



Determining the speed of sound in air using a flute and vote musical instrument for high school students

Thussanaporn Wongkhamchan¹ and Kanchaya Honglertkongsakul^{1,*}

¹*Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University*

**Email: kanchaya@go.buu.ac.th*

Received <23 April 2024>; Revised <12 July 2024>; Accepted <15 July 2024>

Abstract

Experimenting to determine the speed of sound in air is one of the physics experiments involving theory and calculations. Teaching focuses only on theory; students may not understand and could become bored. Teaching incorporating modern equipment or musical instruments can enhance students' interest and enjoyment in learning. Therefore, this research aims to create an experiment to find the speed of sound in air using a flute and vote, and the sound frequency produced by each note will be measured using a smartphone. Flute is an example of open-ended tube resonance and vote is an example of close-ended tube resonance. In an experiment, the relationship between the length of the resonating tube (L) and the sound frequency (f) will be used to create a graph and calculate the speed of sound. In the analysis, the experimental values of the speed of sound in air will be compared with its theoretical values. The experimental results show that the speed of sound from flute and vote is 345.38 m/s and 348.03 m/s respectively. When comparing the obtained values with the theoretical speed of sound, which is 347.26 m/s, it was found that there is a deviation of 0.54% and 0.22%, respectively. This indicates that flute and vote can be effectively used for teaching purposes.

Keywords: Flute and Vote, Musical instrument, The speed of sound

การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด สำหรับผู้เรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

พรรณนาภรณ์ วงศ์คำจันทร์¹ และ กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล^{1,*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

*Email: kanchaya@go.buu.ac.th

รับบทความ: 23 เมษายน 2567 แก้ไขบทความ: 12 กรกฎาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์: 15 กรกฎาคม 2567

บทคัดย่อ

การทดลองหาอัตราเร็วเสียงในอากาศเป็นการทดลองหนึ่งในวิชาฟิสิกส์ที่มีทั้งทฤษฎีและการคำนวณ การเรียนการสอนแบบทฤษฎีเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ผู้เรียนไม่เข้าใจและเกิดความเบื่อหน่ายได้ หากปรับการสอนให้มีการนำอุปกรณ์สมัยใหม่หรือเครื่องดนตรีมาใช้จะทำให้ผู้เรียนสนใจและสนุกกับการเรียนมากขึ้น ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดการทดลองหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากขลุ่ยและโหวด และใช้สมาร์โฟนวัดความถี่เสียงที่ออกมาตามตัวโน้ตที่เป่า ขลุ่ยจะเป็นตัวอย่างของการสั่นพ้องในท่อปลายเปิดและโหวดจะเป็นตัวอย่างของการสั่นพ้องในท่อปลายปิด ในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของท่อสั่นพ้อง (L) กับความถี่เสียง (f) จะนำไปใช้ในการสร้างกราฟและคำนวณหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศ ในการวิเคราะห์จะนำค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ผลการทดลองพบว่าอัตราเร็วเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด มีค่าเท่ากับ 345.38 m/s และ 348.03 m/s ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราเร็วของเสียงตามทฤษฎี ซึ่งเท่ากับ 347.26 m/s จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.54 และ 0.22 ตามลำดับ นั่นแสดงว่าขลุ่ยและโหวดสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายได้

คำสำคัญ: ขลุ่ยและโหวด เครื่องดนตรี อัตราเร็วเสียง

บทนำ

วิทยาศาสตร์มีบทบาทสำคัญต่อการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เนื่องจากสิ่งต่างๆ รอบตัวมีความเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ และมีการนำเอาองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาพัฒนา ปรับประยุกต์ใช้ ยกย่องวิจิตร ให้เป็นระบบ มีเหตุผล มีความคิดสร้างสรรค์ และคิดวิเคราะห์แบบมีวิจารณญาณ นำไปสู่การพัฒนาทักษะในการค้นคว้าหาความรู้ และใช้ความรู้เพื่อแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ ดังนั้นการส่งเสริมให้มีการพัฒนาการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันนำไปสู่การสร้างสรรค์เทคโนโลยีใหม่ ๆ และการสร้างสังคมแห่งการเรียนรู้ (Office of the Basic Education Commission, 2017)

วิชาฟิสิกส์เป็นวิชาหนึ่งที่มักนำมาใช้อธิบายสถานการณ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน วิชานี้จะอาศัยการคำนวณผ่านสมการและตัวแปรจำนวนมาก ทำให้ผู้เรียนส่วนใหญ่คิดว่าเป็นวิชาที่ยาก ไม่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย จึงเกิดความเบื่อหน่ายและท้อถอย ขาดกำลังใจและความกระตือรือร้นในการเรียนวิชา ฟิสิกส์ สาเหตุหนึ่งที่นำไปสู่ความเบื่อหน่ายในการเรียนวิชาฟิสิกส์คือการเรียนการสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียว ทำให้ผู้เรียนไม่สามารถสร้างภาพจำจากการฟังการบรรยายได้ โดยสิ่งที่จะทำให้ผู้เรียนสร้างภาพจำได้เป็นอย่างดีคือการเรียนการสอนแบบสาธิตหรือการลงมือปฏิบัติ จะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจและเชื่อมโยงความรู้อย่างมีประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี อันส่งผลให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ ทำให้มีความรู้ได้ยาก ถึงแม้จะลืมนึกถึงก็ยังคงสังเกต พิสูจน์ และคิดวิเคราะห์สร้างความเข้าใจได้อีกครั้ง (Tiwaree et al, 2018)

เสียงเป็นหนึ่งในเนื้อหาฟิสิกส์สำหรับผู้เรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ในเนื้อหาเรื่องเสียงนี้จะมุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดเสียง แหล่งกำเนิดเสียง ความถี่เสียง และอัตราเร็วของเสียงในอากาศ เสียงเป็นคลื่นตามยาวที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ อัตราเร็วของเสียงจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง เสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขณะที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ โมเลกุลของอากาศจะมีการสั่นสะเทือนในรูปของคลื่นตามยาว ทำให้ความหนาแน่นและความดันเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของเสียง เกิดส่วนอัดและส่วนขยาย ซึ่งส่วนอัด (Compression) คือ บริเวณที่อนุภาคของตัวกลางมีการกระจัดน้อยที่สุดหรือบริเวณที่มีความดันมากที่สุด และส่วนขยาย (Rarefaction) คือ บริเวณที่อนุภาคของตัวกลางมีการกระจัดมากที่สุดหรือบริเวณที่มีความดันน้อยที่สุด (Bodinchart, 2012)

