การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบ

โดย

นางสาวภรนฤมล ทัฬหะกุลธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบ

โดย
นางสาวภรนฤมล ทัพหะกุลธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก 2
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE FIBER OPTIC BASE FABRY-PEROT INTERFEROMETER FOR CRISPNESS MEASUREMENT

By

Miss Pronnaruimon TALHAKULTORN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Engineering ENERGY ENGINEERING

Department of MECHANICAL ENGINEERING

Academic Year 2025

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ สำหรับวัดความกรอบ
โดย	นางสาวภรนฤมล ทัฬหะกุลธร
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แผน ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

---------- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจีรจำเนียร)

พิจารณาเห็นชอบโดย

---------- ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีระศักดิ์ หุดากร)

---------- อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ)

---------- ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประธาน บุรณศิริ)

640920038 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก 2
คำสำคัญ : หัววัดเสียงความกรอบ, ระดับความดันเสียงความกรอบ, ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี - เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์, ขนมขบเคี้ยว

นางสาว ภรนฤมล ทัฬหะกุลธร: การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (FFPI) สำหรับการวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยว อาศัยทฤษฎีการโก่งตัวของวัสดุของคิร์ชฮอฟฟ์-เลิฟ (Kirchhoff-Love's Plate Theory) ร่วมกับเทคนิคการนับริ้วแทรกสอด (Fringe Counting Technique) เพื่อแปลงเป็นค่าการกระจัด (Displacement) และคำนวณกลับเป็นค่าระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level: SPL) ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้มีการออกแบบหัววัดเพื่อให้ได้หัววัดที่เหมาะสมกับการวัดความกรอบจึงมีการทดสอบวัสดุยืดหยุ่นและทดสอบวัสดุสะท้อนแสงซึ่งเป็นองค์ประกอบของหัววัดความกรอบ จากการทดสอบวัสดุทำให้เลือกใช้กระจกเคลือบอะลูมิเนียมเป็นวัสดุสะท้อนแสง และแผ่นยางลาเท็กซ์จากลูกโป่งเป็นวัสดุยืดหยุ่น องค์ประกอบทั้งสองถูกนำไปพัฒนาหัววัด 3 โมเดล ได้แก่ หัววัดโมเดล A หัววัดโมเดล B และหัววัดโมเดล C จากการทดสอบโมเดล C เป็นหัววัดที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นนำไปทดสอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ มันฝรั่งทอดกรอบ และข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ โดยการจำลองเคี้ยวของมนุษย์อาศัยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyzer: T.A.) ผลลัพธ์ของตัวตรวจจับความกรอบที่พัฒนาขึ้นวัดค่าความกรอบของขนมขบเคี้ยวอยู่ในช่วง 140–180 dB มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย อยู่ที่ 0.17 % เมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED) จากการวิเคราะห์ผลค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) เท่ากับ 0.027 และค่าความน่าเชื่อถือของข้อมูล (Reliability) เท่ากับ 93.33% รวมทั้งการวิเคราะห์พบว่าค่าความไว (Sensitivity) ของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงเท่ากับ 0.20 ไมโครเมตรต่อเดซิเบล ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟารี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบที่พัฒนาขึ้นมีความไวสูงและมีค่าความผิดพลาดที่ต่ำ นอกจากนั้น ถือเป็นการประยุกต์ใช้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสู่การควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีศักยภาพในการต่อยอดเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ต้นทุนต่ำเพื่อยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารของไทยในอนาคต

640920038 : Major ENERGY ENGINEERING

Keyword : Sensing probe for crispness measurement, Sound pressure level of crispness, Fiber optic-based Fabry-Perot Interferometer (FFPI), Snack.

Miss Pronnaruimon TALHAKULTORN : Development of a prototype Fiber Optic base Fabry-Perot Interferometer for crispness measurement Thesis advisor : Associate Professor Dr. Saroj Pullteap

This thesis presents the development of a fiber optic based Fabry-Perot interferometer (FFPI) sensor for measuring the crispness of snack foods. This application leverages high-sensitivity sensor technology known for its immunity to electromagnetic interference. The operating principle is based on detecting the deflection of a thin diaphragm in response to the acoustic pressure generated by the fracture (crunching) of the snack. A fringe counting technique is, subsequently, utilized to convert the interference pattern change into a displacement value. This parameter is then converted back into the sound pressure level (*SPL*) using the Kirchhoff-Love's Plate theory of material deflection. The research included designing a suitable sensing probe optimized for crispness measurement. This involved testing various elastic and reflective materials that constitute the probe. Based on material testing, an Aluminum-coated mirror was selected as the reflective material, and a latex rubber balloon diaphragm was also chosen as the elastic material. These two components were integrated into three different probe configurations; model A, model B, model C. Based on the tests, model C was identified as the most suitable probe. The developed probes were then tested on three snack types with distinct physical characteristics: deep-fried shrimp crackers, potato chips, and fried corn chips respectively. A Texture Analyzer (T.A.) was used to simulate human chewing. The results showed that the developed crispness sensor measured the SPL of the snacks in the range of 140–180 dB. The average error was found to be 0.17% when compared to a acoustic envelope detector (AED) as a reference instrument. Uncertainty analysis yielded an uncertainty value of 0.027 and a reliability of 93.33%, respectively. Furthermore, the measured sensitivity of the fiber optic sensor was 0.20 micrometer per decibel. These findings indicate that the developed FFPI crispness sensor is both highly sensitive and exhibits low error. Moreover, this work successfully applies high-performance fiber optic sensor technology to quality control in the food industry, showing great potential for future development as a low-cost commercial tool to enhance the standard of Thai food products.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและการสนับสนุนช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้กรุณามอบความรู้ ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง และให้คำปรึกษาอันทรงคุณค่ามาโดยตลอด รวมทั้งได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการตรวจทานและขัดเกลาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ จนสามารถนำไปใช้สร้างประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปได้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุดากร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บูรณสิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการสอบวิทยานิพนธ์ เพื่อให้การปรับปรุงแก้ไขมีความสมบูรณ์และครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์) ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในหลักสูตรทุกคนสำหรับมิตรภาพที่อบอุ่นกำลังใจที่มอบให้แก่กันเสมอมา รวมถึงการช่วยเหลือและแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ยิ่งตลอดระยะเวลาการศึกษา

ภรนฤมล ทัฬหะกุลธร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
รายการสัญลักษณ์ 1
บทที่ 1 บทนำ 2
1.1 ที่มาและความสำคัญ 2
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.5 สถานที่ในการดำเนินงาน 3
1.6 ระยะเวลาดำเนินงาน 4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 อุตสาหกรรมอาหาร 5
2.1.1 ศักยภาพของอุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทย 5
2.1.2 อุตสาหกรรมอาหารประเภทขนมขบเคี้ยว 6
2.2 คุณภาพอาหาร (Food quality) 6
2.2.1 การทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analysis testing) 7
2.2.2 ความกรอบ (Crispness) 8
2.3 เสียงความกรอบ 8
2.3.1 ความถี่เสียง (Frequency) 8

2.3.2 ระดับความเข้มเสียง (Sound Intensity level: *SIL*) 9
2.3.3 ระดับความดันเสียง (Sound pressure level: *SPL*) 9
2.3.4 สมบัติของคลื่นเสียง 10
2.4 ทฤษฎีการโก่งตัววัสดุของ Kirchhoff-Love's 13
2.5 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดอินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ 14
2.6 วรรณกรรมวิจารณ์ 15
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 22
3.1 การออกแบบระบบตัวตรวจจับและหัววัด 23
3.1.1 การออกแบบระบบตัวตรวจวัดความกรอบ 23
3.1.2 การออกแบบหัววัดตัวตรวจจับ 24
3.2 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่น 26
3.3 การทดสอบวัสดุสะท้อนแสง 26
3.4 การทดสอบหัววัด 27
3.5 การทดสอบระบบตัวตรวจวัดความกรอบ 28
3.6 อุปกรณ์การทดลอง 29
บทที่ 4 ผลการดำเนินการและอภิปรายผล 35
4.1 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น 35
4.2 ผลการทดสอบวัสดุสะท้อนแสง 36
4.3 ผลการพัฒนาหัววัดความกรอบ 38
4.3.1 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล A 38
4.3.2 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล B 39
4.3.3 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล C 40
4.4 ผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ 41
4.4.1 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 1 ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ 42

4.4.2 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 2 มันฝรั่งทอดกรอบ....44
4.4.3 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 3 ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ....45
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ....48
5.1 สรุปผลการศึกษา....48
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน....49
5.3 แนวทางการศึกษาต่อ....50
รายการอ้างอิง....51
ภาคผนวก....58
ภาคผนวก ก....59
ก.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง....60
ก.2 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น....63
ก.3 ผลการทดสอบหัววัด....72
ก.3.1 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล A....72
ก.3.2 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล B....77
ก.3.3 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล C....82
ก.4 ผลการทดสอบตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นกับขนมขบเคี้ยว 3 ชนิด....87
ก.5 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม MATLAB....88
ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....119
ประวัติผู้เขียน....141

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
I_{r}	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณอ้างอิง
I_{s}	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณการวัด
I	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณแทรกสอด
θ	ผลต่างของเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสอง
Δd	ผลต่างของระยะการกระจัด
N	จำนวนริ้วการแทรกสอดของแสง
λ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงมี ค่าเท่ากับ 1,310 nm
n	ดัชนีหักเหของแสง
R_0	รัศมีของวัตถุ
ν	อัตราส่วนปัวซอง
E	ค่ามอดูลัสของยัง
h	ความหนาของวัสดุยืดหยุ่น
P	ความดันที่ต้องการจะแปลงค่าเป็นระดับความดันเสียง
P_0	ความดันเสียงอ้างอิง เมื่อเสียงเดินทางผ่านอากาศ มีค่า 20 ไมโครปาสคาล
P_{REF}	ความดันอ้างอิงจากเสียงกดจากเครื่องวัดคลื่นเสียง
P_{FFEI}	ความดันจากตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์
L_{P}	ระดับความดันเสียง
$L_{\mathrm{P,REF}}$	ระดับความดันเสียงอ้างอิงจากเสียงกดจากเครื่องวัดคลื่นเสียง
$L_{\mathrm{P,FFPI}}$	ระดับความดันเสียงตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรีเปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์
Δx	ความกว้างของวัสดุยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไป
Δy	ความยาวของวัสดุยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไป
ε_x	ค่าความเครียดในแนวขวางของวัสดุยืดหยุ่น
ε_y	ค่าความเครียดตามแนวแรงของวัสดุยืดหยุ่น

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ตลาดของอุตสาหกรรมไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง รวมถึงอุตสาหกรรมอาหารมีการขยายตัว 3-4 เปอร์เซ็นต์ต่อปี [1] และการขยายตัวของตลาดที่สูงขึ้นทำให้มีการแข่งขันที่สูงตามไปด้วย หากกว่าถึงอาหารที่ได้รับความนิยมสามารถรับประทานได้ทุกเพศทุกวัย และมีติดบ้านทุกครัวเรือนคงหนีไม่พ้นอาหารจำพวก ขนมขบเคี้ยว โดยจากข้อมูลจาก Euromonitor บริษัทวิจัยตลาดชั้นนำ ระบุว่าในปี 2566 ตลาดค้าปลีก ขนมขบเคี้ยวของโลกมีมูลค่ารวม 643,805.8 ล้านเหรียญสหรัฐฯ โดยมีแนวโน้มเติบโต 5.4 % ต่อปี และตลาดขนมขบเคี้ยวในประเทศไทย ปี 2566 เติบโตทะลุแสนล้านบาท [2] อย่างไรก็ตาม ผู้ประกอบการไทยต้องการนำขนมกรุบกรอบไทยส่งออกไปตีตลาดต่างประเทศเพิ่มขึ้น จึงต้องนำนวัตกรรมเข้ามาใช้ในการช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค สิ่งสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นั้นคือการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งตัวบ่งชี้คุณภาพขนมขบเคี้ยวนั้นก็คือ ความกรอบ [3] ผู้ผลิตจึงต้องมีการปรับตัวเป็นอย่างมากเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค โดยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของบริษัทต่าง ๆ ต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัยควบคู่ไปกับคุณภาพของอาหาร ซึ่งหนึ่งในประเภทของอาหารที่นิยมกันทั่วโลก คือ อาหารขบเคี้ยว ซึ่งมีความกรอบเป็นปัจจัยสำคัญในการรับรู้สำหรับการประเมินคุณภาพของอาหาร และมีบทบาทสำคัญในการดึงดูดผู้บริโภคให้เลือกซื้อสินค้า [4, 5] เทคโนโลยีด้านเครื่องมือวัดค่าถูกนำมาใช้ประกันคุณภาพ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่พึงพอใจต่อผู้บริโภค แต่เนื่องจากการวัดค่าความกรอบในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มีการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีราคาสูง เครื่องมือมีความซับซ้อนและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ [6-8] ซึ่งตัวตรวจในปัจจุบันมีความหลากหลายทั้งตัวตรวจจับทางกล ตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน และตัวตรวจจับทางแสง เป็นต้น หากพูดถึงตัวตรวจจับทางแสงที่มักถูกนิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง โดยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงถูกประยุกต์ในหลายอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ โรงผลิตไฟฟ้า (Power plants), อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive industry) และด้านเทคนิคการแพทย์ (Medical technologist) เป็นต้น [9-12] ซึ่งสายใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายส่งสัญญาณทั่วไปหลายประการ เช่น สามารถลดทอนสัญญาณต่ำเมื่อเทียบกับสายทองแดง ทำให้สายใยแก้วนำแสงส่งสัญญาณได้ดีกว่า โดยคุณสมบัติการเป็นฉนวนจึงไม่มีการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาทำให้ไม่มีผลกระทบในการรับ-ส่งสัญญาณ รวมถึงสายใยแก้วนำแสงมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบามากเมื่อเทียบกับสายทองแดง รวมไปถึงสายใยแก้วนำแสงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานหากไม่มีสิ่งเร้าภายนอกมากระทำ [13-15]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเอาตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงมาพัฒนาเพื่อตรวจวัดค่าความกรอบในรูปแบบระดับความดันเสียงนอกจากนี้เทคนิคริ้วแทรกสอดจะถูกนำมาใช้แปลงค่าที่วัดได้จากตัวตรวจจับให้อยู่ในรูปแบบระดับความดันเสียงเพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงที่ใช้ได้แก่ เครื่องมือวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED) และเครื่องจำลองการเคี้ยวอาศัยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser: T.A.) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ผู้วิจัยคาดว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยวต้นแบบ (Prototype) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยว โดยผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของระดับความดันเสียงความกรอบได้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1. ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์

1.3.2. เครื่องมือวัดอ้างอิงที่ใช้เป็นเครื่องมือวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED) และเครื่องจำลองการเคี้ยวอาศัยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser: T.A.)

1.3.3. ขนมขบเคี้ยวที่นำมาทดสอบมีทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ

1.3.4. โปรแกรมที่นำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ MATLAB, SolidWorks และ DAQExpress

1.3.5. วัดระดับความดันเสียงความกรอบของขนมขบเคี้ยวที่ช่วง 140–180 เดซิเบล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. เข้าใจระบบการทำงานตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงและสามารถนำไปประยุกต์ได้

1.4.2. เข้าใจกระบวนการและวิธีการตรวจวัดความกรอบของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

1.5 สถานที่ในการดำเนินงาน

1.5.1. ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)

1.5.2. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร (Department of food technology) คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)

1.6 ระยะเวลาดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2565												2566												2567												2568							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ศึกษาทฤษฎีและ งานวิจัยเกี่ยวข้อง	■	■	■	■	■	■																																						
2. ออกแบบระบบวัดความกรอบ							■	■	■	■	■																																	
3. กำหนดและวางแผนการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบที่พัฒนาขึ้น												■	■	■	■																													
4. ทดสอบหัววัดความกรอบ 3 โมเดล																■	■																											
5. ทดสอบตัวตรวจจับกับขนมขบเคี้ยว																		■	■	■	■	■	■	■																				
6. เก็บรวบรวมผลจากการทดลอง																									■	■	■	■	■															
7. อภิปรายและสรุปผลการทดสอบ																														■	■	■	■	■	■								
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																																				■	■	■	■	■	■	■	■	■

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (Fiber optic Fabry-Perot Interferometer: FFPI) สำหรับวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยว ได้นำเอาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ ดังต่อไปนี้

2.1 อุตสาหกรรมอาหาร

อุตสาหกรรมอาหาร (Food industry) หมายถึง อุตสาหกรรมที่นำผลิตผลจากภาคเกษตร ได้แก่ ผลิตผลจากพืช ปศุสัตว์ และประมง เป็นต้น มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหาร โดยอาศัยเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารและการถนอมอาหาร ตลอดจนการนำเครื่องจักรอุปกรณ์มาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร หรือ การบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารให้ได้ปริมาณมาก ๆ มีคุณภาพสม่ำเสมอ ปลอดภัย และสะดวกต่อการบริโภค รวมถึงเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลจากธรรมชาติ [16, 17]

2.1.1 ศักยภาพของอุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทย

อุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการผลิตเพื่อบริโภคในประเทศและเพื่อการส่งออก เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นฐานด้านการผลิตทางการเกษตรที่มั่นคงและมั่งคั่ง ทำให้มีผลผลิตที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปได้อย่างหลากหลายและต่อเนื่อง มีแรงงานที่มีคุณภาพจำนวนมาก มีการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัย มีการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการของตลาดมากยิ่งขึ้น [18] นอกจากนั้นผู้ประกอบการแต่ละประเภทอุตสาหกรรมยังมีความชำนาญในการผลิตและการใช้เทคโนโลยีที่ดีกว่าประเทศคู่แข่งอื่น ๆ อีกหลายประเทศในภูมิภาคเดียวกันสามารถผลิตสินค้าได้ตามความต้องการของผู้ซื้อได้รวดเร็ว และสามารถนำวัตถุดิบจากต่างประเทศมาแปรรูปให้เกิดมูลค่าเพิ่ม นอกจากนั้นผู้ประกอบการยังมีความพร้อมในด้านการจัดการกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ มีบุคลากรที่มีความรู้และประสบการณ์ [19] นอกจากนั้นยังได้รับการยอมรับจากลูกค้าในต่างประเทศในเรื่องของการส่งมอบสินค้า และความรับผิดชอบต่อสินค้า รวมถึงชนิดของผลิตภัณฑ์มีความหลากหลายและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของตลาดต่างประเทศ [20] โดยอุตสาหกรรมอาหารสามารถแบ่งตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ 5 ประเภท ได้แก่ 1) อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ 2) อุตสาหกรรมพืช ผัก และผลไม้ 3) อุตสาหกรรมอาหารแปรรูป 4) อุตสาหกรรมเบเกอร์รี่ และ 5) อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ตามลำดับ [21]

รูปที่ 2.1 อุตสาหกรรมอาหาร 5 ประเภท

2.1.2 อุตสาหกรรมอาหารประเภทขนมขบเคี้ยว

คือ ผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปประเภทขนมหรือของทานเล่นที่มีส่วนประกอบหลักจากแป้ง ธัญพืช หรือเนื้อสัตว์ มาทำการแปรรูป และปรุงรส ผ่านกระบวนการทอด หรืออบให้มีความกรอบ สามารถเก็บรักษาไว้บริโภคได้นาน โดยมากมักมีรสเค็ม และหวาน โดยความแตกต่างของอุตสาหกรรมอาหารประเภทขนมขบเคี้ยว สามารถแบ่งได้ตามพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 แบ่งหมวดอาหารออกเป็น 17 หมวด ซึ่งหมวดที่ 15 ได้กล่าวถึงขอบข่ายของขนมขบเคี้ยว [22] ได้แก่

หมวด 15.1 ขนมขบเคี้ยวที่มีมันฝรั่ง ธัญชาติแป้งหรือสตาร์ชเป็นส่วนประกอบหลัก

หมวด 15.2 ขนมขบเคี้ยวที่มีถั่วเป็นส่วนประกอบหลัก หรือ เมล็ดพืชที่ผ่านกระบวนการการแปรรูปและแต่งกลิ่นรสเป็นส่วนประกอบหลัก

หมวด 15.3 ขนมขบเคี้ยวที่มีปลาหรือสัตว์ทะเลอื่นเป็นส่วนประกอบหลัก

ซึ่งบริษัทอุตสาหกรรมอาหารขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่มีการแข่งขันด้านการขายโดยผลิตออกมาจะมีตัวแปรสำคัญในการเลือกรับประทานของผู้ซื้อ คือ คุณภาพอาหาร (Food quality) ประกอบด้วย คุณภาพด้านความปลอดภัย คุณภาพทางประสาทสัมผัสคุณภาพด้านโภชนาการ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ รูป รส กลิ่น สี และที่สำคัญไม่แพ้สิ่งที่กล่าวมา คือ ความกรอบ [23]

2.2 คุณภาพอาหาร (Food quality)

คุณภาพของอาหารและผลิตภัณฑ์อาหาร ประกอบด้วย คุณภาพทางประสาทสัมผัสคุณภาพด้านโภชนาการ และคุณภาพด้านความปลอดภัย อุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องคำนึงถึง

ความปลอดภัยของผู้บริโภคมากเป็นพิเศษ เนื่องจากมีความเสี่ยงสูงที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคอย่างกว้างขวางและรุนแรงมากกว่าอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท เช่น สิ่งทอ เฟอร์นิเจอร์ เครื่องประดับ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะอาหารมีโอกาสก่ออันตรายกับผู้บริโภคได้ ทั้งอันตรายทางกายภาพ อันตรายทางเคมี และอันตรายทางจุลินทรีย์ รวมทั้งสารพิษที่แบคทีเรีย หรือเชื้อราสร้างขึ้น อีกทั้งอาหารบางประเภทยังทำให้เกิดการแพ้อาหาร (Food allergen) กับผู้บริโภคบางราย ซึ่งมีสถิติเพิ่มสูงขึ้น [24, 25]

2.2.1 การทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analysis testing)

ด้านความกรอบของอาหาร อาจทำได้ด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) และการทดสอบทางวัตถุวิสัย (Objective method) เช่น การทดสอบแบบการโก่งตัว (Bending test), การทดสอบแบบกดทะลุ (Penetration test), และการทดสอบความยืดหยุ่น เป็นต้น [26]

(ก) (ข)

รูปที่ 2.2 การทดสอบคุณภาพอาหาร (ก) การทดสอบประสาทสัมผัส (ข) การทดสอบวัตถุวิสัย

(ที่มา: แพลตฟอร์มบริการผลิตอาหารและส่วนผสมฟังก์ชัน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.))

การวิเคราะห์ทางอาหารในทางวัตถุวิสัยอาศัยการนำเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ามาช่วยวิเคราะห์ อาทิเช่น เครื่องวัดค่า pH (pH meter) ที่มีหน้าที่วัดค่าความเป็นกรดด่างของอาหาร จึงต้องอาศัยเครื่องมือที่แม่นยำในการทดสอบอยู่เสมอ ทำให้เครื่องมือวัดค่า pH เป็นเครื่องมือที่มีการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ และด้วยการการสอบเทียบที่สม่ำเสมอจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูง [27] หรือเครื่องวัดความหวาน (Brix meter) ที่วัดปริมาณน้ำตาลในอาหาร แต่มีข้อจำกัดทางประเภทอาหารที่นำมาทดสอบต้องเป็นของเหลวเท่านั้น และอาจมีความคาดเคลื่อนได้สำหรับอาหารที่มีความซับซ้อน [28] เครื่องตรวจจับโลหะในอาหาร (Metal detector) ถือเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการสร้าง

ความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคช่วยให้ไม่ให้เกิดโลหะปนเปื้อนอาหารได้ส่วนนึง เครื่องตรวจจับโลหะในอาหารยังมีข้อจำกัดสำหรับอาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีเกลือมาก อาจจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนกับเครื่องมือตรวจจับได้ [29] และเครื่องมือวัดความกรอบในรูปแบบของการวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED) ที่มีการทำงานร่วมกับเครื่องจำลองการเคี้ยวอาศัยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser: T.A.) การทำงานร่วมกันของทั้งสองเครื่องมือส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง รวมถึงการผลิตจำเป็นต้องมีการนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยอีกด้วย [30-32]

2.2.2 ความกรอบ (Crispness)

บางครั้งใช้คำว่า “Brittleness” เป็นคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Texture properties) ที่เกิดขึ้นเมื่อทำให้ตัวอย่างแตกออกจากกันพร้อมกันนั้นการแตกหักจะก่อให้เกิดเสียง โดยตัวอย่างทดสอบที่กล่าวมานั้นได้แก่ อาหารขบเคี้ยว อาหารทอด ผักผลไม้สดจะมีเนื้อสัมผัสกรอบ และฉ่ำน้ำ (Juiciness) เป็นต้น ซึ่งความกรอบของอาหารแห้งมีความสัมพันธ์กับความชื้นของอาหาร อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวจะส่งผลกับการยอมรับของผู้บริโภคและอายุการเก็บรักษาอาหารวัสดุที่มีโพรง เช่น ขนมปังกรอบ ซีเรียล และขนมคบเคี้ยว เป็นต้น [33]

2.3 เสียงความกรอบ

เสียงความกรอบ ขนมขบเคี้ยวจะมีลักษณะเฉพาะคือการแตกหักเปราะที่แรงแตกหักต่ำ นอกจากนี้การปล่อยเสียงยังเป็นสิ่งสำคัญในการรับรู้ถึงความกรอบและความกรุบกรอบ เป็นพลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศซึ่งตรวจพบและบันทึก เมื่อใช้แรงกับวัตถุที่กรอบการสั่นสะเทือนจะถูกส่งผ่านอากาศเป็นคลื่นเสียงซึ่งสร้างเสียง ความคมชัดทางประสาทสัมผัสจึงเป็นการรับรู้ถึงความผิดปกติและเหตุการณ์ของเวลา เทคนิคการปล่อยเสียงถูกนำมาใช้เป็นการวัดเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว มีการเสนอการกำหนดเหตุการณ์ทางกลและเสียงจำนวนหนึ่งเพื่อเป็นแนวทางที่ดีในการวัดปริมาณความกรอบ [34]

2.3.1 ความถี่เสียง (Frequency)

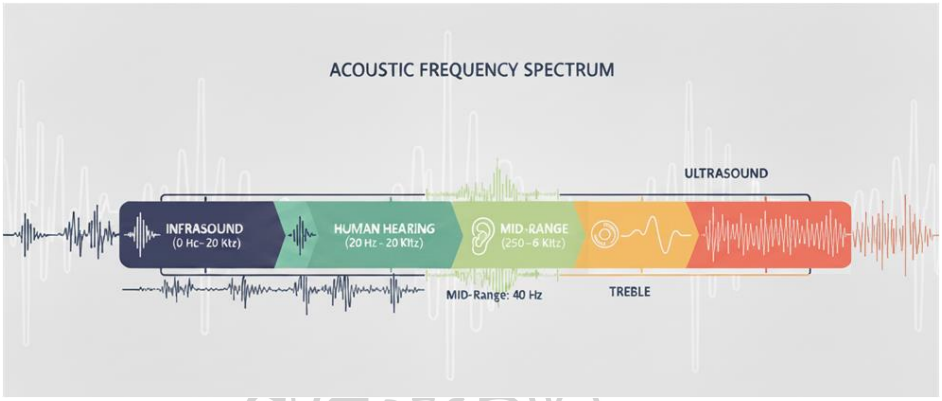
ความถี่เสียง คือ จำนวนที่แหล่งเสียงสั่นสะเทือนต่อวินาทีถูกเรียกว่าความถี่ของเสียง และวัดใน 1 รอบต่อวินาที (Cycle Per Second: CPS) หรือเรียกว่า Hertz (Hz) เสียงซึ่งมี Pitch sound สูงจะมีความถี่สูงและจะรบกวนผู้ฟังมากกว่าเสียงที่มีความถี่ต่ำ เนื่องจากมนุษย์และสัตว์ส่วนใหญ่จะมีช่วงของการตอบสนองต่อการได้ยินที่กว้างด้วยความถี่ประมาณ 20 Hz ถึง 20,000 Hz ซึ่งความถี่เสียงสามารถหาได้จาก (2.1) [35, 36]

$$f = \frac{v_w}{\lambda} \tag{2.1}$$

เมื่อ υ_w = ความเร็วเสียง (เมตรต่อวินาที: m/s)

f = ความถี่เสียง (เฮิร์ต: Hz)

λ = ความยาวคลื่นเสียง (เมตร: m)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างช่วงความถี่เสียง [37]

2.3.2 ระดับความเข้มเสียง (Sound Intensity level: *SIL*)

ระดับความเข้มเสียงเป็นปริมาณทางกายภาพที่ใช้บอกถึงความดังเสียง โดยวัดระดับความเข้มเสียงในหน่วย เดซิเบล (Decibel: dB) ระดับความเข้มเสียงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการรับรู้และสุขภาพของมนุษย์ การเข้าใจเกี่ยวกับระดับความเข้มเสียงจะช่วยให้เราสามารถป้องกันตัวเองจากอันตรายที่เกิดจากเสียงดังได้ [38]

$$SIL = \frac{\Delta p^2}{2\rho \upsilon_w} \tag{2.2}$$

เมื่อ p = ความดัน (ปาสคาล: Pa)

ρ = ความหนาแน่นของตัวกลาง

2.3.3 ระดับความดันเสียง (Sound pressure level: *SPL*)

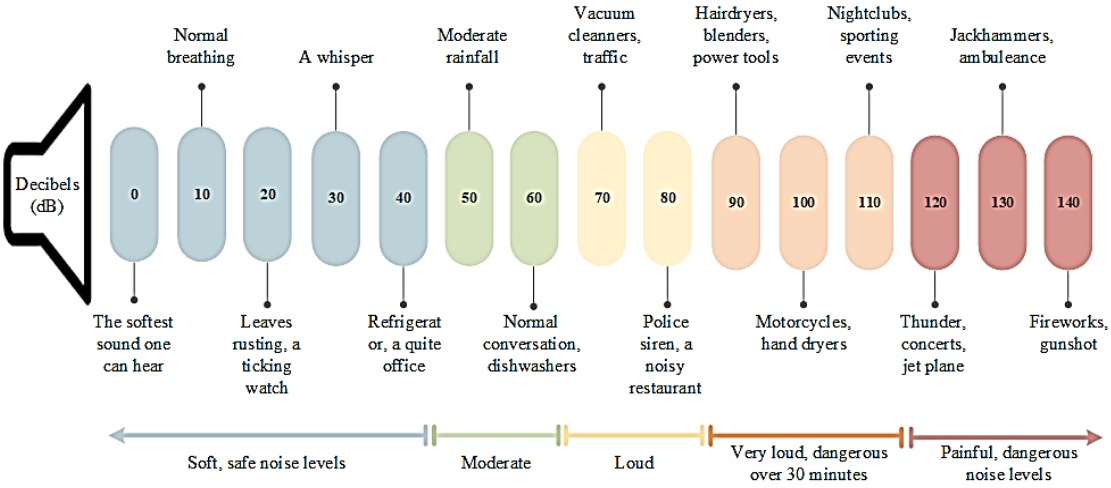
ค่าความดันของคลื่นเสียงที่เปลี่ยนไปจากความดันบรรยากาศปกติ ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือ ค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) หน่วยที่ใช้คือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa) ซึ่งหาค่าระดับความดันเสียงอ้างอิง (P_{REF}) จาก (2.9) การหาระดับความดันเสียงต้องเทียบกับความดันอ้างอิงที่ 20 ไมโครปาสคาล ซึ่งเป็นความดันเสียงต่ำสุดที่มนุษย์ปกติสามารถได้ยิน [39]

$$SPL = 20\log\left(\frac{P}{P_{REF}}\right) \quad (2.3)$$

โดยที่ SPL = ระดับความดันเสียง (dB)

P = ความดันเสียง (Pa)

P_{REF} = ความดันเสียงอ้างอิงในอากาศ เมื่อเสียงเดินทางผ่าน มีค่า 20 ไมโครปาสคาล

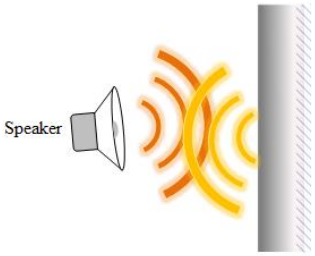


รูปที่ 2.4 ระดับความดันเสียงของแต่ละแหล่งกำเนิด [40]

2.3.4 สมบัติของคลื่นเสียง

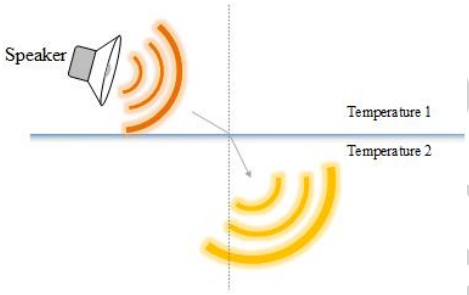
สมบัติของคลื่นเสียง คลื่นเสียงคือคลื่นเชิงกลแบบตามยาว เกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดและแพร่ผ่านตัวกลางด้วยการอัด–ขยายตัวของอนุภาค จึงเดินทางในของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ แต่เดินทางในสุญญากาศไม่ได้ สมบัติของเสียงสามาถแบ่งได้ 4 ประเภทดังนี้

- การสะท้อน (Reflection) คือ พฤติกรรมคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากจะมีการสะท้อนของคลื่นเสียงเกิดขึ้น ซึ่งเฟสจะเปลี่ยนไป 180 องศา แต่ถ้าเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีการสะท้อนเพียงบางส่วน ซึ่งเฟสจะมีค่าเท่าเดิม [41-44]



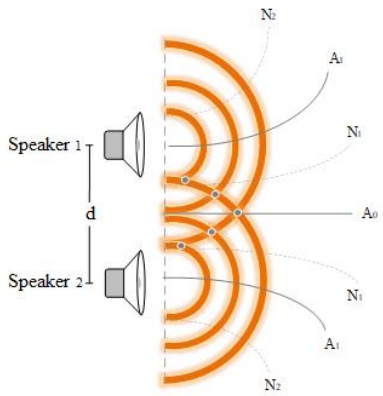
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างลักษณะการสะท้อนของคลื่นเสียงเมื่อเจอสิ่งกรีดขวาง [45]

- การหักเห (Refraction) คือ พฤติกรรมของคลื่นเสียง เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่างกัน คลื่นเสียงจะเบนออกจากเส้นปกติ เมื่อเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือจากบริเวณที่มีความเร็วน้อยไปยังตัวกลางที่มีความเร็วมาก [46]



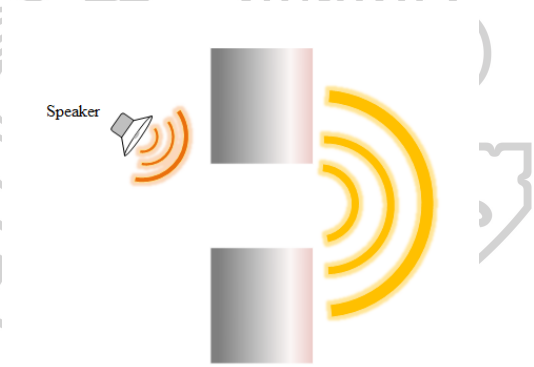
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างลักษณะการหักเหของคลื่นเสียง [47]

- การแทรกสอด (Interference) คือ พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง 2 ขบวนเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลางเดียวกันทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive interference) และการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive interference) โดยตำแหน่งที่เสริมกันคลื่นสียงจะมีเฟสเดียวกันเรียกว่า ปฏิบัพ (Antinode) ตำแหน่งที่หักล้างกันคลื่นเสียงจะมีเฟสตรงข้ามกันเรียกว่า บัพ (Node) และแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent sources) คือ แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงที่มีความถี่ ความยาวคลื่น อัตราเร็ว ค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เท่ากันทุกค่า แต่เฟสอาจจะต่างกันหรือเท่ากันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด [48]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างลักษณะการแทรกสอดของคลื่นเสียง [49]

