

การสร้างและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูล BYD ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF BYD MODEL FOR
PIEZOELECTRIC CERAMIC

เฉลิมชัย จีระพันธ์

CHALERMOCHAI JEEAPAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2495-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูล BVD ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

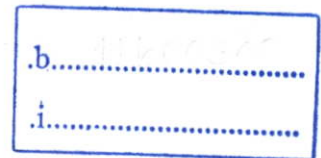
DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF BVD MODEL FOR
PIEZOELECTRIC CERAMIC



เฉลิมชัย จีระพันธุ์

CHALERMCHAI JEERAPAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **61615**
วัน,เดือน,ปี **19 11.ค. 2549**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2495-1

**DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF BVD MODEL FOR
PIEZOELECTRIC CERAMIC**

CHALERMCHAI JEERAPAN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER DEGREE OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2495-1

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูล BVD ของสาร เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
นักศึกษา	นายเฉลิมชัย จีระพันธุ์
รหัสประจำตัว	47060603
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์
อาจารย์ผู้ร่วมควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น เครื่องล้างอุตสาหกรรม โซนิก และเครื่องเชื่อมอุตสาหกรรม การวิเคราะห์สมมูลของสารที่ถูกต้องจะช่วยให้สามารถนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปใช้ได้โดยเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นถึงวิธีการวิเคราะห์สมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบ Butterworth Van Dyke (BVD) โดยเตรียมสารเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร และมีลักษณะการสั่นในโหมดความหนา (thickness mode) ด้วยกระบวนการเซรามิกแบบดั้งเดิม (conventional ceramics processing) เป็นตัวอย่างศึกษา และวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP4192 และ HP4194 โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากเครื่อง HP4194 จะถูกนำมาคำนวณหาค่าวงจร BVD ด้วยโปรแกรมภายในเครื่อง HP4194 และค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 จะใช้สำหรับคำนวณหาวงจร BVD ด้วยวิธีของ IEEE 176-1987 และวิธีอิมพีแดนซ์ที่คิดค้นโดยผู้วิจัย ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ หลังจากนั้นวงจร BVD ที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์จะถูกตรวจสอบความถูกต้อง ด้วยการเปรียบเทียบกับวงจร BVD ที่หาได้จาก 2 วิธีที่เหลือ ซึ่งพบว่ามีค่าแตกต่างจากวิธี IEEE 176-1987 ประมาณ 4% และมีค่าแตกต่างจากวิธีของเครื่อง HP4194 ประมาณ 2.37% นอกจากนี้ยังได้ทดลองนำวิธีอิมพีแดนซ์ไปศึกษาปัจจัยทางด้านแรงกดทับบนชิ้นงานและอุณหภูมิของชิ้นงานที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD โดยพบว่าเมื่อชิ้นงาน PZT มีน้ำหนักกดทับมากขึ้น จะทำให้วงจร BVD ที่คำนวณได้มีค่าของ R_1 , C_1 เพิ่มขึ้น และค่าของ L_1 , C_0 มีค่าลดลง และถ้าอุณหภูมิชิ้นงาน PZT สูงขึ้นจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD มีค่าเพิ่มขึ้นยกเว้นค่า C_1 มีค่าลดลง

Thesis	Development and Analysis of BVD Model for Piezoelectric Ceramics
Student	Mr. Chalermchai Jeerapan
Student ID	47060603
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prasit Junrasarewong
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Witsarut Sriratana

ABSTRACT

At present, piezoelectric ceramics are widely used in several industrial equipment such as ultrasonic cleaner and ultrasonic welder. To obtain the optimal efficiency, their equivalent electrical circuit should be well analyzed. This project has been focused on the method of evaluation of Butterworth Van Dyke model (BVD), which is representative for describing the impedance around resonance. Lead zirconate titanate (PZT) samples in thickness mode of vibration were formed with diameter of 40 mm and thickness of 3 mm. The calculation of the BVD's parameters of the prepared samples can be obtained from impedance data measuring by impedance analyzers model HP4192 and HP4194. For the BVD parameters computation, the following three methods were used : the impedance method, the method described in IEEE 176-1987, and the equivalent circuit evaluation of HP4194 method. The impedance method is BVD parameters calculation based on approximation of reactance at frequency lower than resonance frequency. In order to verify this assumption, the BVD parameters from this method have been compared with other two methods. The BVD parameters obtained from the impedance method differ from those of the IEEE 176-1987 about 4%, while the difference of BVD parameters between the impedance method and the HP4194 method is approximately 2.37%. The results show that the value R_1 and C_1 increase, whereas the value L_1 and C_0 decrease with increasing weight on the top of PZT specimens. Moreover, with increasing PZT's temperature, all values increase except C_1 .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ ที่ให้คำชี้แนะและช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ที่มีคุณค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร และ ผศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์ กรรมการสอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต ผู้อำนวยการฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ ที่ให้โอกาสให้ข้าพเจ้าลาศึกษาต่อ ดร.สุเมธ ภูอภิรดี, น้องสุปราณี เหล่าอุบล และเพื่อนๆ พนักงานในฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ ที่ช่วยสนับสนุนการเขียนวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นเสมือนกำลังใจที่ติดตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นายเฉลิมชัย จีระพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สัญลักษณ์.....	VIII
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 สรุปเนื้อหาของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและการวิเคราะห์สมบัติ.....	4
2.1 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	4
2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect).....	4
2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect).....	5
2.2 โหมดการทำงานของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	6
2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) ..	8
2.3.1 การบดผสม (Mixing).....	9
2.3.2 การอบแห้ง (Dry).....	10
2.3.3 การเผาแคลไซน์ (Calcination).....	10
2.3.4 การบดลดขนาด (Grinding).....	11
2.3.5 การอบแห้ง (Dry).....	11
2.3.6 การอัดขึ้นรูป (Shaping).....	11
2.3.7 การเผาซินเทอริง (Sintering).....	11
2.3.8 การตกแต่งชิ้นงาน (Finishing).....	12
2.3.9 การทำขั้วโลหะ (Electrode).....	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.10 การทำขั้วไฟฟ้า (Poling).....	13
2.3.11 ทดสอบสมบัติของสาร PZT.....	14
2.3.11.1 การทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพ.....	14
2.3.11.2 การทดสอบสมบัติทางด้านไฟฟ้า.....	14
2.3.11.2.1 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	15
2.3.11.2.2 การวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (d_{33}).....	15
2.3.11.2.3 การวัดค่า electromechanical coupling coefficient (k_t).....	16
2.3.11.2.4 การวัดค่า mechanical quality factor (Q_m).....	16
บทที่ 3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและการหาค่าพารามิเตอร์	
ของวงจร BVD.....	17
3.1 ค่าอิมพีแดนซ์ (Z).....	17
3.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์.....	19
3.3 การประมาณค่าทางสถิติ.....	21
3.3.1 การหาค่ากลางของค่าอิมพีแดนซ์.....	21
3.3.1.1 ค่าเฉลี่ย (mean).....	21
3.3.1.2 ค่ามัธยฐาน (median).....	21
3.3.1.3 ค่าฐานนิยม (mode).....	21
3.3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย.....	22
3.3.2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation).....	22
3.3.2.2 ค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด (equipment variation :EV).....	23
3.4 วงจรไฟฟ้าสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริกแบบ Butterworth Van Dyke.....	24
3.5 วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD.....	27
3.5.1 วิธี IEEE 176-1987 [2].....	27
3.5.1.1 วิธีที่ 1.....	29
3.5.1.2 วิธีที่ 2.....	29
3.5.1.3 วิธีที่ 3.....	29
3.5.2 วิธีการคำนวณ โดยวิธีอิมพีแดนซ์.....	30

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.3 วิธีการคำนวณด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ HP4194.....	31
บทที่ 4 การทดลอง.....	32
4.1 การเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	32
4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT.....	32
4.2.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ที่อุณหภูมิห้อง.....	32
4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	34
4.2.3 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ที่มีการกดทับด้วยน้ำหนักมาตรฐาน.....	36
4.2.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ทราบค่า.....	37
4.3 การวิเคราะห์ค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด.....	37
4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD.....	37
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	38
5.1 การสังเคราะห์สาร PZT.....	38
5.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์.....	39
5.2.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้อง.....	39
5.2.2 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	42
5.2.3 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่มีการกดทับด้วยน้ำหนักมาตรฐาน.....	44
5.2.4 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ทราบค่า.....	45
5.3 การวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง.....	51
5.3.1 ผลการวิเคราะห์ความผันแปรของเครื่องมือและวิธีวัด (EV).....	51
5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความผันแปรของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วง 100 Hz - 10 kHz.....	55
5.4 ผลการคำนวณทางจร BVD.....	59
5.4.1 การคำนวณทางจร BVD โดยวิธีของ IEEE.....	59
5.4.2 การคำนวณทางจร BVD โดยวิธีอิมพีแดนซ์.....	60
5.4.3 การหาจจร BVD ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP 4194.....	62

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4.4 การเปรียบเทียบวงจร BVD ที่ทำได้จากวิธีอิมพีแดนซ์กับวิธีของ IEEE และการหาด้วยเครื่อง HP 4194.....	63
5.4.4.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่ทำได้ในแต่ละวิธี.....	63
5.4.4.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างเส้นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่ทำได้ เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้	68
5.5 การศึกษาผลกระทบของสภาวะที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงและน้ำหนักกดทับที่มีผลต่อ ค่าพารามิเตอร์วงจร BVD.....	74
5.5.1 ผลกระทบที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทางด้านอุณหภูมิ ชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น.....	74
5.5.2 ผลกระทบที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทางด้านน้ำหนักกดทับชิ้นงาน...	74
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก.....	79
บทความวิจัยที่เคยตีพิมพ์เผยแพร่.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	85

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Z	= ค่าอิมพีแดนซ์	โอห์ม
Z_r	= ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์	โอห์ม
$ Z $	= ขนาดของอิมพีแดนซ์	
θ	= มุมเฟสของค่าอิมพีแดนซ์	องศา
Y	= ค่าแอดมิแตนซ์	ซีเมนส์
ϕ	= มุมเฟสของค่าแอดมิแตนซ์	องศา
ω	= ความถี่เชิงมุม ($2\pi f$)	เฮิร์ต
d_{33}, d	= ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant)	คูลอม/นิวตัน
f_s	= ความถี่ที่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่าคอนดักแตนซ์ (conductance, G) สูงสุด	เฮิร์ต
f_p	= ความถี่ที่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่ารีซิสแตนซ์ (resistance, R) สูงสุด	เฮิร์ต
Δf	= $f_p - f_s$	
f_r	= ความถี่เรโซแนนซ์ หรือความถี่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่าซัสเปกแตนซ์- (susceptance) เป็นศูนย์	เฮิร์ต
f_a	= ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ หรือความถี่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) เป็นศูนย์	เฮิร์ต
F_m	= ความถี่ที่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด	เฮิร์ต
F_n	= ความถี่ที่สารเพียโซอิเล็กทริกมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด	เฮิร์ต
K_{eff}	= ค่า coupling factor	
K_t	= ค่า electro mechanical coupling coefficient	
M	= ค่า figure of merit	
R_1	= ค่าความต้านทานในวงจรสมมูล BVD	โอห์ม
C_1	= ค่าความจุไฟฟ้าในวงจรสมมูล BVD	ฟาร์ด
C_0	= ค่าความจุไฟฟ้าในวงจรสมมูล BVD	ฟาร์ด
L_1	= ค่าความนำไฟฟ้าในวงจรสมมูล BVD	เฮนรี่
r	= ค่าอัตราส่วนของตัวเก็บประจุ (capacitance ratio)	
X	= ค่ารีแอกแตนซ์ (reactance) ในวงจรสมมูล BVD	โอห์ม
G	= ค่าคอนดักแตนซ์ (conductance) ในวงจรสมมูล BVD	ซีเมนส์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	= ค่าซัสเปกแตนซ์ (susceptance) ในวงจรสมมูล BVD	ซีเมนส์
D	= dissipation factor	
dT	= ค่าความเครียด (stress)	นิวตัน/ตรม.
S	= ค่าความเค้น (strain)	เมตร/เมตร
A	= พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า	ตารางเมตร
E	= ความเข้มสนามไฟฟ้า	โวลต์/ตรม.
\mathcal{E}^J	= อัตราความจุกระแสไฟฟ้า (permittivity) ในสภาวะแรงกด	ฟารัด/เมตร
\mathcal{E}_0	= อัตราความจุกระแสไฟฟ้าของสุญญากาศ (vacuum permittivity)	ฟารัด/เมตร
K	= ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)	
s^E	= สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (elastic coefficient) ในสภาวะไม่มีสนามไฟฟ้า	นิวตัน/ตรม.
ρ	= ความหนาแน่นของเนื้อสาร	กก./คิวบิกเมตร
m	= น้ำหนักของชิ้นงาน	กิโลกรัม
V	= ปริมาตร	คิวบิกเมตร
T_c	= อุณหภูมิคูรี (curie temperature)	องศาเซลเซียส
Q_m	= ค่า mechanical quality factor	
ϵ_s	= ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณทดสอบ	โวลต์
ϵ_r	= ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณคกร่วมส่วน modulator	โวลต์
\bar{X}	= ค่าเฉลี่ย	
σ	= ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
σ_{EV}	= ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า EV	
EV	= ค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด	
d_2	= แฟกเตอร์ปรับค่าในการประมาณค่า σ	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1* แพกเกจปรับค่าแบบไม่เอนเอียงในการประมาณค่า σ	24
5.1 แสดงสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านไฟฟ้าของสาร PZT ทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	38
5.2 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์(Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์(f_r) และความถี่แอนตี้-เรโซแนนซ์ของชิ้นงานภายใต้สภาวะมีแรงกดทับ	44
5.3 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์(Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์(f_r) และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะไม่มีแรงกดทับ	45
5.4 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ $f_s / (2(f_{s,CL} - f_s))$ ต่อค่าของตัวเก็บประจุที่มาต่ออนุกรม กับชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01.....	46
5.5 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง... 52	
5.6 แสดงค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง	53
5.7 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง.....	54
5.8 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยของค่า f_r, f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01.....	55
5.9 แสดงค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด (EV) เมื่อพิจารณาจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r), ค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r)	55
5.10 ค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01.....	56
5.11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01.....	56
5.12 ค่า effective coupling factor (k_{eff}) และ ค่า figure of merit (M) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01.....	59
5.13 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอด BVD ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 โดยวิธี IEEE.....	59
5.14 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอด BVD ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 โดยวิธีอิมพีแดนซ์	61
5.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอด BVD ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่หาจากเครื่อง HP4194.....	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.16 แสดงค่าเฉลี่ยของความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทั้ง 5 ชิ้นงาน ที่หาได้จากวิธีอิมพีแดนซ์, วิธีของ IEEE และวิธีของเครื่อง HP4194.....	64
5.17 แสดงค่าความแตกต่างเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทั้ง 5 ชิ้นงาน ที่หาได้ จากวิธีอิมพีแดนซ์, วิธีของ IEEE และการหาด้วยเครื่อง HP4194.	67
5.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่เปลี่ยนไปเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิ- สูงขึ้น 230°C และอัตราเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ต่อองศาเซลเซียส	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [4].....	6
2.2 แสดงโหมคการสั้นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกอ้างอิงตามตารางที่ 2.1[1]	7
2.3 กระบวนการสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	9
2.4 แสดงขั้นตอนการบดผสมสารตั้งต้น	10
2.5 แสดงการนำสารตั้งต้นเข้าเตาไฟฟ้าเพื่อเผาแคลไซน์	10
2.6 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press).....	11
2.7 แสดงกราฟการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาซินเตอร์ริง	12
2.8 แสดงการขัดตกแต่งชิ้นงาน PZT.....	12
2.9 แสดงการทำขั้วไฟฟ้าด้วยการทาด้วย silver paste	13
2.10 แสดงขั้นตอนการทำโพลาริเซชัน	13
2.11 แสดงการเหนี่ยวนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	14
3.1 แสดงกราฟของค่ารีแอกแตนซ์ของอนุกรมของอุปกรณ์พื้นฐานที่ความถี่ต่าง ๆ	19
3.2 วงจร auto-balance bridge	20
3.3 แสดงกราฟของการแจกแจงแบบปกติ	22
3.4 แสดงความผันแปรของค่าเนื่องจากเครื่องมือวัด	23
3.5 แสดงวงจรเปรียบเทียบสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	25
3.6 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของ ตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากันที่ความถี่ต่ำ.....	26
3.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานของค่าอิมพีแดนซ์ [10]	26
3.8 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ (Z), รีซิสแตนซ์ (Re), รีแอกแตนซ์ (Xe) และรีแอกแตนซ์ของกิ่ง ของวงจร $R_1-C_1-L_1$ (X1) ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [10]	28
4.1 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192	33
4.2 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารPZT ณ ความถี่ต่าง ๆ.....	33
4.3 แสดงเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP4192	34
4.4 แสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยโปรแกรมที่ได้ออกแบบ	34
4.5 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ภายในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ.....	35
4.6 แสดงการต่อของเครื่อง HP4192 กับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงตำแหน่งชิ้นงานภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	35
4.8 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ภายใต้แรงกดทับ	36
4.9 แท่นนำหน้าหนักทองเหลืองมาตรฐาน 0.5 และ 1 ปอนด์	36
5.1 แสดงรูปชิ้นงาน PZT ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิม.....	38
5.2 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ $ Z $ และเฟส(θ) ของชิ้นงาน O01 ที่ความถี่ 100 Hz-13MHz	39
5.3 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz - 80 kHz ของชิ้นงาน N01.....	40
5.4 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน N02.....	40
5.5 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน N03.....	41
5.6 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน N04.....	41
5.7 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน O01.....	42
5.8 แสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	43
5.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ถี่เรโซแนนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	43
5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปจากสถานะ ไม่มีแรงกดทับ	45
5.11 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	46
5.12 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL}-f_s))$ ของชิ้นงาน N01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ	47
5.13 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N02 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	47
5.14 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL}-f_s))$ ของชิ้นงาน N02 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ	48
5.15 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N03 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	48
5.16 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL}-f_s))$ ของชิ้นงาน N03 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ	49
5.17 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N04 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	49
5.18 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL}-f_s))$ ของชิ้นงาน N04 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ	50
5.19 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน O01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	50
5.20 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL}-f_s))$ ของชิ้นงาน) O01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ.....	51
5.21 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01	57
5.22 แสดงกราฟของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกคือ สารเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ซึ่งสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Pierre Curie และ Jacques Curie [4] เมื่อปี ค.ศ. 1880 ในการทดลองทางฟิสิกส์ของผลึกบางชนิดเช่น แร่ควอทซ์, rochelle salt, ซิงก์เบรน (zincblende) และทัวร์มาลีน (tourmaline) ฯลฯ แต่เนื่องจากผลึกแบบเดี่ยว (single crystal) ยังมีความเสถียรต่ำต่ออุณหภูมิ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1940 จึงได้มีการพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) ขึ้น ซึ่งมีข้อดีกว่าสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดผลึกเดี่ยว คือ

- ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน electromechanical สูง
- สามารถตกแต่งรูปทรงได้คืดตามต้องการ โดย (machinability)
- สามารถปรับคุณสมบัติด้วยการปรับปรุงส่วนประกอบของเนื้อสาร (high degree of freedom in characteristics design)
- มีเสถียรภาพสูง
- สามารถนำไปผลิตเป็นอุตสาหกรรมจำนวนมาก ๆ ได้

ทำให้มีการพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอัลตราโซนิคส์ ทรานสดิวเซอร์ (ultrasonic transducer) อย่างมากมาย เช่นเซนเซอร์ตรวจหาปลา (fish finders), เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์, เครื่องเชื่อมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์ ฯลฯ

สำหรับการพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปประยุกต์ใช้งาน การวิเคราะห์สมบัติทางด้านไฟฟ้าของสารนับเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกถูกนำไปใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และวิธีการอธิบายสมบัติทางไฟฟ้าของสารที่นิยม ก็คือการใช้วงจรไฟฟ้าสมมูลแบบ Butterworth Van dyke หรือ BVD ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ [5] โดยวงจร BVD สามารถคำนวณหาได้จากข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) นั้นเอง

เพื่อให้นักวิจัยและพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้เข้าใจถึงพื้นฐานของสมบัติทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกก่อนนำไปประยุกต์ใช้งาน งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาวงจร BVD ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead-Zirconate-Titanate)

หรือ PZT ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิม (conventional ceramic process) ลักษณะเป็นแผ่นกลม ผิวหน้าด้านบนและด้านล่างของสารถูกเคลือบด้วยโลหะเงิน มีรูปแบบการสั่นแบบ thickness mode หรือรูปแบบการสั่นในทิศทางขนานกับความหนาของสาร PZT เมื่อสารถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีการหาวงจร BVD จะคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดด้วยเครื่อง impedance analyzer รุ่น HP4192 และการประมาณค่าทางสถิติ นอกจากนั้นยังศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและแรงกดทับที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT และค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติทางด้านไฟฟ้าของสาร PZT ด้วยวงจร BVD
- การประเมินความถูกต้องทางสถิติของค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดจากเครื่อง HP4192 และค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD
- ผลกระทบของอุณหภูมิและแรงกดทับที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT และวงจร BVD

1.3 ขั้นตอนการวิจัย

1. ผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานेट หรือ PZT ด้วยกระบวนการสังเคราะห์เซรามิกแบบดั้งเดิม (conventional ceramic process)
2. การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4192 และเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม HP VEE ของบริษัท Hewlett-Packard ในสภาวะปกติ และภายใต้แรงกด และอุณหภูมิต่าง ๆ
3. การประมาณค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ด้วยวิธีทางสถิติ และนำค่าอิมพีแดนซ์ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD สภาวะปกติ, สภาวะมีแรงกดทับ และสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิต่าง ๆ
4. ประเมินความถูกต้องค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่หาได้จากวิธีอิมพีแดนซ์ โดยเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD กับค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่หาโดยวิธี IEEE 176-1987 และวงจรมูลที่ได้จากเครื่อง HP4194

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการหาวงจรไฟฟ้าสมมูลที่มีสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ในช่วงความถี่เรโซแนนซ์มูลฐาน (fundamental resonance frequency)
2. ทราบถึงผลกระทบของแรงกดทับบนสาร PZT และอุณหภูมิของสาร PZT ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า

1.5 สรุปเนื้อหางานวิจัย

บทแรกกล่าวถึงที่มาของงานวิจัยและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ส่วนบทที่ 2 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก, ขั้นตอนการสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานเนต หรือเรียกย่อ ๆ ว่าสาร PZT และการวัดสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเพียโซอิเล็กทริกของสาร PZT บทที่ 3 จะเป็นส่วนของพื้นฐานของค่าอิมพีแดนซ์, การวัดค่าอิมพีแดนซ์ ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์, พื้นฐานสถิติที่นำมาใช้ประมาณค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้, วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ด้วยวิธีของมาตรฐาน IEEE และวิธีอิมพีแดนซ์ ส่วนเนื้อหาในบทที่ 4 เป็นการออกแบบการทดลองสังเคราะห์สาร PZT การทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านไฟฟ้าของสาร PZT การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD และบทที่ 5 เป็นผลการทดลองของการสังเคราะห์ชิ้นงาน PZT, ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของสาร PZT ในสภาวะต่าง ๆ, ค่าพารามิเตอร์ของวงจรไฟฟ้า BVD ที่คำนวณได้, การประเมินความถูกต้องของวงจรไฟฟ้าสมมูลแบบ BVD ข้อสรุปและวิจารณ์ผล

บทที่ 2

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและการวิเคราะห์สมบัติ

ในบทนี้เป็นพื้นฐานเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและการนำไปประยุกต์ใช้งาน ขั้นตอนการสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก โดยยกตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์สาร PZT ซึ่งเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีค่าทางด้าน electromechanical สูง และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านคลื่นอุลตราโซนิคส์ และวิธีการทดสอบสมบัติของสาร PZT ก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าในบทต่อไป

2.1 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเปอร์รอฟสไกต์ (perovskite structure) จัดเรียงตัวกันเป็นผลึกแบบ polycrystalline ซึ่งต่างจากผลึกควอทซ์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) ตัวอย่างของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้แก่ แบเรียมไททานेट (Barium Titanate), สารเลดไททานेट (Lead Titanate) และเลดเซอร์โคเนตไททานेट เป็นต้น สมบัติเพียโซอิเล็กทริกซิติ (piezoelectricity) ของสาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect) [6]

2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect)

คือสมบัติของสารที่สามารถสร้างประจุไฟฟ้าออกมาที่ผิวหน้า เมื่อมีแรงกด (stress) มากระทำต่อสาร ดังรูปที่ 2.1 (a) โดยสัญลักษณ์ P แทนเวกเตอร์ของความเป็นขั้วไฟฟ้าในเนื้อสาร (polarization) T คือแรงที่มากกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดหรือแรงเครียด (strain) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร และ D คือประจุที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสาร (dielectric displacement)จะได้ว่า

$$D = Q/A = dT \quad (2.1)$$

โดยที่

d คือค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant) ของสารมีหน่วยเป็นคูลอมต่อนิวตัน (coulombs/newton)

Q คือ ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอม

A คือพื้นที่หน้าตัดของเนื้อสารมีหน่วยเป็นเมตร

2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (reverse effect)

เป็นสมบัติของสารที่สามารถยืดหรือหดตัวได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 (b) ถ้าให้ S คือความเค้น ที่เกิดภายในเนื้อสารและ E คือแรงดันไฟฟ้าที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัด สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$S = dE \quad (2.2)$$

โดยสัญลักษณ์ d สามารถใช้แทนค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบทางตรงและทางอ้อมได้ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปพลังงาน จากสมการ 2.1 และ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงสมบัติของค่าความยืดหยุ่น (elastic) และค่าไดอิเล็กทริกของเนื้อสาร สามารถเขียนเป็นสมการเพียโซอิเล็กทริกคือ

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.3)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.4)$$

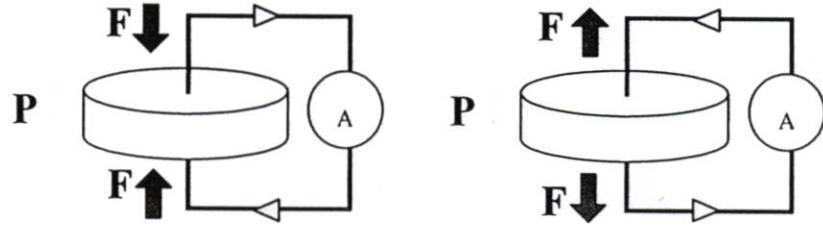
โดยที่

D คือค่า electric flux density หรือ electric displacement

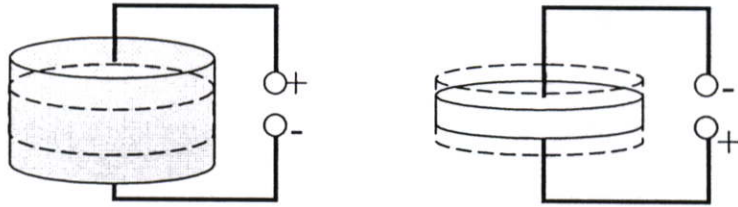
S คือค่าความเค้น ($S = \Delta L/L$)

ϵ^T คืออัตราความจุกระแสไฟฟ้า (relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร (free dielectric constant) (ซึ่งบางตำราใช้ K เป็นสัญลักษณ์) และสัญลักษณ์ด้วย T แทนสภาวะที่ไม่มีแรงกด

s^E คือสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสาร (elastic coefficient) และสัญลักษณ์ด้วย E แทนสภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้า



a) direct piezoelectric effect

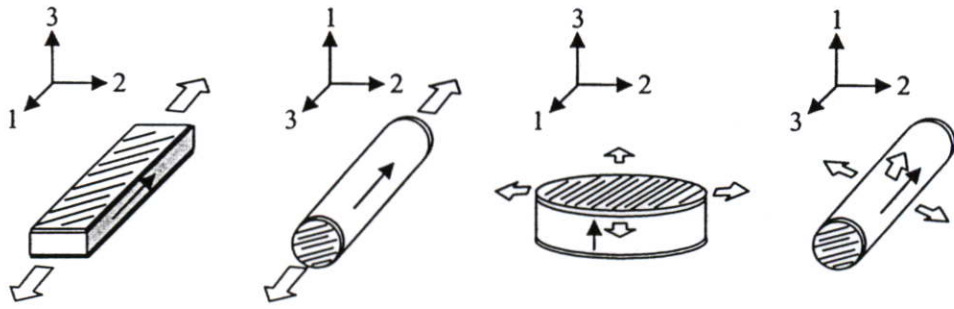


b) reverse piezoelectric effect

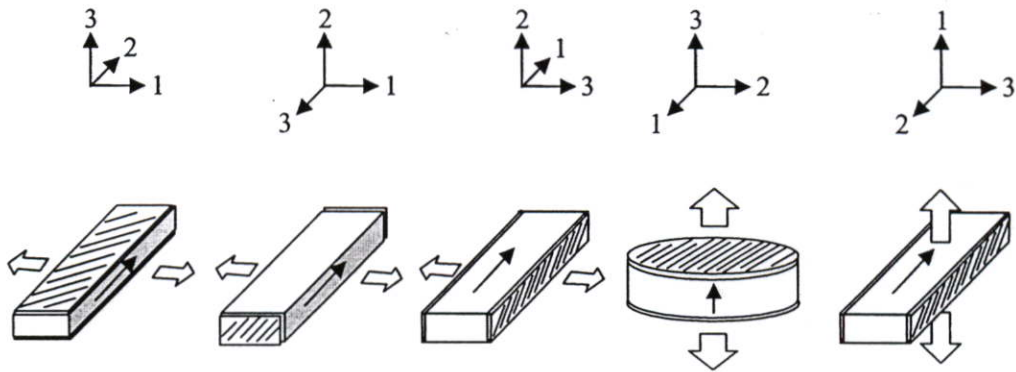
รูปที่ 2.1 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [7]

2.2 โหมดการทำงานของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ในทิศทางการสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีหลายรูปแบบขึ้นกับรูปทรงและชนิดของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 2.2

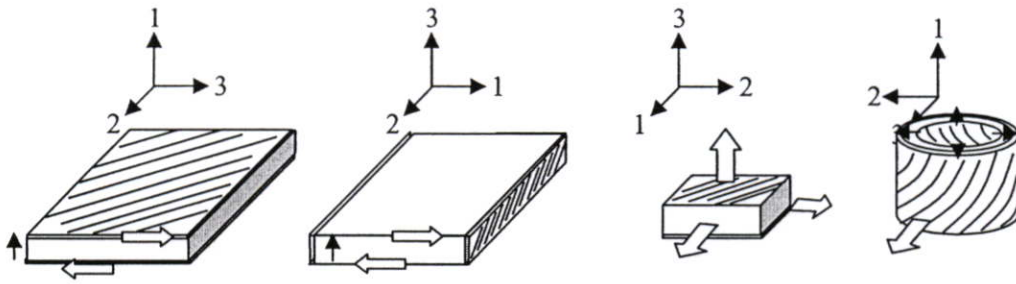


(a) Length-extensional (T) (b) Length-extensional (L) (c) Radial(Extensional) (d) Radial-dilatational



