

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย โดยเริ่มจากการเตรียมผงแบเรียมไทเทเนต (BT) และการเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม ($\text{Fe}^{3+}/\text{Nb}^{5+}$ doped BT) และกระบวนการประดิษฐ์ชิ้นงานเซรามิก จากนั้นจึงกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยมีรายละเอียดแสดงไว้ตามลำดับดังนี้

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมผงของสารทุกระบบด้วยการเลือกใช้เทคนิค mixed - oxide เป็นหลัก โดยมีรายละเอียดของสารตั้งต้นทั้งหมดแสดงไว้ในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่ใช้ศึกษา

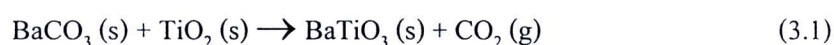
สารตั้งต้น	บริษัทที่ผลิต	มวลโมเลกุล	ความบริสุทธิ์ (%)
BaCO_3	Sigma-Aldrich	197.34	99.00
TiO_2	Sigma-Aldrich	79.87	≥ 99.00
Fe_2O_3	SIAL	159.69	99.98
Nb_2O_5	Aldrich	265.81	99.99

เริ่มจากการชั่งสารตั้งต้นตามที่ได้คำนวณไว้ นำมาใส่ในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนีย (ball-milling) หรือ agate (vibro-milling) เติมเอทานอลลงไปช่วยในการหล่อลื่น นำไปผ่านกระบวนการบดย่อยผสมสารด้วยเทคนิค ball-milling (หรือ vibro-milling) เป็นเวลานานแตกต่างกัน ซึ่งในกระบวนการบดย่อยนี้จะช่วยลดการเกาะตัวกันของอนุภาค และช่วยลดขนาด

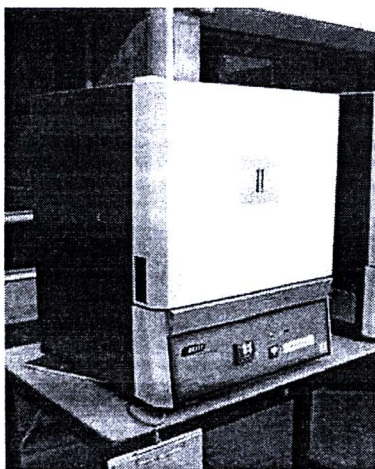
อนุภาคให้เล็กลงด้วย แล้วจึงนำสารผสมที่ได้ไปอบให้แห้ง จากนั้นก็นำผงผสมที่ได้ใส่ลงในถ้วยอลูมินาปิดฝาให้สนิท แล้วนำไปเผาแคลไซน์ด้วยไฟฟ้า (รูป 3.1) ดังแผนภาพแสดงในรูป 3.2

3.1.1 การเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

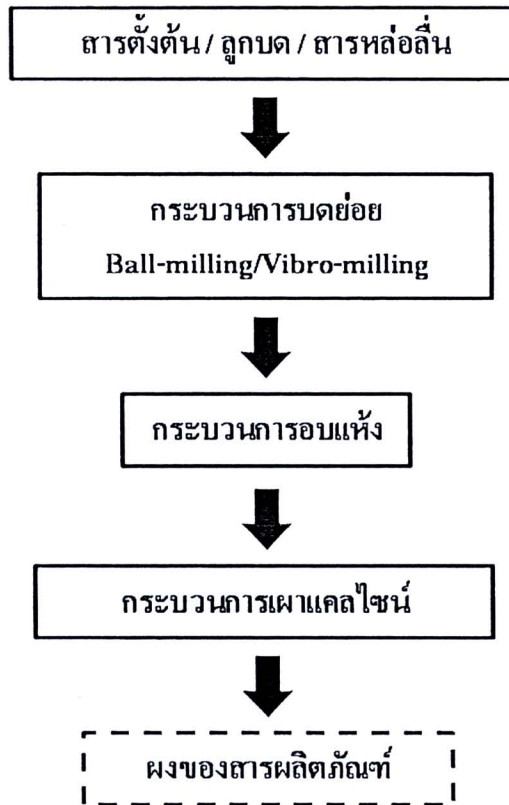
ทำการเตรียมผงแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) จากปฏิกิริยาของสารตั้งต้น BaCO_3 และ TiO_2 โดยอาศัยสมการเคมีที่ (3.1) ดังนี้



