

หัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชันแบบเรโซแนนซ์ โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ ผลึกเดี่ยว (คุณลักษณะและคุณสมบัติในการตรวจสอบ)

เชิดพงษ์ จอมเดช¹ และ อาษา ประทีปเสน²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะและทดสอบคุณสมบัติการตรวจจับสัญญาณของอะคูสติกของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชันแบบเรโซแนนซ์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุ อุปกรณ์และเทคโนโลยีที่มีอยู่ภายในประเทศ นอกจากนั้นยังแนะนำวิธีการสอบเทียบหัวตรวจสอบที่ขณะใช้งานตามมาตรฐาน ASTM E976 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวตรวจโดยสอบอาศัยวงจรถ่ายเทียบเคียงเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์ของ Mason และทฤษฎีวงจรถ่าย เพื่อหาคุณลักษณะของหัวตรวจสอบที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลในรูปของคลื่นเสียงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแบบชั่วขณะขึ้นมา จากนั้นได้ทดสอบคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสัญญาณอะคูสติกอิมัลชันทางโดเมนความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสามารถของหัวตรวจสอบที่มีคุณสมบัติในการตรวจสอบที่ดี ซึ่งเป็นผลจากการเข้ากันได้ของความต้านทานทางเสียงของหัวตรวจสอบระหว่างวัสดุ PZT วัสดุรองหลัง และแผ่นกั้นลึ้กที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา โดยหัวตรวจสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนโดยไม่ทำลายโดยวิธีอะคูสติกอิมัลชันและใช้ตรวจสอบการแตกหักของวัสดุบางชนิดในเวลาจริงได้

คำสำคัญ : หัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชัน / วัสดุรองหลัง / แผ่นกั้นลึ้ก / วงจรถ่ายเทียบเคียง / การสอบเทียบ

¹ นักวิจัย หน่วยเทคโนโลยีเฉพาะทางการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

A Resonance Acoustic Emission Sensor using Single Piezoelectric Ceramic (Characteristic and Performances)

Cherdpong Jomdecha¹ and Asa Prateepasen²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This paper presents a characteristic analysis and performance tests of resonance Acoustic Emission sensors (AE sensors). The AE sensors have been designed and constructed by using materials, equipments and technologies in Thailand. In addition, a calibration method for using in real applications according to ASTM E976 is also presented. A Mason's equivalent circuit model of a piezoelectric transducer and a network theory were utilized to analyze the characteristic of mechanical wave propagation into the AE sensor. Consequently, a transient electrical signal is generated. After that, the performances of designed and constructed AE sensors were studied using AE parameters in frequency domain. Experimental results showed good performance of AE sensors for testing owing to the proper acoustic impedance matching among the PZT, a backing material and a wear plate. An outcome of this research can be employed for an education of the acoustic emission and some material breaks monitoring.

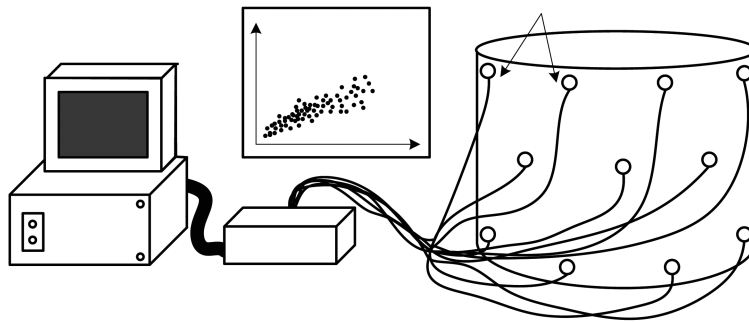
Keywords : Acoustic Emission Sensor / Backing Material / Wear Plate / Equivalent Circuit / Calibration

¹ Researcher, Non-Destructive Testing Technology Center.

² Assistant Professor, Department of Production Engineering.

1. บทนำ

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายสมัยใหม่มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการตรวจสอบแบบเฝ้าระวังความเสียหาย (Health monitoring) ของวัสดุ โครงสร้าง และอุปกรณ์ต่างๆ ที่สนใจจะตรวจสอบมากขึ้น เนื่องจากสามารถตรวจสอบการเกิดความเสียหายในขณะกำลังใช้งาน รวมไปถึงการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและช่วยทำนายการเกิดความเสียหายในอนาคตได้อีกด้วย เพื่อนำไปสู่การป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยในปัจจุบันระบบการตรวจสอบแบบนี้ได้เริ่มนำมาใช้ในต่างประเทศอย่างจริงจังประมาณ 5-10 ปีที่ผ่านมา [1, 2] ซึ่งการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีอะคูสติกอิมิสชัน (Acoustic Emission: AE) [3] เป็นวิธีการตรวจสอบที่ได้ถูกพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจสอบแบบเวลาจริง และเป็นแนวทางหนึ่งที่มีคุณลักษณะของการทำการตรวจสอบเป็นแบบเฝ้าระวัง การตรวจสอบด้วยวิธี AE นั้นสามารถตรวจพบรอยบกพร่องที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัวได้ ทั้งในระดับอนุภาค (Micro Structure) และในระดับมหภาค (Macro Structure) โดยที่รอยบกพร่องจะเป็น ตัวแพร่สัญญาณออกมาในลักษณะคลื่นเสียง โดยระบบการตรวจสอบด้วย AE แสดงในรูปที่ 1



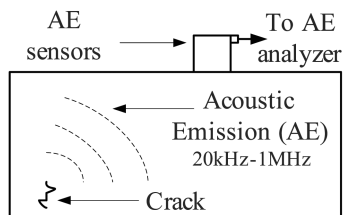
รูปที่ 1 ระบบการตรวจสอบโดยวิธีอะคูสติกอิมิสชัน

