

การวัดพารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของลำโพง

Measurement of Loudspeaker Electro-Mechanical Parameters

ชูเกียรติ สอดศรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดพารามิเตอร์ทางกลไฟฟ้าของลำโพงได้แก่ความต้านทานของวอยซ์คอยล์ (R_E) คอมไพล์-แอนซ์เชิงกล (C_{ms}) มวลของไดอะแฟรมและวอยซ์คอยล์ (M_{mD}) ความต้านทานเชิงกล (R_{ms}) แฟลคเตอร์แรง (Bl) และ แฟลคเตอร์คุณภาพ (Q) ผู้ผลิตใช้การวัดพารามิเตอร์เหล่านี้สำหรับการควบคุมคุณภาพของลำโพงและใช้ในการออกแบบตู้ลำโพง ผู้บริโภคใช้การดูค่าพารามิเตอร์เพื่อทราบถึงคุณลักษณะของเสียงที่จะได้จากลำโพง วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์และพารามิเตอร์ของลำโพงกระทำโดยการป้อนสัญญาณผ่านวงจรที่กระแสและการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ระหว่างสองช่องสัญญาณในโดเมนความถี่ ค่า Q หาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ และพารามิเตอร์ k_s , C_{ms} , M_{mD} , R_{ms} , Bl หาได้ด้วยเทคนิคการเพิ่มมวลที่ไดอะแฟรม ผลการทดลองด้วยการโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับการใช้สัญญาณชานส์-สวีป (Sine sweep) วัดจรรยาบรรณการทำงานของลำโพงและลำโพงจริงขนาด 15 นิ้วแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการวัด

คำสำคัญ : พารามิเตอร์ของลำโพง ความถี่เรโซแนนซ์ วิธีการวัดโดยเทคนิคการเพิ่มมวล

Abstract

This work is to present electro-mechanical parameters of loudspeakers; voice coil resistance (R_E), mechanical compliance (C_{ms}), mass of diaphragm and voice coil (M_{mD}), mechanical resistance (R_{ms}), induced force factor (Bl), and quality factor (Q). Manufacturers measure these parameters for quality control and loudspeaker box design. Measurement of loudspeaker parameters was accomplished by inputting electrical voltage through a constant current-controlled circuit and using the technique of mass-addition method. LabVIEW programming was done for digital filtering and signal processing in frequency domain. Results of measuring resonant frequency of an equivalent circuit and identifying the parameters R_E , C_{ms} , R_{ms} , M_{mD} and Bl of a loudspeaker displayed efficiency of the measurement method.

Keywords : Loudspeaker parameters measurement, Resonance frequency, Method of mass addition.

1. บทนำ

ลำโพงเป็นทรานสดิวเซอร์ประเภทหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกล ใช้สำหรับการสื่อสารและความบันเทิง ผู้ผลิตลำโพงควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยการวัดค่าพารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของลำโพง ผู้บริโภคสามารถทราบถึงลักษณะเสียงของลำโพงได้ด้วยการดูข้อมูลพารามิเตอร์ที่ระบุในเอกสารที่มา

กับลำโพง ส่วนผู้สร้างตู้ลำโพงใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ในการออกแบบตู้ลำโพงให้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการวัดพารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของลำโพงจึงเป็นสิ่งสำคัญ

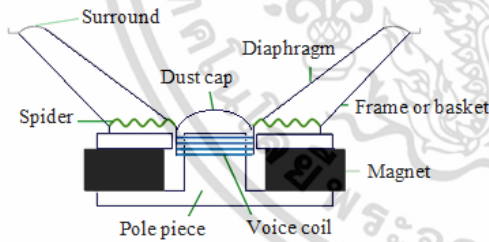
วิธีการวัดพารามิเตอร์ของลำโพงสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ [1-4] ในปัจจุบันการวัดสามารถกระทำได้ง่ายด้วยการใช้การประมวลผลใน

