

## การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูล BVD ของสาร PZT ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ Analysis of BVD Equivalent Circuit of PZT using Impedance Technique

นรินทร์ ธรรมรักษ์วัฒนะ<sup>1)</sup> นฤนาท ศิลาคูปต์<sup>2)</sup> และวิสูตร ศรีวิคิตะ<sup>3)</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์วงจรสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบ BVD [1] โดยการเตรียมสารเลกเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) ลักษณะเป็นแผ่นวงกลมที่มีการสั่นในโหมดความหนา และวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP4192 และ HP4194 โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ประกอบด้วย 3 วิธี ได้แก่ การคำนวณจากค่าที่วัดได้ด้วยโปรแกรมภายในเครื่อง HP4194, การคำนวณโดยใช้วิธีของ IEEE 176-1987 จากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดด้วยเครื่อง HP4192 และการคำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นวิธีใหม่ในการประมาณค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ไปตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับวงจร BVD ที่หาได้จาก 2 วิธีแรก โดยการใช้การทดลองควบคุมและเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสาร PZT เป็นกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยเงื่อนไขของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วย  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $C_0$  และ  $L_1$  ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** สาร PZT, วงจร BVD, อิมพีแดนซ์, ความถี่เรโซแนนซ์, ความถี่แอนติเรโซแนนซ์

### Abstract

This paper presents a study of equivalent circuit analysis of Piezo-electronic ceramic type Butterworth Van Dyke (BVD). Round-shape lead zirconate titanate (PZT) with thick-mode vibration was chosen in this study and the impedance meters model HP4192 and HP4194 was used for impedance analysis. The measured results from HP4194 were taken to analyze for BVD equivalent circuit using the program provided by the instrument's manufacturer as case 1. The impedance values measured by HP4192 were also used for BVD calculation by applying IEEE 176-1987 as case 2. The impedance technique which is a new approach to estimate the reactance in low frequency wavelength (lower than resonance frequency) was case 3 for calculation of BVD circuit. The results of this technique (case 3) were then compared with those of other two alternative cases (case 1 and case 2) for accuracy analysis under controlled and varied temperatures of PZT as a case study. The influences of temperature on BVD parameters including  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $C_0$  and  $L_1$  were also assessed in this study.

**Keywords :** PZT, BVD, impedance, resonance frequency, anti resonance frequency,

<sup>1)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

<sup>2)</sup> นักศึกษาทดลองเรียน ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

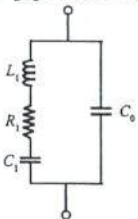
<sup>3)</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520  
(Tel: +66-2739-2407; Fax: +66-2739-2406; E-mail: kswitsar@kmitl.ac.th)

## บทนำ

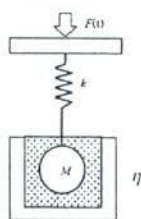
การเตรียมชิ้นงานของสาร PZT โดยการนำสารประกอบที่มีลักษณะเป็นผง 3 ชนิดคือ เลดออกไซด์ (PbO), เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ตามขั้นตอนของการสังเคราะห์สารเซรามิก โดยซึ่งสารประกอบให้มีอัตราส่วนของ PbO : ZrO<sub>2</sub> : TiO<sub>2</sub> เท่ากับ 100 : 52 : 48 โดยโมลจะได้สาร PZT ในรูปแผ่นวงกลม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 cm หนา 0.3 cm และที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้านเคลือบด้วยโลหะเงิน โดยเตรียมตัวอย่างสาร PZT จำนวนทั้งหมด 5 ชิ้น ดังชื่อเป็น N01, N02, N03, N04 และ O01 แต่ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบเพียง 2 ตัวอย่าง ระหว่าง N01 กับ N04 จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสาร PZT ประกอบด้วย ค่าความหนาแน่น, ค่าคงที่ของ PZT, ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 kHz, ค่า electromechanical coupling coefficient (k<sub>t</sub>) และค่า mechanical quality factor (Q<sub>m</sub>)

