

บทที่ 4

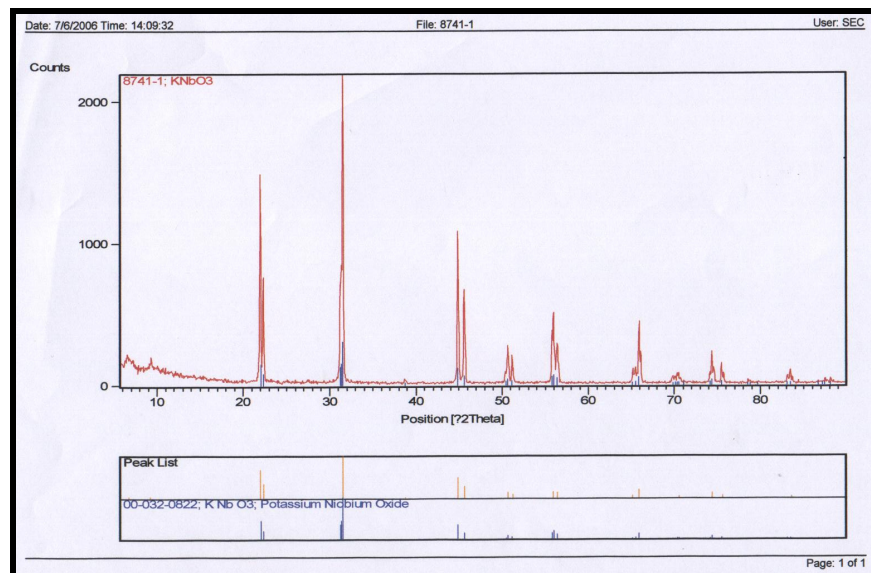
ผลการทดลองและการอภิปราย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเตรียมสาร BaTiO_3 และ KNbO_3 แบ่งขั้นตอนในการทดลองเป็น 4 ส่วน คือการเตรียมสารเพื่อนำมาทำเป็นตัวรับ-ส่ง คลื่นอะคูสติก การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากล การทำวงจรและการผลิตอุปกรณ์ไฮโดรโฟน เพื่อนำมาทดสอบศักยภาพของสารทั้งสองว่าจะนำมาทำเป็นตัวรับ-ส่ง คลื่นอะคูสติกในไฮโดรโฟนแทนสารพวก PZT ที่ใช้กันในปัจจุบันได้หรือไม่

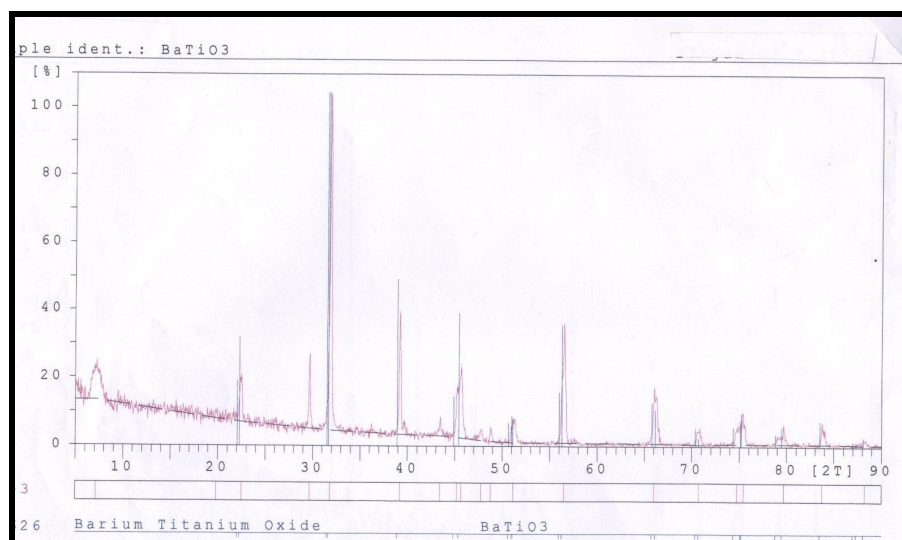
4.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของ KNbO_3 และ BaTiO_3