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอรืซึ่งมีราคาถูกลงอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีต บทความนี้จะนำเสนอวิธีการวัดพารามิเตอร์ของลำโพงด้วยการสร้างสัญญาณไซน์สวีป (Sine sweep) ผ่านวงจรที่กระแสป้อนให้กับลำโพง และใช้คอมพิวเตอรืในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่วัดได้ในโดเมนความถี่เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ค่าแฟกเตอร์คุณภาพ (Quality factor) และค่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) ใช้เทคนิคการเพิ่มมวลที่ไดอะแฟรมเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของลำโพง ความถูกต้องของวิธีการวัดถูกตรวจสอบด้วยการวัดวงจรจำลองลำโพงที่รู้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ แล้วจึงทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ของลำโพงจริงขนาด 15 นิ้ว

2. โครงสร้างและการทำงานของลำโพง

ลำโพงที่มีการใช้เรโซแนนซ์กันอย่างแพร่หลายคือ ลำโพงชนิด Direct-radiator ซึ่งเป็นลำโพงแบบมีไดอะแฟรมเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นพลังงานเสียงไปในตัวกลางที่เป็นอากาศ โครงสร้างของลำโพงประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ 1) ส่วนแม่เหล็กถาวรและวอยซ์คอยล์ 2) สปีนเดอร์ (Spider) และเซอร์ราวด์ (Surround) และ 3) ไดอะแฟรมและดักซ์ท์แคป (Dust cap) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของลำโพง

เมื่อป้อนแรงดันทางไฟฟ้าให้กับลำโพง กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวอยซ์คอยล์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ซึ่งจะไปทำอันตรกิริยากับแม่เหล็กถาวร (Magnet) เกิดแรงผลักและดูดให้วอยซ์คอยล์เกิดการเคลื่อนที่ตามจังหวะหรือความถี่การเปลี่ยนทิศทางของกระแส ดักซ์ท์แคปและไดอะแฟรมที่ติดอยู่กับวอยซ์คอยล์เกิดการเคลื่อนที่ตามไปด้วยและทำให้เกิดการบีบอัดอนุภาคอากาศในบริเวณที่อยู่รอบๆ กำเนิดเป็นคลื่น

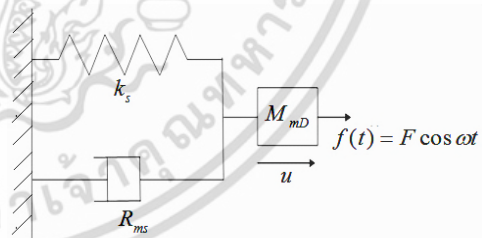
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานเสียงแผ่กระจายไปในตัวกลางอากาศ ทั้งนี้ในการเคลื่อนที่ของวอยซ์คอยล์จะมีความต้านทานเชิงกลที่เกิดจากแรงเสียดทาน (R_{ms}) ด้านการเคลื่อนที่ มีสปีนเดอร์และเซอร์ราวด์ทำหน้าที่เสมือนเป็นสปริงที่สร้างแรงดึงกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศการเคลื่อนที่

แรงแม่เหล็ก (f_c) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสที่ไหลในวอยซ์คอยล์ขึ้นกับทิศทางและขนาดของกระแส $i(t)$ ดังสมการที่ (1) ปริมาณกระแสจะแปรผันตามขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (e_g) ความต้านทานไฟฟ้าภายในของแหล่งจ่าย (R_g) ความต้านทานไฟฟ้า (R_E) และค่าอินดักแตนซ์ (L_E) ของวอยซ์คอยล์แรง f_c ที่เกิดขึ้นทำให้วอยซ์คอยล์ ไดอะแฟรมและดักซ์ท์แคปเคลื่อนที่ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการเปรียบเทียบกับระบบการสั่นทางกลชนิดฮาร์โมนิกอย่างง่าย (Simple harmonics) ที่ประกอบด้วยมวล M_{mD} สปริงที่มีความแข็งเกร็ง k_s และตัวหน่วงการเคลื่อนที่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงกล R_{ms} ดังรูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของระบบมวลและสปริงแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$f_c(t) = Bli(t) \tag{1}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{R_{ms}}{M_{mD}} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} f_c(t) \tag{2}$$



รูปที่ 2 ระบบมวลและสปริง

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่สามารถกระทำได้ในโดเมนความถี่และด้วยนิยามของอิมพีแดนซ์เชิงกลว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเชิงซ้อนที่กระทำและความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำ จะได้อิมพีแดนซ์เชิงกลดังสมการที่ (3) และระยะขจัดของการเคลื่อนที่ดังสมการที่ (4)

$$\tilde{Z}_m = \frac{\tilde{f}_c}{\tilde{u}} = R_{ms} + j \left(\omega M_{mD} - \frac{1}{\omega C_{ms}} \right) \tag{3}$$