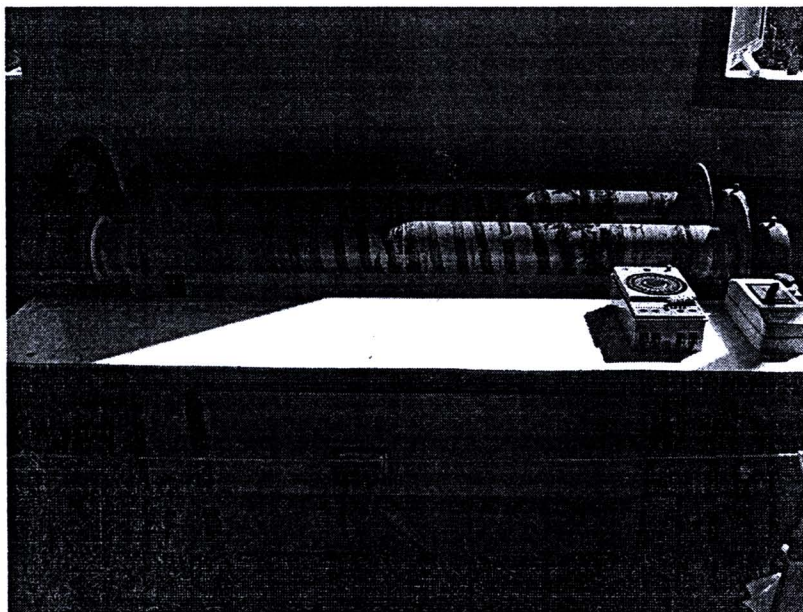
ทำการผสมสารตั้งต้นโดยการ Ball-milling (รูป 3.3) เป็นเวลานาน 10, 20 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-1300 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง อุณหภูมิ 5 °ซ/นาท [36] โดยอาศัยแผนผังในการแคลไซน์ดังรูป 3.4 แล้วจึงนำสารที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาปริมาณเฟสของ BT ที่เกิดขึ้น และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสาร BT ที่มีเฟสบริสุทธิ์ต่อไป



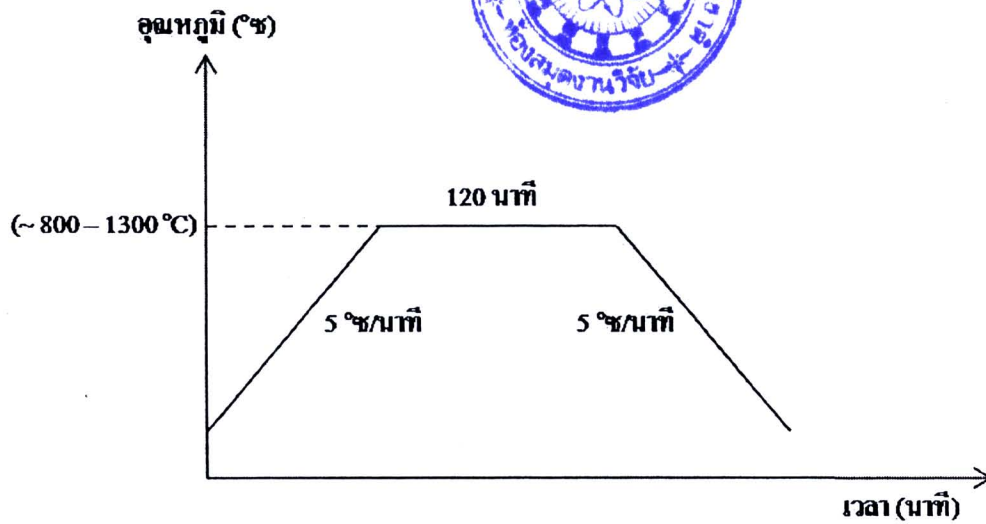
รูป 3.1 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร



รูป 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผงผลิตภัณฑ์ที่ใช้



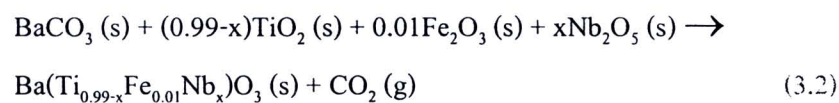
รูป 3.3 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Ball-milling



รูป 3.4 แผนผังแสดงการเผาแคลไซน์ที่ใช้ในการเตรียมผง BT

3.1.2 การเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม

ทำการเตรียมผงแบเรียมไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมด้วยวิธี mixed-oxide โดยอาศัยสมการเคมีที่ (3.2) ดังนี้



ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการเตรียมสารที่มีค่า x เท่ากับ 0.01 และ 0.025 โดยใช้เทคนิค Vibro-milling (รูป 3.5) ในการบดย่อยผสมสารเป็นเวลานาน 0.5 ชั่วโมง จากนั้นนำผงผสมที่ได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $\sim 1100\text{--}1250$ °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที [35] ตามแผนผังการแคลไซน์ในรูป 3.4 แล้วจึงนำสารที่ได้ไปตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD ต่อไป

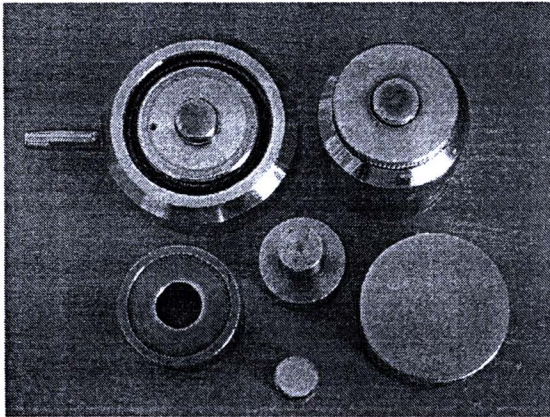


รูป 3.5 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Vibro-milling

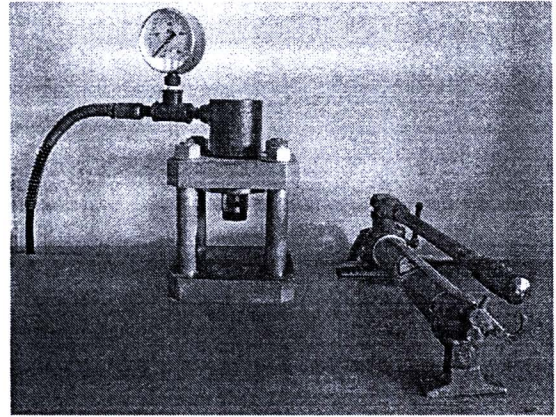
3.1.3 กระบวนการประดิษฐ์เซรามิก (Ceramic Fabrication)