จากรูปที่ 1 เห็นได้ว่าการตรวจสอบวิธีการ AE นั้น ต้องใช้อุปกรณ์หลักในการตรวจสอบคือ หัวตรวจสอบ (AE sensor) อุปกรณ์ขยายเบื้องต้น (Pre-amplifier) และอุปกรณ์ประมวลผล (AE-Analyzer) โดยอุปกรณ์ที่สำคัญที่กำหนดความสามารถและประสิทธิภาพของการตรวจสอบคือ หัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชัน ซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมากถ้าวัสดุที่ทำการตรวจสอบนั้นมีขนาดใหญ่ การติดตั้งหัวตรวจสอบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ตรวจสอบซึ่งมีระยะทางระหว่างหัวตรวจสอบประมาณ 1 ฟุต ถึง 20 ฟุต โดยประมาณ [3] เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ปัจจุบันการพัฒนางานวิจัยหัวตรวจสอบอะคูสติกของต่างประเทศมีการพัฒนาเป็นอย่างมาก สามารถพัฒนาให้สามารถประยุกต์ใช้งานเข้ากับงานตรวจสอบแบบต่างๆ ได้หลากหลายดังได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว โดยงานวิจัยการออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันในปัจจุบันมีแนวทางในการทำให้ความไวในการตรวจสอบที่สูงขึ้นและมีช่วงความถี่ในการตรวจสอบที่กว้างขึ้น [4-6] โดยการออกแบบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและวัสดุรองหลังหัวตรวจสอบ การพัฒนาระบบการขยายและส่งผ่านสัญญาณอะคูสติกโดยใช้ Micro Electronic Mechanical system (MEMS) ส่วนงานวิจัยสมัยใหม่ที่ประยุกต์นำเอาอะคูสติกอิมิสชันไปใช้กับงานใหม่ๆ [7-10] เช่น การใช้หัวตรวจสอบอะคูสติกขนาดเล็กไปใช้ตรวจสอบความบกพร่องของการทำงานฮาร์ดดิสก์คอมพิวเตอร์ การตรวจสอบวัสดุที่ทำจากไม้ การใช้หัวตรวจสอบอะคูสติกในงานวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุผสม และการนำเอาหัวตรวจสอบอะคูสติกไปทำเป็นตัวเฝ้าระวังอันตรายของโครงสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น

เนื่องจากหัวตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมัลชันมีราคาสูง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศยังไม่มีหน่วยงานใดภายในประเทศทำการผลิตขึ้นมาใช้เอง ดังนั้นในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมัลชันเพื่อเป็นการริเริ่มในการสร้างระบบตรวจสอบโดยวิธี AE ภายในประเทศ โดยใช้วัสดุ อุปกรณ์ และเทคโนโลยีที่มีอยู่ภายในประเทศ ซึ่งได้รับการสนับสนุนทางด้านของการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เพื่อทำการศึกษานิตของหัวตรวจสอบ คุณลักษณะการทำงานของหัวตรวจสอบ ปัจจัยในการออกแบบหัวตรวจสอบให้ได้คุณสมบัติในการตรวจสอบที่ดี และวิธีการสอบเทียบหัวตรวจสอบ เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างและผลิตหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชันที่มีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบและใช้ประกอบการเรียนการสอนได้จริง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา [15, 19] ได้ออกแบบหาส่วนประกอบของวัสดุรองหลัง (Backing material) กับแผ่นกันสึก (Wear plate) ที่เหมาะสมกับวัสดุ PZT มาประกอบเป็นหัวตรวจสอบแบบเรโซแนนซ์ที่มีคุณสมบัติในการตรวจสอบที่ดี ซึ่งในบทความนี้ได้เสนอการใช้วงจรเทียบเคียงของ Mason (Mason's equivalent circuit model) มาวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวตรวจสอบทั้งทางด้านทางกลและทางไฟฟ้า แล้วทำการทดลองผลของความสามารถในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชัน โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบตามมาตรฐานของ ASTM E-976

2. ทฤษฎีและหลักการ

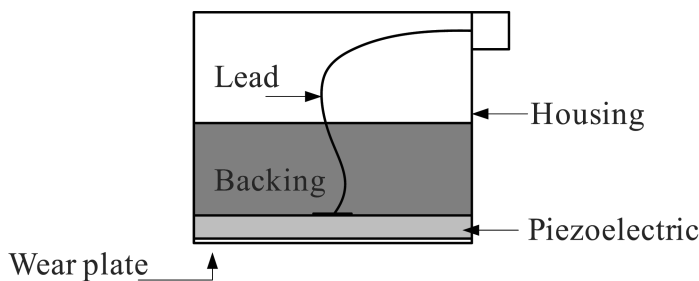
การตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมัลชัน [3] ใช้หลักการตรวจจับพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นยืดหยุ่นแบบชั่วคราว (Transient Elastic Wave) ที่ปลดปล่อยจากรอยบกพร่องของวัสดุ การตรวจจับคลื่นยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยใช้หัวตรวจสอบยึดติดที่ผิวหน้าของวัสดุ หัวตรวจสอบจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของคลื่นเสียงให้เป็นคลื่นไฟฟ้า และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าจะถูกขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น ส่งผ่านไปยังตัวกรองความถี่ (Filter) แล้วส่งผ่านสัญญาณนั้นไปวิเคราะห์เทียบกับรอยบกพร่องต่อไป การวิเคราะห์สัญญาณอาจทำได้ทั้งในโดเมนเวลา (Time domain) และโดเมนความถี่ (Frequency domain) ซึ่งความถี่ที่นำไปวิเคราะห์โดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 kHz จนถึง 1 MHz



รูปที่ 2 หลักการตรวจสอบด้วยอะคูสติกอิมัลชัน

หัวตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมัลชัน [3, 11] หมายถึงหัวตรวจสอบที่ใช้สำหรับตรวจจับคลื่นเสียงบริเวณผิววัสดุ เพื่อรับคลื่นเสียงจากการปลดปล่อยจากภายในวัสดุ และเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยเอาที่พูดของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของหัวตรวจสอบ ซึ่งมีความสำคัญต่อความไว (Sensitivity) ในการตรวจสอบ และการทำซ้ำ (Repeatability) ในการตรวจสอบ หัวตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมัลชันเพียโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance) และแบบช่วงความถี่กว้าง (Broad band) [3] โครงสร้างของหัวตรวจสอบมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 3 คือ

- วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่สามารถให้สนามไฟฟ้าได้ เมื่อให้แรงกระทำทางกลต่อวัสดุนั้น หรือในทางกลับกันถ้าให้สนามไฟฟ้าผ่านวัสดุก็จะทำให้รูปร่างของวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลง
- วัสดุรองหลัง ใช้สำหรับช่วยลดทอนพลังงานเสียงในช่วงความถี่อื่นในการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและช่วยลดซับพลังงานนั้นไว้โดยที่ไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง
- แผ่นป้องกันลึก เป็นวัสดุที่ใช้ป้องกันหน้าสัมผัสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
- ตัวเรือนหัวตรวจสอบ (housing) ใช้ป้องกันการกระทบกระเทือนวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3 หัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชั่น

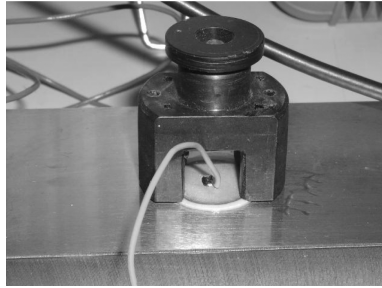
3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุ การออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชั่น

การออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชั่นในงานวิจัยนี้ คำนึงถึงจุดสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบคือ ความสามารถในการวัดค่าซ้ำ ความไวในการตรวจสอบ และช่วงความถี่ที่ใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการทดลองหาวัสดุและส่วนประกอบที่จะนำมาออกแบบและสร้างเป็น หัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชั่นที่มีคุณสมบัติในการตรวจสอบที่ดี โดยการศึกษาและทดลองถึงการหาวัสดุและส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการทำวัสดุรองหลังและแผ่นกันลึกเพื่อนำมาประกอบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) วิธีการประกอบหัวตรวจสอบที่ทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณการตรวจสอบน้อยที่สุด การวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวตรวจสอบโดยใช้วงจรเทียบเคียง และทดลองหาคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM E976 โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมิสชั่น (AE parameters) [3]

เพียโซอิเล็กทริก

ในงานวิจัยนี้ได้รับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตติตานเนต $Pb(Zr,Ti)O_3$ หรือ PZT ที่พัฒนาจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เพื่อมาทำเป็นหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชั่น ซึ่งวัสดุ PZT นี้ มีโครงสร้างผลึกคล้ายสารเลดติตานเนต ($PbTiO_3$) และสารแบเรียมติตานเนต ($BaTiO_3$) โดยมีโครงสร้างแบบ Cubic perovskite [12] โดยลักษณะของ PZT ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Soft piezoelectric ซึ่งมีค่าของ permittivity ที่สูง ในขณะที่มีค่าของสนามไฟฟ้า coercive field ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีความสามารถของควมไวในการตรวจสอบที่ดี (High sensitivity) [13] โดยลักษณะและคุณสมบัติของ PZT ที่ได้รับความเอื้อเพื่อมาแสดงไว้ในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 4 วัสดุ PZT แบบ soft ceramic ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ PZT ที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบอะคูสติก

Specimen No.	1	2	3
Resonance frequency (kHz)	100.80	102.047	102.047
Thickness (mm)	1.1	1.1	1.1
Diameter (mm)	23	23	23
Capacitance (nF)	5.5	5.5	5.3
Charge constant d33 (pC/N)	223	235	251
Dielectric constant	1210	1180	1060
Density (g/cm ³)	7.8	7.8	7.8

วัสดุรองหลัง

วัสดุรองหลังถูกใช้ในการหน่วงสัญญาณที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกโดยการเพิ่มมวล (Mass) และความต้านทานทางกล (Mechanical resistance) ของหัวตรวจสอบ ซึ่งในการหน่วงสัญญาณการตรวจสอบนี้จะกระทำเพื่อต้องการลดพลังงานหรือกำจัดสัญญาณในช่วงความถี่อื่นที่ไม่ต้องการให้หมดไป โดยการดูดซับ (Absorbance) พลังงานของสัญญาณโดยที่ไม่ทำให้คลื่นเสียงนั้นสะท้อนกลับเข้าไปวัสดุ PZT อีกครั้ง ดังนั้นการออกแบบวัสดุรองหลังที่ดีควรจะต้องเลือกวัสดุที่มีค่าความต้านทานเสียงเข้ากันได้กับวัสดุ PZT และต้องสามารถลดทอนพลังงานคลื่นเสียงได้ดีโดยไม่ทำให้พลังงานของสัญญาณในช่วงของความถี่ที่ต้องการนั้นต่ำหรือหายไป โดยในงานวิจัยได้ศึกษาการออกแบบวัสดุรองหลังที่มีผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา [14, 15] โดยพบว่าวัสดุที่ใช้ได้ดีคือ อีพอกซีกับฟองสังกะสี เพื่อให้มีความต้านทานทางเสียงของวัสดุรองหลังใกล้เคียงกับวัสดุ PZT จากการทำให้ความหนาแน่นของวัสดุรองหลังใกล้เคียงกันกับวัสดุ PZT เนื่องจากความต้านทานทางเสียงนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุนั้น ดังสมการที่ (1)

$$Z = \rho \times v \quad (1)$$

เมื่อ Z คือ ความต้านทานทางเสียง ρ คือ ความหนาแน่น และ v คือ ความเร็วเสียงในวัสดุ ดังนั้นผลที่ตามมาก็คือ การที่ความถี่เรโซแนนซ์ของหัวตรวจสอบจะเปลี่ยนไป ซึ่งความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้ควรออกแบบให้ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุ PZT เพื่อช่วยในเรื่องของความไวในการตรวจสอบที่ดี จากผลการทดลองเบื้องต้นจึงได้ออกแบบการวัดร่องหลังไว้ 3 แบบเพื่อหวังสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับและปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัวตรวจสอบ ซึ่งได้ปรับเปลี่ยนส่วนประกอบและคุณลักษณะของวัสดุร่องหลังดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุร่องหลังทั้ง 3 รูปแบบ

วัสดุร่องหลัง หมายเลข	ขนาด $\varnothing \times h$ (มม.)	ผงโลหะ (ก.)	อีพอกซี (ก.)	แรงกด (lb/in ²)	อุณหภูมิ (°ซ.)	ความหนาแน่น (ก./ซม. ³)
1	28 x 15	69	6	2000	30	5.1
2	28 x 15	64	6	2000	30	4.3
3	28 x 15	69	6	2000	150	6.2

เมื่อทำการขึ้นรูปวัสดุร่องหลังทั้ง 3 รูปแบบที่มีขนาดเท่ากันตามตารางที่ 2 เห็นได้ว่านอกจากการเปลี่ยนน้ำหนักของผงโลหะ ในส่วนผสมของวัสดุร่องหลังแล้ว การให้ความร้อนกับวัสดุร่องหลัง ขณะอยู่ในแบบที่มีแรงกดสามารถที่จะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุร่องหลังเปลี่ยนไปได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นแนวทางในการสร้างและขึ้นรูปวัสดุร่องหลังให้สามารถควบคุมความหนาแน่น เพื่อนำไปทำการหาความต้านทานเสียงโดยการทดลองวัดความเร็วเสียงของวัสดุร่องหลังโดยวิธีการอัลตราโซนิคส์แบบ Through transmission [15] ซึ่งพบว่าวัสดุหมายเลข 3 มีความใกล้เคียงกับวัสดุ PZT มากที่สุด โดยวัสดุร่องหลังที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นแสดงดังรูปที่ 5

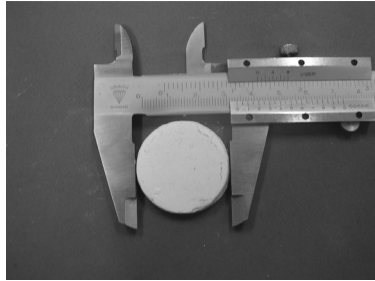


รูปที่ 5 วัสดุร่องหลังสำหรับหวังสัญญาณอะคูสติอิมิตชัน

แผ่นกันสีก

แผ่นกันสีกสำหรับหัวตรวจสอบอะคูสติอิมิตชันมีหน้าที่หลักคือ ป้องกันการสีกหรืออันตรายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ PZT เนื่องจากในงานตรวจสอบโดยไม่ทำลายหลายครั้งนั้นหัวตรวจสอบถูกนำไปติดตั้งกับวัสดุที่อาจก่อให้เกิดอันตรายกับตัวตรวจสอบได้ และหัวตรวจสอบนั้นต้องใช้งานหลายๆ ครั้ง จึงทำให้หัวตรวจสอบสีกหรือได้นอกจากนั้นแผ่นกันสีกเองควรที่จะมีความต้านทานทางเสียงที่ใกล้เคียงกันกับวัสดุ PZT อีกด้วย เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานคลื่นเสียงจากวัสดุที่ตรวจสอบไปยังหัวตรวจสอบได้ดี ซึ่งถ้าให้ดีที่สุดควรมีความหนาที่ $\lambda / 4$ ของความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อ λ คือความยาวคลื่นเสียง เพื่อการส่งผ่านที่สูงสุดของแอมพลิจูดของคลื่นเสียง และคุณสมบัติ