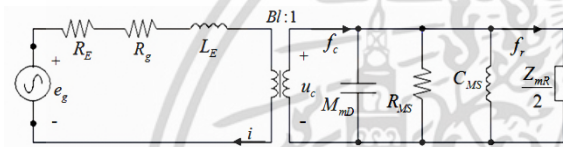
$$x(t) = A \sin(\omega t - \Theta) \quad (4)$$

โดย $A = |f_c| / \omega |Z_m|$ และ

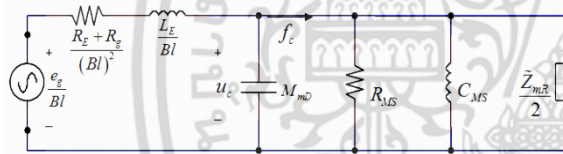
$$\Theta = \tan^{-1}((\omega M_{mD} - k_s / \omega) / R_{ms})$$

ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) ในการสั้นของไดอะแฟรมลำโพง เป็นความถี่ที่ทำให้ส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์หรือเทอม X_D ในสมการที่ (4) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะได้ f_0 ดังสมการที่ (5) การทำงานของลำโพงทั้งด้านไฟฟ้า ทางกลและอะคูสติกส์สามารถแสดง โดยใช้การเทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้าแบบ โมบิลิตี (Mobility analogous) [5] ดังรูปที่ 3

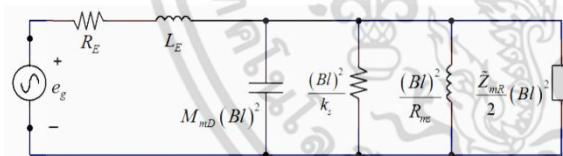
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{ms} M_{mD}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{M_{mD}}} \quad (5)$$



รูป ก.



รูป ข.

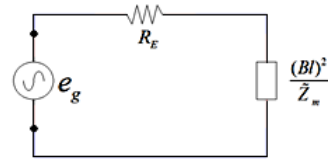


รูป ค.

รูปที่ 3 (ก) วงจรเสมือนแบบ โมบิลิตี (Mobility analogous circuit) ของลำโพงและวงจรเสมือนแบบ โมบิลิตี (ข) ในมุมมองทางกล และ (ค) ในมุมมองทางไฟฟ้า

วอยซ์คอยล์ของลำโพงจะมีค่าอินดักแตนซ์ทางไฟฟ้า L_E น้อยมาก จึงไม่นำมารวมในการวิเคราะห์ และเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ Z_{mR} ซึ่งขึ้นกับมวลอากาศที่ไหลอยู่ด้านหน้าไดอะแฟรมของลำโพงและลักษณะการประกอบเข้ากับตู้ลำโพง จะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ ดังนั้นวงจรอย่างง่ายสำหรับลำโพง แสดงได้ดังรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 วงจรอย่างง่ายสำหรับการวิเคราะห์ลำโพง

3. การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าค่าอิมพีแดนซ์ทางกลและค่าแฟกเตอร์คุณภาพของลำโพง

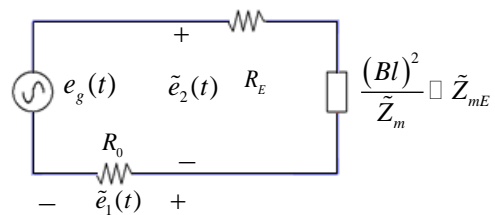
ค่าความต้านทานไฟฟ้า R_E สามารถวัดได้โดยตรงโดยใช้โอห์มมิเตอร์ แต่ค่าอิมพีแดนซ์ทางกล Z_m ของลำโพงไม่สามารถวัดได้โดยตรง การวัดค่า Z_m จะทำการวัดโดยทางอ้อมด้วยการต่อตัวต้านทานภายนอก R_0 ที่รู้ค่าแน่นอน ดังวงจรรูปที่ 5 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) และค่าอิมพีแดนซ์เชิงกลสามารถวัดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมลำโพง \tilde{e}_2 แรงดัน \tilde{e}_1 ที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก R_0 ดังสมการที่ (7)

$$\frac{\tilde{e}_2}{\tilde{e}_1} = \frac{R_E + \tilde{Z}_{mE}}{R_0}, \quad \tilde{Z}_{mE} = \frac{(Bl)^2}{Z_m} \quad (6)$$