(e-g) Width-extensional-1,2,3

(h-i) Thickness-extension-1,2



(j-k) Thickness shear-1,2

(l) Hydrostatic

(m) Tube

↑ = ทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาด

↑ = ทิศทางของโพราไรเซชัน

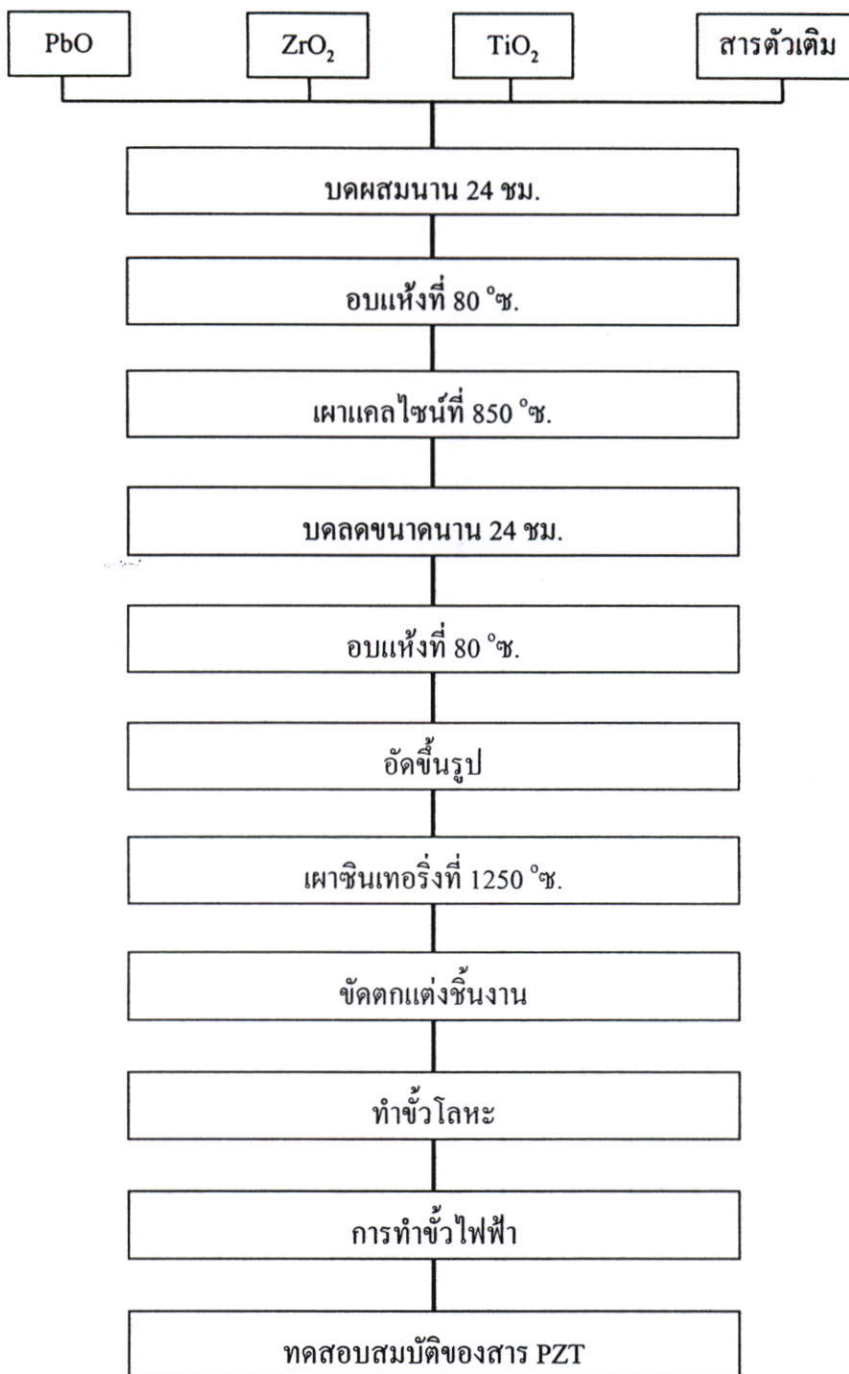
รูปที่ 2.2 แสดงโหมดการสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกอ้างอิงตามตารางที่ 2.1[1]

ตัวอย่างการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไปใช้งานทางด้านคลื่นอุลตราโซนิคส์แบบทางตรง ได้แก่ เครื่องจุดเตาแก๊ส, ตัวเซนเซอร์วัดแรงดัน แบบทางอ้อม ได้แก่ เครื่องเชื่อมพลาสติกอุลตราโซนิคส์, เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคส์ นอกจากนั้นสารเพียโซอิเล็กทริก ยังสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์รับและส่งคลื่นอุลตราโซนิคส์ในตัวเดียวกันได้เช่น อุปกรณ์ตรวจหาปลาและโซนาร์ทรานสดิวเซอร์ ซึ่งสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในแต่ละตัวอย่างข้างต้นจะมีรูปทรง, ชนิด และรูปแบบหรือโหมดการสั่นแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ใน

เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอุลตราโซนิคส์ จะเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ทำจากสาร เลดเซอร์โคเนตไททานเนต มีรูปแบบแบบของการสั่นที่มีทิศทางแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของสารหรือ มีทิศการสั่นขนานกับความหนา เรียกว่า thickness mode ดังรูป 2.2 (h) มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม และที่มีอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนาเท่ากับ 10 หรือมากกว่า โดยการ สั่งเคราะห์สาร PZT ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ในเครื่องทำความสะอาดนี้ จะแสดงในหัวข้อ ถัดไป

2.3 ขั้นตอนการสั่งเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT)

ขั้นตอนการสั่งเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีการสั่งเคราะห์ เซรามิกแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 2.3 เป็นอีกวิธีที่สามารถผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้ โดยใช้ เครื่องมือที่ทำได้ง่าย และไม่ยุ่งยาก ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [1]

2.3.1 การบดผสม (Mixing)

เป็นขั้นตอนผสมสารตั้งต้นแต่ละชนิดรวมตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดเล็เท่ากัน ด้วยการเทสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปผงได้แก่ PbO, ZrO₂, TiO₂ เป็นต้นรวมกับลูกบดเซอร์โคเนีย และสารอะซิโตน ในขวดพลาสติกแล้วนำไปวางบนเพลาลูกกลิ้งของเครื่องโรเลอร์ (roller) ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้น้ำหนักของสารตั้งต้นมีอัตราส่วนโดย

โมลของ $PbO : ZrO_2 : TiO_2$ เท่ากับ 100 : 52 : 48 และเมื่อต้องการพัฒนาคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า และทางด้านกายภาพของสารให้ตรงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานอาจเติมสารตัวเติมเช่น Fe_2O_3 , Sr_2O_3 โดยปรับอัตราส่วนข้างต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเติม



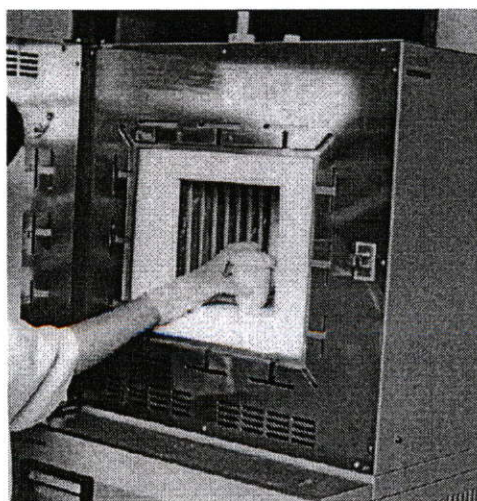
รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการบดผสมสารตั้งต้น

2.3.2 การอบแห้ง (Dry)

เนื่องจากการบดผสมแบบเปียกหรือใช้น้ำอะซิโตน ดังนั้นการการนำไปเผาต้องทำให้ของผสมแห้งเสียก่อน โดยนำของผสมที่ได้มาอบด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$. นานประมาณ 2 ชั่วโมง

2.3.3 การเผาแคลไซน์ (Calcination)

เป็นขั้นตอนเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของผสมที่อยู่ในรูปออกไซด์ให้เกิดปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบเลคโซโคเนตไททานเนต หรือเรียกย่อ ๆ ว่า PZT ด้วยการนำของผสมไปใส่ในถ้วยอะลูมินาแล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ $850^{\circ}C$. นาน 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการนำสารตั้งต้นเข้าเตาไฟฟ้าเพื่อเผาแคลไซน์

2.3.4 การบดลดขนาด (Grinding)

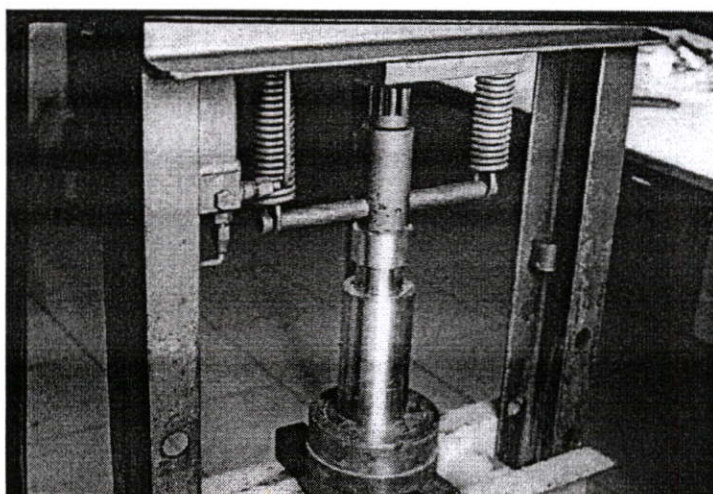
สารประกอบ PZT ที่ได้หลังจากการเผาแคลไซน์ จะจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง จึงต้องทำการบดให้เป็นผงละเอียดก่อนนำไปอัดขึ้นรูปได้ โดยนำสารประกอบ PZT ไปบดด้วยโกร่งให้แตกเป็นผงหยาบ ๆ จากนั้นนำผง PZT ไปเทรวมกับสารอะซิโตนและลูกบดเซอร์โคเนีย ในขวดพลาสติก แล้วนำไปวางบนเพลทหมุนของเครื่องโรเลอร์ ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2.3.5 การอบแห้ง (Dry)

เพื่อให้สารอยู่ในรูปผงจึงต้องนำสารที่ได้ มาอบด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80°C . นาน 2 ชั่วโมง

2.3.6 การอัดขึ้นรูป (Shaping)

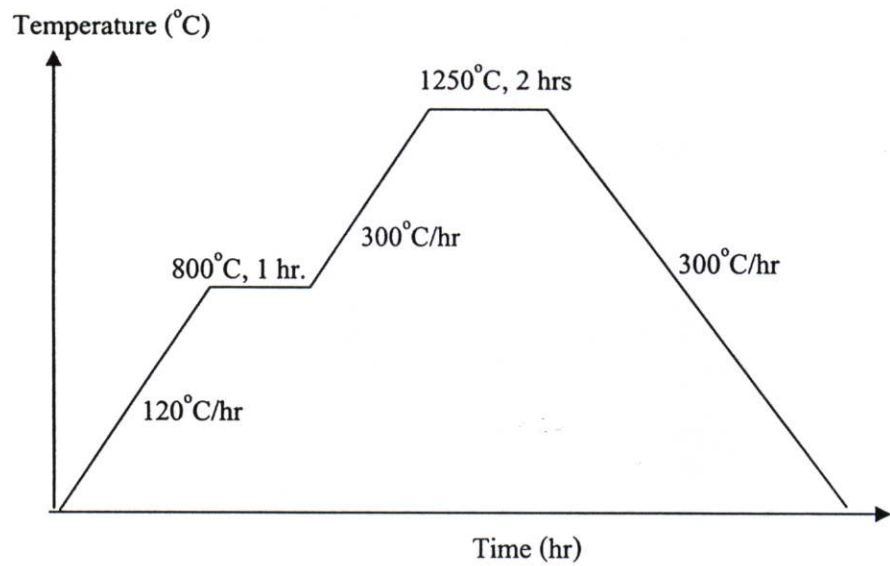
นำผง PZT ที่ได้มาเทใส่ลงในแม่พิมพ์ (mould) ที่เป็นรูปทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แล้วนำไปกดอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press) ด้วยแรงดัน 250 kg จากนั้นนำไปอัดด้วยเครื่องอัดแรงดันแบบทุกทิศทางหรือ cold isostatic press ด้วยแรงดัน 2000 kgf/cm^2 นาน 5 นาที จะได้ชิ้นงาน PZT ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นกลมตามต้องการ



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press)

2.3.7 การเผาซินเทอริง (Sintering)

การเผาซินเทอริงเป็นขั้นตอนที่ทำให้อนุภาคของสาร PZT ที่ถูกอัดรวมตัวกันเกิดการหลอมรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยนำชิ้นงาน PZT ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปไปใส่ในถ้วยอะลูมินา แล้วนำไปเผาด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 1250°C . เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงโดยมีการควบคุมอุณหภูมิดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาซินเตอร์ริง

2.3.8 การตกแต่งชิ้นงาน (Finishing)

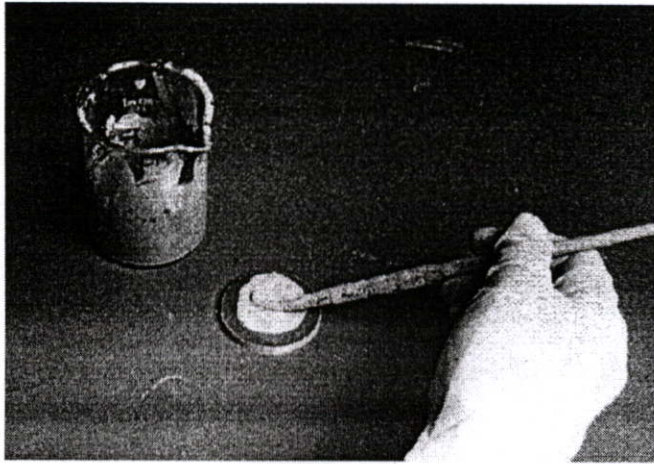
นำชิ้นงานที่ได้จากการเผามาขัดด้วยเครื่องขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสำคัญ เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะขึ้นกับรูปร่างของสาร และความเรียบสม่ำเสมอและความเป็นระนาบขนานกันของผิวหน้าของชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน



รูปที่ 2.8 แสดงการขัดตกแต่งชิ้นงาน PZT

2.3.9 การทำขั้วโลหะ (Electrode)

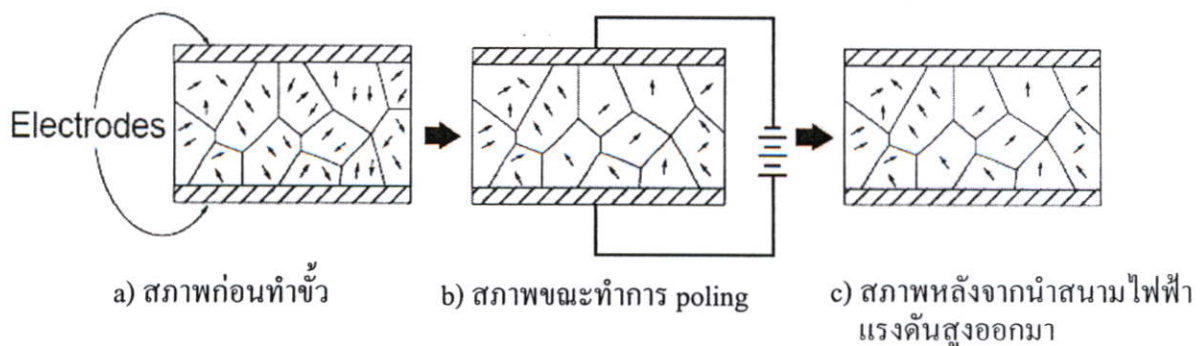
นำชิ้นงาน PZT มาทาสีผิวหน้าทั้งสองด้านด้วย silver paste แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °ซ. นาน 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 2.9



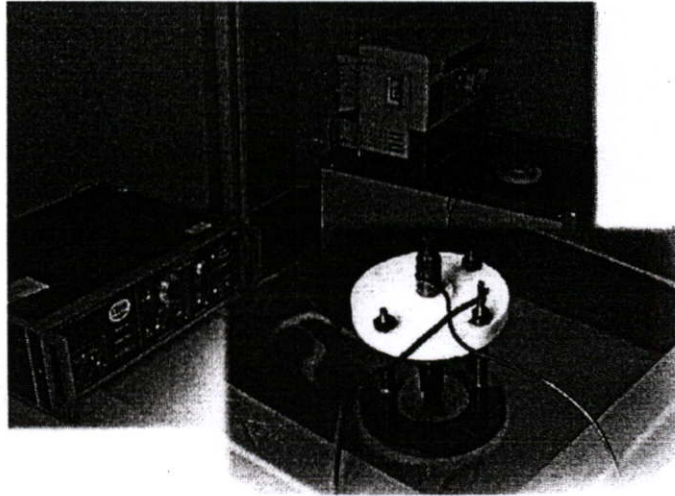
รูปที่ 2.9 แสดงการทำขั้วไฟฟ้าด้วยการทาสีด้วย silver paste

2.3.10 การทำขั้วไฟฟ้า (Poling)

นำชิ้นงาน PZT ที่ได้ไปแช่ในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่มีอุณหภูมิ 120 °ซ. และนำสายไฟจากเครื่องจ่ายไฟแรงดันสูงมาต่อเข้าทางขั้วโลหะด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน แล้วให้แรงดันไฟฟ้าในอัตราส่วน 20 กิโลโวลต์ต่อความหนาของชิ้นงาน 1 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้โดเมนภายในเนื้อสารมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เรียกว่าการโพลาริเซชัน (polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยลูกศรในแต่ละเกรนหมายถึงทิศทางของโดเมนในเนื้อสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก และ (a) สภาพก่อนทำขั้ว (b) สภาพขณะทำการ poling ด้วยสนามไฟฟ้าแรงดันสูง และ (c) สภาพหลังจากนำสนามไฟฟ้าแรงดันสูงออกมา แสดงทิศทางโดเมนภายในเนื้อสารยังคงสภาพการจัดเรียงตัว เช่นเดียวกับการ poling



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการทำโพลาริเซชัน



รูปที่ 2.11 แสดงการเหนี่ยวนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

2.3.11 ทดสอบสมบัติของสาร PZT

เพื่อให้สาร PZT แต่ละชิ้นที่ผลิตได้มีคุณภาพเหมือนกัน การทดสอบสมบัติต่างๆ ของสาร PZT ก่อนนำไปใช้งาน จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยแบ่งเป็น

2.3.11.1 การทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพ

การทดสอบชิ้นงาน PZT ทางด้านกายภาพ ได้แก่ การวัดค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 2.5 การหาลักษณะโครงสร้างผลึกและสารประกอบทางเคมีของสารด้วยวิธี X-ray Diffraction Pattern และการหาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.5)$$

โดยที่

ρ คือค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

m คือน้ำหนักของชิ้นงาน

V คือปริมาตรของชิ้นงาน

2.3.11.2 การทดสอบสมบัติทางด้านไฟฟ้า

การวัดค่าทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT ประกอบด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก การวัดค่าคงที่เพียโซ - อิเล็กทริก ค่า electromechanical coupling coefficient (k) และค่า mechanical quality factor (Q_m) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.11.2.1 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) หรือค่า relative permittivity (ϵ_r) สามารถหาได้จากการคำนวณในสูตรที่ 2.6

$$K = \epsilon_r = \frac{C_f t}{\epsilon_0 A} \quad (2.6)$$

โดยที่

C_f คือค่าความจุไฟฟ้าของสารวัดที่ 1 kHz

t คือ ความหนาของสารเพียโซอิเล็กทริกซึ่งวัดจากผิวหน้าที่ทำขั้วโลหะทั้ง 2 ด้านของสาร

A คือ พื้นที่ของขั้วโลหะ

ϵ_0 คืออัตราความจุกระแสไฟฟ้า (vacuum permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} ฟารัดเมตร

ค่าความสามารถการเก็บประจุของสารสามารถวัดได้ทีความถี่ต่าง ๆ แต่โดยทั่วไปจะวัดที่ความถี่ 1 kHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่า K จะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ของเนื้อสาร ตามสมการของ Curie-Weiss Law คือ

$$K-1 = (C/T-T_c) \quad (2.7)$$

โดยที่

T คือ อุณหภูมิของสาร

T_c คือ อุณหภูมิคูร์รี (curie temperature) หรืออุณหภูมิที่สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไม่มีขั้วไฟฟ้าหรือค่าโพราไรเซชันมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสาร

C คือ ค่าคงที่คูร์รี (curie constant) มีค่าอยู่ระหว่าง 10^3 - 10^5

2.3.11.2.2 การวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (d_{33})

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก เป็นค่าบอถึงความสามารถของการปล่อยประจุไฟฟ้าเมื่อชิ้นงาน PZT ถูกกระทำด้วยแรงกล โดยตัวเลขห้อย 33 หมายถึงทิศทางของการให้แรงกดกับชิ้นงาน PZT ในทิศทาง 3 และทำการวัดค่าประจุไฟฟ้าในทิศทาง 3 ในระบบพิกัดฉากในรูปที่ 2.2 ค่า d_{33} สามารถวัดด้วยเครื่อง Piezo d-meter Model CADT (Channel Products Inc.)

2.3.11.2.3 การวัดค่า electromechanical coupling coefficient (k_t)

ค่า k_t เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยสามารถหาได้จากสมการ [3]

$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan\left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_a}\right) \quad (2.8)$$

โดยที่

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

f_a คือ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์

Δf คือ ค่าความต่างระหว่างความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์

2.3.11.2.4 การวัดค่า mechanical quality factor (Q_m)

ค่า Q_m หรือ ค่าส่วนกลับของค่าการสูญเสีย (dissipation factor) เป็นค่าความสามารถการสั่นทางกลได้สูงสุดในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) คำนวณได้จากสมการ

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r R_1 C_f (f_a^2 - f_r^2)} \quad (2.9)$$

โดยที่

f_s คือ ความถี่เรโซแนนซ์

f_a คือ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์

R_1 คือ ค่าความต้านทานหรือค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ f_r

C_f คือ ค่าความจุไฟฟ้าวัดได้ที่ 1 kHz

บทที่ 3

ค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก และการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD

วิธีหาค่าวงจร BVD ที่เทียบได้กับสารเพียโซอิเล็กทริก จะเป็นวิธีการพิจารณาจากลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์ที่มีการตอบสนองต่อความถี่ต่าง ๆ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง นิยามเกี่ยวกับค่าอิมพีแดนซ์, วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ องค์ประกอบของวงจร BVD และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD

3.1 ค่าอิมพีแดนซ์ (Z)

จากกฎของโอห์ม (Ohm Law) ในระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ค่าความต้านทาน คืออัตราส่วนของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 จุด กับค่ากระแสที่ไหลผ่าน ($R=V/I$) สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) อัตราส่วนดังกล่าวจะเป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน จึงเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) โดยเรียกส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ว่า ค่ารีซิสแตนซ์ (resistance) และเรียกส่วนจินตภาพว่าค่ารีแอคแตนซ์ (reactance)

$$Z = R + jX \quad (3.1)$$

แต่ในบางครั้งเพื่อความสะดวกในการคำนวณ จะใช้ส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์หรือเรียกว่า ค่าแอดมิแตนซ์ (admittance, Y) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y = G + jB = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (3.2)$$

ค่า G คือค่าคอนดักแตนซ์ (conductance) และค่า B คือค่าซัสเซปแตนซ์ (susceptance) โดยค่าอิมพีแดนซ์ สามารถเขียนอยู่ในรูปโพลาร์ (polar form) คือ

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\theta} = |Z|(\cos(\theta) + j \sin(\theta)) \quad (3.3)$$

โดยที่

$$|Z| \text{ คือขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าเท่ากับ } \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta \text{ คือมุมของค่าอิมพีแดนซ์ หรือ } \theta = \tan^{-1}(X/R)$$

และค่าแอดมิแดนซ์เขียนอยู่ในรูปโพร่าคือ

$$Y = G + jB = |Y|e^{j\phi} = |Y|(\cos(\phi) + j\sin(\phi)) \quad (3.4)$$

โดยที่

$$|Y| \text{ คือขนาดของค่าแอดมิแดนซ์ มีค่า } |Y| = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{1}{|Z|}$$

$$\phi \text{ คือมุมของค่าแอดมิแดนซ์ มีค่า } \phi = -\theta = \tan^{-1}(B/G)$$

และค่าของ Q (quality factor) และค่า D (dissipation factor) สามารถหาได้จาก

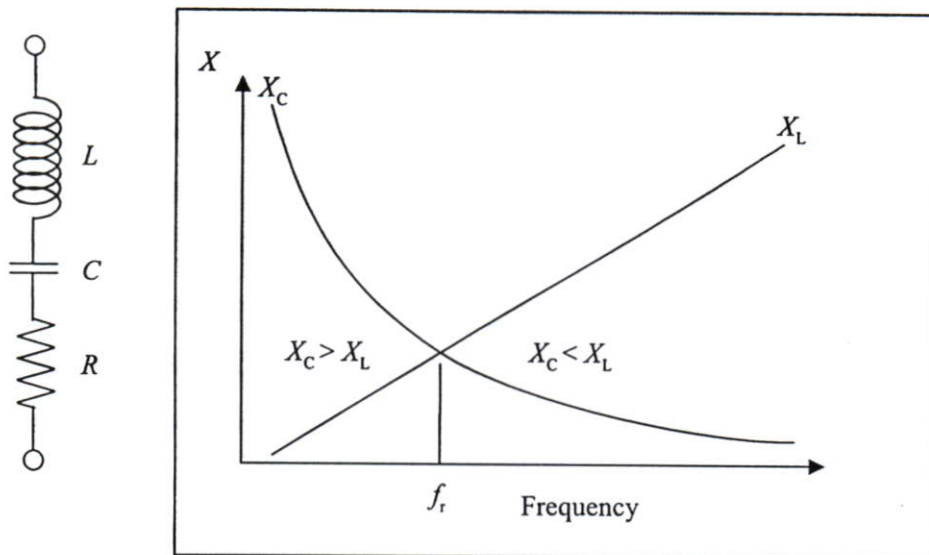
$$Q = \frac{1}{D} = \frac{R}{X} = \frac{B}{G} \quad (3.5)$$

*ค่า D ไม่ใช่ค่า electric flux density ในสมการที่ 2.3 และปกติค่า D จะเป็นบวกเสมอสำหรับอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (passive) แต่บางครั้งค่า Q จะมีค่าเป็นลบสำหรับอุปกรณ์ capacitive resistor ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (power factor) เท่ากับ $D(1+D^2)^{1/2} = \cos \theta$

สำหรับอุปกรณ์พื้นฐานได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และลวดนำไฟฟ้าในอุดมคติ จะมีค่าอิมพีแดนซ์คือ

- ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานเท่ากับ $Z_R = R$
- ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (C) เท่ากับ $Z_C = jX_C = -j/2\pi fC$
- และค่าอิมพีแดนซ์ของลวดความนำ (L) เท่ากับ $Z_L = jX_L = 2\pi fL$

จากความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์พื้นฐาน ถ้านำตัวเก็บประจุ ลวดความนำและตัวต้านทานมาต่ออนุกรม จะสามารถแสดงกราฟคาร์ทีเซียนของแต่ละอุปกรณ์ได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงกราฟของค่ารีแอกแตนซ์ของอนุกรมของอุปกรณ์พื้นฐานที่ความถี่ต่าง ๆ

จากเส้นกราฟของ X_L เป็นสมการของเส้นตรง โดยค่า X_L เทียบได้กับตัวแปร y , ค่า $2\pi L$ เทียบกับความชันของสมการเส้นตรง m และค่า f เทียบได้กับค่าตัวแปร x [8]

$$\begin{array}{cccc}
 X_L = 2\pi L f + 0 & & & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 y = m \times x + c & & &
 \end{array}$$

เส้นกราฟของ X_C เป็นสมการของเส้นไฮเพอร์โบลา (Hyperbola) โดยค่า X_C เทียบได้กับตัวแปร y , ค่า $1/2\pi C$ เทียบกับค่าคงที่ k และค่า f เทียบได้กับค่าตัวแปร x

$$\begin{array}{ccc}
 f X_C = 1/2\pi C & & \\
 \downarrow \downarrow & \downarrow & \\
 x y = k & &
 \end{array}$$

จากตัวอย่างของการตอบสนองของวงจรที่นำตัวอุปกรณ์พื้นฐานมาต่ออนุกรมกัน สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับ การตอบสนองทางไฟฟ้าของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ อย่างเช่น สารเพียโซอิเล็กทริก เซรามิกที่มีค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงเรโซแนนซ์คล้ายกับวงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานเหล่านี้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 3.4 วงจรไฟฟ้าสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริกแบบ Butterworth Van Dyke

3.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

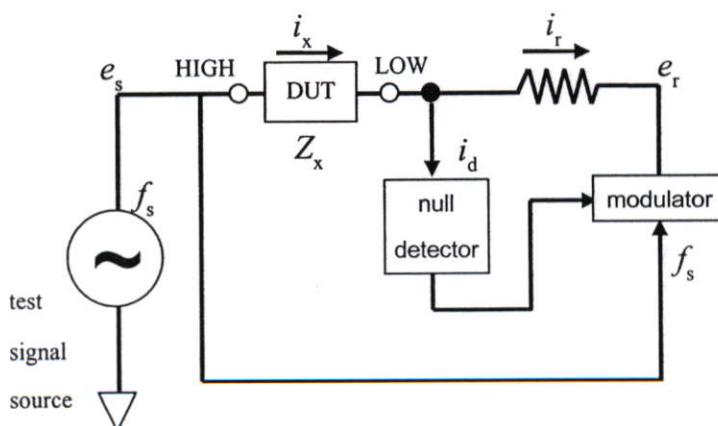
การวัดค่าอิมพีแดนซ์สามารถวัดได้ 2 แบบคือ วิธีการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อ

ความถี่ของสัญญาณวัดเปลี่ยนไป โดยควบคุมให้มีค่าแรงดันคงที่ และ วิธีการวัดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต่อความถี่สัญญาณวัดที่เปลี่ยนไป โดยการควบคุมให้กระแสไหลผ่านอุปกรณ์คงที่ ซึ่งการวัดทั้ง 2 วิธีมีข้อจำกัดคือ แหล่งกำเนิดกำเนิดสัญญาณต้องมีค่าฮาร์โมนิกต่ำ และอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันหรือกระแสต้องมีอัตราขยายคงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการวัด ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่สามารถควบคุมข้อจำกัดดังกล่าว นั่นคือ เครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4192, HP4194, HP4294 ฯลฯ โดยใช้หลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบบอโต้บาลานซ์บริดจ์ (auto-balance bridge) ดังรูปที่ 3.2 วงจรการวัดประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณทดสอบ (test signal source) วงจรตรวจวัดกระแส (null detector) และวงจรปรับลดสัญญาณ (modulator) เมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณทดสอบป้อนสัญญาณความถี่ f_s ให้กับชิ้นงานทดสอบ (DUT) ทำให้มีกระแส i_x ไหลผ่านชิ้นงาน และกระแส i_r ไหลไปยังตัวต้านทานอ้างอิง (R_r) ขณะเดียวกันจะมีกระแส i_d ไหลผ่านไปยังวงจรตรวจวัดกระแส ซึ่งกระแส i_d เกิดจากวงจรบริดจ์ไม่สมดุล และเมื่อค่ากระแส i_d ไม่เป็นศูนย์ วงจรวัดกระแสจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังวงจรปรับลดสัญญาณ เพื่อสร้างสัญญาณหักล้างด้วยค่าความถี่เดียวกับสัญญาณทดสอบเพื่อให้ค่ากระแส $i_d = 0$ เมื่อกระแส i_d เท่ากับศูนย์สามารถคำนวณหาอิมพีแดนซ์ได้ตามสมการ

$$i_x = i_d + i_r \quad (3.6)$$

$$Z_x = R_r \frac{e_s}{e_r} \quad (3.7)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จะอยู่ในรูปของเวกเตอร์ หรือค่าที่บอกถึงขนาด ($|Z|$) และเฟส (θ) ของค่าอิมพีแดนซ์และมีความถูกต้องสูงในช่วงความถี่ต่ำจนถึงความถี่ 13 MHz [9]