การศึกษาการสั่นพ้องของเสียงเป็นหนึ่งในเนื้อหาที่สำคัญของวิชาฟิสิกส์สำหรับผู้เรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย นอกจากนี้ในการออกแบบหรือสร้างเครื่องดนตรีในระดับสูงจะมีการประยุกต์ใช้หลักการสั่นพ้องของเสียงในการสร้างเครื่องดนตรีเหล่านั้น เช่น กีตาร์ และขลุ่ย (Torcal-Milla, 2023) เป็นต้น การใช้เครื่องดนตรีนำมาประกอบการเรียนการสอนในชั้นเรียนนั้นจะช่วยสร้างความสนใจ กระตุ้นความอยากรู้อยากเห็นให้กับผู้เรียนมากกว่าการให้ผู้เรียนอยู่กับตัวเลข หรือสมการของวิชาฟิสิกส์เพียงอย่างเดียว (Lopresto, 2011) ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการจัดการเรียนการสอนที่เน้นให้ผู้เรียนเข้าใจง่าย และกระตุ้นการเรียนรู้ของผู้เรียน จากการฝึกปฏิบัติจริงด้วยการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายและใกล้ตัวผู้เรียนคือ เครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือโทรศัพท์สมาร์ตโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน และจากการสืบค้นข้อมูลพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นพ้องของเสียงมักจะเป็นการศึกษาการสั่นพ้องของท่อปลายเปิด หรือปลายปิดเพียงอย่างเดียว เช่น การวิจัยของ Torcal-Milla (2023) ศึกษาการหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ยอินคา (pan flute) ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นพ้องของเสียงเป็นแบบท่อปลายปิด หรือการวิจัยของ Lopresto (2011) ศึกษาการหาระยะคลาดเคลื่อนของท่อสั่นพ้อง (end-correction) และหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรี Boomwhacker ซึ่งมีลักษณะการสั่นพ้องของเสียงเป็นแบบท่อปลายเปิด เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ยเพียงอย่างเดียวซึ่งมีลักษณะการสั่นพ้องของเสียงเป็นแบบท่อปลายเปิด และเครื่องดนตรีโหวดซึ่งมีลักษณะการสั่นพ้องของเสียงเป็นแบบท่อปลายปิด ค่าอัตราเร็วของเสียงที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราเร็วของเสียงตามทฤษฎี เพื่อนำไปประยุกต์ในการออกแบบชุดทดลองสำหรับการหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศสำหรับใช้ในการเรียนการสอน และเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาการสั่นพ้องของท่อปลายเปิด และปลายปิด ในประเทศไทย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบชุดการทดลองสำหรับการหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั่นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด
2. เพื่อหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั่นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด
3. เพื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั่นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดกับค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศตามทฤษฎี

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ใช้การวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research methodology) ในรูปแบบการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) เพื่อหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด ซึ่งมีทฤษฎีเรื่องความถี่เสียง อุปกรณ์การทดลอง วิธีการทดลอง ผลการวิจัยและอภิปรายผล สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย ดังนี้

ทฤษฎีเรื่องความถี่เสียง

ความถี่ของเสียงคือ จำนวนคลื่นเสียงที่ผ่านจุดๆ หนึ่ง ใน 1 วินาที หรือ จำนวนส่วนอัดหรือจำนวนส่วนขยายที่เคลื่อนที่ผ่านจุดๆ หนึ่ง ใน 1 วินาที มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) เป็นปริมาณที่บอกระดับความถี่หรือแหลมของเสียง เสียงทุ้มจะเป็นเสียงที่มีความถี่ต่ำ เสียงแหลมจะเป็นเสียงที่มีความถี่สูง (Bodinchart, 2012) การจำแนกเสียงตามความถี่ต่าง ๆ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) เสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่หูของมนุษย์สามารถรับรู้ได้ มีความถี่ในช่วง 20 – 20,000 เฮิรตซ์ (2) เสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าช่วงที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า อินฟราโซนิก (Infrasonic wave) มีความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ และ (3) เสียงที่มีความถี่สูงกว่าช่วงที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า อัลตราโซนิก (Ultrasonic wave) มีความถี่มากกว่า 20,000 เฮิรตซ์

ทั้งนี้ระดับเสียงเป็นปริมาณที่บอกความแตกต่างของเสียงซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของเสียง ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงการแบ่งระดับเสียงโน้ตดนตรีทางวิทยาศาสตร์ เริ่มจากเสียง โด ที่มีความถี่ 256 Hz ต่อไปเป็นเสียง เร, มี, ฟา, ซอล, ลา และ ที มีความถี่เป็น 288, 320, 341, 384, 427, 480 ตามลำดับ ถัดจากนั้นจะเริ่มเสียง โด' ซึ่งมีความถี่ 512 Hz โดยความถี่ของเสียง โด' เป็น 2 เท่าของเสียง โด เรียกกระดับเสียง โด' นี้ว่า เสียงคู่แปด (octave) ของเสียง โด และในทำนองเดียวกัน ระดับเสียงอื่น ๆ เช่น ระดับเสียง เร' ก็เป็นเสียงคู่แปดของเสียง เร ซึ่ง เร' จะมีความถี่เป็น 2 เท่าของเสียง เร (Niran, 2017) สำหรับเสียง โด'' ที่มีความถี่ 1024 Hz โดยความถี่ของเสียง โด'' เป็น 2 เท่าของเสียง โด' เรียกเสียง โด'' นี้ว่า 2 คู่แปดของเสียง โด เมื่อตัวโน้ตสูง ๆ ขึ้นไป ทุก ๆ คู่แปด ความถี่ของเสียงดนตรีจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเสมอ (Niran, 2017)

ตารางที่ 1 การแบ่งระดับเสียงดนตรีในทางวิทยาศาสตร์

เสียง	โด (C)	เร (D)	มี (E)	ฟา (F)	ซอล (G)	ลา (A)	ที (B)	โด' (C')
ความถี่ (Hz)	256	288	320	341	384	427	480	512
อัตราส่วนเทียบกับเสียง โด (C)	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ “/” อ่านว่า ไพรม์ คือสัญลักษณ์ที่แสดงถึงความถี่ที่สูงขึ้นของเสียงโน้ตดนตรี