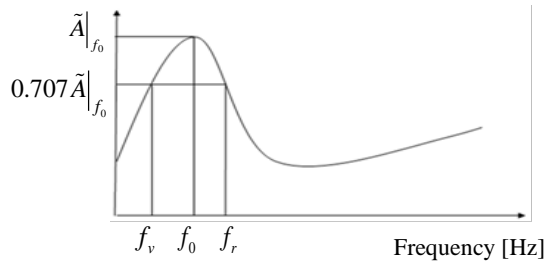
$$\tilde{Z}_{mE} = R_0 \left(\frac{\tilde{e}_2}{\tilde{e}_1} - \frac{R_E}{R_0} \right) \quad (7)$$

แฟกเตอร์คุณภาพหาได้จากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์เชิงกล Z_m ดังรูปที่ 6 โดย f_0 คือค่าความถี่เรโซแนนซ์และ $f_u - f_r$ คือ ช่วงของความถี่ที่พลังงานทางกลที่ความถี่เรโซแนนซ์ลดลงครึ่งหนึ่งหรือเท่ากับ 0.707 เท่าของขนาดอิมพีแดนซ์สูงสุดแล้วคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (8)

$$Q = \frac{f_0}{f_r - f_u} \quad (8)$$



รูปที่ 5 วงจรอย่างง่ายที่ต่อตัวต้านทานภายนอก R_0 สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์



รูปที่ 6 ค่าความถี่ f_0 , f_r และ f_v สำหรับหา Q

4. การหาค่า R_{ms} , C_{ms} , M_{mD} , Bl ของลำโพง

การสั้นในระบบมวลและสปริงที่มีตัวหน่วงการเคลื่อนที่ กำลังงานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $|f|^2 R_{ms} / (2Z_m^2)$ และจากสมการที่ (8) จะสามารถพิสูจน์ได้ว่า $f_u - f_r = R_{ms} / (2\pi M_{mD})$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ms} , M_{mD} และ R_{ms} ดังสมการที่ (9)

$$Q = \frac{2\pi f_0 M_{mD}}{R_{ms}} \quad (9)$$

และได้ $R_{ms} = \frac{2\pi f_0 M_{mD}}{Q}$ (10)

การหาค่าพารามิเตอร์ C_{ms} , M_{mD} จะใช้เทคนิคการเพิ่มมวล M_+ โดยตรงที่หน้าไดอะแฟรมของลำโพง [6] สมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (11)

$$\frac{1}{4\pi^2 f^2} = \frac{M_{mD}}{k_s} \quad (11)$$

เมื่อทำการเพิ่มมวลขนาด M_+ เข้าที่ไดอะแฟรมของลำโพง ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) จะเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (12) ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(2\pi f_0)^2$ และ มวลที่เพิ่มขึ้น M_+ โดยความชันของเส้นตรงคือ $1/k_s$ หรือเท่ากับ C_{ms} และจุดตัดแกน $1/(2\pi f_0)^2$ คือ M_{mD}/k_s สำหรับค่าพารามิเตอร์ Bl จะหาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ \tilde{Z}_{mE} ที่ความถี่ f_0 ดังสมการที่ (13) เนื่องจากที่ f_0 , $X_D = 0$

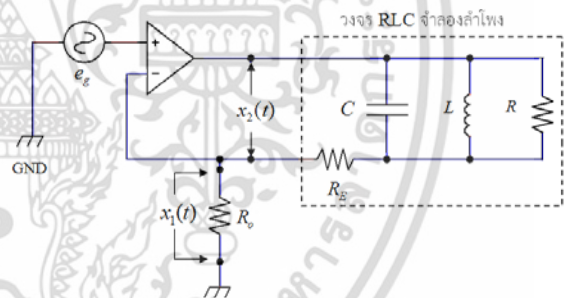
$$\frac{1}{(2\pi f_0)^2} = \frac{1}{k_s} M_+ + \frac{M_{mD}}{k_s} \quad (12)$$

$$\tilde{Z}_{mE} \Big|_{f_0} = \frac{(Bl)^2}{\tilde{Z}_m \Big|_{f_0}} = \frac{(Bl)^2}{R_{ms}} \quad (13)$$