ในกระบวนการประดิษฐ์เซรามิกทุกระบบจะผสม Polyvinyl Alcohol (PVA) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักลงไปด้วยประมาณ 1-2 หยด เพื่อเป็นตัวช่วยประสานให้ผงเกาะกันดีขึ้น จากนั้นนำผงที่เตรียมได้มาทำการอัดขึ้นรูปแบบ uniaxial pressing จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disk) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร โดยทำการอัดในแม่พิมพ์โลหะด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (รูป 3.6 (ก) และ (ข)) ด้วยความดัน 100-150 เมกะพาสคัล เป็นเวลานาน 15-20 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (green body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงบนแผ่นจานอลูมินาที่มีผงอลูมินารองเป็นพื้นอยู่ (รูป 3.7) จากนั้นปิดด้วยฝาอลูมินา แล้วนำไปเผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยในการเผาขึ้นเตอร์สารจะเริ่มด้วยการให้ความร้อนด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ไปถึงที่อุณหภูมิ 500°C แล้วคงความร้อนไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิเผาขึ้นเตอร์ โดยในกรณีของการเตรียมเซรามิก BT จะอยู่ในช่วง $1325\text{-}1450^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ (ดังแสดงในรูป 3.8)

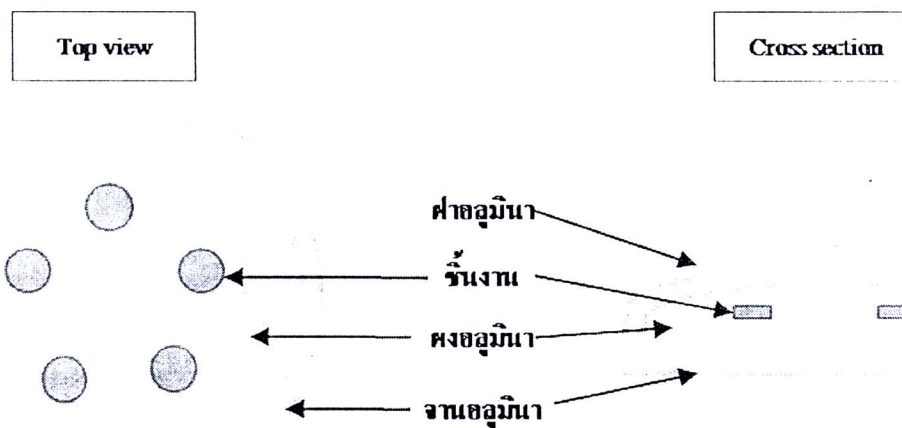


(ก)

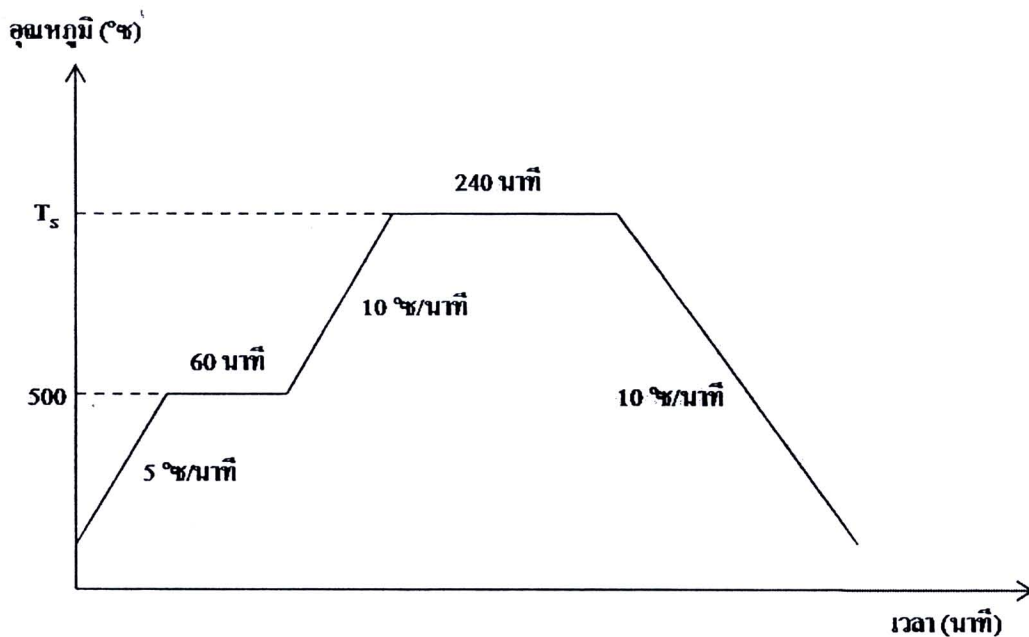


(ข)

รูป 3.6 (ก) แม่พิมพ์โลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (ข) เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก



รูป 3.7 การจัดเรียงชิ้นงานบนแผ่นงานอลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์