รูปที่ 3.2 วงจร auto-balance bridge

สาร PZT ที่ผลิตได้จากกระบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิมจากบิทที่แล้ว จะถูกนำมาวิเคราะห์หาอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ในช่วงความถี่ต่าง ๆ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์

และความถี่โรเซนเนสที่วัดได้ จึงต้องประมาณค่าด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อหาค่าจริงก่อนนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.3 การประมาณค่าทางสถิติ

ในการทดลองวัดค่าของสิ่งของซ้ำหลายครั้งค่าที่ได้ย่อมไม่เท่ากัน เช่นเดียวกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ดังนั้นก่อนนำค่าอิมพีแดนซ์ไปคำนวณหาวงจร BVD จึงต้องใช้วิธีประมาณค่าทางสถิติ โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น การหาค่ากลางของค่าอิมพีแดนซ์จากกลุ่มข้อมูลที่วัดซ้ำ และการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องมือระบบการวัด โดยอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย

3.3.1 การหาค่ากลางของค่าอิมพีแดนซ์

จากกลุ่มข้อมูลของค่าที่วัดได้ การประมาณค่ากลางสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับลักษณะข้อมูล วิธีการคำนวณที่นิยมได้แก่

3.3.1.1 ค่าเฉลี่ย (mean)

หาได้จากสมการ ผลรวมของกลุ่มข้อมูลหารด้วยจำนวนของข้อมูล

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.8)$$

ค่าเฉลี่ยนิยมใช้กับกลุ่มข้อมูลที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเพียงค่าเดียว ในกลุ่มข้อมูลจะมีผลต่อค่าเฉลี่ย

3.3.1.2 ค่ามัธยฐาน (median)

คือค่าตรงกลางของกลุ่มข้อมูล หาได้จากการนำข้อมูลมาเรียงตั้งแต่ต่ำไปหาสูง แล้วแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม แล้วหาค่ามัธยฐานได้ดังนี้

- สำหรับข้อมูลมีจำนวนเป็นเลขคี่ ค่ามัธยฐานคือค่าที่อยู่ลำดับกึ่งกลางของค่าทั้ง 2 กลุ่ม หรือ $Mdn = x_{(n+1)/2}$
- สำหรับข้อมูลมีจำนวนเป็นเลขคู่ ค่ามัธยฐานหาได้จาก $Mdn = (x_{n/2} + x_{(n+1)/2})/2$

ค่ามัธยฐานจะใช้กับกลุ่มข้อมูลที่มีค่าที่ห่างไม่เท่ากัน หรือมีค่าที่สูงหรือต่ำกว่าค่าอื่นภายในกลุ่มมาก ๆ

3.3.1.3 ค่าฐานนิยม (mode)

คือค่าที่มีความถี่มากที่สุดในกลุ่มข้อมูลหรือค่าที่มีจำนวนซ้ำมากที่สุด นิยมใช้กับกลุ่มข้อมูลที่

ศึกษาเกี่ยวกับค่านิยมต่าง ๆ [2]

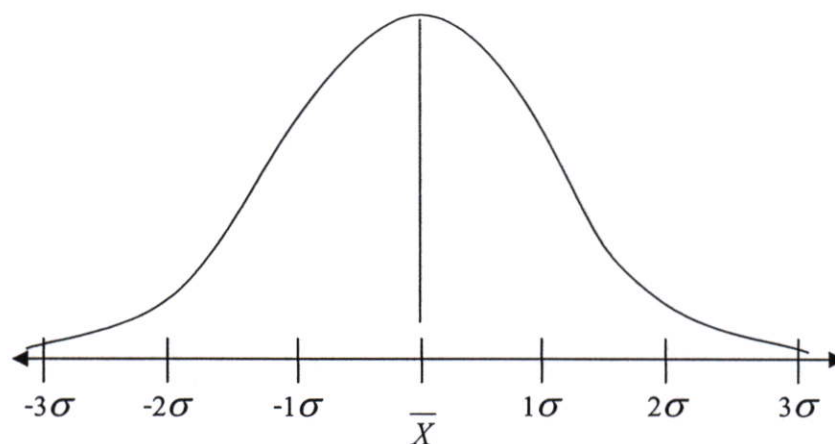
3.3.2 การวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย

การวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธีอาศัยค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ความแม่นยำของค่าที่ระบบวัดได้ ทำให้ทราบถึงความสามารถของระบบการวัด และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยมีวิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

3.3.2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

ค่าความแปรปรวนมาตรฐาน (σ) เป็นสถิติที่ช่วยให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ในตัวแปรที่ศึกษา ของสมาชิกในกลุ่มว่ามีมากหรือน้อย ถ้าค่า σ มาก แสดงว่าสมาชิกในกลุ่มนั้นมีค่าที่วัดในตัวแปรที่ศึกษาแตกต่างกันมาก และถ้าค่า σ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าสมาชิกในกลุ่มนั้นมีค่าแตกต่างกันน้อย การพิจารณาค่าที่วัดมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่ากลางมากหรือน้อยอาจพิจารณาจากการแจกแจงแบบปกติ ประกอบการพิจารณาเช่น

- ถ้าค่าที่วัดได้อยู่ระหว่างค่ากลาง $\pm 1\sigma$ แสดงว่า ค่านั้นมีอยู่ในกลุ่มของสมาชิก 68% ของกลุ่มสมาชิก
- ถ้าค่าที่วัดได้อยู่ระหว่างค่ากลาง $\pm 2\sigma$ แสดงว่า ค่านั้นมีอยู่ในกลุ่มของสมาชิก 96% ของกลุ่มสมาชิก



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟของการแจกแจงแบบปกติ

การหาค่า σ คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3.9)$$

โดยที่

σ แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

X แทน ค่าของข้อมูล

N แทน จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.3.2.2 ค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด (equipment variation :EV)

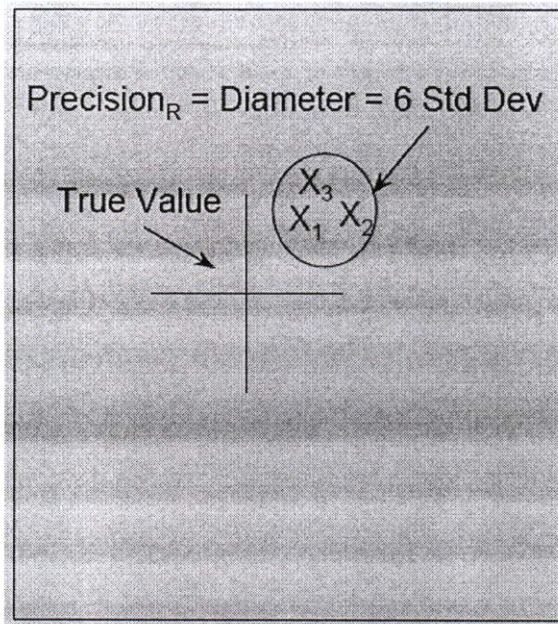
ค่าความผันแปรของอุปกรณ์วัด ในบางครั้งเรียกว่าค่ารีพีทบิลิตี (repeatability) เป็นค่าที่บอกถึงความผันแปรของค่าที่เกิดจากการวัดซ้ำกัน ในตัวอย่างเดียวกัน เวลาเดียวกัน และผู้ทำการวัดคนเดียว การคำนวณหาได้จาก

$$EV = 5.15\sigma_{EV} \quad (3.10)$$

โดยที่

$$\sigma_{EV} = \frac{\bar{R}(X)}{d_2} \quad (3.11)$$

และ $\bar{R}(X)$ คือค่าพิสัยเฉลี่ย โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละตัวอย่างที่ทำการวัดซ้ำ และค่า d_2 หาได้จากตารางที่ 3.1 [9]



รูปที่ 3.4 แสดงความผันแปรของค่าเนื่องจากเครื่องมือวัด

ตารางที่ 3.1* แฟกเตอร์ปรับค่าแบบไม่เอนเอียงในการประมาณค่า σ

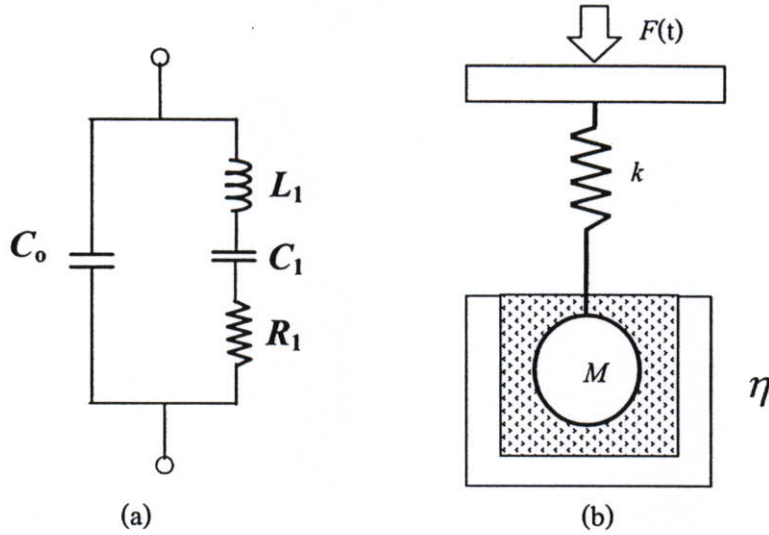
ขนาด กลุ่มย่อย	d_2	c_2	c_4	ขนาด กลุ่มย่อย	d_2	c_2	c_4
2	1.128	0.5642	.7979	21	3.778	0.9638	.9876
3	1.693	0.7236	.8862	22	3.819	0.9655	.9882
4	2.059	0.7979	.9213	23	3.858	0.9670	.9887
5	2.326	0.8407	.9400	24	3.895	0.9684	.9892
6	2.534	0.8686	.9515	25	3.931	0.9695	.9896
7	2.704	0.8882	.9594	30	4.086	0.9748	.9915
8	2.847	0.9027	.9650	35	4.213	0.9784	.9927
9	2.970	0.9139	.9693	40	4.322	0.9811	.9936
10	3.078	0.9227	.9727	45	4.415	0.9832	.9943
11	3.173	0.9300	.9754	50	4.498	0.9849	.9949
12	3.258	0.9359	.9776	60	4.639	0.9874	.9957
13	3.336	0.9410	.9794	70	4.755	0.9874	.9963
14	3.407	0.9453	.9810	80	4.854	0.9892	.9968
15	3.472	0.9490	.9823	90	4.415	0.9916	.9972
16	3.532	0.9523	.9835	100	5.015	0.9925	.9975
17	3.588	0.9551	.9845				
18	3.640	0.9576	.9854				
19	3.689	0.9599	.9862				
20	3.735	0.9619	.9869				

*คัดจาก Wheeler (1988)

แฟกเตอร์ปรับค่า d_2 , c_2 , c_4 ข้างบนนี้ ใช้สำหรับปรับค่าเพื่อไม่ให้เกิดความเอนเอียงสำหรับการประมาณค่า σ โดยใช้ตัวสถิติพิสัย รากที่สองของความเบี่ยงเบนกำลังสองโดยเฉลี่ย (RMS) และความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยลำดับ

3.4 วงจรไฟฟ้าสมมูลของสารเพียโซอิเล็กทริกแบบ Butterworth Van Dyke

จากค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก สามารถอธิบายได้ด้วยวงจรไฟฟ้าที่มีสมบัติใกล้เคียงกันเช่นวงจร BVD ดังรูปที่ 3.3 (ก) ประกอบด้วยส่วนอนุกรมของตัวต้านทาน (R_1), ตัวเก็บประจุ (C_1) และ ลวดความนำ (L_1) เรียกส่วนนี้ว่า Motional ขนาดกับตัวเก็บประจุ (C_0) โดยเทียบได้กับสมบัติทางกลคือ ลวดความนำเทียบได้กับมวลของลูกตุ้ม ตัวเก็บประจุเทียบได้กับสปริง (k) และแรงเสียดทาน (η) เทียบได้กับตัวต้านทาน และสมมุติให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ [5]



(a) วงจรไฟฟ้าสมมูล BVD
(b) ลักษณะทางกล

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรเปรียบเทียบสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

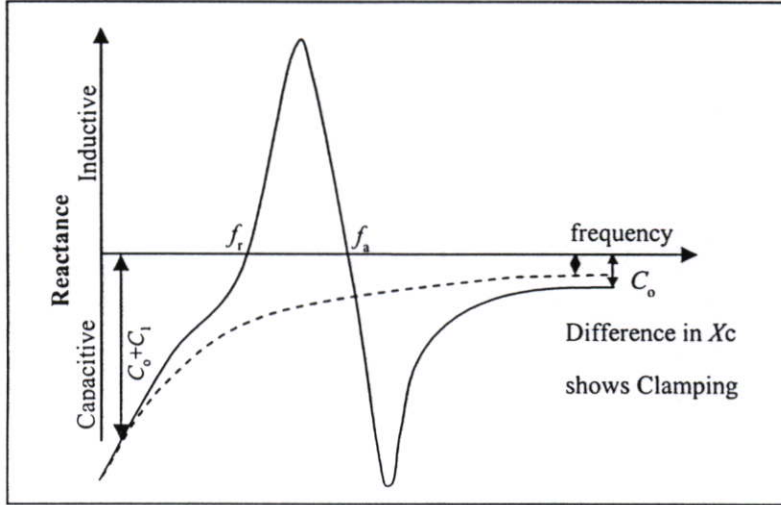
โดยเราสามารถเขียนสมการของค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในรูปของค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD คือ

$$Z = \frac{R + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)}{1 + j\omega C_0 \left[R + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) \right]} \quad (3.14)$$

โดย $\omega = 2\pi f$ และจากกราฟในรูปที่ 3.4 ค่ารีแอกแตนซ์ (X) ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่ารีแอกแตนซ์มีสภาพเป็นตัวเก็บประจุ (capacitive) จนถึงความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากค่าของ ωL_1 มีขนาดเท่ากับ $1/\omega C_1$ แต่มีทิศตรงข้ามกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ f_r มีค่าเท่ากับ ตัวต้านทาน (R_1) และที่ความถี่มากกว่าความถี่ f_r สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเปลี่ยนเป็นสภาพตัวนำ (inductive) จนถึงความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ค่ารีแอกแตนซ์ของแขนอนุกรมของ R_1 - C_1 - L_1 มีขนาดเท่ากับรีแอกแตนซ์ของ $1/\omega C_0$ จึงทำให้ค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเป็นศูนย์อีกครั้งและทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสารมีค่าสูงสุด สามารถเขียนสมการของความสัมพันธ์ที่ความถี่ f_r และ f_a [4] ได้ดังนี้

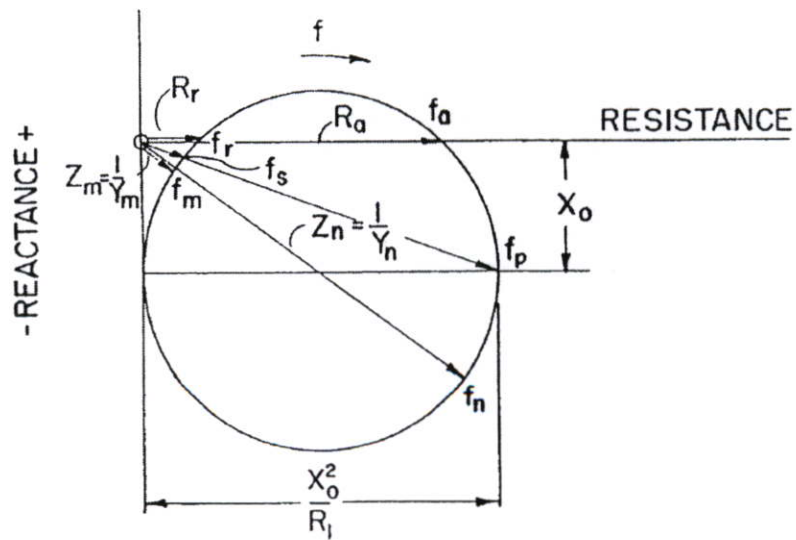
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.15)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 C_o C_1}{C_o + C_1}}} \tag{3.16}$$



รูปที่ 3.6 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับที่ความถี่ต่ำ

นอกจากนั้น การพิจารณาความเหมาะสมของวงจร BVD ที่มาเป็นตัวแทนค่าทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้ ขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมในแผนภาพวงกลมรูปที่ 3.5 ที่แสดงค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานที่ความถี่ในช่วงเรโซแนนซ์ ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าค่าของ $2\pi f C_o$



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานของค่าอิมพีแดนซ์ [10]

3.5 วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD หรือค่า R_1 , C_1 , L_1 และ C_0 ในงานวิจัยนี้มี 3 วิธีคือการคำนวณหาค่าของ C_1 ตามวิธีของ IEEE 176-1987, วิธีการคำนวณตามแนวคิดของผู้วิจัย และการหาค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากเครื่อง HP4194 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

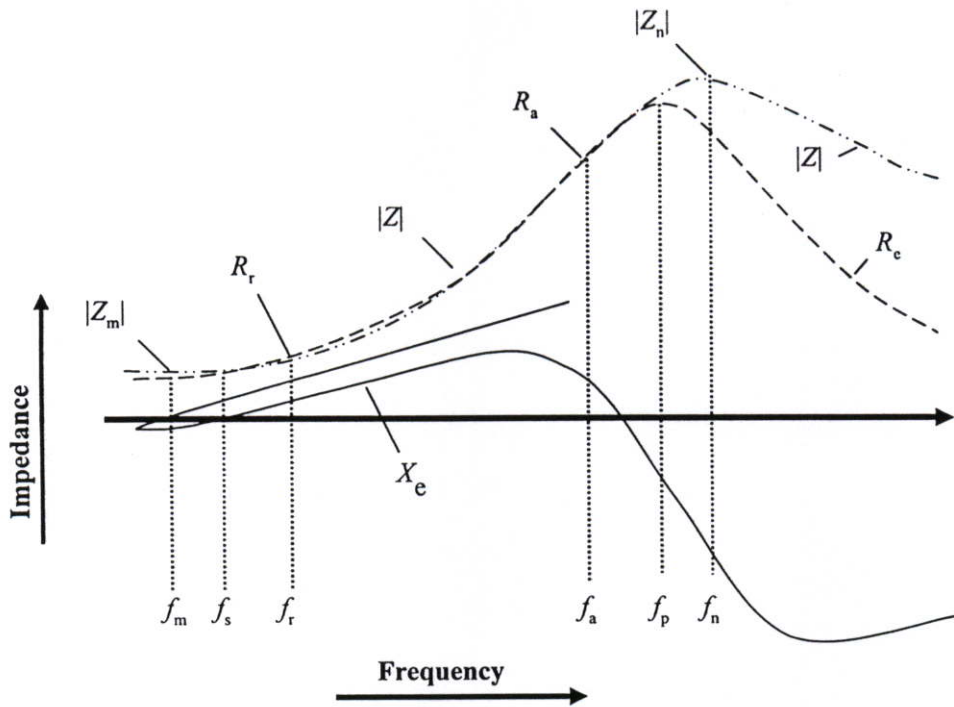
3.5.1 วิธี IEEE 176-1987 [5]

วงจร BVD สามารถใช้เป็นตัวแทนทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริกสำหรับช่วงความถี่เรโซแนนซ์ได้ โดยค่าความต้านทาน R_1 เปรียบเทียบได้กับการสูญเสียทางกล (mechanical dissipation) ของสารเพียโซอิเล็กทริก โดยวัดค่าการสูญเสียได้จากค่า Q ตามสมการ

$$Q = \frac{\left(\frac{L_1}{C_1}\right)^{1/2}}{R_1} \quad (3.17)$$

สำหรับสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้เป็นอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ (resonator) ที่มีการสูญเสียต่ำ จะมีความถี่ f_1 และ f_2 เพียงความถี่เดียวที่มีค่าแอดมิแตนซ์ ($Y=1/Z$) และค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุดตามลำดับ แต่สำหรับเรโซเนเตอร์ที่มีการสูญเสียสูงจะพบว่า มี 3 ความถี่ที่มีค่าแอดมิแตนซ์มากและอยู่ใกล้เคียงกัน คือ f_m , f_s , f_r และมีความถี่ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่มากและอยู่ใกล้เคียงกัน 3 ความถี่คือ f_n , f_p , f_a ดังรูปที่ 3.6 โดย

- f_m และ f_n คือความถี่ที่มีค่าแอดมิแตนซ์ ($Y=1/Z$) และค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุด
- f_s และ f_p คือความถี่ที่มีค่าความนำไฟฟ้า (G) และค่าความต้านทาน (R) มากที่สุด หรือเรียก f_s และ f_p ว่าความถี่ เรโซแนนซ์ อนุกรม (series resonance frequency) และ ความถี่ เรโซแนนซ์ขนาน (parallel resonance frequency)
- f_r และ f_a คือความถี่ที่มีค่าซบสเปกแตนต์ซ์ (B) และค่ารีแอกแตนต์ซ์ (R) มีค่าเป็นศูนย์ หรือเรียก f_r และ f_a ว่าความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) และ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (anti-resonance frequency)



รูปที่ 3.8 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ ($|Z|$), รีซิสแตนซ์ (R_e), รีแอคแตนซ์ (X_e) และรีแอคแตนซ์ของส่วน $R_1-C_1-L_1$ ของวงจรสมมูล BVD ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [10]

ทั้งนี้การวัดเพื่อหาค่าความถี่ข้างต้นขึ้นกับค่า figure of merit ของสาร โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนรูปพลังงาน (coupling factor, k_{eff}) สามารถหาได้จากความถี่ f_s และ f_p ตามสมการ

$$(k_{eff})^2 = \frac{(f_p^2 - f_s^2)}{f_p^2} \quad (3.18)$$

และค่าของ figure of merit ของสารคือ

$$M = \frac{k_{eff}^2 Q}{(1 - k_{eff}^2)} \quad (3.19)$$

สำหรับการหาค่าความถี่ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณจะขึ้นกับค่า M ของสารเช่น

- สารที่มีค่า $M > 5$ การหาค่าความถี่ f_s สามารถแทนด้วยความถี่ f_1 และ f_p ต่างจาก f_2 ประมาณ $1/Q^2$
- สารที่มีค่า $M > 50$ ค่าความถี่ f_m หรือ f_r สามารถใช้ค่าความถี่ที่ f_1 แทนได้โดยตรง และ f_n หรือ f_a เท่ากับ f_2
- และสารที่มีค่า $M < 50$ ต้องใช้การวัดค่าอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์หาค่า f_s หรือ f_p

ในการทดลองนี้จะถือว่าค่า f_s เท่ากับ f_1 และ f_p เท่ากับ f_2 และสามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ (C_1) ได้ ด้วยกัน 3 วิธีคือ

3.5.1.1 วิธีที่ 1

การวิเคราะห์ค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงใกล้กับจุดความถี่เรโซแนนซ์ด้วยการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบบวงจรบริดจ์ (impedance bridge) และประมาณค่าของ C_1 จากความชันของเส้นตรงที่สัมผัสเส้นโค้งในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ เขียนเป็นสมการคือ

$$\left(\frac{dx}{df}\right)_{f=f_s} = \frac{1}{(\pi f_s^2 C_1)} \quad (3.20)$$

จะได้ค่าของ C_1 มีค่าผิดพลาดต่ำกว่า 1% ถ้าสารมีค่า $M > 10$

3.5.1.2 วิธีที่ 2

การนำค่าตัวเก็บประจุ C_L หลาย ๆ ค่า มาต่ออนุกรมกับสารเพียโซอิเล็กทริก แล้วหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_{sL}) ของแต่ละตัวเก็บประจุที่มาต่ออนุกรม จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_s/2(f_{sL}-f_s)$ และค่า C_L จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน $1/C_1$ ซึ่งเขียนเป็นสมการคือ

$$\frac{C_o + C_L}{C_1} = \frac{f_s}{2(f_{sL} - f_s)} \quad (3.21)$$

วิธีนี้จะใช้ได้กับสารที่มีค่า $M > 50$ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้การวัดค่าด้วยวงจรบริดจ์

3.5.1.3 วิธีที่ 3

วิธีนี้เหมาะสำหรับสารที่มีค่า M ต่ำ โดยพิจารณาจากค่า C_1 จากค่าการสูญเสีย (Q) ด้วยการหาค่า R_1 จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าด้วยวงจรบริดจ์ ค่าความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม แล้วคำนวณจากสมการ

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_s R_1 Q)} \quad (3.22)$$

ค่าของ L_1 และ C_o จะคำนวณจากค่า C_1 ที่หาได้ไปแทนค่าในสมการที่ 3.15 แล้วนำค่า C_1, L_1 ไปแทนค่าในสมการที่ 3.16 ตามลำดับ และค่า R_1 หาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์

3.5.2 วิธีการคำนวณโดยวิธีอิมพีแดนซ์

จากสมการที่ 3.15 และ 3.16 จะได้อัตราส่วนของตัวเก็บประจุ (capacitance ratio, r) [12] คือ

$$r = \frac{C_1}{C_o} = \frac{\omega_a^2 - \omega_r^2}{\omega_r^2} \quad (3.23)$$

เมื่อแทนค่า C_1 จากสมการที่ 3.23 ในสมการที่ 3.16 จะได้

$$CL_o = \frac{1}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \quad (3.24)$$

และจากการเปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุของ C_1 และลวดความนำ L_1 ในวงจร BVD ในช่วงความถี่ต่ำ ๆ โดยสมมติให้ความถี่ f_s เท่ากับความถี่ f_r และ f_p เท่ากับความถี่ f_a พบว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีสภาพเป็นตัวเก็บประจุ หรือเขียนเป็นสมการ

$$\frac{j}{\omega C_1} \gg j\omega L_1 \quad (3.25)$$

ทำให้ $(R_1 + j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1}) \approx (R - \frac{j}{\omega C_1})$ และ จากสมการที่ 3.17 และ 3.18 สามารถเขียนค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในสมการที่ 3.8 ใหม่ได้ว่า

$$Z = \frac{R_1 - \frac{j}{\omega C_1}}{\left[\frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \right] + jR\omega C_o} \quad (3.26)$$

จากสมการที่ 3.20 เทอมของ $jR\omega C_o$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเทอม $\left[\frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \right]$ จึงสามารถตัดทิ้ง และสามารถหาค่า C_1 ได้ตามสมการดังนี้

$$C_1 = \frac{1}{\omega \sqrt{\left[\frac{\omega_r^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \right]^2 |Z|^2 - R^2}} \quad (3.27)$$

สำหรับค่า L_1 และ C_0 จะสามารถหาได้จากการแทนค่า C_1 ในสมการที่ 3.15 แล้วนำค่า C_1 , L_1 ไปแทนค่าในสมการที่ 3.16 เพื่อหาค่า C_0 ตามลำดับ และค่า R_1 หาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์

3.5.3 วิธีการคำนวณด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ HP4194

เนื่องจากวิธีข้างต้นเป็นการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ซึ่งเป็นเครื่องที่ไม่มีส่วนคำนวณทางจรสมมูลเหมือนกับเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4194 ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลของการคำนวณจึงต้องใช้เครื่องรุ่นนี้มาเปรียบเทียบค่าของวงจร BVD และวิธีการคำนวณหาค่าวงจร BVD ของเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4194 จะใช้วิธีที่ 3 ของ IEEE ในหัวข้อ 3.4.1.3 และค่าของ L_1 และ C_0 จะคำนวณจากค่า C_1 ที่หาได้ไปแทนค่าในสมการที่ 3.15 และสมการที่ 3.16 ตามลำดับ และค่า R_1 หาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์ [12]

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 การเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เตรียมสารเพียโซอิเล็กทริกหรือสาร PZT จากการนำสารประกอบที่อยู่ในรูปผง 3 ชนิด คือ เลดออกไซด์ (PbO) , เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามขั้นตอนของการสังเคราะห์สารเซรามิกในหัวข้อ 2.1 โดยชั่งสารประกอบให้มีอัตราส่วนของ $PbO : ZrO_2 : TiO_2$ เท่ากับ 100 : 52 : 48 โดยโมล ซึ่งจะได้สารเพียโซอิเล็กทริกในรูปแผ่นวงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร และที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้านเคลือบด้วยโลหะเงิน โดยเตรียมจำนวนสาร PZT ทั้งหมด จำนวน 5 ชิ้น และตั้งชื่อตัวอย่าง N01, N02, N03, N04 และ O01 จากนั้นทำการวัดสมบัติของสาร PZT ได้แก่ ความหนาแน่น, ค่าเพียโซอิเล็กทริกด้วยเครื่อง Piezo d-meter Model CADT (Channel Products Inc.), ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกวัดด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1 kHz, ค่า k_t และค่า Q_m เป็นต้น

4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT

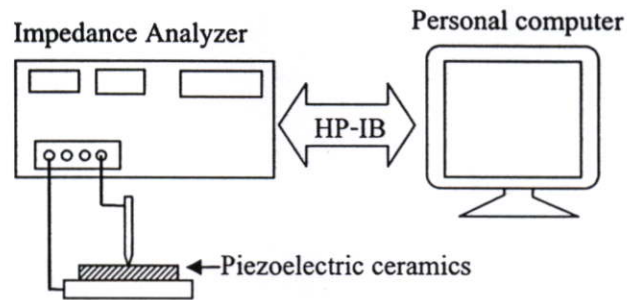
เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น และการนำค่าอิมพีแดนซ์ไปใช้คำนวณวงจร BVD จึงได้ออกแบบการทดลองเป็น 4 ลักษณะคือ การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ที่อุณหภูมิห้อง การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสาร PZT ที่มีการกดทับด้วยน้ำหนักมาตรฐาน และการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของการต่ออนุกรมกันของสาร PZT กับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ที่อุณหภูมิห้อง

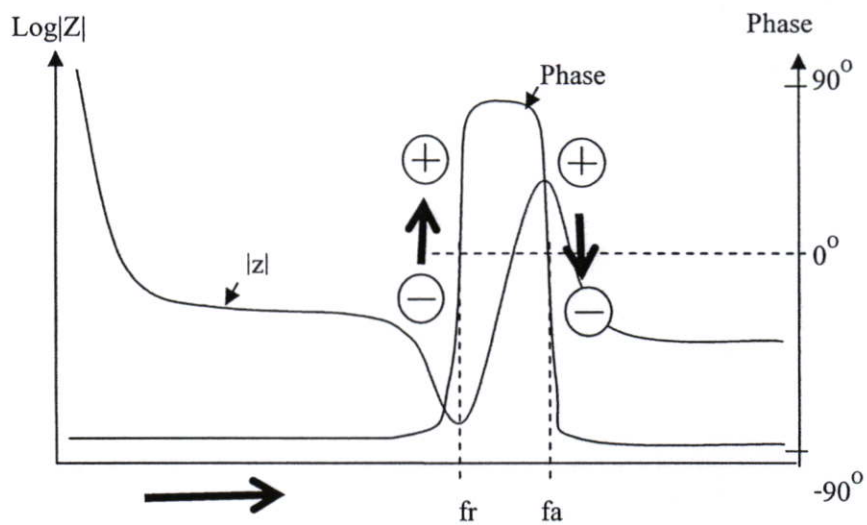
เป็นการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของสาร PZT ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4192 และควบคุมการวัดและเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรมที่เขียนบน HP Vee รุ่น 5.01 ผ่านทางพอร์ต HP-IB ดังรูปที่ 4.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ จะวัดตั้งแต่ความถี่ 1 kHz จนถึงความถี่ 80 kHz จำนวน 5 ตัวอย่าง ในแต่ละตัวอย่างจะทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เพื่อใช้คำนวณหาค่าเฉลี่ย และวิธีการหาจุดความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และแอนติเรโซแนนซ์ (f_a) จะพิจารณาจากค่าเฟสของอิมพีแดนซ์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