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างของ KNbO_3 และ BaTiO_3

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย XRD เพื่อตรวจสอบเฟสโครงสร้างของ KNbO_3 และ BaTiO_3 ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดย KNbO_3 ที่นำมาตรวจสอบผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผงของ BaTiO_3 ที่นำมาตรวจสอบผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังภาพประกอบที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงผลลายการเลี้ยวเบนของผง KNbO_3 เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C

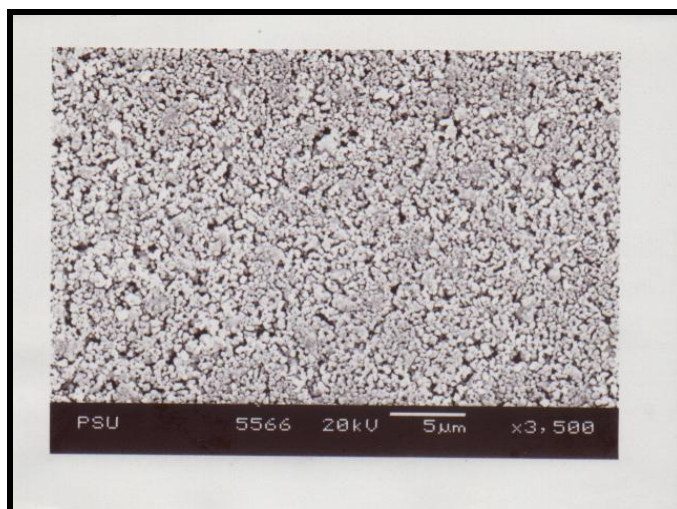


ภาพประกอบที่ 4.2 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนของผง BaTiO₃ เเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1100 °C

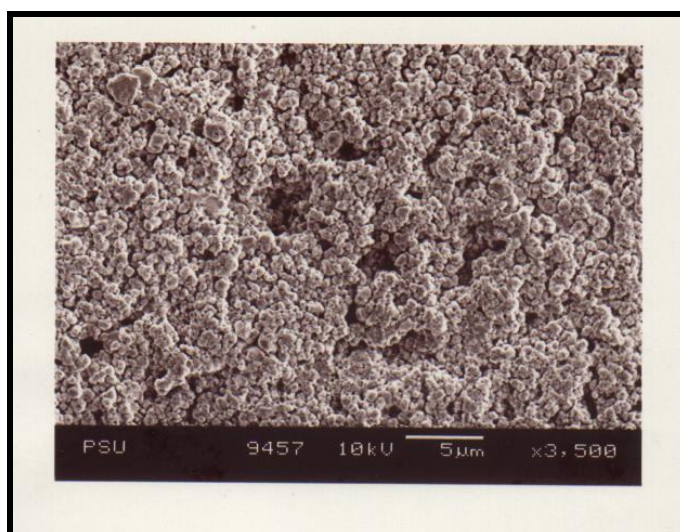
จากการวิเคราะห์เฟสของผง KNbO₃ และเฟสของผง BaTiO₃ ที่ผ่านการเผาแคลไซต์ในช่วงอุณหภูมิและเวลา ดังกล่าวจะเห็นว่าสารที่เตรียมจาก $K_2CO_3(s) + Nb_2O_5(s) \rightarrow 2KNbO_3(s) + CO_2(g)$ ได้ KNbO₃ ตามที่ต้องการและสารที่เตรียมจาก $BaCO_3(s) + TiO_2(s) \rightarrow BaTiO_3(s) + CO_2(g)$ ได้ BaTiO₃ ตามที่ต้องการ

4.1.2 โครงสร้างจุลภาค KNbO₃ และ BaTiO₃

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ลักษณะของรูพรุนของสารตัวอย่างที่เตรียมให้มีความพรุน 30% และขนาดเกรน โดยอาศัยภาพถ่าย SEM ของ KNbO₃ และ BaTiO₃ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของ KNbO_3 ความพรุน 30%



ภาพประกอบที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของ BaTiO_3 ความพรุน 30%