อีกประการของแผ่นกันสีกคือ ไม่ควรมีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากจะทำให้การตรวจสอบคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและผลิตแผ่นกันสีกจากวัสดุดินซูเปอร์พอร์ตเลน [15] ซึ่งเป็นสารแอ็ดวานซ์ เซรามิกที่ทำจากดินซูเปอร์พอร์ตเลนที่มีคุณสมบัติยอมให้กระแสผ่านได้น้อย (Dielectric Material) ดังรูปที่ 6 ซึ่งได้ทำการทดลองหาความเข้ากันได้ของคลื่นเสียงกับ PZT วิธีการเดียวกันกับการทดลองหาความต้านทานเสียงของวัสดุรองหลัง จากนั้นได้ทำให้บางโดยวิธีการขัดจนได้ความหนาประมาณ 1 มม. เพื่อไม่ให้ลดทอนสัญญาณที่รับมากจนเกินไป

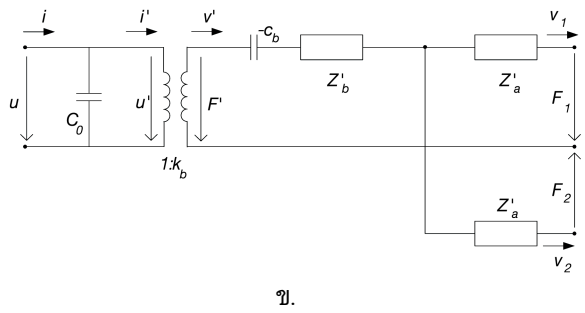
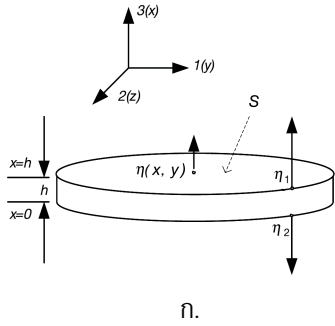


รูปที่ 6 แผ่นกันสีกที่ทำจากซูเปอร์พอร์ตเลน

3.2 วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชัน

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทรานสดิวเซอร์ที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์สมการของคลื่น (Wave equation) [16] เพื่อหาความสามารถในการส่งผ่าน การสะท้อน การลดทอนพลังงาน และการดูดซับพลังงานของคลื่นเสียง ซึ่งทำให้สามารถหาคุณลักษณะของทรานสดิวเซอร์ได้ แต่วิธีการนี้มีความลำบากและยุ่งยากในวิธีการหาสมการและวิเคราะห์สมการเหล่านั้น เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่แล้วจะไม่เป็นแบบ homogenous ดังนั้นจึงมีวิธีการวิเคราะห์ทรานสดิวเซอร์เหล่านี้โดยใช้วิธีวงจรเทียบเคียงการส่งผ่านพลังงานระหว่างทางด้านไฟฟ้าและทางกล วิธีการนี้ใช้หลักการของทฤษฎีวงจรข่าย (Network theory) มาช่วยในการวิเคราะห์สมการของคลื่นเสียง ซึ่งจะมีความสามารถมากกว่าเนื่องจากสามารถจำลองวัสดุต่างๆ ที่นำมาประกอบเป็นทรานสดิวเซอร์ให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรทางกลและทางไฟฟ้าได้ โดยที่ต้องมีการกำหนดขอบเขตของการวิเคราะห์ (Boundary condition) ให้เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการออกแบบหัวตรวจสอบ ทำให้การวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องสูงกว่าการวิเคราะห์สมการของคลื่นเสียงเอง ผู้คิดค้นการวิเคราะห์ทรานสดิวเซอร์ที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นคือ W. P. Mason โดยออกเผยแพร่เมื่อปี 1942 [16]

บทความนี้ได้้นำเอาวิธีการวิเคราะห์วงจรเทียบเคียงของ Mason model มาใช้ในการวิเคราะห์หัว ตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันแบบเรโซแนนซ์โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์ (PZT) ผลึกเดี่ยว โดยนำมาวิเคราะห์ถึงวัสดุ PZT ที่มีการเคลื่อนที่ทางด้านของความหนา (Thickness mode expander) [16-18] ซึ่งทิศทางของสนามไฟฟ้าขนานกับความหนาของวัสดุ PZT และกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางอื่น ดังนั้นที่พื้นผิวทั้งสองด้านของวัสดุ PZT จะเป็นพอร์ตด้านทางกล ส่วนพอร์ตทางด้านไฟฟ้าจะมีหนึ่งพอร์ตคือระหว่างขั้วบวกและลบของวัสดุ PZT โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่ของ PZT แสดงดังรูปที่ 7ก.



รูปที่ 7 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีการเคลื่อนที่ด้านความหนา

วัสดุ PZT ที่ใช้มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีพื้นที่หน้าตัดคือ S และมีความหนาคือ h และทิศทางการเคลื่อนที่คือ η_1 และ η_2 โดยที่ทั้งสองฝั่งของวัสดุ PZT มีการเคลื่อนที่วนนำไฟฟ้าเพื่อเป็นอิเล็กโทรดสำหรับการต่อไปใช้งานเพื่อวัดสัญญาณทางไฟฟ้า เมื่อ v คือแรงดันไฟฟ้าและ i คือกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ความเค้นและการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (ทิศทาง $3(x)$) ในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกดังนี้

$$D_3 = \epsilon_3 E_3 + e \sigma_3 \tag{2}$$

$$T_3 = -\frac{e}{\epsilon_3} D_3 + \psi_3^D \sigma_3 \tag{3}$$

เมื่อ D_3 คือ การเคลื่อนที่ (Displacement) T_3 คือ ความเค้น (Stress) E_3 คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) และ σ_3 คือ ความเครียด (Strain) ในทิศทาง $3(x)$ ส่วน $e = \frac{\partial D_3}{\partial \sigma_3}$ และ ψ_3^D คือค่า Young's modulus of elasticity ของ D_3 ซึ่ง $\psi_3^D = \psi_3 (1 + \chi^2)$ โดยที่ $\chi = \frac{e}{\sqrt{\epsilon_3 \psi_3}}$ โดยที่ความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ใน PZT คือ $c'_0 = \sqrt{\frac{\psi_3^D}{\rho}}$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นในวัสดุ โดยจากรูปที่ 7ก. ใช้ขอบเขตในการวิเคราะห์คุณลักษณะเอาต์พุตด้านทางไฟฟ้าของ PZT ตามทิศทางของการเคลื่อนที่โดยกำหนดให้ $\eta = -\eta_2$ ที่ $x = 0$ และ $\eta = \eta_1$ ที่ $x = h$ ดังนั้น

$$\eta(x, t) = \frac{\sin k' x}{\sin k' h} \eta_1 - \left(\cos k' x - \frac{\sin k' x}{\tan k' h} \right) \eta_2 \quad \text{เมื่อ } k' = \frac{\omega}{c'_0} \tag{4}$$

