

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล
จากการวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก
ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

Software Development for Analyzing Electrical Data
Obtained from the Dielectric Properties Measurement of
Ferroelectric Materials

เบญญา เชิดหิรัญกร* และเจียรนัย เล็กอุทัย

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

วัฒนสิทธิ์ พิมพา

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Benya Cherdhirunkorn* and Jearanai Lekuthai

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Wattanasit Pimpao

National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology

Development Agency, Thailand Science Park, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจัดอยู่ในกลุ่มย่อยของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ในเครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ มอเตอร์เพียโซอิเล็กทริก อุปกรณ์กีฬา หน้าจอสัมผัสของโทรศัพท์มือถือ เครื่องวัดความดันเลือด เครื่องอัลตราซาวด์ เป็นต้น โดยการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานหรืองานวิจัยพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเหล่านี้ ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้สร้างเครื่องมือวัดวงฮีสเทอรีซิส P-E [1] ส่วนงานวิจัยนี้เน้นการพัฒนาซอฟต์แวร์จากโปรแกรม Microsoft Visual Studio เวอร์ชัน 2008 โดยใช้ภาษา C# สำหรับการประมวลผลข้อมูลทางไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไดอิเล็กทริก เพื่อใช้วิเคราะห์สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก PZT (Lead Zirconate Titanate)

ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในการทดลองได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันที่เกิดจากการป้อนสนามไฟฟ้าแก่วัสดุ PZT โดยด้วยเวเนเดียม (V) ซึ่งผลิตด้วยวิธีผสมออกไซด์ (mixed oxide route) โดยใช้เครื่องมือวัด P-E loop มาตรฐานของ Hall และคณะ [2] และนำข้อมูลวงฮิสเทอรีซิสโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า (P-E hysteresis loop) ที่วัดได้มาคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง คือ ประมาณ 25°C (อุณหภูมิห้อง) พบว่าซอฟต์แวร์วิเคราะห์ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ PZT นั้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ของ Hall และคณะ [2] ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เป็นซอฟต์แวร์อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

คำสำคัญ : การวัดสัญญาณไฟฟ้า; การวัดวงฮิสเทอรีซิส P-E; การวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก; วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

Abstract

Ferroelectric materials are subset of piezoelectric materials, which are widely used in many electronic appliances and devices such as piezoelectric motor, sport equipment, touch screen of mobile phone, blood pressure meter, and ultrasonic probe etc. In order to utilize or make ferroelectric materials, the measurements of their properties are necessary. In our previous work [1], the polarization-electric field (P-E) hysteresis loops test set was developed. Thus, in this work, the P-E loops analysis software was developed using Microsoft Visual Studio Version 2008 with language C#. The analysis software was developed for determining the dielectric properties, which were dielectric loss and relative permittivity of ferroelectric materials. V doped PZT (vanadium doped lead zirconate titanate) ceramics were produced via mixed oxide route in order to be used in this work. The data on the polarization and electric field were collected from the standard P-E loop test set developed by Hall, *et al.* [2] at constant temperature of 25°C . The P-E loop measurement data were analyzed using the developed software in order to determine the dielectric loss and relative permittivity of V-doped PZT ceramics. The analyzed data were then compared to the values obtained from the standard software developed by Hall, *et al.* [2]

Keywords: dielectric properties measurement; P-E loops measurement, dielectric properties measurement; ferroelectric material

1. บทนำ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกก็เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าพิเศษชนิดหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในการนำมาใช้งานเป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ เซ็นเซอร์ แอคชูเอเตอร์ วัสดุดูดซับ

แรงสั่นสะเทือน แบตเตอรี่ เป็นต้น [3] ในประเทศไทยนั้นการผลิตวัสดุประเภทนี้ยังมีไม่มาก โดยมากจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุประเภทนี้จึงมีความสำคัญยิ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ

การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งาน หรืองานวิจัยพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเหล่านี้ ซึ่งสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนไปเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ความถี่ที่ใช้งาน และอุณหภูมิใช้งาน การโดปไอออนบวกอย่างเช่น Mn^{3+} , Co^{3+} และอื่น ๆ ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก เช่น PZT (lead zirconate titanate) มีการค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ลดลง [4-5]

ดังนั้นนอกจากการทำงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาการผลิตวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้ว การพัฒนาเครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุประเภทนี้ก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในประเทศไทยยังขาดการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวัดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ โดยมากจึงต้องนำเข้าเครื่องมือสำเร็จรูปพร้อมซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ผลจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง และเมื่อการใช้งานซอฟต์แวร์มีปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้เอง เนื่องจากไม่ได้เป็นผู้เขียนซอฟต์แวร์นั้นขึ้นมา จึงทำให้ต้องจ้างซ่อมในราคาสูง นอกจากนั้นยังยากต่อการดัดแปลงเครื่องมือและซอฟต์แวร์เพื่อให้ใช้งานด้านอื่น ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปในส่วนที่เป็นพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อประมวลผลข้อมูลทางไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์วัดค่าทางไดอิเล็กทริก โดยในงานวิจัยนี้ได้นำซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในการทดลองได้นำค่าโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงจากการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุ หรือวงฮิสเทอรีซิสโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า

(P-E hysteresis loop) มาคำนวณวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลองคือประมาณ $25^{\circ}C$ (อุณหภูมิห้อง)

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมชิ้นงานเซรามิก V-doped

PZT

2.1.1 การเผาแคลไซน์ผง PZT

วัตถุดิบสำหรับการผลิตเซรามิก V-doped PZT ได้แก่ เลดออกไซด์ (PbO) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และตัวโดปเวเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ซึ่งเป็นตัวโดปที่มีวาเลนซ์ 5+ ใช้วิธีการผลิตแบบการผสมสารออกไซด์ สูตรสารประกอบพื้นฐานที่ผลิตในโครงการนี้ คือ $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{1-x}M_xO_3$ โดย M คือ V และ $x = 0.002, 0.005, 0.01$ และ 0.15 นำวัตถุดิบที่ชั่งไว้ไปบดด้วยลูกบดแบบรางหมุน (ball milling) ในขวดบดโพลีโพรพิลีน (polypropylene) โดยมีของเหลวตัวกลางคือไอโซโพรพานอล (isopropanol) บดเป็นเวลา 50 ชั่วโมง นำวัตถุดิบที่บดเสร็จแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ จากนั้นทำการทดลองเผาแคลไซน์ (calcine) โดยนำผง PZT ใส่ภาชนะอลูมินาและใช้แผ่นอลูมินาปิดให้สนิท เพื่อกันการระเหยของตะกั่วที่อุณหภูมิสูง ใช้อัตราการเพิ่มและการลดอุณหภูมิ คือ $5^{\circ}C/min$ เผาในเตาเผา (ยี่ห้อ Lenton) ที่อุณหภูมิ $800^{\circ}C$ ซึ่งให้เฟสเดียวของ PZT จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ขั้นตอนการผลิตผง PZT แสดงดังรูปที่ 1