- การเลี้ยวเบน (Diffraction) คือ พฤติกรรมของคลื่นเสียง เมื่อคลื่นเสียงเดินทางพบสิ่งกีดขวาง คลื่นเสียงจะเคลื่อนที่เลี้ยวอ้อมผ่านสิ่งกีดขวางนั้น แต่ยังคงมีบางส่วนที่ถูกสะท้อนกลับ โดยการอธิบายสามารถใช้หลักของฮอยเกนส์ ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือได้ว่าเป็นจุดกำเนิดคลื่นใหม่ที่ให้คลื่นความยาวคลื่นและเฟสเดียวกัน” [50]

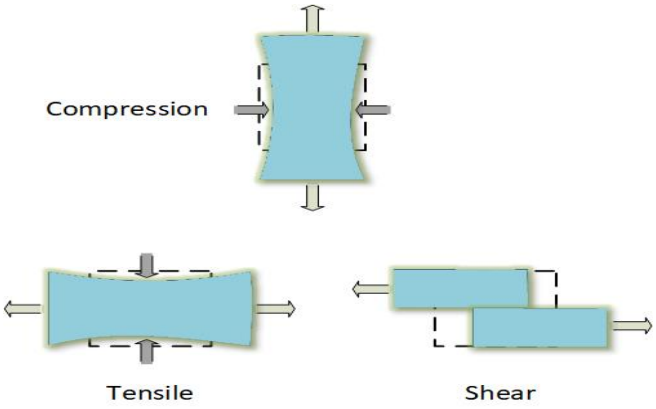


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างลักษณะการเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง [51]

เสียงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับมนุษย์ไว้ใช้สำหรับสื่อสารในชีวิตประจำชีวิต อีกทั้งนอกจากเรื่องของการสื่อสารเสียงที่ได้ยินจากสิ่งต่าง ๆ ทำให้เรารับรู้ได้ถึงอารมณ์และความรู้สึก ซึ่งความกรอบนับเป็นเสียงอย่างหนึ่งของอาหารที่ทำให้เราสัมผัสได้ถึงอารมณ์และความรู้สึกในการรับประทานอาหาร บ่งบอกถึงความน่ารับประทาน คุณภาพและความต้องการซื้อของผลิตภัณฑ์ จึงควรศึกษาด้านนี้อย่างจริงจังและนำมาประยุกต์ในการทำระบบวัดความกรอบของอาหาร [52]

2.4 ทฤษฎีการโก่งตัววัสดุของ Kirchhoff-Love's

การโก่งตัวของวัสดุเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ลักษณะ และขนาด เมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุ อาทิเช่น แรงดัน (Pressure), แรงดึง (Tensile), แรงกด (Compression) และแรงเฉือน (Shear) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าความหนา (Thickness) แรงต้าน (Resistance) ค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ (Stress and strain) และค่ายังมอดูลัส (Modulus of material) สามารถแสดงลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุ [53-56] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุ [57]

การหาค่ายังมอดูลัส (Modulus Elasticity: E) เป็นการวัดแรงต้านของวัสดุยืดหยุ่นก่อนจะถึงจุดวิกฤติ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [58-61] ดัง (2.4)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2.4}$$

เมื่อ σ = ความเค้น

ε = ความเครียด

นอกจากนั้นอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio: ν) คือ อัตราส่วนของความเครียดในแนวด้านข้างต่อความเครียดในแนวยาว [62] ดัง (2.5)

$$\nu = \frac{\Delta x/x_0}{\Delta y/y_0} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \tag{2.5}$$

เมื่อ Δx = ระยะยืดที่เปลี่ยนไปในแนวขวาง

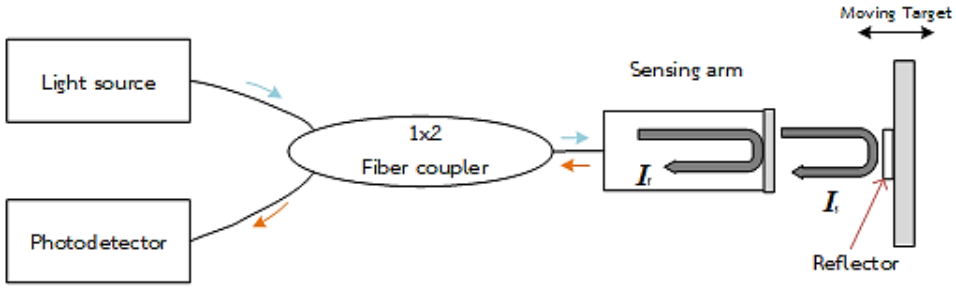
x_0 = ระยะยืดที่เปลี่ยนไปในแนวแกนตั้ง

Δy = ระยะเริ่มต้นในแนวขวาง

y_0 = ระยะเริ่มต้นในแนวแกนตั้ง

2.5 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดอินเทอร์ฟีรอมิเตอร์

ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์ อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เป็นหนึ่งในประเภทของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงอิเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ประกอบด้วย 4 ชนิด คือ Michelson, Mach-Zehnder, Sagnac และ Fabry-Perot interferometer ตามลำดับ ถือว่าเป็นประเภทที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับในงานอุตสาหกรรม อันเนื่องด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น ความไวในการตรวจจับ ต้นทุนต่ำ และโครงสร้างไม่ซับซ้อน [63-65] ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของตัวตรวจจับชนิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

จากรูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของตัวตรวจจับชนิดนี้โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงแนวแกนเดียวภายในสายใยแก้วซึ่งแตกต่างจากอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบอื่น ๆ ที่ส่งผ่านสัญญาณจากสองแนวแกน ซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งผ่านไปยัง Fiber coupler 1x2 แล้วจึงเดินทางสู่หัววัด โดยแสงประมาณ 4 % ถูกสะท้อนกลับที่ปลายหัววัด เรียกว่า สัญญาณอ้างอิง (Reference signal: I_r) ในขณะที่แสงที่เหลือจะส่งผ่านไปยังตัวสะท้อน (Reflector) แล้วสะท้อนกลับเข้าสู่หัววัด เรียกว่า สัญญาณวัด (Sensing signal: I_s) เมื่อสัญญาณทั้งสองกลับเข้าสู่หัววัดในลักษณะที่มีความต่างเฟสกัน (Phase difference: θ) ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจะออกมาในรูปแบบที่ เรียกว่า สัญญาณแทรกสอด (Interference signal) [66, 67] ซึ่งสามารถหาค่าความเข้มแสงได้จาก (2.6)

$$I = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r}\, cos\theta \tag{2.6}$$

จากการหาค่าความเข้มของริ้วแทรกสอดที่มีความแตกต่างกันของเฟส [68] ซึ่งสามารถหาได้ดัง (2.7)

$$\theta = \frac{4\pi nD}{\lambda} \tag{2.7}$$

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหแสง (n = 1 เมื่อตัวกลางเป็นอากาศ)

λ = ค่าความยาวคลื่นแสง

D = ระยะกระจัด

การหาระยะการกระจัดของวัตถุ (Displacement: *D*) จะอาศัยความสัมพันธ์กับริ้วแทรกสอด (*N*) ที่วัดได้จาก FFPI ในเวลาหนึ่งรูปคลื่น (Period time) [69] ซึ่งคำนวณได้จาก (2.8)

$$D = N\frac{\lambda}{2} \tag{2.8}$$

จากนั้น นำระยะกระจัด (*D*) ที่เกิดขึ้นแทนในสมการความดันของวัตถุดัง (2.9) [70, 71]

$$P_{\mathrm{FFPI}} = D\,\frac{16Eh^3}{3R_0^4(1-\nu^2)} \tag{2.9}$$

เมื่อ P_{FFPI} = ความดันของเสียง (Pa)

R_0 = รัศมีของวัตถุ (m)

ν = อัตราส่วนปัวซอง

E = ค่ามอดูลัสของยัง (Pa)

h = ความหนาของวัตถุ (m)

2.6 วรรณกรรมวิจารณ์

A. Saita *et al*. ศึกษาบทบาทของ “ความกรอบ” (Crispness) ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสที่มีผลสำคัญต่อความอร่อยของขนม “คะคิโนะตาเนะ” (Kakinotane) โดยใช้ “คำเลียนเสียงธรรมชาติ” (Onomatopoeic words) เพื่ออธิบายระดับความกรอบและความชื้นของอาหาร งานวิจัย

นี้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี Temporal Dominance of Sensations (TDS) และ Temporal Drivers of Liking (TDL) เพื่อวิเคราะห์การรับรู้ความกรอบและความสัมพันธ์กับความชอบของผู้บริโภค พบว่า “ระดับความชื้น” เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดการรับรู้ความกรอบ โดยคำเลียนเสียงที่สื่อความชื้น เช่น BETA-BETA (เหนียวและชื้น) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความอร่อย ในขณะที่คำที่สื่อความกรอบ เช่น BARI-BARI และ BORI-BORI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความชอบของผู้บริโภค การวัดเสียงเคี้ยวและสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อบดเคี้ยว (electromyography: EMG) พบว่ามีความสัมพันธ์กับความชอบในระดับหนึ่ง แต่ไม่ชัดเจนเท่าการประเมินด้วยคำเลียนเสียง งานวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่าการใช้คำเลียนเสียงธรรมชาติร่วมกับวิธี TDS และ TDL เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการทำความเข้าใจและทำนายความรู้สึกของผู้บริโภคต่อความกรอบของอาหาร [72]

H. Michael *et al.* ได้ศึกษาวิธีการประเมิน “ความกรอบ” (Crispness) ของเวเฟอร์ โดยเปรียบเทียบความสามารถของการทดสอบทางเครื่องมือสองวิธี ได้แก่ การดัดสามจุด (Three-Point Bending Test) และการตัด (Cutting Test) ซึ่งบันทึกข้อมูลแรงและเสียงระหว่างการแตกหักของตัวอย่างพร้อมกัน งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นผิว (Texture Analyser: TA) ที่ติดตั้งเครื่องตรวจจับสัญญาณเสียงแบบห่อหุ้ม (Acoustic Envelope Detector: AED) เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ทางกลและเสียง เช่น ความดันเสียงสูงสุด (maximum sound pressure: Smax) จำนวนจุดยอดเสียง (number of sound peaks: NSP) และแรงสูงสุด (maximum force: Fmax) ผลการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีสามารถจำแนกเวเฟอร์ที่มีคุณภาพแตกต่างกันได้ โดยค่าความดันเสียงสูงสุด (Smax) และจำนวนจุดยอดแรง (number of force peaks: NFP) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความกรอบจากการประเมินทางประสาทสัมผัส (sensory crispness; r = 0.49–0.76) นอกจากนี้ แบบทดสอบการดัดสามจุดให้ความสัมพันธ์สูงกับคุณลักษณะเชิงกล ในขณะที่แบบทดสอบการตัดให้ผลแม่นยำกว่าในการสะท้อนคุณลักษณะด้านความกรอบ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ทางเสียง เช่น Smax, NSP และค่าเฉลี่ยความดันเสียง (mean sound pressure: MS) สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพความกรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [73]

P. Laura and G. Valentina ศึกษาพื้นผิวอันเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับคุณสมบัติทางโครงสร้างของเนื้อเยื่อเซลล์ของแอปเปิ้ลและได้รับการกล่าวอ้างว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคนอกเหนือจากรสชาติ โดยการทดสอบจะใช้เครื่องตรวจจับ AED แบบอะคูสติก เชื่อมต่อกับ Texture Analyzer เพื่อรวบรวมทั้งการปล่อยเสียงที่บันทึกไว้ระหว่างการทดสอบการซึมผ่านของเครื่องมือกล และการปล่อยเสียงที่เกิดจากการกัดครั้งแรกของ Apple flash ซึ่งเสียงทำขึ้นโดยอาสาสมัคร 10 คน ที่มีสภาพฟันแบบสุ่ม และทดสอบกับแอปเปิ้ลที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสต่างกัน (Fuji, Golden Delicious, Granny Smith, Pink Lady, Renetta Canada, Royal Gala และ Stark) ได้รับการวิเคราะห์ ในการวัดปริมาณน้ำในแอปเปิ้ล ของเหลวที่

แสดงออกได้จะถูกปล่อยออกมา จาก Apple flash ระหว่างการบีบอัดก็ถูกวัดเช่นกัน ผสานพารามิเตอร์ที่โดดเด่นซึ่งนำมาจากสัญญาณเชิงกลและร่องรอยอะคูสติกที่บันทึกไว้พร้อมกัน อย่างไรก็ตามได้จัดกลุ่มแอปเปิลตามคุณสมบัติความกรอบโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) วิธีการเชิงคุณภาพสำหรับชุดข้อมูลหลายตัวแปร ผลการวิจัยพบว่าเสียงที่เปล่งออกมาระหว่างการกัดของมนุษย์ไม่สามารถสันนิษฐานได้ว่าเป็นตัวทำนายของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของความกรอบ ททในขณะที่แอปเปิ้ลสามารถแยกความกรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับความกรอบโดยวิธีการจับคู่การวิเคราะห์พื้นผิวทางเสียงและเชิงกล โดยสุดท้ายนี้การศึกษาบ่งบอกว่าการรวมความชุ่มฉ่ำไว้ในข้อมูล PCA เชิงกลและเสียงที่สร้างขึ้น ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการแยกคลัสเตอร์ในแง่ของคุณสมบัติความกรอบของพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ [74]

J. Chen *et al*. ศึกษาความสัมพันธ์ของความกรอบของอาหารที่ขึ้นอยู่กับแรงกระทำ การกระจัดและธรรมชาติของอะคูสติกได้รับการประเมินโดยใช้ Acoustic Envelope Detector (AED) ซึ่งติดอยู่กับเครื่องวิเคราะห์พื้นผิว โดยทดสอบกับขนมปังกรอบ 6 ชนิด ที่ใช้คือ Carr's Table Water, Crackerbread, Digestive, Dutch Crispbakes, Rich Tea Frinsgers และ Shortbread อย่างไรก็ตามสัญญาณแรง การกระจัด และเสียง จะถูกบันทึกพร้อมกันระหว่างการแตกขนมปังกรอบ สำหรับแต่ละรายการที่ตรวจพบ สัญญาณเสียงมีแรงอัดลดลงอย่างกะทันหัน การวิเคราะห์เส้นโค้งแรงของและการกระจัดแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงระหว่าง อนุพันธ์อันดับสองของเส้นโค้งแรงและเหตุการณ์อะคูสติก บ่งบอกถึงพลังงานที่ถูกปลดปล่อยผ่านอากาศของเหตุการณ์รอยร้าวเหล่านี้ พฤติกรรมทางเสียงของขนมปังกรอบที่ได้รับการประเมินในแง่ของระดับความดันเสียงสูงสุดและจำนวนเหตุการณ์อะคูสติกซึ่งตีความเพิ่มเติมว่าเป็นอะคูสติก ซึ่งการศึกษาพบว่าในการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นภายระยะเวลาสั้นและให้ความแตกต่างของขนมปังกรอบกรอบได้ดีขึ้น [75]

H. Nakamoto *et al.* ได้ศึกษาผลกระทบของการผสมผสานประสาทสัมผัส (Sensation Combination) ที่มีต่อการรับรู้ความกรอบ โดยมุ่งเน้นที่ แรง (Force), การสั่นสะเทือน (Vibration หรือเสียงที่นำผ่านกระดูก) และ เสียงในอากาศ (Air-conduction sound). การทดลองได้ให้อาสาสมัคร 10 คน ประเมินขนมขบเคี้ยว 8 ชนิด โดยใช้คำคุณศัพท์ความกรอบในภาษาญี่ปุ่น 4 คำ (Sakusaku, Karikari, Paripari, Zakuzaku) ภายใต้ 3 เงื่อนไข: (1) การเคี้ยวปกติ, (2) การเคี้ยวแบบปิดกั้นเสียงในอากาศ (สวมที่อุดหู) และ (3) การฟังเฉพาะเสียงที่อัดไว้ ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบเครื่องมือวัดที่บันทึกข้อมูล แรง, การสั่นสะเทือน และเสียงไปพร้อมกัน และใช้แบบจำลอง Gaussian Process Regression (GPR) ซึ่งเป็น Machine Learning เพื่อทำนายค่าการประเมินของมนุษย์จากข้อมูลเครื่องมือ. ผลการศึกษาพบว่าการรับรู้ต่างกัน เช่น Paripari และ Karikari จะถูกเน้นด้วยเสียงในอากาศ ขณะที่ Sakusaku และ Zakuzaku จะขึ้นอยู่กับแรงและการสั่นสะเทือนมากกว่า โดยแบบจำลอง GPR สามารถทำนายผลการประเมินทางประสาทสัมผัสได้แม่นยำในทุกเงื่อนไข [76]

F. Ni *et al.* ศึกษาได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับความกรอบ (Crispness) โดยใช้เทคนิคแบบไม่ทำลาย (Non-destructive) ผ่านออปติคัลไฟเบอร์สเปกโทรสโกปี (Optical fiber spectroscopy) เพื่อทดแทนการประเมินด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) แบบดั้งเดิมที่ต้องทำลายตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมในช่วง 450-1000 นาโนเมตร และใช้อัลกอริทึม ได้แก่ SPA (Successive Projections Algorithm) และ x-LW (X-loading weights) เพื่อคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพ (Effective wavelengths) ในการลดความซับซ้อนของข้อมูล จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองการทำนายโดยเปรียบเทียบวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ PLS (Partial Least Squares), RBNN (Radial Basis Neural Networks), MLPNN (Multilayer Perceptron Neural Networks) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง MLPNN เมื่อใช้ร่วมกับการคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพ สามารถทำนายความกรอบของแอปเปิ้ลพันธุ์ "Fuji" และ "Qinguan" ได้ด้วยความแม่นยำสูงถึง 97.8% และ 99.9% ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีศักยภาพสูงในการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจวัดความกรอบโดยไม่ต้องทำลายผลผลิต [77]

Cai *et al*. ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับแบบผสมผสานระหว่างเสียงและแรง (Acoustic-force Detection Method) ที่สะดวก เพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของบะหมี่แห้งจีนในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยการทดสอบใช้วิธีดัดโค้งสามจุด (Three-point Bending) เพื่อบันทึกกราฟแรง-การกระจัด (Force-displacement Curves) พร้อมกันกับ สเปกโตรแกรมเสียง (Acoustic Spectrograms) ณ จุดแตกหัก ผลการวิจัยพบว่าค่าพารามิเตอร์ทางกล (เช่น แรงเฉือนสูงสุด และ Young's modulus) และค่าลักษณะเฉพาะทางเสียง (Acoustic Eigenvalues เช่น Wave Crest และ Signal Maximum) ต่างก็มี แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกัน ตลอดกระบวนการอบแห้ง โดยพบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนว่า ยิ่งบะหมี่มีความแข็ง (Rigidity) และความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Strength) มากขึ้นโดยวัดจากค่าทางกล เสียงที่ปล่อยออกมา ณ จุดแตกหักก็ยิ่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [78]

ตารางที่ 2.1 สรุปวรรณกรรมวิจารณ์

งานวิจัย	ผู้วิจัย	ตัวแปรในการวิจัย	สรุปผลวิจัย
1. Crispness, the Key for the Palatability of “Kakinotane”: A Sensory Study with Onoma-topoeic Words	A. Saita, K. Yamamoto, A. Raevskiy, *et al*.	**ตัวแปรต้น:** ความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบที่รับรู้และความอร่อยของข้าวเกรียบญี่ปุ่นห้าชนิดที่เรียกว่า "Kakinotane" **ตัวแปรตาม:** วิธี TDS อิทธิพลต่อการอธิบายความแตก ต่างของเนื้อสัมผัสของอาหารมากกว่าข้อมูลทางวัตถุวิสัย	การทดลองสามารถแยก แยะความแตกต่างของความคมชัดของ "Kakino-tane" ได้โดยใช้วิธี TDS และ TDL รวมถึงชี้ให้เห็นว่าคำเลียนเสียงที่ใช้เป็นตัวอธิบายในวิธี TDS อิทธิพลต่อการอธิบายความแตก ต่างของเนื้อสัมผัสของอาหารมากกว่าข้อมูลทางวัตถุวิสัย
2. Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products	E. Çars, K. Duerrschmid, G. Schleining	**ตัวแปรต้น:** ความแตกต่างกันของเครื่องมือทั้งสองวิธีที่เกี่ยวกับความสามารถแยกแยะผลิตภัณฑ์ที่กรอบมีคุณภาพต่างกันและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของเครื่องมือทั้งสอง **ตัวแปรตาม:** เครื่องมือทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ด้านคุณภาพในการทดสอบที่แตกต่างกันตามประเภทของเวเฟอร์	การเปรียบเทียบด้วยเครื่องมือทั้งสองวิธีที่เกี่ยวกับความสามารถในการแยกแยะผลิต ภัณฑ์ความกรอบที่มีคุณภาพต่างกัน โดยผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวิธีหักครึ่งของเครื่องมือวัดทำให้ได้ค่าความดันเสียงสูงสุด r = 0.89 และวิธีการหัก 3 ส่วน ทำให้ทราบค่าความดันเสียงสูงสุด r = 50

ตารางที่ 2.1 สรุปวรรณกรรมวิจารณ์ (ต่อ)

งานวิจัย	ผู้วิจัย	ตัวแปรในการวิจัย	สรุปผลวิจัย
3. Nondestructive detection of apple crispness via optical fiber spectroscopy based on effective wavelengths	F. Ni, *et al*.	**ตัวแปรต้น:** การทดสอบเนื้อสัมผัสโดยไม่ทำลายพื้นผิวแอปเปิ้ล **ตัวแปรตาม:** ความแม่นยำในการคาดการณ์ของแบบจำลองสำหรับพันธุ์แอปเปิ้ล "ฟูจิ" และ "ชิงกวน"	การศึกษานี้สเปกโทรสโกปีได้รับการเสนอให้เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายในการตรวจจับความฉ่ำน้ำของแอปเปิ้ลได้ โดยผลลัพธ์แสดงเป็นกราฟเส้นโค้งการสะท้อนแสงทางสเปกตรัมระหว่าง 450 nmถึง 1,000 nm ผลการวิจัยข้างต้นเลือกความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพและการสร้างแบบจำลอง MLPNN สามารถตรวจจับความกรอบของแอปเปิ้ลด้วยความแม่นยำสูงสุด ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบกับแอปเปิ้ล "ฟูจิ" และ "ชิงกวน" โดยมีความแม่นยำในการคาดการณ์สูงถึง 97.8% และ 99.9% ตามลำดับ
4.Quick assess-ment of the potato chip crispness using the mechanical acoustic mea-surement method	H. Xu, Y. Zhao, *et al*.	**ตัวแปรต้น:** การประเมินความกรอบของอาหารการทดสอบเชิงกลอะคูสติก **ตัวแปนตาม:** ความสามารถแยกความแตกต่างได้อย่างมีประสิทธิภาพตามพารามิเตอร์ คือ แรงสูงสุด (Fmax) และพลังงานเสียงสูงสุดในหน่วยเวลา (SEmax)	การพัฒนาการประเมินความกรอบของอาหารอย่างรวดเร็วโดยทดสอบเชิงกลอะคูสติกโดยใช้พารามิเตอร์สองพารามิเตอร์ คือ แรงสูงสุด และพลังงานเสียงสูงสุดในหน่วยเวลา เพื่อประเมินความกรอบของมันฝรั่งทอดแห้ง พบว่าการทดสอบทางกลและอะคูสติกเสร็จสิ้นในเวลาประมาณ 1.2 วินาที และมันฝรั่งทอดมีการกระจายทางสถิติสำหรับ Fmax มีค่าเฉลี่ยทางสถิติ 13.48 N และ SEmax 93.51 mV·ms ทำให้สรุปได้ว่า"ความคมชัด" ทางประสาทสัมผัสมีความสัมพันธ์ที่ดีกับสถิติเฉลี่ย SEmax งานนี้แสดงให้เห็นว่าเป็นไปได้สำหรับการวัดความกรอบของอาหารอย่างรวดเร็วโดยใช้วิธีการเชิงกลและอะคูสติกนี้

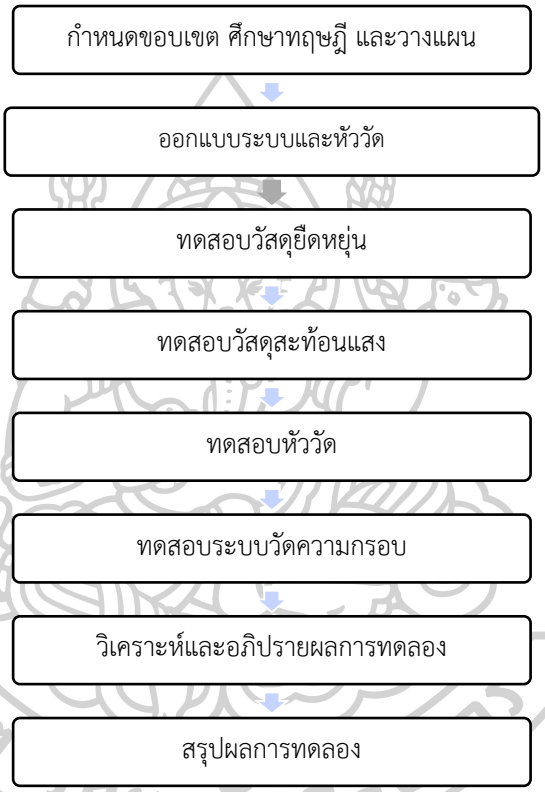
ตารางที่ 2.1 สรุปวรรณกรรมวิจารณ์ (ต่อ)

งานวิจัย	ผู้วิจัย	ตัวแปรในการวิจัย	สรุปผลวิจัย
5. Nondestructive Determination of Apple Internal Qualities Using Near-Infrared Hyperspectral Reflectance Imaging	J. Dong and W. Guo	**ตัวแปรต้น**: การประเมินแอปเปิ้ลด้วยเทคโนโลยีการถ่ายภาพสะท้อนแสงไฮเปอร์สเปกตรัม **ตัวแปรตาม**: ปริมาณของความฉ่ำน้ำ (SSC) ความหนาแน่นความชื้น (MC) และค่า pH ของแอปเปิ้ล 'ฟูจิ'	เทคโนโลยีการถ่ายภาพสะท้อนแสงไฮเปอร์สเปกตรัมในบริเวณอินฟราเรดใกล้ (900–1,700 นาโนเมตร) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินปริมาณของความฉ่ำน้ำ (SSC) ความหนาแน่นความชื้น (MC) และค่า pH ของแอปเปิ้ล 'ฟูจิ' ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า SSC และ MC สามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำโดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ทั้งหมดการเบี่ยงเบนการคาดการณ์ที่เหลืออยู่ที่ 3.49, 5.51 และ 2.06 ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพสะท้อนแสงไฮเปอร์สเปกตรัมใกล้อินฟราเรดเป็นวิธีที่ไม่รุกรานในการทำนาย SSC, MC และ pH ของแอปเปิ้ลพร้อมกันได้

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจารณ์และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทำทราบถึงการพัฒนาเครื่องมือวัดความกรอบในรูปแบบที่หลากหลาย รวมถึงแสดงให้เห็นความซับซ้อนของการทดสอบและการแยกแยะจำแนกการทดลองทดสอบความกรอบของอาหาร อย่างไรก็ตาม วรรณกรรมและทฤษฎีที่ได้กล่าวไปข้างต้นเป็นการพัฒนาภายนอกประเทศ ทำให้เห็นแนวทางในการทดลองพัฒนาตัวตรวจจับเพื่อให้อุตสาหกรรมอาหารภายในประเทศมีการเข้าถึงเครื่องมือวัดความกรอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอการดำเนินงานการพัฒนาตัวตรวจจับต้นแบบ ชนิดใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดระดับเสียงความกรอบของขนมขบเคี้ยว สามารถแสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานการพัฒนาตัวตรวจจับสำหรับวัดความกรอบ ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนหลัก ๆ ออกเป็น 8 ขั้นตอน เริ่มจากการกำหนดขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์และศึกษาทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาตัวตรวจวัดความกรอบดังทฤษฎีที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 รวมถึงวางแผนและออกแบบการทดลอง โดยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ถูกนำมาใช้ในระบบตัวตรวจวัดความกรอบ นอกจากนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้ยังมีการออกแบบหัววัดจึงมีการทดสอบวัสดุยืดหยุ่นและทดสอบวัสดุสะท้อนแสง ซึ่ง 2 การทดลองนี้เป็นเพียงองค์ประกอบของหัววัดตัวตรวจจับเท่านั้น ในการทดสอบหัววัดหัววัดทั้ง 3 โมเดลจะถูกทดสอบกับ

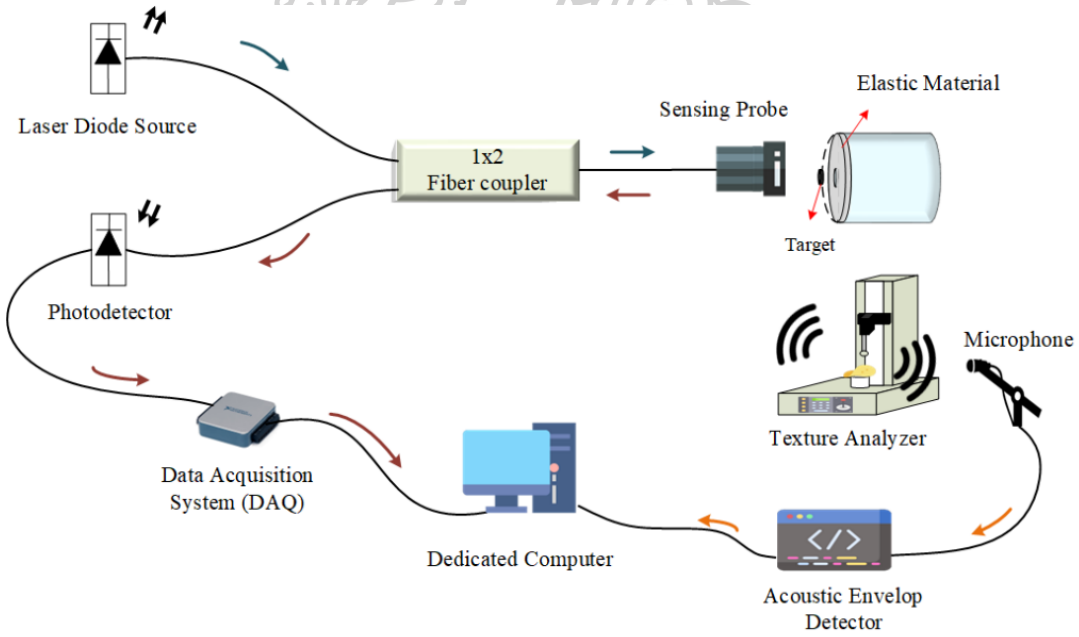
ขนมขบเคี้ยวชนิเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบหาหัววัดที่เหมาะสมกับการตรวจวัดเสียงความกรอบ เมื่อได้หัววัดที่เหมาะสมจะนำไปทดสอบกับระบบขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน และผลลัพธ์ที่ได้จากตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นถูกนำเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ก่อนนำไปวิเคราะห์ผลอาศัยโปรแกรม MATLAB และสรุปผลการทดลอง สามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

3.1 การออกแบบระบบตัวตรวจจับและหัววัด

การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ แบ่งออก 2 ส่วนหลัก คือส่วนของระบบตัวตรวจับใยแก้วนำแสง และส่วนของหัววัด ซึ่งรายละเอียดการออกแบบมีดังนี้

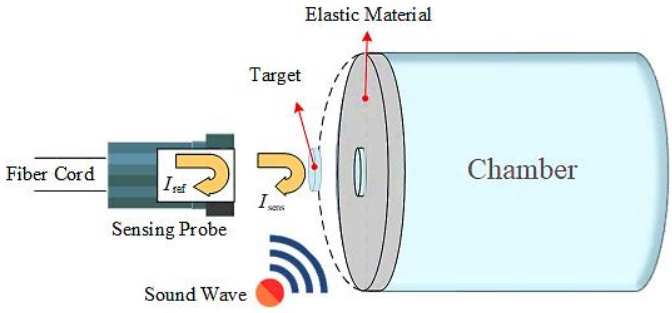
3.1.1 การออกแบบระบบตัวตรวจวัดความกรอบ

การออกแบบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบสำหรับวัดความกรอบ โดยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ถูกนำมาใช้ในระบบตัวตรวจวัดความกรอบครั้งนี้ นอกจากนั้นเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหารและไมค์โครโฟนถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิงนั้น ผลลัพธ์จะแสดงผ่านโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงต้นแบบชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดค่าความกรอบ

การทำงานของระบบถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของเครื่องมือวัดอ้างอิง และระบบตรวจจับความกรอบ การทำงานของระบบจะเริ่มจากเครื่อง Texture analyzer (T.A.) ทำหน้าที่จำลองการเคี้ยวของมนุษย์อาศัยการกดทะลุ ทำให้เกิดคลื่นเสียงจากการแตกหักของขนมขบเคี้ยว คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นเดินทางผ่านอากาศไปที่ไมโครโฟนที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องรับคลื่นเสียง และส่วนของระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงจะตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัสดุสะท้อนแสง โดยเสียงความกรอบเดินทางผ่านอากาศไปยังวัสดุยืดหยุ่นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะตัวสะท้อนแสงที่ติดอยู่บนวัสดุยืดหยุ่น การเปลี่ยนแปลงของระยะการกระจัดทำให้สัญญาณวัดที่ได้เปลี่ยนไปจากเดิมระยะของตัวสะท้อนสัญญาณการวัดที่เปลี่ยนไปจะส่งผลให้เกิดริ้วแทรกสอดขึ้น ซึ่งการทำงานของตัวตรวจจับจะสามารถแสดงได้ดังนี้



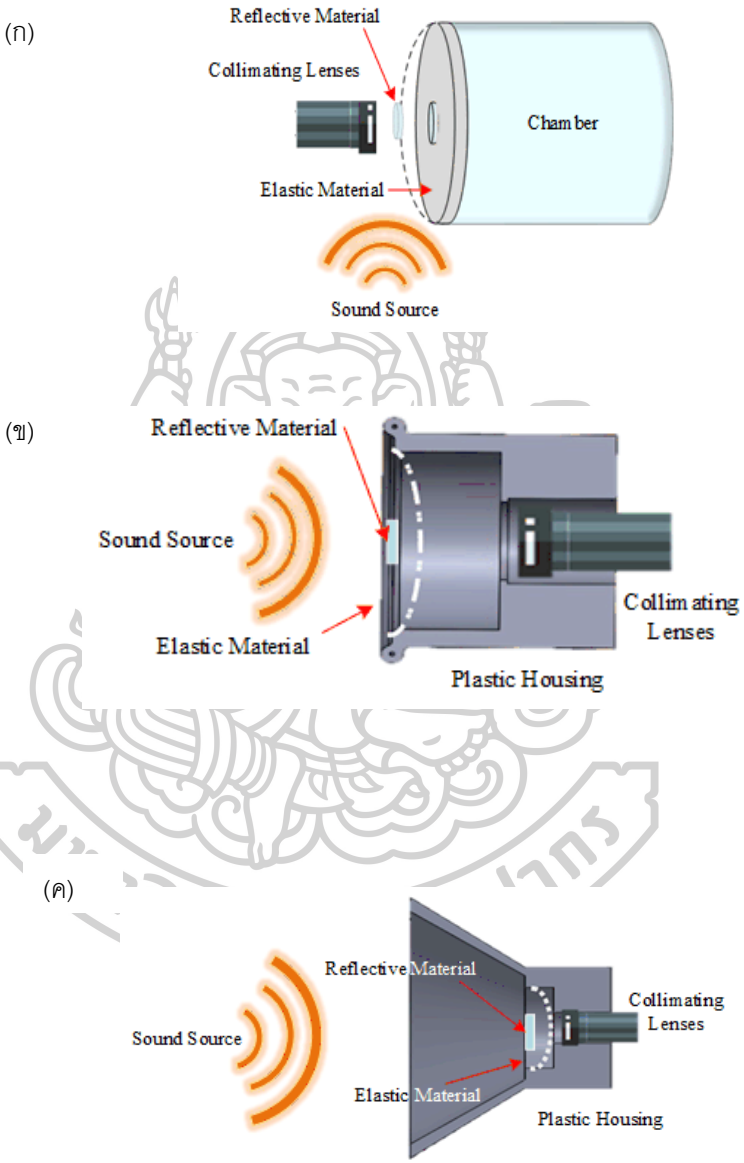
รูปที่ 3.3 ลักษณะหัววัดเกิดการขยับเมื่อเกิดเสียงความกรอบ