อัตราเร็วของเสียงจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและอุณหภูมิของตัวกลางที่เสียงเดินทางผ่าน สำหรับเสียงที่เดินทางผ่านอากาศความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของเสียงกับอุณหภูมิของตัวกลางเขียนได้ดังนี้

$$v_t = 331 + 0.6t \quad (1)$$

กำหนดให้ v_t = อัตราเร็วของเสียงที่อุณหภูมิใดๆ มีหน่วยเป็น m/s
 t = อุณหภูมิของตัวกลาง มีหน่วยเป็น °C

จากสมการ (1) สามารถคำนวณหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศ ที่อุณหภูมิ 0 °C และ 25 °C ได้เท่ากับ 331 m/s และ 346 m/s ตามลำดับ

การสั่นพ้องของคลื่นเสียงในท่ออากาศเกิดได้จากการรวมกันระหว่างคลื่นเสียงตกกระทบและคลื่นเสียงสะท้อน คล้ายกับการสั่นพ้องของคลื่นในเส้นเชือกที่ปลายทั้งสองตรึงแน่น เมื่อทำให้เชือกสั่นจะเกิดคลื่นในเส้นเชือกเคลื่อนที่ไปกระทบจุดตรึงแล้วสะท้อนกลับออกไปกลับมาเป็นคลื่นนิ่ง (Niran, 2017) การสะท้อนของคลื่นเสียงจะมีเฟสการสะท้อนขึ้นอยู่กับว่าท่อนั้นเป็นปลายปิดหรือเปิดคล้ายกับเฟสการสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือกที่มีปลายตรึงหรือปลายอิสระ ตามลำดับ

กรณีท่ออากาศปลายปิดด้านหนึ่ง อากาศจะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ เมื่อเสียงเดินทางผ่านอากาศเข้าไปในท่อปลายปิดจะทำให้เสียงมีเฟสสะท้อนกลับ 180 องศา เช่นเดียวกับการสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือกปลายตรึง และที่ด้านปลายเปิดนี้อากาศจะอัดตัวมีความดันสูงสุด ทำให้ปลายเปิดเป็นตำแหน่งบัพของการกระจัดของโมเลกุลอากาศ หรือเป็นปฏิบัพของคลื่นความดัน

กรณีท่ออากาศปลายเปิด คลื่นสะท้อนจะมีเฟสเดียวกันกับคลื่นต้นกำเนิด เช่นเดียวกับการสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือกปลายอิสระ ทั้งนี้ถือว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่ผ่านท่อ ทำให้ด้านปลายเปิดของท่ออากาศเป็นตำแหน่งปฏิบัติของการกระจัดของโมเลกุลอากาศ หรือเป็นบัพของคลื่นความดัน (Parameth, 2016)

ในภาพที่ 1 แสดงการสั่นพ้องในท่อปลายเปิด ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความยาวของท่ออากาศยาว L ระยะห่างของปฏิบัติที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\lambda/2$ พิจารณาการสั่นพ้องในฮาร์โมนิกส์ที่หนึ่ง ของท่อปลายเปิดจะได้ความสัมพันธ์ของความยาวท่อกับความยาวคลื่นเป็น $L = \lambda_1/2$ หรือ $\lambda_1 = 2L$ ดังนั้น ความถี่มูลฐานของการสั่นพ้องในท่ออากาศปลายเปิดที่ยาว L คือ

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad (2)$$

เมื่อ f_1 คือ ความถี่มูลฐาน มีหน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

v คือ อัตราเร็วของคลื่น มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

λ_1 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่หนึ่ง มีหน่วย เมตร (m)

L คือ ความยาวท่ออากาศ มีหน่วย เมตร (m)

ส่วนการสั่นพ้องถัดมาที่มีความยาวคลื่นเป็น $\lambda_2 = 2L/2$, $\lambda_3 = 2L/3$ และ $\lambda_4 = 2L/4$ ซึ่งมีความถี่เป็น $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1$ และ $f_4 = 4f_1$ ตามลำดับ ดังนั้นสมการทั่วไปของความถี่ของการสั่นพ้องในท่อปลายเปิดคือ

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, 4 \dots) \quad (3)$$

$$\text{หรือ} \quad f_n = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, 4 \dots) \quad (4)$$

เมื่อ f_n คือ ความถี่ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ n มีหน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

n คือ ลำดับฮาร์โมนิกส์ ($n = 1, 2, 3, 4 \dots$)

เนื่องจาก n มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, 4, ... ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสั่นพ้องในท่ออากาศแบบปลายเปิดมีอนุกรมฮาร์โมนิกได้ตั้งแต่ f_1 (ความถี่มูลฐาน), f_2 , f_3 , f_4 , ..., f_n

ในภาพที่ 2 แสดงการสั่นพ้องในท่อปลายปิด ซึ่งจะเห็นว่าปลายด้านปิดของท่อเป็นตำแหน่งบัพของคลื่นการกระจัด เมื่อเกิดการสั่นพ้องครั้งแรกจะได้ความสัมพันธ์ความยาวท่อกับความยาวคลื่นเป็น $L = \lambda_1/4$ หรือได้ความถี่มูลฐานเป็น

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (5)$$

เมื่อ f_1 คือ ความถี่มูลฐาน มีหน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

v คือ อัตราเร็วของคลื่น มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

L คือ ความยาวท่ออากาศ มีหน่วย เมตร (m)

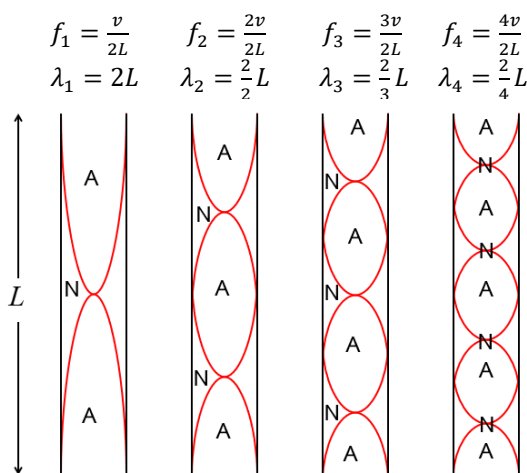
ความถี่มูลฐานนี้จะเป็นครึ่งหนึ่งของความถี่มูลฐานของท่อปลายเปิดที่มีความยาวเท่ากัน ทุก ๆ โอเวอร์โทน (overtone) ของท่อปลายปิดจะมีบัพปลายปิดและปฏิบัติปลายเปิด จึงทำให้ไม่มีฮาร์โมนิกส์ที่ 2, 4, 6, ... และมีฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนคี่เท่านั้น ส่วนการสั่นพ้องถัดมาที่มีความยาวคลื่นเป็น $\lambda_3 = 4L/3$, $\lambda_5 = 4L/5$ และ $\lambda_7 = 4L/7$ ซึ่งมีความถี่เป็น $f_3 = 3f_1$, $f_5 = 5f_1$ และ $f_7 = 7f_1$ ตามลำดับ ดังนั้นสมการทั่วไปของความถี่ของการสั่นพ้องในท่อปลายปิดคือ