สัญญาณเอาต์พุตแบบฮาร์มอนิกสามารถหาได้จาก

$$i = j\omega C_0 u + k_b (v_1 + v_2) \tag{5}$$

โดยที่ค่าตัวเก็บประจุ (C_0) ของ PZT และตัวแปรการแปลงผันพลังงาน (k_b) คือ

$$C_0 = \frac{\epsilon_3 S}{h} \quad \text{และ} \quad k_b = e \frac{S}{h} \tag{6}$$

เมื่อ v_1 และ v_2 คือ ความเร็วของคลื่นเสียงที่บริเวณผิวของ PZT

ส่วนคุณลักษณะด้านทางกลสามารถหาได้จาก

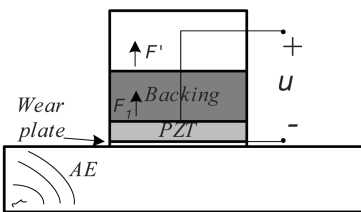
$$F_1 = k_b u - \left(Z'_b - \frac{1}{j\omega c_b} \right) (v_1 + v_2) - Z'_a v_1 \tag{7}$$

$$F_2 = k_b u - \left(Z'_b - \frac{1}{j\omega c_b} \right) (v_1 + v_2) - Z'_a v_2 \tag{8}$$

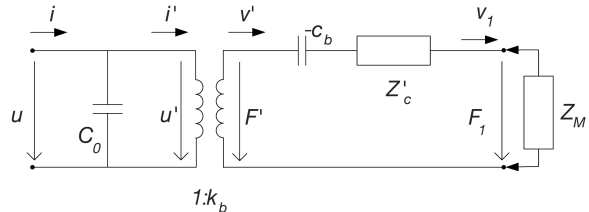
เมื่อ $Z'_a = jc'_0 \rho S \tan \frac{k'h}{2}$, $Z'_b = c'_0 \rho S \frac{1}{j \sin k'h}$ และ $c_b = \frac{\epsilon_3 h}{e^2 S}$

ซึ่งวงจรเทียบเคียงของ PZT ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ด้านความหนาโดยทั่วไปสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (5) (7) และ (8) ดังรูปที่ 7ข. เมื่อ c_b เป็นแรงยึดหยุ่นด้านลบ

เมื่อนำ PZT ไปใช้งานเป็นหัวตรวจสอบอะคูสติกนั้นต้องทำการประกอบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น วัสดุรองหลังและแผ่นกันสึกและนำไปติดกับวัสดุที่ต้องตรวจสอบโดยใช้สารช่วยสัมผัสที่มีความหนืดต่ำ (couplant) ดังรูปที่ 8ก. ดังนั้นพอร์ตด้านทางกล F_2 จะถูกยึดติดกับวัสดุที่ต้องตรวจสอบ โดยที่ภาระที่ต่ออยู่ที่พอร์ตจะถูกเปรียบเทียบกับมีค่า $Z_2 = \infty$ ดังนั้นพอร์ตทางด้าน F_2 จะถูกเปิดออก ดังนั้นวงจรเทียบเคียงในรูปที่ 7ข. จึงถูกเปลี่ยนเป็นดังรูป 8ข.



ก.



ข.

รูปที่ 8 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิตชัน

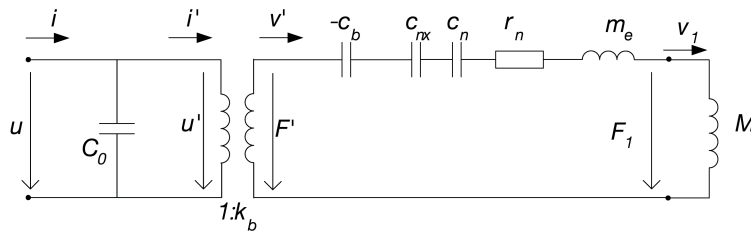
จากรูปที่ 8ข. ค่าอิมพีแดนซ์ ของวงจรเทียบเคียงสามารถรวมได้เป็น

$$Z'_c = Z'_a + Z'_b = c'_0 \rho S \frac{1}{j \tan k'h} \tag{9}$$

เมื่อ Z_M เป็นอิมพีแดนซ์ของวัสดุรองหลังซึ่งยังไม่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ส่วนประกอบด้านทางกลในส่วน
ของมวลเทียบเคียง (m_e) และความยืดหยุ่นเทียบเคียง (c'_n) ดังนี้

$$m_e = \frac{\rho Sh}{2} \cdot c_n = \frac{8h}{\pi^2 (2n-1)^2 \psi_3 S} \quad \text{และ} \quad c_{nx} = \frac{c_n}{\chi^2} \tag{10}$$

เมื่อ c_n เป็นค่าความยืดหยุ่นของหัวตรวจสอบในส่วนที่ไม่เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ส่วนค่า c_{nx} เป็นค่า
ความยืดหยุ่นที่แปรผันตามคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยที่ m_e และ c'_n ที่ต่อกันแบบอนุกรมเรโซแนนซ์
โดยการแทนที่ค่าของอิมพีแดนซ์ Z'_c และจาก Z_M สามารถทำให้อยู่ในรูปของมวลทางกล M ได้ตามสมการ
ที่ (10) ซึ่งค่าของ $M \gg m_e$ ดังนั้นสามารถให้มวลของวงจรทางกลเท่ากับ M ได้ โดยที่สามารถแทนค่าการ
สูญเสียของระบบทางด้านทางกลโดยใส่ค่าความต้านทานทางกล $r_n = \frac{\phi}{c_n}$ ลงในวงจรเทียบเคียง เมื่อ ϕ คือ
ค่าคงที่ความต้านทานของระบบที่ S และ h เท่ากับ 1 สามารถเขียนวงจรเทียบเคียงหัวตรวจสอบอะคูสติกขณะ
การใช้งานได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรเทียบเคียงด้านทางกลและทางไฟฟ้าของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชันที่สร้างขึ้นมา