## ทฤษฎีและหลักการ

การออกแบบวงจร BVD เพื่อกระตุ้นสาร PZT ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ วงจรสมมูลจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน (R<sub>1</sub>) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C<sub>1</sub>) และลวดความนำ (L<sub>1</sub>) ขนานกับตัวเก็บประจุ (C<sub>0</sub>) โดยเทียบได้กับคุณสมบัติทางกลคือลวดความนำเทียบได้กับมวลของลูกตุ้ม ตัวเก็บประจุเทียบได้กับสปริง (k) และแรงเสียดทาน (h) เทียบได้กับตัวต้านทาน โดยพารามิเตอร์ของวงจร BVD มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ [2] ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) วงจรสมมูล BVD



(ข) ลักษณะทางกล

รูปที่ 1 วงจรเปรียบเทียบคุณสมบัติของสาร PZT

จากวงจร BVD ในรูปที่ 1 (ก) สามารถเขียนสมการพื้นฐานของค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ได้ดังสมการที่ (1)

$$Z = \frac{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)}{1 + j\omega\omega_0\left[R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\right]} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาการคำนวณโดยวิธีอิมพีแดนซ์จากอัตราส่วนของตัวเก็บประจุ (r) ดังสมการที่ (2)

$$r = \frac{C_1}{C_0} = \frac{\omega_a^2 - \omega_r^2}{\omega_r^2} \quad (2)$$

เมื่อ  $\omega_a$  คือความเร็วเชิงมุมที่ความถี่แอนติเรโซแนนซ์,

$$\omega_a = 2\pi f_a$$

$\omega_r$  คือความเร็วเชิงมุมที่ความถี่เรโซแนนซ์,

$$\omega_r = 2\pi f_r$$

จากวงจร BVD เมื่อเปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (C<sub>1</sub>) และตัวเหนี่ยวนำ (L<sub>1</sub>) ในวงจร BVD ในช่วงความถี่ต่างๆ พบว่าค่ารีแอคแตนซ์ของสาร PZT มีสภาพเป็นตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (3)

$$\frac{j}{\omega C_1} \gg j\omega L_1 \quad (3)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (3) เมื่อนำไปพิจารณาพร้อมกับสมการที่ (1) จะพบว่า

$$\left(R_1 + j\omega\omega_0 - \frac{j}{\omega C_1}\right) = \left(R - \frac{j}{\omega C_1}\right)$$

และสามารถเขียนสมการค่าอิมพีแดนซ์ของ PZT ได้ใหม่ดังสมการที่ (4)

$$Z = \frac{R_1 - \frac{j}{\omega C_1}}{\left[\frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2}\right] + jR\omega R_0} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) สามารถคำนวณหาค่า  $C_1$  ได้ โดยเลือกค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ ณ ความถี่ต่ำๆ โดยมีความเร็วเชิงมุมที่ความถี่ดังกล่าวเท่ากับ  $\omega$  และที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่า  $|Z|$  และค่า  $R$  มีค่าเท่ากับ  $|Z|$  ดังนั้นจึงสามารถหาค่า  $C_1$  ได้จากสมการที่ (5)

$$C_1 = \frac{1}{\omega \sqrt{\left[ \frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \right]^2 |Z|^2 - R^2}} \quad (5)$$

### การทดสอบสาร PZT

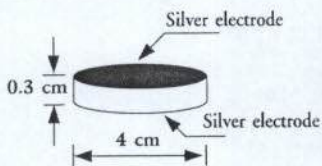
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่ได้สังเคราะห์ขึ้นจะพิจารณาถึงความหนาแน่นค่าคงที่ของ PZT ( $d_{33}$ ) ค่า  $k_t$  และค่า  $Q_m$  จากค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz ดังแสดงในตารางที่ 1

#### อุณหภูมิห้อง

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ดังโครงสร้างในรูปที่ 2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT โดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิควบคุมที่ความถี่ต่างๆ กราฟใน