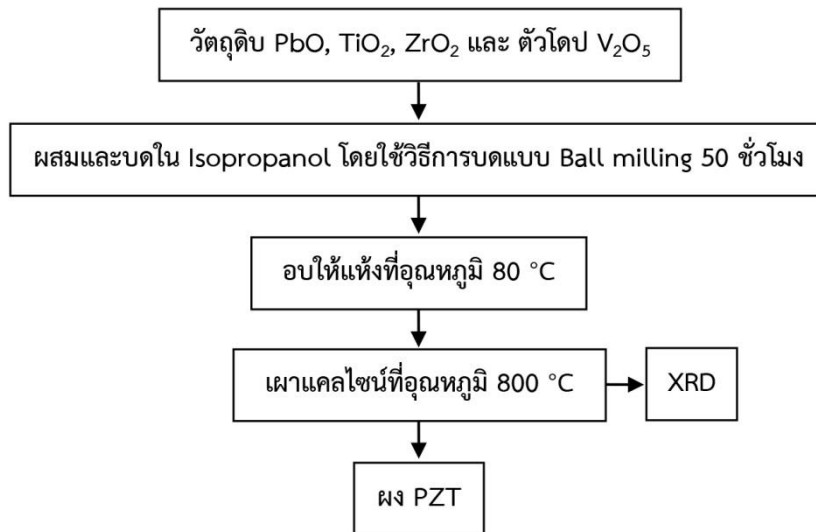
2.1.2 การเผาซินเทอร์เซรามิก V-doped

PZT

เมื่อได้ผง PZT แล้วนำมาบดอีกรอบเพื่อลดขนาดอนุภาค โดยใช้การบดแบบหมุนเหวี่ยง (planetary milling) ด้วยเครื่องบดยี่ห้อ Fritsch รุ่น

D-55743 ใช้ความเร็วในการหมุนบด 200 รอบต่อนาที ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวกลางในการบด โดยใช้ลูกบดเซอรโคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm และบดเป็น

เวลา 60 นาที ซึ่งจะได้ขนาดของอนุภาคที่เหมาะสม ประมาณ 2 ไมครอน ในขั้นตอนนี้มีการเติมสารที่ช่วยในการยึดเกาะ (binder) คือ สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตผง PZT

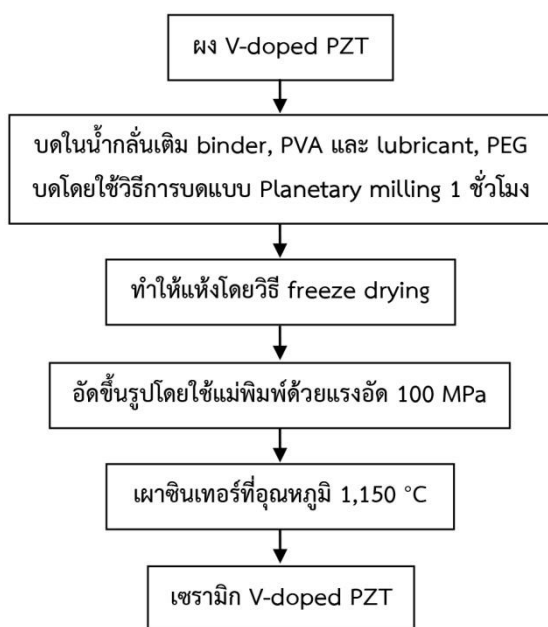
(polyvinyl alcohol, PVA) 0.5 wt % และสารหล่อลื่น (lubricant) คือ สารโพลีเอทธีรีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) 0.5 wt % หลังจากบดจึงแยกสารออกจากลูกบดและนำไปทำให้แห้งโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) เริ่มต้นจากนำสารใส่ขวดแก้วและนำไปแช่เย็นให้แข็งในไนโตรเจนเหลวจนกระทั่งสารแข็งตัวจึงนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze dryer) ซึ่งเครื่องจะดูดอากาศออกจากขวดแก้วทำให้ภายในขวดเป็นสุญญากาศ ทำให้น้ำแข็งระเหิดไปโดยไม่มีกรละลาย เมื่อน้ำแข็งระเหิดไปหมดจะทิ้งไว้แต่ผง PZT ที่แห้ง หลังจากนั้นนำผง PZT มาอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่แบบ (die) รูปทรงกระบอกที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13.0 mm ใช้ความดันในการอัด 100 MPa เมื่ออัดแล้วได้ชิ้นงานรูปดิสก์ที่มีความหนาประมาณ 1.0 mm

แล้วนำชิ้นงานไปเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,150 °C ในการเผาใช้อัตราการเพิ่มและการลดอุณหภูมิ 5 °C/min และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับการเผาซินเทอร์นี้ ใช้แผ่นอลูมินาเป็นฐานในการรองรับชิ้นงานโรยผงเลดเซอร์โคเนต (lead zirconate, PZ) รอบ ๆ ชิ้นงาน สาร PZ นี้เป็นสารที่ทำให้เกิดบรรยากาศที่เป็นตะกั่วเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่วออกจากชิ้นงานแล้วจึงครอบด้วยถ้วยอลูมินาเพื่อให้เป็นบรรยากาศปิดและยังเป็นการกั้นการระเหยของตะกั่วอีกชั้นหนึ่ง ขั้นตอนการเผาซินเทอร์เซรามิก PZT แสดงดังรูปที่ 2

2.2 ระบบการทำงานของเครื่องมือวัด P-E loop ของ Hall และคณะ [2]

เครื่องมือวัด P-E loop ที่ใช้นี้ได้ออกแบบจะอาศัยพื้นฐานการวัดของ Sawyer และ Tower ซึ่งใช้ทดสอบหาวงวนฮีสเทรีซิสของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดเครื่องมือที่สร้างโดย Hall ที่ School of Materials, University of Manchester, UK ในการวัดค่าโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชิ้นงานทดสอบ เครื่องมือมีวงจรต่อเชื่อมเป็นดังรูปที่ 3 โดยใช้เครื่องขยายความต่างศักย์สูงแบบ AC (high voltage AC amplifier) ต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ และเมื่อให้ชิ้นงานอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าก็จะเกิดโพลาริเซชันขึ้นภายในชิ้นงาน จากการวัดค่ากระแสที่ออกจากชิ้นงานเทียบกับเวลา เมื่ออินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแสกับเวลาจะได้ค่าโพลาริเซชัน ซึ่งจะเปลี่ยนไปเมื่อนำสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป เมื่อนำค่าโพลาริเซชันมาเขียนกราฟเทียบกับสนามไฟฟ้าจะได้กราฟเป็นลักษณะของวงฮิสเทอรีซิสหรือเรียกว่าวง P-E