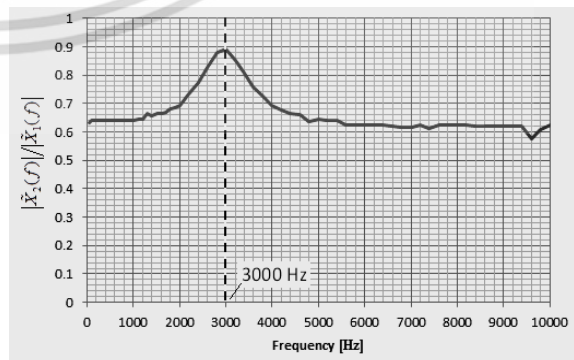
5. การทดลอง

5.1 ทดสอบความถูกต้องของวิธีการวัด

เพื่อทดสอบความถูกต้องของวิธีการวัด จะทำการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรไฟฟ้า RLC ที่รู้ค่าตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ป้อนแรงดัน คลื่นรูปไซน์ e_s ที่มีความถี่แปรเปลี่ยนตั้งแต่ 20 Hz – 10000 Hz ผ่านวงจรควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับโหลดซึ่งใช้วงจรจำลองลำโพงแทนลำโพงจริงและวัดแรงดัน $x_2(t)$ คร่อมโหลดและแรงดัน $x_1(t)$ คร่อม R_0 ดังรูปที่ 7 หลังจากนั้นทำการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณ $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ ให้อยู่ในโดเมนความถี่ซึ่งจะได้สเปกตรัม $\tilde{X}_1(f)$ และ $\tilde{X}_2(f)$ ตามลำดับ ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณได้จากกราฟ $|\tilde{X}_2(f)/\tilde{X}_1(f)|$ ดังรูปที่ 8 ค่าความถี่ที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากคำนวณตามสมการ $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{1/LC} = 2997.06$ Hz เห็นได้ว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของวิธีการวัด



รูปที่ 7 การป้อนสัญญาณผ่านวงจรคงกระแสให้กับวงจรจำลองลำโพง สำหรับ $R = 1k\Omega$ $L = 9.4H$ และ $C = 0.3\mu F$



รูปที่ 8 ความถี่เรโซแนนซ์ f_0 ของวงจรจำลองลำโพง

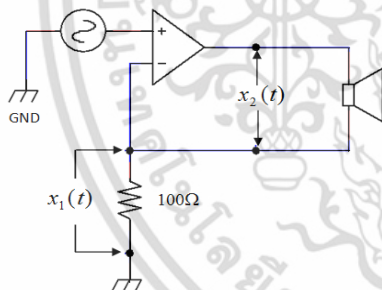
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองวัดพารามิเตอร์ของลำโพง

พารามิเตอร์ของลำโพงวัดโดยใช้วิธีการเพิ่มมวลที่ไดอะแฟรม และใช้การเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อจ่ายสัญญาณไซน์ที่มีขนาดแอมพลิจูดคงที่ $V_{pp} = 141.4$ mV คงที่และปรับความถี่จาก 20 Hz ถึง 20 kHz โดยอัตโนมัติให้กับลำโพงแล้วทำการวัดแรงดันตกคร่อม $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ ดังในรูปที่ 9 โดยในแต่ละสแต็ปที่ปรับเพิ่มความถี่จะคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ \tilde{Z}_{mE} จากสมการที่ (14)

$$\tilde{Z}_{mE} = R_0 \frac{\tilde{X}_2(f)}{\tilde{X}_1(f)} - R_E \quad (14)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ \tilde{Z}_{mE} ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยจากกราฟ 10 (ก) จะทำให้คำนวณค่าแฟคเตอร์คุณภาพ (Q) ได้โดยใช้สมการที่ (8) ค่าความถี่เรโซแนนซ์หาได้จากกราฟรูปที่ 10 (ข) หรือ 10 (ค) โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับความถี่ที่ทำให้เฟสเป็นศูนย์หรือความถี่ที่ทำให้ส่วนจินตภาพของ \tilde{Z}_{mE} มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าอิมพีแดนซ์ของ \tilde{Z}_{mE} ที่ความถี่นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า R_{ms} ได้ จากความสัมพันธ์ $\tilde{Z}_{mE}|_{f_0} = (Bl)^2 / R_{ms}$ ได้