$$f_n = n \frac{v}{4L} \quad (n = 1, 3, 5, 7 \dots) \quad (6)$$

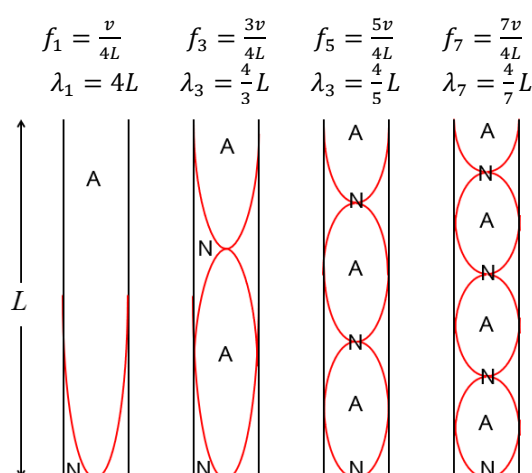
$$\text{หรือ} \quad f_n = n f_1 \quad (n = 1, 3, 5, 7 \dots) \quad (7)$$

เมื่อ f_n คือ ความถี่ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ n มีหน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

n คือ ลำดับฮาร์โมนิกส์ ($n = 1, 3, 5, 7 \dots$)



ภาพที่ 1 การสั่นพ้องในท่ออากาศปลายเปิดมีความถี่ธรรมชาติทุกฮาร์โมนิกส์ (Bodinchart, 2012)



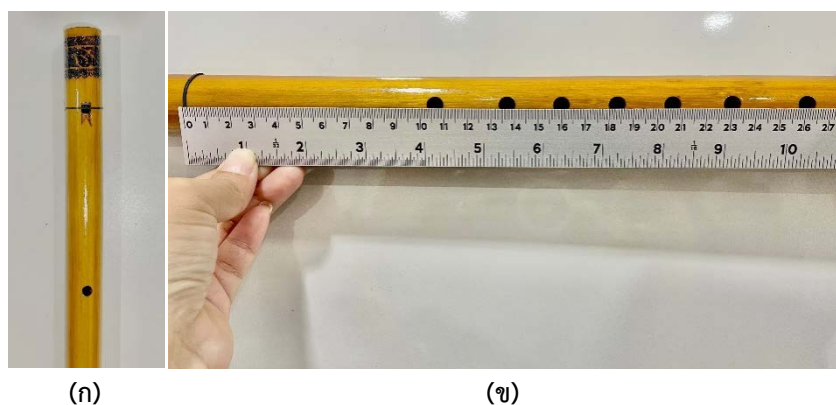
ภาพที่ 2 การสั่นพ้องในท่ออากาศปลายปิดมีความถี่ธรรมชาติเฉพาะฮาร์โมนิกส์ที่เป็นเลขคี่ (Bodinchart, 2012)

การเกิดเสียงของเครื่องดนตรีขลุ่ย (ตัวอย่างการสั่นพ้องในท่ออากาศปลายเปิด)

ขลุ่ยเป็นเครื่องดนตรีประเภทเป่าที่มีลิ้น มีส่วนประกอบแสดงในภาพที่ 3 เสียงของขลุ่ยเกิดจากการใช้ลมปากเป่าที่ปลายของเลาขลุ่ยซึ่งมีดากอยู่ ดากคือไม้อุดปากขลุ่ยซึ่งผ่านเป็นช่องเล็ก ๆ ให้ลมผ่านไปยังรูที่เจาะเป็นช่องรับลมจากปลายดาก ภายในขลุ่ยอยู่ด้านเดียวกับรูเป่าจะมีรู ที่เรียกว่ารูปากนกแก้ว รูปากนกแก้วนี้ทำให้เกิดเสียงหรือเทียบได้กับลิ้นของขลุ่ย เลาขลุ่ยจะมีการเจาะรูในระยะห่างต่าง ๆ กันในแต่ละรูเพื่อบังคับเสียงให้เกิดตัวโน้ตต่าง ๆ เมื่อใช้นิ้วปิดรูบังคับเสียงทุกระยะจะทำให้ท่ออากาศยาวเกิดเป็นเสียงต่ำ และเมื่อเปิดนิ้วที่ปิดรูบังคับเสียงทีละนิ้วจะทำให้ท่ออากาศสั้นลงเกิดเป็นเสียงที่สูงขึ้น (Boonsatta, 2014)

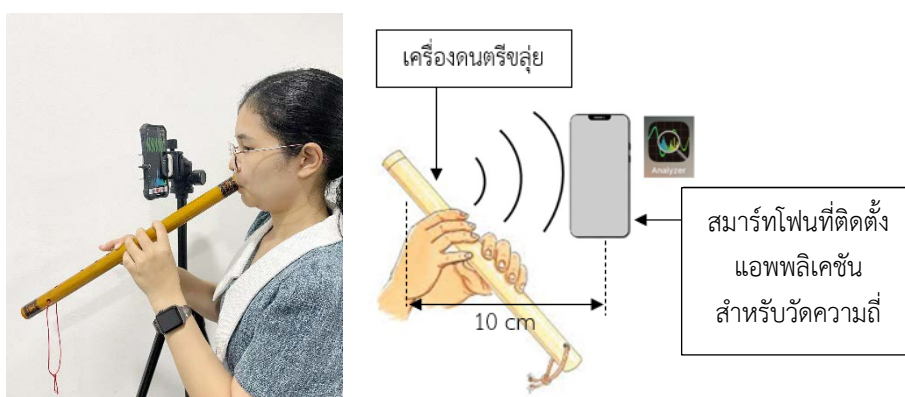
การเกิดเสียงของเครื่องดนตรีโหวด (ตัวอย่างการสั่นพ้องในท่ออากาศปลายปิด)