รูปที่ 2 กระบวนการซินเทอร์เซรามิก PZT

ในการทดลองชิ้นงานเซรามิก V-doped PZT ที่เผาซินเทอร์แล้วจะต้องนำมาทำซ้ำโดยการเคลือบด้วยสารตัวนำไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้สารแขวน

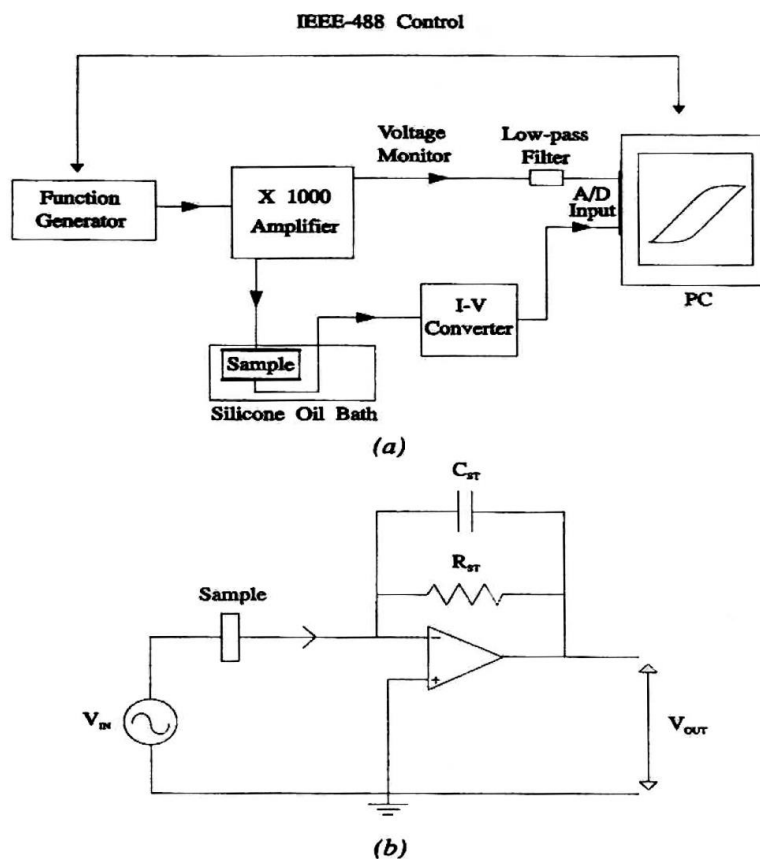
ลอยของอนุภาคโลหะเงิน (Ag, Silver paste) เคลือบลงบนชิ้นงานรูปดิสก์ ซึ่งกำหนดให้มีความหนาประมาณ 1 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 mm เมื่อเคลือบด้วยเงินแล้วจะต้องนำไปเผาเพื่อไล่สารอินทรีย์และทำให้เงินเกิดพันธะเข้ากับผิวของชิ้นงาน ซึ่งทำให้เงินติดแน่นที่ผิว ชิ้นงานที่ทำซ้ำแล้วสามารถนำมาใช้สำหรับการวัดวงฮิสเทอรีซิสของค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า (P-E loop) โดยให้สนามไฟฟ้าความเข้มต่าง ๆ ในช่วงตั้งแต่ 0.2 ถึง 2 kV/mm

2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์วงฮิสเทอรีซิส P-E

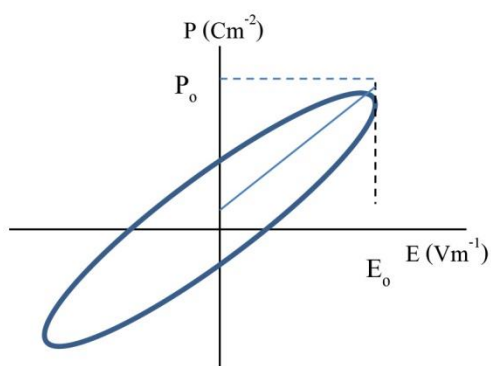
2.3.1 การคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุจากวงฮิสเทอรีซิส P-E

วิธีการคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity, ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) นั้น สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่ได้ออกมาจากระหว่างค่าโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า (P-E loop) หนึ่งวง โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์นั้นมีความสัมพันธ์กับความชันของกราฟ และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ในวง ทั้งนี้ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์อาจจะเป็นข้อมูลที่วัดมาในลักษณะชุดข้อมูลที่ได้ออกมาจากการวัดค่าแบบต่อเนื่อง แต่ที่สำคัญคือจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของกราฟ P-E ที่ต้องกำหนดได้ชัดเจน (ปกติคือจุดที่มีค่าสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์) ซึ่งจะทำให้การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟและความชันถูกต้อง จากกราฟ P-E ดังรูปที่ 4 กำหนดให้ P_0 คือค่าโพลาริเซชันที่จุดสูงสุดของกราฟและ E_0 คือค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ป้อนให้แก่ชิ้นงาน จากกราฟจะสามารถคำนวณขนาดของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน $|\epsilon_r^*|$ สามารถคำนวณได้จาก P_0/E_0 ดังสมการที่ 1

$$|\epsilon_r^*| = P_0/E_0 \quad (1)$$



รูปที่ 3 (a) แผนผังการต่อเครื่องมือวัด (b) วงจรเชื่อมต่อเครื่องมือทดสอบ P-E loop [2]



รูปที่ 4 วงฮิสเทอรีซิส P-E แสดงตำแหน่งที่ใช้สำหรับค่า P_0 และ E_0

อย่างไรก็ตามค่า $|\epsilon_r^*|$ นี้ไม่เท่ากับค่า ϵ_r' (Real part of relative permittivity) ถึงแม้ว่า

ค่าทั้งสองนี้อาจจะมีค่าใกล้เคียงกันหากวัสดุมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$U_H = \pi \epsilon_0 \epsilon_r'' E_0^2 \quad (2)$$

U_H คือ ค่าการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) ซึ่งได้จากการหาผลรวม (integrate) ของพื้นที่ใต้กราฟของวง P-E โดยที่หน่วยของ P กำหนดให้เป็น Cm^{-2} และหน่วยของ E เป็น Vm^{-1} ซึ่งจะได้ค่า U_H ในหน่วยของ Jm^{-3} ค่า ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ จากสมการที่ 2 เมื่อทราบ U_H จากพื้นที่ใต้กราฟของวง P-E ก็จะสามารถหาค่า ϵ_r'' ได้ เมื่อแทนค่า ϵ_r''

และ $|\epsilon_r^*|$ ในสมการที่ 3 จะสามารถหาค่า ϵ_r' ซึ่งเป็นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ได้ ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss หรือ $\tan\delta$) หาได้จากสมการที่ 4