จากรูปที่ 9 จะได้ว่า

$$\frac{Z_m}{Z_e} = \frac{F' i'}{u' v'} \quad \text{หรือ} \quad Z_m = k_b^2 Z_e \tag{11}$$

ทำให้สามารถหาค่าเทียบเคียงของส่วนประกอบทางกลและทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$R = \frac{r}{k_b^2} \quad , \quad L = \frac{m}{k_b^2} \quad \text{และ} \quad C = k_b^2 c \tag{12}$$

โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ของหัวตรวจสอบจะเท่ากับ

$$\omega_n = \frac{\pi(2n-1)}{2h} \tag{13}$$

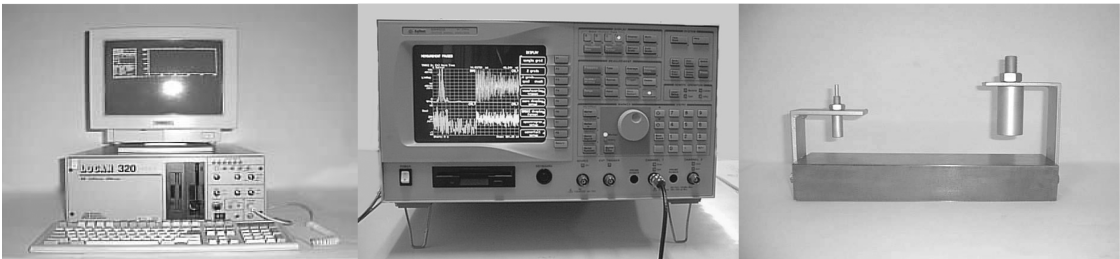
ซึ่งเมื่อแทนค่า $\omega_n = 2\pi f$ ลงในสมการที่ (23) จะได้

$$h = (2n - 1) \frac{\lambda_n}{4} \quad (14)$$

จากสมการที่ (14) เห็นได้ว่า หัวตรวจสอบอะคูสติกจะตรวจจับสัญญาณได้แอมพลิจูดสูงสุดนั้นเมื่อความหนาของ PZT เท่ากับจำนวนเท่าที่เป็นเลขคี่ของ $\lambda / 4$

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การหาคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิตชันที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา [15, 19] นั้นได้กระทำตามมาตรฐานของ ASTM E976-94 [20] ซึ่งการสอบเทียบนั้นต้องทำการป้อนแหล่งกำเนิดเสียงเทียมขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาค่าความไวในการตอบสนองของหัวตรวจสอบ โดยในมาตรฐานกำหนดไว้อยู่ 3 วิธีคือ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจากอัลตราโซนิคส์ทรานสดิวเซอร์ การใช้ Gas jet และการหักไล่ดินสออย่างระมัดระวัง ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอในส่วนของ การหักไล่ดินสอเนื่องจากใช้อุปกรณ์น้อย ให้ผลการสอบเทียบที่มีการทำซ้ำที่ดี และสามารถทำการสอบเทียบในงานสนามได้ โดยได้ทำการสร้างอุปกรณ์สอบเทียบและใช้วิธีการทดลองตามมาตรฐานดังกล่าว คือ แท่งสอบเทียบมาตรฐานสำหรับสอบเทียบหัวตรวจสอบอะคูสติกในการตรวจจับคลื่นเสียงที่ผิว โดยส่วนใหญ่แล้วหัวตรวจสอบจะถูกใช้งานในการตรวจสอบคลื่นที่ผิว การหาคุณสมบัติในการตรวจสอบนั้นใช้การหักไล่ดินสอ 2H ขนาด 0.5 มม. ห่างจากหัวตรวจสอบเท่ากับ 80 มม. จำนวนการหักไล่ดินสอกำเนิดเสียงเทียม 30 ครั้ง โดยมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดังรูปที่ 10



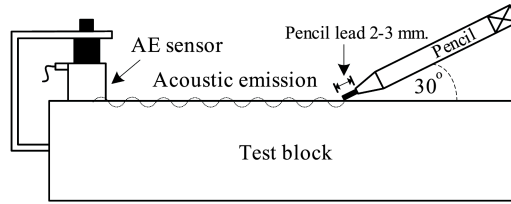
ก.

ข.

ค.

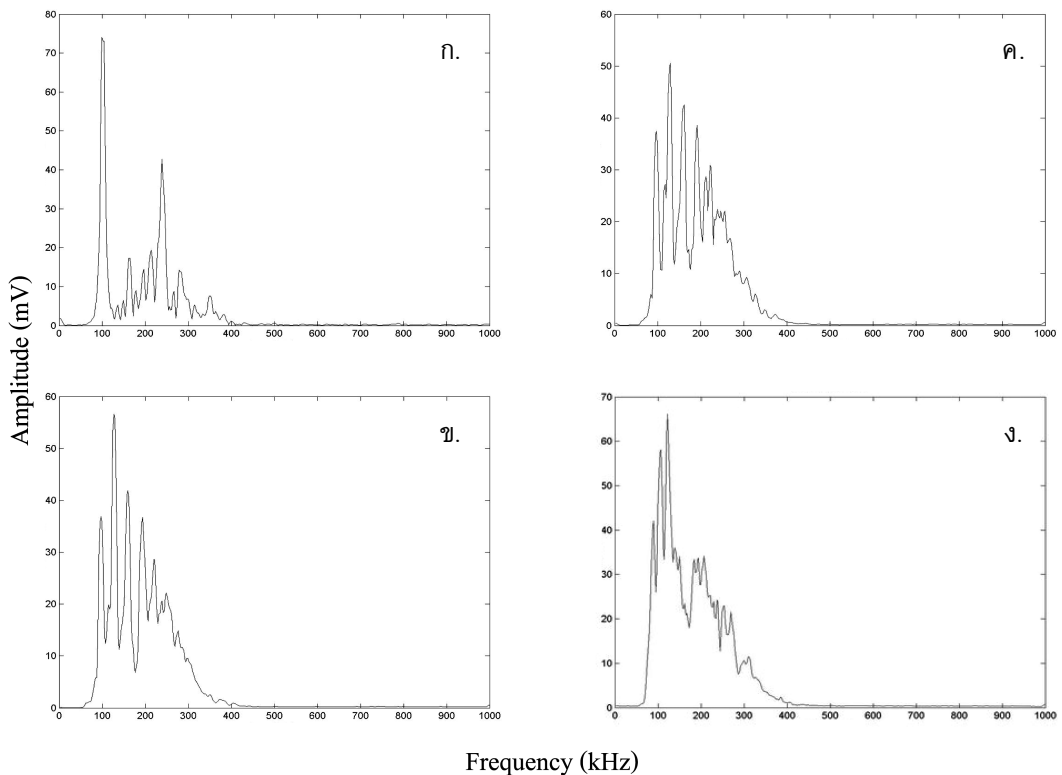
รูปที่ 10 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาคุณสมบัติในการตรวจสอบ

จากรูปที่ 10ก. คือ อุปกรณ์วิเคราะห์พารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมิตชัน LOCAN 320, รูปที่ 10ข. คือ เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ Spectrum analyzer HP 89410 และรูปที่ 10ค. คือ แท่งสอบเทียบหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิตชันแบบคลื่นที่ผิว ตามลำดับ โดยวิธีการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 วิธีการทดลองหาคุนสมบัติการตรวจสอบของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมัลชัน

โดยครั้งแรกเป็นการทดลองวัดสัญญาณจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ไม่มีการใส่วัสดุรองหลังและแผ่นกันสีก จากนั้นได้ทำการทดลองวัดสัญญาณจากหัวตรวจสอบที่ใส่วัสดุรองหลังทั้ง 3 แบบเพื่อดูความไวในการตรวจสอบ และช่วงการตอบสนองทางความถี่ที่ดีที่สุดของหัวตรวจสอบทั้ง 3 แบบ ผลการทดลองดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 เอ้าท์พุททางโดเมนความถี่ของหัวตรวจสอบที่ออกแบบและสร้างขึ้น

โดยที่รูป 12ก. คือสัญญาณเอ้าท์พุทของวัสดุ PZT ขณะที่ยังไม่ได้ประกอบกับวัสดุรองหลังและแผ่นกันสีก เป็นหัวตรวจสอบอะคูสติก ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงสุด 75 mV อยู่ที่ความถี่ประมาณ 100 kHz ตามคุณสมบัติในตารางที่ 1 ส่วนในรูป 12ข. 12ค. และ 12ง. เป็นสัญญาณเอ้าท์พุทของหัวตรวจสอบอะคูสติกที่ประกอบกับวัสดุรองหลังหมายเลข 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงการตอบสนองความถี่ของหัวตรวจสอบทั้ง 3 โดยมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัวตรวจสอบอยู่ที่ประมาณ 125 kHz ซึ่งเป็นผลมาจากการใส่วัสดุรองหลังให้กับ

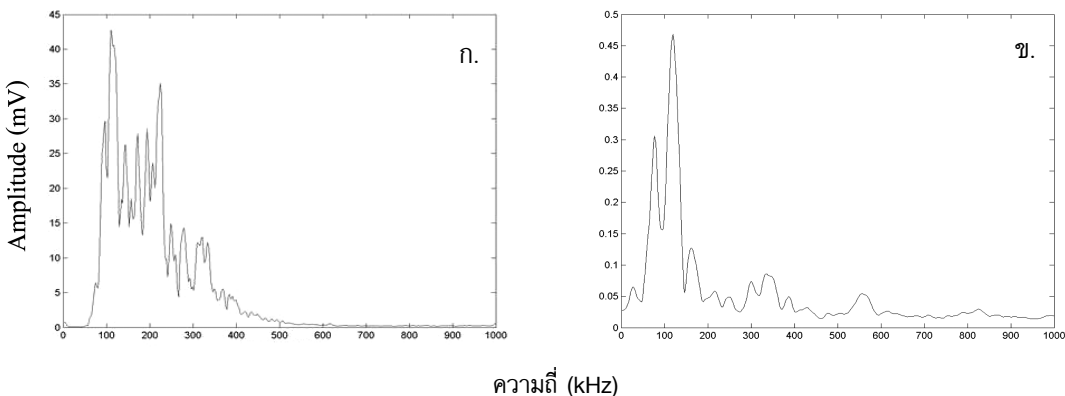
หัวตรวจสอบทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปจาก 100 kHz ไปเป็น 125 kHz โดยที่หัวตรวจสอบหมายเลข 3 มีค่าความไวในการตรวจสอบมากที่สุด (Amplitude) และสัญญาณในทางโดเมนความถี่มีพลังงานมากที่สุด (AErms) ซึ่งเป็นผลมาจากการวัดตรงหลังถูกเพิ่มผงทั้งสแตนเพื่อเพิ่มความต้านทานทางเสียงและใช้ความร้อนกับแรงกดในการขึ้นรูปของวัสดุตรงหลังทำให้คลื่นเสียงความถี่ที่ไม่ต้องการถูกดูดกลืนได้ดีกว่า 2 ชนิดแรกสามารถสังเกตได้จากการที่แอมพลิจูดของสัญญาณเอาร์ทพุตในช่วง 200-300 kHz ถูกทำให้ลดลงอย่างมากจนเห็นแค่แอมพลิจูดของสัญญาณที่ต้องการช่วง 100-150 kHz เท่านั้น โดยผลการวิเคราะห์หัวแปรแอมพลิจูดและ AErms ของสัญญาณและค่าความคลาดเคลื่อนเป็นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 AE parameters สัญญาณเอาร์ทพุตของหัวตรวจสอบคูลดิกอิมิสซ์ันที่สร้างขึ้น

AE sensor No.	Mean of amplitude (V)	STD* of amplitude (V)	Mean of AErms (V)	STD of AErms (V)
1	0.057	0.009	0.213	0.028
2	0.050	0.007	0.198	0.022
3	0.067	0.012	0.289	0.039

*STD คือ Standard deviation

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 หัวตรวจสอบหมายเลข 3 มีความไวในการตรวจสอบสูงสุดและมีพลังงานทางด้าน AErms สูงสุดเช่นเดียวกัน ส่วนการกระจายตัวของแอมพลิจูดและ AErms ในการทดลองของหัวตรวจสอบทั้ง 3 แบบนั้นใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของแอมพลิจูด 15.8%, 14.0% และ 17.9% ตามลำดับ ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของพลังงาน AErms มีค่า 13.1%, 11.1% และ 13.5% ตามลำดับ จากผลที่ได้จึงเลือกหัวตรวจสอบหมายเลข 3 ที่มีความไวในการตรวจสอบทางด้านโดเมนความถี่ที่ดีที่สุดมาประกอบกับแผ่นกันสีกที่ทำจากดินซูปเปอร์พอร์ิตเลน เพื่อป้องกันอันตรายกับวัสดุ PZT จากนั้นได้ทำการทดสอบคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบทางด้านโดเมนความถี่เพื่อดูถึงการเข้ากันได้ของความต้านทานทางเสียงระหว่างวัสดุ PZT และแผ่นกันสีก ผลของสัญญาณเอาร์ทพุตแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เอาร์ทพุตทางโดเมนความถี่ของหัวตรวจสอบหมายเลข 3 เมื่อประกอบกับแผ่นกันสีกเทียบกับหัวตรวจสอบมาตรฐาน R15