การกำหนดความถี่ของเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ให้มีค่าต่ำกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ หรือความถี่ที่ค่าอิมพีแดนซ์มีเฟสเป็นลบ จากนั้นทำการเพิ่มความถี่จนค่าเฟสของอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นศูนย์เรียก

จุดนี้ว่า ความถี่เรโซแนนซ์ และเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้น ค่าเฟสของอิมพีแดนซ์จะเริ่มมีค่าเป็นบวก และจะลดลงมาเป็นศูนย์อีกครั้ง เรียกความถี่ที่จุดนี้ว่า ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



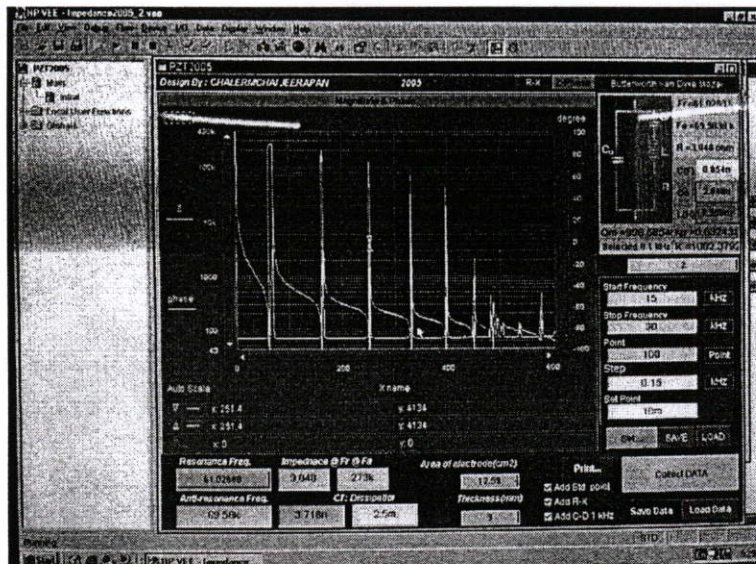
รูปที่ 4.1 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192



รูปที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT ณ ความถี่ต่าง ๆ



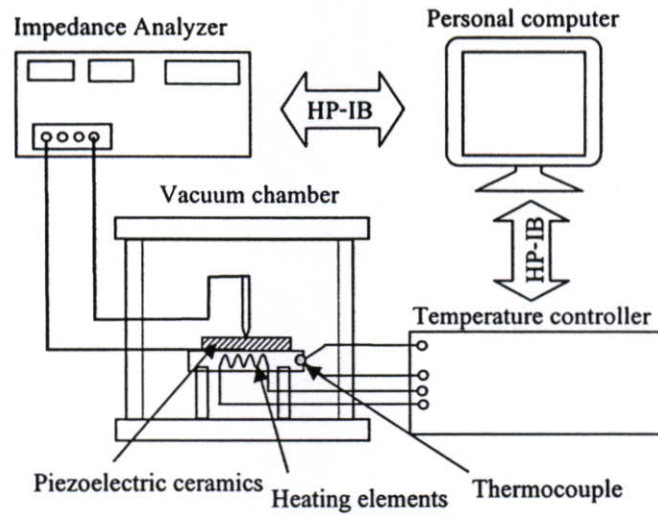
รูปที่ 4.3 แสดงเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP4192



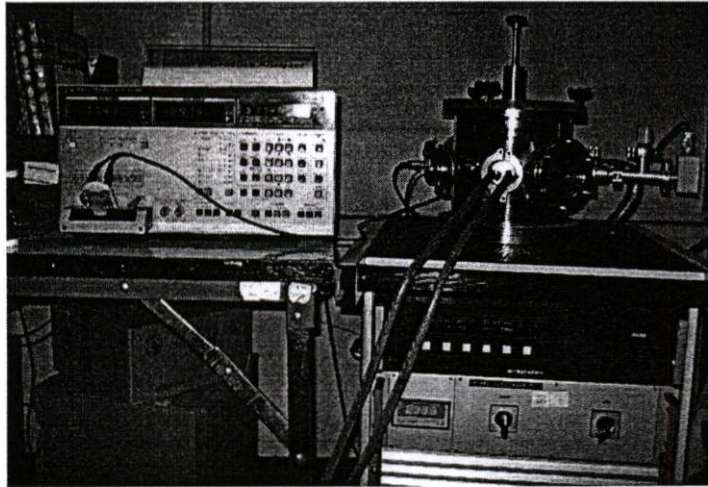
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยโปรแกรมที่ได้ออกแบบ

4.2.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

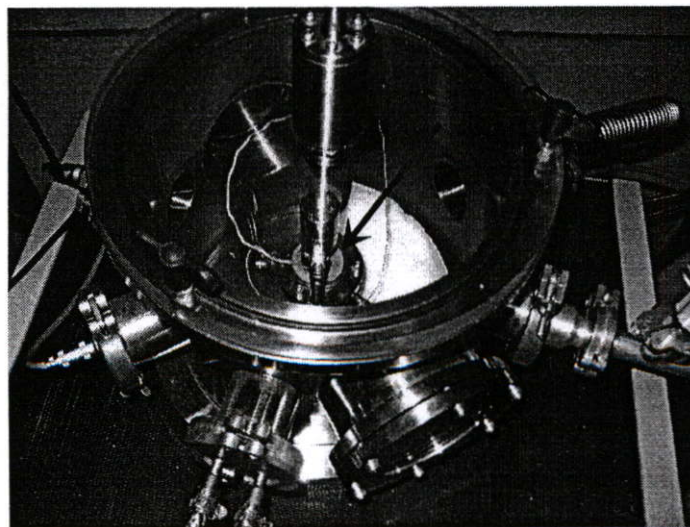
ส่วนประกอบของเครื่องมือสำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์จะคล้ายกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่อุณหภูมิห้อง แต่สาร PZT จะถูกนำไปวางไว้บนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ซึ่งอยู่ภายในตู้ที่มีสภาพเป็นสุญญากาศ และสามารถควบคุมอุณหภูมิด้วยโปรแกรมที่เขียนบน HP Vee ผ่านทางพอร์ต HP-IB ดังรูปที่ 4.5 ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 30 - 210 °ซ. และทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ทุก ๆ การเพิ่มอุณหภูมิ 20 °ซ. ซึ่งการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละครั้ง จะวัดตั้งแต่ความถี่ 2 kHz จนถึงความถี่ 80 kHz และทำการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อใช้คำนวณหาความไม่แน่นอนของเครื่องวัดและสาร PZT



รูปที่ 4.5 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ภายในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ



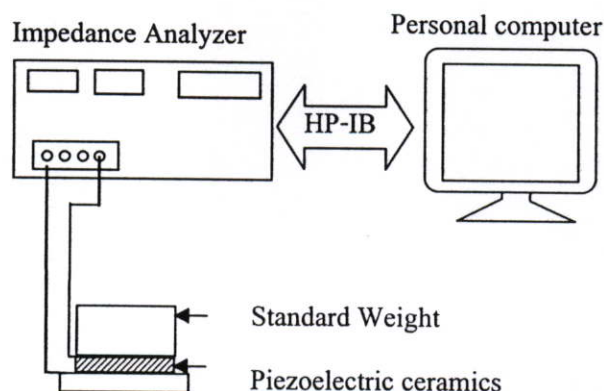
รูปที่ 4.6 แสดงการต่อของเครื่อง HP4192 กับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งชิ้นงานภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

4.2.3 การวัดค่าอิมพีแดนซ์สาร PZT ที่มีการกดทับด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

เป็นการวัดด้วยวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้อง แต่ขณะวัดจะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 0.5, 1.0 ปอนด์ มา กดทับสาร PZT ทำให้เกิดค่าการกดทับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ปอนด์ ซึ่งการกดทับ 1.5 ปอนด์ จะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักทั้งสองมาซ้อนทับกัน ซึ่งการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละครั้ง จะวัดตั้งแต่ความถี่ 2 kHz จนถึงความถี่ 80 kHz และทำการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้ง เพื่อใช้คำนวณหาเฉลี่ย



รูปที่ 4.8 แผนผังการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ภายใต้แรงกดทับ



รูปที่ 4.9 แท่นน้ำหนักทองเหลืองมาตรฐาน 0.5 และ 1 ปอนด์

นอกจากการยังนำได้นำสาร PZT ไปวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4194 ซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่สามารถหาวงจรมุม BVD เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรมุมที่คำนวณได้

4.2.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ทราบค่า

เนื่องจากค่า figure of merit (M) ของชิ้นงาน PZT มีค่ามากกว่า 50 จึงเลือกใช้วิธีที่ 2 ของ IEEE มาใช้หาวงจรมุม BVD โดย นำชิ้นงาน PZT มาต่อกับตัวเก็บประจุค่า 4.48nF, 33.016nF, 1.460nF, 1.097nF, 1.92nF, 5.92nF และ 8.97nF แล้ววัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_{sCL}) จากนั้นพล็อตกราฟระหว่างค่า $f_r / (2(f_{sCL}-f_r))$ กับค่าของตัวเก็บประจุ เพื่อหาความชันของเส้นกราฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/C_1$ (โดยกำหนดให้ $f_r \sim f_s$, $f_{sCL} \sim f_{CL}$ หรือค่าความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน PZT เมื่อต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ)

4.3 การวิเคราะห์ค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด

เนื่องจากการคำนวณหาวงจรมุม BVD จะใช้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r), แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ ๆ ดังนั้นการพิจารณาความเบี่ยงเบนของค่าดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการพิจารณาความถูกต้องของวงจรมุม BVD โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. วัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r), แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) ของชิ้นงาน PZT จำนวน 5 ตัวอย่าง ซ้ำ ๆ กัน 30 ครั้ง
2. วัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่ 1-10 kHz ของชิ้นงาน PZT จำนวน 5 ตัวอย่าง ซ้ำ ๆ กัน 30 ครั้ง
3. หาความผันแปรของระบบการวัด (EV) จากข้อมูลที่หาได้ในข้อ 1 และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่หาได้ในข้อ 2

4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรมุม BVD

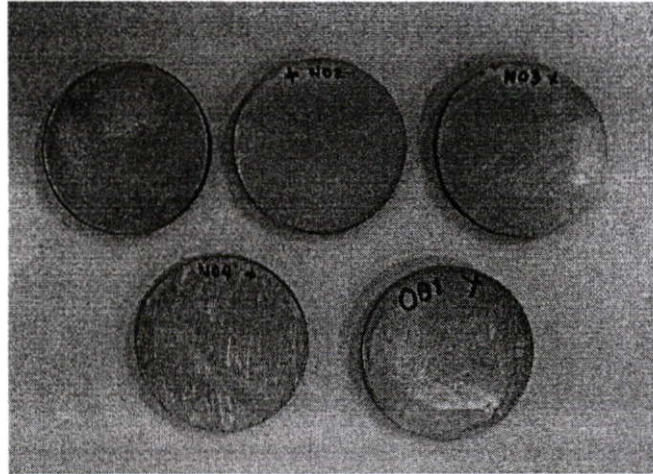
นำข้อมูลของค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์, ความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ ในหัวข้อ 4.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรมุม BVD ด้วยวิธีของ IEEE 176-1987 และ วิธีการคำนวณตามแนวคิดของผู้วิจัย และประเมินความถูกต้องของแนวคิดของผู้วิจัยด้วยการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมุม BVD ที่หาได้จากวิธีของ IEEE, วิธีการของผู้วิจัย และวงจรมุมที่ได้จากเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ รุ่น HP4194 กับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 การสังเคราะห์สาร PZT

ชิ้นงานของสาร PZT ที่ได้จากการสังเคราะห์จำนวน 5 ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5.1 โดยกำหนดชื่อของชิ้นงานเป็น N01, N02, N03, N04 และ O01



รูปที่ 5.1 แสดงรูปชิ้นงาน PZT ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเซรามิกแบบดั้งเดิม

จากชิ้นงานที่ได้จะนำไปการตรวจสอบสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเพียโซอิเล็กทริก เซรามิกได้แก่ ค่าความหนาแน่น, วัสดุค่า d_{33} หมายถึงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยเครื่อง Piezo d-meter Model CADT (Channel Products Inc.) และหาค่า k_t และค่า Q_m จากค่าความจุไฟฟ้าวัดที่ 1 kHz, ค่าความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งใช้แทนค่า R_1 ในตารางที่ 5.6 มาคำนวณตามสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ตามลำดับ โดยแสดงค่า ดังตารางที่ 5.1

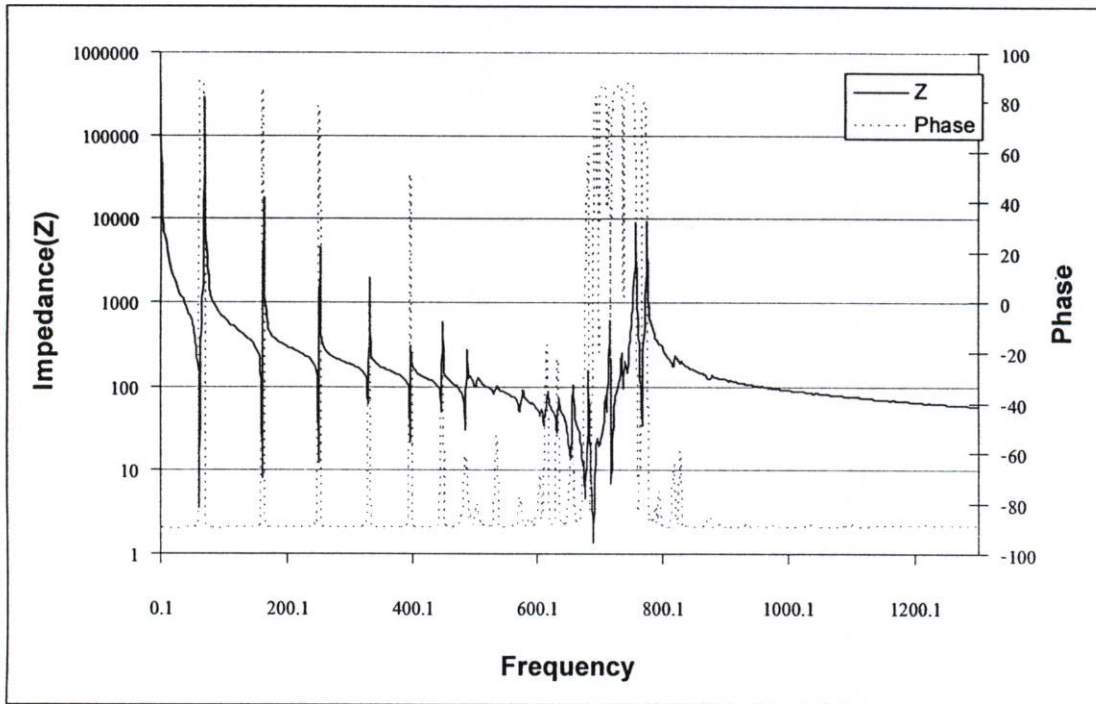
ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านไฟฟ้าของสาร PZT ทั้ง 5 ชิ้นงาน

ชื่อชิ้นงาน PZT	ค่าความหนาแน่น	$d_{33}(10^{-12} \text{C/N})$	$C_f(\text{nF})$	$K(\text{F/m})$	k_t	Q_m
N01	7.38	275	4.7888	1040	0.48	846
N02	7.42	256	3.5619	996	0.51	822
N03	7.40	262	3.5812	1002	0.51	919
N04	7.40	271	3.6474	1016	0.51	844
O01	6.90	261	5.7554	1424	0.48	605

5.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

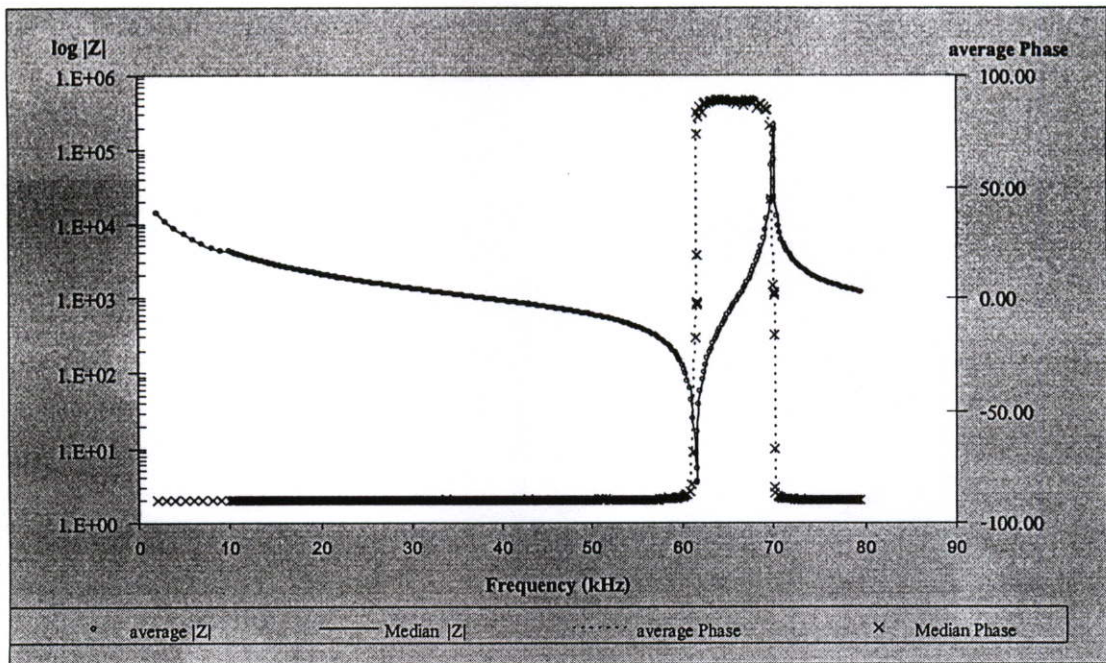
5.2.1 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้อง

จากค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT ที่วัดด้วยเครื่อง HP4192 ที่อุณหภูมิห้อง และไม่มีน้ำหนักกดทับเนื้อสารในช่วงความถี่ 100 Hz จนถึง 13 MHz แสดงในรูปที่ 5.2

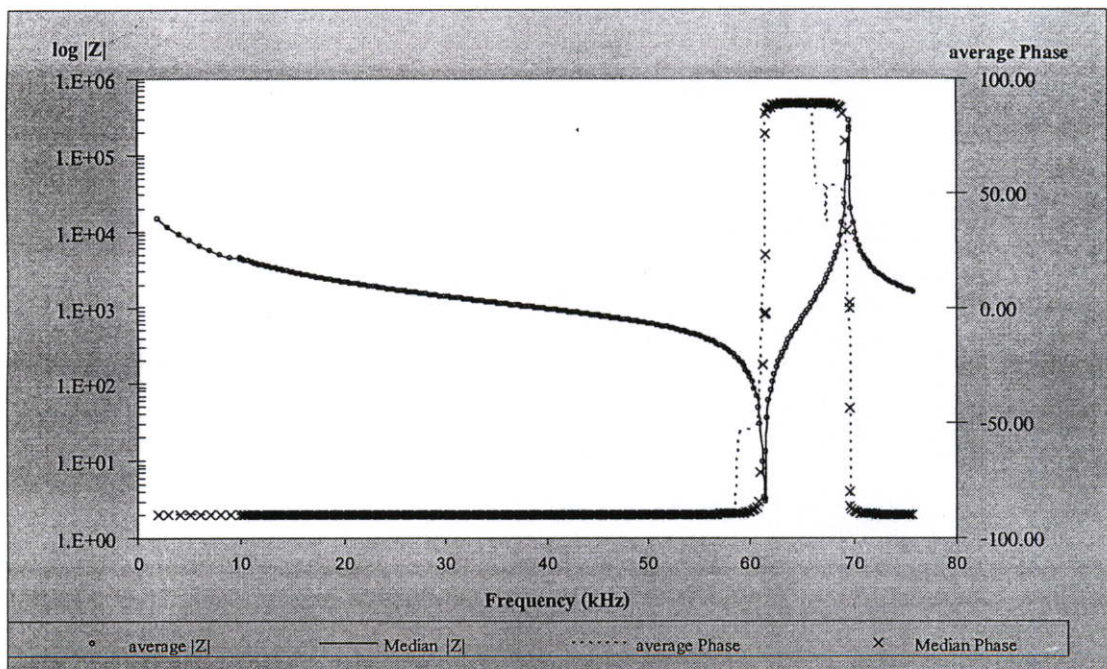


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ $|Z|$ และเฟส (θ) ของชิ้นงาน O01 ที่ความถี่ 100 Hz-13MHz

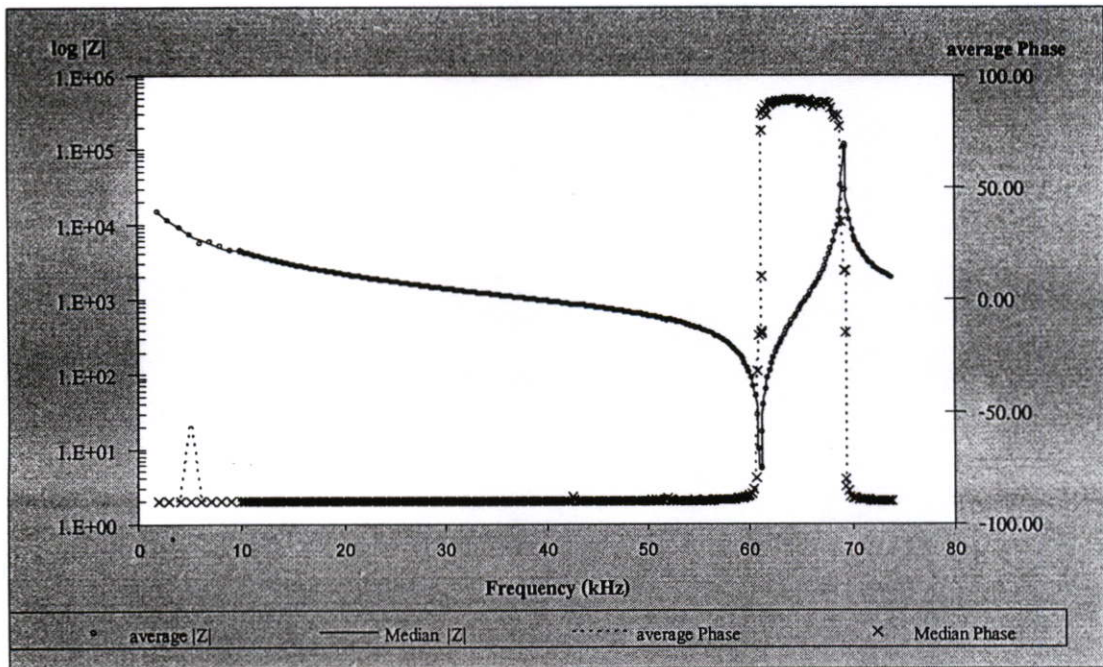
พบว่า สาร PZT มีค่าความถี่เรโซแนนซ์มูลฐานอยู่ระหว่าง 59 - 70 kHz จึงกำหนดช่วงความถี่สำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT อยู่ระหว่างความถี่ 1 kHz จนถึง 80 kHz จากนั้นนำค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดได้ มาหาค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐาน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 - 5.7 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการใช้ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานเป็นตัวแทนของค่าขนาดมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 5 ชิ้นงาน แต่สำหรับค่าเฟสค่าเฉลี่ยจะไม่เหมาะสม ดังตัวอย่างเส้นกราฟของค่าเฉลี่ยเฟส (average phase) ของชิ้นงาน N02 และ N03 ที่มีค่าเฉลี่ยผิดปกติในบางช่วง เนื่องจากข้อมูลบางค่าในการทดลองวัดซ้ำทั้ง 5 ครั้ง มีบางค่าสูงมากผิดปกติ ซึ่งการใช้ค่ามัธยฐานเป็นค่ากลางจึงเหมาะสมมากกว่า ซึ่งข้อมูลในการทดลองนี้จะถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้ ในหัวข้อ 5.4



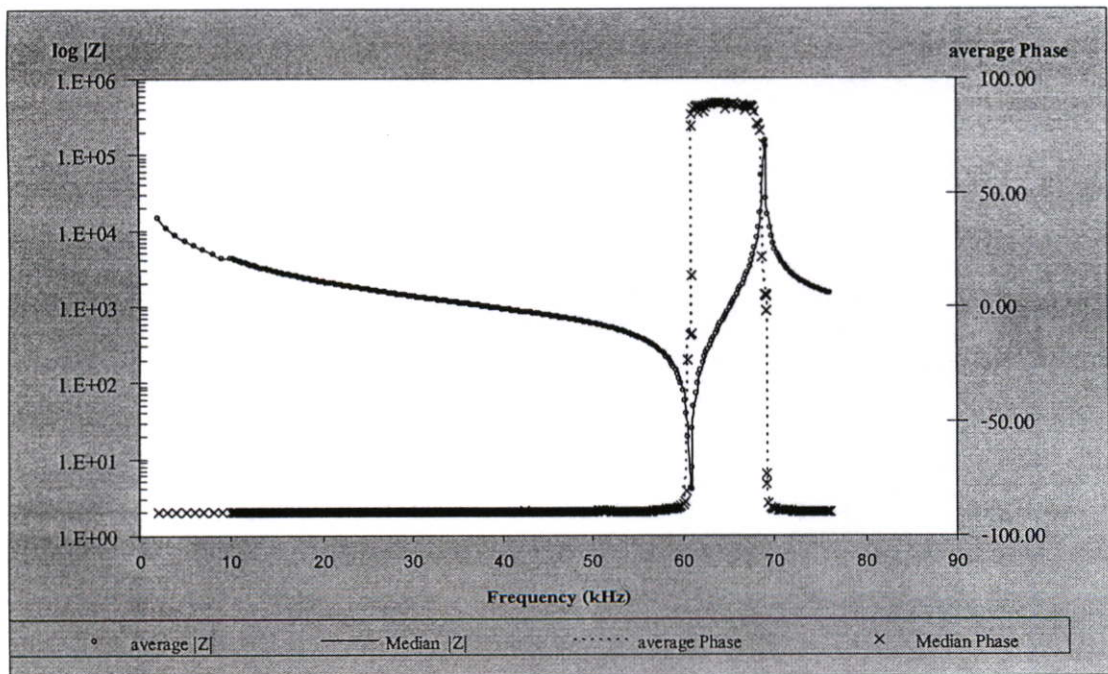
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz - 80 kHz ของชิ้นงาน N01



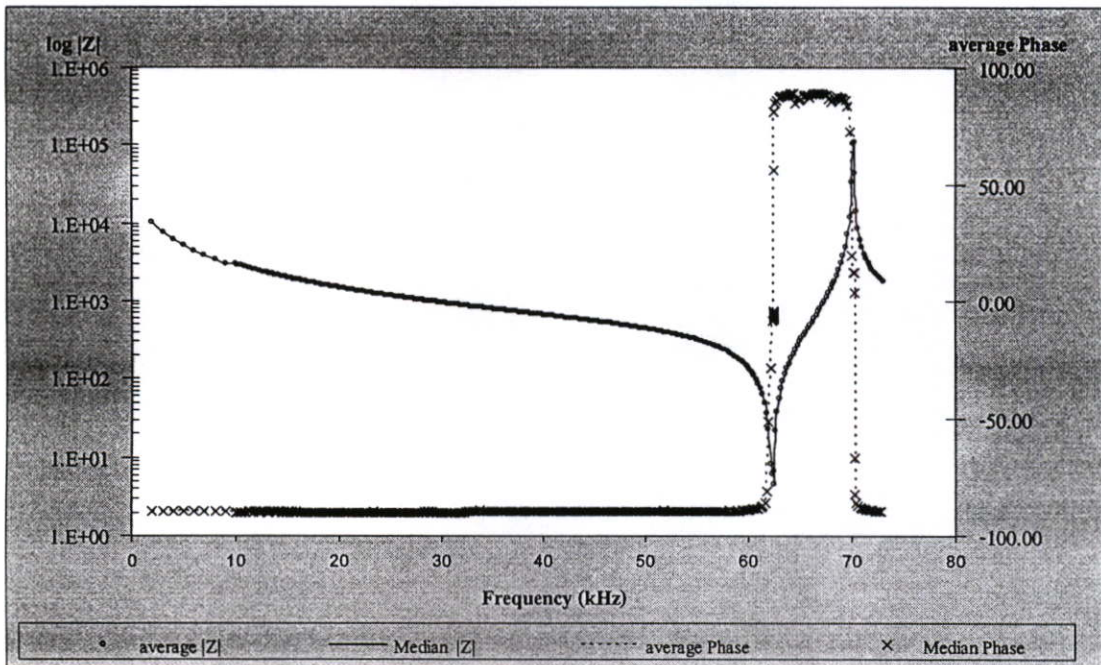
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน N02



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชั้นงาน N03



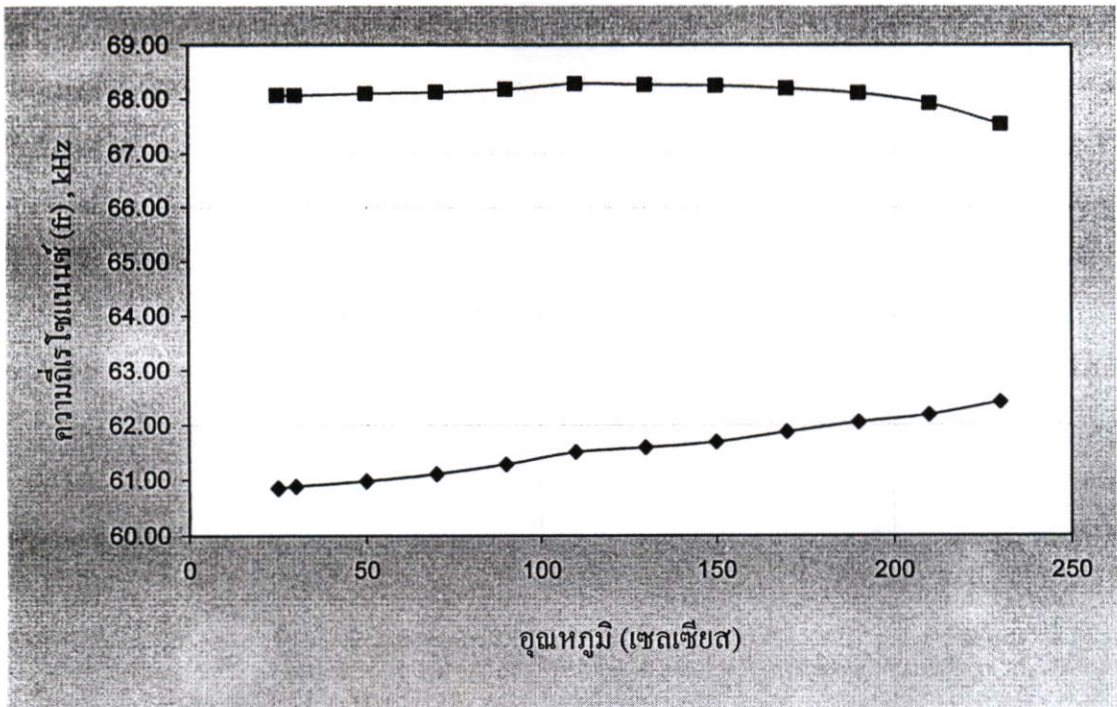
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชั้นงาน N04