4.1.3 ค่าความพรุน

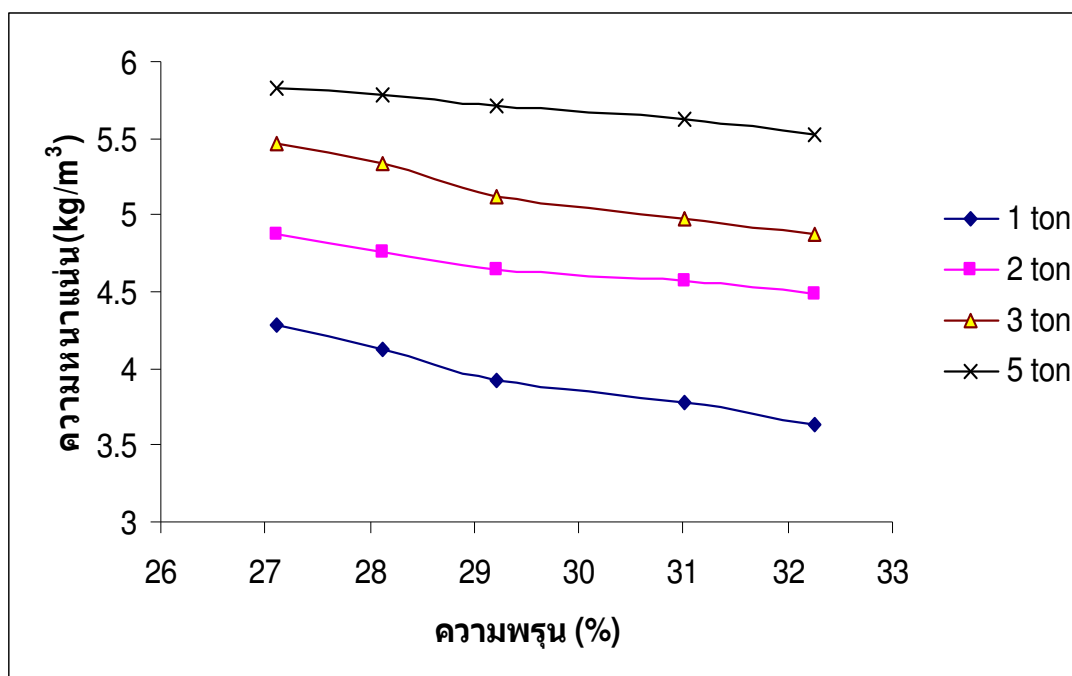
การเตรียมสารไพโอโซเซรามิกที่ไม่มีตะกั่ว คือโพแทสเซียมไนโอเบตและแบเรียมไทเทเนตให้มีความพรุนในช่วง 10-30% โดยใช้เงื่อนไขแรงอัดในการขึ้นรูป 1 – 5 ตัน อัตราการการเพิ่มอุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลา 30 นาที ในช่วงอุณหภูมิ $50\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิของการเผาเคลือบที่ $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ PVA ความเข้มข้น 15 โมลเปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนระหว่างสารละลาย PVA ต่อผงเซรามิกเท่ากับ 10 : 3 โดยมวลและอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเผาอบนี้ 5

$^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ พบว่าค่าความพรุน 30% เป็นความพรุนสูงสุดที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาตรง โดยที่ความพรุนมากกว่า 30% สารตัวอย่างจะเปราะบาง และแตกหักได้ง่าย ไม่สามารถนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพทางไฟฟ้า และทางกลได้