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นลักษณะการทำงานของตัวตรวจจับ ริ้วแทรกสอดที่เกิดขึ้นจากเสียงความกรอบจะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการเทคนิคนับริ้วแทรกสอด โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ในการตรวจจับค่าสูงสุดของสัญญาณ (Peak detection) จำนวนค่าสูงสุดที่ได้ถูกนำเข้าสู่ (2.8) หาระยะการกระจัด เมื่อได้ระยะการกระจัดจะจะถูกแทนค่าใน (2.9) เพื่อให้ได้มาซึ่งความดัน เพื่อแปลงค่าความดันที่ได้ให้เป็นค่าระดับความดันเสียง (SPL_{FFPI}) จะเป็นตามความสัมพันธ์ของ (2.3)

3.1.2 การออกแบบหัววัดตัวตรวจจับ

ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นมีการออกแบบหัววัด 3 โมเดล โดยการนำวัสดุสะท้อนแสงและวัสดุยืดหยุ่นที่ผ่านการทดสอบแล้วมาเป็นองค์ประกอบของหัววัด ซึ่งหัววัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อหาหัววัดที่เหมาะสมกับการวัดระดับความดันเสียงความกรอบ หัววัด 3 โมเดล ได้แก่ โมเดล A เป็นการนำโครงสร้างพื้นฐานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงมาใช้ ในขณะที่โมเดล B มีการเพิ่มโครงพลาสติกเข้ามาและย้ายวัสดุสะท้อนแสงให้อยู่ในโครงพลาสติกเพื่อให้หัววัดสามารถรับเสียงได้ตรงมากขึ้น และโมเดล C มีลักษณะคล้ายกับโมเดล B แต่มีการเพิ่มหน้ารับเสียงลักษณะคล้าย

ลำโพงโดยคาดว่าจะช่วยเพิ่มการรับเสียงมากยิ่งขึ้น การทดสอบทั้ง 3 โมเดลจะถูกนำไปทดสอบกับขนมชนิดเดียวกัน เพื่อหาโมเดลที่ตรวจวัดความกรอบได้ดีที่สุด สามารถแสดงภาพแต่ละโมเดลได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบหัววัดทั้ง 3 โมเดล: (ก) หัววัดโมเดล A, (ข) หัววัดโมเดล B, (ค) หัววัดโมเดล C

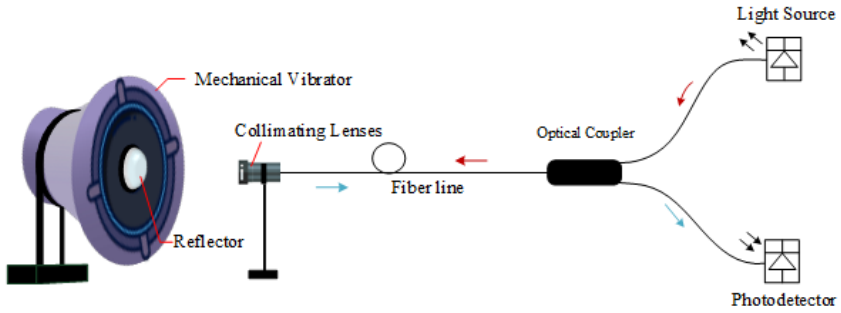
3.2 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่น

การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นเพื่อทดสอบคุณสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นที่ถูกนำมาใช้เป็นพื้นผิวเคลื่อนที่ (Moving target) โดยการทดสอบจะทำให้ทราบถึง ค่าความหนา ค่าความเค้น ความเครียด อัตราส่วนปัวร์ซอง และค่ามอดูลัสของยัง ในการทดสอบวัสดุยืดหยุ่นจะยึดตามมาตรฐาน ASTM: International: American Society for Testing and Materials ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) สำหรับวัสดุยืดหยุ่น อาศัยเครื่อง *Universal Tensile Tester model: CY6040A12* สามารถแสดงตัวอย่างเครื่องมือวัดอ้างอิงได้ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดวัสดุยืดหยุ่น Universal Tensile Tester model: CY6040A12

3.3 การทดสอบวัสดุสะท้อนแสง

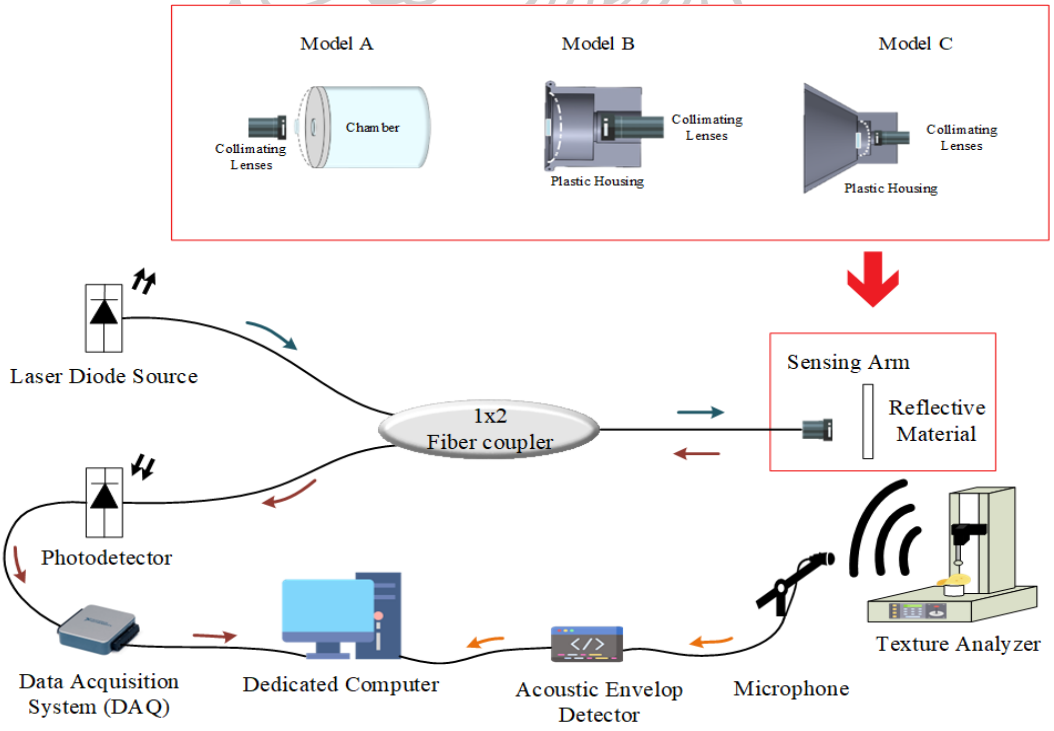
การทดลองวัสดุสะท้อนแสงได้นำวัสดุสะท้อนแสงมาทดสอบที่สัญญาณขาเข้าความถี่ 1 เฮิร์ต ค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) 2 โวลต์ ทำซ้ำ 10 ครั้ง ทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพการสะท้อนแสงที่เหมาะสม โดยทดสอบเพื่อเปรียบเทียบวัสดุสะท้อนแสง 2 ประเภท คือ วัสดุสะท้อนแสงแบบฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึมและกระจกเคลือบอลูมิเนียม ในการทดลองจะนำวัสดุสะท้อนแสงติดเข้ากับลำโพง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การทดลองวัสดุสะท้อนแสง

3.4 การทดสอบหัววัด

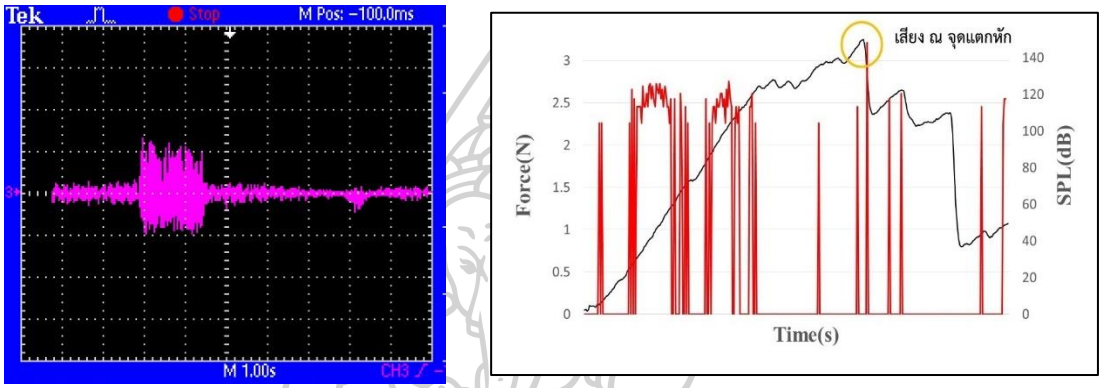
การทดสอบหัววัดเป็นการทดสอบเพื่อหาหัววัดที่เหมาะสมกับการวัดความกรอบหัววัดจะถูกนำมาติดตั้งเข้ากับระบบตัวตรวจวัดความกรอบที่พัฒนาขึ้น การทดสอบหัววัดจะทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบ โดยการทดสอบซ้ำจำนวน 5 ครั้งต่อโมเดล ผลลัพธ์ของแต่ละโมเดลจะถูกนำไปหาค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละโมเดล ซึ่งการเปรียบเทียบความคาดเคลื่อนของผลลัพธ์แต่ละโมเดลจะบ่งชี้ถึงความเหมาะสมสำหรับวัดความกรอบ โมเดลแต่ละโมเดลจะถูกนำไปประกอบเข้าในส่วนของแขนวัดของระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างแสดงตำแหน่งการแทนที่ของหัววัด

3.5 การทดสอบระบบตัวตรวจวัดความกรอบ

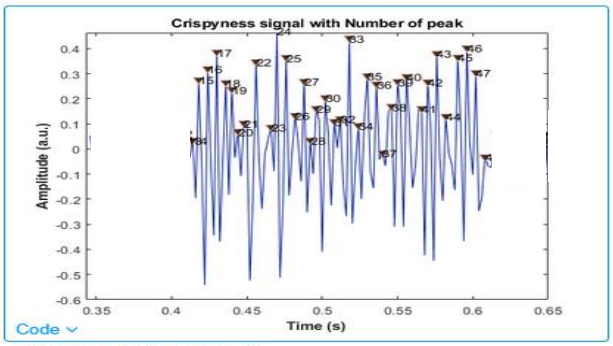
ระบบตัวตรวจวัดความกรอบที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้นถูกนำมาประกอบกับหัววัดที่มีความเหมาะสมสำหรับการวัดความกรอบ เพื่อทดสอบระบบตัวตรวจวัดความกรอบ โดยการทดสอบนี้จะนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาทดสอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างผลลัพธ์ที่วัดได้จากตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องมือวัดอ้างอิงสามารถแสดงดังรูปที่ 3.8



(ก) (ข)

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ (ก) ผลลัพธ์จากตัวตรวจจับความกรอบที่พัฒนาขึ้น (ข) ผลลัพธ์จากเครื่องมือวัดอ้างอิง

ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิงและผลลัพธ์จากตัวตรวจจับจะถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบหาค่าความคาดเคลื่อนของตัวตรวจจับความกรอบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB

รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหลังป้อนสัญญาณริ้วการแทรกสอดที่เกิดจากเสียงความกรอบ อย่างไรก็ตาม ค่าความคลาดเคลื่อนจะบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการสร้างตัวตรวจจับต้นแบบว่าสามารถใช้ทดแทนเครื่องมือวัดที่มีอยู่ได้หรือไม่

3.6 อุปกรณ์การทดลอง

การพัฒนาระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ ตามที่กล่าวมาข้างต้นการออกแบบระบบตัวตรวจจับและระเบียบวิธีการทดสอบ การดำเนินการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือและอุปกรณ์ ในส่วนนี้จึงขอนำเสนอรายละเอียดคุณลักษณะจำเพาะ (Specifications) ของเครื่องมือและอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง ดังต่อไปนี้

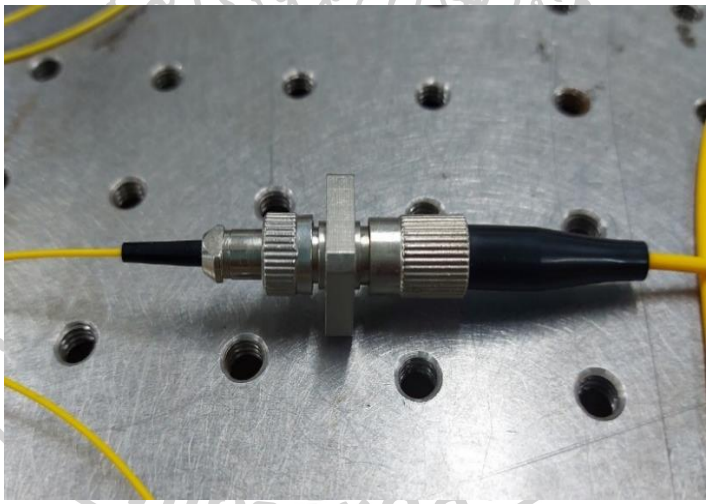
3.6.1 เครื่องมือวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Digital storage oscilloscope) มีหน้าที่แสดงผลและบันทึกรูปคลื่นแรงดัน/กระแสตามเวลา เพื่อวัดค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) ความถี่ เวลาไต่ขึ้น/ลง และสัญญาณรบกวน โดยมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และอัตราการสุ่มเป็นตัวกำหนดความละเอียดเวลา ในการทดลองนี้เครื่องมือวัดรูปคลื่นถูกนำมาใช้เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นไฟฟ้าสำหรับตรวจรูปคลื่น ซึ่งผลลัพธ์สามารถแสดงหน้าจอหรือเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ เพื่อนำริ้วการแทรกสอดไปวิเคราะห์ต่อไป สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Digital storage oscilloscope)

3.6.2 บอร์ดทางแสง (Optical bread board) เป็นแผ่นฐานเรียบที่ลดการสั่นสะเทือน มีตะแกรงรูเกลียวสำหรับยึดอุปกรณ์ออปติก ช่วยจัดวางและคงตำแหน่งองค์ประกอบออปติก เช่น เลนส์ กระจก และอะแดปเตอร์คัปปลิง ให้คงที่เชิงกลและเชิงมุม ผิวด้านมักชุบดำเพื่อลดแสงสะท้อน สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.11

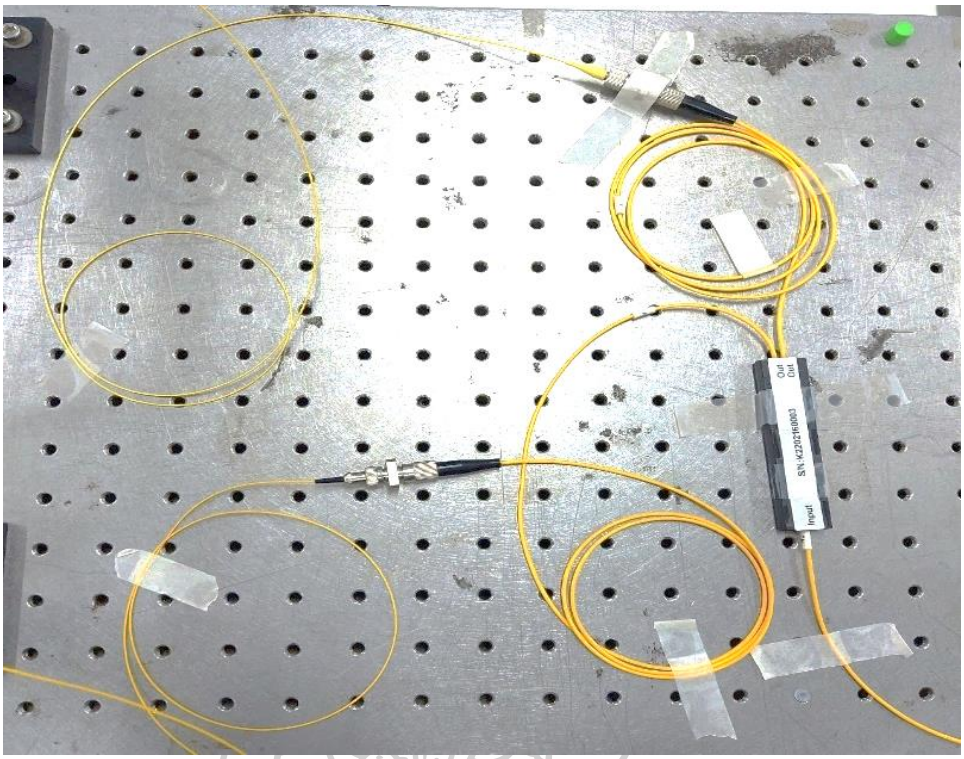
รูปที่ 3.11 บอร์ดทางแสง (Optical bread board)
(ที่มา: https://www.thorlabs.com/thorproduct)

3.6.3 อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้วนำ (Mating sleeve) ทำหน้าที่จัดแนวเฟอร์รูลของคอนเนคเตอร์สองด้านให้อยู่แกนเดียวกัน ลดการเยื้องศูนย์และช่องว่าง สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.12



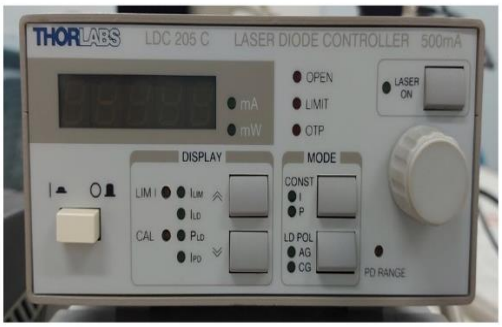
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแก้วนำแสง (Mating sleeve)

3.6.4 สายส่งสัญญาณใยแก้วนำแสง (Fiber optic patch cable) สายส่งสัญญาณสำหรับใยแก้วนำแสงเดินทางเดียว หน้าที่คือส่งสัญญาณทางแสงระหว่าง FC/PC ไปยัง FC/APC โดยไม่ได้มีหน้าเป็นตัวตรวจจับ สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.13

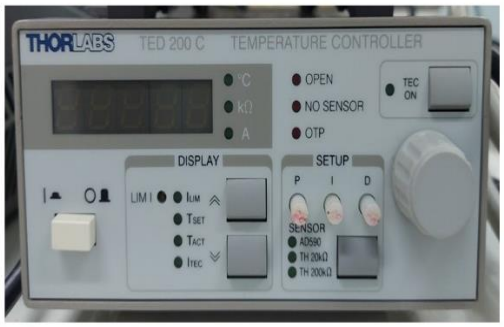


รูปที่ 3.13 สายส่งสัญญาณใยแก้วนำแสง (Fiber optic patch cable)

3.6.5 ชุดควบคุมแหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์ไดโอด (Complete laser diode operation starter set) เป็นระบบครบชุดสำหรับขับและควบคุมเลเซอร์ไดโอดเชิงความแม่นยำ ประกอบด้วย ชุดขับแสงเลเซอร์ (Laser driver) กระแสคงที่เพื่อกำหนด/รักษากระแสขับ และวงจรป้อนกลับจากโฟโต้ไดโอด เพื่อควบคุมกำลังแสง ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบ TEC ร่วมวงจรควบคุม PID ช่วยควบคุมอุณหภูมิ ลดการดริฟต์ของความยาวคลื่น กำลังเอาต์พุต และอุปกรณ์ แหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์ไดโอด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง หน้าที่หลักของเครื่องมือคือสร้างสภาวะการทำงานที่เสถียรและปลอดภัยสำหรับการทดลอง เพื่อลดความเสียหายของอุปกรณ์ สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.14



(ก)

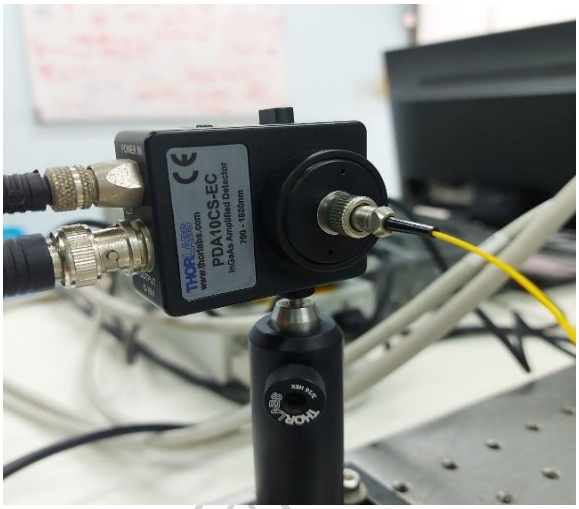


(ข)

(ค)

รูปที่ 3.14 ชุดควบคุมการกำเนิดลำแสงเลเซอร์; (ก) ชุดควบคุมกระแสของแหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์ไดโอด, (ข) ชุดควบคุมอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์ไดโอด, และ (ค) อุปกรณ์แหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์ไดโอด

3.6.6 อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector) ตัวตรวจจับแสง มีหน้าที่เปลี่ยนค่าความเข้มแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และส่งออกไปยังเครื่องมือวัดรูปสัญญาณไฟฟ้า ใช้หลักโฟโตอิเล็กทริก สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.15



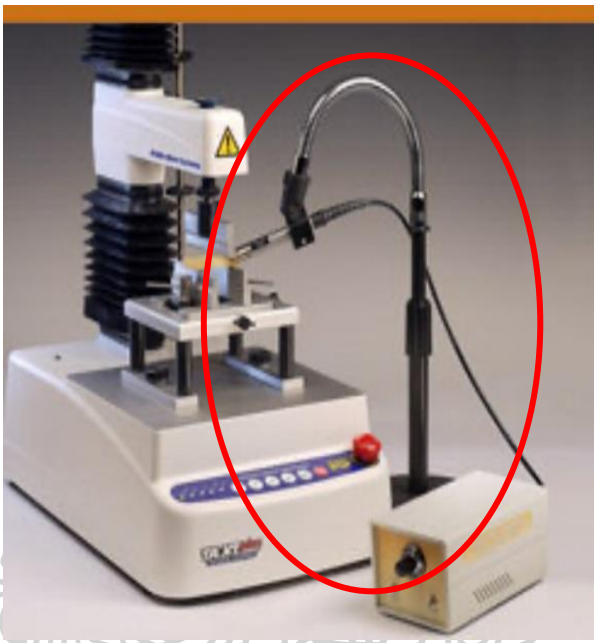
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector)

3.6.7 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser: T.A.) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจำลองการบดเคี้ยวอาหารของมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์แรงที่ใช้สำหรับการกดอาหารจนเกิดการแตกหักได้ สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser)

(ที่มา: www.stablemicrosystems.com)

3.2.8 เครื่องวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED) เป็นเครื่องมือวัดค่าสัญญาณเสียง โดยใช้การประมวลผลดิจิทัล AED ถูกนำมาใช้สำหรับบันทึกเสียงของขนมขบเคี้ยวขณะแตกหัก โดยใช้ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (T.A.) ที่เป็นเครื่องมือจำลองการเคี้ยวของมนุษย์ สามารถแสดงเครื่องมือได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED)
(ที่มา: www.stablemicrosystems.com)

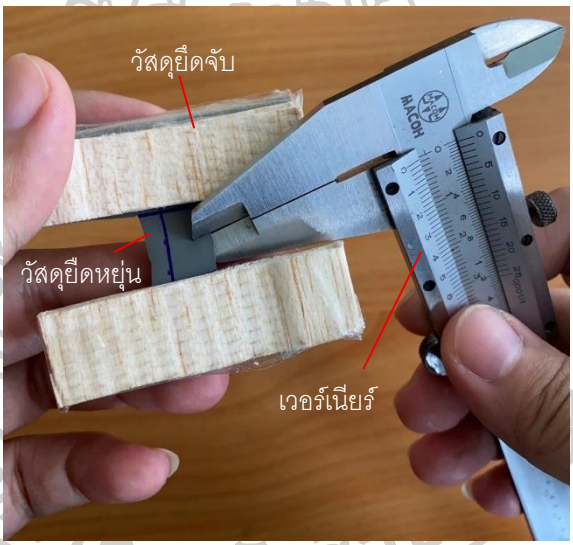
จากการออกแบบและติดตั้งชุดการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น ระบบที่ได้จะถูกนำไปทดสอบกับขนมขบเคี้ยวเพื่อยืนยันถึงความเป็นไปได้และทดสอบประสิทธิภาพของระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับวัดความกรอบ ซึ่งผลลัพธ์ของการทดลองและการวิเคราะห์จะถูกรวบรวมและนำเสนอรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4
ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

ผลการดำเนินการของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ผลการทดอสบวัสดุยืดหยุ่น ผลการทดสอบวัสดุสะท้อนแสง ผลการพัฒนาหัววัด และผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบวัสดุยืดหยุ่นจะทำให้ทราบค่าความหนา ค่าความยาว และความกว้างที่เปลี่ยนไปของวัสดุยืดหยุ่น ซึ่งการวัดขนาดก่อนและหลังการเตรียมวัสดุมีการนำเวอร์เนียร์เป็นเครื่องมือวัด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดคลื่นเสียง (Acoustic Envelope Detector: AED)

เมื่อทราบค่าดังกล่าวแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการการหาอัตราส่วนปัวร์ซอง การทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยผลลัพธ์จากการทดสอบสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1 (รายละเอียดผลการทดลองภาคผนวก ก)

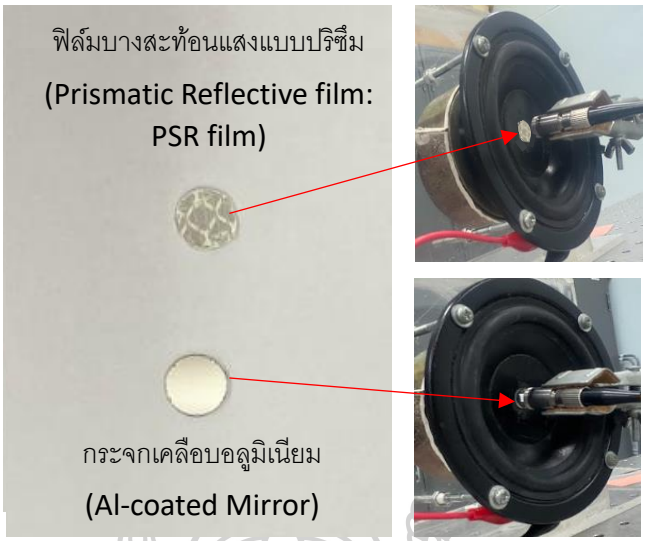
รูปที่ 4.2 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นโดยอาศัยเครื่อง Universal Tensile Tester

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น

คำอธิบาย	**สัญลักษณ์**	**ค่าตัวแปร**	
ค่ายังมอดูลัสเฉลี่ย	E	2.73	MPa
ความหนาของวัสดุยืดหยุ่น	h	0.22	mm
อัตราส่วนปัวร์ซองเฉลี่ย	v	0.28	
ค่ารัศมีของการวัสดุโก่งตัว	R_0	15.00	mm
ความยาวคลื่น	λ	1311.82	nm

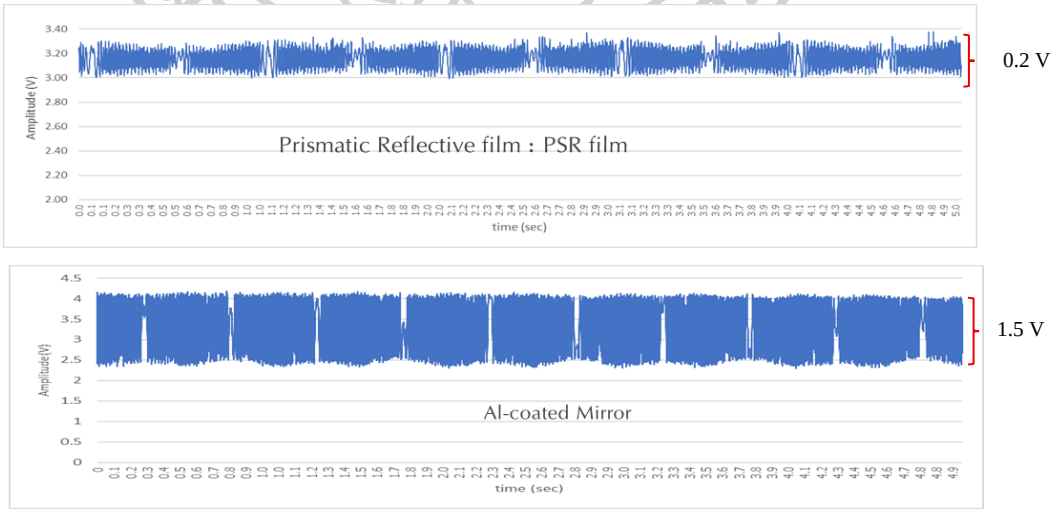
4.2 ผลการทดสอบวัสดุสะท้อนแสง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพิจารณาที่ค่าระดับความสูงของสัญญาณ (Amplitude) ที่ได้จากการวัดฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึม มีค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เท่ากับ 0.2 โวลต์ ในขณะที่กระจกเคลือบอลูมิเนียมมีค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เท่ากับ 1.5 โวลต์ ทำให้เห็นว่ากระจกเคลือบมีอัตราการสะท้อนหรือค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude)ที่สูงกว่าชัดเจนกว่าฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึม นอกจากนี้จำนวนริ้วการแทรกสอดของกระจกเคลือบอลูมิเนียมที่มีมากกว่าฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึมสองเท่า นั้นเกิดจากปรากฏการณ์ดับเบิ้ลรีแฟรคชั่น (Double reflection effect) ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความละเอียดที่มากขึ้น ซึ่งการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดลองวัสดุสะท้อนแสง

การทดสอบวัสดุสะท้อนแสง 2 ชนิด ทำให้ทราบว่ากระจกเคลือบอลูมิเนียมมีความเหมาะสมกับงานมากกว่าฟิล์มบางแบบสะท้อนแสงแบบปริซึม สัญญาณวัดสู่หัววัดมีค่าความสูงของระดับสัญญาณ (Amplitude)ที่เสถียรชัดเจนของกระจกเคลือบอลูมิเนียม ทำให้เลือกใช้เป็นกระจกเคลือบอลูมิเนียมในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 4.4



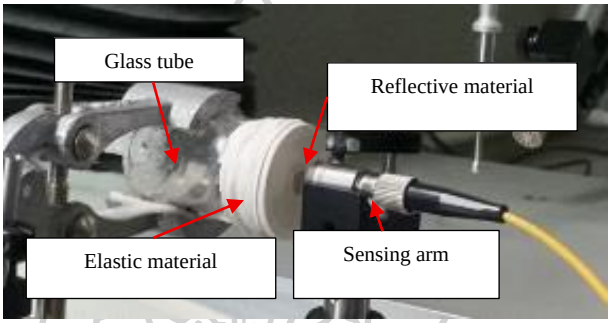
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างริ้วการแทรกสอดจากการทดสอบวัสดุสะท้อนแสง

4.3 ผลการพัฒนาหัววัดความกรอบ

การพัฒนาหัววัดทั้ง 3 โมเดล จากข้างต้นแสดงลักษณะการทำงานและแนวทางการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดแต่ละโมเดล ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง ของแต่ละโมเดลสามารถแสดงได้ดังนี้

4.3.1 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล A

โครงสร้างหัววัดทำมาจากแก้วปิดปากหลอดด้วยวัสดุยืดหยุ่นและติดวัสดุสะท้อนแสงไว้ตรงกลาง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างหัววัดโมเดล A

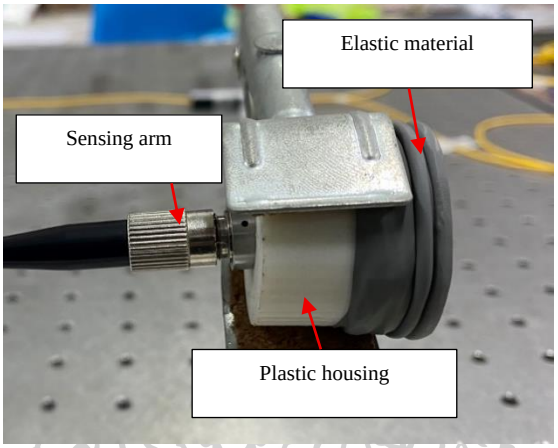
ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล A เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหัก ของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 160.67 – 165.07 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงได้อยู่ในช่วง 146.10 – 160.63 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 6.80% สามารถแสดงผลลัพธ์การทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล A

ครั้งที่	ระดับความดันเสียงตัวตรวจจับ (dB)	ระดับความดันเสียงอ้างอิง (dB)	ค่าความคาดเคลื่อน %
1	147.96	165.07	10.37
2	160.63	160.67	0.02
3	146.10	162.44	10.06
4	159.49	164.22	2.88
5	146.46	163.70	10.53
เฉลี่ย	152.13	163.22	6.80

4.3.2 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล B

โครงสร้างหัววัดทำมาจากพลาสติกปิดปากหลอดด้วยวัสดุยืดหยุ่นและติดวัสดุสะท้อนแสงไว้ตรงกลางข้างใน ซึ่งโครงสร้างอาศัยการพิมพ์แบบ 3D สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างหัววัดโมเดล B

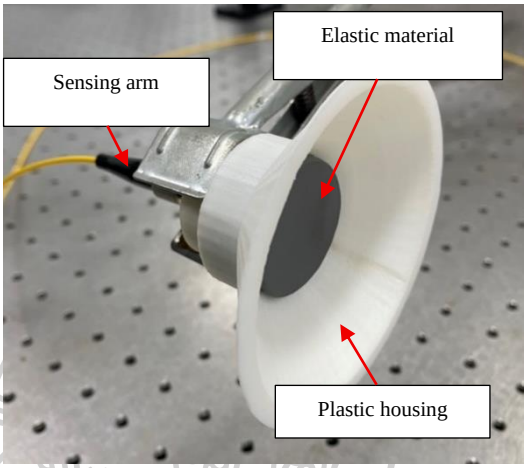
ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล B เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหัก ของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 160.33 – 168.48 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงได้อยู่ในช่วง 163.04 – 170.80 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.89 % สามารถแสดงผลลัพธ์การทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล B

ครั้งที่	ระดับความดันเสียงตัวตรวจจับ (dB)	ระดับความดันเสียงอ้างอิง (dB)	ค่าความคาดเคลื่อน %
1	169.25	164.60	2.82
2	164.98	162.98	1.43
3	170.80	168.48	1.38
4	163.04	164.53	0.90
5	164.98	160.33	2.90
เฉลี่ย	165.95	164.08	1.89

4.3.3 ผลลัพธ์หัววัดโมเดล C

หัววัดโมเดล C โครงสร้างหัววัดทำมาจากพลาสติกปิดปากหลอดด้วยวัสดุยืดหยุ่นและติดวัสดุสะท้อนแสงไว้ตรงกลางข้างในคล้ายกับโมเดล B แต่ด้วยโครงสร้างลักษณะทรงลำโพงจึงสามารถช่วยรับเสียงได้มากขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหัววัดโมเดล C