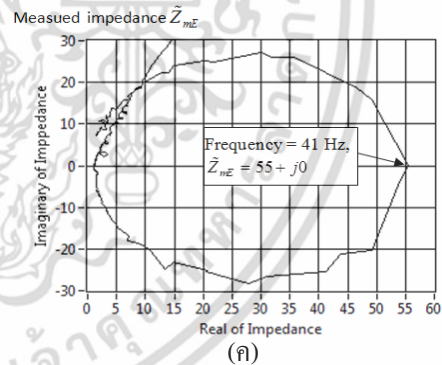
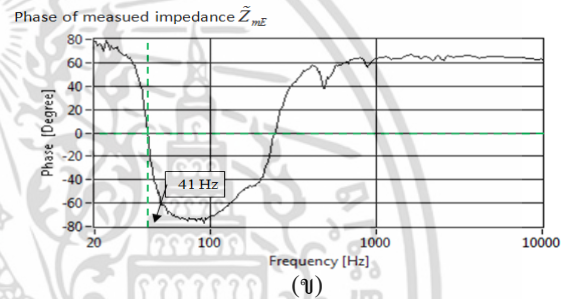
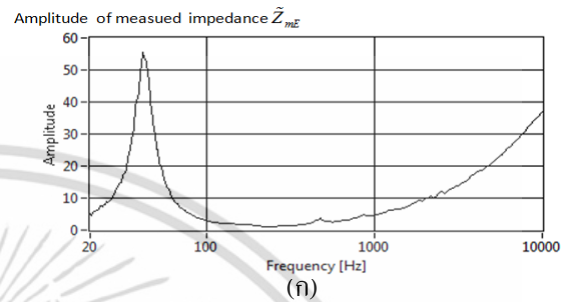


รูปที่ 9 การป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรที่กระแสให้กับลำโพง

ค่า R_E วัดได้โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานของลำโพงโดยตรง ดังรูปที่ 11(ก) การเพิ่มมวลขนาด M_+ ที่หน้าไดอะแฟรมของลำโพงขนาด 15 นิ้ว (ดังรูปที่ 11(ข)) มีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตารางที่ 1 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้เมื่อเพิ่มมวลขนาด 10g, 20g, 30g, 40g, 50g, 60g, 70g, 80g, 90g และ 100g ที่ด้านหน้าของแผ่นไดอะแฟรม และแสดงกราฟได้ดังรูปที่ 12 ใช้การประมาณการความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อสร้างสมการเส้นตรง และนำค่าความชันและ

เอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จุดตัดแกน $1/(2\pi f_0)^2$ มาคำนวณค่า k_s , C_{ms} , M_{mD} ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (12) และค่า Bl จากสมการที่ (13) ซึ่งในการทดลองวัดลำโพง 15 นิ้วที่ใช้ศึกษา พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ดังนี้ $R_E = 6.4\Omega$, $Q = 4.2$, $k_s = 5415.3$ N/m, $C_{ms} = 1.84 \times 10^{-7}$ m/N, $M_{mD} = 78.46$ g, $R_{ms} = 4.84 \Omega$, $Bl = 16.41$ T.m จากค่า k_s และ M_{mD} ที่ได้



รูปที่ 10 (ก) ขนาดของอิมพีแดนซ์ (ข) เฟสของอิมพีแดนซ์ และ (ค) ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 (ก) ใช้มัลติมิเตอร์วัด R_E (ข) การเพิ่มมวลที่หน้าไดอะแฟรมของลำโพงเพื่อวัดพารามิเตอร์ของลำโพง