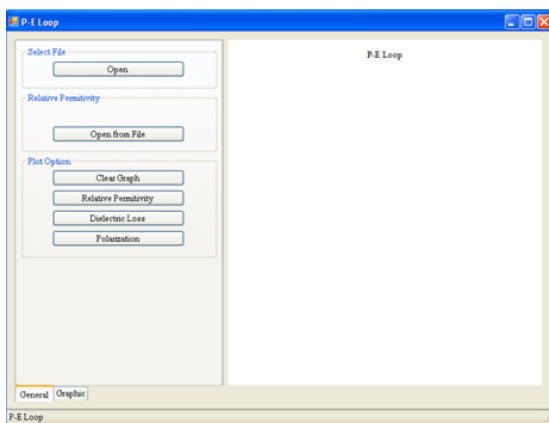
$$|\epsilon_r^*| = \sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} \quad (3)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4)$$

2.3.2 การเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ห่วง

ฮีสเทอรีซิส P-E (P-E loop analysis program)

โปรแกรม P-E loop analysis ในงานวิจัยนี้สร้างมาจากโปรแกรม Microsoft Visual Studio เวอร์ชัน 2008 โดยใช้ภาษา C# การเขียนโปรแกรมโดย Microsoft Visual Studio คือ Integrated Development Environment (IDE) ที่พัฒนาขึ้นโดย Microsoft ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยนักพัฒนาซอฟต์แวร์พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เว็บไซต์ เว็บแอปพลิเคชัน และเว็บเซอร์วิส ที่รองรับการทำงานในระบบ Microsoft Windows, Windows CE Pocket PC, Windows Mobile และ เว็บเบราว์เซอร์ ในปัจจุบัน Microsoft Visual Studio เป็นภาษาดอตเน็ต (.NET Framework) ที่สามารถใช้ได้หลายภาษา เช่น VB.NET, C++, C#, J# ในโปรแกรมเดียวกัน



รูปที่ 5 หน้าจอแสดงโปรแกรม P-E Loop analysis

สำหรับหน้าจอแสดงโปรแกรม P-E loop analysis นั้น ผู้วิจัยออกแบบให้เรียบง่ายและเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 5 โดยมีปุ่มเรียกเปิดไฟล์เพื่อนำข้อมูลมาทำการเขียนกราฟ ปุ่มคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าและนำค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่คำนวณได้มาเขียนกราฟ ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity, ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss, $\tan\delta$) มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเหล่านี้และค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ชิ้นงานได้

2.3.3 การนำข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ P-E loop

งานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ชิ้นงานเซรามิก V-doped PZT มาใช้ โดยไฟล์สำหรับการเก็บข้อมูลแต่ละวงฮีสเทอรีซิสหรือลูป (loop) จะถูกเก็บไว้ในรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งตัวอักษร E คือ ค่าสนามไฟฟ้า และ P คือ ค่าโพลาริเซชันของชิ้นงาน แต่ละค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานคายประจุไฟฟ้าออกมาไม่เท่ากัน และสามารถนำไปคำนวณและเก็บข้อมูลเป็นค่าโพลาริเซชันเฉพาะของแต่ละค่าสนามไฟฟ้าได้ เช่น เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E11 วัสดุจะมีค่าโพลาริเซชันเท่ากับ P11

ตารางที่ 1 โครงสร้างของไฟล์ข้อมูล

E11	P11	E12	P12	E1N	P1N
E21	P21	E22	P22	E2N	P2N
EN1	PN1	EN2	PN2	ENN	PNN

และมีการบันทึกเป็นไฟล์คอมพิวเตอร์แบบข้อความ (text) โดยมีโครงสร้างดังนี้

E11, P11, E12, P12 E1N, P1N

E21, P21, E22, P22, E2N, P2N

EN1, PN1, EN2, PN2, ENN, PNN

เมื่อนำไฟล์ที่มีโครงสร้างในรูปที่ 6 ไป

ซึ่งแต่ละค่าจะถูกค้นกลางด้วย

เปิดกับโปรแกรม Microsoft Excel ก็จะได้เป็นตาราง

เครื่องหมาย “ , ” ดังแสดงในรูปที่ 6

ดังแสดงในรูปที่ 7

1 2.49E-03,1.17E-04,7.88E-03,2.91E-04,1.18E-02,5.07E-04,1.57E-02,7.75E-04,1.32E-0
 2 1.32E-03,9.76E-05,4.69E-03,2.52E-04,6.44E-03,4.47E-04,8.53E-03,6.91E-04,7.68E-0
 3 3.69E-04,8.03E-05,1.83E-03,2.14E-04,9.07E-04,3.87E-04,7.53E-04,6.10E-04,-1.09E-
 4 -2.09E-03,6.46E-05,-1.58E-03,1.78E-04,-4.90E-03,3.29E-04,-8.62E-03,5.29E-04,-2.
 5 -5.81E-03,4.90E-05,-7.02E-03,1.44E-04,-1.21E-02,2.73E-04,-1.90E-02,4.49E-04,-3.
 6 -8.97E-03,3.20E-05,-1.28E-02,1.08E-04,-2.01E-02,2.16E-04,-2.85E-02,3.66E-04,-3.
 7 -1.14E-02,1.28E-05,-1.82E-02,7.11E-05,-2.63E-02,1.58E-04,-3.66E-02,2.83E-04,-5.
 8 -1.26E-02,-7.40E-06,-2.21E-02,3.21E-05,-3.14E-02,9.80E-05,-4.42E-02,1.99E-04,-6
 9 -1.42E-02,-2.67E-05,-2.53E-02,-6.84E-06,-3.66E-02,3.79E-05,-5.12E-02,1.18E-04,-
 10 -1.53E-02,-4.39E-05,-2.79E-02,-4.38E-05,-4.21E-02,-2.03E-05,-5.87E-02,3.81E-05,
 11 -1.71E-02,-5.95E-05,-3.12E-02,-7.89E-05,-4.82E-02,-7.63E-05,-6.85E-02,-4.08E-05
 12 -2.01E-02,-7.52E-05,-3.66E-02,-1.13E-04,-5.64E-02,-1.32E-04,-7.80E-02,-1.21E-04
 13 -2.28E-02,-9.25E-05,-4.21E-02,-1.49E-04,-6.39E-02,-1.89E-04,-8.62E-02,-2.04E-04
 14 -2.48E-02,-1.12E-04,-4.63E-02,-1.87E-04,-7.00E-02,-2.48E-04,-9.34E-02,-2.87E-04
 15 -2.61E-02,-1.32E-04,-4.94E-02,-2.26E-04,-7.51E-02,-3.09E-04,-1.01E-01,-3.69E-04
 16 -2.71E-02,-1.51E-04,-5.25E-02,-2.64E-04,-7.99E-02,-3.68E-04,-1.09E-01,-4.49E-04
 17 -2.83E-02,-1.67E-04,-5.59E-02,-3.00E-04,-8.53E-02,-4.25E-04,-1.19E-01,-5.27E-04
 18 -3.13E-02,-1.83E-04,-6.10E-02,-3.34E-04,-9.30E-02,-4.80E-04,-1.28E-01,-6.07E-04
 19 -3.48E-02,-1.98E-04,-6.65E-02,-3.69E-04,-1.02E-01,-5.37E-04,-1.36E-01,-6.89E-04
 20 -3.75E-02,-2.16E-04,-7.11E-02,-4.06E-04,-1.09E-01,-5.95E-04,-1.44E-01,-7.72E-04