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล C เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหัก ของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 167.38 – 169.47 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงได้อยู่ในช่วง 166.34 – 170.80 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 6.80% สามารถแสดงผลลัพธ์การทดสอบได้ดังตารางที่ 4.4

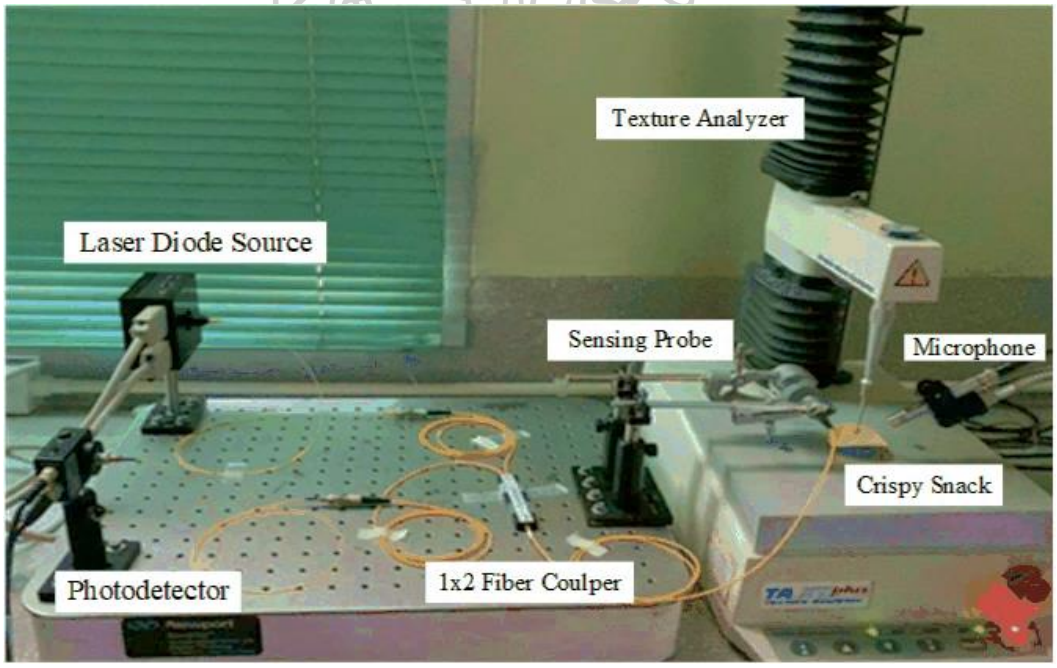
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล C

ครั้งที่	ระดับความดันเสียง ตัวตรวจจับ (dB)	ระดับความดันเสียง อ้างอิง (dB)	ค่าความคาดเคลื่อน %
1	168.49	167.38	0.67
2	166.34	167.56	0.73
3	166.34	167.87	0.91
4	170.80	169.47	0.79
5	169.25	169.23	0.01
เฉลี่ย	168.24	168.30	0.62

ผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบแต่ละโมเดลพบว่า โมเดล A มีค่าความคาดเคลื่อนที่กับ 6.80% ความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากโครงสร้างของตัวตรวจจับที่มี 2 ส่วนที่แยกออกจากกัน ทำให้การรับสัญญาณเสียงความกรอบรับได้ไม่ดี ในขณะที่โมเดล B มีค่าความคาดเคลื่อนที่กับ 1.89% มีการรับสัญญาณเสียงได้ดีมากขึ้น เมื่อวัสดุสะท้อนแสงและหัววัดถูกนำมาประกอบเข้าอยู่ในโครงพลาสติก ทำให้หันหน้ารับเสียงได้โดยตรง และโมเดล C มีค่าความคาดเคลื่อนที่กับ 0.62% ซึ่งหัววัดโมเดล C มีค่าความคาดเคลื่อนน้อยที่สุดจึงเลือกใช้โมเดลนี้กับระบบตัวตรวจจับใยแก้วสำหรับวัดความกรอบ

4.4 ผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ

การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบมีการนำหัววัดโมเดล C มาทดสอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะที่แตกต่างกันทางกายภาพ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ สามารถแสดงขนมขบเคี้ยวได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ

(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.9 ขนมขบเคี้ยวทั้ง 3 ชนิดสำหรับการทดสอบความกรอบ (ก) ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ (ข) มันฝรั่งทอดกรอบ (ค) ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ

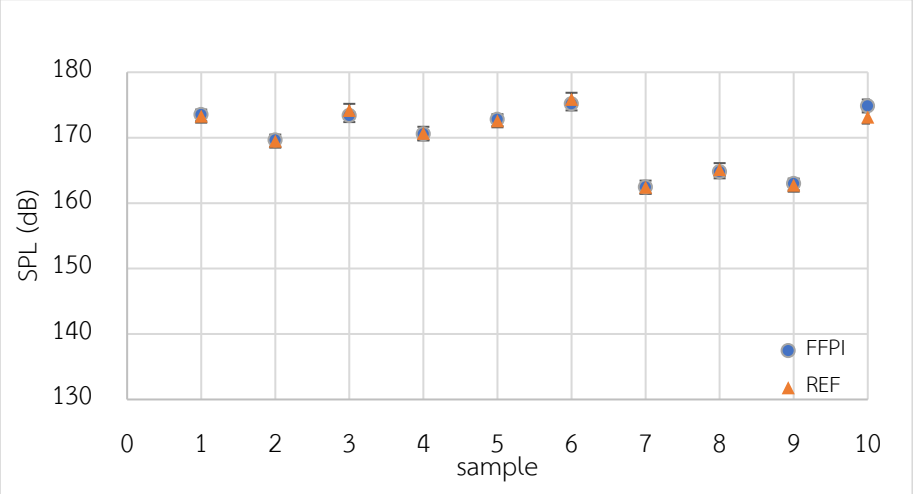
4.4.1 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 1 ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ

ผลลัพธ์จากการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบซ้ำ 10 ครั้ง ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของ ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ ที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่

ในช่วง 162.44 – 175.87 dB และตัวตรวจจับความกรอบตัวจับได้ระหว่าง 162.45 – 175.16 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.26 % และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.28 การทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ

ลำดับ	ระดับความดันเสียงอ้างอิง (dB)	ระดับความดันเสียง *FFPI* (dB)	*Error* (%)
1	173.30	173.53	0.13
2	169.48	169.64	0.10
3	174.17	173.38	0.45
4	170.67	170.57	0.05
5	172.59	172.79	0.12
6	175.87	175.16	0.40
7	162.44	162.45	0.00
8	165.11	164.79	0.20
9	162.75	162.99	0.14
10	173.15	174.86	0.98
เฉลี่ย	169.95	170.02	0.26



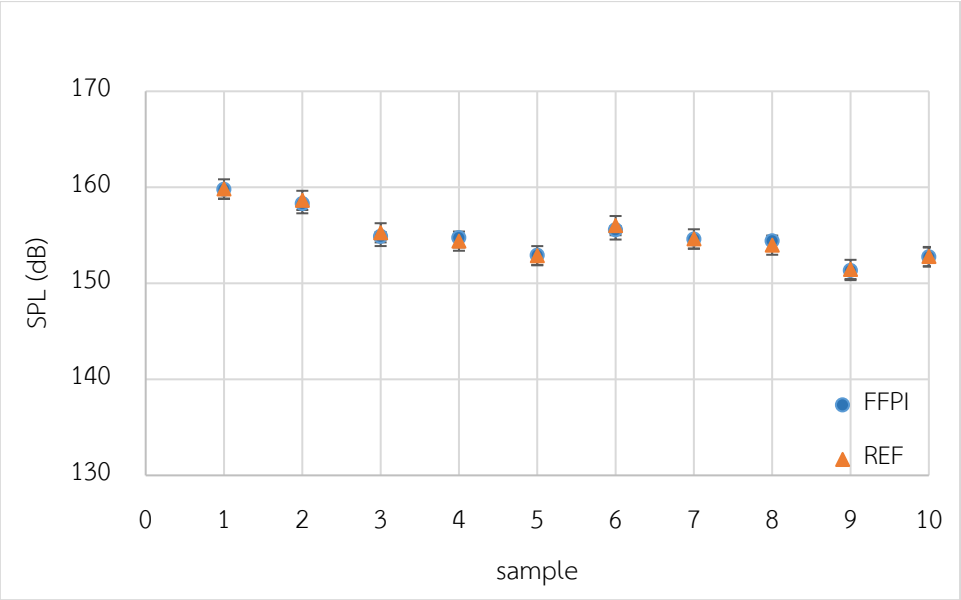
รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์ตัวตรวจจับเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงของข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ

4.4.2 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 2 มันฝรั่งทอดกรอบ

ผลลัพธ์จากการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำ 10 ครั้ง ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของ มันฝรั่งทอดกรอบ ที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ระหว่างช่วง 151.45 ถึง 159.83 dB และตัวตรวจจับความกรอบตัวจับได้ระหว่าง 151.33 ถึง 159.78 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 % และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.11 การทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับมันฝรั่งทอดกรอบ

ลำดับ	**ระดับความดันเสียงอ้างอิง (dB)**	**ระดับความดันเสียง *FFPI* (dB)**	***Error* (%)**
1	159.83	159.78	0.03
2	158.64	158.29	0.22
3	155.26	154.88	0.24
4	154.39	154.75	0.23
5	152.88	152.92	0.03
6	156.01	155.56	0.29
7	154.63	154.60	0.02
8	153.98	154.42	0.29
9	151.45	151.33	0.08
10	152.79	152.74	0.03
เฉลี่ย	154.99	154.93	0.15



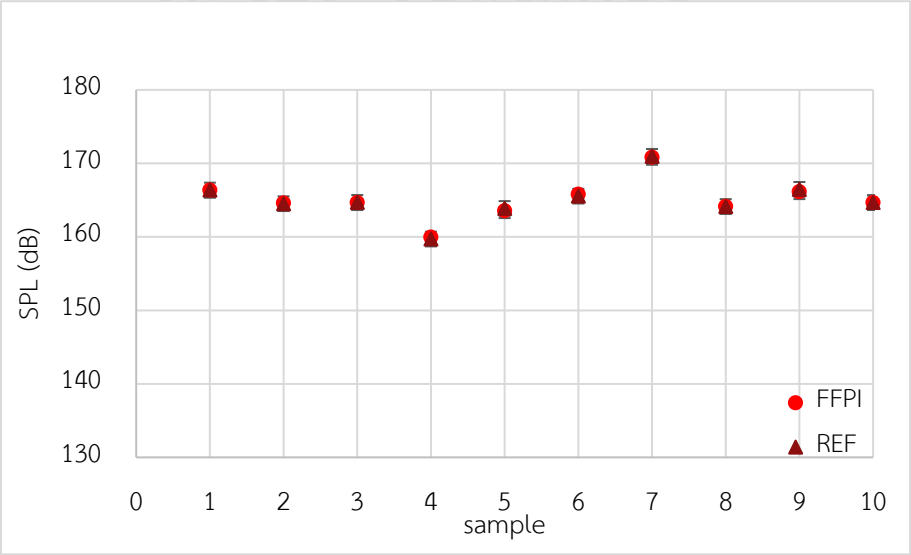
รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์ตัวตรวจจับเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงของมันฝรั่งทอดกรอบ

4.4.3 ผลการทดสอบขนมขบเคี้ยวชนิดที่ 3 ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ

ผลลัพธ์จากการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับข้าวโพดแผ่นทอดกรอบซ้ำ 10 ครั้ง ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของ ข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ ที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ระหว่าง 159.71 – 170.96 dB และตัวตรวจจับความกรอบตัวจับได้ระหว่าง 159.95 – 170.81 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.09 % และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.07 การทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบตัวตรวจจับความกรอบกับข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ

ลำดับ	ระดับความดันเสียงอ้างอิง (dB)	ระดับความดันเสียง *FFPI* (dB)	*Error* (%)
1	166.37	166.35	0.01
2	164.51	164.59	0.05
3	164.69	164.65	0.02
4	159.71	159.95	0.15
5	163.87	163.55	0.19
6	165.54	165.80	0.15
7	170.96	170.81	0.09
8	164.13	164.14	0.00
9	166.46	166.14	0.20
10	164.67	164.65	0.01
เฉลี่ย	165.09	165.06	0.09



รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์ตัวตรวจจับเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงของข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ

ผลการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 ชนิด เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้น จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้น พบว่าเครื่องมือมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) เท่ากับ 0.027 เดซิเบล ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำแสดงถึงความแม่นยำและความเสถียรในการทำงานของตัวตรวจจับ นอกจากนี้ ผลการประเมินยังบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของผลลัพธ์ที่ได้จากตัวตรวจจับในระดับสูงถึง 93.33% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าตัวตรวจจับสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องและเชื่อถือได้ในการทดสอบซ้ำ ๆ ในด้านของความไว (Sensitivity) ตัวตรวจจับมีอัตราส่วนของสัญญาณขาออกต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้าอยู่ที่ 0.20 μm/dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับมีความสามารถสูงในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของสัญญาณขาเข้าถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการตรวจจับเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟารี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (FFPI) สำหรับการวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยว โดยประยุกต์ใช้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงอาศัยการตรวจจับการโก่งตัวตามทฤษฎีของคิร์ชฮอฟฟ์-เลิฟ (Kirchhoff-Love's Plate Theory) ของแผ่นฟิล์มบางที่ตอบสนองต่อแรงดันเสียงจากการแตกหักของขนม ร่วมกับเทคนิคการนับริ้วแทรกสอด (Fringe Counting Technique) เพื่อแปลงเป็นค่าการกระจัด (Displacement) และคำนวณกลับเป็นค่าระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level: SPL) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการพัฒนาในครั้งนี้ จากการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ

การทดลอง	ผลลัพธ์ที่ได้
การทดสอบวัสดุยืดหยุ่น	ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบวัสดุยืดหยุ่นจะทำให้ทราบค่าดังนี้ ค่ายังมอดูลัสเฉลี่ย 2.73 MPa ค่ารัศมีของการวัสดุโก่งตัว 15.00 mm ความหนาของวัสดุยืดหยุ่น 0.22 mm อัตราส่วนปัวร์ซองเฉลี่ย 0.28
การทดสอบวัสดุสะท้อนแสง 2 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึม และกระจกเคลือบอลูมิเนียม	ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพิจารณาที่ค่าระดับความสูงของสัญญาณ (Amplitude) ที่ได้จากการวัดฟิล์มบางสะท้อนแสงแบบปริซึม มีค่า เท่ากับ 0.2 โวลต์ ในขณะที่กระจกเคลือบอลูมิเนียมมีค่า เท่ากับ 1.5 โวลต์ ทำให้เลือกใช้กระจกเคลือบอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหัววัด
การพัฒนาหัววัดความกรอบ 3 โมเดล ได้แก่ หัววัดโมเดล A หัววัดโมเดล B และหัววัดโมเดล C	ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบหัววัดทั้ง 3 โมเดล กับมันฝรั่งทอด ซ้ำ 5 ครั้ง ของแต่ละโมเดล สามารถแสดงค่าความคาดเคลื่อน ดังนี้ โมเดล A มีค่าความคาดเคลื่อน เท่ากับ 6.80% โมเดล B มีค่าความคาดเคลื่อน เท่ากับ 1.89% และโมเดล C มีค่าความคาดเคลื่อน เท่ากับ 0.62% ทำให้เลือกใช้หัววัดโมเดล C ที่มีค่าความคาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการพัฒนาระบบตรวจวัดความกรอบในครั้งนี้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบ (ต่อ)

การทดลอง	ผลลัพธ์ที่ได้
การทดสอบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบ มันฝรั่งทอดกรอบ และข้าวโพดแผ่นทอดกรอบ	ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบระบบตัวตรวจจับกับข้าวเกรียบกุ้งทอดกรอบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.26 % ทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 % และทดสอบกับข้าวโพดแผ่นทอดกรอบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.09 % ทำให้ระบบตัวตรวจจับใยแก้วสำหรับวัดความกรอบมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 %

จากการทดสอบทำให้สรุปผลการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟารี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (FFPI) สำหรับการวัดความกรอบของขนมขบเคี้ยว ซึ่งมีหัววัดโมเดล C ที่มีองค์ประกอบของหัววัดความกรอบเป็นแผ่นยางลาเท็กซ์จากลูกโป่ง (Latex rubber balloon) เป็นวัสดุยืดหยุ่น และกระจกเคลือบอะลูมิเนียม (Aluminum-coated mirror) เป็นวัสดุสะท้อนแสง เมื่อนำไปทดสอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 3 ชนิด ข้างต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวตรวจจับที่พัฒนาผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์ระดับความดันเสียงความกรอบ ผลลัพธ์จากตัวตรวจจับความกรอบถูกนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง พบว่า ระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงวัดระดับค่าความดันเสียงความกรอบของขนมขบเคี้ยวอยู่ในช่วง 140 -180 dB ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 % ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่า และเมื่อนำไปวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าเครื่องมือวัดความกรอบที่พัฒนาขึ้นมีความไวถึง 0.20 μm/dB. และมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) เท่ากับ 0.027 เดซิเบล ทำให้ค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของตัวตรวจจับอยู่ในระดับสูงถึง 93.33% โดยอนาคตหากพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์จะสามารถช่วยยกระดับคุณภาพของอาหารไทยให้จดจำทั่วโลก

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

5.2.1 ความเสี่ยงจากการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่อาจกระทบต่อผลการทดลอง ซึ่งการทดสอบจำเป็นต้องย้ายเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ไปยังภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร การเคลื่อนย้ายระหว่างพื้นที่หรือตำแหน่งติดตั้งเสี่ยงก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงกลและเชิงไฟฟ้า เช่น การสูญเสียสภาพการปรับเทียบ และการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการสั่นสะเทือน เป็นต้น

5.2.2 เกิดความล่าช้าในการดำเนินการทดลองจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ความซับซ้อนของเครื่องมือร่วมกับความไม่คุ้นเคยในการใช้เครื่องมือทดสอบทางอาหาร ทำให้การตั้งค่า การปรับเทียบ และการแก้ไขปัญหาใช้เวลามากกว่าที่คาด และ (2) ข้อจำกัดด้านช่วงเวลาปฏิบัติงานตามเวลาเปิด–ปิดของห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้ไม่สามารถดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ต้องแบ่งงานเป็นหลายช่วง เพิ่มเวลาการเตรียมการซ้ำ และลดประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการทดลอง

5.2.3 พื้นที่ทดลองเป็นพื้นที่ใช้งานร่วมของหลายกลุ่มผู้ใช้ ส่งผลให้ในบางวันสภาพแวดล้อมไม่เอื้อต่อการดำเนินการทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้ดำเนินการทดลองเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความเงียบและความเสถียรของสภาพแวดล้อมสูงสุด เพื่อลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนและคงคุณภาพของข้อมูลทดลอง

5.3 แนวทางการศึกษาต่อ

เพื่อยกระดับความพร้อมใช้งานของเครื่องวัดความกรอบและขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ทั้งในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรม แนวทางการศึกษาต่อในอนาคตควรมุ่งพัฒนาการประมวลผลสัญญาณและระบบแสดงผลแบบเรียลไทม์ภายในอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานรับทราบค่าที่วัดได้ทันที ลดภาระการประมวลผลภายนอก และเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจระหว่างการทดสอบ ควบคู่กับการศึกษาความเป็นไปได้ในการต่อยอดสู่การตรวจวัดเสียงในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม โดยเน้นการเพิ่มความทนทาน ความแม่นยำ การปรับเทียบที่ตรวจสอบย้อนกลับได้ และความสอดคล้องตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ การพัฒนาในทิศทางดังกล่าวจะช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ ลดต้นทุนการดำเนินงาน และเสริมสร้างขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีของประเทศในระยะยาว

รายการอ้างอิง

[1] S. Kornboontritos. "Industry Outlook 2024-2026: Ready to Eat Food Industry." https://tinyurl.com/nccaer43 (accessed 18 March, 2024).

[2] National Economic and Social Development Board (NESDB) of Thailand. "Quarterly Gross Domestic Product (QGDP)." https://tinyurl.com/ysb7mvkh (accessed 18 March, 2023).

[3] M.B. Mishell *et al*., "Crispness as a key textural attribute in snack foods: A comprehensive review of measurement techniques and consumer perception," *Journal of Food Engineering,* vol. 297, p. 110482, 2021.

[4] C. E. Torres *et al*., "The impact of sensory attributes on consumer purchase decisions: A focus on crispness in snack products," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 112, pp. 318–330, 2021.

[5] S. R. Daniele *et al*., "Textural properties and consumer acceptance of snack foods: The role of crispness in product preference," *Food Research International,* vol. 138, p. 109736, 2020.

[6] J. A. Karl *et al*., "Challenges in industrial texture measurement: High costs, complexity and import dependency of instrumentation," *Journal of Food Measurement and Characterization,* vol. 15, no. 4, pp. 3321–3335, 2021.

[7] R. S. Thompson *et al*., "Import dependency and technological gaps in food industry instrumentation: A global perspective," *Food Control,* vol. 128, p. 108195, 2021.

[8] L. M. Pérez *et al*., "Economic and technical barriers to adoption of advanced food texture analyzers in developing countries," *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* vol. 72, p. 102743, 2021.

[9] M. A. Brown *et al*., "Fiber optic technologies in medical diagnostics: Current status and future perspectives," *Biosensors and Bioelectronics,* vol. 178, p. 113026, 2021.

[10] T. W. Roberts *et al*., "Advances in fiber optic sensing for automotive industry applications," *IEEE Sensors Journal,* vol. 21, no. 6, pp. 7654–7667, 2021.

[11] K. L. Martínez *et al.*, "Fiber optic monitoring systems in power plants: A comprehensive review," *Measurement,* vol. 189, p. 110432, 2022.

[12] H. G. Fernández *et al.*, "Fiber optic sensors in oil and gas industry: Applications and recent advancements," *Sensors and Actuators A: Physical,* vol. 331, p. 112986, 2022.

[13] S. K. Lee *et al.*, "Durability and longevity of optical fibers under various environmental conditions," *Materials & Design,* vol. 206, p. 109782, 2021.

[14] A. D. Rodriguez *et al.*, "Noise immunity and interference rejection in fiber optic communication systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* vol. 70, no. 4, pp. 1–11, 2021.

[15] P. J. Chen *et al.*, "Comparative analysis of optical fiber vs. copper cable: Attenuation characteristics and signal integrity," *Optical Fiber Technology,* vol. 64, p. 102540, 2021.

[16] J. Karl *et al.*, "Sustainable food processing: Integration of agricultural raw materials into industrial food production systems," *Journal of Cleaner Production,* vol. 312, p. 127692, 2021.

[17] R. M. Pérez *et al.*, "Food industry 4.0: A comprehensive review of technological transformation in food processing and preservation," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 118, pp. 550–565, 2021.

[18] A. Hassoun *et al.*, "Food industry 4.0: A comprehensive review of technological transformation in food processing and preservation," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 23, pp. 1–37, 2024.

[19] S. Suttida and J. Panyaporn, "Key success factors and challenges of the Thai food export industry: A review," *International Journal of Food Science and Technology,* vol. 56, no. 8, pp. 3865–3878, 2021.

[20] T. Chen *et al.*, "Global market acceptance of ethnic snacks: Determinants of international consumer trust in product quality and manufacturer reliability," *Journal of International Food & Agribusiness Marketing,* vol. 34, no. 3, pp. 245–267, 2022.

[21] P. Nukul and A. Supachai, "Classification of the food industry in Thailand: A structural analysis," *Food Industry Research J.,* vol. 15, no. 1, pp. 101–115, 2020.

[22] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.). คู่มือการขึ้นทะเบียนตำรับอาหารและระบบแจ้งรายละเอียดอาหาร. 2023.

[23] M. Zulfiqar M. Akram, and H. Muhammad, "Impact of Sensory Attributes on Consumer Acceptance of Snack Foods: A Review," *Food Quality and Safety,* vol. 6, no. 3, pp. 1–12, 2022.

[24] M. K. K. Piernas *et al.*, "Food safety and quality challenges in global supply chains: A comprehensive review," *Food Control,* vol. 145, p. 109461, 2023.

[25] P. Pradip and J. Alok, "Food Safety and Quality Assurance in the Modern Food Industry: Challenges and Control Strategies," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* vol. 22, no. 1, pp. 100–125, 2023.

[26] S. Anusree and H. Ramaswamy, "Instrumental techniques for texture analysis of food products: A comprehensive review," *Journal of Food Engineering,* vol. 289, pp. 110–384, 2021.

[27] M.S. Ahmed, "Development of cost-effective and portable pH sensor for real-time food quality monitoring," *Sensors and Actuators B: Chemical,* vol. 308, p. 127670, 2020.

[28] J. Alagarsamy, "Advances in non-destructive techniques for sugar content measurement in complex food matrices," *Food Analytical Methods,* vol. 16, no. 5, pp. 1001–1015, 2023.

[29] R. Michael and S. David, "Metal detection in the food industry: Principles, limitations, and recent developments," *Trends in Food Science & Technology,* vol. 110, pp. 520–530, 2021.

[30] M. G. Corradini *et al.*, "Low-cost acoustic-emission based texture analyzers for food applications: Technical limitations and commercialization barriers," *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* vol. 68, p. 102612, 2021.

[31] J. Chen *et al.*, "Acoustic envelope detection techniques combined with texture analysis for food quality assessment: A review," *Journal of Food Engineering,* vol. 324, p. 111025, 2022.

[32] M. Taniwaki and K. Kohyama, "Mechanical and acoustic properties of crispness in potato chips evaluated by uniaxial compression," *Journal of Texture Studies,* vol. 51, no. 3, pp. 448–457, 2020.

[33] C.P. Singh, *PHYSICS FUNDAMENTALS AND ADVANCED TOPICS: FROM CLASSICAL MECHANICS TO CONTEMPORARY APPLICATIONS* (Core Res. Private Limited). 2024.

[34] A.D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications*, 3 ed. Acoustical Society of America, 2024.

[35] A. D. Alty, *Understanding Acoustics, An Experimentalist's View of Sound and Vibration*. 2020.

[36] K. D. Skeldon, "Wave (physics)," EBSCO Information Services, 2024.

[37] Francisco Pena-Pereira and Marek Tobiszewski, *The application of green solvents in separation processes*. Elsevier, 2017.

[38] L. Learning, "Sound Intensity and Sound Level," *Fundamentals of Heat, Light & Sound,* 2021.

[39] J. M. Navarro and A. Pita, "Machine Learning Prediction of the Long-Term Environmental Acoustic Pattern of a City Location Using Short-Term Sound Pressure Level Measurements," *Applied Sciences,* vol. 13, no. 3, p. 1613, 2023.

[40] R. Hickling, *Sound-Power Flow*: Morgan & Claypool Publishers, 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1088/978-1-6817-4453-7.

[41] T. L. Szabo, "Phase reversal phenomena in acoustic wave reflection at boundaries," *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 147, no. 3, pp. 1425–1436, 2020.

[42] M.A. Sahin *et al.*, "Fundamentals of acoustic wave generation and propagation," *Acoustic Technologies in Biology and Medicine,* pp. 1–36, 2023.

[43] J. D. N. Cheeke, "Fundamentals and applications of acoustic wave reflection with phase analysis," *Ultrasonics Sonochemistry,* 2020.

[44] P. G. L. Leighton, "Phase changes in acoustic wave reflection: Fundamental principles and applications," *Ultrasonics Sonochemistry,* vol. 77, p. 105674, 2021.

[45] Andy Farnell, *Designing sound*. Mit Press, 2010.

[46] M. F. Hamilton *et al.*, "Refraction of acoustic waves at fluid-solid interfaces: A comprehensive review," *Sound and Vibration J.,* vol. 489, p. 115678, 2021.

[47] Robert Pasnau, "What is sound?," *The Philosophical Quarterly,* vol. 49, no. 196, pp. 309–324, 1999.

[48] J. W. S. Rayleigh, "Modern applications of acoustic wave interference: From node-antinode patterns to advanced sensing," *Ultrasonics* vol. 112, p. 106355, 2021.

[49] Hermann Helmholtz, "The theory of sound," ed: Nature Publishing Group UK London, 1878.

[50] C. Spence, "The multisensory perception of flavor in food and drink," *Curr. Biol.,* vol. 30, no. 5, pp. R207–R213, 2020.

[51] Harvey E White and Donald H White, *Physics and music: the science of musical sound*. Courier Corporation, 2014.

[52] Y. Zhou *et al.*, "Research on a novel inclinometer based on distributed optical fiber strain and conjugate beam method," *Meas. J. Int. Meas. Confed,* vol. 153, 2020.

[53] W.K. Samer, *Development of laboratory to field shift factors for hot-mix asphalt resilient modulus*. Virginia Polytechnic. Institute and State U., 2003.

[54] C. Uff *et al.*, "Further characterization of changes in axial strain elastograms due to the presence of slippery tumor boundaries," *J. Med. Imaging,* vol. 5, no. 2, p. 021211, 2018.

[55] R. Khan and Z. Mustansar, "Reliability of Using Elastic Modulus for Non-Homogeneous Materials MATEC Web of Conferences," *EDP Sciences,* vol. 49, p. 09001.

[56] A. Nie *et al.*, "Approaching diamond's theoretical elasticity and strength limits," *Nat. Commun.,* vol. 10, p. 5533, 2019.

[57] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. "Shear stress." www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0491/shear-stress-ความเค้นเฉือน (accessed 20 March, 2024).

[58] H. Belyadi *et al.*, *Rock mechanical properties and in situ stresses*, 2 ed. Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs, 2019.

[59] F. P. Beer *et al.*, *Mechanics of Materials*, 8 ed. NY: McGraw-Hill Education, 2021.

[60] JTG D50-2017, *Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement*. Ministry of Transport of the People's Republic of China, Beijing, 2017.

[61] S. Timoshenko and and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, 2 ed. McGraw-Hill, Incorporated, 1959.

[62] P. Song *et al.*, "Miniature MEMS Pressure Sensors," *Micromachines,* vol. 11, no. 22, 2020.

[63] X. Su *et al.*, "Fiber optic Fabry-Perot sensors: Review and recent developments," *Sens. Actuators A Phys.,* vol. 336, p. 113398, 2022.

[64] K.M. Fadeev *et al.*, "A Fiber-Optic Sensor for Simultaneous Temperature and Pressure Measurements Based on a Fabry–Perot Interferometer and a Fiber Bragg Grating," *Instrum Exp Tech,* vol. 63, pp. 543–546., 2020.

[65] B. Xu *et al.*, "Optical fiber Fabry–Perot interferometer based on an air cavity for gas pressure sensing," *Photonics Res.,* vol. 9, no. 2, 2017.

[66] J. Eom *et al.*, "Fiber optic Fabry–Perot pressure sensor based on lensed fiber and polymeric diaphragm," *Sensors and Actuators A: Physical,* vol. 225, pp. 25–32, 2015/04/15/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.023.

[67] D. Jauregui-Vazquez *et al.*, "Low pressure and liquid level fber-optic sensor based on polymeric Fabry–Perot cavity," *Optical and Quantum Electronics,* vol. 53, p. 237, 2021.

[68] X. Zhou *et al.*, "Fiber-optic Fabry–Perot pressure sensor for down-hole application," *Optics and Lasers in Engineering,* vol. 121, pp. 289–299, 2019/10/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.04.028.

[69] Y. Zhou and K. Huang, "On simplified deformation gradient theory of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plate," *European Journal of Mechanics-A/Solids,* vol. 100, p. 105014, 2023.

[70] K.M. Fadeev *et al.*, "A fiber-optic sensor for simultaneous temperature and pressure measurements based on a Fabry–Perot interferometer and a fiber Bragg grating," *Instruments and Experimental Techniques,* vol. 63, no. 4, pp. 543–546, 2020.

[71] P. Talhakultorn and S. Pullteap, "Dynamic Low-Pressure Measurement Using a Fiber Optic-based Fabry-Perot Interferometer," *Applied Science and Engineering Progress,* vol. 17, no. 2, p. 7283, 04/03 2024, doi: 10.14416/j.asep.2023.11.011.

[72] A. Saita *et al.*, "Crispness, the Key for the Palatability of “Kakinotane”: A Sensory Study with Onomatopoeic Words," *Foods*, vol. 10, no. 8, doi: 10.3390/foods10081724.

[73] E. Çarşanba *et al.*, "Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products," *Journal of Food Engineering,* vol. 229, pp. 93–101, 2018/07/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.006.

[74] L. Piazza and V. Giovenzana, "Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples," *Food Research International,* vol. 69, pp. 209–215, 2015.

[75] J. CHEN *et al.*, "ACOUSTIC ENVELOPE DETECTOR FOR CRISPNESS ASSESSMENT OF BISCUITS," *Journal of Texture Studies,* vol. 36, no. 2, pp. 139–156, 2005, doi: https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2005.00008.x.

[76] H. Nakamoto *et al.*, "Effects of sensory combination on crispness and prediction of sensory evaluation value by Gaussian process regression," (in eng), *PLoS One,* vol. 19, no. 2, p. e0297620, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0297620.

[77] F. Ni *et al.*, "Nondestructive detection of apple crispness via optical fiber spectroscopy based on effective wavelengths," *Food Science & Nutrition,* vol. 7, no. 11, pp. 3654–3663, 2019.