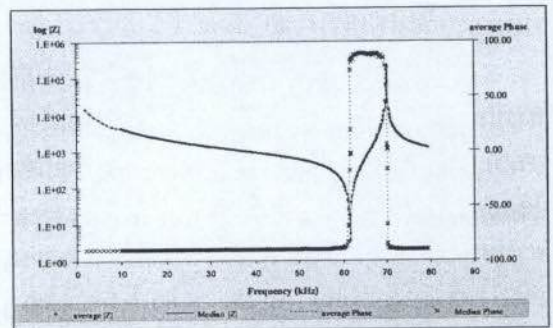
ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของสาร PZT ชิ้นงานที่ N01 และ N04

| PZT | Density | $d_{33}$ ( $10^{-12}$ C/N) | $C_1$ (nF) | $K$ (F/m) | $k_t$ | $Q_m$ |
|-----|---------|----------------------------|------------|-----------|-------|-------|
| N01 | 7.38    | 275                        | 4.7888     | 1040      |       | 0.48  |
| N04 | 7.40    | 271                        | 3.6474     | 1016      |       | 0.51  |

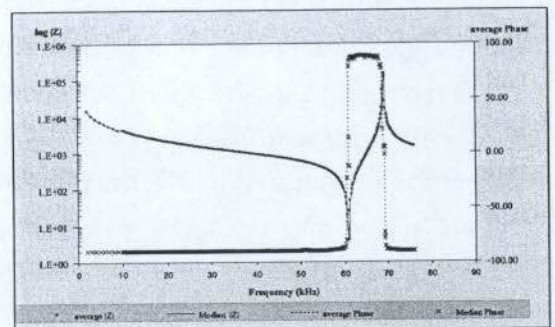


รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้าง PZT ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิม

รูปที่ 3 และ 4 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ PZT ของชิ้นงานที่ N01 และ N04 จากการวัดด้วยเครื่อง HP4192 ณ อุณหภูมิห้องที่ความถี่ 1 kHz - 80 kHz เป็นจำนวน 5 ครั้งของการซ้ำค่าเดิม



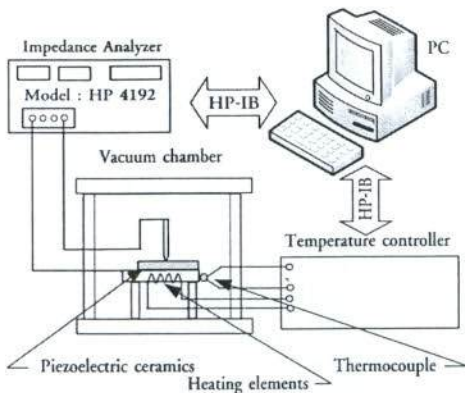
รูปที่ 3 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz - 80 kHz ของชิ้นงาน N01



รูปที่ 4 ค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz - 80 kHz ของชิ้นงาน N04

#### อุณหภูมิควบคุม

การวัดอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ณ อุณหภูมิควบคุม สาร PZT จะถูกนำไปวางไว้บนแผ่นให้ความร้อนซึ่งอยู่ภายในตู้ที่มีสภาพเป็นสุญญากาศ การควบคุมอุณหภูมิทำโดยโปรแกรมที่เขียนบน HP Vee ผ่านทางพอร์ต HP-IB ดังรูปที่ 5 การวัดค่าอิมพีแดนซ์จะทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25°C จนถึง 230°C ที่ละ 20°C และบันทึกค่าอิมพีแดนซ์ ที่มีค่าตั้งแต่ 2 KHz-8 KHz ทั้งหมด 3 ครั้ง และนำค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ไปใช้คำนวณหาความไม่แน่นอนของเครื่องวัดและสาร PZT



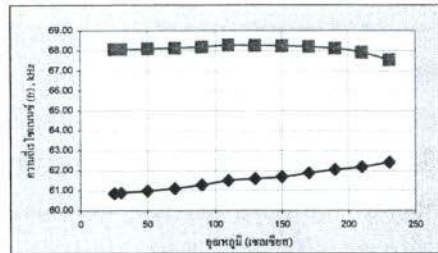
รูปที่ 5 ระบบการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิ

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์สาร PZT

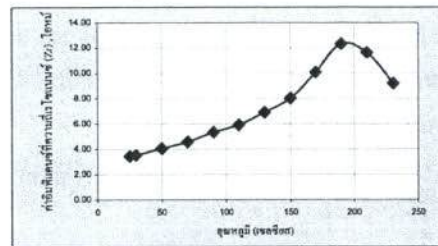
ผลจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน N01 ภายใต้สภาวะของอุณหภูมิที่กำหนด มีความใกล้เคียงกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้อง แต่มีการเลื่อนตำแหน่งของจุดความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์ โดยที่อุณหภูมิ 230 °C ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ประมาณ 1.6 kHz และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์มีค่าลดลง ประมาณ 1 kHz นั่นคือความแตกต่างระหว่างความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์มีค่าลดลงประมาณ 2.6 kHz ดังแสดงในรูปที่ 6 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่ามากขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 190 °C ค่าอิมพีแดนซ์เริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7

### ผลการวิเคราะห์ความผันแปรของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วง 100 Hz - 10 kHz

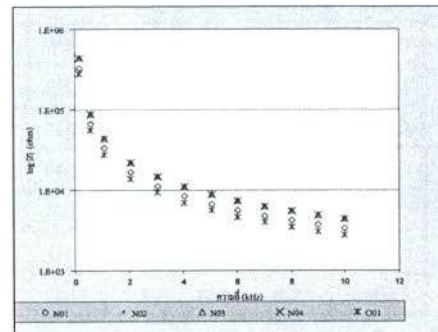
การทดสอบชิ้นงาน N01 และ N04 ในช่วงความถี่ 100Hz - 10 kHz เพื่อคำนวณหา BVD ตามวิธีอิมพีแดนซ์ โดยการวัดซ้ำค่าเดิมจำนวน 30 ครั้ง ดังแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอิมพีแดนซ์ในกราฟรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะสูงในช่วงความถี่ต่ำและจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น



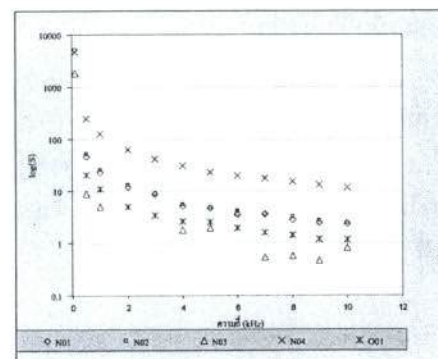
รูปที่ 6 ความถี่เรโซแนนซ์ของสาร PZT ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 7 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสาร PZT ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01



รูปที่ 9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

### ผลการคำนวณหาวงจร BVD โดยวิธีอิมพีแดนซ์

ค่าเฉลี่ยของความถี่เรโซแนนซ์ แอนตี้เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์จากการทดสอบเมื่อนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของวงจร BVD โดยกำหนดความถี่ตั้งแต่ 0.1KHz-10KHz จะได้ค่าพารามิเตอร์ของ BVD ที่มีความแตกต่างกันคือ  $L_1$  ประมาณ 0.16 mH - 0.2 mH,  $C_1$  ประมาณ 0.018 nF - 0.040 nF,  $C_0$  ประมาณ 0.06 nF - 0.18 nF และ  $R_1$  มีค่าเท่ากันเนื่องจากใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ขึ้นงาน N01 และ N04 โดยวิธีอิมพีแดนซ์

| PZT | BVD         | Frequency    |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |          |
|-----|-------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------|
|     |             | 0.1<br>(kHz) | 0.5<br>(kHz) | 1<br>(kHz) | 2<br>(kHz) | 3<br>(kHz) | 4<br>(kHz) | 5<br>(kHz) | 6<br>(kHz) | 7<br>(kHz) | 8<br>(kHz) | 9<br>(kHz) | 10<br>(kHz) | $\sigma$ |
| N01 | $C_0$ (nF)  | 3.870        | 3.850        | 3.850      | 3.840      | 3.840      | 3.850      | 3.860      | 3.870      | 3.880      | 3.890      | 3.910      | 3.930       | 0.090    |
|     | $C_1$ (nF)  | 0.947        | 0.941        | 0.940      | 0.940      | 0.940      | 0.941      | 0.943      | 0.946      | 0.948      | 0.952      | 0.956      | 0.961       | 0.021    |
|     | $L_1$ (mH)  | 7.146        | 7.190        | 7.199      | 7.203      | 7.202      | 7.192      | 7.179      | 7.159      | 7.142      | 7.112      | 7.079      | 7.044       | 0.159    |
|     | $R_1$ (ohm) | 3.331        | 3.331        | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331      | 3.331       | 0.000    |
| N04 | $C_0$ (nF)  | 2.840        | 2.840        | 2.840      | 2.840      | 2.840      | 2.840      | 2.850      | 2.850      | 2.860      | 2.870      | 2.890      | 2.900       | 0.060    |
|     | $C_1$ (nF)  | 0.804        | 0.806        | 0.805      | 0.804      | 0.805      | 0.806      | 0.808      | 0.809      | 0.811      | 0.814      | 0.818      | 0.822       | 0.018    |
|     | $L_1$ (mH)  | 8.449        | 8.429        | 8.439      | 8.441      | 8.439      | 8.429      | 8.403      | 8.396      | 8.373      | 8.337      | 8.298      | 8.258       | 0.191    |
|     | $R_1$ (ohm) | 3.828        | 3.828        | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828      | 3.828       | 0.000    |