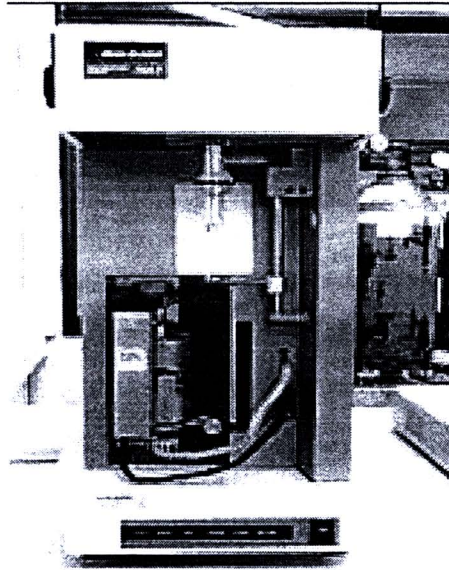
รูป 3.8 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์ของเซรามิก BT (T_s คืออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์)

ส่วนเซรามิกในระบบแบเรียมไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียมสูตร $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.99-x}\text{Fe}_{0.01}\text{Nb}_x)\text{O}_3$ ที่มีค่า $x = 0.01$ และ $x = 0.025$ ใช้อุณหภูมิเผาซินเตอร์อยู่ในช่วง 1300-1400 °ซ และ 1350-1450 °ซ ตามลำดับ โดยเผาเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น 10 °ซ/นาที

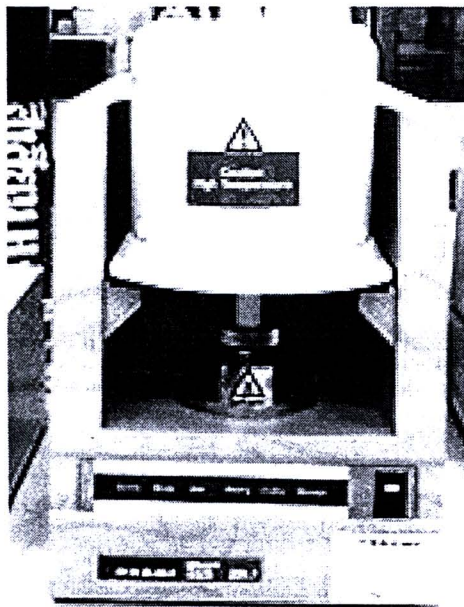
3.2 การตรวจสอบชิ้นงาน

3.2.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyzer และ Differential scanning calorimetry (TGA-DSC)

พฤติกรรมการสูญเสียน้ำหนัก และการสลายตัวของผงที่ยังไม่ได้เผาแคลไซน์ อันเนื่องมาจากความร้อนนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyzer และ Differential scanning calorimetry โดยนำผงที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณเล็กน้อยใส่ลงในถ้วยที่ทำมาจากแพลตตินัม แล้วใส่ลงไปในเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Perkin Elmer TGA7 (รูป 3.9) และ Perkin Elmer DSC7 (รูป 3.10) และใช้ผงอลูมินาเป็นตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบ จากนั้นให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 1300 °ซ ด้วยอัตรา 10 °ซ/นาที [37]



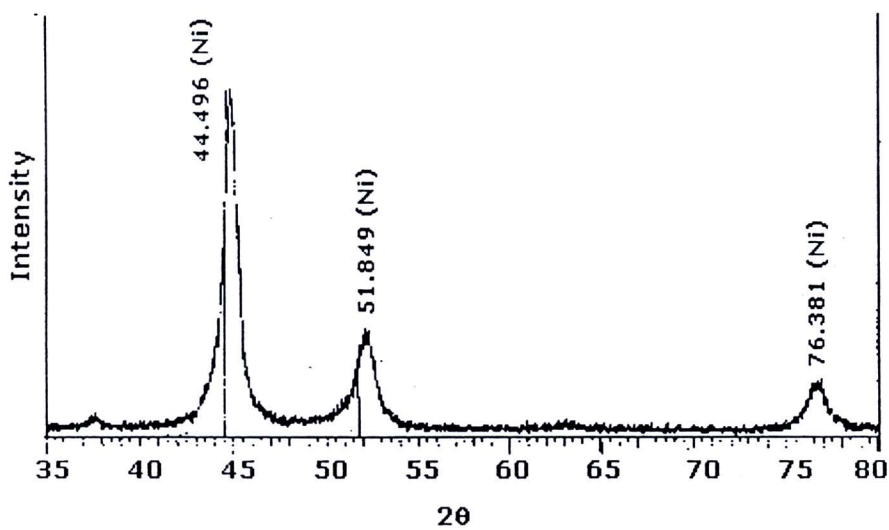
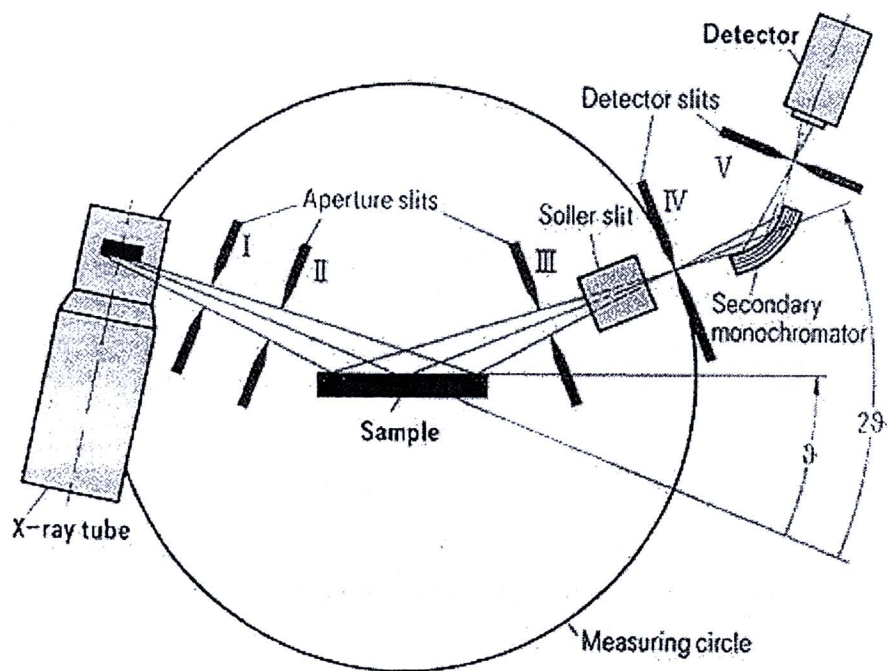
รูป 3.9 เครื่องวิเคราะห์ Thermogravimetric (Perkin Elmer TGA7)