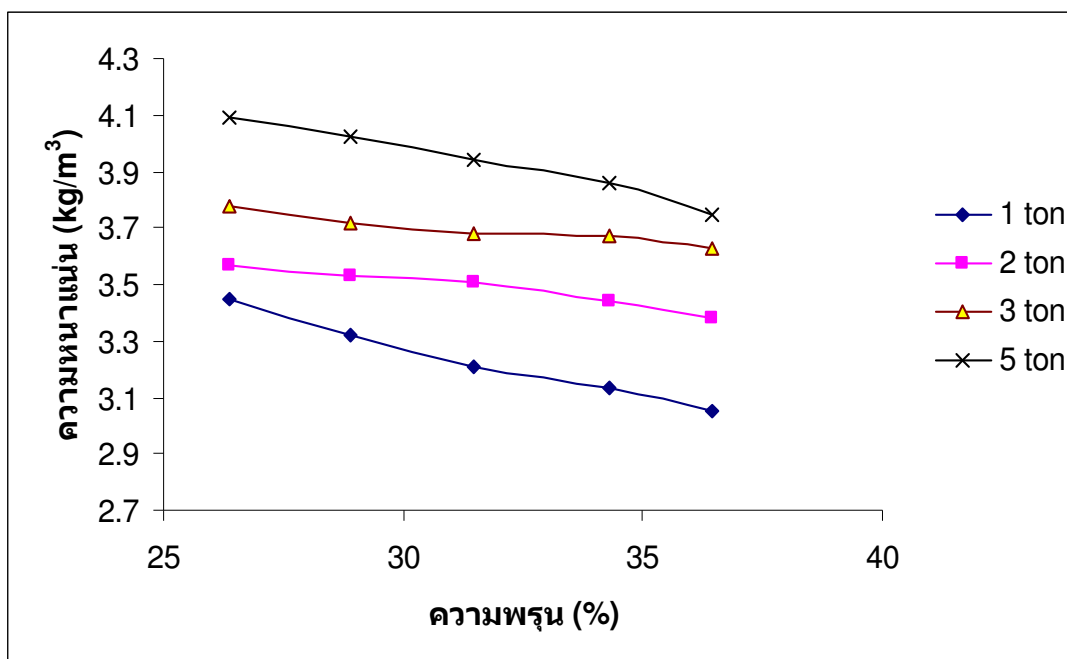
ขนาดของรูพรุนที่สังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ดังภาพประกอบที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่า KNbO_3 จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดอนุภาคของ BaTiO_3 และรูพรุนที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากขนาดอนุภาคของ BaTiO_3 มีลักษณะไม่เท่ากัน แต่จะกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดของ KNbO_3 และขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดของ BaTiO_3 มีขนาด 1.2 ± 0.5 ไมครอน และ 1.6 ± 0.5 ไมครอนตามลำดับ

4.1.4 ค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นของ KNbO_3 และ BaTiO_3 อาศัยหลักการวิธีอะคิมิตีส โดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จากวิธีการวัดแบบ true density test พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.75% ดังนั้นจึงใช้หลักการอะคิมิตีสในการหาค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่างดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-2)



ภาพประกอบที่ 4.5 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับ %ความพรุนของ KNbO_3