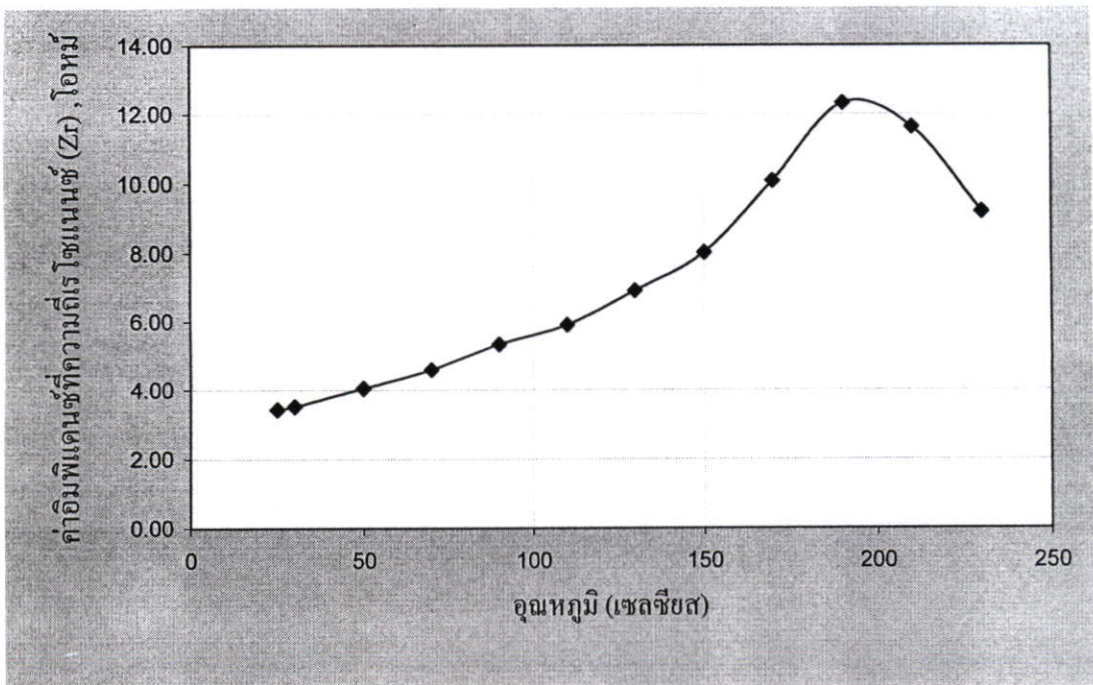
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และเฟสที่ความถี่ 100 Hz-80 kHz ของชิ้นงาน O01

5.2.2 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ทดลองนำชิ้นงาน PZT เบอร์ N01 มาใส่ในเครื่องควบคุมสุญญากาศ และทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิ 25, 30, 50, 70, ..., 230 °ซ. พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้อง แต่มีการเลื่อนตำแหน่งของจุดความถี่เรโซแนนซ์ และ แอนตี้เรโซแนนซ์ โดยที่ อุณหภูมิ 230 °ซ. ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากเดิมประมาณ 1.6 kHz และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์มีค่าลดลงประมาณ 1 kHz นั่นคือความต่างระหว่างความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์มีค่าลดลงประมาณ 2.6 kHz ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่ามากขึ้น จนถึงอุณหภูมิ 190 °ซ. ค่าอิมพีแดนซ์เริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 แสดงความถี่เรโซแนนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 5.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ

5.2.3 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่มีการกดทับด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

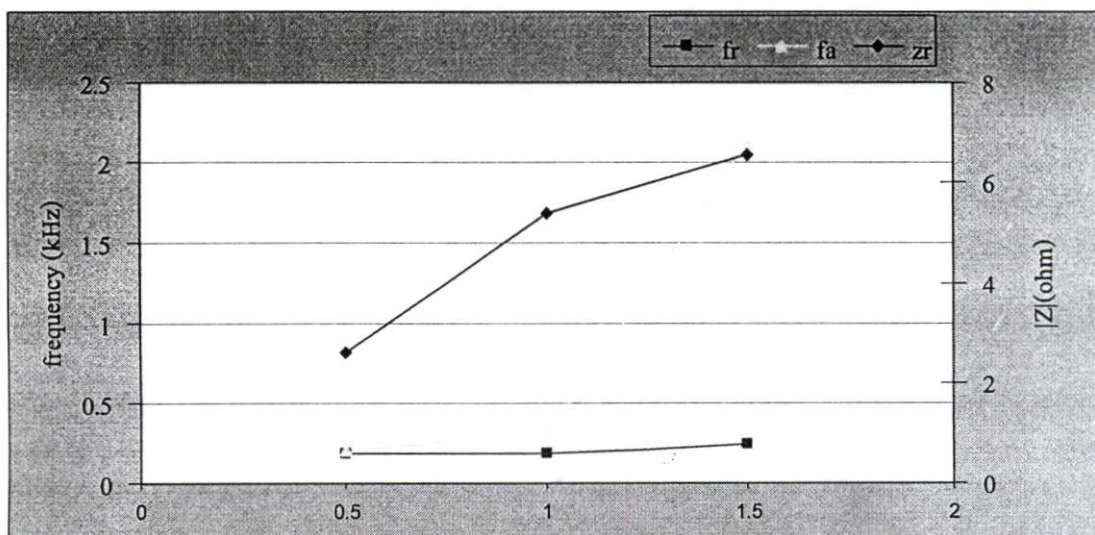
จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์เพื่อหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงานในสภาวะที่มีน้ำหนักกดทับ 0.5, 1 และ 1.5 ปอนด์ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 แล้วนำมาหาค่าความต่างจากสภาวะที่ไม่มีน้ำหนักกดทับ ดังตารางที่ 5.3 และกราฟรูปที่ 5.10 พบว่าชิ้นงานที่มีน้ำหนักกดทับ 1.5 ปอนด์ จะมีความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น 0.24 kHz และค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น 2 kHz และค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อน้ำหนักกดทับมากขึ้น ประมาณ 6.5Ω มีแนวโน้มเริ่มคงที่

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงานภายใต้สภาวะมีแรงกดทับ

ชิ้นงาน	พารามิเตอร์	น้ำหนักกดทับ(pound)			
		0	0.5	1	1.5
N01	Z_r	4.147	6.468	11.326	10.693
	f_r	61.700	61.850	62.000	62.000
	f_a	70.100	70.400	70.700	70.700
N02	Z_r	3.601	8.770	7.536	10.553
	f_r	61.550	61.850	61.700	61.850
	f_a	69.800	69.950	69.950	79.099
N03	Z_r	3.964	5.575	10.587	5.506
	f_r	61.250	61.400	61.400	61.400
	f_a	69.350	69.500	69.350	69.350
N04	Z_r	6.239	9.649	9.244	8.404
	f_r	61.100	61.250	61.250	61.400
	f_a	69.200	69.350	69.350	69.350
O01	Z_r	5.215	5.712	11.373	20.804
	f_r	61.700	61.849	61.849	61.849
	f_a	69.500	69.800	70.099	70.099

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปจากสถานะไม่มีแรงกดทับ

พารามิเตอร์	น้ำหนักกดทับ (pound)		
	0.5	1	1.5
ΔZ_r	2.602	5.380	6.560
Δf_r	0.180	0.180	0.240
Δf_a	0.210	0.300	2.130



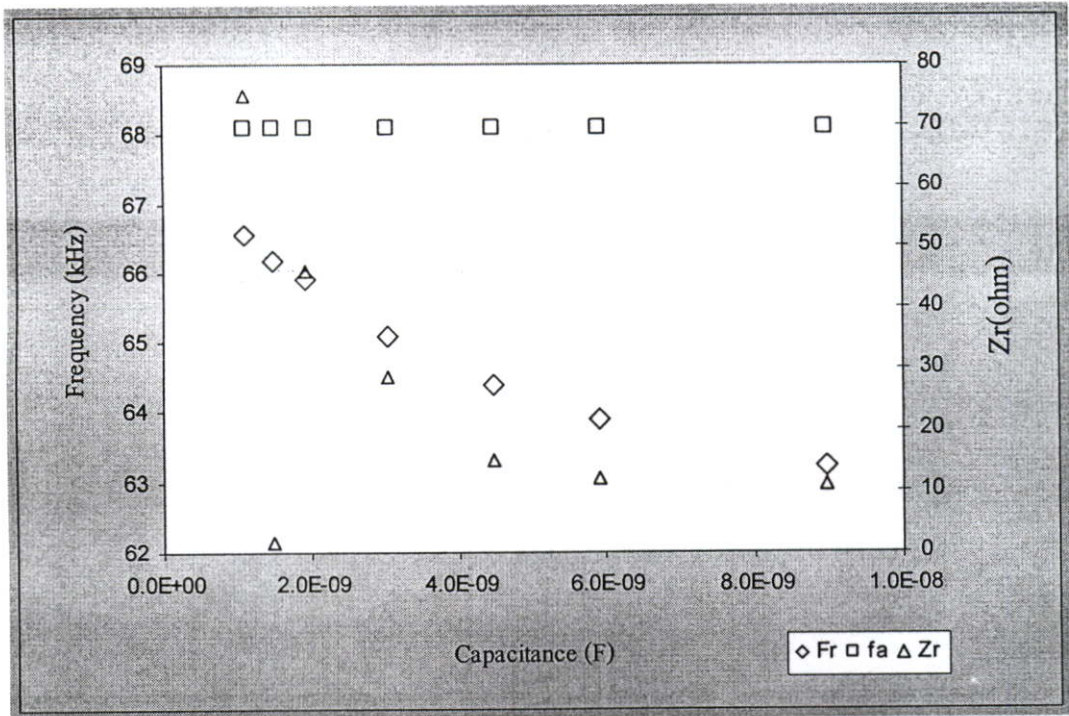
รูปที่ 5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r), ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปจากสถานะไม่มีแรงกดทับ

5.2.4 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ทราบค่า

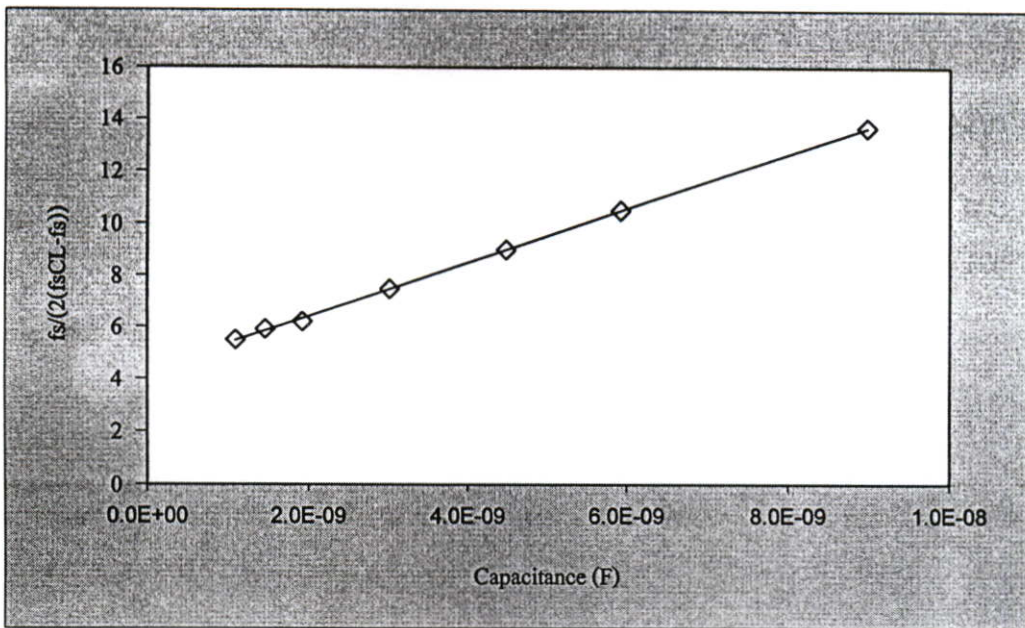
ผลการทดลองนำตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่มีค่า 4.48nF, 33.016nF, 1.460nF, 1.097nF, 1.92nF, 5.92nF และ 8.97nF มาต่อกับชิ้นงานทั้ง 5 ตัวอย่างคือ N01, N02, N03, N04 และ O01 แล้ววัดค่าความถี่ f_r , ความถี่ f_a และ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) และกราฟแสดงค่า $f_s / (2(f_{s,CL} - f_r))$ ดังแสดงรูปที่ 5.11 - 5.20 โดยในขั้นตอนการหาวงจร BVD ตามวิธีที่ 2 ของ IEEE ในหัวข้อ 3.5.1.2 และได้ความชันของเส้นกราฟเท่ากับ $1/C_1$ ของทั้ง 5 ชิ้นงานดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความชันของเส้นกราฟ $f_r / (2(f_{scL} - f_r))$ ต่อค่าของตัวเก็บประจุที่มาต่ออนุกรมกับ
ชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

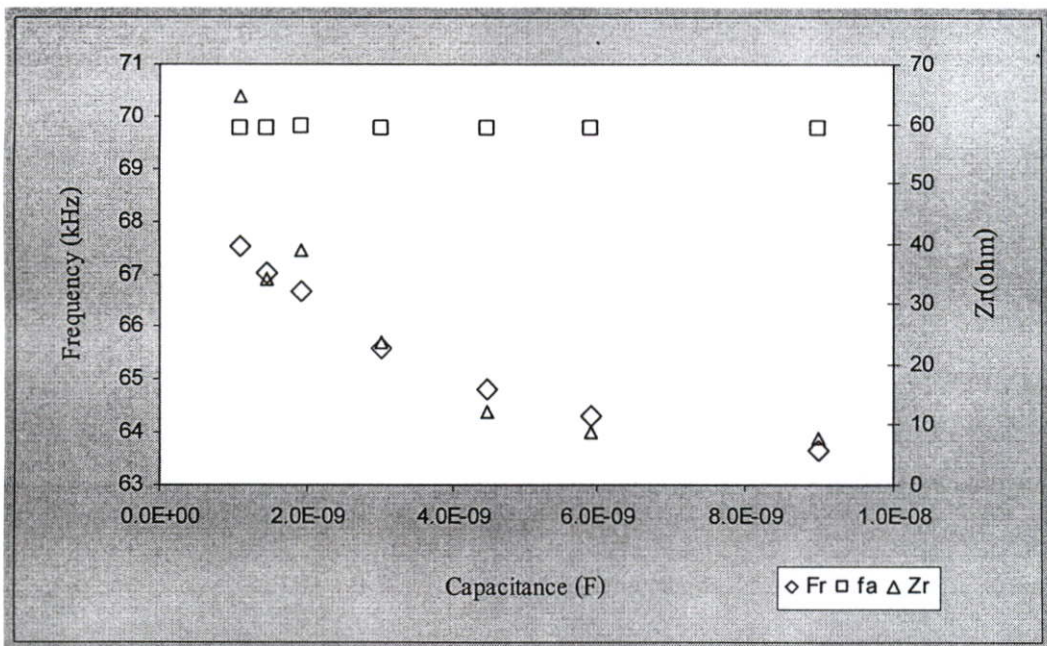
ชิ้นงาน	ความชันของกราฟ= $1/C_1$ (10^9)	C_1 (nF)
N01	1.040	0.961
N02	1.237	0.808
N03	1.235	0.810
N04	1.281	0.781
O01	0.809	1.235



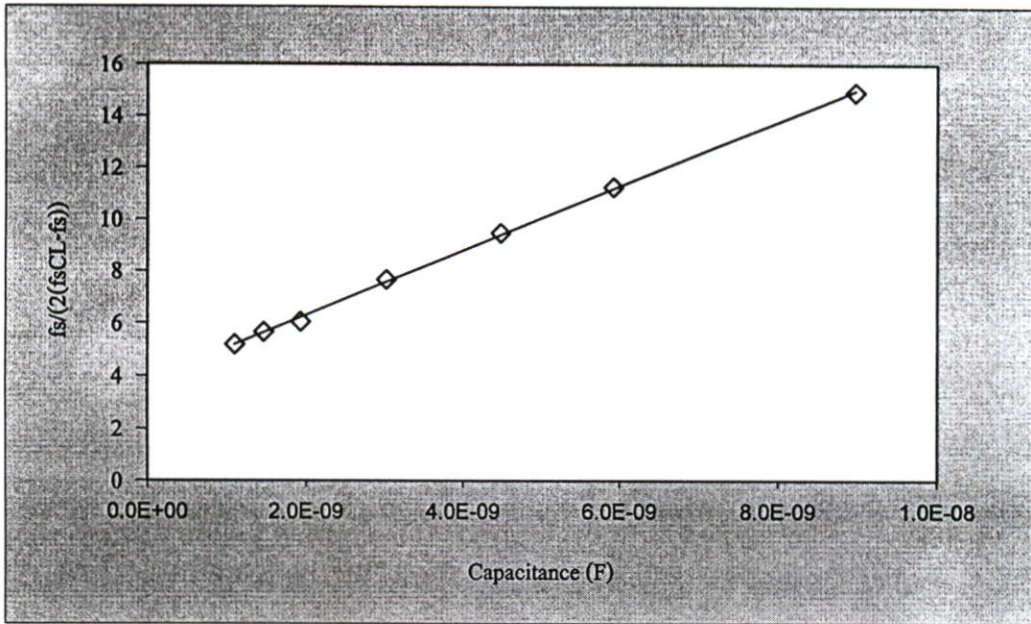
รูปที่ 5.11 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่างๆ



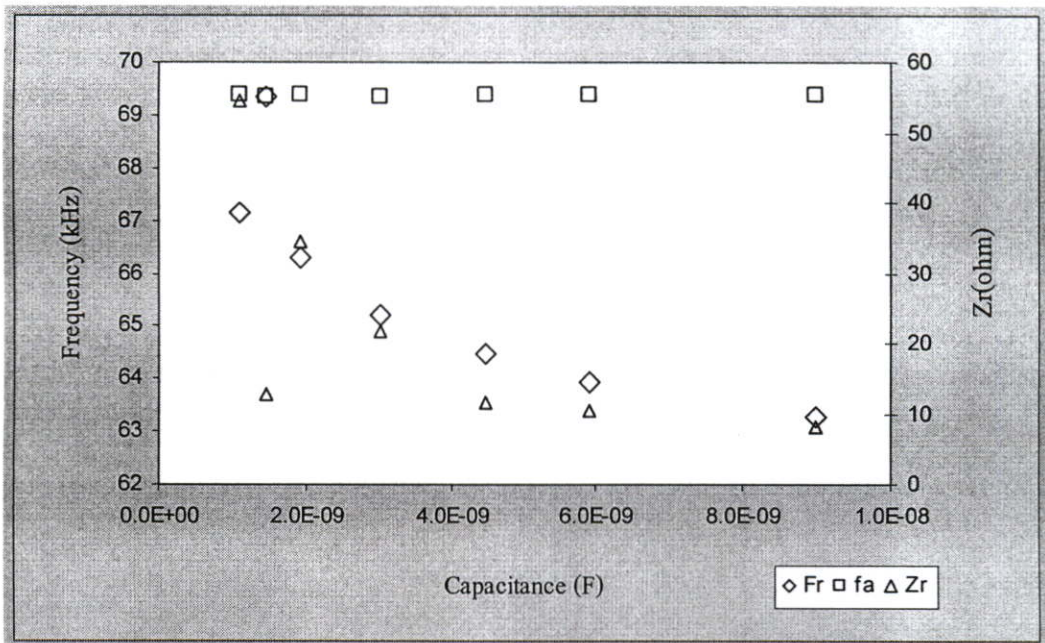
รูปที่ 5.12 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL} - f_s))$ ของชิ้นงาน N01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



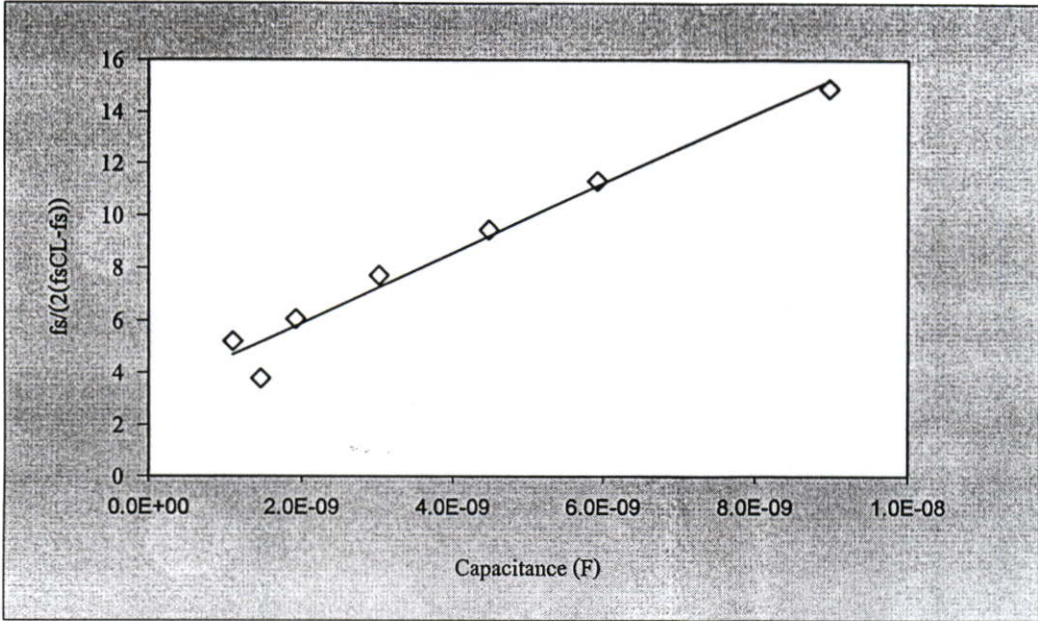
รูปที่ 5.13 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N02 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



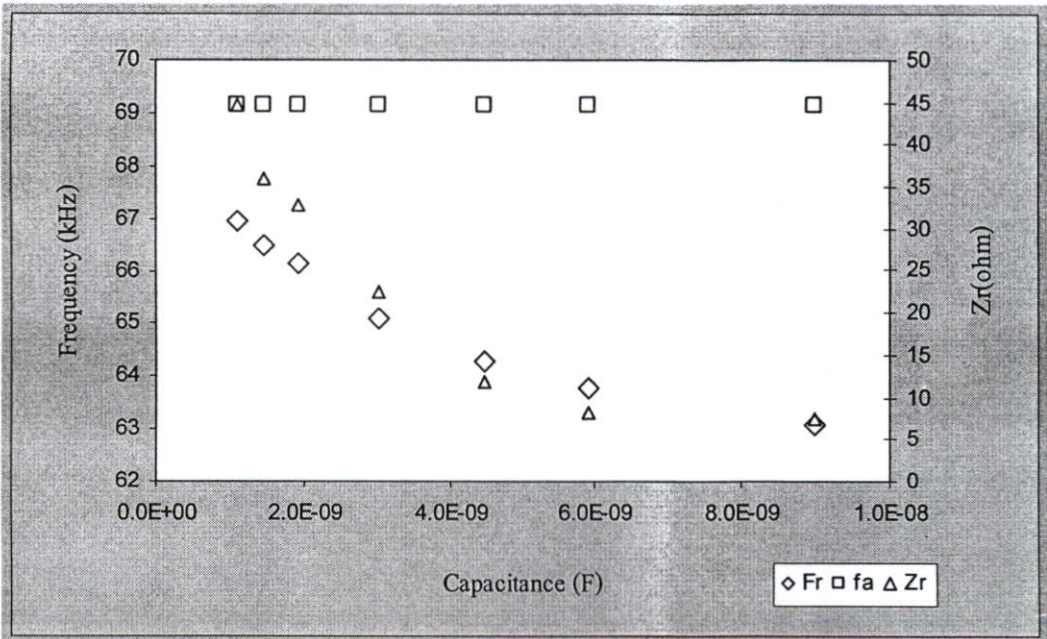
รูปที่ 5.14 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL} - f_s))$ ของชิ้นงาน N02 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่างๆ



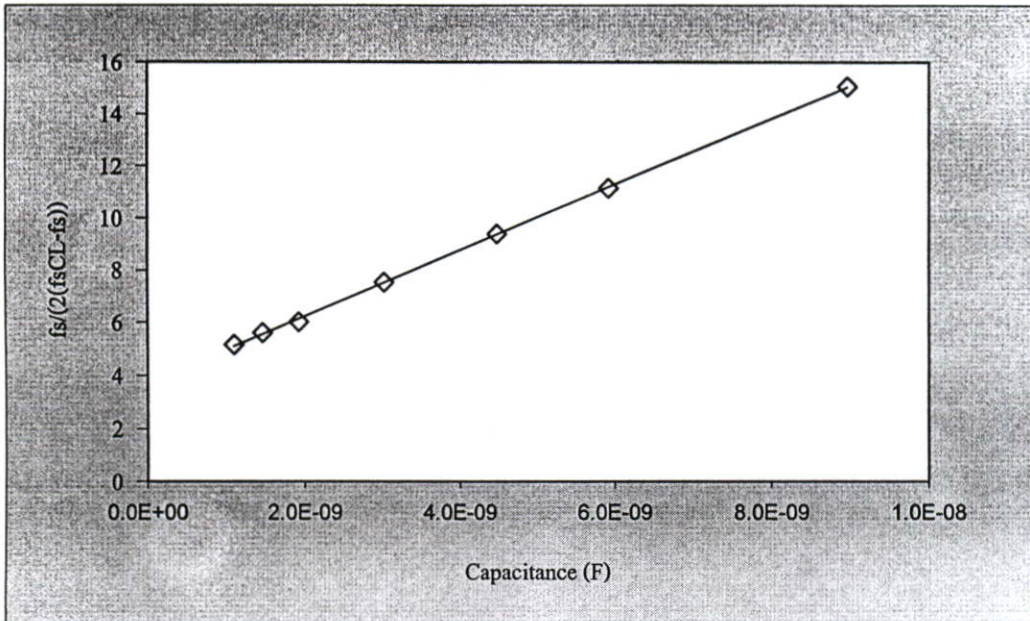
รูปที่ 5.15 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N03 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่างๆ



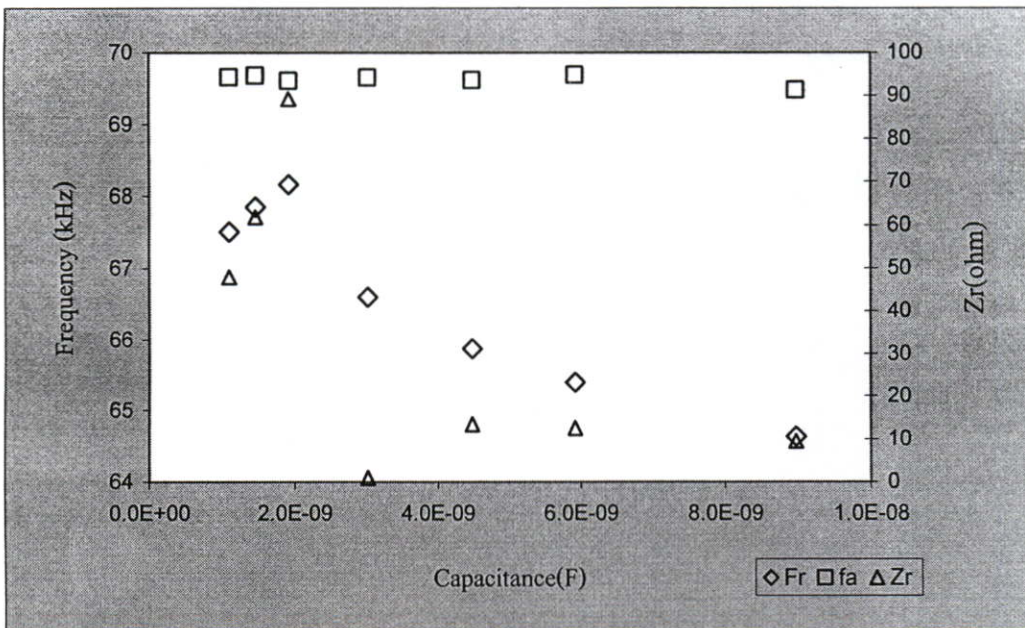
รูปที่ 5.16 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL} - f_s))$ ของชิ้นงาน N03 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



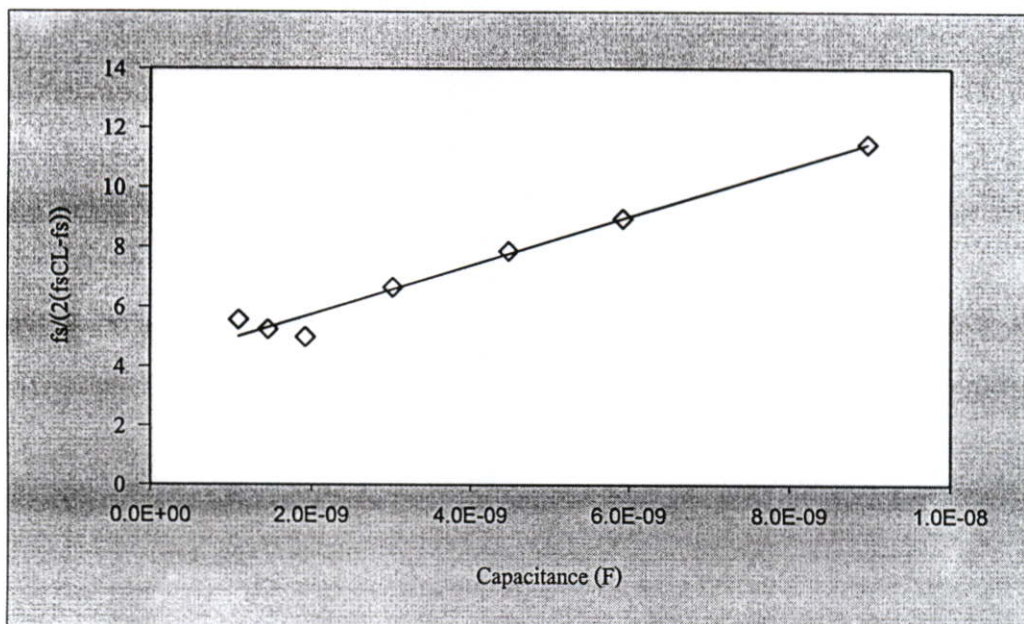
รูปที่ 5.17 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N04 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5.18 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL} - f_s))$ ของชิ้นงาน N04 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5.19 แสดงค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน O01 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5.20 แสดงค่า $f_s / (2(f_{sCL} - f_s))$ ของชิ้นงาน 001 อนุกรมกับตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ

5.3 การวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง

5.3.1 ผลการวิเคราะห์ความผันแปรของเครื่องมือและวิธีวัด (EV)

การศึกษาถึงความผันแปรของเครื่องมือและวิธีวัดค่า f_r , f_a และ Z_r จะพิจารณาจากความสามารถของระบบที่สามารถวัดค่าซ้ำ ๆ กัน (repeatability) ด้วยการวัดค่า f_r , f_a และ Z_r (ตามวิธีการหาในหัวข้อ 4.2.1) ของชิ้นงาน PZT จำนวน 5 ตัวอย่าง จำนวนครั้ง 30 ครั้ง ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 5.5 - 5.7 แล้วนำข้อมูลของค่า f_r , f_a และ Z_r ที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย (\bar{X}), ค่าพิสัย (R), ค่าพิสัยของค่าเฉลี่ย ($R(\bar{X})$) และค่าเฉลี่ยพิสัย ($R(\bar{X})$) ของกลุ่มข้อมูล ซึ่งแสดงในตาราง 5.8 จากนั้นนำค่าในตารางมาคำนวณค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด (EV) ดังตัวอย่างเช่น จากกลุ่มของข้อมูลของค่า f_r ที่วัดจากชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นงาน หรือ $n=5$ และจำนวนครั้งที่วัดซ้ำ (r) เท่ากับ 30 จากตารางที่ 3.1 จะได้ค่า d_2 เท่ากับ 4.086 เพื่อนำไปคำนวณหาค่า EV ดังนี้