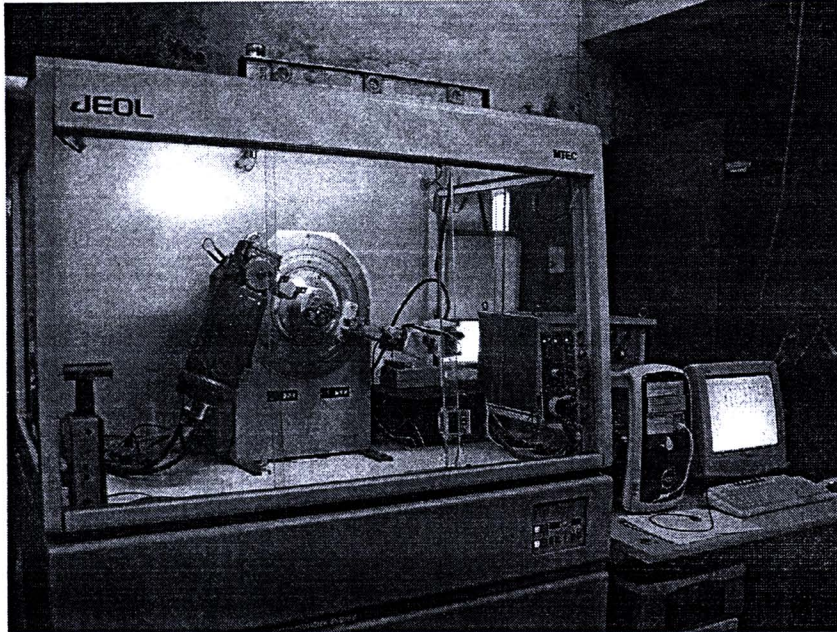
รูป 3.10 เครื่องวิเคราะห์ Differential scanning calorimetry (Perkin Elmer DSC7)

3.2.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique) ในการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ลงบนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) และเลี้ยวเบนโดยมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็จะมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้น ๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่าง ๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด โดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) และความเข้มของพีการังสีเอ็กซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ (รูป 3.11) ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป จึงสามารถนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files) [38] เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากการนำผงและชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้มาแพคใส่ใน holder จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (รูป 3.12) แล้วจึงเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ที่ให้รังสีเอ็กซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1.54 \text{ \AA}$ ออกมาด้วย step ประมาณ 5 องศาต่อนาที จากค่ามุม 2θ ที่ 20 องศา ไปจนถึงที่ค่ามุม 2θ ที่ 60 องศา



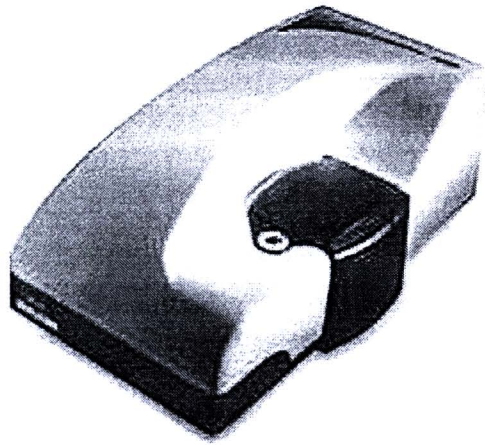
รูป 3.11 หลักการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD และตัวอย่าง รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูป 3.12 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น JDX-8030

3.2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analysis)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิค laser diffraction โดยเริ่มจากการนำผงที่เตรียมได้ไปทำการกระจายตัวในอะซิโตน (acetone) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นนำไปหยดลงในเซลล์ควอตซ์ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค (รุ่น Nano S) ดังแสดงในรูป 3.13 ซึ่งสามารถวิเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-10000 นาโนเมตรได้