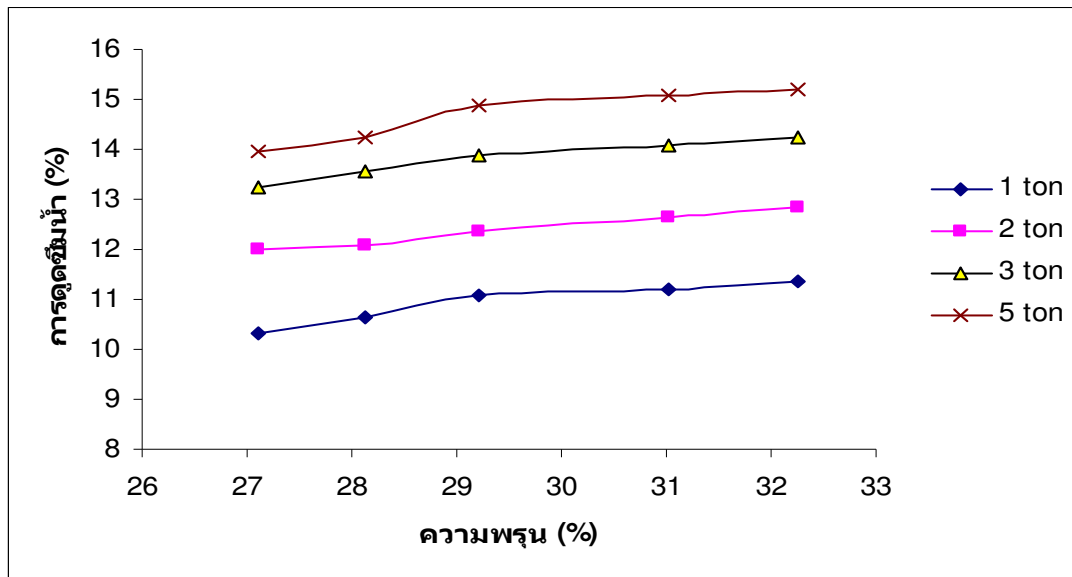


ภาพประกอบที่ 4.5 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับ %ความพรุนของ BaTiO₃

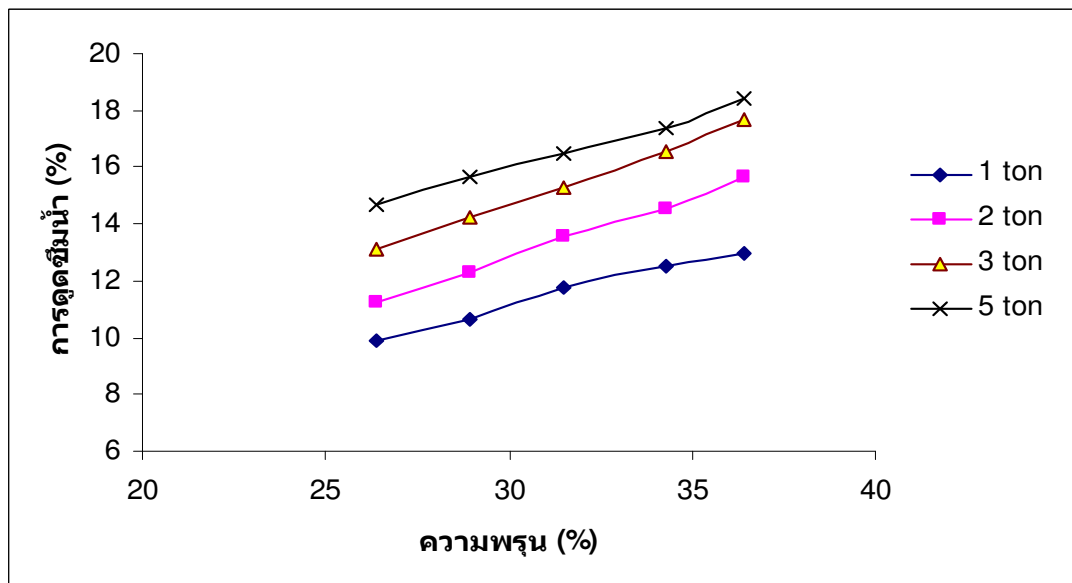
ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นใช้ สมการที่ 3.3 และผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและความหนาแน่นแสดงดังภาพประกอบที่ 4.5 จากกราฟจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นและผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของสารจะแปรผกผันกันและค่าทั้งสองเป็นผลมาจากการเพิ่มค่าของแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ที่เพิ่มขึ้นรูปสารตัวอย่าง

4.1.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

ทำนองเดียวกันในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ KNbO₃ และ BaTiO₃ โดยใช้สมการที่ 3.4 ในการคำนวณหาค่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำได้ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-2) และแสดงภาพประกอบที่ 4.6



ภาพประกอบที่ 4.6 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การดูดซึมน้ำกับ %ความพรุนของ KNbO₃