การประมาณค่าเบี่ยงเบน σ_{EV} จากสมการ

$$\sigma_{EV} = \frac{\bar{R}(X)}{d_2}$$

$$\sigma_{AV} = \frac{0.005278}{4.086} = 0.00129$$

และนำค่า σ_{EV} ไปหาค่า EV ในสมการ

$$EV = 5.15\sigma_{EV}$$

$$EV = 5.15 \cdot 0.00129 = 0.0066$$

แสดงว่าความผันแปรของเครื่องมือในการวัดค่า f_r มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 0.0033 kHz รอบค่าจริงของ f_r สำหรับค่า EV ของค่า f_r , f_a และ Z_r ที่คำนวณได้จะแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง

ครั้งที่	N01	N02	N03	N04	O01
1	61.14333	61.58026	61.25449	61.04959	61.14002
2	61.14396	61.58028	61.25517	61.05009	61.13997
3	61.14456	61.58033	61.25571	61.05057	61.14025
4	61.14505	61.58042	61.25614	61.051	61.14062
5	61.14552	61.57876	61.25654	61.05133	61.14062
6	61.14592	61.57897	61.25703	61.05164	61.14083
7	61.14606	61.57912	61.25741	61.05195	61.14082
8	61.14638	61.57918	61.25776	61.05215	61.14158
9	61.14664	61.57932	61.25821	61.0524	61.141
10	61.14689	61.57908	61.25854	61.05257	61.14108
11	61.14717	61.57948	61.25883	61.05277	61.14108
12	61.14741	61.57935	61.2591	61.05294	61.14158
13	61.14754	61.57944	61.25943	61.05314	61.14131
14	61.14775	61.57952	61.25968	61.05331	61.14131
15	61.14795	61.57959	61.25991	61.05352	61.14131
16	61.14821	61.57963	61.2601	61.05365	61.14108
17	61.1484	61.57967	61.26031	61.05379	61.14158
18	61.14851	61.57971	61.26049	61.05383	61.14158
19	61.14864	61.57974	61.26073	61.05383	61.14156
20	61.14884	61.57974	61.26093	61.05395	61.14158
21	61.14904	61.57979	61.26114	61.05409	61.14181
22	61.14914	61.57987	61.26134	61.0542	61.14181
23	61.14933	61.57984	61.26148	61.05432	61.14452
24	61.14949	61.57987	61.26166	61.0544	61.14186
25	61.14961	61.57984	61.26181	61.05457	61.14452
26	61.14974	61.57991	61.26204	61.05464	61.14193
27	61.14993	61.57995	61.26216	61.05469	61.14193
28	61.15015	61.57997	61.26229	61.05472	61.14193
29	61.15021	61.58002	61.26244	61.05039	61.14206
30	61.15027	61.58004	61.2626	61.05082	61.14206

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง

ครั้งที่	N01	N02	N03	N04	O01
1	68.21405	69.75729	69.35688	69.16261	68.19147
2	68.2143	69.7578	69.35725	69.16302	68.19209
3	68.21462	69.75836	69.35739	69.16302	68.19259
4	68.2148	69.75875	69.35767	69.16277	68.20312
5	68.21505	69.75891	69.3579	69.16302	68.19271
6	68.21522	69.75911	69.3581	69.16289	68.19307
7	68.2154	69.75924	69.35836	69.15624	68.19319
8	68.21562	69.75942	69.35855	69.15624	68.19332
9	68.21573	69.75952	69.35869	69.16283	68.19334
10	68.21582	69.75958	69.35885	69.16303	68.19361
11	68.21602	69.75959	69.35896	69.16303	68.19373
12	68.21608	69.75972	69.359	69.16303	68.19381
13	68.21608	69.75974	69.3591	69.16301	68.19391
14	68.21621	69.75983	69.35921	69.16307	68.19403
15	68.21628	69.75995	69.35937	69.16306	68.19431
16	68.21638	69.75996	69.35936	69.16302	68.19416
17	68.21646	69.76004	69.35937	69.1629	68.19431
18	68.21651	69.76008	69.35959	69.16278	68.19429
19	68.21668	69.76024	69.3597	69.16277	68.19441
20	68.21675	69.76031	69.3598	69.16405	68.19453
21	68.21678	69.76039	69.35983	69.16256	68.19459
22	68.21678	69.7605	69.35986	69.16265	68.19466
23	68.217	69.76049	69.36004	69.16271	68.19466
24	68.21713	69.76061	69.36018	69.16303	68.19482
25	68.21717	69.76066	69.36023	69.16303	68.19489
26	68.21725	69.76064	69.36028	69.16298	68.195
27	68.21735	69.7607	69.36033	69.16302	68.19502
28	68.21747	69.76074	69.36036	69.16299	68.19479
29	68.21749	69.76081	69.36051	69.16301	68.19479
30	68.21753	69.76086	69.36048	69.16329	68.19479

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่วัดซ้ำ 30 ครั้ง

ครั้งที่	N01	N02	N03	N04	O01
1	3.347	4.027	3.642	3.852	3.838
2	3.344	4.025	3.631	3.836	3.832
3	3.34	4.025	3.626	3.808	3.828
4	3.338	4.024	3.619	3.794	3.826
5	3.334	4.064	3.614	3.8	3.824
6	3.333	4.053	3.611	3.794	3.823
7	3.339	4.046	3.607	3.789	3.821
8	3.334	4.045	3.603	3.787	3.822
9	3.333	4.042	3.6	3.785	3.821
10	3.331	4.038	3.594	3.786	3.822
11	3.33	4.042	3.591	3.785	3.821
12	3.329	4.044	3.589	3.783	3.82
13	3.328	4.038	3.588	3.784	3.818
14	3.328	4.037	3.585	3.792	3.818
15	3.328	4.035	3.581	3.789	3.818
16	3.328	4.034	3.58	3.787	3.815
17	3.328	4.034	3.581	3.788	3.814
18	3.328	4.033	3.58	3.787	3.815
19	3.329	4.032	3.577	3.792	3.814
20	3.329	4.03	3.576	3.787	3.812
21	3.328	4.03	3.573	3.785	3.814
22	3.327	4.029	3.574	3.787	3.812
23	3.327	4.03	3.575	3.787	3.821
24	3.326	4.03	3.573	3.788	3.812
25	3.326	4.029	3.57	3.792	3.819
26	3.326	4.029	3.571	3.791	3.814
27	3.326	4.03	3.57	3.792	3.812
28	3.324	4.03	3.568	3.793	3.811
29	3.324	4.03	3.569	4.325	3.812
30	3.324	4.028	3.57	4.293	3.81

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยของค่า f_r , f_a และ Z_r ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ

O01

ชิ้นงาน	N01	N02	N03	N04	O01	ค่าพิสัย ของเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย ของค่า พิสัย
ค่าเฉลี่ยของ f_r (kHz)	61.148	61.580	61.260	61.053	61.142	0.527	-
ค่าเฉลี่ยของ f_a (kHz)	68.216	69.760	69.359	69.163	68.194	1.566	-
ค่าเฉลี่ยของ Z_r (Ω)	3.331	4.035	3.590	3.828	3.819	0.704	-
ค่าพิสัยของ f_r (kHz)	0.007	0.002	0.008	0.005	0.005	-	0.005
ค่าพิสัยของ f_a (kHz)	0.003	0.004	0.004	0.009	0.012	-	0.006
ค่าพิสัยของ Z_r (Ω)	0.023	0.040	0.074	0.542	0.028	-	0.141

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความผันแปรของเครื่องมือวัด (EV) เมื่อพิจารณาจากค่าความถี่เรโซแนนซ์(f_r),
ค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r)

พารามิเตอร์ที่วัด	ความผันแปรของเครื่องมือ (EV)	พิสัยรอบค่าจริง
ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r :kHz)	0.0066	± 0.0033
ค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a :kHz)	0.0076	± 0.0038
ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r : Ω)	0.178	± 0.0890

5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความผันแปรของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วง 100 Hz - 10 kHz

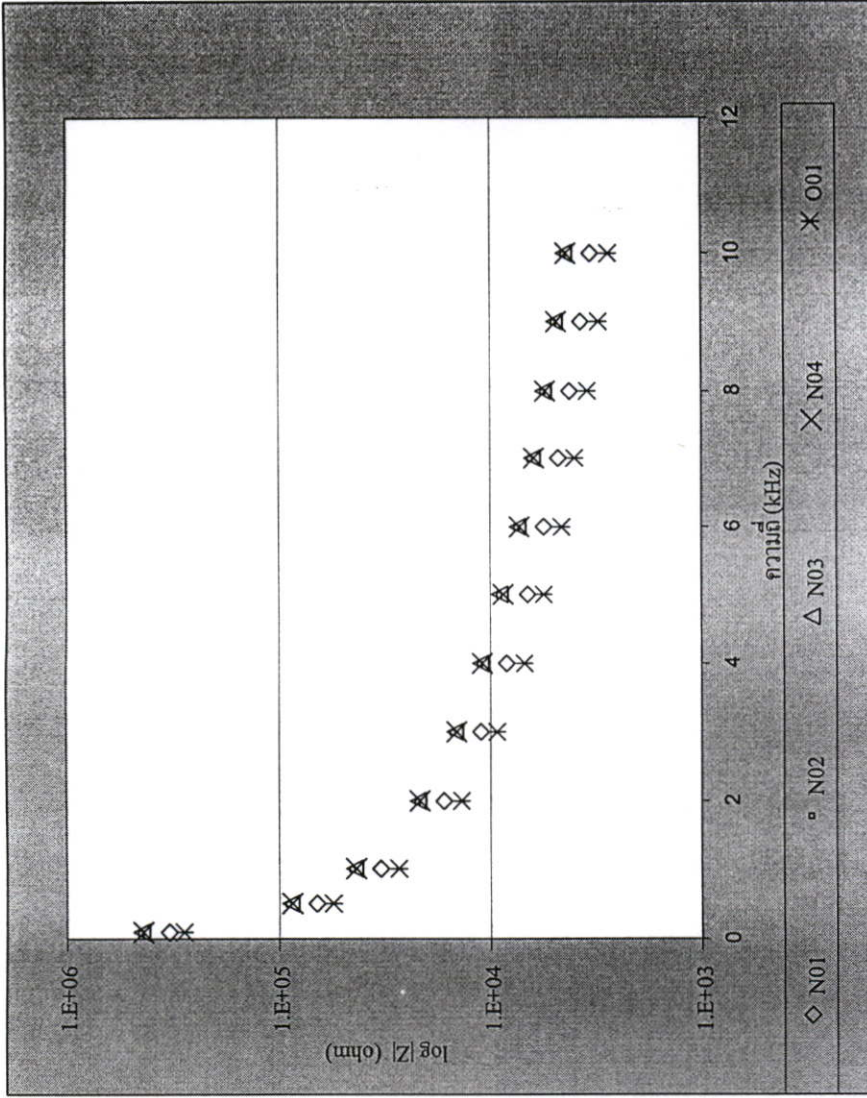
เพื่อนำข้อมูลอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ต่ำๆ ไปคำนวณหาวงจร BVD ตามวิธีอิมพีแดนซ์ในหัวข้อ 3.5.2 จึงได้นำชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 มาทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100Hz - 10kHz โดยทำการวัดซ้ำๆ กันจำนวน 30 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 5.10 และ กราฟในรูปที่ 5.21 และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามสมการที่ 3.9 ดังแสดงในตารางที่ 5.11 และ กราฟในรูปที่ 5.22 ซึ่งในช่วงความถี่ต่ำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะสูง และมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถของเครื่อง HP4192 ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าอิมพีแดนซ์ จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ค่าสูงๆ จะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

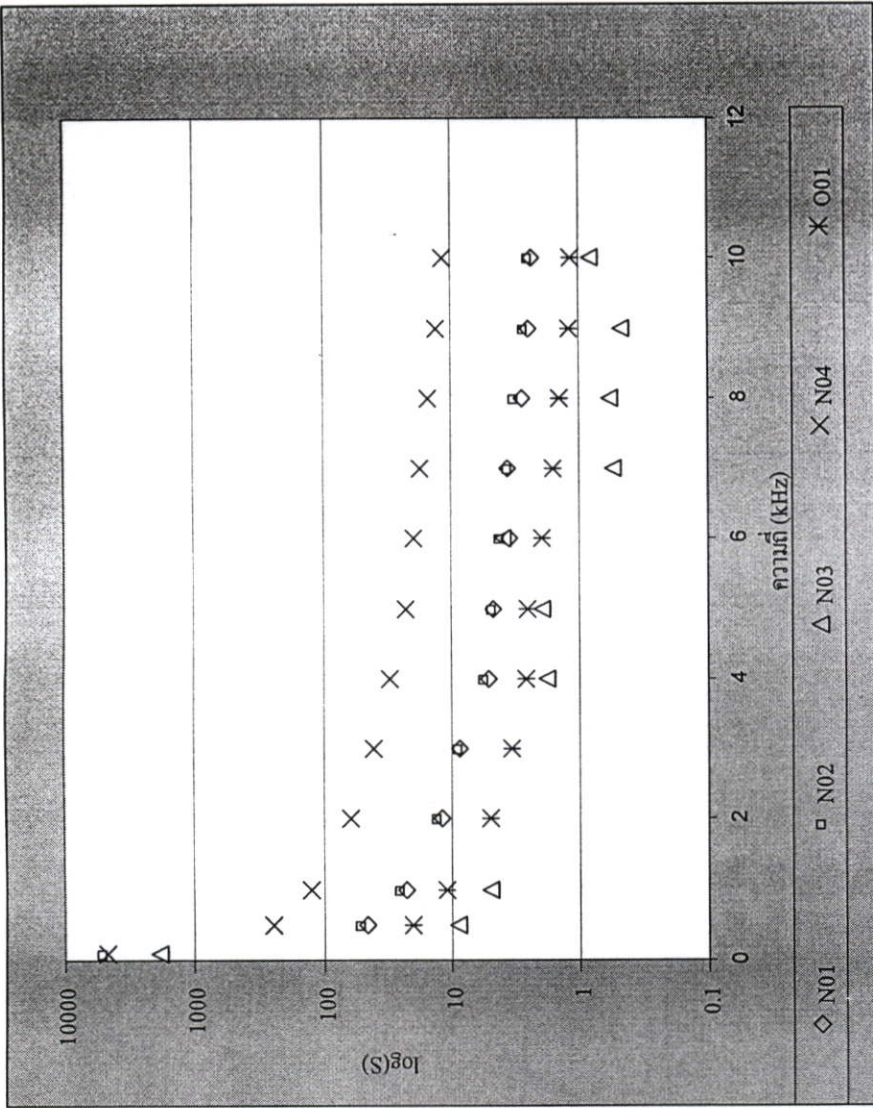
Frequency (kHz)	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
N01	330000	66414	33252	16646	11108	8333	6667	5553	4762	4163	3697	3325
N02	445667	89272	44705	22376	14933	11205	8961	7464	6398	5593	4967	4466
N03	440333	88811	44464	22250	14850	11140	8917	7420	6361	5562	4939	4441
N04	437000	87204	43658	21848	14577	10936	8738	7293	6251	5463	4851	4362
O01	280000	55276	27667	13845	9236	6926	5548	4620	3959	3462	3074	2765

ตารางที่ 5.11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

Frequency (kHz)	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
N01	0.00	46.44	23.25	11.92	8.74	5.24	4.72	3.51	3.63	2.80	2.51	2.34
N02	5040.07	52.00	25.69	13.05	9.07	5.71	4.84	4.16	3.69	3.26	2.73	2.49
N03	1825.74	9.07	5.04	0.00	0.00	1.83	1.98	3.92	0.55	0.57	0.47	0.81
N04	4660.92	247.63	124.95	62.72	41.27	30.84	22.90	19.55	17.62	15.22	13.06	11.67
O01	0.00	20.25	11.12	5.07	3.43	2.63	2.54	1.98	1.62	1.43	1.19	1.17



รูปที่ 5.21 แสดงกราฟของค่าเฉลี่ยของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01



รูปที่ 5.22 แสดงกราฟของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 kHz ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

5.4 ผลการคำนวณทางจร BVD

5.4.1 การคำนวณทางจร BVD โดยวิธีของ IEEE

เมื่อพิจารณาจากค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์ในตารางที่ 5.8 และค่า Q ที่แทนด้วยค่า Q_m ในตารางที่ 5.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่า effective coupling factor (k_{eff}) และค่า figure of merit (M) ตามสมการที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ โดยสมมติให้ค่า $f_r \sim f_s$ และค่า $f_a \sim f_p$ ดังแสดงค่าในตารางที่ 5.12 ซึ่งพบว่าค่า M มีค่ามากกว่า 50 จึงเลือกการคำนวณทางจร BVD ตามวิธี IEEE ในวิธีที่ 2 ซึ่งค่า C_1 ได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.2.4 และค่า C_0, L_1 หาได้โดยใช้สมการที่ 3.15 และ 3.16

ตารางที่ 5.12 ค่า effective coupling factor (k_{eff}) และ ค่า figure of merit (M) ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01

ชื่อตัวอย่าง	ค่า k_{eff}	ค่า M
N01	0.443284	206.8945
N02	0.469864	232.8899
N03	0.468956	259.0836
N04	0.469853	239.1097
O01	0.442885	147.6253

ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 โดยวิธี IEEE

ชื่อตัวอย่าง	พารามิเตอร์ของ BVD			
	C_0 (nF)	C_1 (nF)	L_1 (mH)	R_1 (Ω)
N01	3.929	0.9611	7.043	3.33
N02	2.852	0.8082	8.258	4.03
N03	2.872	0.8098	8.328	3.59
N04	2.756	0.7809	8.695	3.83
O01	5.061	1.235	5.482	3.82

5.4.2 การคำนวณหาวงจร BVD โดยวิธีอิมพีแดนซ์

จากค่าเฉลี่ยของค่าความถี่เรโซแนนซ์, ค่าแอมพลิจูดเรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในตารางที่ 5.8 และค่าเฉลี่ยอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ ในตารางที่ 5.10 สามารถนำมาคำนวณหาวงจร BVD แสดงในตารางที่ 5.14 ซึ่งพบว่าการเลือกค่าความถี่ตั้งแต่ 0.1 kHz จนถึง 10 kHz ได้ค่าพารามิเตอร์ของ BVD ที่มีความแตกต่างกันคือ L_1 ประมาณ 0.16 - 0.2 mH, ค่า C_1 ประมาณ 0.018-0.040 nF, ค่า C_0 มีค่าประมาณ 0.06 - 0.18 nF และ ค่า R_1 มีค่าเท่ากันเนื่องจากใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดความถี่เรโซแนนซ์เหมือนกัน

5.4.3 การหาวงจร BVD ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์รุ่น HP4194

เมื่อนำชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นไปวัดค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 10 kHz - 100 kHz ด้วยการเพิ่มความถี่ทีละ 0.2 kHz แล้วสั่งให้เครื่องหาวงจร BVD โดยทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง จะได้ค่าของวงจร BVD ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ของชิ้นงาน N01, N02, N03, N04 และ O01 ที่หาจากเครื่อง HP 4194

	ครั้งที่	1	2	3	4	5	σ	ค่าเฉลี่ย
N01	$R_1(\text{ohm})$	3.436	3.413	3.392	3.361	3.345	0.037	3.389
	$C_1(\text{nF})$	0.850	0.845	0.845	0.843	0.842	0.003	0.845
	$L_1(\text{mH})$	7.875	7.913	7.916	7.932	7.935	0.024	7.914
	$C_o(\text{nF})$	2.830	2.814	2.812	2.807	2.806	0.010	2.814
N02	$R_1(\text{ohm})$	3.424	3.418	3.414	3.411	3.407	0.006	3.415
	$C_1(\text{nF})$	0.792	0.791	0.791	0.791	0.791	0.000	0.791
	$L_1(\text{mH})$	8.480	8.485	8.484	8.483	8.482	0.002	8.483
	$C_o(\text{nF})$	2.708	2.706	2.707	2.707	2.707	0.001	2.707
N03	$R_1(\text{ohm})$	4.016	4.057	4.064	4.070	4.073	0.023	4.056
	$C_1(\text{nF})$	0.791	0.790	0.790	0.790	0.791	0.000	0.791
	$L_1(\text{mH})$	8.567	8.575	8.576	8.574	8.570	0.004	8.572
	$C_o(\text{nF})$	2.722	2.719	2.718	2.718	2.719	0.001	2.719
N04	$R_1(\text{ohm})$	3.348	3.329	3.322	3.315	3.314	0.014	3.326
	$C_1(\text{nF})$	0.815	0.814	0.814	0.814	0.814	0.001	0.814
	$L_1(\text{mH})$	8.380	8.389	8.389	8.391	8.392	0.005	8.388
	$C_o(\text{nF})$	2.778	2.775	2.775	2.774	2.774	0.002	2.775
O01	$R_1(\text{ohm})$	2.549	2.456	2.426	2.410	2.884	0.197	2.545
	$C_1(\text{nF})$	1.081	1.079	1.079	1.080	1.080	0.001	1.080
	$L_1(\text{mH})$	6.026	6.033	6.033	6.031	6.028	0.003	6.030
	$C_o(\text{nF})$	3.992	3.987	3.987	3.988	3.984	0.003	3.988

5.4.4 การเปรียบเทียบวงจรวจร BVD ที่หาได้จากวิธีอิมพีแดนซ์กับวิธีของ IEEE และการหาด้วย เครื่อง HP 4194

ในการหาความถูกต้องของวงจรวจร BVD จะเปรียบเทียบ 2 ลักษณะ คือ การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจรวจร BVD ที่หาได้ในแต่ละวิธี และการเปรียบเทียบความแตกต่างเส้นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรวจร BVD ที่หาได้เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้คำนวณ

5.4.4.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจรวจร BVD ที่หาได้ในแต่ละวิธี

จากการเปรียบเทียบวงจรวจร BVD ที่ได้จากทั้ง 3 วิธี (โดยวงจรวจร BVD ที่คำนวณตามวิธีอิมพีแดนซ์ จะเลือกค่าวงจรวจร BVD ที่คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ 1 kHz) ดังแสดงในตารางที่ 5.16 และ 5.17 พบว่าวงจรวจร BVD ที่หาได้ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์และวิธีของ IEEE 176-1987 มีความแตกต่างกันเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 4 % ยกเว้นค่า R_1 ที่ไม่แตกต่างกันเนื่องจากการกำหนดค่า R_1 จะกำหนดให้เป็นค่าความต้านทานที่จุดความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) เหมือนกัน โดยพบว่าตัวอย่างที่ 001 ค่า C_1 มีความแตกต่างสูงกว่าตัวอย่างอื่นถึง 9.29 % ทำให้ค่าเฉลี่ยสูงตามไปด้วย ทั้งนี้ในขั้นตอนการวัดค่า f_{CL} ของตัวอย่าง 001 มีความผิดพลาดดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.20 สำหรับการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจรวจร BVD ที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์กับวิธีของเครื่อง HP4194 พบว่าค่า R_1 มีความแตกต่างเฉลี่ย 9.54% และค่า C_0 แตกต่างเฉลี่ย 15.31% เนื่องจากข้อมูลอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้คำนวณหาวจร BVD ทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันมากในบางตัวอย่าง โดยสังเกตจากรูปที่ 5.23-5.27 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ N01 และ 001 มีจุด f_r ที่แตกต่างกันมาก ทำให้ค่า C_0 ในตารางที่ 5.16 ของตัวอย่าง N01 มีความแตกต่างสูงถึง 26.91% และ 13.68% สำหรับตัวอย่าง 001 เป็นผลทำให้ค่าความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ของวงจรวจร BVD จากทั้ง 2 วิธี มีความแตกต่างกันสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นถ้าพิจารณาวจร BVD ที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีเฉพาะตัวอย่างที่มีข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกันคือ N02, N03, N04 พบว่ามีความแตกต่างกันเฉลี่ยลดลงคือ ค่า C_0 แตกต่างเฉลี่ย 2.37%, ค่า C_1 แตกต่างเฉลี่ย 0.76% , ค่า L_1 แตกต่างเฉลี่ย 0.25% และสำหรับค่า R_1 13.82% โดยที่ค่า R_1 มีความแตกต่างกันสูง เนื่องจากลักษณะการหาค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 จะใช้โปรแกรมทำการค้นหาจุดความถี่ f_r ได้ละเอียดมากกว่าทำให้ได้ค่า R_1 ต่ำกว่า สรุปจากการเปรียบเทียบวงจรวจร BVD ที่คำนวณได้จากทั้ง 3 วิธี วิธีอิมพีแดนซ์จะสามารถหาวจร BVD ได้ใกล้เคียงกับ 2 วิธีที่เหลือ โดยมีความแตกต่างกันเฉลี่ยน้อยกว่า 3 % ยกเว้นค่า R_1

จากการตรวจสอบความถูกต้องของวงจรวจร BVD ด้วยวิธีข้างต้น จะสามารถใช้ได้ถ้าข้อมูลอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้คำนวณทั้ง 3 วิธีเป็นข้อมูลเดียวกัน ดังนั้นจึงได้เพิ่มวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของวงจรวจร BVD อีกวิธีคือ การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ที่จำลอง (simulate) จากวงจรวจร BVD ที่หาได้ ความถี่ต่าง ๆ กับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้หรือค่าอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้คำนวณหาวจร BVD ในหัวข้อถัดไป

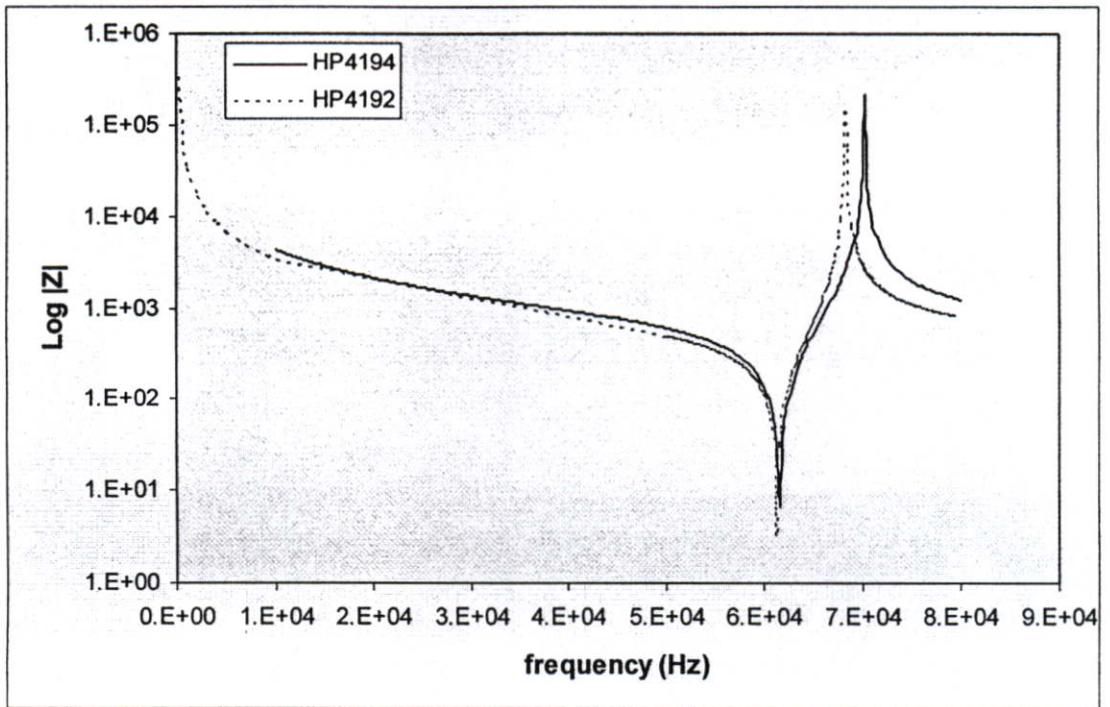
ตารางที่ 5.16 แสดงค่าเฉลี่ยของความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทั้ง 5 ชั้นงาน
ที่หาได้จากวิธีอิมพีแดนซ์, วิธีของ IEEE และวิธีของเครื่อง HP4194

ชั้นงาน	พารามิเตอร์ BVD	วิธีอิมพีแดนซ์ ที่ 1 kHz	IEEE	HP4194	Δ_1	Δ_2
N01	C_0 (nF)	3.850	3.929	2.814	2.05%	26.91%
	C_1 (nF)	0.940	0.961	0.845	2.23%	10.11%
	L_1 (mH)	7.199	7.043	7.914	2.17%	9.93%
	R_1 (ohm)	3.331	3.331	3.389	0.00%	1.74%
N02	C_0 (nF)	2.770	2.852	2.707	2.96%	2.27%
	C_1 (nF)	0.786	0.808	0.791	2.80%	0.64%
	L_1 (mH)	8.494	8.258	8.483	2.78%	0.13%
	R_1 (ohm)	4.035	4.035	3.415	0.00%	15.37%
N03	C_0 (nF)	2.790	2.872	2.719	2.94%	2.54%
	C_1 (nF)	0.787	0.810	0.791	2.92%	0.51%
	L_1 (mH)	8.570	8.328	8.572	2.82%	0.02%
	R_1 (ohm)	3.590	3.590	4.056	0.00%	12.98%
N04	C_0 (nF)	2.840	2.756	2.775	2.96%	2.29%
	C_1 (nF)	0.805	0.781	0.814	2.98%	1.12%
	L_1 (mH)	8.439	8.695	8.388	3.03%	0.60%
	R_1 (ohm)	3.828	3.828	3.326	0.00%	13.11%
O01	C_0 (nF)	4.620	5.061	3.988	9.55%	13.68%
	C_1 (nF)	1.130	1.235	1.080	9.29%	4.42%
	L_1 (mH)	6.002	5.482	6.030	8.66%	0.47%
	R_1 (ohm)	3.819	3.819	2.545	0.00%	33.36%

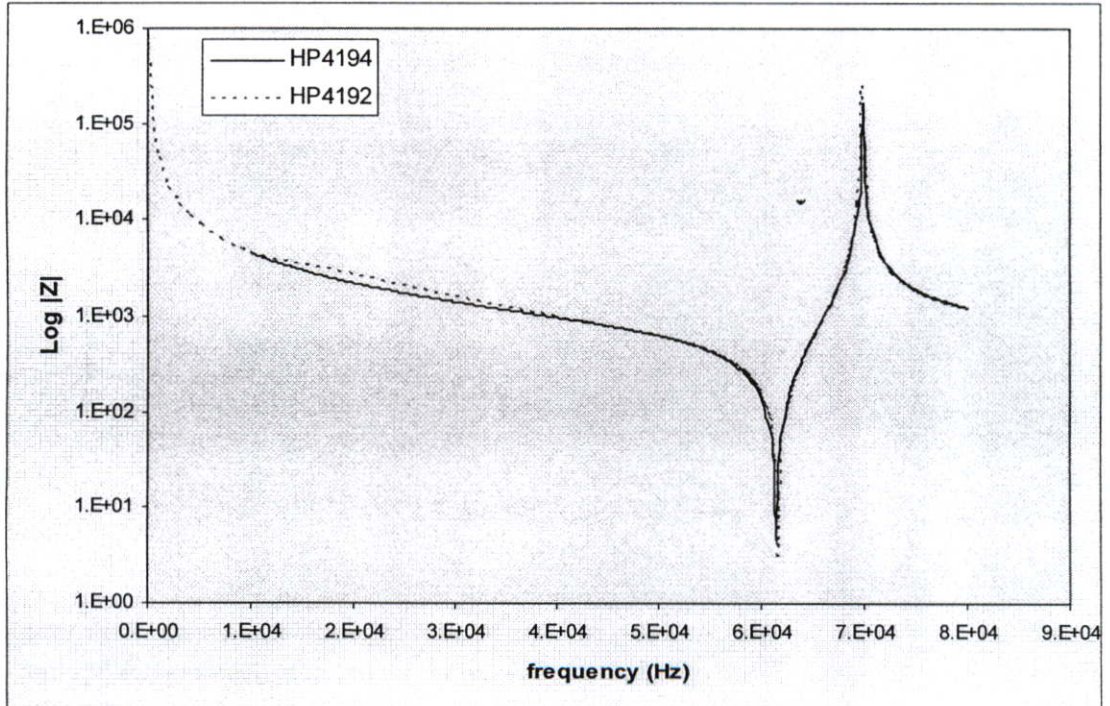
IEEE คือวิธีของ IEEE 176-1987

Δ_1 คือค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของค่าที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์และวิธีของ IEEE 176-1987