รูป 3.13 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

3.2.4 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

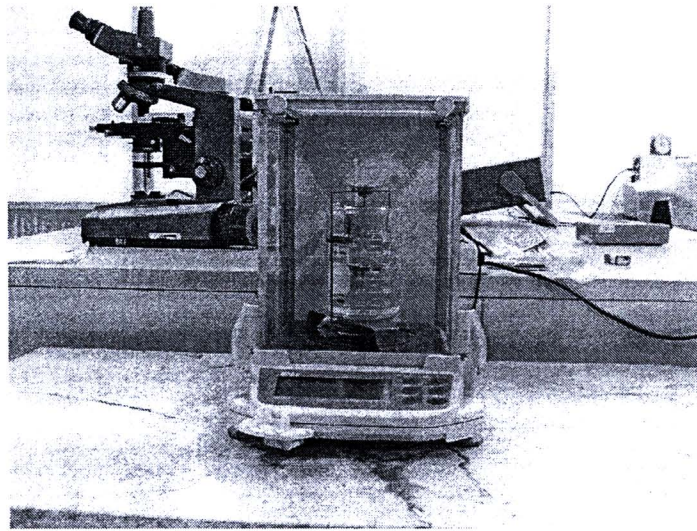
3.2.4.1 การหาค่าความหนาแน่น (density)

ทำการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส (Archimedes) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การแทนที่ของไซลีน (Xylene) แทนการแทนที่ของน้ำเริ่มจากนำเซรามิกที่ต้องการทราบค่ามาแช่ในไซลีนเป็นเวลานาน 15-20 นาที จากนั้นจึงนำมาชั่งในไซลีน (W_3) ชั่งขณะเปียก (W_2) และนำไปอบในเตาอบให้แห้งนาน 24 ชั่วโมงเพื่อนำมาชั่งขณะแห้ง (W_1) ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลดังรูป 3.14 แล้วจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการ (3.3) ดังนี้

$$\rho_c = \left(\frac{W_1}{W_2 - W_3} \right) \times \rho_{xylene} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_c และ ρ_{xylene} คือ ความหนาแน่นของเซรามิก และของไซลีนที่อุณหภูมิขณะทำการทดลอง

W_1 , W_2 และ W_3 คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในอากาศขณะแห้ง ขณะเปียก และในไซลีนตามลำดับ



รูป 3.14 เครื่องชั่งดิจิตอลสำหรับใช้หาค่าความหนาแน่นตามหลักของ Archimedes

3.2.4.2 การหาค่าการหดตัวหลังการเผา (shrinkage)

หลังจากผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์เรียบร้อยแล้วจะนำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบหาค่าการหดตัวของเซรามิกภายหลังการเผาในรูปแบบของการหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage) ด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกก่อน และหลังการเผาซินเตอร์ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการหดตัวของเซรามิกจากสมการ (3.4) ดังนี้

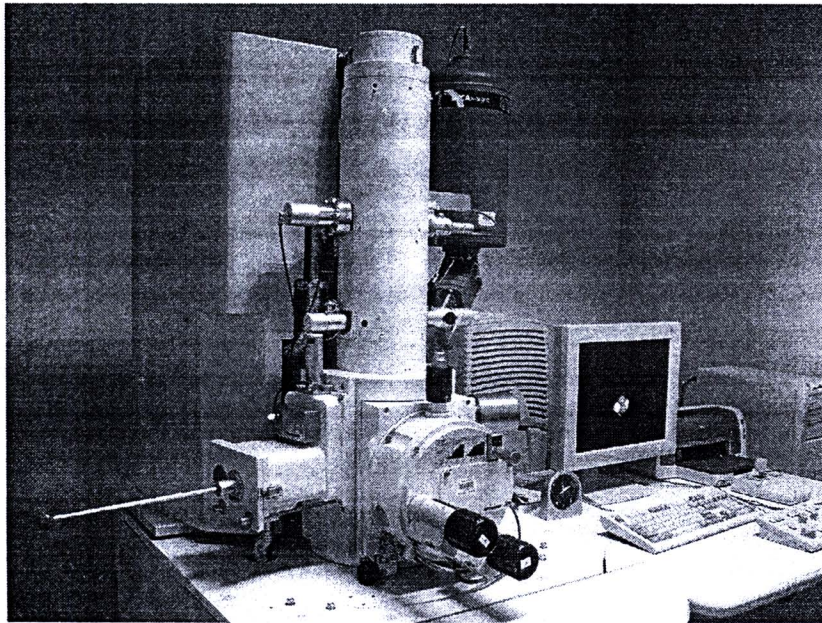
$$\text{การหดตัว (\%)} = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ R_1 และ R_2 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ตามลำดับ

3.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis)

ในการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของผง และโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกที่เตรียมได้นั้น จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูป 3.15 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ประกอบในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ สำหรับการเตรียมชิ้นงานที่เป็นผงจะเตรียมโดยทำให้เกิดการกระจายตัวในเอทานอลด้วยการใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลานาน 15-30 นาที แล้วนำไปหยดลงบนแท่น