รูปที่ 6 โครงสร้างข้อมูลที่บันทึกในไฟล์คอมพิวเตอร์

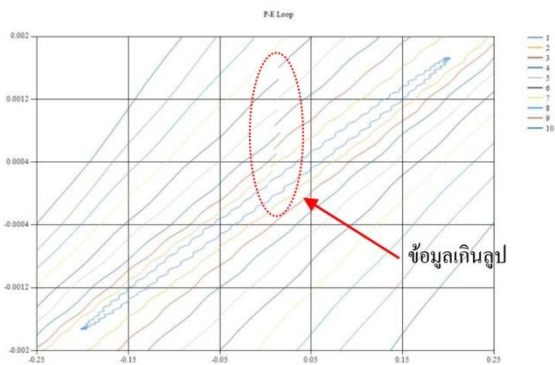
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	E / MV m ²	P / C m ²	E / MV m ²	P / C m ²	E / MV m ²	P / C m ²	E / MV m ²	P / C m ²	E / MV m ²	P / C m ²
3	2.49E-03	1.17E-04	7.88E-03	2.91E-04	1.18E-02	5.07E-04	1.57E-02	7.75E-04	1.32E-02	1.06E-03
4	1.32E-03	9.76E-05	4.69E-03	2.52E-04	6.44E-03	4.47E-04	8.53E-03	6.91E-04	7.68E-04	9.56E-04
5	3.69E-04	8.03E-05	1.83E-03	2.14E-04	9.07E-04	3.87E-04	7.53E-04	6.10E-04	-1.09E-02	8.46E-04
6	-2.09E-03	6.46E-05	-1.58E-03	1.78E-04	-4.90E-03	3.29E-04	-8.62E-03	5.29E-04	-2.04E-02	7.34E-04
7	-5.81E-03	4.90E-05	-7.02E-03	1.44E-04	-1.21E-02	2.73E-04	-1.90E-02	4.49E-04	-3.01E-02	6.22E-04
8	-8.97E-03	3.20E-05	-1.28E-02	1.08E-04	-2.01E-02	2.16E-04	-2.85E-02	3.66E-04	-3.98E-02	5.13E-04
9	-1.14E-02	1.28E-05	-1.82E-02	7.11E-05	-2.63E-02	1.58E-04	-3.66E-02	2.83E-04	-5.04E-02	4.07E-04
10	-1.26E-02	-7.40E-06	-2.21E-02	3.21E-05	-3.14E-02	9.80E-05	-4.42E-02	1.99E-04	-6.27E-02	3.01E-04
11	-1.42E-02	-2.67E-05	-2.53E-02	-6.84E-06	-3.66E-02	3.79E-05	-5.12E-02	1.18E-04	-7.39E-02	1.93E-04
12	-1.53E-02	-4.39E-05	-2.79E-02	-4.38E-05	-4.21E-02	-2.03E-05	-5.87E-02	3.81E-05	-8.44E-02	8.31E-05
13	-1.71E-02	-5.95E-05	-3.12E-02	-7.89E-05	-4.82E-02	-7.63E-05	-6.85E-02	-4.08E-05	-9.43E-02	-2.68E-05
14	-2.01E-02	-7.52E-05	-3.66E-02	-1.13E-04	-5.64E-02	-1.32E-04	-7.80E-02	-1.21E-04	-1.05E-01	-1.35E-04
15	-2.28E-02	-9.25E-05	-4.21E-02	-1.49E-04	-6.39E-02	-1.89E-04	-8.62E-02	-2.04E-04	-1.15E-01	-2.40E-04
16	-2.48E-02	-1.12E-04	-4.63E-02	-1.87E-04	-7.00E-02	-2.48E-04	-9.34E-02	-2.87E-04	-1.28E-01	-3.45E-04
17	-2.61E-02	-1.32E-04	-4.94E-02	-2.26E-04	-7.51E-02	-3.09E-04	-1.01E-01	-3.69E-04	-1.39E-01	-4.52E-04
18	-2.71E-02	-1.51E-04	-5.25E-02	-2.64E-04	-7.99E-02	-3.68E-04	-1.09E-01	-4.49E-04	-1.49E-01	-5.61E-04
19	-2.83E-02	-1.67E-04	-5.59E-02	-3.00E-04	-8.53E-02	-4.25E-04	-1.19E-01	-5.27E-04	-1.58E-01	-6.70E-04
20	-3.13E-02	-1.83E-04	-6.10E-02	-3.34E-04	-9.30E-02	-4.80E-04	-1.28E-01	-6.07E-04	-1.68E-01	-7.77E-04

รูปที่ 7 ข้อมูลที่บันทึกในไฟล์คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

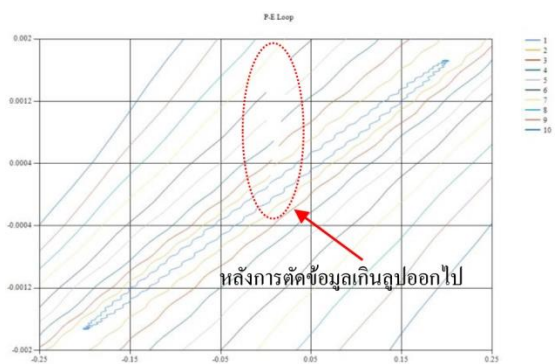
2.3.4 การกรองข้อมูลเกินรูป (loop)

เมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้า E แก้วชุดข้อมูลที่น่ามาเขียนกราฟจะเริ่มนับจากจุดที่ข้อมูลมีค่าโพลาริเซชันเป็นศูนย์แล้ววนไปที่จุดโพลาริเซชันสูงสุด (ปกติเมื่อค่า E เท่ากับ E ที่กำหนดในการวัดค่าแต่ละครั้ง) จากนั้นวนกลับไปจุดที่ค่าโพลาริเซชันต่ำสุด (หรือจุดที่ให้สนามไฟฟ้ากลับทิศหรือเป็นลบ) แล้ววน

กลับไปจุดเริ่มต้นอีกครั้ง เรียกว่า 1 ลูป ซึ่งบางครั้งการจบที่ 1 ลูปจะมีข้อมูลที่เกิดลูปติดมาด้วยดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะมีผลทำให้การคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ (parameter) ของลูปผิดพลาดไปด้วย จึงจำเป็นต้องมีการกรองไม่ให้ข้อมูลเกินรูป ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยโปรแกรมจะตัดข้อมูลที่เกินมาออกไป