โหวดเป็นเครื่องดนตรีประเภทเป่าที่ไม่มีลิ้น มีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 4 เสียงของโหวดเกิดจากการใช้ลมปากเป่าโดยให้หัวโหวดหรือจุกโหวดอยู่บริเวณคาง ทำรูปปากเป่าให้คล้ายกับการผิวปาก เป่าไปยังลูกโหวดแต่ละลูก ซึ่งลมที่เป่านี้ จะทำให้เกิดการสะท้อนของเสียง โดยบริเวณปลายด้านหนึ่งของลูกโหวดจะถูกอุดด้วยซี่สุด ระดับเสียงสูง-ต่ำของลูกโหวดซึ่งทำให้เกิดเป็นตัวโน้ตต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโหวด และความยาวของลูกโหวด โดยเสียงต่ำที่สุดเกิดจากลูกโหวดที่ใหญ่และยาวที่สุด และเสียงสูงที่สุดเกิดจากลูกโหวดที่มีขนาดเล็กและสั้นที่สุด (Phathong, Chan-on and Danpradit, 2017)



ภาพที่ 5 (ก) การนำหนังยางมารัดที่จุดวัดกึ่งกลางของปากนกแก้วของเครื่องดนตรีขลุ่ย และ
(ข) การวัดความยาวของท่อสั้นพ้อง (L) จากหนังยางจนถึงรูเปิดในแต่ละตัวโน้ต

- ติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง โดยให้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน Audio/Spectrum Analyzer ห่างจากปากนกแก้ว เป็นระยะประมาณ 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีขลุ่ย (Petudom, 2017)

- เป่าเครื่องดนตรีขลุ่ยแต่ละตัวโน้ต และวัดความถี่เสียง (f) ด้วยสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน 5 ครั้ง เพื่อไปหาค่าความถี่เสียงเฉลี่ย (f_{av}) และหาค่า $\frac{1}{f_{av}}$
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ โดยให้แกน y เป็นความยาวท่อสั้นพ้อง L_{av} และแกน x เป็น $\frac{1}{f_{av}}$ และคำนวณหาค่าความชัน (slope)
- นำค่าความชัน (slope) ที่ได้ มาคำนวณหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ย จากสมการที่ (3) $f_n = \frac{nv}{2L}$ (กำหนดให้ $n = 1$) จะได้ $L = \frac{v}{2f_n}$ ซึ่งหากเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx + c$ จะได้ว่า $slope = \frac{v}{2}$ ดังนั้นจะได้อัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ย (v_{ex}) = $2slope$

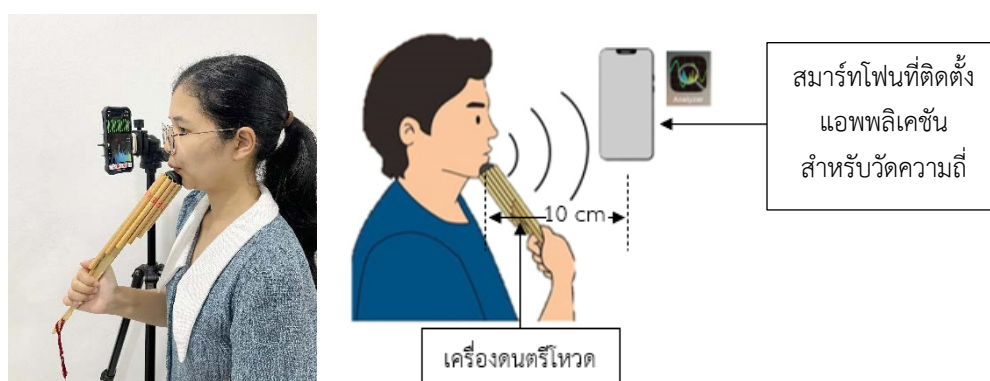
2.2 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีโหวด

- วัดความยาวของท่อสั้นพ้อง (L) จากจมูกโหวดไปถึงปลายลูกโหวดในแต่ละตัวโน้ต จำนวน 5 ครั้ง พร้อมหาค่าความยาวเฉลี่ยของท่อสั้นพ้อง (L_{av}) ของแต่ละตัวโน้ต ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การวัดความยาวของท่อน้ำพอง (L) ในแต่ละตัวโน้ตของเครื่องดนตรีโหวด

- ติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง โดยให้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน Audio/Spectrum Analyzer ห่างจากจุมูกโหวด เป็นระยะประมาณ 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีโหวด
(Department of Cultural Promotion, 2021)

- เป่าเครื่องดนตรีโหวดแต่ละตัวโน้ต และวัดความถี่เสียง (f) ด้วยสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน 5 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าความถี่เสียงเฉลี่ย (f_{av}) และหาค่า $\frac{1}{f_{av}}$
- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ โดยให้แกน y เป็นความยาวท่อน้ำพอง L_{av} และแกน x เป็น $\frac{1}{f_{av}}$ และคำนวณหาค่าความชัน (slope)
- นำค่าความชัน (slope) ที่ได้ มาคำนวณหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีโหวด จากสมการที่ (6) $f_n = \frac{nv}{4L}$ (กำหนดให้ $n = 1$) จะได้ $L = \frac{v}{4f_n}$ ซึ่งหากเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx + c$ จะได้ว่า $slope = \frac{v}{4}$ ดังนั้นจะได้อัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีโหวด (v_{ex}) = $4slope$

ตอนที่ 3 การเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อน้ำพองจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดกับค่าทางทฤษฎี

หากเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด (v_{ex}) กับค่าทางทฤษฎี (v_t) จะได้ว่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดเทียบกับอัตราเร็วเสียงในอากาศตามทฤษฎี ตามสมการ

$$\Delta v\% = \frac{|v_{ex} - v_t|}{v_t} \times 100\% \quad (8)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศตามทฤษฎี ตอนที่ 2 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อน้ำพองจาก

เครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด และตอนที่ 3 การเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดกับค่าทางทฤษฎี รายละเอียดดังนี้

ตอนที่ 1 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศตามทฤษฎี

ในการหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศตามทฤษฎี ผู้วิจัยได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิขณะทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง และนำไปหาอุณหภูมิเฉลี่ย (t) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ย (t) เท่ากับ $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังตารางที่ 2 เมื่อคำนวณค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากสมการ $v_t = 331 + 0.6t$ ที่อุณหภูมิ $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ $v_t = 331 + 0.6(27.1) = 347.26\text{ m/s}$ ดังนั้น อัตราเร็วของเสียงในอากาศตามทฤษฎี (v_t) เท่ากับ 347.26 m/s