ทองเหลือง (stub) ที่ติดเทปทองแดงไว้แล้ว ส่วนชิ้นงานที่เป็นเซรามิกสามารถเตรียมได้จากการนำชิ้นงานมาทำความสะอาดผิวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกไปจากผิวหน้าชิ้นงาน จากนั้นนำไปอบให้แห้ง แล้วจึงหักชิ้นงานออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำแต่ละชิ้นไปติดบนแท่นทองเหลืองด้วยเทปกาวคาร์บอน โดยจัดให้ผิวหน้า (surface) และรอยแตก (fracture) วางตัวอยู่ในแนวที่เหมาะสมต่อการสำรวจด้วยเทคนิค SEM แล้วทำการเคลือบผิวของชิ้นงานเป็นเวลานาน 30 วินาที โดยเซรามิกแบบเรียบไทเทเนตจะใช้ทองคำในการเคลือบผิว ส่วนเซรามิกในระบบแบบเรียบไทเทเนตที่เจือด้วยเหล็กและไนโอเบียม จะใช้คาร์บอนในการเคลือบผิว จากนั้นจึงนำไปทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานต่อไป



รูป 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL JSM-840A

3.2.6 การวัดสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Measurement)

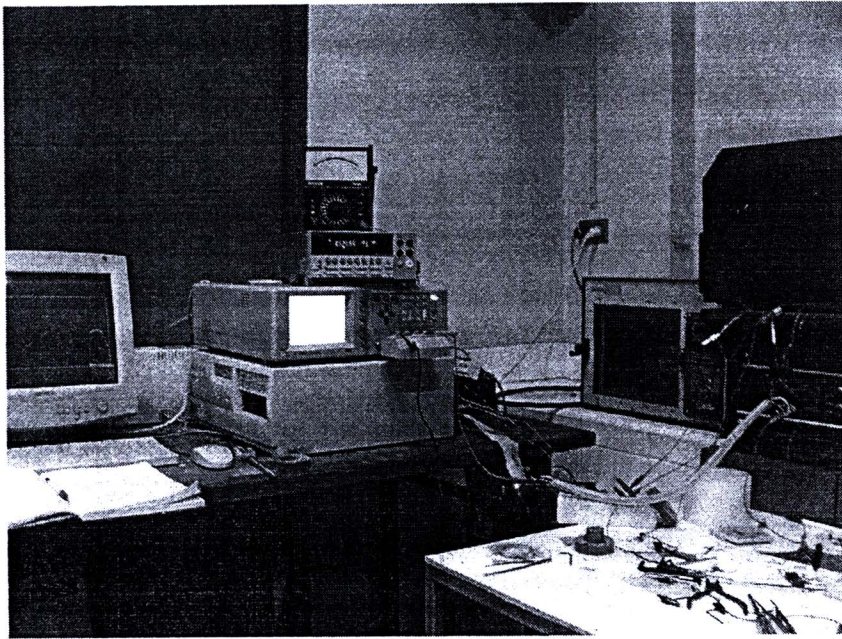
ในงานวิจัยนี้ จะทำการวัดค่า relative permittivity และ dielectric loss ด้วยเครื่อง LCR meter (TH2819A, Tonghui Inc.) ดังแสดงในรูป 3.16 โดยจะทำการวัดที่ความถี่ตั้งแต่ 100 เฮิร์ตซ์ – 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และอุณหภูมิตั้งแต่ 30 – 250 °ซ ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดสมบัติไดอิเล็กทริก นั้น ก่อนอื่นต้องทำการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 600-1200 แล้วจึงนำไปทำการทำขั้วอิเล็กโทรดโดยการเคลือบผิวด้วยทองทั้งสองหน้าของเซรามิก โดยที่แต่ละหน้าใช้เวลาในการเคลือบผิวนาน 1 นาที จากนั้นนำไปทำการวัดเพื่อนำมาคำนวณหาค่า relative permittivity (ϵ_r) ดังสมการที่ (3.5)

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (3.5)$$

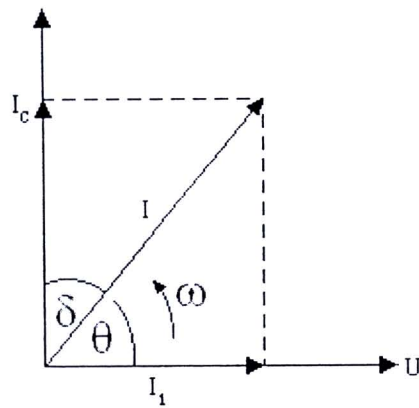
เมื่อ	C	คือ ค่า Capacitance
	d	คือ ความหนาของชิ้นงาน
	A	คือ พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด
	ϵ_0	คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของวัสดุจะต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ($E = E_0 \sin \omega t$) ดังนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้า กระแสสลับที่ให้ ณ ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิดรีแลกเซชัน (relaxation) ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นพลังงานแบบหนึ่งซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลในวัสดุไดอิเล็กทริกจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมา แต่เมื่อที่ความถี่สูง ๆ ไดโพลจะกลับตัวตามความถี่ไม่ทัน เมื่อกลับไม่ทันไดโพลจึงไม่กลับตัวและเมื่อไม่กลับตัว แต่ยังรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมจนเกิดเป็นความร้อนขึ้นเป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก

ตามทฤษฎีจะไม่เกิดการสูญเสียขึ้น แต่ในความเป็นจริงกระแสมีได้นำศักย์ไฟฟ้าอยู่ 90° ส่งผลให้เกิดการสูญเสียขึ้น เรียกเทอม $\tan \delta$ ว่า dissipation factor หรือ loss tangent ดังรูป 3.17 ถ้ามุม δ เล็ก การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยและเรียกมุม δ ว่าเป็น loss angle



รูป 3.16 เครื่อง LCR meter (TH2819A, Tonghui Inc.)