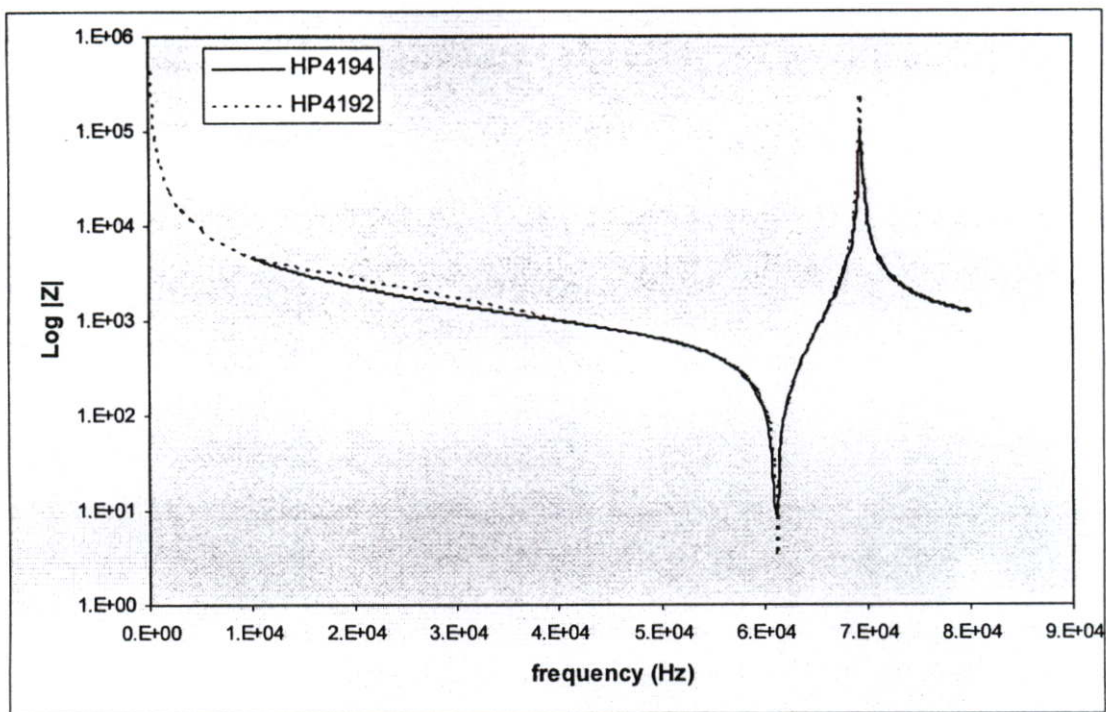
Δ_2 คือค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของค่าที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์และวิธีของเครื่อง HP4194



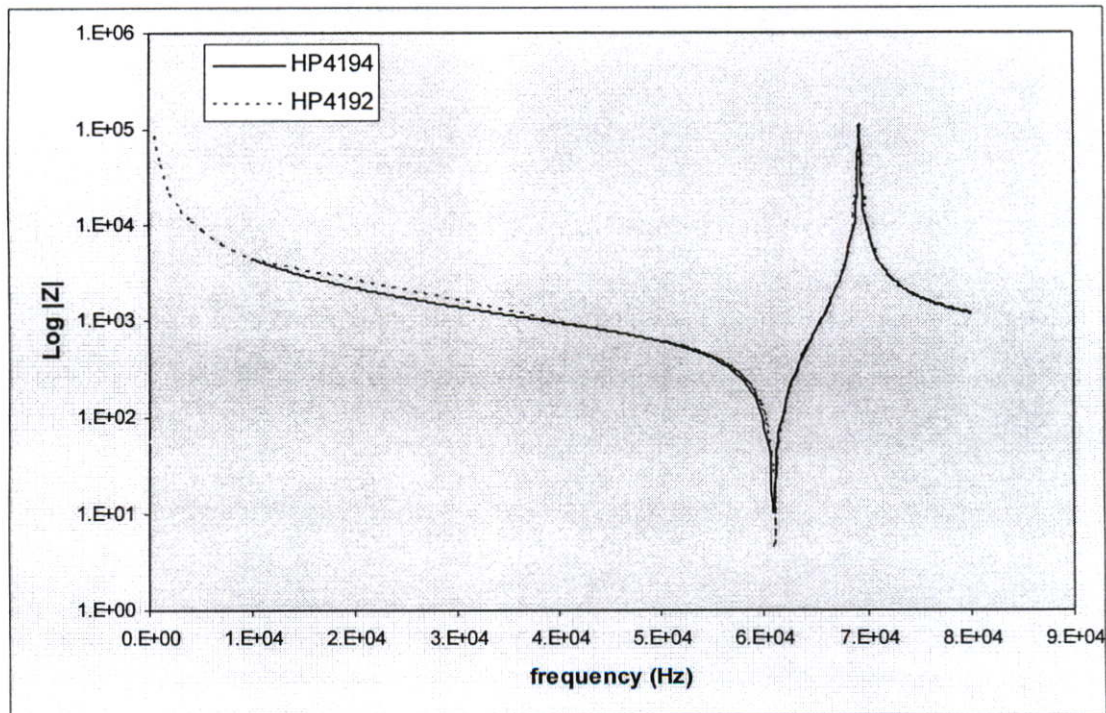
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N01 ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 เปรียบเทียบกับ HP4194 ที่ความถี่ต่าง ๆ



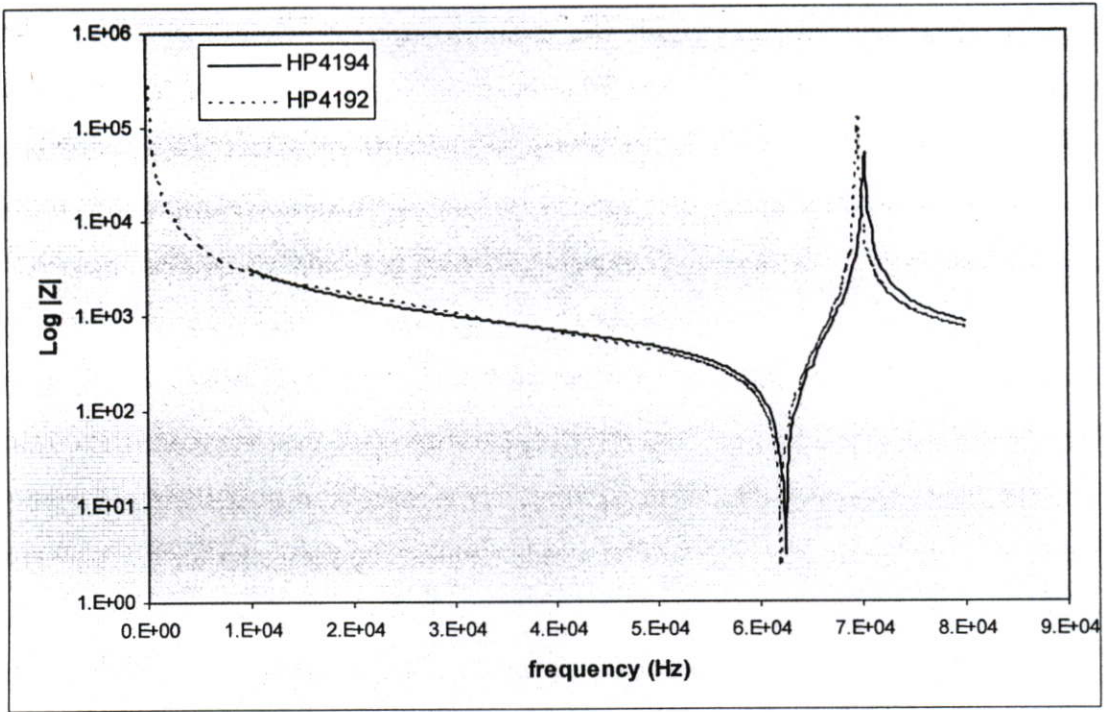
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N02 ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 เปรียบเทียบกับ HP4194 ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N03 ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 เปรียบเทียบกับ HP4194 ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N04 ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 เปรียบเทียบกับ HP4194 ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน O01 ที่วัดได้จากเครื่อง HP4192 เปรียบเทียบกับ HP4194 ที่ความถี่ต่าง ๆ

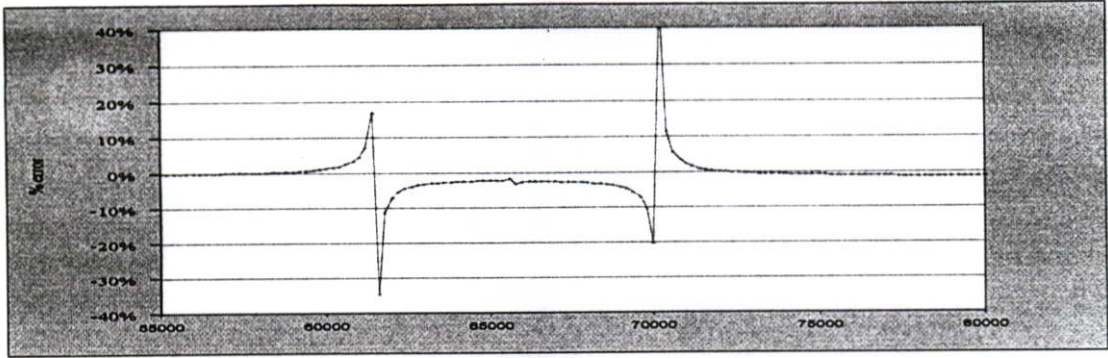
ตารางที่ 5.17 แสดงค่าความแตกต่างเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทั้ง 5 ชิ้นงาน ที่ทำได้ จากวิธีอิมพีแดนซ์, วิธีของ IEEE และการหาด้วยเครื่อง HP4194

พารามิเตอร์ ของ BVD	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	
	Δ_1	Δ_2
C_0	4.09%	9.54%
C_1	4.05%	3.36%
L_1	3.89%	2.23%
R_1	0.00%	15.31%

5.4.4.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างเส้นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่หาได้ เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

โดยวิธีการหาความถูกต้องของวงจร BVD จะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD กับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากชิ้นงาน [13-15] ดังแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ ในรูปที่ 5.23-5.27 ซึ่งพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ทั้ง 5 ชิ้นงาน ที่คำนวณจาก 3 วิธีข้างต้น จะมีความใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ และมีค่าความแตกต่างอิมพีแดนซ์นอกช่วงเรโซแนนซ์มาตรฐานประมาณ $\pm 5\%$ แต่ในช่วงเรโซแนนซ์มาตรฐาน ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่ได้จากวิธีของเครื่อง HP4194 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงกว่าวิธีอื่น เนื่องจากข้อจำกัดในการกำหนดความละเอียดของความถี่ในการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 0.2 kHz ซึ่งมีความละเอียดน้อยกว่าการวัดด้วยเครื่อง HP4192 ที่ใช้โปรแกรมทำให้ที่สามารถควบคุมให้ได้ละเอียดถึง 0.001kHz และมีความผิดพลาดมากกว่า และที่ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ของทุก ๆ ชิ้นงาน จะมีความผิดพลาดสูงความถี่ช่วงอื่น เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงต่อความถี่สูงมาก ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าจุดอื่น ๆ

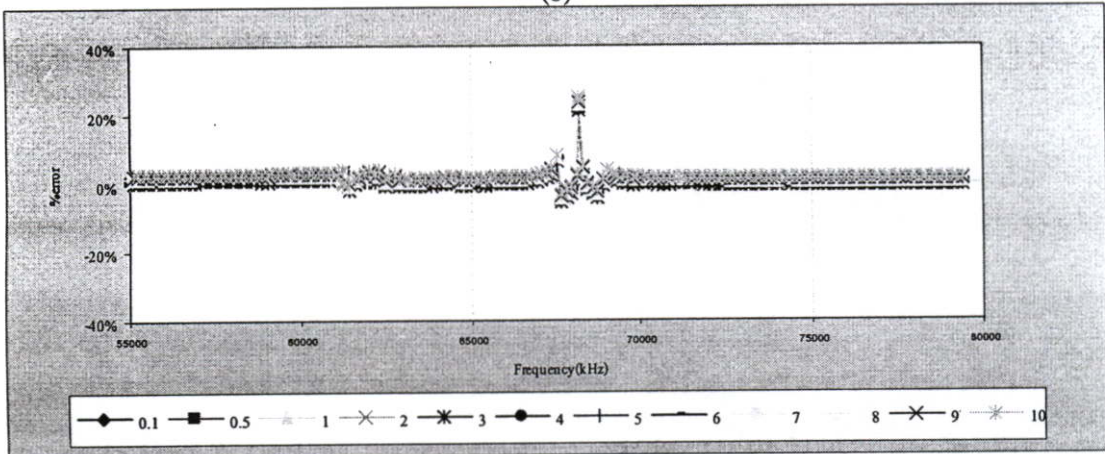
สำหรับค่าความเหมาะสมในการเลือกค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำหรือช่วง 100 kHz เพื่อใช้ในการคำนวณวงจร BVD ในวิธีอิมพีแดนซ์ โดยพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอิมพีแดนซ์จากรูปกราฟ 5.22 และค่าของ %error (ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณจากวงจร BVD และค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้) ในกราฟ 5.23(c), กราฟ 5.249c) และกราฟ 5.26(c) เห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำสุดค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงแต่กลับได้ค่าของ %error น้อยสุด ค่าอิมพีแดนซ์จะเริ่มมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยลงจนใกล้เคียงกันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 kHz จนถึง 10 kHz ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1 kHz จึงเป็นจุดเหมาะสมที่สุด สำหรับนำไปใช้คำนวณค่า BVD ตามวิธีอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้หาค่าความจุไฟฟ้าของเซรามิกโดยทั่วไป [6]



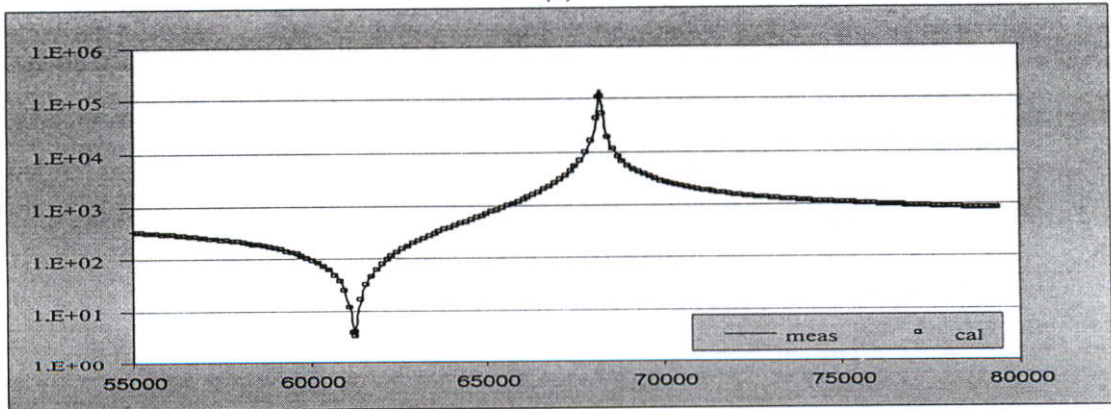
(a)



(b)

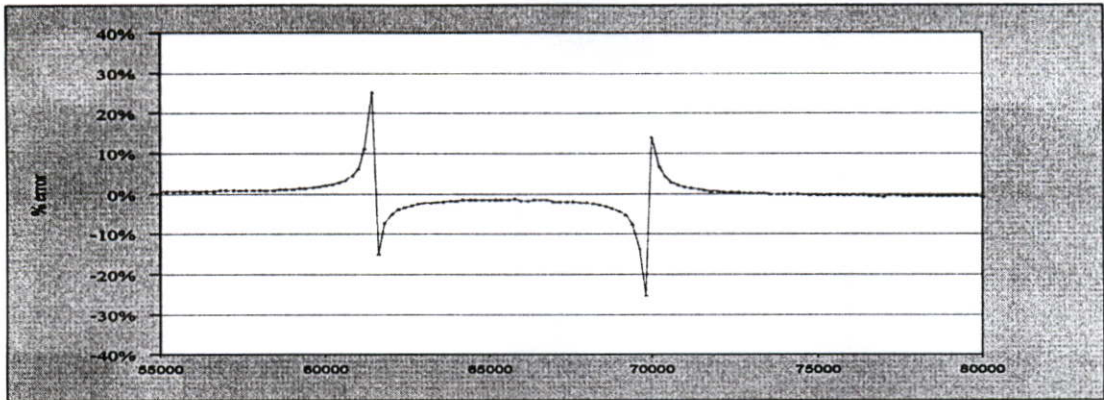


(c)

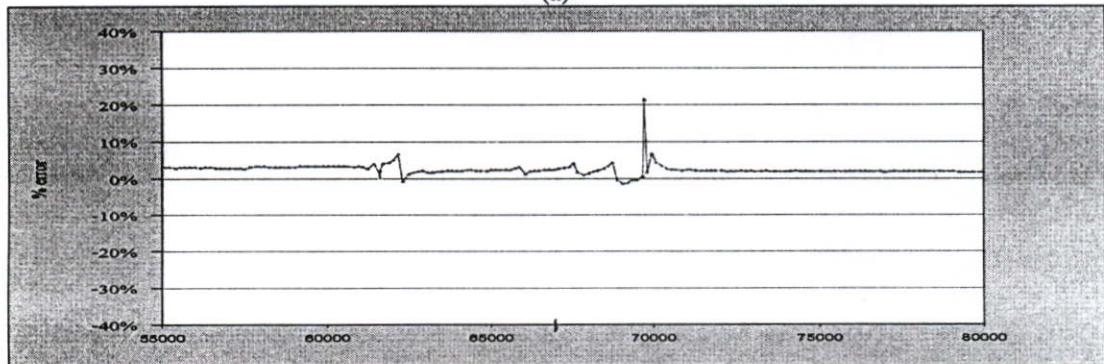


(d)

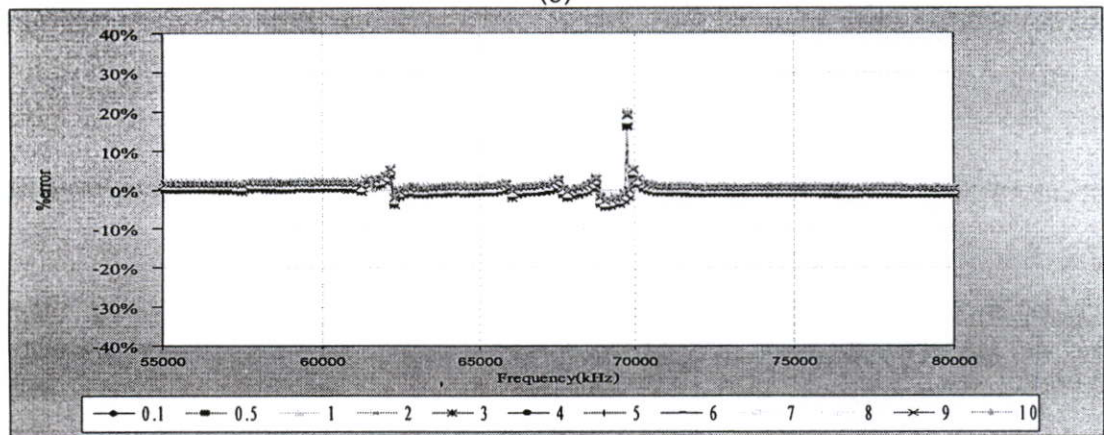
รูปที่ 5.28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N01 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยเครื่องวัด HP4192 (a) , วิธีของ IEEE (b) , วิธีอิมพีแดนซ์ (c) และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ (d)



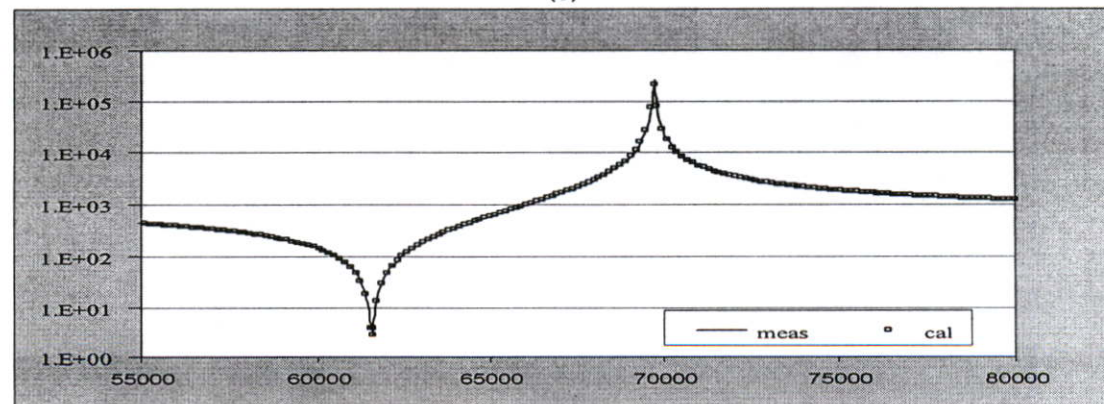
(a)



(b)

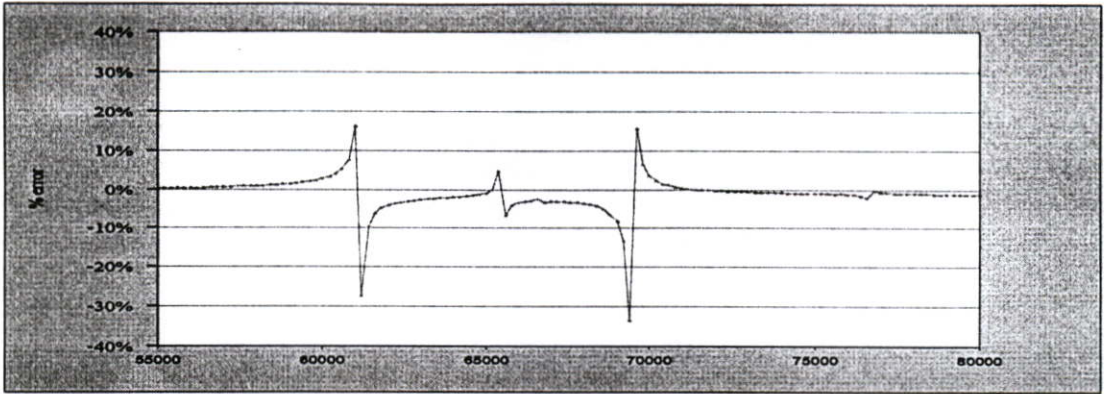


(c)

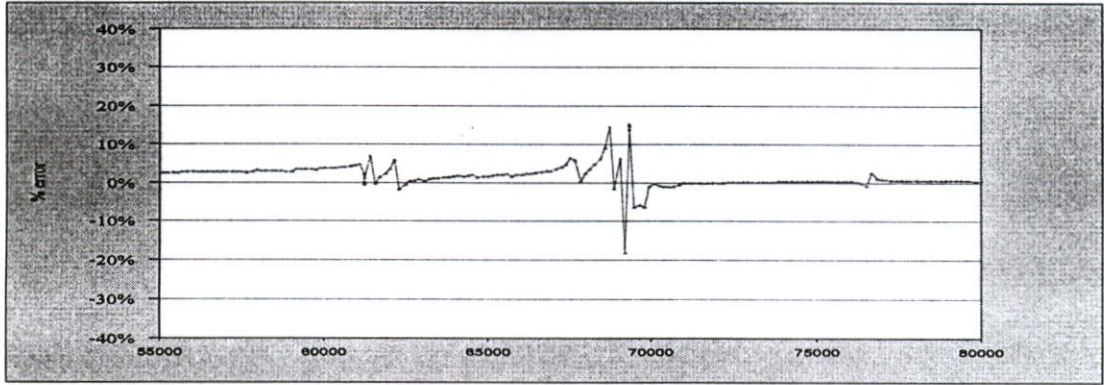


(d)

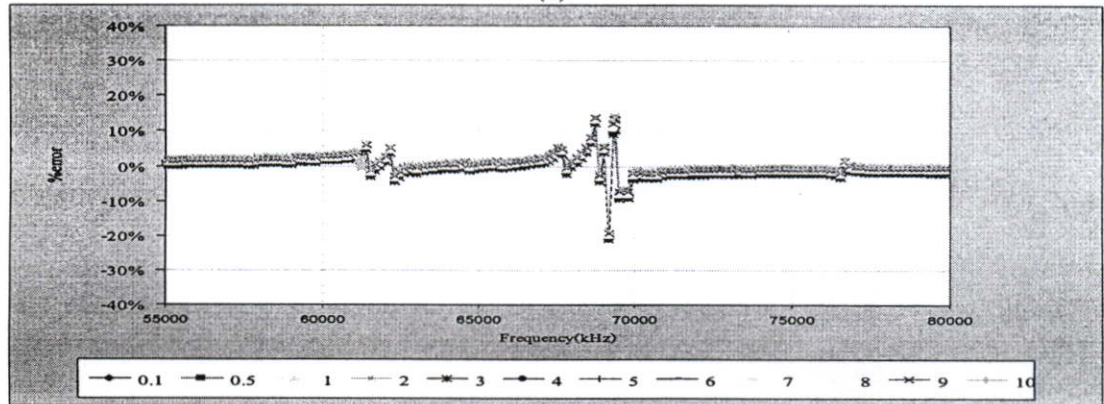
รูปที่ 5.29 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N02 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยเครื่องวัด HP4192 (a), วิธีของ IEEE (b), วิธีอิมพีแดนซ์ (c) และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ (d)



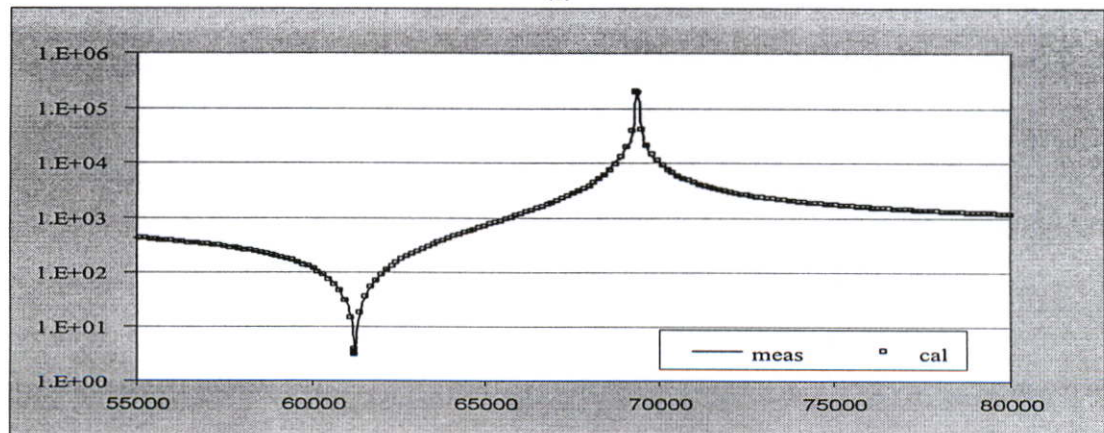
(a)



(b)

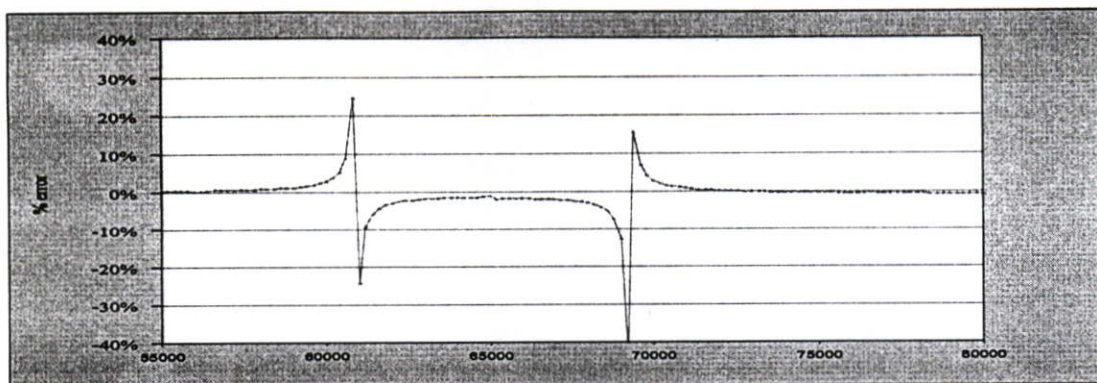


(c)

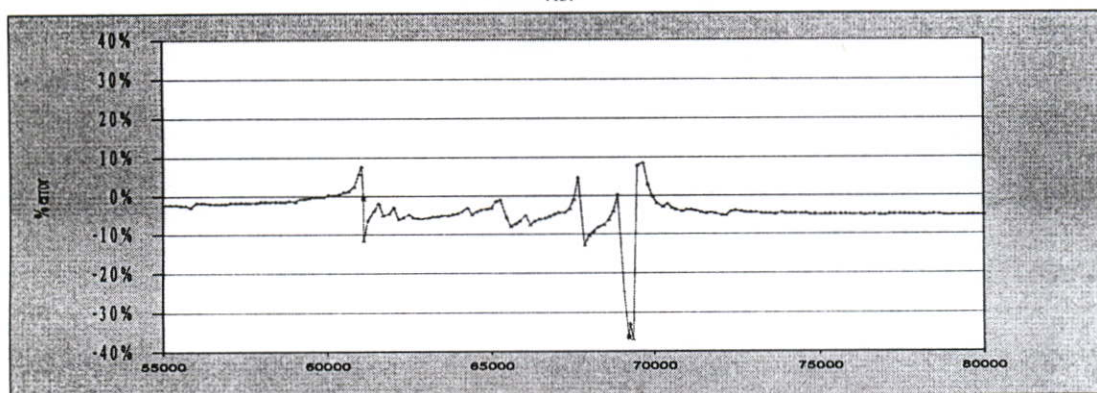


(d)

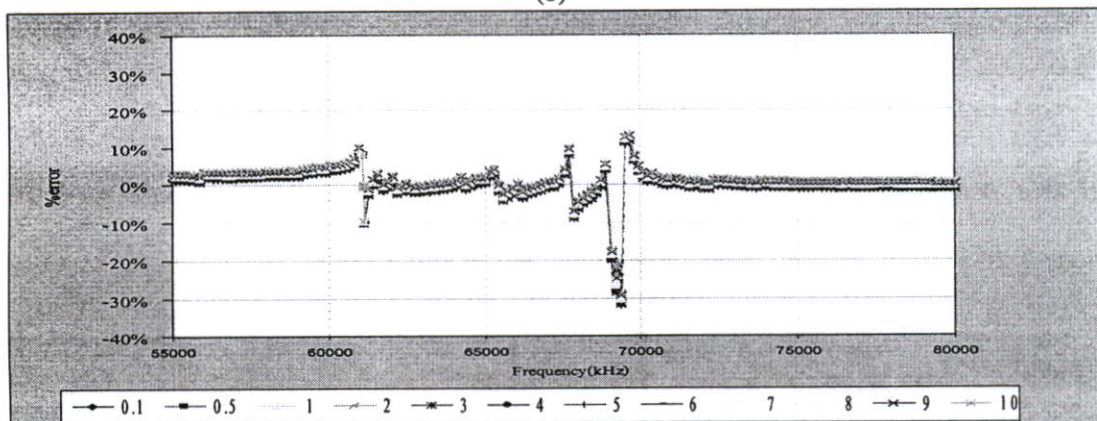
รูปที่ 5.30 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N03 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยเครื่องวัด HP4192 (a) , วิธีของ IEEE (b) , วิธีอิมพีแดนซ์ (c) และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณ ได้เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ (d)