[78] Z. Cai *et.al*, "Texture Analysis of Chinese Dried Noodles during Drying Based on Acoustic–Mechanical Detection Methods," *Foods*, vol. 13, no. 2, doi: 10.3390/foods13020268.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ก.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

โปรแกรม MATLAB ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลอง โดยข้อมูลป้อนเข้าสู่ระบบ คือ ริ้วแทรกสอด ริ้วแทรกสอดที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดเสียงความกรอบจะถูกนำเข้าและแปลงค่าออกมาเป็นระดับความดันเสียงความกรอบ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างโค้ดได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 พล็อตกราฟสัญญาณ

```
% Plot original signal Capture XX.1
x = Capture31.Input0;       %
t = Capture31.Channelname;       %
plot(t, x);
xlabel('time(sec)');
ylabel('Amplitude (V)');
title('Crispyness signal from Sensing prob Model III');
```

ขั้นที่ 2 กรองสัญญารบกวนออก

```
% Filter part:the lowpass Butterworth filter
Fs = 5; % Sampling frequency (Hz)
cutoff_frequency = 1; % Cutoff frequency (Hz)
order = 10; % Filter order
[b, a] = butter(order, cutoff_frequency / (Fs/0.1), 'low');
Filter_x = filtfilt(b, a, x);
% Smoothing window size (adjust this based on your data)
window_size = 2;
plot(t, Filter_x);
xlabel('time(sec)');
ylabel('Amplitude (V)');
title('Crispyness signal from Sensing prob Model III');
```

ขั้นที่ 3 เลือกช่วงสัญญาณเฉพาะส่วนที่ตรวจจับเสียงความกรอบ

```
% Select a period to analyze
OriginalWaveform   =   Filter_x;
BeginSelection     =   2.2;
```

```
EndSelection      =    2.45;
SelectionRange    =    [BeginSelection, EndSelection];
SelectionRange    =    sort(SelectionRange);

SelectedWaveform  =    OriginalWaveform( t <= SelectionRange(2) );
nt                =    t( t <= SelectionRange(2) );
SelectedWaveform  =    SelectedWaveform( nt >= SelectionRange(1) );
nt                =    nt( nt >= SelectionRange(1) );
plot(nt, SelectedWaveform, 'Color', [0,0.1,0.6])
xlabel('\bfTime (s)')
ylabel('\bfAmplitude (V)')
title('Crispyness signal sensor (preriod)');
```

ขั้นที่ 4 หาพีคของช่วงสัญญาณและนับจำนวนพีค

```
% Find peaks in the filtered data
[pks, locs]     =    findpeaks(SelectedWaveform, nt);
plot(nt, SelectedWaveform, 'Color', [0,0.1,0.6])
xlabel('\bfTime (s)')
ylabel('\bfAmplitude (V)')
hold on
scatter(locs, pks, 'v', 'MarkerEdgeColor', [0.8,0.5,0.4], 'MarkerFaceColor', [0.2,0.2,0.2])
hold off
text( locs, pks, num2str( (1:numel(pks))' ), 'Color', [0,0,0] )
title('Crispyness signal with Number of peak');

% Count total peaks
total_peaks = numel(pks);
disp(['Number of fringe (N): ' , num2str(total_peaks)]);
```

ขั้นที่ 5 จำนวนริ้วการแทรกสอดเพื่อหาค่าระดับความดันเสียงความกรอบ

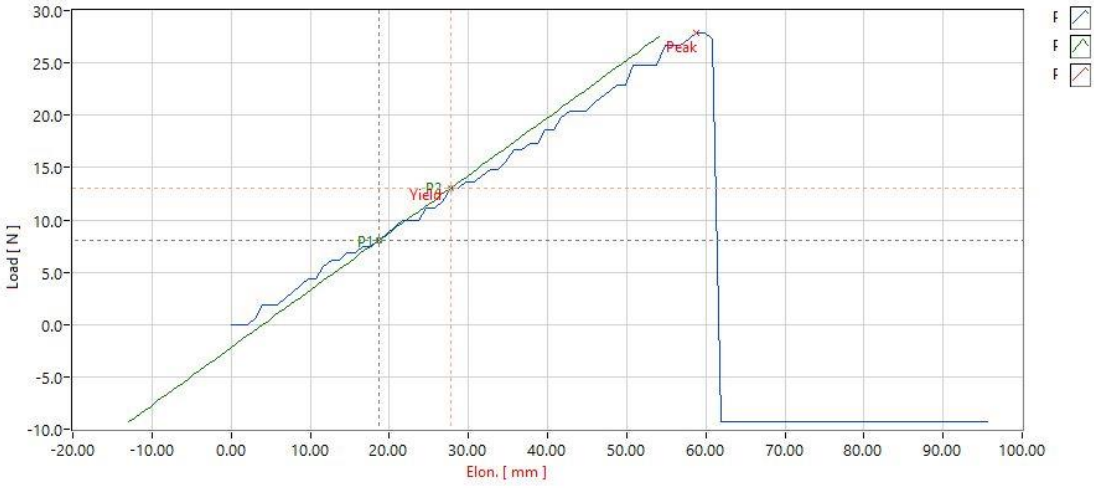
```
% Demodulate displacement to pressure
N = total_peaks;
E = 2.73; %MPascal
h = 0.00022;
r = 0.015 ; %meter
v = 0.282 ;
lambda = 1311.82*10^-9;
deltaD = N*(lambda/2); %meter
disp(['Displacement: ', num2str(deltaD)]);
pressure_FFPI = (16*E*(h^3)*(deltaD))/(3*(r^3)*(1-(v^2))); %Pa
disp(['Pressure(FFPI) : ', num2str(pressure_FFPI), ' Pa']);

% Demodulate pressure to pressure level
p0 = 20*10^-6; %P(Ref) = P0 ,Pascal
pressure_level = 10*log10(pressure_FFPI/p0)^2;

SPLref  =  XX dB;       %

disp(['Sound Pressure Level (Lp) : ', num2str(pressure_level),' dB']);
disp(['Sound Pressure Level Reference (Lpf) : ', num2str(SPLref) ,' dB']);

%Error Sensor
Error = (abs(SPLref-pressure_level)/SPLref)*100;
disp(['Error of Sensing probe Modell 3 : ', num2str(Error) ,' %']);
```

ก.2 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น

การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นทำให้ทราบคุณสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นที่นำมาใช้ โดยการทดสอบทำซ้ำจำนวน 10 ครั้ง จากการทดสอบการดึงวัสดุยืดหยุ่น ซึ่งในที่นี้วัสดุยืดหยุ่นที่ทดสอบเป็นลูกโป่ง ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาในลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Load) บนแกนตั้ง และ ระยะยืด (Elongation) บนแกนแนวนอน กราฟเริ่มต้นจากช่วงความยืดหยุ่น (Elastic Region) ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่เส้นแนวโน้ม (Trendline) แสดงความชัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในการกลับคืนสู่รูปเดิม หลังจากนั้นวัสดุเริ่มมีพฤติกรรมการยืดตัวแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เมื่อถึงจุดคราก (Yield Point) ชิ้นงานจะเริ่มเกิดการเสียรูปถาวรแรงดึงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุด (Peak) ที่เป็นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ หลังจากจุดสูงสุดนี้แรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว (กราฟดิ่งลง) ซึ่งแสดงถึงการขาด (Fracture) ของชิ้นงานในที่สุด สามารถแสดงผลลัพธ์การทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ ก.2.1 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 1

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	27.9	58.84	12.670	392.233
Break	-9.3	95.61	-4.223	637.400
YieldYs	13.0	27.74	5.912	184.966

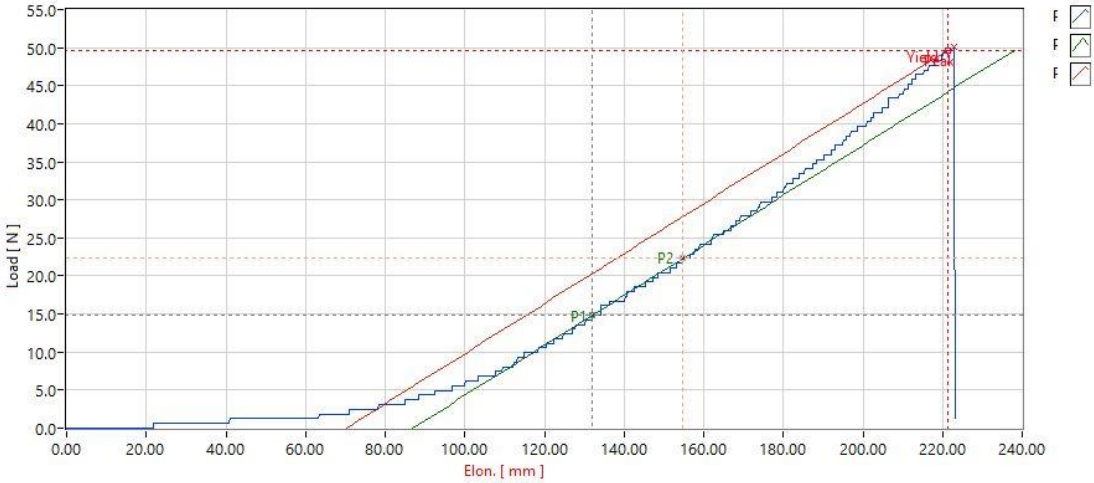


รูปที่ ก.2.11 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 1

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 1 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 13 N และมีระยะยืดประมาณ 58.84 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุมีค่าประมาณ 27.9 N

ตารางที่ ก.2.2 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 2

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	50.2	222.84	22.805	1485.617
Break	1.2	223.14	0.563	1487.600
YieldYs	50.2	222.84	22.805	1485.617

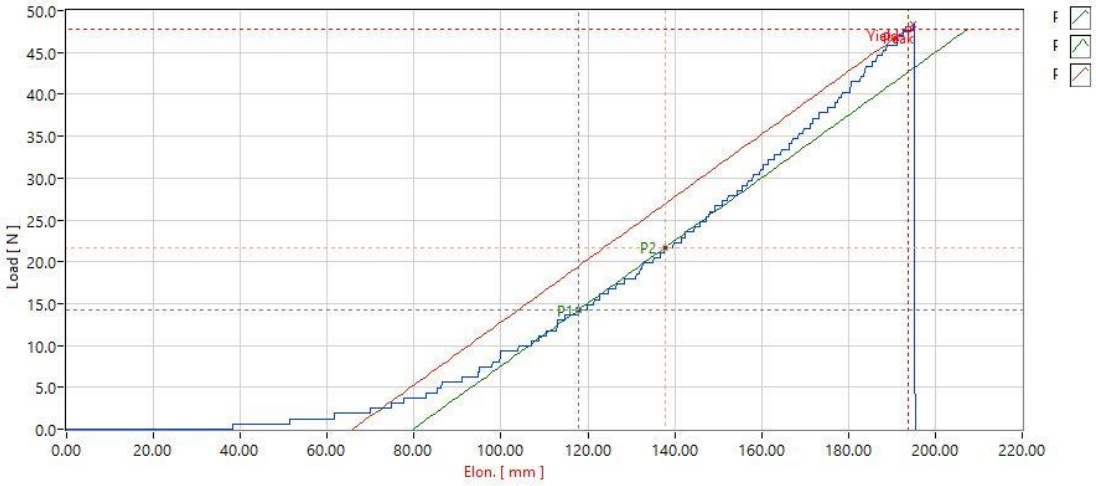


รูปที่ ก.2.12 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 2

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 2 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 50.2 N และมีระยะยืดประมาณ 222.84 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 50.2 N

ตารางที่ ก.2.3 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 3

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	48.3	194.93	21.961	1299.550
Break	0.0	195.47	0.000	1303.133
YieldYs	48.3	194.93	21.961	1299.550

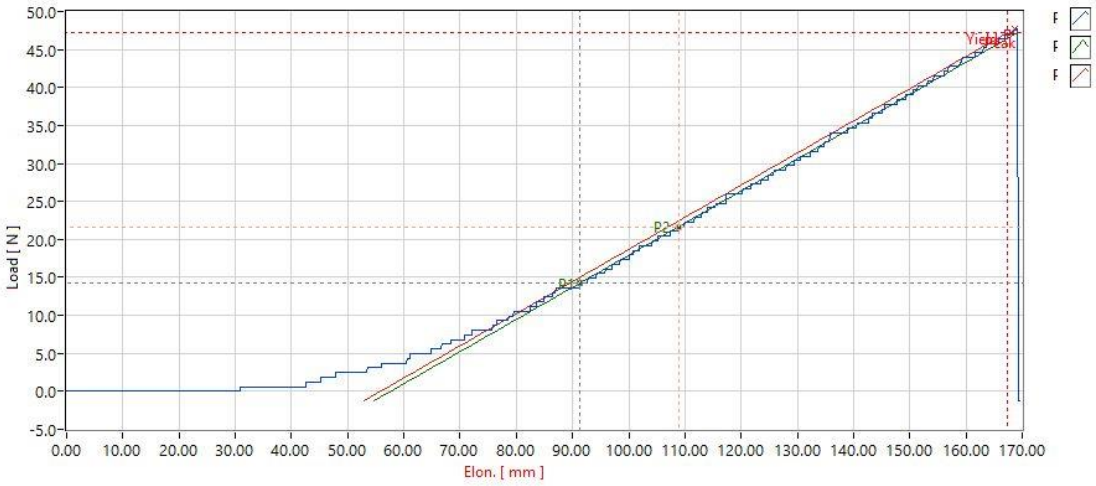


รูปที่ ก.2.3 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 3

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 3 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 48.3 N และมีระยะยืดประมาณ 194.93 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 48.3 N

ตารางที่ ก.2.4 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 4

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	47.7	168.62	21.679	1124.100
Break	-1.2	169.52	-0.563	1130.117
YieldYs	47.7	168.62	21.679	1124.100

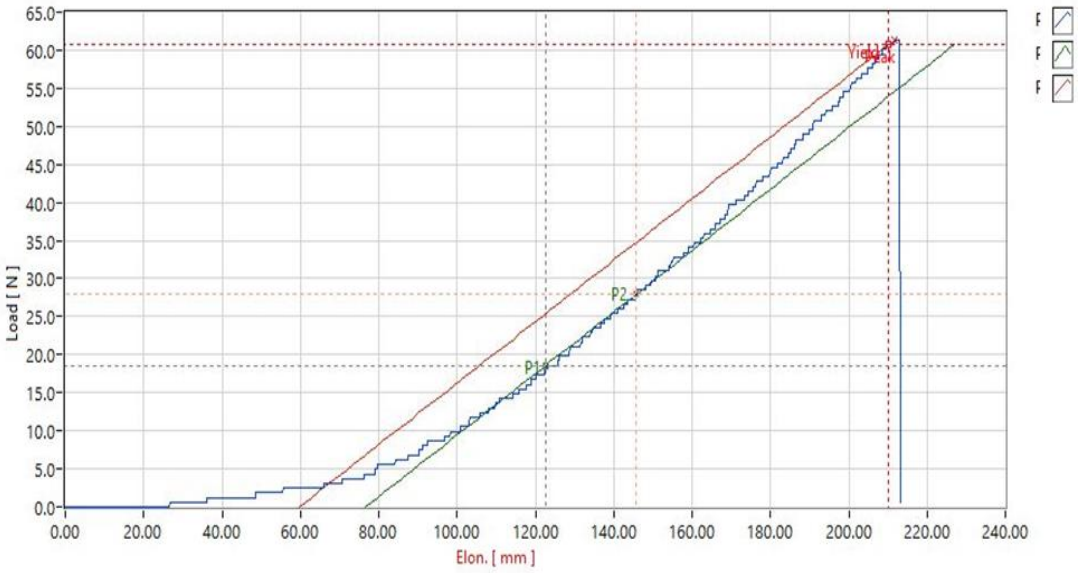


รูปที่ ก.2.4 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 4

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 4 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 47.7 N และมีระยะยืดประมาณ 168.62 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 47.7 N

ตารางที่ ก.2.5 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 5

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	61.3	211.56	27.873	1410.417
Break	0.6	213.37	0.282	1422.450
YieldYs	61.3	211.56	27.873	1410.417

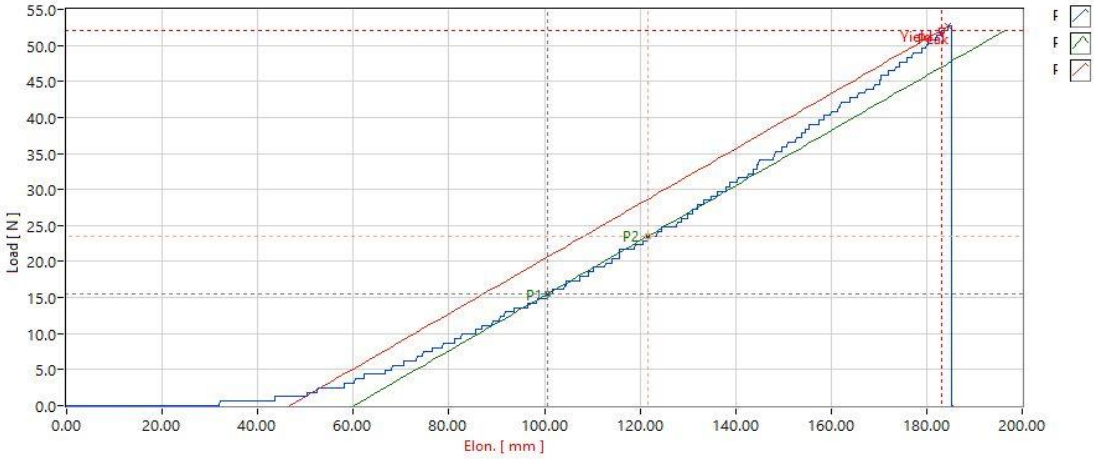


รูปที่ ก.2.5 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 5

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 5 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 61.3 N และมีระยะยืดประมาณ 211.56 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 61.3 N

ตารางที่ ก.2.6 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 6

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	52.7	184.51	23.931	1230.050
Break	0.0	185.51	0.000	1236.717
YieldYs	52.7	184.51	23.931	1230.050

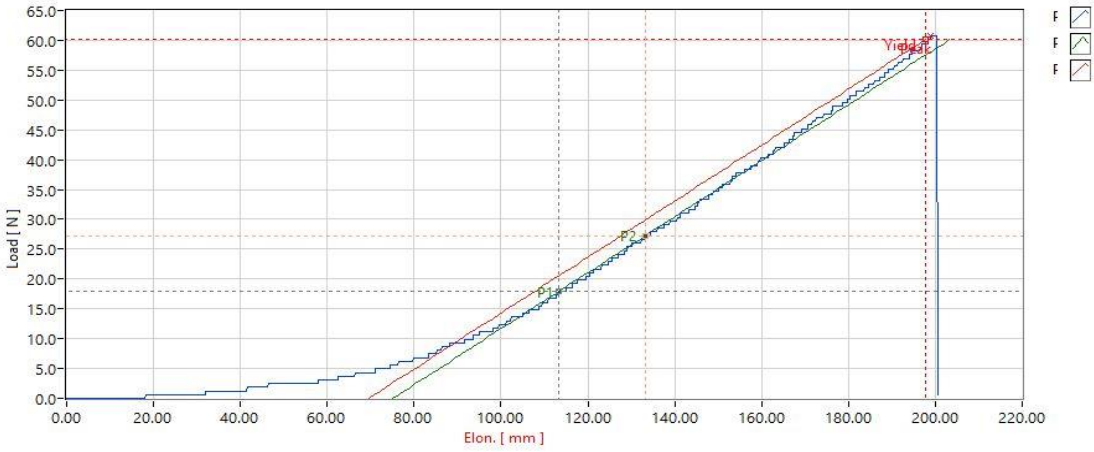


รูปที่ ก.2.6 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 6

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 6 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 52.7 N และมีระยะยืดประมาณ 184.51 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 52.7 N

ตารางที่ ก.2.7 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 7

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	60.7	198.92	27.592	1326.133
Break	0.6	200.72	0.282	1338.117
YieldYs	60.7	198.92	27.592	1326.133

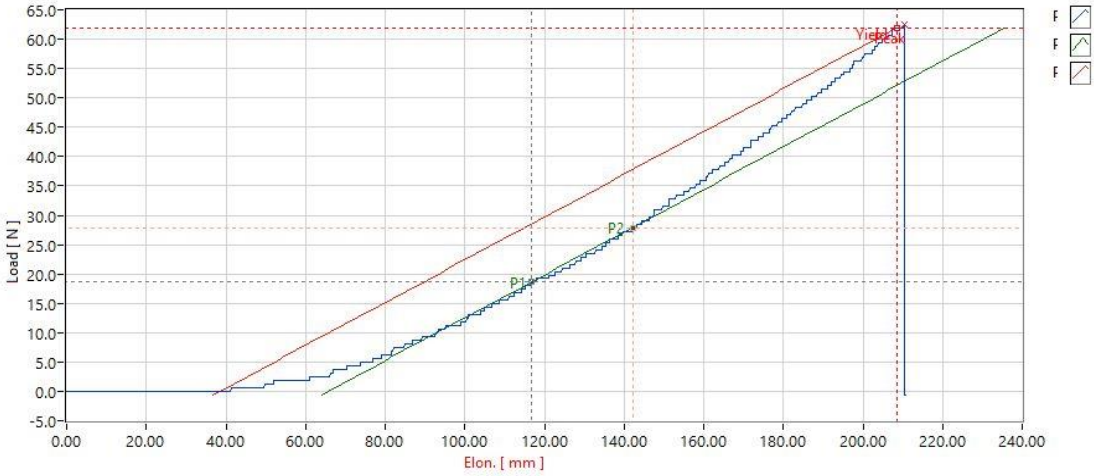


รูปที่ ก.2.7 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 7

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 7 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 60.7 N และมีระยะยืดประมาณ 198.92 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 60.7 N

ตารางที่ ก.2.8 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 8

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	62.6	210.28	28.436	1401.883
Break	-0.6	210.59	-0.282	1403.900
YieldYs	62.6	210.28	28.436	1401.883

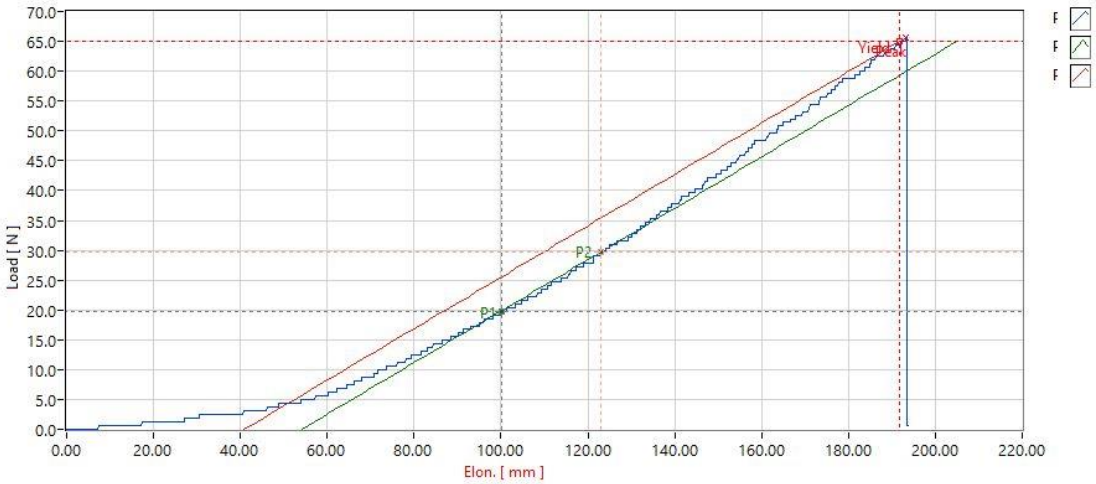


รูปที่ ก.2.8 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 8

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 8 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 62.6 N และมีระยะยืดประมาณ 210.28 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 62.6 N

ตารางที่ ก.2.9 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 9

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	65.7	193.29	29.844	1288.583
Break	0.6	193.69	0.282	1291.250
YieldYs	65.7	193.29	29.844	1288.583

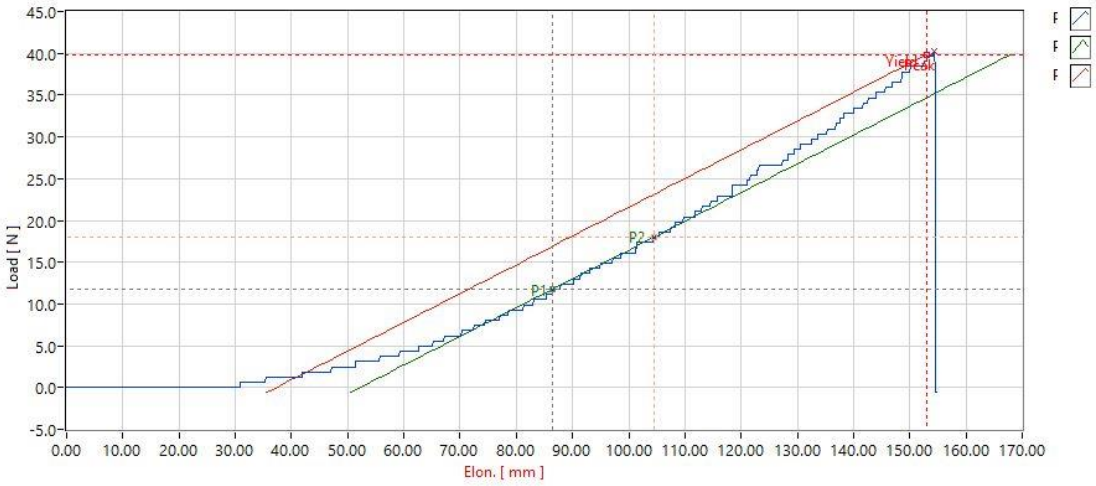


รูปที่ ก.2.9 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 9

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 9 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 65.7 N และมีระยะยืดประมาณ 193.29 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 65.7 N

ตารางที่ ก.2.10 การทดสอบวัสดุยืดหยุ่นครั้งที่ 10

	Load (N)	Elon (mm)	Stress (N/mm^2)	Strain (%)
Peak	40.3	154.32	18.301	1028.783
Break	-0.6	154.72	-0.282	1031.433
YieldYs	40.3	154.32	18.301	1028.783



รูปที่ ก.2.10 ผลการทดสอบวัสดุยืดหยุ่น ครั้งที่ 10

จากการทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่ง ครั้งที่ 10 จุดคราก (Yield Point) อยู่ที่ประมาณ 40.3 N และมีระยะยืดประมาณ 154.32 mm แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ มีค่าประมาณ 40.3 N

การทดสอบการดึงชิ้นงานลูกโป่งทั้งหมด 10 ครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ จุดคราก (Yield Point) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.25 N และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation): 15.22 N ระยะยืด ณ จุดคราก ค่าเฉลี่ย ของระยะยืด ณ จุดคราก: 179.61 mm

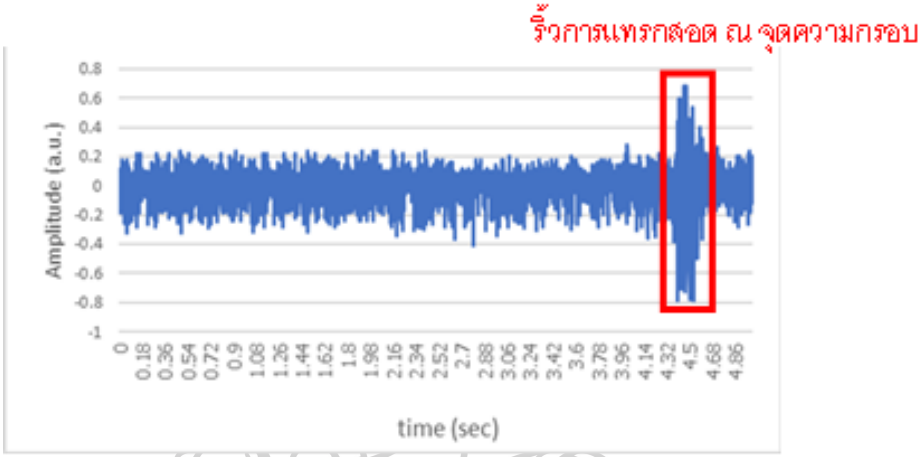
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน: 53.95 mm ผลการทดสอบ พบว่า วัสดุลูกโป่งมีความสามารถในการทนแรงดึงและยืดตัวได้สูง โดยมีค่าแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยประมาณ 50–55 N แต่พบความแปรปรวนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบครั้งที่ 1 ที่มีค่าต่ำกว่าค่าปกติอย่างมาก ซึ่งอาจจะมีความผิดพลาดของการเซตการทดสอบหรือการฉีกขาดของตัวอย่างทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าครั้งอื่น ๆ

ก.3 ผลการทดสอบหัววัด

ก.3.1 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล A

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล A โมเดลที่ใช้โครงสร้างพื้นฐานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์อินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ การทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

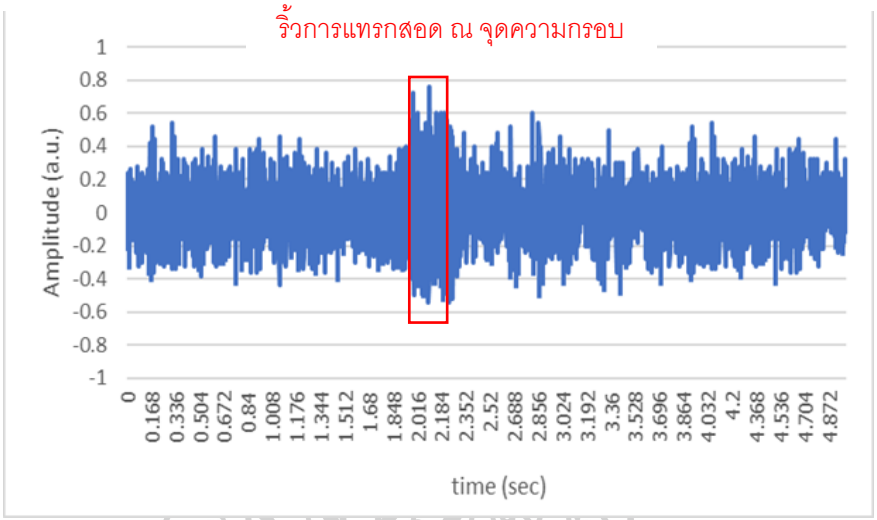
ตาราง ก.3.1.1 การทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 1



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	87	
	ระยะการกระจัด (*D*)	5.71×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	2.85	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	147.96	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	165.07	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 165.07 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 147.96 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 10.37%

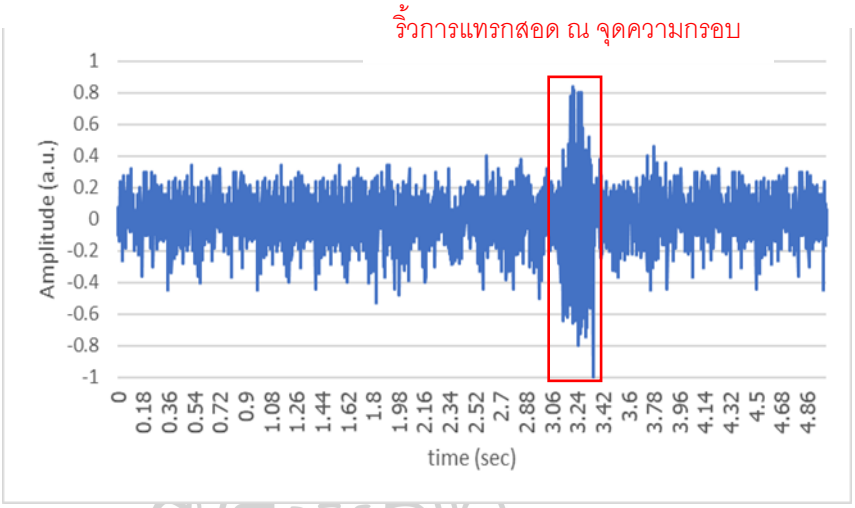
ตาราง ก.3.1.2 การทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 2



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	60	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.94×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.96	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	160.63	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	160.63	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 160.67 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 160.63 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.02%

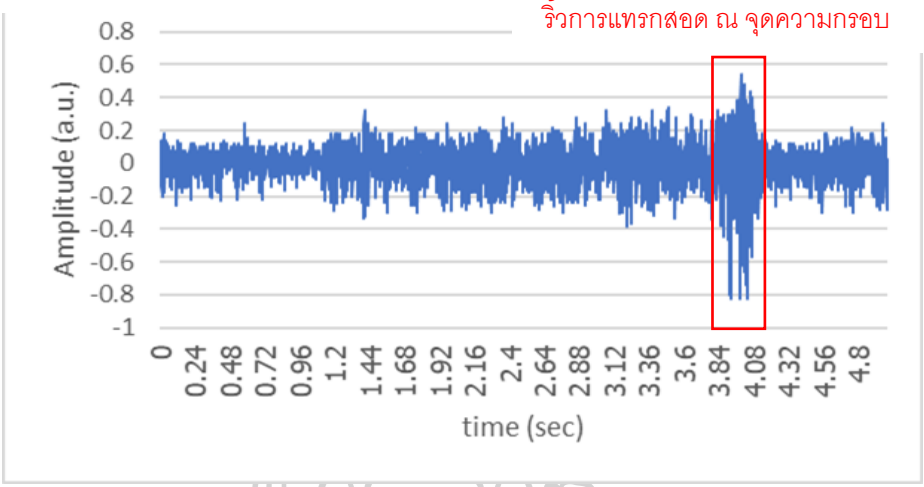
ตาราง ก.3.1.3 การทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 3



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	92	
	ระยะการกระจัด (*D*)	6.03×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	3.01	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	146.10	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	162.44	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 162.44 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 146.10 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 10.06%

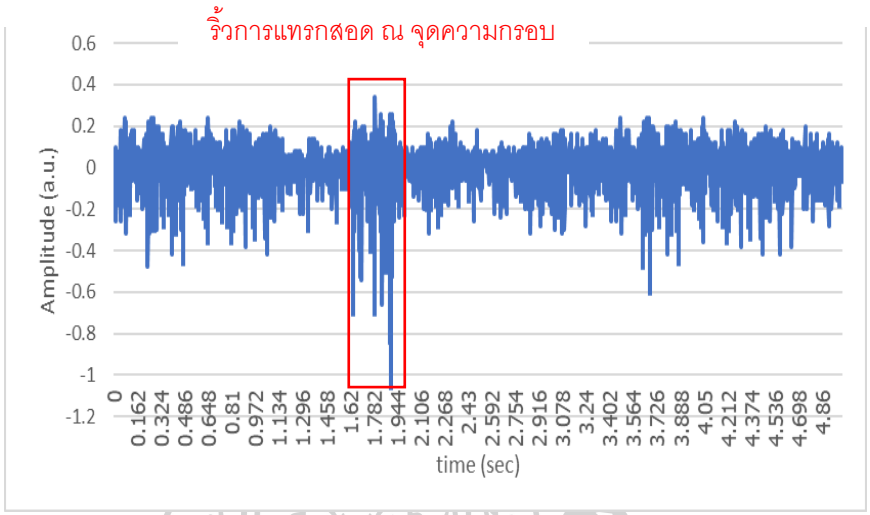
ตาราง ก.3.1.4 การทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 4



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	62	
	ระยะการกระจัด (*D*)	4.07×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	2.03	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	159.49	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	164.22	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 164.22 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 159.49 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 2.88%

ตาราง ก.3.1.5 การทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 5



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	91	
	ระยะการกระจัด (*D*)	5.97×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	2.98	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	146.46	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	163.70	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล A ครั้งที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 163.70 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 146.46 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 10.53%

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล A เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของเครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 160.67 – 165.07 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ A สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงวัดได้อยู่ในช่วง 146.10 – 160.63 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 6.80% ผลลัพธ์ที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของหัววัดความกรอบใยแก้วนำแสงโมเดล A ในการตรวจจับระดับความกรอบของมันฝรั่งทอดกรอบมีความไม่แม่นยำ (Inaccuracy) ค่อนข้างมากเมื่อ

เทียบกับเครื่องมืออ้างอิง ความผิดพลาดส่วนใหญ่น่าจะมาจากโครงสร้างของหัววัดโมเดล A อาจยังไม่เหมาะสมสำหรับการรับคลื่นเสียงความถี่สูงและแรงดันสูงที่เกิดจากการแตกหักอย่างฉับพลัน (Transient Acoustic Event)

ก.3.2 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล B

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล B โมเดลที่พัฒนาให้วัสดุสะท้อนแสงอยู่ภายในโครงพลาสติก การทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ตาราง ก.3.2.1 การทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 1

ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	47	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.01×10^{-4}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.54	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	169.25	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	164.60	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 164.60 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 169.25 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 2.82%

ตาราง ก.3.2.2 การทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 2

ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	47	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.48×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.73	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	164.98	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	162.98	dB

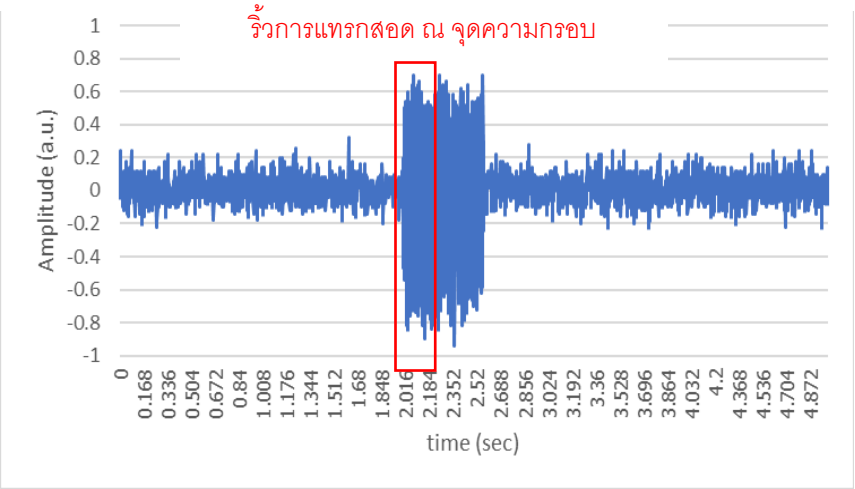
จากการทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 162.98 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 164.98 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 1.48%

ตาราง ก.3.2.3 การทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 3

ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	45	
	ระยะการกระจัด (*D*)	2.95×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.47	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	168.48	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	162.44	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 162.44 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 168.48 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 1.38%