รูป 3.17 การนิยาม Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริก [39]

3.2.7 การวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Measurement)

งานวิจัยนี้ ทำการวัดค่า polarization ด้วยเครื่องวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยใช้วงจร Sawyer-Tower (รูป 3.18) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีระบบวัดสำหรับหาลักษณะความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบ non-linear สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่เป็นฟิล์มบางและเซรามิก หลังจากทำการขัดผิวชิ้นงานด้วยผงอลูมินาแล้ว ก็นำชิ้นงานที่ได้ไปทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยการเคลือบผิวด้วยทองทั้งสองหน้าของเซรามิก แล้วจึงนำไปทำการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส (P-E) โดยให้สนามไฟฟ้าตั้งแต่ 5 – 30 กิโลโวลต์/เซนติเมตร โดยใช้ความถี่ในการวัด 50 Hz ซึ่งการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสในการทดลองนี้จะใช้วงจรที่เรียกว่า Sawyer-Tower circuit [7] ดังรูป 3.19 จากวงจรนี้จะทำให้สามารถหาค่า polarization เมื่อให้สนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ได้จากสมการที่ (3.6)

$$P = Q/A \tag{3.6}$$

ดังนั้น $V_x = \text{Applied Voltage} \quad V_y = \text{Voltage @ } C_0$

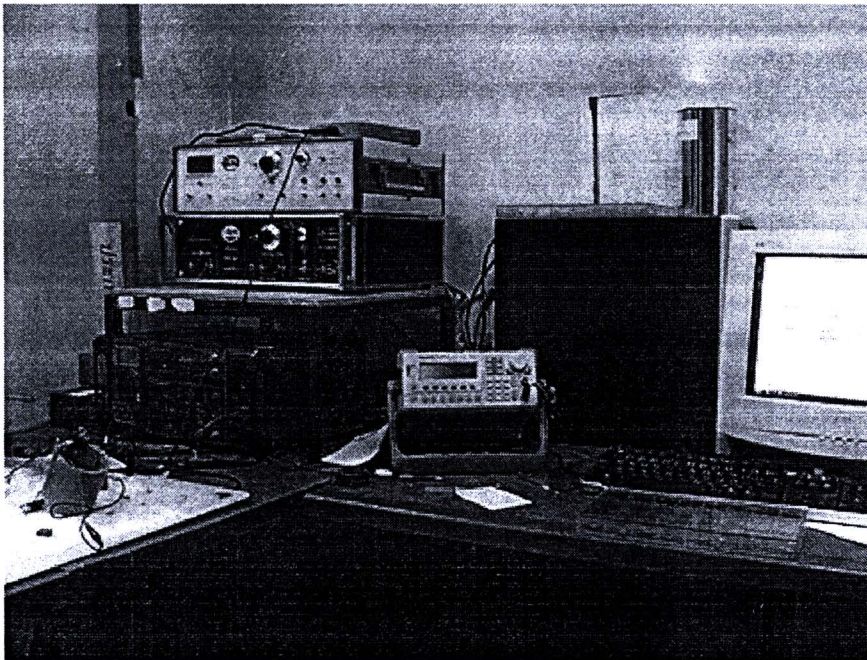
$$E = \frac{V_x}{t} \text{ unit } \left(\frac{kV}{cm} \right) ; t = \text{sample thickness}(cm)$$

$$P = \frac{Q}{A} = \frac{CV_y}{A} \text{ unit } \left(\frac{\mu C}{cm^2} \right)$$

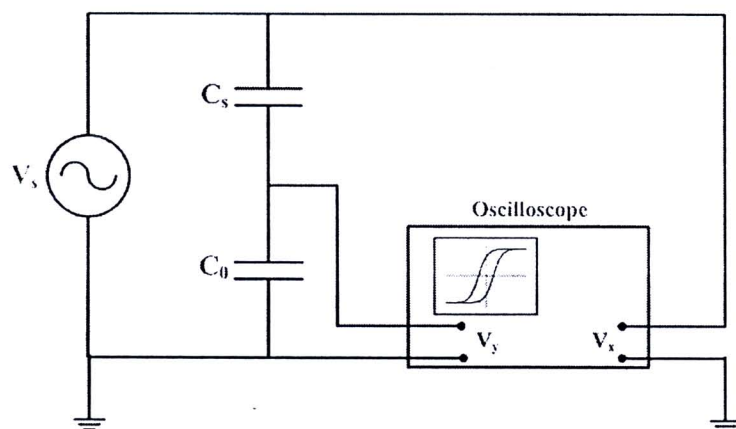
which $A = \text{sample Area } (cm^2)$

$$C = \text{Capacitor @ } C_0 (nF)$$

- เมื่อ P คือ polarization (C/m²)
Q คือ ประจุบนพื้นผิวดั้วเก็บประจุ (C)
A คือ พื้นที่ดั้วเก็บประจุ (m²)



รูป 3.18 แสดงเครื่องวัดวงวนซิสเทอริซีส



รูป 3.19 แผนผังวงจร Sawyer-Tower ($C_0 = 0.1 \mu\text{F}$, $C_s = \text{Sample}$, $C_0 \gg C_s$) [7]