สัญญาณเอาท์พุทในรูปที่ 13ก. พบว่าการตอบสนองทางความถี่สูงสุดอยู่ที่ 110 kHz และมีระดับของแอมพลิจูดทางด้านโดเมนความถี่มีค่าลดลงเหลืออยู่ที่ 43 mV และมีผลต่อช่วงการตอบสนองความถี่อีกด้วย โดยมีแบนด์วิดธ์ของช่วงการตอบสนองความถี่อยู่ที่ 100-500 kHz ซึ่งมากกว่าเดิม 100 kHz ดังนั้นจากผลการทดลองแผ่นรองหน้าที่ใช้ในการประกอบกับหัวตรวจสอบนั้นสามารถเข้ากันได้กับหัวตรวจสอบโดยทำให้การลดทอนสัญญาณแอมพลิจูดทางด้านความถี่ลดลงไม่มาก แต่มีผลทางด้านการเลื่อนตัวในการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งเป็นผลทำให้เพิ่มการตอบสนองทางความถี่สูงขึ้นมา เห็นได้จากการที่แอมพลิจูดของสัญญาณช่วง 200-300 kHz กลับสูงขึ้นมาเล็กน้อยด้วย และเมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของหัวตรวจสอบมาตรฐาน R15 ในรูปที่ 13ข. พบว่ามีความไวในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบที่สร้างขึ้นนั้นมีความไวน้อยกว่ามาก ($R15 = 475 \text{ mV}$) โดยอาจเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากความไวในการตรวจสอบของวัสดุ PZT เองที่มีค่าต่ำอยู่แล้ว (75 mV)

6. สรุป

จากการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันแบบเรโซแนนซ์ที่สร้างขึ้นมาโดยวิธีการวิเคราะห์ห้วงจรเทียบเคียง และทำการทดสอบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกอิมิสชันจากแหล่งกำเนิดเสียงเทียม ทำให้สามารถเข้าใจถึงหลักการออกแบบหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันได้เป็นอย่างดี เป็นประโยชน์ในการออกแบบและสร้างหัวตรวจสอบให้มีคุณสมบัติในการตรวจสอบที่ดีขึ้นกว่าเดิมได้ในอนาคต โดยผลการทดลองแม้ว่าคุณสมบัติในการตรวจสอบของหัวตรวจสอบที่สร้างขึ้นมานี้ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับหัวตรวจสอบมาตรฐานที่มีการจำหน่ายอยู่ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ PZT ที่นำมาสร้างนั้นมีความไวในการตรวจสอบที่ต่ำแต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลจากการประกอบส่วนประกอบของวัสดุรองหลังและแผ่นกันสีกนั้นสามารถที่จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ได้ดี โดยมีการดูดซับสัญญาณจากความถี่อื่นที่ไม่ต้องการได้และการลดทอนสัญญาณในช่วงความถี่ที่ใกล้กับเรโซแนนซ์ของวัสดุ PZT มีไม่มากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้ากันได้ของความต้านทานทางเสียงของหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันที่ออกแบบและสร้างขึ้นมา ซึ่งหัวตรวจสอบที่สร้างขึ้นมานี้เป็นความสำเร็จเบื้องต้นที่สามารถนำไปพัฒนาต่อ เพื่อการใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบการแตกหักของวัสดุ และนำมาใช้ในการเรียนการสอนได้ โดยที่ต้องมีการขยายสัญญาณการตรวจสอบที่สูงขึ้นจากเดิม นอกจากนี้ในบทความยังนำเสนอถึงวิธีการสอบเทียบหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิสชันที่มีความถูกต้องและการทำซ้ำที่ดี จากการใช้แหล่งกำเนิดเสียงเทียมคือ การหักไล่ดินสอ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำออกไปสอบเทียบในงานสนาม

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย และได้เอื้อเพื่อวัสดุเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ และคุณเฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร สำหรับผลการทดลองและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

1. Park, J.Y., Cho, H.D., and Nan, S.H., 2003, "Detection of Crack Source Location on RC Structures Strengthened with CFRP Plate for Health Monitoring System", 11th APCNDT, 3-7 November.

2. Kwun, H.K., Kim, S.Y., and Light, G.M., 2003, "Health Monitoring of Large Structures using The Magnetostrictive Sensor Guided Wave Technology", *11th APCNDT*, 3-7 November.
3. Miller, R. and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*, Vol. 5, 2nd Edition, pp. 57-59, 112-133.
4. Hamstad, M.A. and Fortunko, C.M., 1995, "Development of Wide Band High Fidelity Acoustic Emission Sensor", *California SPIE Proceedings*, Vol. 2456.
5. Nakamachi, T. and Nara, N., 2002, "High Sensitivity and Midium Resolution 1-3 Type Composite Transducer", *Technical Information of Imagine Supersonic Laboratory*.
6. Polla, D.L. and Robins, W.P., 2000, "Piezoelectric Device and MEMs", *International Symposium on Ferroelectric, Aachen, Germany*, March 12-15.
7. Hard Disk Interference Testing, PACNDT Inc., http://www.pacndt.com/index.aspx?go=products&focus=/Sensors/applications/hard__disk.
8. Kawamoto, S. and William, S., 2004, *Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites*, United State Department of Agriculture.
9. Hamstad, M.A., 2000, "Thirty Years of Advances and Some Remaining Challenges in the Application of Acoustic Emission to Composite Materials, Acoustic Emission Beyond the Millennium", *Edited by T. Kishi, M. Ohtsu and S. Yuyama*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 77-91.
10. Joh, C., Varadan, V., and Varadan, K., 2003, "Topology Optimization for Microstructure of 2-2 Type Piezocomposite Transducer using Finite Element Analysis", *11th APCNDT*, 3-7 November.
11. McIntire, P., 1991, *Nondestructive Testing Handbook Second Edition Volume Seven, Ultrasonics Testing*, American Society for Nondestructive Testing, USA.
12. Uchino, K., 2000, *Ferroelectric Devices*, Marcel Dekker Inc., Bassel, Switzerland.
13. *Piezoelectric Ceramics Properties & Applications*, Morganceramics Inc., 2004.
14. Asher, R.C., 1997, *Ultrasonic Sensor for Chemical and Process Plant, Sensors Series*, ed. by B.E. Jones.
15. เสริมสุข บัวเจริญ, 2546, *การออกแบบและพัฒนาหัวตรวจสอบอะคูสติกอีมีชัน*, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
16. Mason, W.P., 1948, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, Van Nostrand.
17. Berlincourt, D.A., Curran, D.R., and Jaffe, H., 1964, "Chapter 3 Piezoelectric and Piezomagnetic Material and their Function in Transducers", *Physical Acoustics Principles and Methods*, Volume 1-Part A, ed. W.P. Mason, Academic Press, New York, pp. 169-270.
18. Merhaut, J., 1981, *Theory of Electroacoustics*, McGraw-Hill Inc.
19. Jomdecha C. and Prateepasen, A., 2004, "Double Active Elements PZT for Acoustic Emission Sensor", *MSAT 3, 10-11 August*, pp. 49-51.
20. ASTM E976-94, 1994, "Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response", *ASTM Standard*, V. 3.03, pp. 380-385.