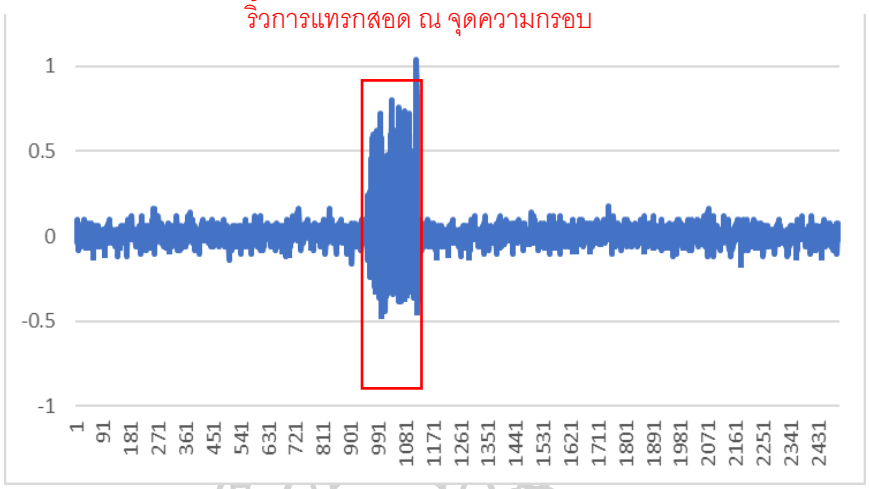
ตาราง ก.3.2.3 การทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 4



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	57	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.67×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.83	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	163.04	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	160.33	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 160.33 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 163.04 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 2.90%

ตาราง ก.3.2.4 การทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 5



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	53	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.48×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.73	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	164.98	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	160.33	dB

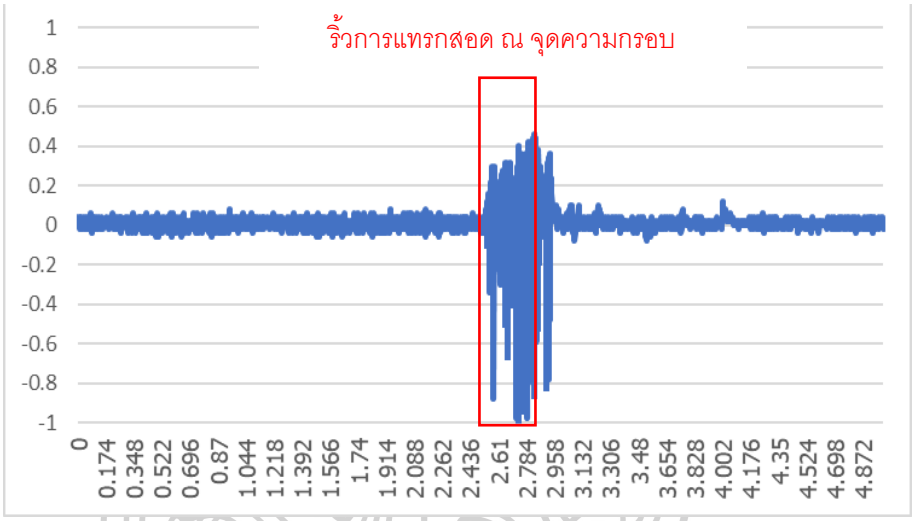
จากการทดสอบหัววัดโมเดล B ครั้งที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 160.33 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 164.98 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 2.90%

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล B เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหัก ของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 160.33 – 168.48 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ B สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงได้อยู่ในช่วง 163.04 – 170.80 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.89 %

ก.3.3 ผลการทดสอบหัววัดโมเดล C

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล C โมเดลที่พัฒนาให้วัสดุสะท้อนแสงอยู่ภายในโครงพลาสติกและเพิ่มโครงพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายลำโพง การทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

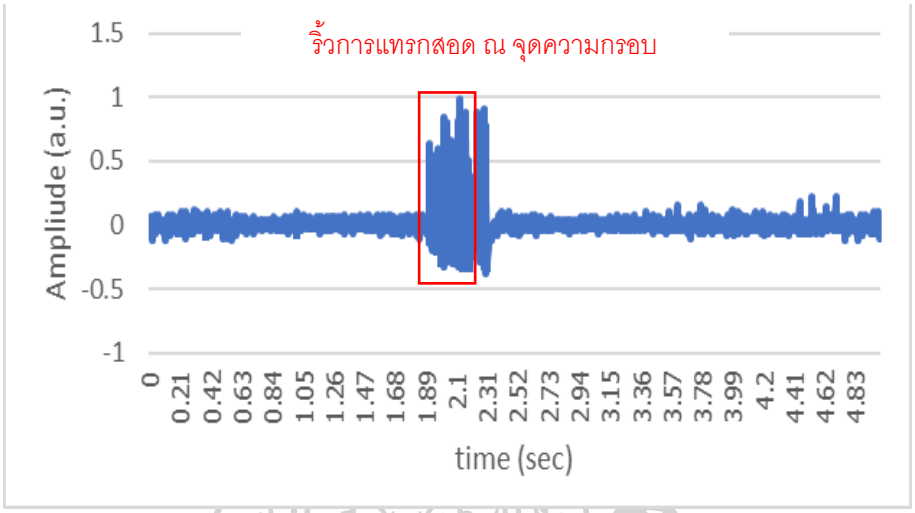
ตาราง ก.3.3.1 การทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 1



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	48	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.15×10^{-4}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.57	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	168.49	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	167.38	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 167.38 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 168.49 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.67%

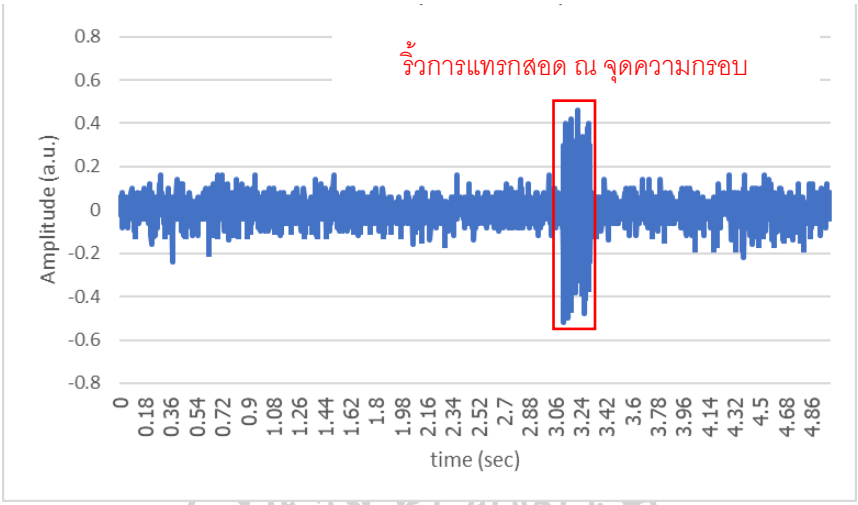
ตาราง ก.3.3.2 การทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 2



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	51	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.34×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.67	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	166.34	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	162.98	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 162.98 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 166.34 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.73%

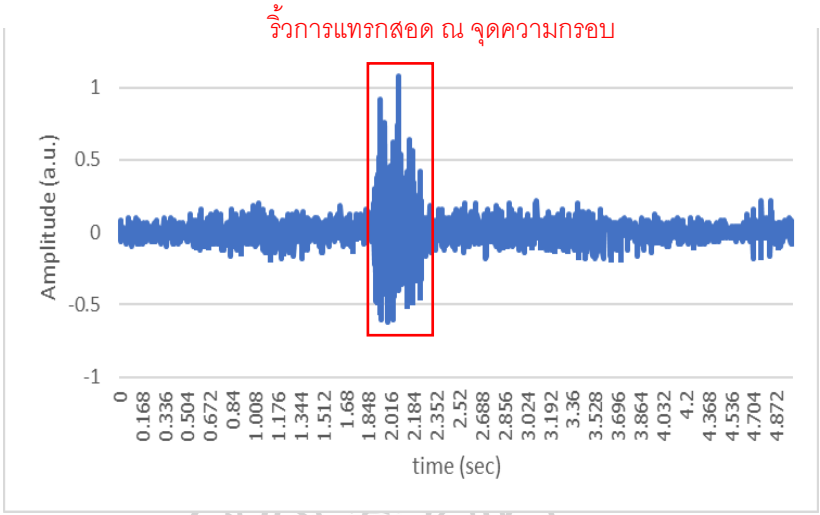
ตาราง ก.3.3.3 การทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 3



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	51	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.34×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.67	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	166.34	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	162.98	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 162.98 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 166.34 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.73%

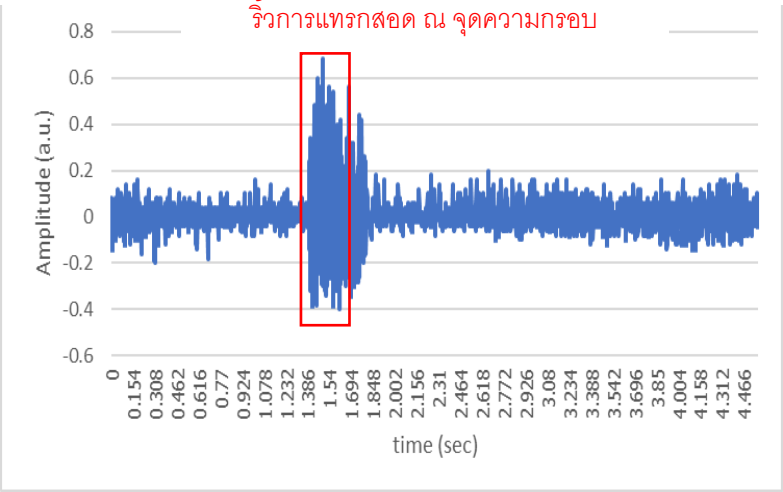
ตาราง ก.3.3.4 การทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 4



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	45	
	ระยะการกระจัด (*D*)	2.95×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.47	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	170.80	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	169.47	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 169.47 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 170.80 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.79%

ตาราง ก.3.3.4 การทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 4



ริ้วการแทรกสอด ณ จุดความกรอบ	จำนวนริ้วการแทรกสอด (*N*)	47	
	ระยะการกระจัด (*D*)	3.08×10^{-5}	m
	ความดันเสียงความกรอบ (*P*)	1.54	nPa
	ระดับความดันของความกรอบ (*SPL*)	169.25	dB
	ระดับความดันของความกรอบอ้างอิง (SPL_{ref})	169.23	dB

จากการทดสอบหัววัดโมเดล C ครั้งที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหักของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้ เท่ากับ 169.23 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตัวตรวจจับความดันเสียงได้ เท่ากับ 169.25 dB ค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.01%

ผลลัพธ์ของหัววัดโมเดล C เมื่อทดสอบกับมันฝรั่งทอดกรอบซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้ ณ เสียงความกรอบขณะแตกหัก ของขนมขบเคี้ยวที่เครื่องมือวัดอ้างอิงวัดได้อยู่ในช่วง 167.38 – 169.47 dB และ ตัวตรวจจับความกรอบโมเดลที่ C สามารถตรวจจับระดับความดันเสียงได้อยู่ในช่วง 166.34 – 170.80 dB ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 6.80%

ก.4 ผลการทดสอบตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นกับขนมขบเคี้ยว 3 ชนิด

การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับวัดความกรอบมีการนำหัววัดโมเดล C มาทดสอบกับขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะที่แตกต่างกันทางกายภาพ 3 ชนิดดังที่ได้กล่าวข้างต้น สามารถแสดงรายละเอียดของขนมขบเคี้ยวได้ดังนี้

ตารางที่ ก.11 ขนาดของขนมขบเคี้ยวทั้ง 3 ชนิด

type	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
Shrimp chip	39.60	27.00	2.75
	37.80	25.90	2.35
	39.80	27.30	2.35
	33.90	27.20	2.38
	35.20	27.68	2.20
	39.60	25.70	2.90
	40.40	28.45	2.95
	38.60	28.20	2.35
	39.40	27.50	2.50
	40.20	26.20	2.00
Average	38.45	27.11	2.47
Corn chip	55.28	50.30	0.70
	62.30	53.40	1.10
	51.50	51.30	1.20
	53.70	48.20	1.10
	53.50	47.00	1.10
	56.75	50.10	1.75
	50.80	49.90	1.00
	57.40	55.30	1.98
	57.28	50.40	1.10
	48.40	41.20	1.40
Average	54.69	49.71	1.24

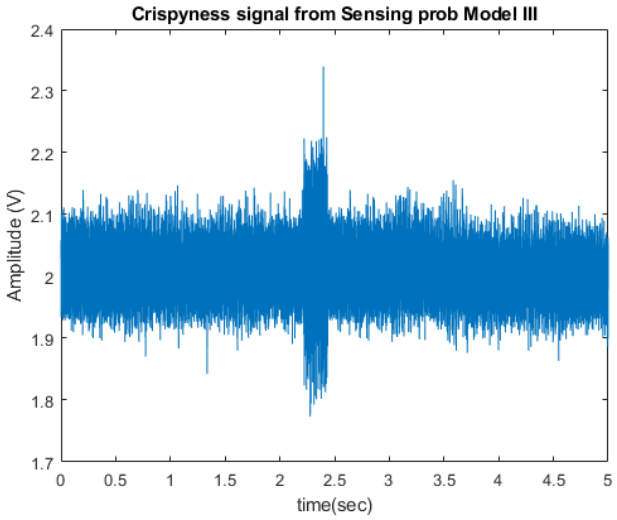
ตารางที่ ก.11 ขนาดของขนมขบเคี้ยวทั้ง 3 ชนิด (ต่อ)

Potato chip	50.60	40.60	1.10
	50.50	40.60	1.00
	51.00	40.90	0.90
	52.00	42.20	1.10
	51.38	42.20	1.20
	52.10	42.20	1.10
	52.00	40.40	1.10
	52.00	42.00	1.00
	51.90	42.60	1.10
	50.50	41.30	1.20
Average	51.40	41.50	1.08

ก.5 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม MATLAB

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองอาศัยโปรแกรม MATLAB มนการช่วยวิเคราะห์ผลตามโค้ดภาคผนวก ก.1 จากการป้อนเข้าริ้วแทรกสอดของความกรอบ สัญญาณจะถูกผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกก่อนเลือกช่วงริ้วการแทรกสอดของเสียงความกรอบที่ขึ้นจากขนมขบเคี้ยว ซึ่งในการจำลองการเคี้ยวขนมของมนุษย์จะมีทั้งการแตกหัก 1 ครั้งและการแตกหักมากกว่า 1 ครั้ง ทำให้มีการเลือกช่วงริ้วการแทรกสอดของเสียงความกรอบครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากการแตกหักครั้งถัดไปเป็นการแตกหักของชิ้นส่วนที่แตกไม่สมบูรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม MATLAB ประกอบไปด้วย กราฟความสัมพันธ์แอมพิจูดกับเวลา และค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 และ 3 โดยแสดงค่าจำนวนริ้วการแทรกสอด ระยะการกระจัด ความดันเสียง ระดับความดันเสียงความกรอบจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ระดับความดันเสียงความกรอบจากเครื่องมือวัดอ้างอิง และค่าความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 1



Number of fringe (N): 43

Displacement: 2.8204e-05

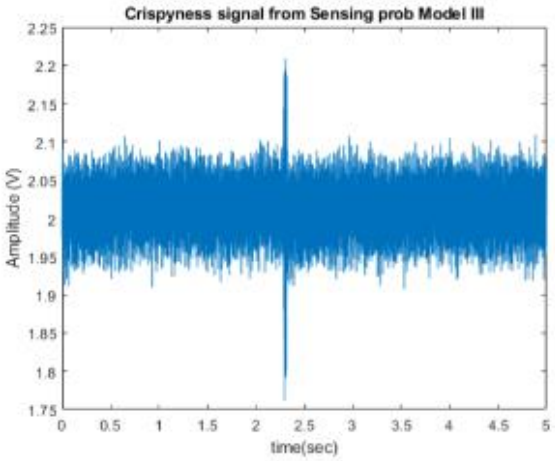
Pressure(FFPI) : 1.4075e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 172.4387 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 173.3 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.49699 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 2



Number of fringe (N): 39

Displacement: 2.558e-05

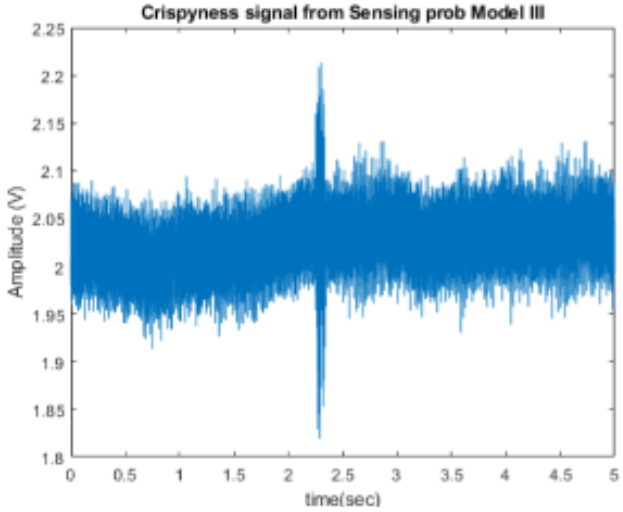
Pressure(FFPI) : 1.2766e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 175.9784 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 173.3 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 1.5455 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 3



Number of fringe (N): 44

Displacement: 2.886e-05

Pressure(FFPI) : 1.4403e-09 Pa

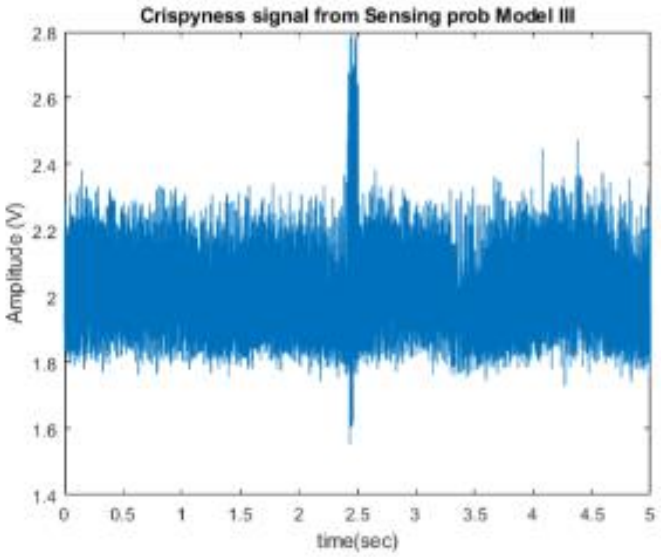
Sound Pressure Level (Lp) : 171.6105 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 173.3 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.97489 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 4



Number of fringe (N): 46

Displacement: 3.0172e-05

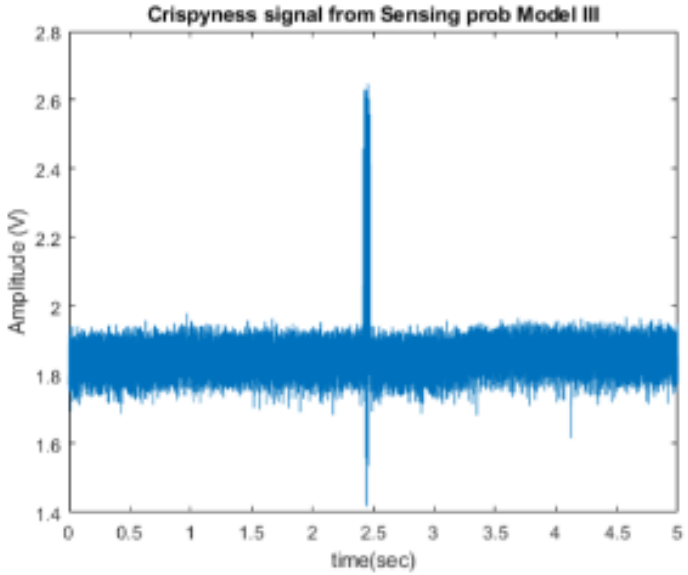
Pressure(FFPI) : 1.5057e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 170.0148 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 169.48 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.31554 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 5



Number of fringe (N): 43

Displacement: 2.8204e-05

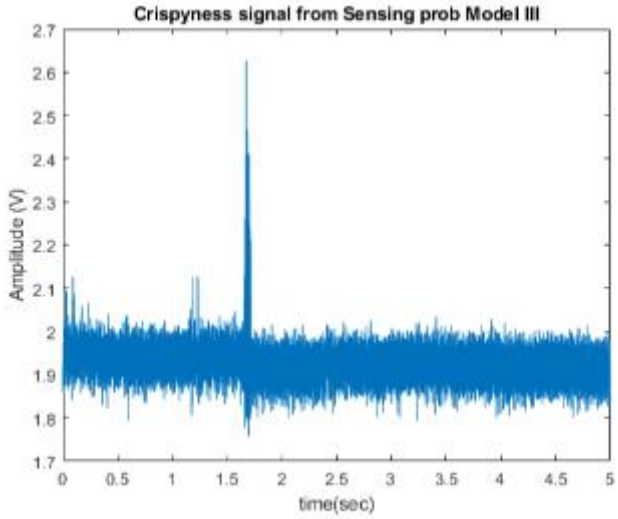
Pressure(FFPI) : 1.4075e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 172.4387 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 174.1717 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.99498 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 6



Number of fringe (N): 42

Displacement: 2.7548e-05

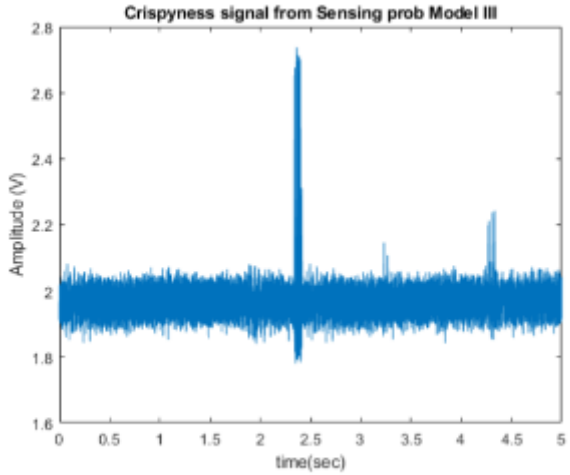
Pressure(FFPI) : 1.3748e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 173.2885 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 174.1717 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.5071 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 7



Number of fringe (N): 47

Displacement: 3.0828e-05

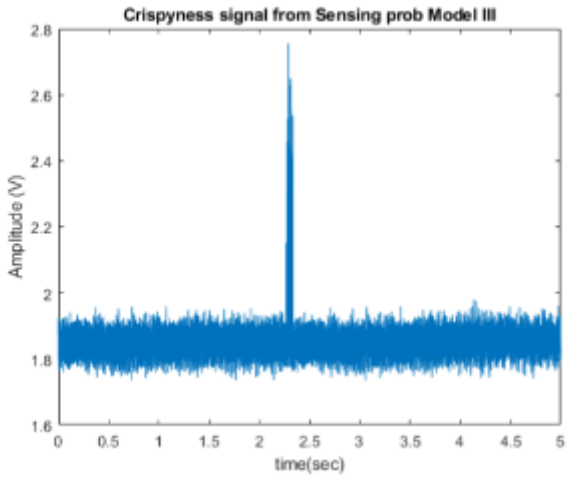
Pressure(FFPI) : 1.5385e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 169.2454 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 169.48 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.13842 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 8



Number of fringe (N): 44

Displacement: 2.886e-05

Pressure(FFPI) : 1.4403e-09 Pa

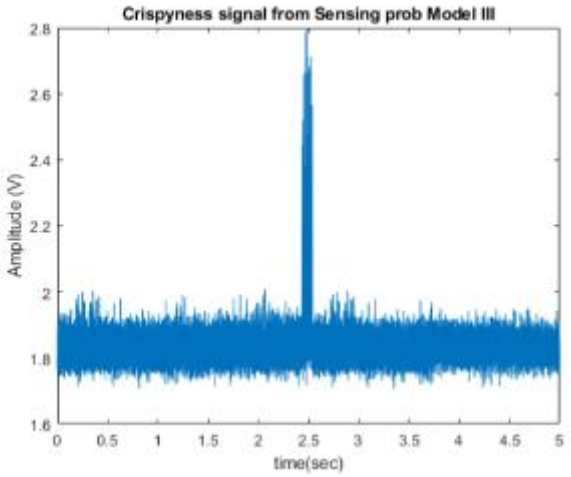
Sound Pressure Level (Lp) : 171.6105 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 169.48 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 1.2571 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 9



Number of fringe (N): 47

Displacement: 3.0828e-05

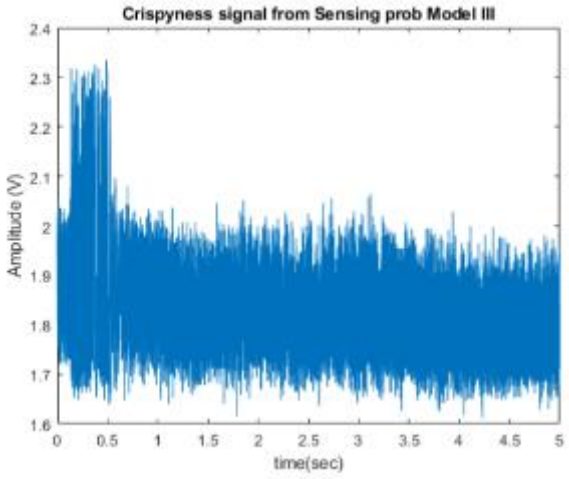
Pressure(FFPI) : 1.5385e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 169.2454 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 169.48 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.13842 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 10



Number of fringe (N): 70

Displacement: 4.5914e-05

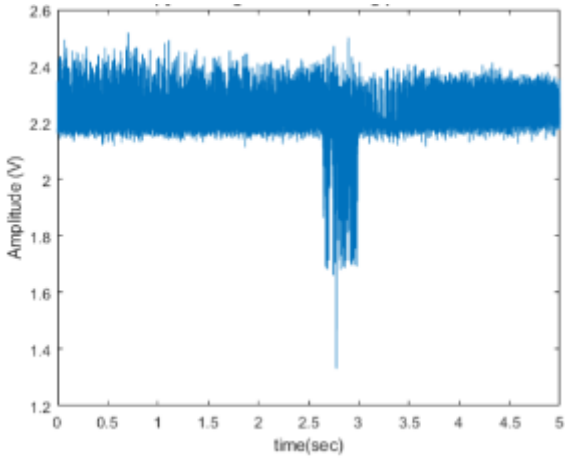
Pressure(FFPI) : 2.2913e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 155.3104 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 156.0105 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.44873 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 11



Number of fringe (N): 69

Displacement: 4.5258e-05

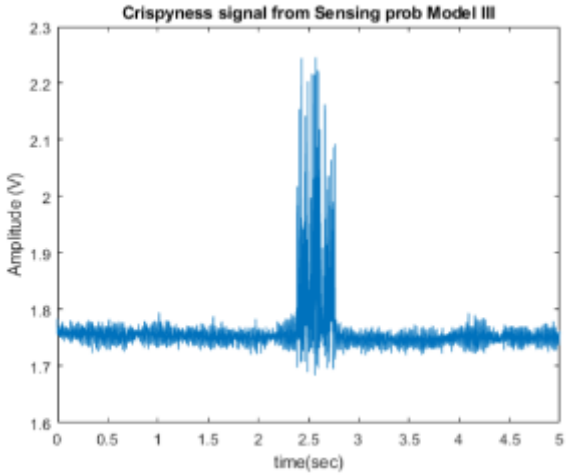
Pressure(FFPI) : 2.2586e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 155.8034 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 156.0105 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.13277 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 12



Number of fringe (N): 72

Displacement: 4.7226e-05

Pressure(FFPI) : 2.3568e-09 Pa

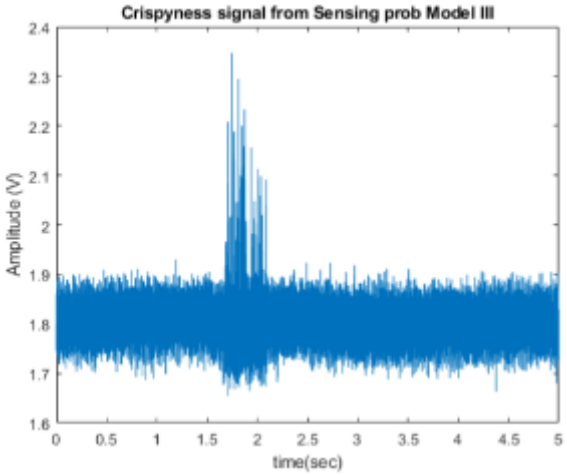
Sound Pressure Level (Lp) : 154.3476 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.183 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 13



Number of fringe (N): 69

Displacement: 4.5258e-05

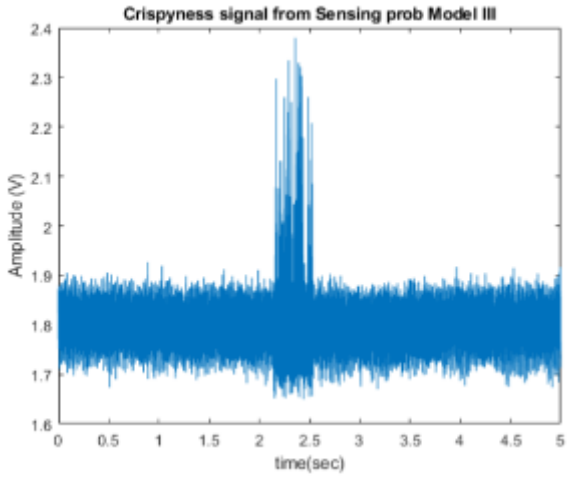
Pressure(FFPI) : 2.2586e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 155.8034 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.75843 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 14



Number of fringe (N): 73

Displacement: 4.7881e-05

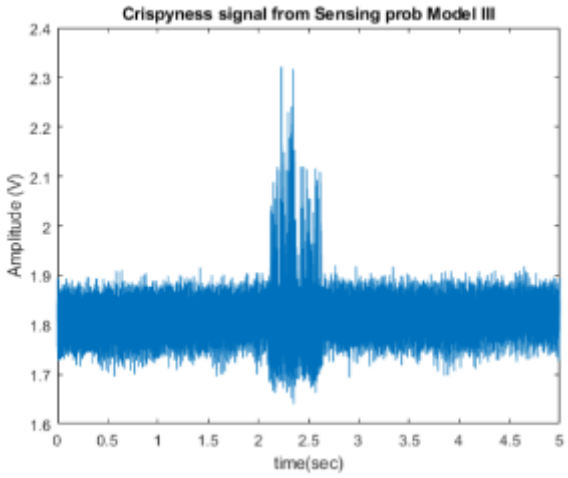
Pressure(FFPI) : 2.3895e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 153.8773 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.48716 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 15



Number of fringe (N): 69

Displacement: 4.5258e-05

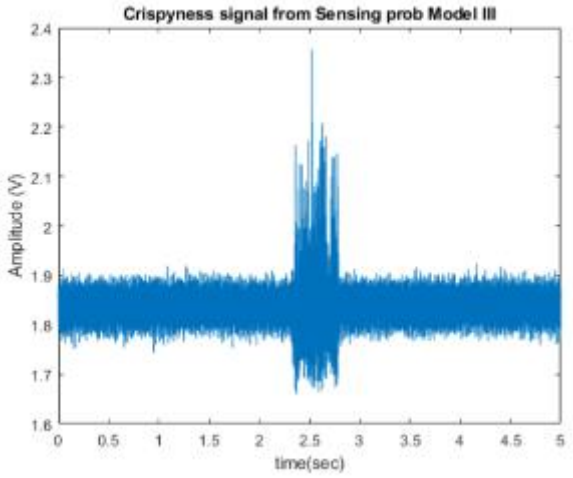
Pressure(FFPI) : 2.2586e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 155.8034 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.75843 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 16



Number of fringe (N): 71

Displacement: 4.657e-05

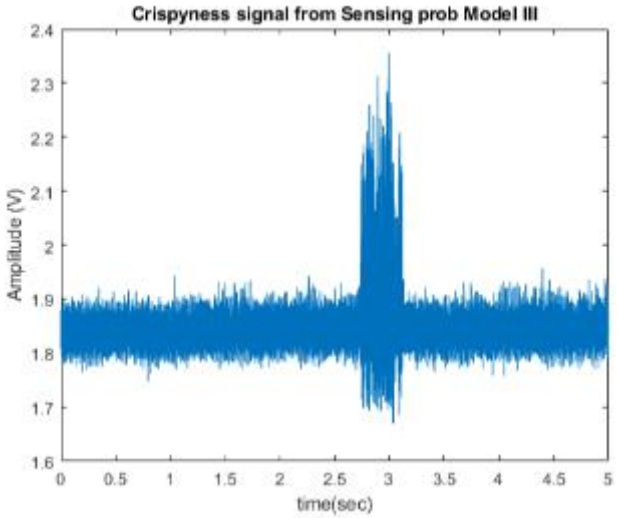
Pressure(FFPI) : 2.3241e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 154.8253 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.12589 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 17



Number of fringe (N): 70

Displacement: 4.5914e-05

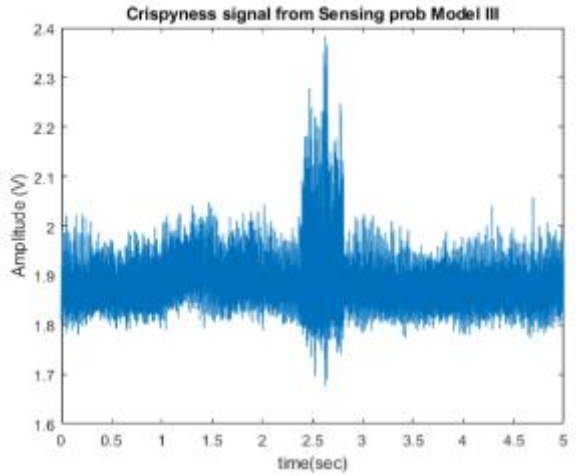
Pressure(FFPI) : 2.2913e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 155.3104 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.43965 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 18



Number of fringe (N): 72

Displacement: 4.7226e-05

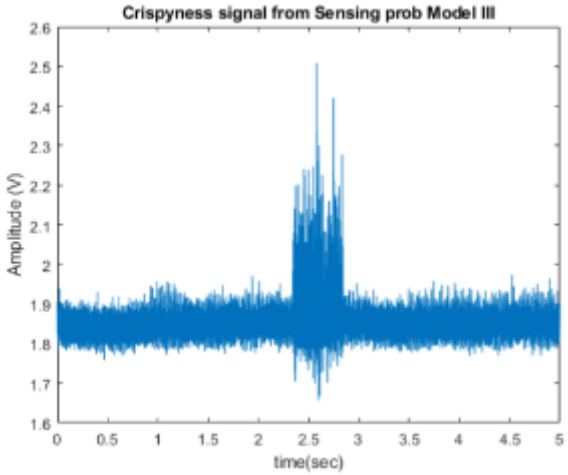
Pressure(FFPI) : 2.3568e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 154.3476 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.183 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 19



Number of fringe (N): 74

Displacement: 4.8537e-05

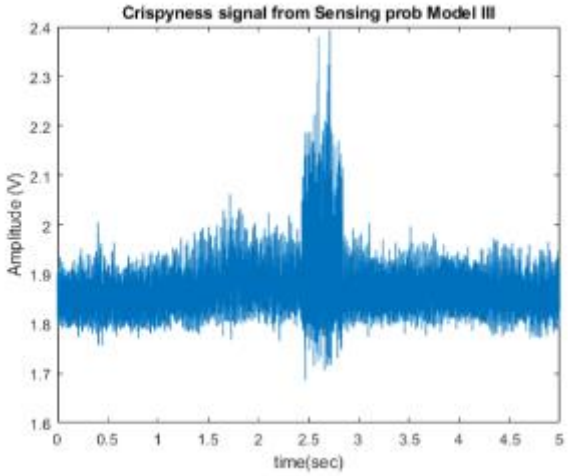
Pressure(FFPI) : 2.4223e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 153.4141 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.78673 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 20