เมื่อ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

### ผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เมื่อชิ้นงานถูกนำไปวางในตู้ควบคุมที่อุณหภูมิ 230°C ค่าพารามิเตอร์  $C_1$  จะมีค่าลดลง 72% หรือ 0.726%/°C ทำให้  $L_1$  เพิ่มขึ้นถึง 255% จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อโดยตรงกับคุณสมบัติของสาร PZT ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่เปลี่ยนไปเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น 230°C

| Parameter of BVD | % Difference | % Difference/°C |
|------------------|--------------|-----------------|
| $R_1$            | 167.0        | 0.726           |
| $C_1$            | -72.0        | -0.313          |
| $L_1$            | 255.0        | 1.109           |
| $C_0$            | 18.1         | 0.079           |

### สรุปผล

การสังเคราะห์สาร PZT เพื่อวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์และนำมาประมาณค่าทางสถิติ พบว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์สามารถวัดได้แม่นยำ  $\pm 0.0033$  kHz รอบค่ากลาง โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00129 ทำให้มีความน่าเชื่อถือมากสำหรับการนำไปคำนวณหาวงจร BVD นอกจากนี้การคำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ยังมีความใกล้เคียงกับวิธีของ IEEE 176-1987 และวิธีคำนวณจากเครื่องวัด HP4194 จากการตรวจสอบความถูกต้องของวงจร BVD โดยเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร

BVD ที่จำลองขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ ผลคือค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์และวิธี IEEE 176-1987 มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.37% ซึ่งน้อยกว่าวิธีของ HP4194 ที่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4% ส่วนการทดลองหาผลกระทบทางด้านอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของสาร PZT สรุปได้ว่าถ้าอุณหภูมิชิ้นงานสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความต่างของความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์ลดน้อยลงและมีค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) มากขึ้น ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้มีค่าเปลี่ยนแปลงคือ  $C_1$  มีค่าลดลงแต่  $R_1$ ,  $L_1$  และ  $C_0$  มีค่าเพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chalermchai Jeerapan, Witsarut Sriratana, Prasit Julseerewong, Sart Kumool "Analysis of Appropriate Parameters for Piezoelectric Ceramic Utilization by Using BVD Model", **ICCAS2005, International Conference on Control, Automation and System**, Gyeonggi-Do, Korea, June 2-5, 2005
- [2] S. Sherit, H. D. Wiederick, B. K. Mukherjee "Accurate Equivalent Resonators", pp.931-935, 1997.
- [3] An American National Standard **IEEE Standard on Piezoelectricity 176-1987**
- [4] Bernard Jaffe, William R. Cook, Jr. and Hans Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", pp.31-35, 1971.
- [5] J. G. Smits, "Iterative method for accurate determination of real and imaginary parts of the materials coefficients of piezoelectric ceramics", **IEEE Trans. Sonics Ultrason.**, vol. SU-23, pp. 393-402, 1976.
- [6] Q. C. Xu, A. R. Ramachandran, and R. E. Newnham, "Resonance measuring technique for complex coefficients of piezoelectric composites", **J. Wave-material Interaction**, vol. 2, pp. 105-122, 1987.
- [7] Standard Definitions and Method of Measurement for Piezoelectric vibrators, **IEEE No.177 May 19**