รูปที่ 8 กราฟแสดงภาพขยายบริเวณกลางวงฮิสเทอรีซิส P-E ซึ่งแสดงลูปซ้อนกันของหลาย ๆ ค่าสนามไฟฟ้าและในบางลูปมีลักษณะข้อมูลเกินลูป

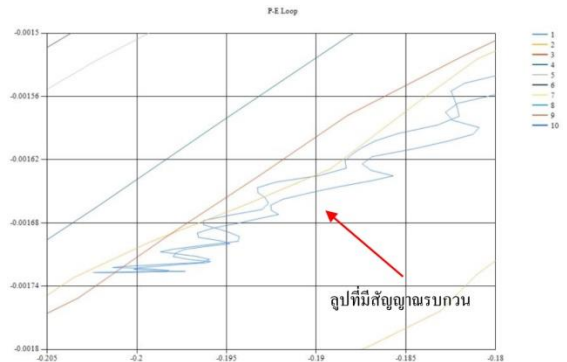


รูปที่ 9 ข้อมูลที่ผ่านการกรองเพื่อไม่ให้เกินลูป

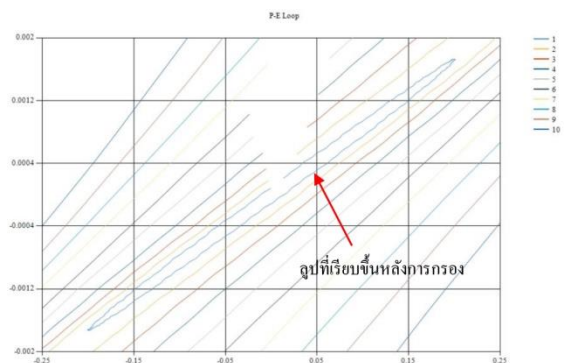
2.3.5 การกรองสัญญาณรบกวน

ข้อมูลที่มีความเรียบของสัญญาณน้อย อาจเกิดจากความไม่ละเอียดของเครื่องมือวัด ส่วนใหญ่จะเกิดในลูปที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 10 ความไม่เรียบของสัญญาณดังกล่าวจะมีผลทำให้คำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ผิดพลาดได้ โปรแกรม P-E loop analysis จึงได้มีการออกแบบให้มีการแก้ไขโดยการเพิ่มตัวกรองสัญญาณให้แก่ข้อมูลซึ่งเป็นตัวกรองแบบดิจิตอล (digital filter) แบบ median filter และ average filter ซึ่งมีสมบัติช่วยลดสัญญาณรบกวนและทำให้ข้อมูลเรียบตามลำดับ ดังผลการกรองสัญญาณในรูปที่

11 สังเกตว่ากราฟของลูปด้านใน หรือลูปที่สนามไฟฟ้าต่ำ ๆ ที่มักจะมีลักษณะของสัญญาณรบกวนอยู่มาก เมื่อผ่านการกรองสัญญาณแล้วเส้นกราฟเรียบขึ้น



รูปที่ 10 ความไม่เรียบของสัญญาณที่เกิดในลูปเล็ก (สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ ๆ)



รูปที่ 11 สัญญาณที่ได้หลังการกรองข้อมูลเกินลูป และกรองสัญญาณรบกวนเรียบร้อยแล้ว

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ P-E loop

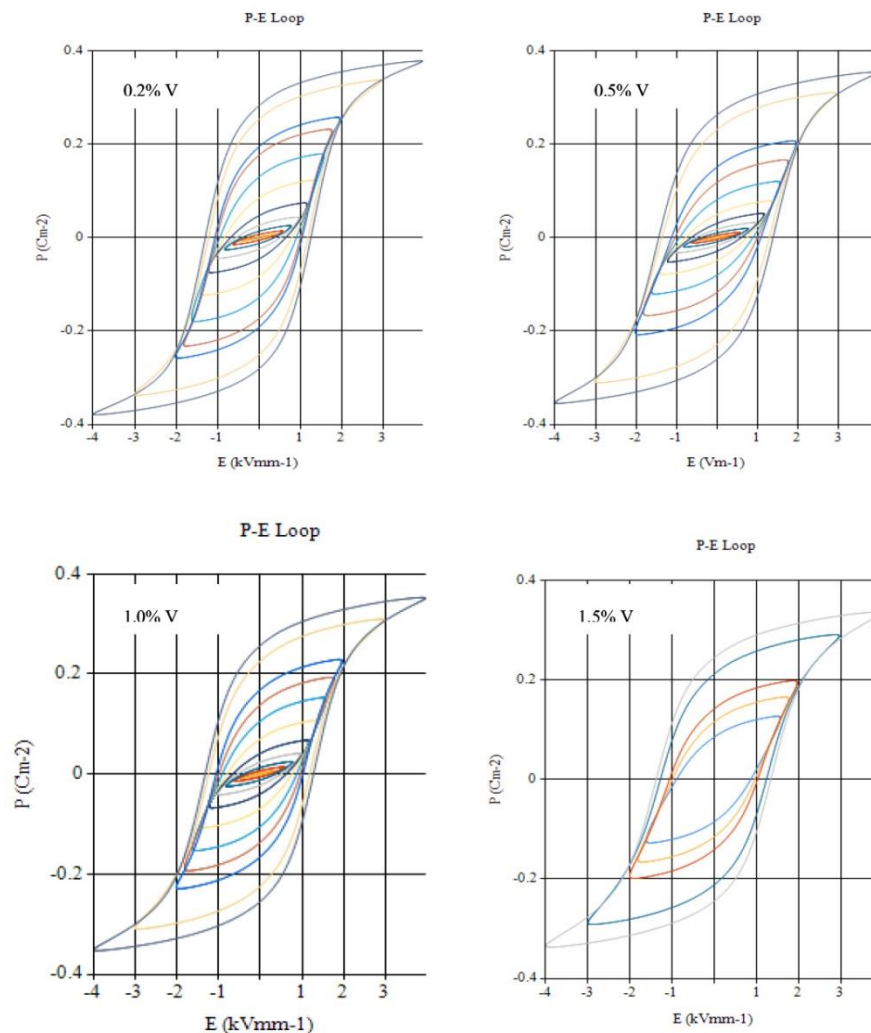
ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาใช้วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลทางไฟฟ้า คือ ค่าโพลาไรเซชันของเซรามิก PZT ที่ผลิตขึ้นมา 4 สูตร คือ PZT ที่มีการผสมตัวโดปเวเนเดียม (V) ในปริมาณต่าง ๆ คือ 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 mol % โดยวัดค่าโพลาไรเซชันของชิ้นงานเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าความเข้ม

ต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 2 kV/mm โดยแบ่งผลการใช้โปรแกรมเป็น 2 ส่วน ดังหัวข้อ 3.1.1 และ 3.1.2