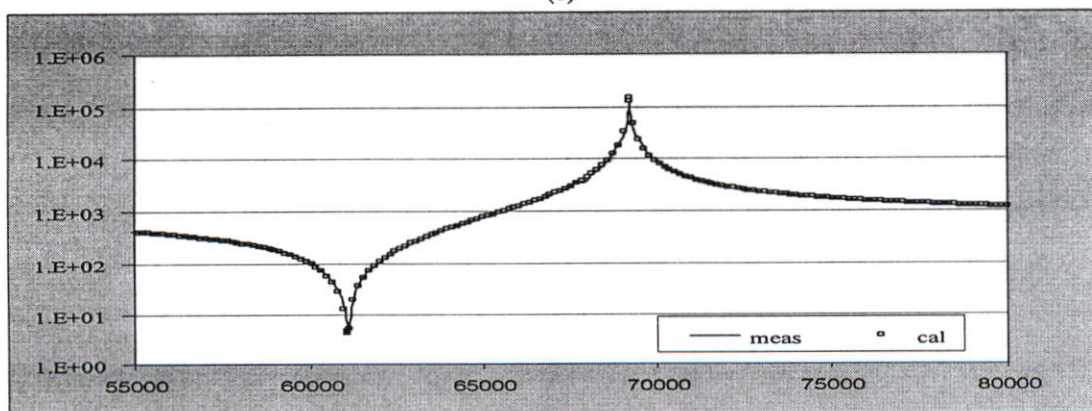
(a)



(b)



(c)

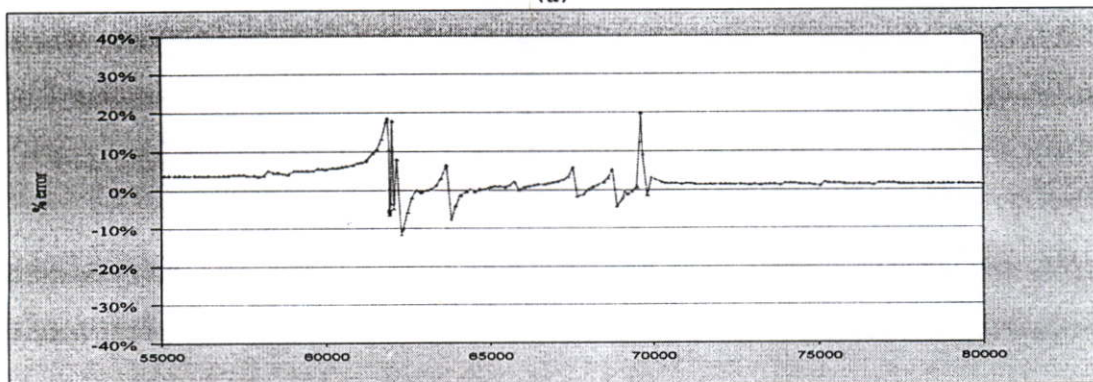


(d)

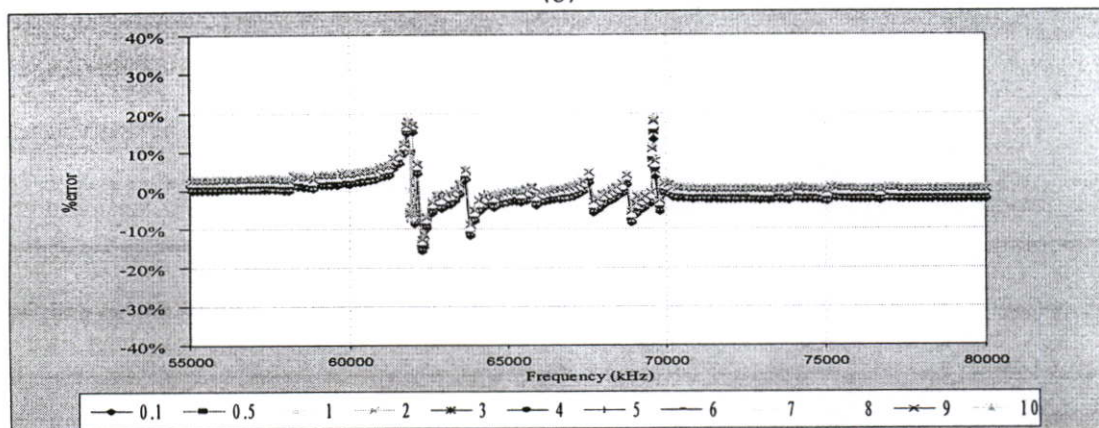
รูปที่ 5.31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน N04 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยเครื่องวัด HP4192 (a) , วิธีของ IEEE (b), วิธีอิมพีแดนซ์ (c) และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ (d)



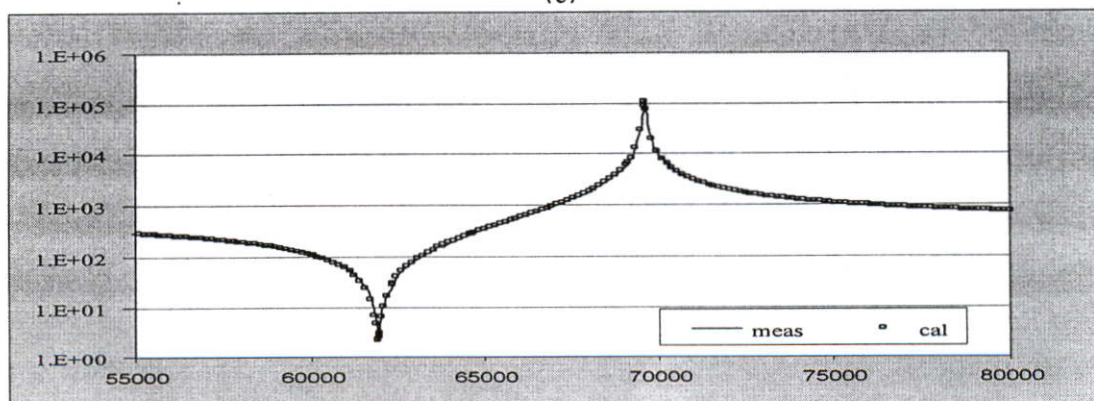
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5.32 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน O01 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยเครื่องวัด HP4192 (a), วิธีของ IEEE (b), วิธีอิมพีแดนซ์ (c) และค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้เทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ (d)

5.5 การศึกษาผลกระทบของสภาวะที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงและน้ำหนักกดทับที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์วงจร BVD

5.5.1 ผลกระทบที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทางด้านอุณหภูมิชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น

จากค่าที่เปลี่ยนไปของความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อชิ้นงานได้ถูกนำไปวางในตู้ควบคุมบรรยากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ในหัวข้อ 5.2.2 พบว่าที่อุณหภูมิ 230 °C ค่าพารามิเตอร์ C_1 มีค่าลดลงเท่ากับ 72 เพอร์เซ็นต์ หรือ 0.726 เพอร์เซ็นต์ต่อองศาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น 1 องศา และทำให้ค่า L_1 มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 255 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขึ้นกับอุณหภูมิ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่เปลี่ยนไปเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น 230°C และอัตราเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ต่อองศาเซลเซียส

ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD	เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลง	เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงต่อองศาเซลเซียส
R_1	167.0	0.726
C_1	-72.0	-0.313
L_1	255.0	1.109
C_o	18.1	0.079

5.5.2 ผลกระทบที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ทางด้านน้ำหนักกดทับชิ้นงาน

จากค่าที่เปลี่ยนไปของความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อมีน้ำหนักมากกดชิ้นงานในหัวข้อ 5.2.3 ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์สามารถนำมาคำนวณหาค่า C_o , C_1 และ L_1 ที่เปลี่ยนแปลงได้ตามตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 แสดงเปอร์เซ็นต์ของค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีน้ำหนักกดทับ

1.5 ปอนด์และอัตราเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ต่อปอนด์

ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD	เปอร์เซ็นต์ การ เปลี่ยนแปลง	เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลง/ปอนด์
R_1	144	96
C_1	21.22	14.14667
L_1	-18.14	-12.0933
C_0	-4.96	-3.30667

5.6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสังเคราะห์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิดสารเลดเซอร์โคเนตไททานต แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าด้วยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่อง HP4192 ที่ควบคุมด้วยโปรแกรมที่เขียนบน HP Vee แล้วนำค่าอิมพีแดนซ์มาประมาณค่าทางสถิติ พบว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ และแอนตี้เรโซแนนซ์สามารถวัดได้แม่นยำ ± 0.0033 kHz รอบค่ากลาง โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00129 ซึ่งมีความแน่นอนสำหรับการนำไปคำนวณหาวงจรไฟฟ้าสมมูลแบบ Butterworth Van Dyke (BVD) สูง และพบว่าวิธีอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นวิธีของผู้วิจัย สามารถนำไปคำนวณหาวงจร BVD ได้ใกล้เคียงกับวิธีของ IEEE 176-1987 และวิธีคำนวณจากเครื่องวัด HP4194 ยกเว้นค่า R_1 เพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดด้วย HP4192 ซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้ความละเอียดกว่า ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์มีความแตกต่างกัน และจากการตรวจสอบความถูกต้องของวงจร BVD โดยการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร BVD ที่จำลองขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร BVD ที่คำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ และวิธี IEEE 176-1987 มีความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีของ HP4194 สำหรับการทดลองหาผลกระทบทางด้านอุณหภูมิและแรงกดทับที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน PZT พบว่าแรงกดทับชิ้นงาน PZT จะทำให้ ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_r), ค่าความถี่ f_r และค่าความถี่ f_a เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD มีค่า R_1 และ C_1 เพิ่มขึ้น และค่าของ L_1 และ C_0 มีค่าลดลง และถ้าอุณหภูมิชิ้นงาน PZT สูงขึ้นจะทำให้ค่าความต่างของความถี่เรโซแนนซ์และแอนตี้เรโซแนนซ์ลดน้อยลง และมีค่าอิมพีแดนซ์ (Z_r) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร BVD ที่คำนวณได้มีค่าเปลี่ยนแปลงคือ ค่า C_1 มีค่าลดลง และค่าของ R_1 , L_1 , และ C_0 มีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชุตินา เข็มโชติชวลิต และคณะ. การพัฒนาเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิคส์ทางการแพทย์. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2543.
- [2] บุญชุม ศรีสะอาด, รศ.ดร. วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย. กรุงเทพมหานคร : สุวีริยาสาส์น. 2541.
- [3] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ระบบการวัด MSA. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2542.
- [4] Ikeda, Takuro. 1990. **Fundamentals of Piezoelectricity**. New York : Oxford University Press.
- [5] "IEEE Standard on Piezoelectricity." **ANSI/IEEE Std.176-1987**.
- [6] Jaffe, Bernard. **Piezoelectric Ceramics**. Ohio : Academic Press Limited. 1971.
- [7] Moulson, A. J. and Herbert, J. M. 2003. *Electroceramics*. 2nd ed. West Sussex : John Wiley & Sons.
- [8] Henry P. Hall. **Electric Measurement and Instrument**. Massachusetts : General Radio Company, Concord. pp. 265-318.
- [9] **Agilent 4192A's manual**. Agilent Technologies Japan. March 2000.
- [10] "Standard Definition and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators." **IEEE Standard**, No. 177-1966, May 1966.
- [11] "IRE Standards on Piezoelectric Crystals : Measurements of Piezoelectric Ceramics" **Proc. IRE**, vol. 49, 1961. pp. 1161-1169.
- [12] **HP4194A's manual**. Hewlett-Packard Japan. December 1996.
- [13] Uchino, Kenji. **Ferroelectric Devices**. Basel : Marcel Dekker. 2000.
- [14] Robert, L. Boylestad. **Introductory Circuit Analysis**. 6th ED. New York : Macmillan Publishing Company. 1990.
- [15] Hickernell, Fred S. "Measurement Techniques for Evaluating Piezoelectric Thin Films" **IEEE Ultrasonics Symposium**, 1996. pp. 235-242.
- [16] Kim J. S., Choi K. and Yu I. "A New Method of Determining the Equivalent Circuit Parameters of Piezoelectric Resonators and Analysis of the Piezoelectric Loading Effect"

- IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** **40**, 4, July, 1993. pp. 424-426.
- [17] Yamada Ken, Sakamura Jun-ichi and Nakamura Kiyoshi. "Equivalent Network Representation for Thickness Vibration Modes in Piezoelectric Plates with a Linearly Graded Parameter" **IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. **48**, 2, March, 2001. pp. 613-616.
- [18] Antonio Arnau, Tomas Sogorb and Yolanda Jiménez. "A New Method for Continuous Monitoring of Series Resonance Frequency and Simple Determination of Motional Impedance Parameters for Loaded Quartz-Crystal Resonators" **IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. **48**, 2, March, 2001. pp. 617-622.
- [19] Arthur Ballato and John Ballato. "Modern Piezoelectric Equivalent Networks" **IEEE Ultrasonic Symposium**, 1995. pp. 683-686.
- [20] Arthur Ballato and John G. Gualtieri. "Advances in High- Q Piezoelectric Resonator Materials and Devices" **IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. **41**, 6, November, 1994. pp. 834-844.
- [21] S Sherrit, H D Wiederick, B K Mukherjee and M Sayer. "An accurate equivalent circuit for the unloaded piezoelectric vibrator in the thickness mode" **J. Phys. D: Appl. Phys.** **30**, 1997. pp. 2354-2363.
- [22] S. Sherrit, H D Wiederick and B K Mukherjee. " An Accurate Equivalent Circuits for Unloaded Piezoelectric Resonators" **IEEE Ultrasonic Symposium**, 1997. pp. 931-935.
- [23] Xiao-Hong Du, Qing-ming Wang and Kenji Uchino. " An Accurate Method for the Determination of Complex Coefficients for Single Crystal Piezoelectric Resonators II: Design of Measurement and Experiments" **IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. **51**, 2, February, 2004. pp. 238-248.
- [24] Stewart Sherrit, Sean P. Leary, Benjamin P. Dolgin and Yoseph Bar-Cohen. "Comparison of the KLM Equivalent Circuits for Piezoelectric Resonators in the Thickness Mode" **IEEE Ultrasonic Symposium**, 1999. pp. 921-926.
- [25] M. Kaltenbacher, R. Simkovic, B. Kaltenbacher and R. Lerch. "Determination of piezoelectric material parameters using a combined measurement and simulation technique" **IEEE Ultrasonic Symposium**, 2001. pp. 1023-1026.

- [26] Mingjie Guan and Wei-Hsin Liao. "Studies on the Circuit Models of Piezoelectric Ceramics." **Proceedings of 2004 International on Information Acquisition**. 2004. pp. 26-31.
- [27] E. Markiewicz, J. Kulek and Cz. Pawlaczyk. "Simple Electric Equivalent Circuit Method to Determine Piezoelectric and Elastic Properties of Piezoelectric Polymer Film." **IEEE Tran. on Dielectrics and Electrical Insulation**. 6, 3, June, 1999. pp. 304-308.
- [28] Anthony R. West, Derek C. Sinclair and Naohiro Hirose. "Characterization of Electrical Materials, Especially Ferroelectrics, by Impedance Spectroscopy." **Journal of Electroceramics**. 1, January, 1997. pp. 65-71.

ภาคผนวก ก.

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ICCAS 2005

International Conference on Control, Automation, and Systems

June 2-5, 2005

KINTEX, Gyeonggi-Do, KOREA



Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Talks & Invited Talks

Table of Contents

Author Index

Financial Contribution

Search This CD-ROM

SICE - ICCAS 2006

CD-ROM Help

EXIT



Analysis of Appropriate Parameters for Piezoelectric Ceramic Utilization by Using BVD Model

Chalermchai Jeerapan, Witsarut Sriratana, Prasit Julsereewong, Sart Kummool

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Tel: +66-2-739-2407; Fax: +66-2-739-2406 ; E-mail: kswitsar@kmitl.ac.th)

Abstract: This paper presents an approach to evaluate the appropriate parameters for Piezoelectric ceramic utilization by adopting Impedance Method. Butterworth Van Dyke model (BVD) is considered to use as an equivalent circuit of Piezoelectric ceramic in case of no load. The experimental results from this model will be compared with the results from a circular Piezoelectric ceramic with 4.8 cm. diameter and 3 mm. thickness. The Thickness Mode vibration measured by Impedance Analyzer model 4192A can be analyzed from 1Hz to 13MHz for calculating and analyzing parameters at resonance frequency and anti-resonance frequency. These parameters are evaluated to design the efficient circuit for Piezoelectric ceramic utilization to obtain the optimal efficiency.

Keywords: Piezoelectric ceramic, Equivalent circuit, Electrical equivalent circuit, BVD

1. INTRODUCTION

At present, Piezoelectric ceramic is used in several machines such as ultrasonic cleaner and ultrasonic welder. To obtain the optimal efficiency, the equivalent circuit of Piezoelectric ceramic should be well analyzed. In this paper, the Butterworth Van Dyke model is considered. This model has 2 parallel branches as shown in Fig. 1. The First one consists of series of motional resistance (R) which represents the mechanical dissipation, inductor (L) which is related to the Piezoelectric motional, and capacitor (C). Another one consists of the capacitor corresponds to the electrostatic capacitance (C_o). The R, C, L and C_o parameters are calculated by adopting various methods such as IEEE Standard [2], [3], Smits [7], Sherrit [8] and Xu [10]. Smits's and Sherrit's consider those parameters as complex numbers whilst Xu's is similar to Smits's. The impedance of Piezoelectric ceramic is measured under the frequency that covers the resonance frequency (f_r), anti-resonance frequency (f_a) and mechanical parameters (elastic, piezoelectric constant and coupling coefficient). However, it is complicated to calculate due to many parameters required. As a result, this paper presents the calculation of BVD parameters by considering the frequency response of R, C, L and C_o in BVD circuit and then the Piezoelectric ceramic applied in this research will be utilized in an ultrasonic cleaner.

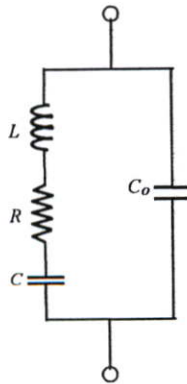


Fig.1 The Butterworth Van Dyke (BVD) model

2. THEORY

Fig. 1 is illustrated the equivalent circuit of no-load Piezoelectric ceramic BVD in thickness mode. R, C, L and C_o are considered as constant parameters and independent to the frequency and impedance as shown in Eq. (1).

$$Z = \frac{1}{j\omega C_o} // \left(R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \right)$$

$$Z = \frac{R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}}{1 - \omega^2 C_o L + \frac{C_o}{C} + j\omega R C_o} \quad (1)$$

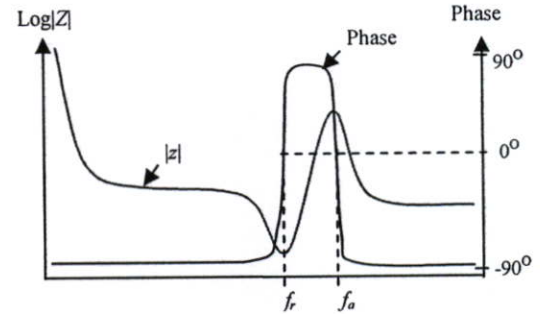


Fig.2 The frequency response characteristic of piezoelectric ceramic

From Fig. 2, the characteristics of Piezoelectric ceramic in various frequencies are as follow:

2.1) At Resonance Frequency, the reactance of $R-L-C$ branch is zero, thus:

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$$

$$LC = \frac{1}{\omega_r^2} \quad (2)$$

Where $\omega_r = 2\pi f_r$ is the angle velocity at resonance frequency.

2.2) At Anti-resonance Frequency:

$$\omega_a^2 C_o L = 1 + \frac{C_o}{C}, \omega_a = \sqrt{\frac{C + C_o}{C_o CL}}$$

$$C_o L = \frac{\left(1 + \frac{C_o}{C}\right)}{\omega_a^2} \tag{3}$$

Where ω_a is the angle velocity at anti-resonance frequency ($= 2\pi f_a$). Divide Eq. (3) by Eq. (2):

$$\frac{C_o}{C} = \frac{\omega_r^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \tag{4}$$

From Eq. (2), (3) and (4):

$$C_o L = \frac{1}{\omega_a^2 - \omega_r^2} \tag{5}$$

Calculate Eq. (1) by using $\frac{C_o}{C}$ and LC_o from Eq. (4) and (5):

$$Z = \frac{R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}}{\left(\frac{\omega_a^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2}\right) + j\omega RC_o} \tag{6}$$

Phase of impedance is:

$$Z(\theta) = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{Im}}{Z_{Real}} \right) \tag{7}$$

Where Z_{Real} is the real number of impedance
 Z_{Im} is the imaginary number of impedance

From $Z(\theta)$ graph in Fig. (2), if the frequency is greatly lower than resonance frequency, $Z(\theta) \sim -90^\circ$, then:

$$Z_{Im} \sim \frac{1}{\omega C} \text{ or } \omega L \ll \frac{1}{\omega C} \text{ and } RC_o \approx 0 \tag{8}$$

If ω is greatly lower than resonance, then:

$$Z \approx \frac{\omega_a^2 - \omega_r^2}{\omega_a^2 - \omega^2} \left(R - \frac{j}{\omega C} \right) \tag{9}$$

At resonance frequency ($\omega = \omega_r$), the reactance is zero ($j\omega L - \frac{j}{\omega C} = 0$). Thus the impedance at resonance point is the resistance or R only as proven in Eq. (10) where $LC = 1 / \omega_r^2$:

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC_o}$$

$$Z \approx R \tag{10}$$

From Eq. (8), if $j\omega_r RC_o \approx 0$, then:

$$\omega = \omega_r \tag{11}$$

From Eq. (10), it is found that when the impedance measured at the low frequency is calculated in Eq. (8) and ω is the angle velocity at the considered frequency of $|Z|$ and R is $|Z|$ at resonance frequency, C can be calculated by using Eq. (12):

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{\left(\frac{\omega_a^2 - \omega^2}{\omega_a^2 - \omega_r^2}\right)^2 |Z|^2 - R^2}} \tag{12}$$

Finally, C_o and L can be calculated by applying C into Eq. (4) and (5)

3. EXPERIMENT

The Piezoelectric ceramic with 4.8 cm. diameter and 3 mm. thickness is electroded by silver paste at the top and the bottom and then connected to the system as shown in Fig. 4. The HP Vee program is applied to control the Impedance Analyzer Model HP4192A via HP-IB interface and collect the impedance at 100 Hz - 1.3 MHz. Then, the resonance frequency and the impedance at resonance frequency and lower resonance frequency will be applied to calculate R , L and C_o using Eq. (10), (4) and (5). The calculated value will be evaluated and compared with the value calculated by using Eq. (1). In this paper, only the fundamental resonance is considered regardless the resonance frequency at harmonic period.

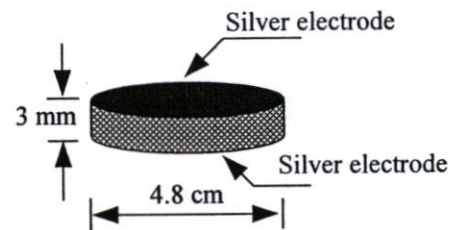


Fig.3 Physical of Piezoelectric ceramic sample

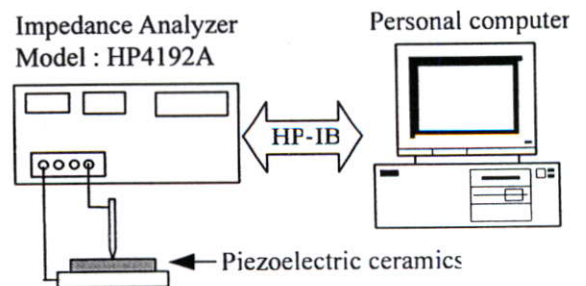


Fig.4 Impedance of Piezoelectric ceramic measurement diagram

4. EXPERIMENTAL RESULTS

From experiment and measurement of Piezoelectric ceramic impedance, the calculated parameters from BVD model are as shown in Table 1. Fig. 5 and 6 are illustrated the comparison of size ($|Z|_m$) and phase (PhaseMeas) of the impedance at 100 Hz - 100 kHz measured by Impedance Analyzer Model HP4192A and the calculated impedance ($|Z|_{cal}$ and PhaseCal). The impedance at 1 kHz is selected to calculated in Eq. (12). To obtain the appropriate value of C, the impedance at lower resonance frequency is suggested such as 100 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 6 kHz and 14 kHz. The BDV parameters are as shown in Table 2 and the percentage of error (%error) is shown in Fig. 7.

Table 1 The Piezoelectric ceramic properties

Piezoelectric ceramic properties	
Fundamental resonance frequency (fr)	60.329 kHz
Fundamental anti-resonance frequency (fa)	68.971 kHz
Impedance at fr	2.847 Ω
Impedance at 1kHz	41.040 kΩ
Impedance at 2 kHz	20.540 kΩ
Impedance at 3 kHz	11.245 kΩ
Impedance at 6 kHz	6.526 kΩ
Impedance at 14 kHz	2.863 kΩ

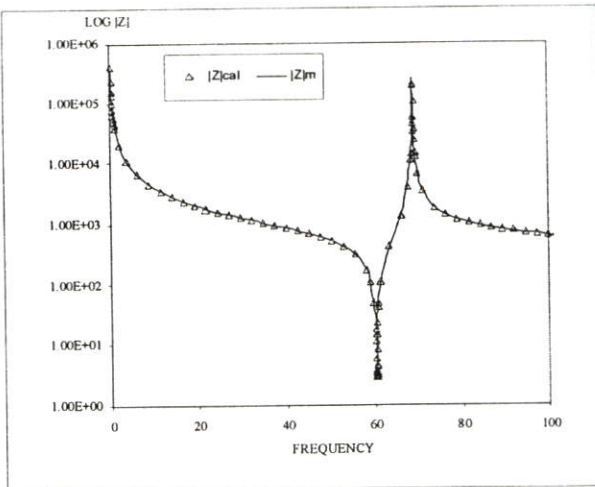


Fig.5 Gain impedance of Piezoelectric ceramic measurement at various frequency

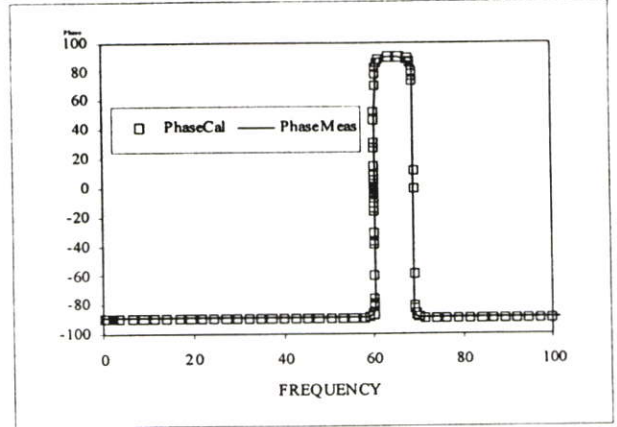


Fig.6 Phase impedance of Piezoelectric ceramic at various frequency

Table 2 Calculated parameters of Butterworth Van Dyke circuit at 100 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 6 kHz, 14 kHz

	100 (Hz)	1 (kHz)	2 (kHz)	3 (kHz)	6 (kHz)	14 (kHz)
R (Ω)	2.847	2.847	2.847	2.847	2.847	2.847
C (pF)	912.3	911.6	911.7	925.3	932.5	973.9
C ₀ (nF)	2.9715	2.9693	2.9697	3.014	3.037	3.172
L (mH)	7.63	7.64	7.64	7.53	7.47	7.15

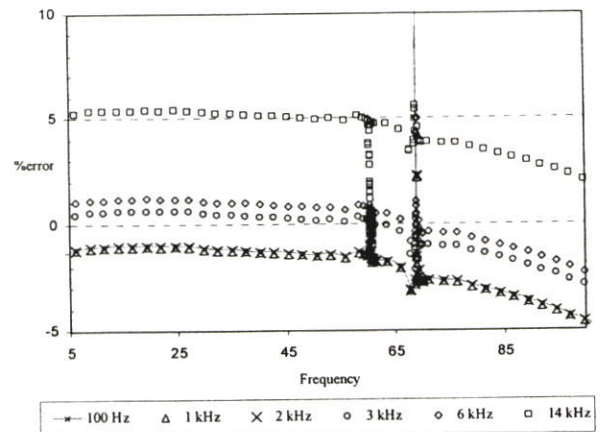


Fig.7 Error percentage of calculated impedance at various frequency (100 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 6 kHz and 14 kHz)

5. CONCLUSION

In conclusion, from the calculation of size ($|Z|$) and phase ($Z(\theta)$), it is found that the impedance in the greatly low frequency or in the range ($f_r - f_a$) is close to the impedance measured by HP4192A. If the low frequency such as 100 Hz, 1 kHz and 2 kHz, is used to calculate C, then the error percentage of $|Z|$ is about -1% as well as the use of impedance and frequency at 3 kHz that has the error percentage lower than

1%. However, if the impedance at 14 kHz is calculated, then the error percentage is about 5% because the impedance is not as estimated as in Eq. (8). ωL has more influence upon the impedance than $\frac{1}{\omega C}$ does. Therefore, the impedance chosen to calculate should be less than $f \ll (f_a^2 - f_r^2)$. From the consideration of error percentage, it is found that the selected impedance at 100 Hz, 1 kHz and 2 kHz provide the similar results. Normally, the Dielectric Constant measurement is operated at 1 kHz [1] with 20-25% error at anti-resonance frequency. In determining the frequency as the resonance and anti-resonance frequency with minimum and maximum impedance respectively, the error in calculation will be occurred because those frequencies are not in the same point based on IEEE standard [2]. In this paper, the Piezoelectric ceramic applied to the ultrasonic cleaner is used the frequency within the resonance frequency range only. Hence, the impedance error is acceptable to apply in electronic design.

REFERENCES

- [1] Bernard Jaffe, William R. Cook, Jr. and Hans Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", pp.31-35, 1971.
- [2] Standard Definitions and Method of Measurement for Piezoelectric vibrators, IEEE No.177 May 1966.
- [3] An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity 176-1987.
- [4] Takuro Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity", pp.138-145, 1990.
- [5] S. Sherrit, H. D. Wiederick, B. K. Mukherjee "Accurate Equivalent Resonators" , pp.931-935, 1997.
- [6] S Sherrit, H. D. Wiederick, B. K. Mukherjee and M Sayer "An accurate equivalent Circuits for the Unloaded Piezoelectric vibrator in the thickness mode" , pp.2354-2363, 1997.
- [7] 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.
- [8] S. Sherrit, H. D. Wiederick, and B. K. Mukherjee, "Non-iterative evaluation of the real and imaginary material constants of piezoelectric resonators", Ferroelectrics, vol. 134, pp. 111-119, 1992.
- [9] Satoru Fujishima, Kazuya Togawa, and Satoshi Ohta "ANALYSIS AND DESIGN OF THE PIEZOELECTRIC CERAMIC RESONATOR OSCILLATORS" , pp.391-397, 1987.
- [10] 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.