ตารางที่ 2 อุณหภูมิขณะทำการทดลอง

ครั้งที่	อุณหภูมิขณะทำการทดลอง ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)
1	27.0	27.1
2	27.1	
3	27.3	
4	26.9	
5	27.0	

ตอนที่ 2 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด

2.1 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีขลุ่ย

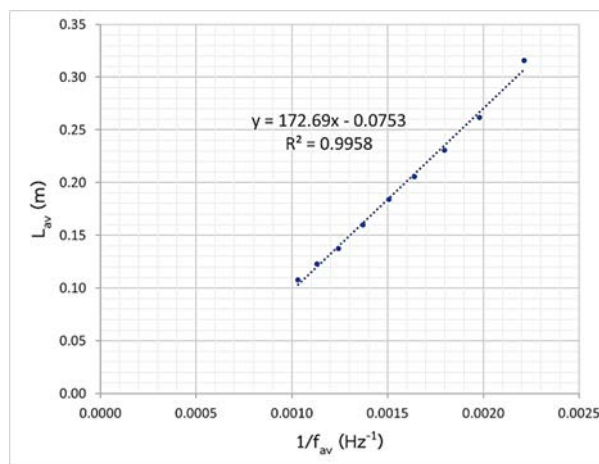
ในการวัดค่าความยาวของท่อสั้นพ้องและความถี่เสียงด้วยแอปพลิเคชันวัดค่าความถี่เสียงบนสมาร์ทโฟนของตัวโน้ต 9 ตัว ของเครื่องดนตรีขลุ่ย ได้แก่ ร'' ด'' ท' ล' ช' พ' ม' ร' ด' ได้ผลแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความยาวเฉลี่ยของท่อสั้นพ้อง (L_{av}) และความถี่เสียงเฉลี่ย (f_{av}) และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีขลุ่ย

ลำดับที่	ตัวโน้ต	$L_{av} (\times 10^{-2}\text{ m})$	$f_{av} (\text{Hz})$	$\frac{1}{f_{av}} (\times 10^{-3}\text{ Hz}^{-1})$	$v = 2Lf$ (m/s)
1	ร''	10.76 ± 0.04	969	1.03	208.53
2	ด''	12.26 ± 0.04	884	1.13	216.76
3	ท'	13.73 ± 0.04	804	1.24	220.78
4	ล'	16.01 ± 0.04	729	1.37	233.37
5	ช'	18.42 ± 0.06	664	1.51	244.62
6	พ'	20.57 ± 0.08	609	1.64	250.54
7	ม'	23.06 ± 0.04	557	1.80	256.89
8	ร'	26.16 ± 0.04	505	1.98	264.22
9	ด'	31.56 ± 0.04	452	2.21	285.30

จากตารางที่ 3 พบว่า ความยาวของท่อสั้นพ้องของเครื่องดนตรีขลุ่ยตัวโน้ต ร'' ด'' ท' ล' ช' พ' ม' ร' ด' มีความยาวเฉลี่ย (L_{av}) เท่ากับ $10.76 \pm 0.04\text{ cm}$, $12.26 \pm 0.04\text{ cm}$, $13.73 \pm 0.04\text{ cm}$, $16.01 \pm 0.04\text{ cm}$, $18.42 \pm 0.06\text{ cm}$, $20.57 \pm 0.08\text{ cm}$, $23.06 \pm 0.04\text{ cm}$, $26.16 \pm 0.04\text{ cm}$ และ $31.56 \pm 0.04\text{ cm}$ ตามลำดับ และสอดคล้องกับการวัดค่าความถี่เสียงด้วยแอปพลิเคชันวัดค่าความถี่เสียงบนสมาร์ทโฟน ที่มีความถี่เฉลี่ย (f_{av}) เท่ากับ 969 Hz , 884 Hz , 804 Hz , 729 Hz , 664 Hz , 609 Hz , 557 Hz , 505 Hz และ 452 Hz ตามลำดับ หากลองคำนวณค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของแต่ละตัวโน้ต ตามสมการที่ (3) ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 3 คอลัมน์ 6 พบว่า ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของแต่ละตัวโน้ตมีความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีมาก เนื่องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยมีรูบังคับเสียงและรูปรับแต่งเสียง ซึ่งส่งผลต่อความถี่เสียงของแต่ละตัวโน้ตที่ออกมาจากรูปากนกแก้วถือเป็นข้อจำกัดที่ส่งผลให้ค่าอัตราเร็วเสียงในอากาศมีความคลาดเคลื่อนจากค่า

ทางทฤษฎีมาก ดังนั้นเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจึงใช้วิธีการหาอัตราเร็วเสียงในอากาศจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ แสดงได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีขลุ่ย

จากภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีขลุ่ย พบว่าเป็นกราฟเส้นตรงมีสมการเป็น $L_{av} = 172.69 \left(\frac{1}{f_{av}} \right) - 0.0753$ หากเปรียบเทียบกับสมการที่ (3) ที่เป็นสมการความถี่ของการสั่นพ้องในท่อปลายเปิด $f_n = \frac{nv}{2L}$ กำหนดให้ $n = 1$ จะได้ $\frac{v}{2} = \text{slope}$ หรือเขียนได้ว่า $v = 2\text{slope}$ แทนค่าความชันจากกราฟจะได้ $v = 2(172.69) = 345.38 \text{ m/s}$ ดังนั้นการวัดอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีขลุ่ย (v_{ex}) เท่ากับ 345.38 m/s เมื่อพิจารณาสมการเส้นตรงเพิ่มเติม พบว่าในทางทฤษฎีนั้นจุดตัดแกนควรจะเป็น 0 แต่ในการทดลองมีค่าเป็น -0.0753 และเมื่อนำค่านี้นับวกเข้าทั้งสองข้างของสมการเส้นตรงข้างต้นจะได้ $L_{av} + 0.0753 = 172.69 \left(\frac{1}{f_{av}} \right)$ ซึ่งไม่มีจุดตัดแกนตรงกับทฤษฎี ดังนั้นค่า 0.0753 คือค่าที่ควรที่จะเพิ่มเข้าไปจากค่าความยาวของท่อสั้นพ้องเฉลี่ย จึงจะทำให้ได้ความยาวของท่อสั้นพ้องที่ควรจะเป็นและให้ผลใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งค่านี้เรียกว่า end-correction หรือระยะคลาดเคลื่อนของท่อสั้นพ้อง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lopresto (2011) ซึ่งศึกษาหาค่าความยาวที่ถูกต้องของท่อสั้นพ้องของเครื่องดนตรี Boomwhacker ที่เป็นท่อปลายเปิด พบว่า เมื่อวัดความยาวของท่อสั้นพ้องในแต่ละตัวโน้ต และเพิ่มเติมด้วยค่า end-correction แล้วจะทำให้ได้ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี

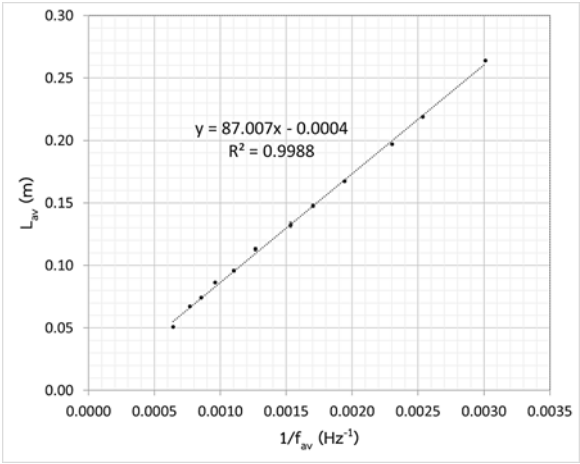
2.2 การหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากเครื่องดนตรีโหวด

ในการวัดค่าความยาวของท่อสั้นพ้องและความถี่เสียงด้วยแอปพลิเคชันวัดค่าความถี่เสียงบนสมาร์ตโฟนของตัวโน้ต 12 ตัว ของเครื่องดนตรีโหวด ได้แก่ ซ' ม' ร' ด' ล' ซ' ม' ร' ด' ล' ซ' ม' ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความยาวเฉลี่ยของท่อสั้นพ้อง (L_{av}) และความถี่เสียงเฉลี่ย (f_{av}) และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีโหวด

ลำดับที่	ตัวโน้ต	$L_{av} (\times 10^{-2} m)$	$f_{av} (Hz)$	$\frac{1}{f_{av}} (\times 10^{-3} Hz^{-1})$	$v = 4Lf$ (m/s)
1	ซ//	5.09±0.04	1560	0.64	317.62
2	ม//	6.74±0.05	1300	0.77	350.48
3	ร//	7.41±0.09	1169	0.86	346.49
4	ด//	8.63±0.11	1040	0.96	359.01
5	ล'	9.58±0.12	907	1.10	347.56
6	ซ'	11.30±0.15	790	1.27	357.08
7	ม'	13.25±0.21	652	1.53	345.56
8	ร'	14.77±0.15	587	1.70	346.80
9	ด'	16.76±0.02	515	1.94	345.26
10	ล	19.71±0.02	434	2.30	342.17
11	ซ	21.89±0.03	394	2.54	344.99
12	ม	26.40±0.04	332	3.01	350.59

จากตารางที่ 4 การทดลองหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีโหวด ความยาวของท่อสั้นพ้องของตัวโน้ต ซ// ม// ร// ด// ล' ซ' ม' ร' ด' ล ซ ม มีความยาวเฉลี่ย (L_{av}) เท่ากับ $5.09 \pm 0.04 \text{ cm}$, $6.74 \pm 0.05 \text{ cm}$, $7.41 \pm 0.09 \text{ cm}$, $8.63 \pm 0.11 \text{ cm}$, $9.58 \pm 0.12 \text{ cm}$, $11.30 \pm 0.15 \text{ cm}$, $13.25 \pm 0.21 \text{ cm}$, $14.77 \pm 0.15 \text{ cm}$, $16.76 \pm 0.02 \text{ cm}$, $19.71 \pm 0.02 \text{ cm}$, $21.89 \pm 0.03 \text{ cm}$ และ $26.40 \pm 0.04 \text{ cm}$ ตามลำดับ และสอดคล้องกับการวัดค่าความถี่เสียงด้วยแอปพลิเคชันวัดความถี่เสียงบนสมาร์ทโฟน ที่มีความถี่เฉลี่ย (f_{av}) เท่ากับ $1,560 \text{ Hz}$, $1,300 \text{ Hz}$, $1,169 \text{ Hz}$, $1,040 \text{ Hz}$, 907 Hz , 790 Hz , 652 Hz , 587 Hz , 515 Hz , 434 Hz , 394 Hz และ 332 Hz ตามลำดับ หากลองคำนวณค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของแต่ละตัวโน้ต ตามสมการที่ (6) ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4 คอลัมน์ 6 พบว่า ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของแต่ละตัวโน้ตมีความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีไม่มากนัก ทั้งนี้หากหาอัตราเร็วเสียงในอากาศจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ แสดงได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีโหวด

จากภาพที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L_{av} และ $\frac{1}{f_{av}}$ ของเครื่องดนตรีโหวด พบว่าเป็นกราฟเส้นตรงมีสมการเป็น $L_{av} = 87.007 \left(\frac{1}{f_{av}} \right) - 0.0004$ หากเปรียบเทียบกับสมการที่ (6) ที่เป็นสมการความถี่ของการสั่นพ้องในท่อปลายปิด $f_n = \frac{nv}{4L}$ กำหนดให้ $n = 1$ จะได้ $\frac{v}{4} = slope$ หรือเขียนได้ว่า $v = 4slope$ แทนค่าความชันจากกราฟจะได้ $v = 4(87.007) = 348.03 \text{ m/s}$ ดังนั้นการวัดอัตราเร็วของเสียงในอากาศด้วยเครื่องดนตรีโหวด v เท่ากับ 348.03 m/s