3.1.1 ผลการเขียนกราฟฮิสเทอรีซิส P-E

เมื่อนำโปรแกรมวิเคราะห์ P-E loop มาใช้เรียกข้อมูลทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าโพลาไรเซชันของชิ้นงานเซรามิก PZT ที่มีการเติมตัวโดป

เวเนเดียมปริมาณตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.5 mol % ได้ผลดังรูปที่ 12 ซึ่งเปรียบเทียบกราฟของชิ้นงานเซรามิก PZT+V ทั้ง 4 ชิ้นงาน ซึ่งกราฟที่ได้นี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ดังจะแสดงผลในหัวข้อ 3.1.2



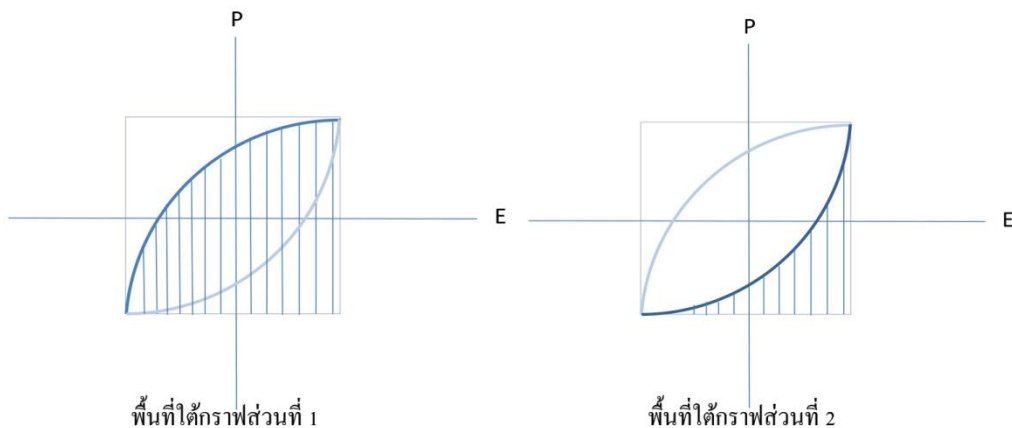
รูปที่ 12 ผลการเขียนกราฟเปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิส P-E ของชิ้นงาน PZT ที่โดปด้วยเวเนเดียม

3.1.2 ผลการใช้โปรแกรมคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ

คำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ของโปรแกรม P-E loop (โปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้คำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก) เริ่มจาก

การหาค่าสนามไฟฟ้า (E_0) สูงสุด และค่าโพลาริเซชัน (P_0) สูงสุดจากลูป จากนั้นคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากความชันของกราฟและโปรแกรมที่เขียนขึ้นยังสามารถหาค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (หรือ $\tan \delta$) ได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟดังหลักการที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.1 ซึ่งในทางปฏิบัติการคำนวณพื้นที่ใต้

กราฟนี้จะใช้หลักการรวมพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 13 โดยโปรแกรมจะรวมพื้นที่ใต้กราฟของลูปด้านบน (ส่วนที่ 1) และพื้นที่ใต้กราฟของลูปด้านล่าง (ส่วนที่ 2) แล้วนำส่วนที่ 2 ลบออกจากส่วนที่ 1 ก็จะได้พื้นที่ในลูป ซึ่งก็คือค่าการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (U_H) ซึ่งโปรแกรมจะนำไปคำนวณเป็นค่า $\tan \delta$ ได้



รูปที่ 13 การหาพื้นที่ภายในลูปของ P-E

เมื่อคำนวณค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ ได้แล้ว โปรแกรม P-E loop analysis จะทำการบันทึกค่าที่คำนวณได้อย่างอัตโนมัติ (auto save) ไว้ในไฟล์ที่มีชื่อ

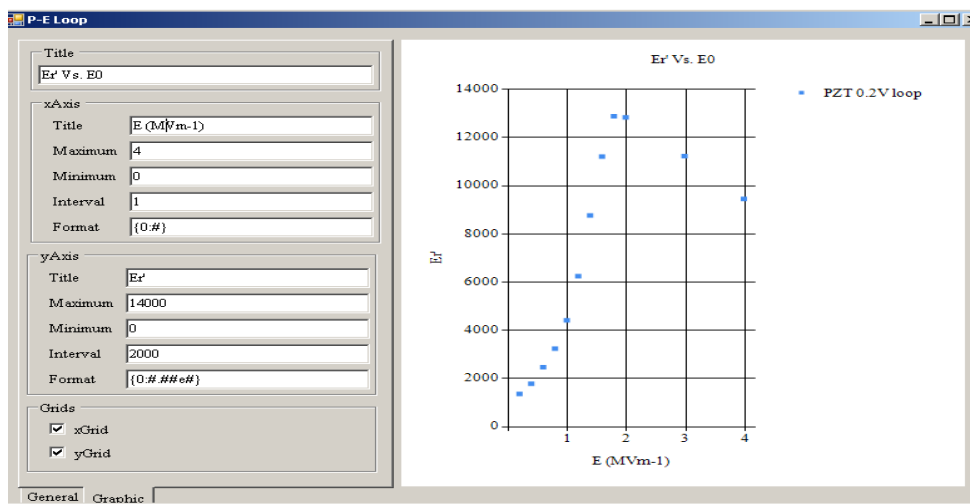
เดิมแต่เพิ่มคำว่า “calculated” โดยมีข้อมูลที่ได้จากการคำนวณบรรจุอยู่ภายในไฟล์ ซึ่งแสดงในตารางของโปรแกรม Microsoft Excel ได้ดังแสดงในรูปที่ 14

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	E0	P0	Er	Er1	Er2	Tan(Er2/Er1)	Uh		
2	0.1998	0.002738	1370.37	1360.661	162.8398178	0.119677005	0.001808		
3	0.3982	0.00715	1795.58	1781.78	222.189198	0.124700695	0.0098		
4	0.599	0.0149	2487.479	2467.101	317.7477685	0.128793966	0.031712		
5	0.7994	0.0261	3264.949	3236.881	427.1868599	0.131974828	0.075934		
6	0.9976	0.0444	4450.681	4411.052	592.6063869	0.134345806	0.164047		
7	1.19	0.0751	6310.924	6253.1	852.351347	0.136308611	0.335739		
8	1.39	0.123	8848.921	8765.473	1212.38813	0.138314053	0.651569		
9	1.59	0.18	11320.75	11213.18	1556.925127	0.138847739	1.094842		
10	1.79	0.233	13016.76	12890.24	1810.452255	0.140451395	1.61355		
11	1.99	0.258	12964.82	12838.93	1802.341691	0.140380952	1.98533		
12	2.98	0.338	11342.28	11232.98	1570.845545	0.139842303	3.880212		
13	3.98	0.38	9547.739	9455.794	1321.843181	0.139791875	5.824189		
14									
15									
16									
17									