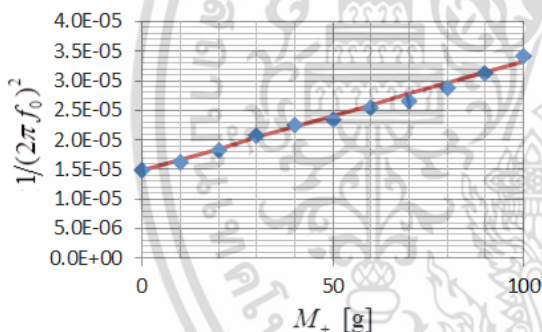
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำไปคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในการสั้นของลำโพง โดยใช้สมการที่ (5) พบว่า $f_0 = 41.8 \text{ Hz}$ ซึ่งใกล้เคียงมากกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้ นอกจากนี้ค่า R_{ms} ที่ได้มีค่าที่ไม่แตกต่างกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ

$$R_{ms} = (Bl)^2 / \tilde{Z}_{mE}|_{f_0} = 4.89 \Omega$$

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวล M_+ และความถี่ f_0

มวล M_+ (g)	ความถี่ f_0 (Hz)	$\frac{1}{4\pi^2 f_0^2}$	มวล M_+ (g)	ความถี่ f_0 (Hz)	$\frac{1}{4\pi^2 f_0^2}$
0	41.29	1.49×10^{-5}	60	31.54	2.55×10^{-5}
10	39.62	1.62×10^{-5}	70	30.90	2.66×10^{-5}
20	37.23	1.83×10^{-5}	80	29.64	2.89×10^{-5}
30	34.98	2.07×10^{-5}	90	28.44	3.13×10^{-5}
40	33.56	2.25×10^{-5}	100	27.28	3.41×10^{-5}
50	32.88	2.35×10^{-5}			



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ f_0 ที่วัดได้และมวล M_+ ที่ใส่เพิ่มที่ไดอะแฟรมของลำโพง

6. สรุป

การวัดค่าพารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของลำโพงทำได้โดยการวัดโดยตรงและการป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้า Sine sweep ผ่านวงจรคงที่กระแสเพื่อประมวลผลในโดเมนความถี่สำหรับหาอิมพีแดนซ์และความถี่เรโซแนนซ์ การวัดความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร RLC ซึ่งจำลองการทำงานของลำโพง ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้ มีค่าตรงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของวิธีการวัด การทดลองด้วยการใช้เทคนิคการเพิ่มมวลที่ไดอะแฟรมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $k_s, C_{ms}, M_{mD}, R_E, Q, R_{ms}$ และ Bl ของลำโพงขนาด 15 นิ้ว ใช้การประมวลผล

ด้วยคอมพิวเตอร์ในโดเมนความถี่ ได้ค่าพารามิเตอร์ $R_E = 6.4 \Omega, Q = 4.2, k_s = 5415.3 \text{ N/m}, C_{ms} = 1.84 \times 10^{-7} \text{ m/N}, M_{mD} = 78.46 \text{ g}, R_{ms} = 4.84 \Omega, Bl = 16.41 \text{ T.m}$ และเมื่อนำค่าที่วัด k_s และ M_{mD} ที่ได้มาคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติในการสั้นของวอยซ์คอยล์ พบว่ามีค่าตรงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของลำโพงที่วัดได้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการวัดได้เป็นอย่างดี

7. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนด้านวัสดุและอุปกรณ์จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยศิลปากร และได้รับความร่วมมือจากนายอนุชา หน่ยครบุรี ECS 2 ในการร่วมเก็บข้อมูลการทดลอง ผู้เขียนขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Knudsen, J. Jensen, and et al., "Determination of Loudspeaker Driver Parameters Using a System Identification Technique," J. of Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 9, pp. 700-708, 1989.
- [2] W. M. Leach, R. W. Schafer, and T. P. Barnwell, "Time domain measurement of loudspeaker driver parameters," IEEE trans. on Acoustics, Speech, Signal Process., Vol. 27, No. 6, 1979.
- [3] O. Jacobsen, "Measuring Loudspeaker Constants by a Transient Method," J. of Audio Eng. Soc., Vol. 30, No. 3, pp. 112-116, 1982.
- [4] J. N. Moreno, "Measurement of Loudspeaker Parameters Using a Laser Velocity Transducer and Two-Channel FFT Analysis," J. of Audio Eng. Soc., Vol. 39, No. 4, pp. 243-249, 1991.
- [5] L. L. Baranek, Acoustics, Acoustics Society of America, NY 1996.
- [6] T. B. Gabrielson, "Lecture notes in Transducer Techniques and Practices," Graduate program in Acoustics, Pennsylvania State University, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้