Number of fringe (N): 74

Displacement: 4.8537e-05

Pressure(FFPI) : 2.4223e-09 Pa

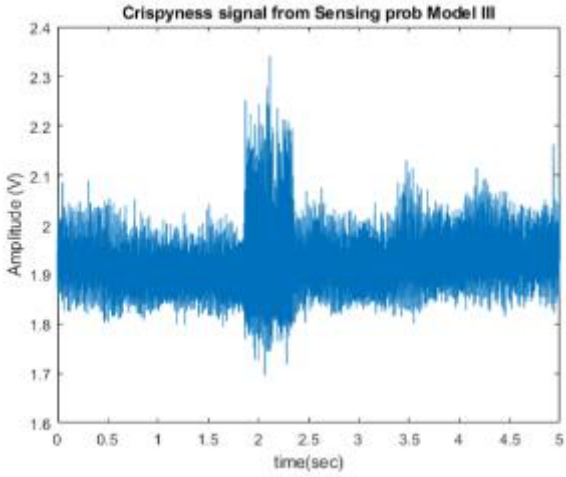
Sound Pressure Level (Lp) : 153.4141 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.78673 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 21



Number of fringe (N): 71

Displacement: 4.657e-05

Pressure(FFPI) : 2.3241e-09 Pa

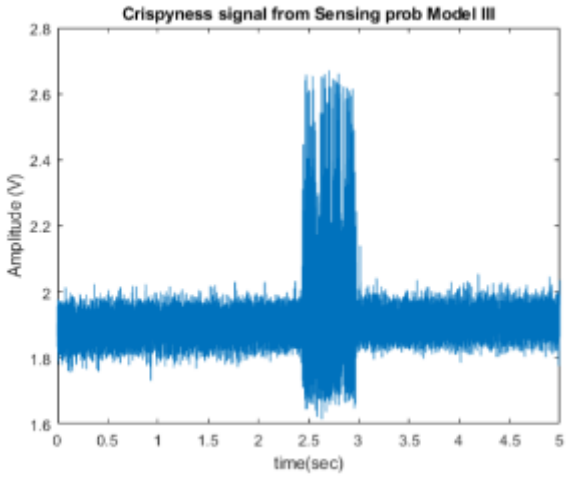
Sound Pressure Level (Lp) : 154.8253 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 154.6306 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.12589 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 22



Number of fringe (N): 38

Displacement: 2.4925e-05

Pressure(FFPI) : 1.2439e-09 Pa

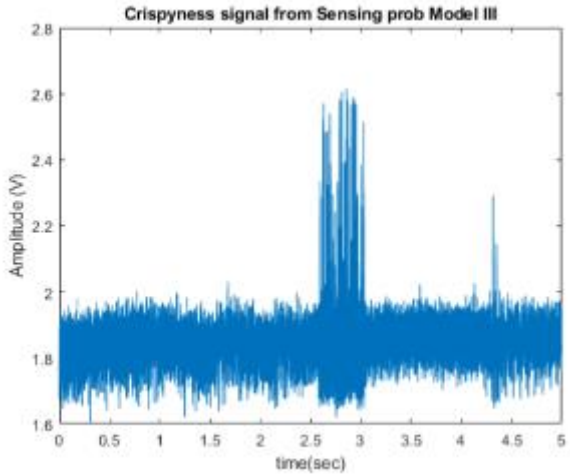
Sound Pressure Level (Lp) : 176.9261 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.60321 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 23



Number of fringe (N): 41

Displacement: 2.6892e-05

Pressure(FFPI) : 1.3421e-09 Pa

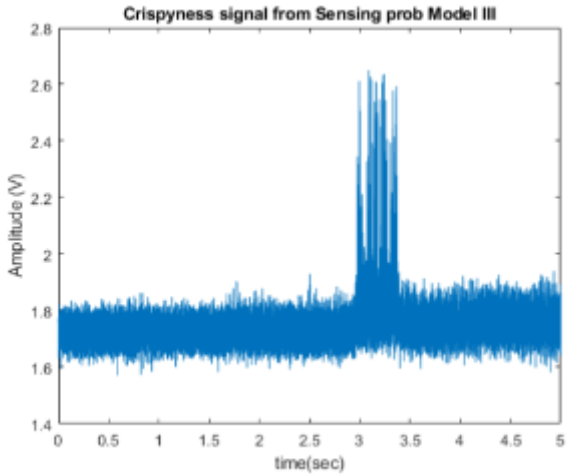
Sound Pressure Level (Lp) : 174.1609 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.96916 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 24



Number of fringe (N): 41

Displacement: 2.6892e-05

Pressure(FFPI) : 1.3421e-09 Pa

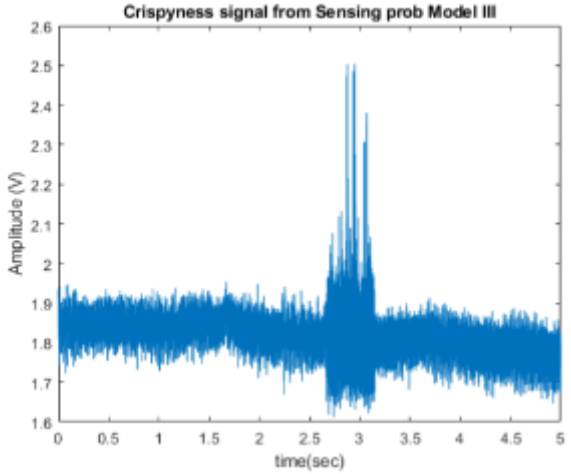
Sound Pressure Level (Lp) : 174.1609 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.96916 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 25



Number of fringe (N): 39

Displacement: 2.558e-05

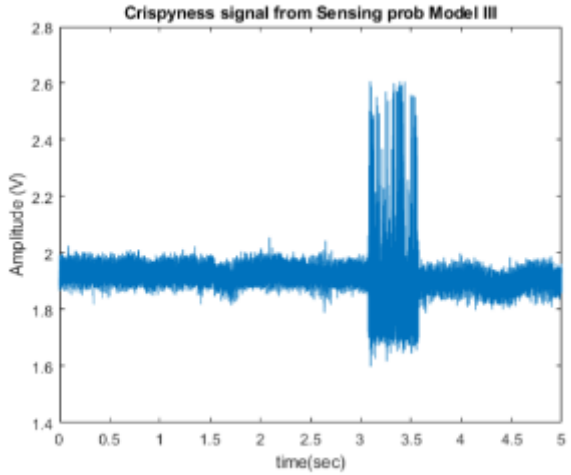
Pressure(FFPI) : 1.2766e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 175.9784 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.064311 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 26



Number of fringe (N): 41

Displacement: 2.6892e-05

Pressure(FFPI) : 1.3421e-09 Pa

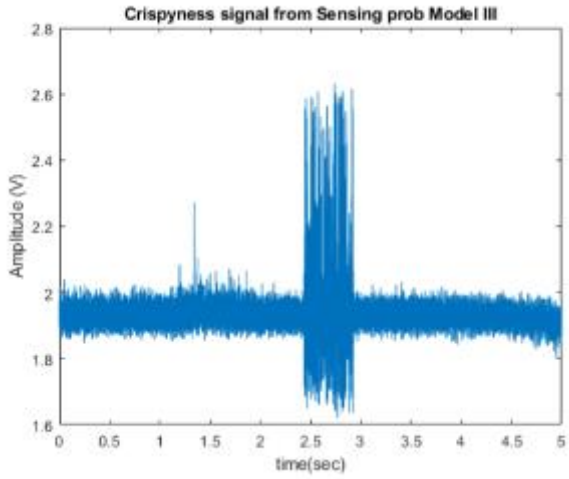
Sound Pressure Level (Lp) : 174.1609 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.96916 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 27



Number of fringe (N): 40

Displacement: 2.6236e-05

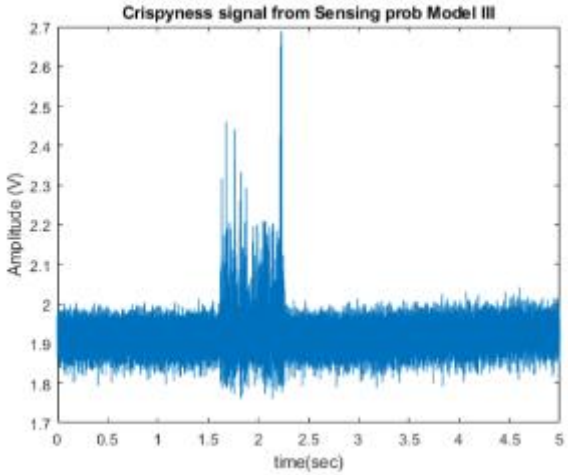
Pressure(FFPI) : 1.3093e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 175.0571 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 175.8653 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.45955 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 28



Number of fringe (N): 46

Displacement: 3.0172e-05

Pressure(FFPI) : 1.5057e-09 Pa

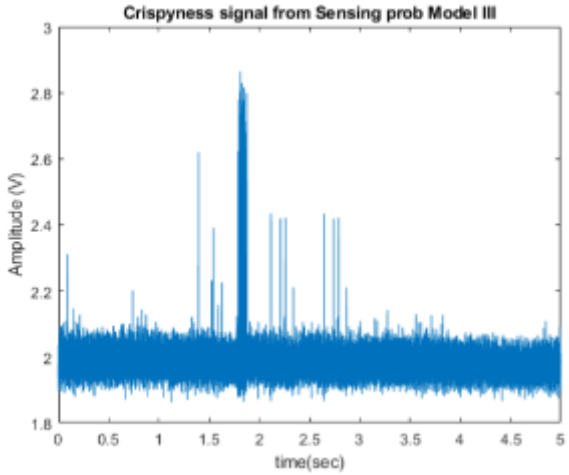
Sound Pressure Level (Lp) : 170.0148 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 170.665 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.381 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 29



Number of fringe (N): 42

Displacement: 2.7548e-05

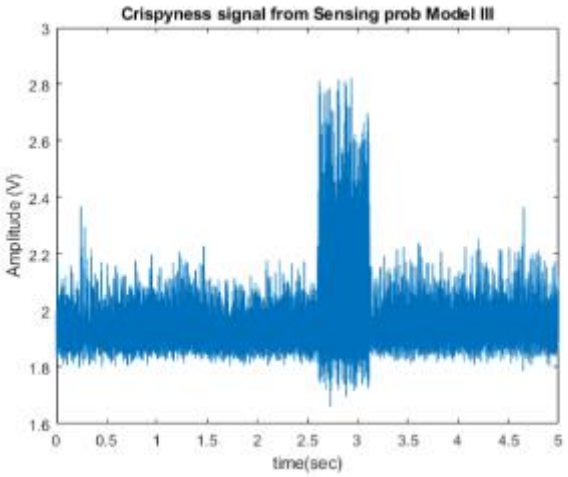
Pressure(FFPI) : 1.3748e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 173.2885 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 173.3 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.0066479 %

ขนมขบเคี้ยวตัวอย่างที่ 30



Number of fringe (N): 56

Displacement: 3.6731e-05

Pressure(FFPI) : 1.8331e-09 Pa

Sound Pressure Level (Lp) : 163.0427 dB

Sound Pressure Level Reference (Lpf) : 162.7511 dB

Error of Sensing probe Modell 3 : 0.17917 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Applied Science and Engineering Progress, Vol. 17, No. 2, 2024, 7283 1

Research Article

Dynamic Low-Pressure Measurement Using a Fiber Optic-based Fabry-Perot Interferometer

Pronnaruimon Talhakultorn and Saroj Pullteap*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding author. E-mail: saroj@su.ac.th DOI: 10.14416/j.asep.2023.11.011
Received: 8 September 2023; Revised: 5 October 2023; Accepted: 25 October 2023; Published online: 28 November 2023
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract
A dynamic low-pressure measurement using a fiber optic-based Fabry-Perot Interferometer (FFPI) has been demonstrated in this work. The developed system has been divided into 2 main parts: pressure source and sensing system. The former is a chamber comprised of an elastic diaphragm, which proportionally deflects according to input pressure from an air pump. The FFPI, consequently, detects the material deflection and demodulates the parameter into useful pressure value via the fringe counting technique and Kirchhoff-Love's plate theory. To validate the performance of the developed system, a reference pressure instrument is utilized while the air pump feeds pressure of 0.34–6.57 mbar with 10 times repeatability into the system. The experimental results indicated that the FFPI can measure the pressure of 0.343–6.568 mbar, while the reference instrument showed the output values from 0.343–6.471 mbar, respectively. Moreover, the average and maximum percentage error in measurement is 1.27% and 2.67%, respectively. The resolution of the FFPI sensor is also analyzed to be approximately 0.05% or 0.0382 mbar/μm over all measurement ranges. Therefore, we conclude that the FFPI has high accuracy, resolution, linearity, and reliability in dynamic low-pressure measurements.

Keywords: Dynamic low-pressure measurement, Fabry-Perot interferometer, Fringe counting technique, Material deflection, Reference pressure instrument

1 Introduction

In modern industries, measuring instruments and sensors have become critical roles as integral components of automated control systems. However, it corresponds to the demand for user-friendly, high-precision equipment capable of autonomous decision-making. Furthermore, industrial machinery can benefit from the support of operating systems that are equipped with predefined datasets, thereby enhancing their operational speed. Consequently, a diverse array of sensors, encompassing categories such as pressure, temperature, chemical, and optical sensors, etc. [1] has found widespread adoption across a multitude of industries. Notably, pressure-sensing instruments are indispensable in a variety of contexts, including but not limited to the oil and gas sector, power plants, automotive manufacturing, and agriculture [2], [3]. Within the limitation of industrial processes, it becomes imperative to regulate, monitor, and sustain pressure levels in accordance with the specific requirements of each machine system [4]. In this context, low-pressure instruments can offer superior resolution and precision capabilities. Nonetheless, it is important to acknowledge that current devices possess certain limitations in their applications, most notably in terms of sensitivity, accuracy, precision, and high-precision or specialized pressure sensors can be expensive, which may be a limitation for budget-conscious applications [5].

Consequently, a fiber optic sensor (FOS) is another type of suitable pressure detector for low-pressure applications with several advantages over the

electronic commercial sensor such as high sensitivity, small size, immunity to electromagnetic waves, lightweight, and operational in noisy, hazardous, as well as narrow areas [6]–[10]. Several researchers have, therefore, investigated and developed low-pressure sensors using FOS. For instance, Riveraa *et al.*, [11] developed an extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer (EFPI) based on thin polyester film using phase signal analysis at a variable pressure ranging from 0–2 psi. Results demonstrated that the EFPI had high efficiency with detection sensitivity close to 3.5 rad/psi. This study opens up a wide range of options for low-pressure detection. Moreover, Aime *et al.*, [12] developed a specific low-pressure sensor for aerodynamic applications. Two fiber optic strain sensing technologies based on fiber segment interferometry (FSI) and fiber Bragg grating (FBG) have been implemented. The pressure resolution was designed to be 23, 9.5, and 0.61 Pa, respectively. The results also showed that the pressure resolution of the FSI was 15 times greater than that of the FBG. In addition, Mishra *et al.*, [13] developed an optical pressure sensor based on the Fabry–Perot Interferometer (FPI) principle for a pressure range of 1 bar. A finite element (FE)-based sensor was also developed to simulate the structure and fluid element for the diaphragm and gas trapped in the cavity of a pressure sensor. The reference pressure and diaphragm deflection were assessed at different applied pressures. Analyzing the effects of gases trapped in the small sealed cavities of pressure sensors showed that the range of the diaphragm was more severely affected than sensors with smaller cavity lengths due to a greater change in reference pressure in the sealed compartment. However, the development of low-pressure instruments still has limitations. For example, measurement errors can occur in the sensing probe, and the pressure sensor is not able to measure the dynamic low-pressure range sufficiently [11].

In previous work, we preliminary developed an extrinsic fiber-based Fabry-Perot interferometer (EFFPI) for measuring the low-pressure in the range of 5–55 mbar with a maximum error of 3.77% [14]. However, we are continuing the development of a sensing system using the principle of the fiber optic-based Fabry-Perot interferometer (FFPI) for dynamic low-pressure measurement. The fringe counting technique cooperated with the material deformation theory is still utilized as a main technique to demodulate the obtained interference fringe to the pressure value. We anticipate that the development of pressure sensors for lower pressure measurements will yield increased sensitivity, but reduce responsiveness to the external incentives. Consequently, with the ability to accurately measure extremely low-pressure levels, these sensors can effectively mitigate the risks associated with pressures exceeding the system's capacity, thereby preventing potential accidents. Moreover, the reduced production costs associated with these sensors will enhance their affordability and accessibility to a broader user base. Furthermore, their user-friendly nature facilitates their integration into existing low-pressure detection systems, potentially enhancing their overall performance and reliability.

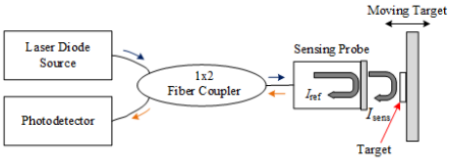


Figure 1: Basic structure of a FFPI.

2 Materials and Methods

The development of a dynamic low-pressure sensor using a fiber optic-based Fabry-Perot interferometer has been applied using the following theories and related studies.

2.1 *Fiber optic-based interferometers*

In general, the optical fiber-based interferometer has been classified into four main types; Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac, and Fabry-Perot interferometers [15]. The fiber optic-based Fabry-Perot interferometer (FFPI) is one of the fiber optic interferometers that are widely applied as a detector for industrial applications, due to their several outstanding features such as high detection sensitivity, low cost, and simplicity of development [16]–[18]. The basic structure of this sensor is shown in Figure 1.

As shown in Figure 1, the basic structure of a fiber optic-based Fabry-Perot interferometer functions by using only a uniaxial element as a sensing arm, unlike

other interferometers that transmit signals from two axes (reference and sensing arms).The monochromatic light from the laser diode source is injected through a 1x2 fiber coupler and subsequently into the sensing arm. About 4% of the light is reflected at the fiber end as a reference signal (I_{ref}), while the rest is transmitted to the target and then reflected back to the sensing arm as a sensing signal (I_{sens}). Afterward, the two signals superimpose within the fiber arm, achieving an interference signal (I), which is modulated by a phase difference (ϕ) [19]–[23], which can be determined by Equation (1):

$$I = I_{sens} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{sens} I_{ref}}\cos\phi \quad (1)$$

In addition, the phase difference [20] between the sensing and reference signals can be expressed by Equation (2).

$$\phi = \frac{4\pi n \Delta l}{\lambda} \quad (2)$$

where. n is the refrative index ($n = 1$ when the medium is air), λ is the wavelength of a monochromatic light source and Δl is the cavity length variation

When the phase difference is perturbed, the output interference signal will be modulated, forming a set of cosinusoidal waveforms with each wave period corresponding to an interference fringe. Consequently, the number of interference fringe (N) can be applied to calculate the displacement (D) of a moving target, [24], [25], as shown in Equation (3).

$$D = N\frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

2.2 *Deformation of material*

Material deformation is a process of changing the shape, appearance, and size of a material when forces such as pressure, tensile, compression, and shear are applied to it. However, such a process can be used to determine the thickness, resistance, stress, strain, and elastic modulus (δ) of the material. The nature of the force acting on the material [26] in several ways can be demonstrated in Figure 2.

The determination of elastic modulus is a measure of the resistance of an elastic material before it reaches a critical point. This phenomenon can be determined

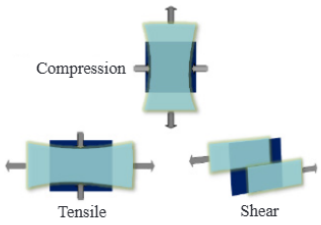


Figure 2: Nature of force acting on material.

from the relationship between the stress and strain of the material [27]–[29], as shown in Equation (4).

$$\delta = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

where: σ is the stress of the material
ε is the strain of material

In addition, Poisson's ratio (v), which is the ratio of lateral strain to longitudinal strain [30], [31], can be expressed as Equation (5):

$$v = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (5)$$

where: ε_x is the transverse strain of material
ε_y is the axial strain of material

2.3 *Pressure measurement*

The relationship between the magnitude of the force acting perpendicularly to any area is pressure (P), as shown in Equation (6). The unit of pressure can be expressed in pascal (Pa), pound per square inch (Psi), or bar [32].

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

when: F is the inducing force
A is the area being acted upon

Pressure is also involved in several industrial applications [33]. Pressure measurement and control are, generally, required in the process of machine operations using qualified and sufficiently high-quality measuring instruments. As a result, most pressure-measuring devices are developed from optical devices [34], [35]. Optical pressure measuring devices usually rely on the deformation of a reflective material caused by induced pressure. Here, Kirchhoff-Love's plate

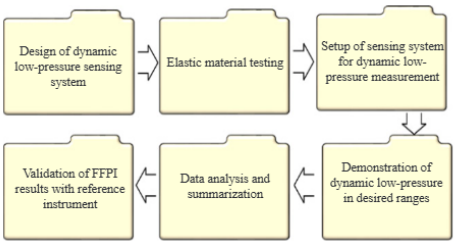


Figure 3: Workflow of dynamic low-pressure sensing development based on Fabry-Perot interferometer.

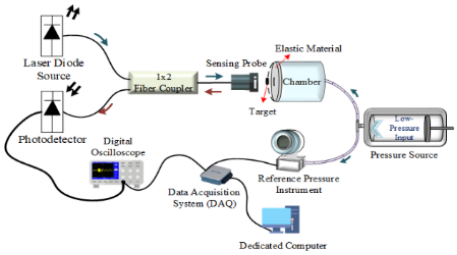


Figure 4: Structure of a dynamic low-pressure measurement using fiber optic-based Fabry-Perot interferometer.

theory for a clamped-edge circular diaphragm is demonstrated, which presents the relationship between the change in displacement and pressure as follows [36]–[41].

$$P = \frac{16\delta d^3 \Delta l}{3r^3(1-\nu^2)} \tag{7}$$

where: d is the material thickness
r is the deformation radius of the material
Δl is the changes in displacement

3 Experimental Setup

In this work, a low-pressure sensing system has been designed and implemented. The workflows of this system are illustrated in Figure 3.

The experiment is designed to collect the pressure values from a reference instrument (P_{ref}) and also the interference fringes from the developed system (P_{FFPI}), which was demonstrated at various pressure ranges for verifying the performance of the FFPI sensor. In addition, both pressure values obtained from Pref and PFFPI are next compared to determine the errors and the performance of the developed system.

3.1 *Dynamic low-pressure measurement using fiber optic-based Fabry-Perot interferometer*

As mentioned in the previous section, a dynamic low-pressure measurement using a fiber optic-based Fabry-Perot interferometer has been developed with its structure illustrated in Figure 4.

As shown in Figure 4, the dynamic low-pressure measurement system can be divided into 2 main parts:

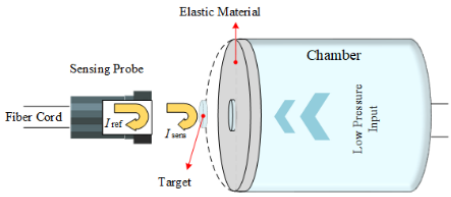


Figure 5: Concept of dynamic low-pressure measurement via changing of elastic material.

the dynamic low-pressure source and the fiber optic sensing system. The pressure source comprises an air pump that feeds in air pressure simultaneously to a chamber and a reference high-precision differential pressure instrument model: SITRANS P320 from Siemens. Note that the pressure instrument is applied as a pressure gauge during pressure feeding and also as a reference device for validating the developed FFPI. At the chamber, the feed-in pressure will induce upon an elastic material, proportionally deflecting it as illustrated in Figure 5.

As shown in Figure 5, the elastic material is deflected according to input pressure. This phenomenon can be detected by using an FFPI [31] and later demodulated into useful pressure readings via the fringe counting technique in Equation (7) [42]. To observe the output interference signal, a digital oscilloscope model: TDS2014B from Tektronix is utilized as a display. Meanwhile, a data acquisition unit simultaneously records the data from both the oscilloscope and reference pressure device for further analysis using MATLAB programming in a dedicated computer.

(a) (b)

Figure 6: Material testing process: (a) measuring of stress and strain in elastic material, (b) diameter measurement on material's fixation to chamber.

To validate the developed FFPI system, both the FFPI sensor and the reference instruments are exploited to measure input pressure. Here, the input pressure range is 0.343–6.417 mbar (measured by the reference device) and each selected value is performed in 10 times of repeatability. This experiment aims to verify the performance of the developed FFPI that is its accuracy, resolution, and linearity in low-pressure measurement.

3.2 *Elastic material testing process*

To apply the deformation theory for detecting the dynamic low-pressure using an optical fiber interferometer, the elastic material has been characterized for investigating its material thickness, Young's modulus (E), Poisson's ratio, and the radius, etc. An example of this investigation is depicted in Figure 6.

Figure 6 shows the measurement process of the elastic material by using a universal testing machine (UTM) *Model: 5969* from *Instron Engineering Corporation* for obtaining the stress, strain, and radius parameters. Consequently, the testing results are then used to calculate Young's modulus (or elastic modulus), and Poisson's ratio by using Equations (4) and (5), respectively. These parameters are summarized in Table 1.

Table 1: Elastic modulus, thickness, and Poisson's ratio of elastic material

Description	Symbol	Values
Elastic modulus of material	E	6.365 MPa
Thickness of material	h	0.135 mm
Poisson's ratio of material	v	0.49
Wavelength	λ	1311.82 nm
Bending radius	r	15 mm

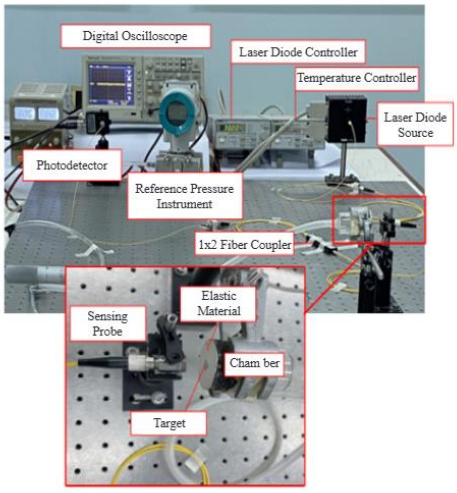


Figure 7: Experimental setup of a dynamic low-pressure measurement system using FFPI sensor.

4 Experimental Results and Discussion

As mentioned before, a fiber optic-based Fabry-Perot interferometer (FFPI) for dynamic low-pressure measurement has been developed in this research work. The experimental setup of the system is, therefore, shown in Figure 7.

As shown in Figure 7, the developed system is composed of 2 main parts, pressure source, and sensing system, respectively. Initially, when the whole system is installed without feeding any pressure, the output signal from the digital oscilloscope is displayed in Figure 8(a). On the other hand, when a dynamic pressure is fed into the system, the output signal plotted on the oscilloscope is presented in Figure 8(b). Moreover, this signal is next transferred to a dedicated computer and then demodulated using the MATLAB programming to calculate the output pressure. An example of the demodulated pressure has been plotted in Figure 8(c).

To validate the FFPI sensor's accuracy, pressure in the range of 0.34–6.417 mbar has been inducted into the system with 20 times repeatability for each test. The demodulated pressure obtained using the FFPI is then compared to that of the reference. Consequently, the experimental results are summarized in Table 2.

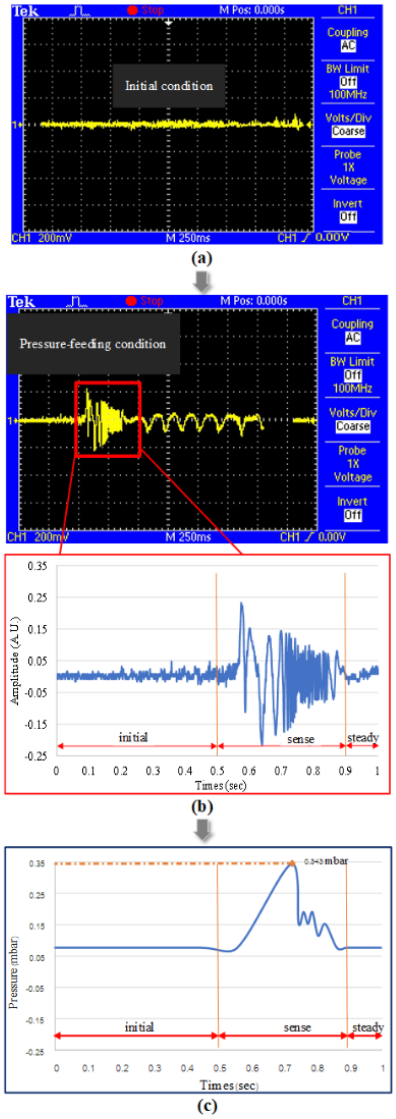


Figure 8: Output signal displayed on monitoring system: (a) at initial condition, (b) example of output interference fringes with pressure-feeding condition and (c) dynamic pressure plotted by MATLAB programming.

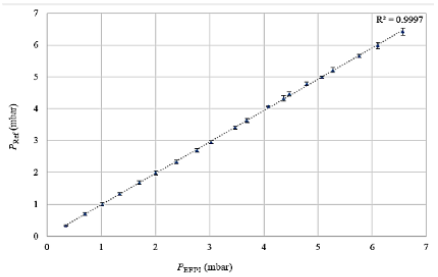


Figure 9: Relationship of output pressure obtained from FFPI vs. reference instrument.

Table 2: Experimental results from FFPI compared with reference pressure instrument

Range	$P_{ref,Avg}$ (mbar)	$P_{FFPI,Avg}$ (mbar)	% ERROR
1	0.343	0.343	0.00
2	0.694	0.697	0.43
3	1.003	1.013	0.99
4	1.330	1.341	0.82
5	1.682	1.699	1.00
6	1.987	2.004	0.85
7	2.331	2.389	2.43
8	2.697	2.766	2.49
9	2.948	3.029	2.67
10	3.410	3.471	1.76
11	3.628	3.691	1.71
12	4.080	4.084	0.10
13	4.332	4.366	0.78
14	4.470	4.469	0.02
15	4.778	4.789	0.23
16	4.988	5.071	1.64
17	5.212	5.273	1.16
18	5.657	5.760	1.79
19	5.975	6.107	2.16
20	6.417	6.568	2.30

The results in Table 2 show that the maximum percentage error of the developed FFPI is 2.67%, while the average percentage error is 1.27%, respectively. In addition, the relationship between the pressure output obtained from the reference instrument versus the FFPI sensor has been plotted in Figure 9. This relation has investigated the linearity of the FFPI for dynamic low-pressure measurements compared with the standard value.

Figure 9 shows the relationship between

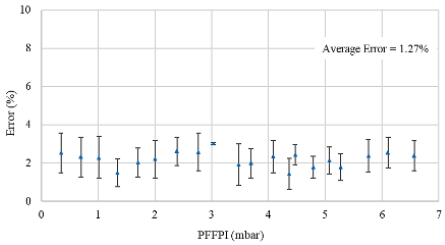


Figure 10: Measurement error obtained from FFPI.

the output low-pressures obtained from the reference pressure instrument (P_{ref}) and the fiber optic-based Fabry-Perot interferometer (P_{FFPI}) for each dynamic pressure range (each averaged from 10 times repeatable tests). A linear correlation analysis indicates a coefficient of determination (R^2) of 0.9997. This implies that the FFPI pressure sensor has very high linearity. Moreover, the percentage measurement error from the experiment has been illustrated in Figure 10.

Figure 10 depicts the relationship between the output low-pressure range achieved from the FFPI sensor and the percentage error of each pressure range. The result indicates that a maximum percentage error is found to be 2.67% at the pressure range of 2.948 mbar, while the average error over all pressure ranges is 1.27%, respectively. Thus, 3 main factors causing the error can be deduced: the surrounding environment affecting the elastic material, the pressure leak from the source and chamber, and the improper sensor installation. Nevertheless, the experimental results verified that the FFPI sensor has the capability for dynamic low-pressure measurement with high linearity (R^2 value equals to 0.9997), and also a high resolution of approximately 0.05% or 0.0382 mbar/m.

4 Conclusions

In this work, a dynamic low-pressure sensing system using a fiber optic-based Fabry-Perot interferometer (FFPI) has been developed. The interference fringe counting technique is applied in conjunction with the material deflection theory to calculate the desired low pressure. Furthermore, a reference pressure instrument is simultaneously operated to determine the performance of the developed FFPI system. In the experiment, air pressure input into the system ranges from 0.34–6.57 mbar, and the testing also are performed for 10 times of repeatability. The experimental results indicate that the FFPI can measure the pressure in the range of 0.343–6.568 mbar, while the reference pressure instrument measures in the range of 0.343–6.417 mbar. Further, a maximum percentage error was found to be 2.67%, while an average percentage error was 1.27%, respectively. In this study, a total of 20 distinct pressure ranges were subjected to testing, spanning from 0.343–6.417 microbars. Upon examining the average values of FFPI within each of these pressure ranges, it becomes evident that certain pressure intervals exhibit a notably frequent occurrence. This observation underscores the remarkable sensitivity achieved by the developed detector, a fact that is highly commendable from the perspective of the authors. The experiment results demonstrate the high efficiency and high resolution of the low-pressure measurement. Therefore, it can be further developed as a cost-effective measuring instrument. Moreover, it could be conceivable in the future to develop a low-pressure measuring instrument for industrial applications in Thailand.

Acknowledgment

This research has received funding and support from Silpakorn University Research, Innovation, and Creative Fund.

Author Contributions

S.P. Conceptualization; S.P. and P.T.: methodology; S.P. and P.T.: validation; P.T. and S.P.: formal analysis; P.T. and S.P.: resources; P.T. and S.P.: writing-original draft preparation; P.T. and S.P.: writing-review and editing; S.P., supervision; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

[1] M. A. Kotov, P.V. Kozlov, G. Ya Gerasimov, V. Y. Levashov, A. N. Shemyakin, N. G. Solovyov, M. Y. Yakimov, V. N. Glebov, G. A. Dubrova, and A. M. Malyutin, "Thermoelectric detector

application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture," *Acta Astronautica*, vol. 204, pp. 787–793, 2023.

[2] K. Chimklin and C. Chungchoo, "Optimization of design for air gap sensor using the response surface methodology," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 16, no. 1, 2023, Art. no. 5687, doi: 10.14416/j.asep.2022.01.003.

[3] I. Floris, J. M. Adam, P. A. Calderón, and S. Sales, "Fiber optic shape sensors: A comprehensive review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 139, 2021, Art. no. 106508.

[4] C. Li, J. Xie, F. Cordovilla, J. Zhou, R. Jagdheesh, and J. L. Ocaña, "Design fabrication and characterization of an annularly grooved membrane combined with rood beam piezoresistive pressure sensor for low-pressure measurements," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 279, pp. 525–536, 2018.

[5] E. Vorathin, Z. M. Hafizi, N. Ismail, and M. Loman, "Review of high sensitivity fiber-optic pressure sensors for low pressure sensing," *Optics & Laser Technology*, vol. 121, 2020, Art. no. 105841.

[6] D. D. Vo, R. Moradi, M. B. Gerdroodbary, and D.D. Ganji, "Measurement of low-pressure Knudsen force with deflection approximation for gas detection," *Results in Physics*, vol. 13, 2019, Art. no.102257.

[7] P. Thaisongkroh and S. Pullteap, "Investigation of fiber optic-based-refractometer for biogas sensing,"*Applied Science and Engineering Progress*, vol.16, no.4, 2023, Art. no. 6793, doi: 10.14416/j.asep.2023.03.003.

[8] J. Jiang, T. Zhang, S. Wang, K. Liu, C. Li, Z. Zhao, and T. Liu, "Noncontact ultrasonic detection in low-pressure carbon dioxide medium using high sensitivity fiber-optic fabry-peot sensor system," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 23, pp. 5079–5085, 2017.

[9] H. Liao, P. Lu, L. Liu, S. Wang, W. Ni, X. Fu, D. Liu, and J. Zhang, "Phase demodulation of Short-Cavity Fabry-Perot interferometric acoustic sensors with two," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, 2017, Art no. 7102207, doi: 10.1109/JPHOT.2017.2689771.