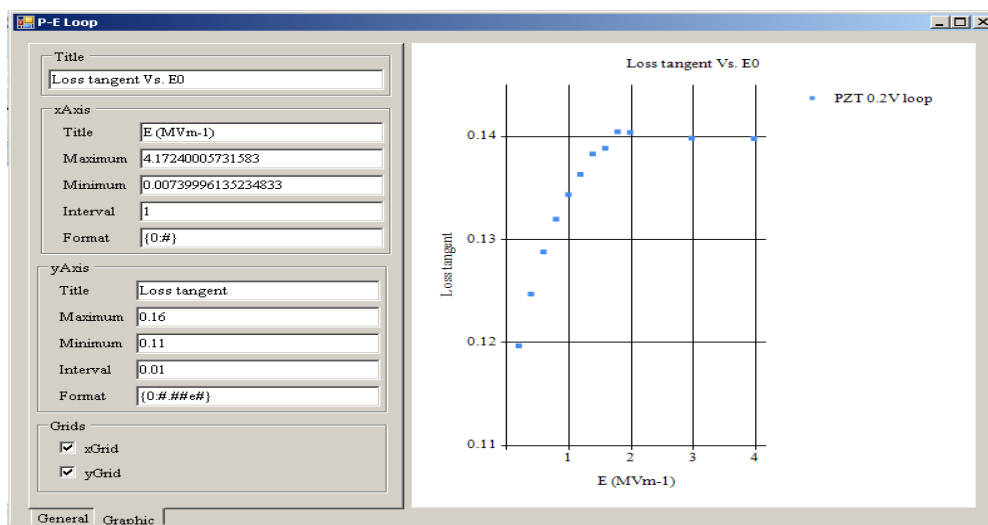
รูปที่ 14 ตัวอย่างไฟล์ที่เก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากกราฟ P-E loop

ข้อมูลที่คำนวณแล้วสามารถที่จะนำไปเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้ด้วย ส่วนในตัวโปรแกรมเองก็สามารถที่จะแสดงผลกราฟระหว่างค่าตัวแปรต่าง ๆ กับค่าสนามไฟฟ้า การแสดงผล relative permittivity หน้าจอโปรแกรมจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_r และ E_0 ดังรูปที่ 15 สำหรับกราฟระหว่างค่าการสูญเสียทาง

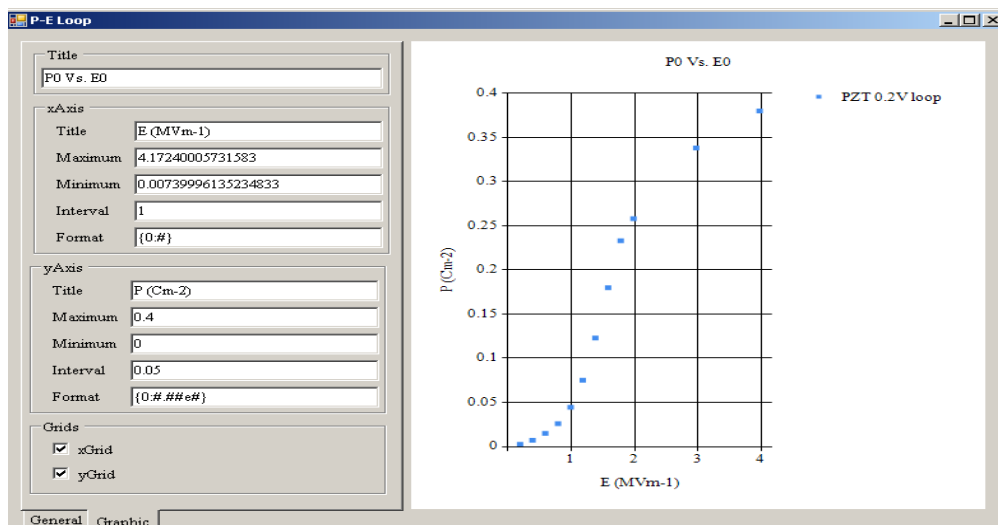
ไดอิเล็กทริก หรือค่า loss tangent สามารถแสดง dielectric loss ดังแสดงในรูป 16 หากต้องการใช้แสดงกราฟระหว่างค่าโพลาไรเซชันสูงสุด P_0 กับค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ชิ้นงาน E_0 ก็จะได้กราฟดังแสดงในรูป 17 โดยสามารถควบคุมสเกลของกราฟได้จากหน้าจอ graphic



รูปที่ 15 หน้าจอแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และสนามไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT + 0.2 % V (ϵ_r Vs. E_0)



รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า loss tangent และค่าสนามไฟฟ้า (E)



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันสูงสุดที่วัดได้จากการป้อนสนามไฟฟ้าความเข้มต่าง ๆ

4. สรุปผลงานวิจัย

โปรแกรมวิเคราะห์ P-E loop ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Visual Studio C## นี้สามารถทำให้การเขียนกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันและสนามไฟฟ้าของชิ้นงานหนึ่ง ๆ ได้ และนำมาแสดงเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นโปรแกรมยังสามารถนำกราฟวงฮิสเทอรีซิสมาคำนวณค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกได้ และสามารถนำค่าที่คำนวณมาแสดงบนหน้าจอเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้า นอกจากนั้นกราฟที่แสดงบนหน้าจอโปรแกรมยังสามารถปรับสเกลเพื่อให้เห็นรายละเอียดของกราฟได้ด้วย ดังนั้นโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานี้จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการเรียนการสอนและงานวิจัยทางด้านการวัดค่าทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติ

การทางการวัดค่าเพียโซอิเล็กทริก School of Materials, University of Manchester, UK

6. รายการอ้างอิง

- [1] เจียรนัย เล็กอุทัย, เบญญา เชิดทริฎกร และ จักรารุช พานิชโยทัย, 2558, การพัฒนาสร้างเครื่องมือทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสของค่าโพลาไรเซชันและสนามไฟฟ้าสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 23(3): 466-474. (2015)
- [2] Stevenson, P.J., 1998, High Field Dielectric Properties of Hard PZT Ceramics, Ph.D. Thesis, University of Manchester, Manchester.
- [3] Jeffe, B., Cook, W. and Jeffe, H., 1971, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, Inc., (London) Ltd.
- [4] Cherdhirunkorn, B., Pidthong, B., Jeamwutthisak, P., Hall, D.A., Shuaib, M. and Tunkasiri, T., 2012, Influences of cobalt

- dopant on the phases, microstructures and dielectric properties of PZT ceramics, J. Ceram. Proc. Res. 13(2): s323-s327.
- [5] Cherdhirunkorn, B., Smith, M.F., Limpi-jumnon, S., Hall, D.A., 2008, EXAFS study on the site preference of Mn in perovskite structure of PZT ceramics, Ceram. Int. 34: 727-729.