เมื่อพิจารณาสมการกราฟเส้นตรงเพิ่มเติม พบว่ามีจุดตัดแกนคือ -0.0004 ซึ่งในทางทฤษฎีจุดตัดแกนควรเป็น 0 เมื่อนำค่า 0.0004 บวกเข้าทั้งสองข้างของสมการเส้นตรงข้างต้นจะได้ $L_{av} + 0.0004 = 87.007 \left(\frac{1}{f_{av}}\right)$ ซึ่งไม่มีจุดตัดแกนตรงกับทฤษฎี ดังนั้น ค่า 0.0004 คือค่าที่ควรพิจารณาเพิ่มจากค่าความยาวเฉลี่ยของท่อสั้นพ้อง จึงจะทำให้ได้ค่าความยาวของท่อสั้นพ้องที่ควรจะเป็นและให้ผลใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งค่านี้เรียกว่า end-correction หรือระยะคลาดเคลื่อนจากปลายท่อสั้นพ้อง สอดคล้องกับการทดลองของ Torcal-Milla (2023) ซึ่งศึกษาอัตราเร็วของเสียงในอากาศโดยใช้ขลุ่ยอินคา (pan flute) ซึ่งเป็นท่อปลายปิด พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากกราฟสมการเส้นตรงของความยาวท่อสั้นพ้องที่พิจารณาค่า end-correction เพิ่มเติม กับความยาวท่อสั้นพ้องที่ไม่ได้พิจารณาค่า end-correction เพิ่มขึ้น ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของความยาวท่อสั้นพ้องที่พิจารณาค่า end-correction เพิ่มขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าทฤษฎีมากกว่าค่าความยาวของท่อสั้นพ้องที่ไม่ได้พิจารณาค่า end-correction เพิ่มขึ้น

ตอนที่ 3 การเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดกับค่าทางทฤษฎี

3.1 การเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องดนตรีขลุ่ยกับค่าทางทฤษฎี

จากการทดลองตอนที่ 1 ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศทางทฤษฎี (v_t) เท่ากับ 347.26 m/s และจากการทดลอง ตอนที่ 2.1 ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีขลุ่ยที่ได้จากการทดลอง (v_{ex}) เท่ากับ 345.38 m/s หากเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีขลุ่ยที่ได้จากการทดลอง (v_{ex}) กับค่าทางทฤษฎี (v_t) จากสมการ

$$\Delta v\% = \frac{|v_{ex}-v_t|}{v_t} \times 100\%$$

แทนค่า $\Delta v\% = \frac{|345.38-347.26|}{347.26} \times 100\%$

จะได้ $\Delta v\% = 0.54\%$

3.2 การเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องดนตรีโหวดกับค่าทางทฤษฎี

จากการทดลองตอนที่ 1 ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศทางทฤษฎี (v_t) เท่ากับ 347.26 m/s และจากการทดลอง ตอนที่ 2.2 ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีโหวดที่ได้จากการทดลอง (v_{ex}) เท่ากับ 348.03 m/s หากเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศของเครื่องดนตรีโหวดที่ได้จากการทดลอง (v_{ex}) กับค่าทางทฤษฎี (v_t) จากสมการ

$$\Delta v\% = \frac{|v_{ex}-v_t|}{v_t} \times 100\%$$

แทนค่า $\Delta v\% = \frac{|348.03-347.26|}{347.26} \times 100\%$

จะได้ $\Delta v\% = 0.22\%$

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองหาอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวด สามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิขณะทำการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.1°C จะได้ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศ (v_t) ตามทฤษฎี เท่ากับ 347.26 m/s ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่หาจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยมีค่าเท่ากับ 345.38 m/s และโหวดมีค่าเท่ากับ 348.03 m/s และเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราเร็วของเสียงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เสียงและความยาวของท่อสั้นพ้องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดกับค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศทางทฤษฎี พบว่า มีค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.54 และ 0.22 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้ได้ค่าอัตราเร็วของเสียงในอากาศที่ใกล้เคียงกับค่าทฤษฎีมากที่สุด ควรพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของท่อสั้นพ้อง หรือค่า end-correction ร่วมด้วย
2. เนื่องจากเครื่องดนตรีขลุ่ยและโหวดทำจากไม้ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสามารถยึดเหนี่ยวได้ตามสภาพอากาศ ดังนั้นควรควบคุมปัจจัยความชื้นของอากาศเพิ่มเติม
3. ผู้วิจัยอาจใช้ขลุ่ยที่ทำจากวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ไม้ทำการทดลอง เช่น ขลุ่ยรีคอร์เดอร์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่วิจัย และความอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

จริยธรรมการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการรับรองการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในบันทึกข้อความ ที่ อว 8100/07204 ลงวันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2566 ตามวิธีการดำเนินการมาตรฐาน (Standard Operating Procedures, SOP) ฉบับที่ 2.0 พ.ศ. 2566 ประกาศใช้เมื่อวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2566 แล้วว่าไม่ได้ทำการศึกษา วิจัยในมนุษย์

References

- Boonsatta, N. (2014). Thai music (flute) (in Thai). Retrieved 15 December 2023, from **Blogspot**: <http://boonsatta.blogspot.com>
- Bodinchart, S. (2012). **Physics 1**. Pathum Thani: Sky books.
- Datkamjon, N. (2022). Learning Management of Khlui Peang-Or Flute Skill through Brain-Based Learning and QR Code for Mathayomsuksa 2 Students. **Master of Education Program**, Uttaradit: Uttaradit Rajabhat University.
- Department of Cultural Promotion. (2021). How to play vote (in Thai). Retrieved 15 December 2023, from **Facebook**: <https://www.facebook.com/watch/?v=227187312620049>
- Lopresto, M. C. (2011). Experimenting with end-correction and the speed of sound. **Physics education**, 46(4), 437.
- Niran, S. (2017). **Handbook of learning Physics M.5 volume 4**. Nonthaburi: Phoemsap Printing.
- Office of the Basic Education Commission. (2017). **Basic Education Core Curriculum B.E. 2560** (in Thai). Bangkok: Agricultural cooperative printing demonstrations of Thai.
- Parameth, P. (2016). **Physic 1**. Bangkok: Sripatum University.
- Petudom, S. (2017). The development skill of Khluy-Peang-Or (in Thai). Retrieved 12 December 2023, from **NakhonsawanSchool**: https://km.nssc.ac.th/external_newsblog.php?links=1637
- Phathong, D., Chan-on, A. and Danpradit, P. (2017). The selection-Purchase of Wot and Kaen: A case study Bang Tha Ruea, Nakhon Phanom (in Thai). **Music and Performing Art Journal**, 3(1), 34-48.
- Phonkhate, Y. (2019). Knowledge of vote (in Thai). Retrieved 20 November 2023, from **Google site**: <https://sites.google.com/site/karphathnabthreinybnweb2529/howd>.
- Tiwaree, R., Cheumklang, K., Phromyod, N. and Songpongs, P. (2018). **Guide to Conducting Sound Experiment Activities via Smartphone or Tablet Apps and PC** (in Thai). Bangkok: The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology.
- Torcal-Milla, F. J. (2023). Measuring the speed of sound with a pan flute and a smartphone: a half-melodicand totally-didactic experiment. **Physics Education**, 58(5), 055010.