[10] S. Pullteap, H.-C. Seat, and T. M. Bosch, "Modified fringe-counting technique applied to a dual-cavity fiber Fabry-Pérot vibrometer," *Optical Engineering*, vol. 46, no. 11, 2017, Art. no. 115603.

[11] M. Gutierrez-Rivera, D. Jauregui-Vazquez, J. M. SierraHernandez, D. F. Garcia-Minac, Y. Lopez-Dieguez, J. M. Estudillo-Ayala, and R. Rojas-Laguna, "Low-pressure fiber-optic sensor by polyester Fabry-Perot cavity and its phase signal processing analysis," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, 2020, Art. no. 112338.

[12] L. F. J. Aime, T. Kissinger, S. W. James, E. Chehura, A. Verzeletti, and R. P. Tatam, "High sensitivity pressure measurement using optical fibre sensors mounted on a composite diaphragm," *Optics Express*, vol. 29, no. 3, 2021.

[13] S. Mishra, R. Balasubramaniam, and S. Chandra, "Finite element analysis and experimental validation of suppression of span in optical MEMS pressure sensor," *Microsystem Technologies*, vol. 25, pp. 3691–3701, 2019.

[14] P. Thaisongkroh, S. Pullteap, and H. C. Seat, "Low-pressure measurement using an extrinsic fiber based Fabry-Perot interferometer for industrial applications," *Engineering Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 317–325, 2020.

[15] G. A. Lashari, F. Mumtaz, Z. Ai, and Y. Dai, "Recent advancements and future challenges in hybrid optical fiber interferometers," *Optik*, vol. 282, 2023, Art. no. 170860.

[16] C.-B. Yu, Y. Wu, C. Li, F. Wu, J.-H. Zhou, Y. Gong, Y.-J. Rao, and Y.-F. Chen, "Highly sensitive and selective fiber-optic Fabry-Perot volatile organic compounds sensor based on a PMMA film," *Optical Materials Express*, vol. 7, no. 6, pp. 2111–2116, 2017.

[17] M. I. Reja, L. V. Nguyen, H. Ebendorff-Heidepriem, and S. C. Warren-Smith, "Multipoint pressure sensing at up to 900 °C using a fiber optic multimode interferometer," *Optical Fiber Technology*, vol. 75, Jan. 2023, Art. no. 103157.

[18] Y. Cao, L. Wang, Z. Lu, G. Wang, X. Wang, Y. Ran, X. Feng, and B.-O. Guan, "High-speed refractive index sensing system based on Fourier domain mode-locked laser," *Optics Express*, vol. 27, no. 6, pp. 7988–7996, 2019.

[19] M. Elsherif, A. E. Salih, M. Elsherif, A. E. Salih, M. G. Muñoz, F. Alam, B. AlQattan, D. S. Antonysamy, M. F. Zaki, A. K. Yetisen, S. Park, T. D. Wilkinson,

and H. Butt, "Optical fiber sensors: Working principle, applications, and limitations," *Advances in Photonics Research*, vol. 3, no. 11, 2022, Art. no. 2100371.

[20] B. Yang, J. Zhang, Y. Yin, Y. Niu, and M. Ding, "A sensing peak identification method for fiber extrinsic fabry-perot interferometric refractive index sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019, Art. no. 96.

[21] Q. Zhang, J. Lei, Y. Chen, Y. Wu, C. Chen, and H. Xiao, "3D printing of all-glass fiber-optic pressure sensor for high temperature applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, 2019, Art. no. 11242.

[22] H. Chen, J. Liu, X. Zhang, W. Wang, Z. Ma, W. Lv, and Z. Guo, "High-order harmonic-frequency cross-correlation algorithm for absolute cavity length interrogation of white-light fiber-optic Fabry-Perot sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 953–960, 2020.

[23] D. Pawar and S. N. Kale, "A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors, and ions," *Microchimica* Acta, vol. 186, p. 253, 2019.

[24] Y. Zhou, Z. Dongjian, C. Zhuoyan, and L. Yongtao, "Research on a novel inclinometer based on distributed optical fiber strain and conjugate beam method," *Measurement*, vol. 153, Mar. 2020, Art. no. 107404.

[25] C. Xiong, W. Wan, J. Chen, D. Zeng, and M. Cai, "Fast high-precision displacement measurement system based on fringe image analysis techniques," *Results in Physics*, vol. 17, 2020, Art. no. 103048.

[26] J. Liu, Z. Su, Y. Wang, J. He, Z. Liu, H. Wang, Y. Tian, and W. Yang, "Approaching diamond's theoretical elasticity and strength limits," *Nature Communications*, vol. 10, 2019, Art. no. 5533.

[27] R. Khan and Z. Mustansar, "Reliability of using elastic modulus for non-homogeneous materials," *MATEC Web of Conferences*, vol. 49, 2016, Art. no. 109001.

[28] C. Uff, L. Garcia, J. Fromageau, A. Chakraborty, N. Dorward, and J. Bamber, "Further characterization of changes in axial strain elastograms due to the presence of slippery tumor boundaries," *Journal of Medical Imaging*, vol. 5, no. 2, 2018, Art. no. 021211.

[29] A. Yodrux, N. Yodpijit, and M. Jongprasithpornt, "Stress and displacement analysis of dental implant threads using three-dimensional finite element analysis," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 12, no. 3, pp. 216–222, 2019, doi: 10.14416/j.ijast.2018.09.002.

[30] JTG D50-2017, "Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement," Ministry of Transport of the People's Republic of China, Beijing, 2017.

[31] H. Belyadi, E. Fathi, and F. Belyadi, "Rock mechanical properties and in situ stresses" in *Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs*, 2nd ed., Texas: Gulf Professional Publishing, pp. 215–231, 2019.

[32] S. Ronen, "Psi, pascal, bars, and decibels," *The Leading Edge*, vol. 21, no. 1, 2002, doi: 10.1190/1.1487322.

[33] M. Liu, Q. Cai, and H. Song, "Regional strain homogenized diaphragm based FBG high pressure sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 355, Jun. 2023, Art. no. 114298.

[34] P. Song, Z. Ma, J. Ma, L. Yang, J. Wei, Y. Zhao, M. Zhang, F. Yang, and X. Wang, "Recent progress of miniature MEMS pressure sensors," *Micromachines*, vol. 11, no. 1, 2020, Art. no. 56.

[35] K. M. Fadeev, D. D. Larionov, L. A. Zhikina, A. M. Minkin, and D. I. Shevtsov, "A fiber-optic sensor for simultaneous temperature and pressure measurements based on a Fabry–Perot interferometer and a fiber bragg grating," *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 63, pp. 543–546, 2020.

[36] B. Xu, Y. Liu, D. Wang, D. Jia, and C. Jiang, "Optical fiber Fabry–Perot interferometer based on an air cavity for gas pressure sensing," *Photonics Research*, vol. 9, no. 2, 2017, Art. no. 7102309.

[37] M. Li, M. Wang, and H. Li, "Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry," *Optics Express*, vol. 14, pp. 1497–1504, 2016.

[38] Y. Zhou and K. Huang, "On simplified deformation gradient theory of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plate," *European Journal of Mechanics/A Solids*, vol. 100, Art. no. 105014, 2023.

[39] M. W. Witczak and M. W. Mirza, "Development of relationships to predict Poisson's ratio for paving materials," Inter team Technical Report

for NCHRP 1–37A University of Maryland, College Park, Maryland, USA, 1999.

[40] Y. Javed, M. Mansoor, and I. A. Shah, "A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications," *Sensor Review*, vol. 39, no. 5, pp. 652–664, 2019.

[41] D. Jauregui-Vazquez, M. E. Gutierrez-Rivera, D. F. Garcia-Mina, J. M. Sierra-Hernandez, E. Gallegos-Arellano, J. M. Estudillo-Ayala, J. C. Hernandez-Garcia, and R. Rojas-Laguna, "Low pressure and liquid level fber-optic sensor based on polymeric Fabry–Perot cavity," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, 2021, Art. no. 237.

[42] Z. Xinlei, Y. Qingxu, and P. Wei, "Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for down-hole application," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 121, pp. 289–299, 2019.

PROCEEDINGS OF SPIE

2024 International Conference on Photonics Solutions (ICPS2024)

Apichai Bhatranand
Editor

9–11 December 2024
Bangkok, Thailand

Organized by
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)
King Mongkut's University of Technology Thonburi (Thailand)

Sponsored by
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)
King Mongkut's University of Technology Thonburi (Thailand)
Optical Society of Japan (Japan)
Thailand Optics and Photonics Society (Thailand)
IEEE Thailand Chapter Photonics Society (Thailand)
Optica Thailand Chapter (Thailand)
Furukawa FITEL (Thailand)
Yokokawa (Thailand)
Fuyuan Communication Technology (Thailand)
Digital Instrument (Thailand)
AML Technology (Thailand)
CADFEM (Thailand)
F. E. S. (Thailand)
OptoSigma (Singapore)

Published by
SPIE

Volume 13518

Proceedings of SPIE 0277-786X, V. 13518

SPIE is an international society advancing an interdisciplinary approach to the science and application of light.

2024 International Conference on Photonics Solutions (ICPS2024),
edited by Apichai Bhatranand, Proc. of SPIE Vol. 13518, 1351801
© 2025 SPIE · 0277-786X · doi: 10.1117/12.3063079

The papers in this volume were part of the technical conference cited on the cover and title page. Papers were selected and subject to review by the editors and conference program committee. Some conference presentations may not be available for publication. Additional papers and presentation recordings may be available online in the SPIE Digital Library at SPIEDigitalLibrary.org.

The papers reflect the work and thoughts of the authors and are published herein as submitted. The publisher is not responsible for the validity of the information or for any outcomes resulting from reliance thereon.

Please use the following format to cite material from these proceedings:
Author(s), "Title of Paper," in *2024 International Conference on Photonics Solutions (ICPS2024)*, edited by Apichai Bhatranand, Proc. of SPIE 13518, Seven-digit Article CID Number (DD/MM/YYYY); (DOI URL).

ISSN: 0277-786X
ISSN: 1996-756X (electronic)

ISBN: 9781510688292
ISBN: 9781510688308 (electronic)

Published by
SPIE
P.O. Box 10, Bellingham, Washington 98227-0010 USA
Telephone +1 360 676 3290 (Pacific Time)
SPIE.org
Copyright © 2025 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).

Copying of material in this book for internal or personal use, or for the internal or personal use of specific clients, beyond the fair use provisions granted by the U.S. Copyright Law is authorized by SPIE subject to payment of fees. To obtain permission to use and share articles in this volume, visit Copyright Clearance Center at copyright.com. Other copying for republication, resale, advertising or promotion, or any form of systematic or multiple reproduction of any material in this book is prohibited except with permission in writing from the publisher.

Printed in the United States of America by Curran Associates, Inc., under license from SPIE.

Publication of record for individual papers is online in the SPIE Digital Library.

SPIE. DIGITAL LIBRARY
SPIEDigitalLibrary.org

Paper Numbering: A unique citation identifier (CID) number is assigned to each article in the Proceedings of SPIE at the time of publication. Utilization of CIDs allows articles to be fully citable as soon as they are published online, and connects the same identifier to all online and print versions of the publication. SPIE uses a seven-digit CID article numbering system structured as follows:

- The first five digits correspond to the SPIE volume number.
- The last two digits indicate publication order within the volume using a Base 36 numbering system employing both numerals and letters. These two-number sets start with 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 0A, 0B … 0Z, followed by 10-1Z, 20-2Z, etc. The CID Number appears on each page of the manuscript.

13518 0H **Interferometric vibration measurement of electromechanical devices using vision technique** [13518-16]

13518 0I **Machine learning-based fingerprint pattern recognition with Mach-Zehnder interferometer** [13518-17]

13518 0J **Embedded hardware implementation of noise gate on STM32 processor using MATLAB/Simulink** [13518-18]

13518 0K **Quantitative refractive index analysis of thermal and non-thermal curing of polymeric holographic material** [13518-19]

13518 0L **Generalized frequency division multiplexing decoders under imperfect channel estimation** [13518-20]

13518 0M **Validation of perfectly rotating polarized light using Sagnac interferometry: a comparison of Python simulations and machine learning technique** [13518-21]

13518 0N **Correcting instrument shifts in solar spectroscopy with telluric lines: a study with an in-house Fourier transform spectrograph** [13518-22]

13518 0O **Visualization of sound propagating in multiple directions in a single recording using digital holography** [13518-23]

13518 0P **Pulse wave measurement system by rPPG from human and animal soles (Invited Paper)** [13518-24]

13518 0Q **Application-optimized FPGAs design using RTL-designed FPGAs architectures** [13518-25]

13518 0R **Attenuation error of variable optical attenuator at NIMT** [13518-26]

13518 0S **Laser calorimeter as a laser power standard for low power calibration systems at NIMT** [13518-27]

13518 0T **Enhancing noise suppression and signal detection in Fourier transform spectrograph using lock-in amplifier** [13518-28]

13518 0U **CAD development and routing analysis for RTL-designed FPGAs** [13518-29]

13518 0V **Event-related potential reveals partial face cognitive mechanisms through machine learning** [13518-30]

13518 0W **Investigation variable star classification through light curve analysis using machine learning approach** [13518-31]

13518 0X **Characterization of refractive index of polydimethylsiloxane and titanium dioxide particles composite for tissue phantom application in 0.2–0.5 THz range** [13518-32]

13518 0Y **Differences in the electronic and optical properties between hexagonal boron nitride monolayer and carbon-doped hexagonal boron nitride monolayer: a DFT study** [13518-33]

13518 0Z **3D fluorescence imaging through scattering medium and bioapplications (Invited Paper)** [13518-34]

13518 10 **Development of crispness measurement system based on fiber optic sensor** [13518-35]

Development of Crispness Measurement System based on Fiber Optic Sensor

Pronnaruimon Talhakultorn and Saroj Pullteap*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand
*Email: saroj@su.ac.th

ABSTRACT

In this work, development of crispness measurement system based-on fiber optic sensor (FOS) has been proposed. The fringe counting technique, Kirchhoff-Love's plate theory, and sound pressure level method are employed for investigating the crispness parameters of desired target. Three sensor probe models as followed: model A, model B, and model C are implemented to figured out the optimization of the probe for measuring the crispness. The basic structure of model A is using only the fiber optic sensor, while Model B is using a reflective material within the plastic housing to detect the sound waves, and model C is a derivative of model B with an augmented sound input respectively.In addition, the elastic material and also reflective materials have, additionally, been investigated to operate as part of the sensing probe. The testing results found that the prismatic reflective film and the aluminum (Al)-coated mirror is the most suitable material to use as the sensing to refer for. Furthermore, the model C is an optimal model for crispness measurement. Besides, an acoustic envelope detector (AED) has been used as a reference instrument to investigate the performance of the developed sensor. However, the sensor has measure the crispness with a measurement range of 140 -180 dB, demonstrating an average error of 6.80%, 1.89%, and 0.62% respectively. In addition, the FOS has indicated a high sensitivity of 0.20 μm/dB.

Keywords: Crispness measurement, fiber optic sensor, fringe counting technique, Kirchhoff-Love's plate theory, sound pressure level method.

1. INTRODUCTION

Thailand's reputation as a global tourist destination is significantly bolstered by its world-renowned cuisine. While the country's cultural offerings are widely admired, it is the exceptional quality and diversity of Thai food that frequently draws visitors from all corners of the globe. The aesthetics of a dish are of paramount importance in Thai cuisine, alongside its taste, aroma, and texture, making these sensory attributes key determinants of a dish's appeal. Snacks are the most ubiquitous food category, appealing to a broad demographic and commonly stocked in homes. The global retail snack market exhibited substantial growth in 2023, reaching a valuation of $643.8 billion, as reported by Euromonitor. This market is projected to maintain a steady growth trajectory of 5.4% annually, which surpassed 100 billion bath in 2023 [1], also Thai entrepreneurs are driving the growth of the snack food industry. This expansion has been accompanied by a growing desire to introduce authentic Thai crispy snacks to international consumers. Therefore, it is imperative to leverage innovation to enhance our products and align them with evolving consumer preferences. A critical aspect of product development is quality control, with crispness serving as a key indicator of snack food quality [2]. A comprehensive assessment of crispness often involves a combination of sensory evaluation and objective method [3]. While sensory evaluation provides insights into consumer perception, objective measurements using instruments like the Texture Analyzer (T.A.) and acoustic envelope detector (AED) offer a quantitative basis for comparison and product development. The challenges associated with these two instruments include the need for international procurement, a substantial financial investment, and the requirement for highly trained personnel. Thus, this study utilized fiber optic sensors, demonstrating their versatility in a broad spectrum of applications, including engineering, chemistry, geology, and communications [4-7]. In consideration of their low attenuation, electromagnetic interference immunity, and compact form factor [8-11]. Fiber optic sensors were chosen as the optimal technology for developing a crispness measurement device.

In this work, development of crispness measurement system based-on fiber optic sensor (FOS) has been proposed. The fringe counting technique, Kirchhoff-Love's plate theory, and sound pressure level method are employed for investigating the crispness parameters of desired target. This study involved the design and testing of three probe models. The primary objective was to determine the optimal probe for measuring crispness. To achieve this, both reflective and elastic materials

2024 International Conference on Photonics Solutions (ICPS2024),
edited by Apichai Bhatranand, Proc. of SPIE Vol. 13518, 1351810
© 2025 SPIE · 0277-786X · doi: 10.1117/12.3058791

were evaluated as potential components of the probes. Multiple trials on potato chips will be conducted to evaluate the performance of the newly developed sensor. By comparing the sensor's output with a Texture Analyzer and acoustic envelope detector, a standard measurement tool, the researchers expect to demonstrate the sensor's high sensitivity and efficiency in quantifying the crispness of snack foods.

2. RELATED THEORIES

A fiber optic interferometer has been developed to measure crispness using an applied technique. The fringe counting technique, Kirchhoff-Love's plate theory, and also sound pressure level method. The details of which are as follows:

2.1 Fiber optic interferometer

Fiber optic sensors are widely applied in the development of innovations to measure various parameters in different environments. They are primarily categorized based-on their applications, such as an environmental monitor incorporating a fiber optic sensor (FOS) has been developed for water quality monitoring, utilizing a stacked interferometer structure. Furthermore, geotechnical health monitoring has been implemented utilizing fiber optic sensors to study the movement of subsurface rock masses. Additionally, FOS have been adopted in the aerospace industry for health monitoring systems [12-14]. Fiber optic interferometers (FOI), a class of fiber optic sensors, offer superior performance in terms of sensitivity and operational range. Moreover, their ability to multiplex multiple sensors onto a single fiber optic cable provides a cost-effective and efficient means of system integration. These advantages have driven ongoing research and development in this field [15-16]. Consequently, the FOI is classified into four types as follows: Mach-Zehnder Interferometer, Sagnac Interferometer, Michelson Interferometer, and Fabry-Perot Interferometer [17-18]. However, their configurations have been represented the underlying structure of each type in Figure 1.

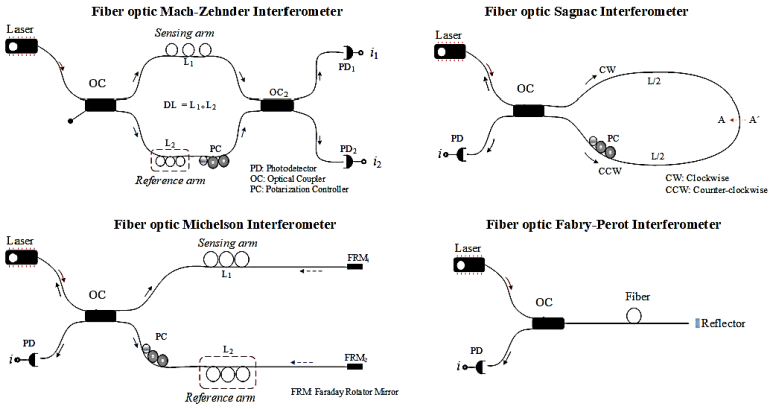


Figure 1 Basic structure of each type of interferometer; (a) Mach-Zehnder interferometer, (b) Sagnac interferometer, (c) Michelson interferometer, (d) Fabry-Perot interferometer

The fringe counting technique was incorporated to facilitate the conversion of incoming signal data into displacement (D). the relationship of which can be expressed as (1) [19-20]

$$D_{sensor} = N\frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

When D_{sensor} is a displacement of target
N is the number of fringe
λ is the wavelength of a monochromatic light source

2.2 Kirchhoff-Love's plate theory

This theory is commonly used to analyze the behavior of thin plates subjected to external forces, such as pressure. This is particularly applicable when the thickness of the plate is small compared to its overall dimensions. The theory serves as a fundamental basis for the analysis of structures like roofs, walls, and floors. When referring to pressure, it signifies the force exerted per unit area. When pressure is applied to a plate, it causes the plate to deflect. Kirchhoff-Love plate theory is a crucial tool for analyzing the behavior of thin plates under pressure [21-24]. In this research, a flexible material was employed as a moving target to measure the sound pressure (P_{sensor}) generated during the fracture of a snack through the reception of sound waves. In association with the thickness of material (h), elastic modulus of material (E), Poisson's ratio of material (ν), banding radius (r), that the specific properties of the material allow us to determine the relationship of which can be expressed as (2):

$$P_{sensor} = \frac{16Eh^3 D_{sensor}}{3r^3(1-\nu^2)} \tag{2}$$

2.3 Sound pressure method

Sound pressure level (SPL) measurement is a common technique employed in food quality assessment. When evaluating the crispness of a food product, three primary acoustic parameters are typically measured: pitch (frequency) in Hertz, sound intensity level (SIL) in decibels, and sound pressure level (SPL) in decibels. In this study, the crispness was quantified using SPL_{sensor}, with a reference pressure of 20 µPa (P_0), corresponding to the human hearing threshold [25-27] as shown in (3):

$$SPL_{sensor} = 20\log\left(\frac{P_{sensor}}{P_0}\right) \tag{3}$$

3. EXPERIMENTAL SETUP

In this work, the experimental setup of fiber optic sensor for crispness measurement has been illustrated in Figure 2.

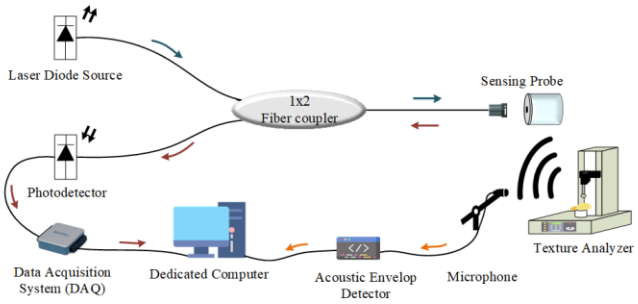


Figure 2 Configuration of crispness measurement system based-on fiber optic Fabry-Perot Interferometer

As shown in Figure 2, the structure of a fiber-optic based Fabry-Perot interferometer sensor designed for measuring the crispness of snacks is presented. The operational procedure can be divided into five steps, beginning with the design

of the sensing head. Solidworks software was utilized for the design of the sensing head. Once the design was complete, the elastic material serving as the moving target was tested using a Universal tensile tester model: CY6040A12. Additionally, two types of reflective materials were tested: Prismatic Reflective film (PSR film) and an Al-coated mirror. The objective was to determine the most suitable reflective material for measuring crispness. Upon assembling all components into a sensing head, it was integrated into the fiber-optic system. To evaluate the performance, all three sensor models were tested on fried potato chips five times. The test results were obtained in the form of interference fringes. These fringes were imported into MATLAB software to count the number of interference fringes generated during the occurrence of crisp sounds. Subsequently, the displacement and sound pressure level were calculated. In the final step, the results were compared with an acoustic envelope detector to determine the error for each model, and conclusions were drawn regarding the suitability of each model for the crispness measurement system.

4. Experimental results and discussions

The development of a crispness detector hinges on two key tests: elasticity and reflectivity. These tests would as certain the most suitable reflective material for accurate crispness quantification.

4.1 Elastic material testing

The elastic materials will be subjected to ten tensile tests using a universal tensile testing machine, which is a type of measuring instrument as shown in Figure 3. The specific properties of the material allow us to determine the following: thickness of material (h) is 0.22 mm, elastic modulus of material (E) is 2.73 MPa, bending radius (r) is 15.00 mm, Poisson's ratio of material (ν) is 0.28, respectively.

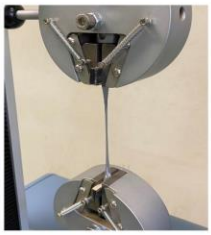


Figure 3 Elastic materials tests using a universal tensile testing machine

4.2 Reflective material testing

This experiment will conduct a comparative analysis of two reflective materials: prismatic reflective film and an aluminum-coated mirror. To facilitate this analysis, each material would be affixed to a speaker and subjected to a 1 Hz sinusoidal signal with an amplitude of 2 volts. The results, as illustrated in Figure 4, indicate that the aluminum (Al)-coated mirror is the most suitable material.

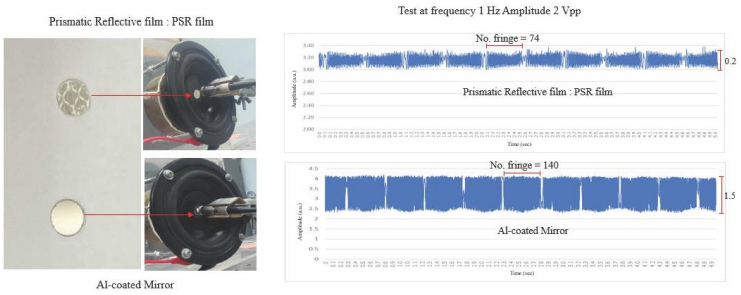


Figure 4 Reflective material testing and **experimental** results

4.3 Design of crispness measurement system based on fiber optic sensor

Three sensor probe models as followed: model A, model B, and model C are implemented to figured out the optimization of the probe for measuring the crispness. The basic structure of model A used only the fiber optic sensor, while model B used a reflective material within the plastic housing to detect the sound waves, and model C is a derivative of model B with an augmented sound input, respectively. A comparative analysis would be conducted on three models, each of which will undergo repeated evaluation using potato chips as a test target. The primary objective is to determine the model that exhibits the highest accuracy in quantifying crispness. Thus Figure 5 offers a visual comparison of the models, while Figure 6 displays exemplary outcomes from the testing process, respectively.

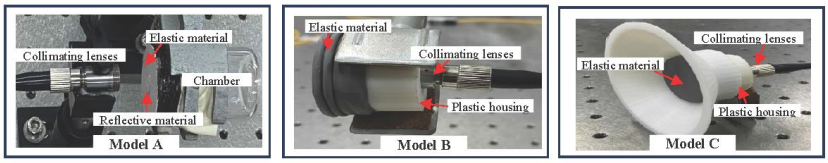


Figure 5 Three sensing probe models development for experiments

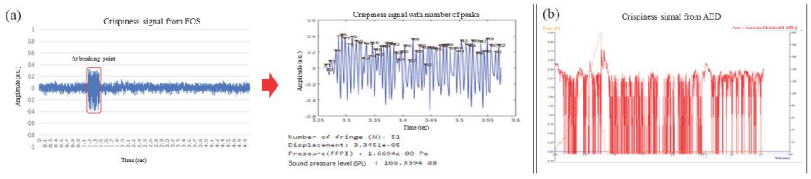


Figure 6 Example result; (a) from fiber optic sensor and (b) from acoustic envelope detector

The results of model A was found average error of 6.80% The observed discrepancies can likely be attributed to the detector's bipartite structure, which may compromise the sensitivity of the device to crisp sound signals. While Model 2 exhibited a 1.89% deviation in error, it demonstrated a significant improvement in sound reception. This enhancement is attributed to the direct alignment of the sensing probe and reflective material within the plastic housing, enabling optimal sound capture. Moreover, Model 3 exhibited the lowest error rate at 0.62%.

5. Conclusion

This work presents development of a crispness measurement system base-on fiber optic sensor. Focus on developing probe sensing for measuring crispness by using 3 probe models: model A, model B, and model C, the models would be differentiated through structural alterations designed to suit the unique demands of this experiment. Potato chips would then serve as the standardized testing material for all models involved. The fringe produced by the custom-designed detector serves as the input for MATLAB analysis. This analysis yields quantitative measurements of displacement and sound pressure level. Subsequently, a comparative analysis is conducted between the calculated *SPL* values and those obtained from a reference measurement device. The results of model A was found average error of 6.80%, 1.89% and 0.62%, respectively. In addition, the results obtained model C was selected for use with FOS as it was found tobe the most suitable for crispness measurement and exhibited the lowest error rate when compared to other model. Moreover, the sensor has measure the crispness with a measurement range from 140-180 dB and analysis revealed that the developed crispness measurement tool exhibited a high sensitivity of 0.20 μm/dB. Future research would involve explanding the application of this probe to a diverse array of products.

References

[1] Trade Policy and Strategy Office, "The Department of Commerce Reports a Sustained Uptick in the Consumption of Health-Conscious Snacks, Indicating a Lucrative Prospect for Thai Businesses", 15 April 2025.

[2] Małgorzata C., Mariola K., Anna I., Hanna K., "Development of drying and roasting processes for the production of plant-based pro-healthy snacks in the light of nutritional trends and sustainable techniques", Trends in Food Science & Technology 149, pp.104553 (2024), https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104553

[3] Paula, A. M., & Conti-Silva, A. C., "Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks", Journal of food engineering 121, pp.9-14.(2014), https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.007

[4] Pendão, C., & Silva, I., "Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications" Sensors, 22(19), 7554 (2022), https://doi.org/10.3390/s22197554

[5] Ashry, I., Mao, Y., Wang, B., Hveding, F., Bukhamsin, A. Y., Ng, T. K., & Ooi, B. S., "A review of distributed fiber–optic sensing in the oil and gas industry" Journal of Lightwave Technology, 40(5), 1407-1431 (2022).

[6] Bado, M. F., & Casas, J. R., "A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring", Sensors 21(5), 1818 (2021), https://doi.org/10.3390/s21051818

[7] Shadab; A., Raghuwanshi; S.K., Kumar, S., "Advances in Micro-Fabricated Fiber Bragg Grating for Detection of Physical, Chemical, and Biological Parameters—A Review", IEEE Sensors Journal 22(16), pp. 15650-15660, 15 Aug.15 (2022), https://doi: 10.1109/JSEN.2022.3188813

[8] Vorathin, E., Hafizi, Z. M., Ismail, N., & Loman, M., "Review of high sensitivity fiber-optic pressure sensors for low pressure sensing", Optics & Laser Technology 121, pp.105841 (2020), https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105841

[9] Elsherif, M., Salih, A. E., Muñoz, M. G., Alam, F., AlQattan, B., Antonysamy, D. S., & Butt, H., "Optical fiber sensors: Working principle", applications and limitations. Advanced Photonics Research l.3(11), pp.2100371 (2022), https://doi.org/10.1002/adpr.202100371

[10] Yang, B., Yang, B., Zhang, J., Yin, Y., Niu, Y., and Ding, M., "A sensing peak identification method for fiber extrinsic fabry–perot interferometric refractive index sensing", Sensors 19(1), pp.96 (2018), https://doi.org/10.3390/s19010096

[11] Venketeswaran, A., Lalam, N., Wuenschell, J., Ohodnicki Jr, P. R., Badar, M., Chen, K. P., ... and Buric, M.. "Recent advances in machine learning for fiber optic sensor applications". Advanced Intelligent Systems, 4(1), 2100067 (2022).

[12] Rovera, A., Tancau, A., Boetti, N, Dalla Vedova, M. D. L., Maggiore, P. and Janner, D., "Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation Environments in Aerospace Applications" Sensors 2023, 23, 2512. https://doi.org/10.3390/s23052512

[13] Zhenga, Y., Zhu, Z-W., Xiao, W., Deng, Q-X., "Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring", Optical Fiber Technology 54, January, 102127 (2020). https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127

[14] Butt, M.A., Voronkov, G.S., Grakhova, E.P., Kutluyarov, R.V., Kazanskiy, N.L. and Khonina S.N., "Environmental Monitoring: A Comprehensive Review on Optical Waveguide and Fiber-Based Sensors", Biosensors 12, 1038 (2022). https://doi.org/10.3390/bios12111038

[15] Jalil, M. A. B., "Optical Interferometers and Its Applications in the Field of Medicine", Ijraset Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology, ISSN: 2321-9653 (2024), https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63323

[16] Miliou, A., "In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances", Photonic s., MDPI. 8 (7), p. 265, (2021), https://doi.org/10.3390/photonics8070265

[17] Singh, B. P., Singh, T., & Narwade, R., "Recent Progress of Fibre Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure", Sensors and Fiber Optics: Recent Trends, 61 (2022).

[18] Jingshan J., Xuhui F., Yi J., "A Mach-Zehnder interferometric acoustic sensor using in complete symmetry 3x3 coupler-based phase shifting demodulator", Sensors and Actuators A: Physical 378, 115808, 1 November 2024, https://doi.org/10.1117/12.50954

[19] N. Ushakov, A. Markvart, D. Kulik and L. Liokumovich, "Comparison of Pulse Wave Signal Monitoring Techniques with Different Fiber-Optic Interferometric Sensing Elements", Photonics 8 (5), pp. 142, (2021).

[20] Ratanapanya,N., Pullteap, S., "Sensing Probe Development for Pulse Wave and Blood Pressure Detection using Fiber Optic Based Fabry-Perot Interferometer", 2023 8th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed), Ayutthaya, Thailand, 2023, pp. 1-6, https://doi: 10.1109/iSTEM-Ed59413.2023.10305735

[21] Nguyen, D.T.A., Li, L. and Ji, H. "Stable and accurate numerical methods for generalized Kirchhoff–Love plates". J Eng Math 130, 6 (2021). https://doi.org/10.1007/s10665-021-10163-x

[22] Marti, P., ASCE, F., Kaufmann W., Seelhofer, H., and Karagiannis, D., "Kirchhoff–Love Plate Deformations Reinterpreted", Journal of Engineering Mechanics 148 (6), (2022), https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002105

[23] Zhou, Y., and Huang, K. "On simplified deformation gradient theory of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plate", European Journal of Mechanics-A/Solids 100, 105014 (2023). https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105014

[24] Zhou, Y., and Huang, K., "Static and dynamic stabilities of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plates", European Journal of Mechanics-A/Solids 108, 105426 (2024), https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2024.105426

[25] Navarro, J. M., and Pita, A., "Machine Learning Prediction of the Long-Term Environmental Acoustic Pattern of a City Location Using Short-Term Sound Pressure Level Measurements", Applied Sciences, 13(3), 1613 (2023), https://doi.org/10.3390/app13031613

[26] Laly, Z., Atalla, N., Meslioui, S-A., Bikri, K-L., "Sensitivity analysis of micro-perforated panel absorber models at high sound pressure levels", Applied Acoustics 156, 15 December 2019, 7-20 (2019), https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.06.025

[27] Patil, V. S., Bano, F., Kurahatti, R. V., Patil, A. Y., Raju, G. U., Afzal, A., ... and Saleel, C. A., "A study of sound pressure level (SPL) inside the truck cabin for new acoustic materials: An experimental and FEA approach", Alexandria Engineering Journal 60(6), 5949-5976 (2021), https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.074

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภรนฤมล ทัฬหะกุลธร
วุฒิการศึกษา	หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาวิชาธุรกิจวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2563
ผลงานตีพิมพ์	1) Talhakultorn, P., & Pullteap, S. (2024). Dynamic Low-Pressure Measurement Using a Fiber Optic-based Fabry-Perot Interferometer. Applied Science and Engineering Progress, 17(2), 7283. https://doi.org/10.14416/j.asep.2023.11.011 2) Pronnaruimon Talhakultorn and Saroj Pullteap "Development of crispness measurement system based on fiber optic sensor", Proc. SPIE 13518, 2024 International Conference on Photonics Solutions (ICPS2024), 1351810 (19 February 2025); https://doi.org/10.1117/12.3058791

มหาวิทยาลัยศิลปากร