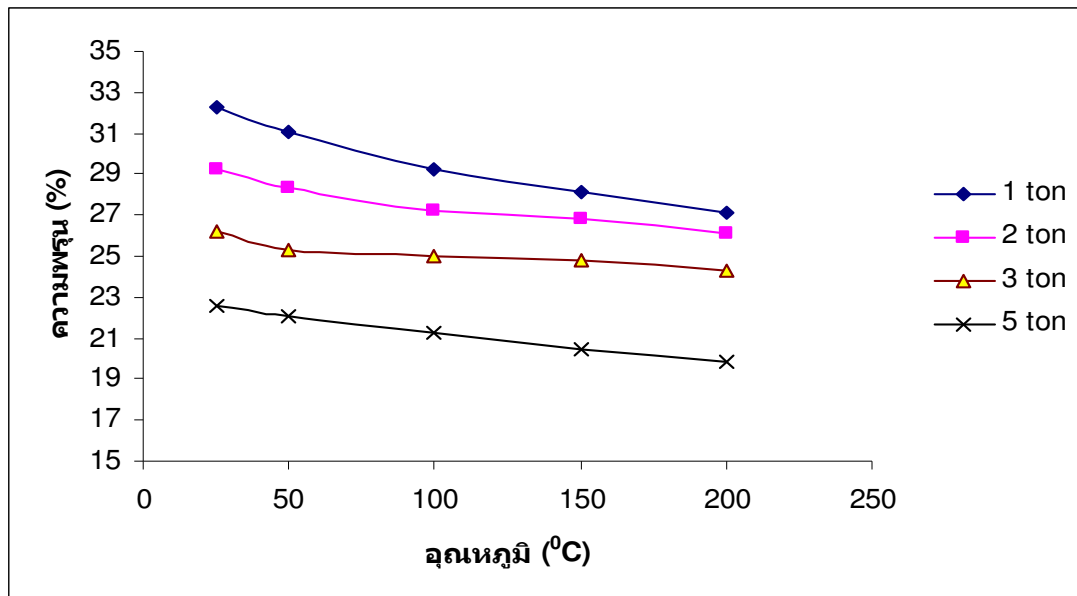


ภาพประกอบที่ 4.6 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %การดูดซึมน้ำกับ %ความพรุนของ BaTiO₃

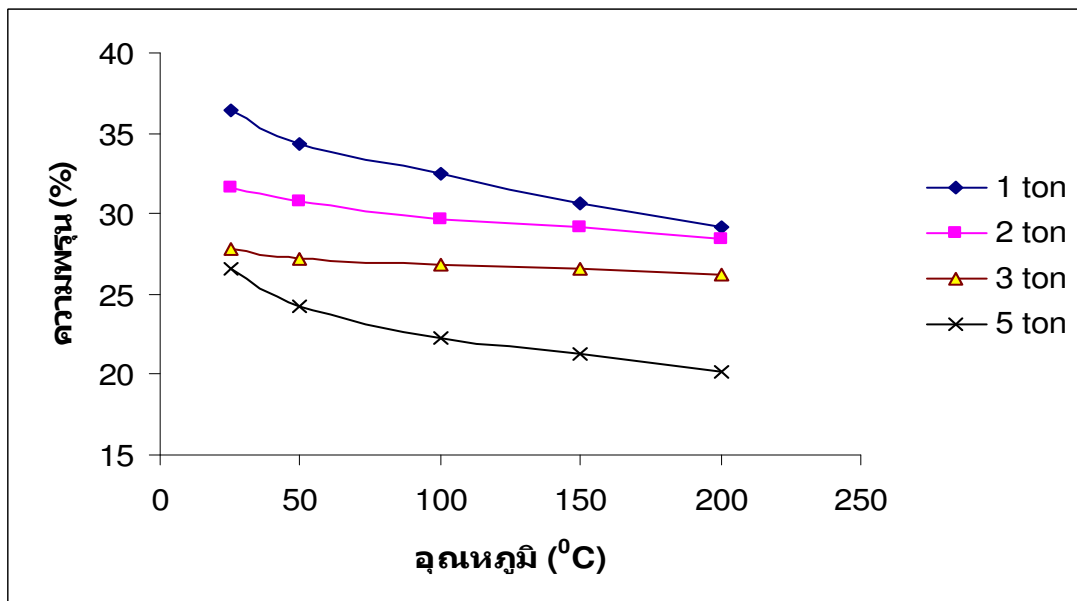
จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ จะเพิ่มขึ้นตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและจะมีแนวโน้มลดลงอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงอัดและอุณหภูมิในการเผาอบพนักที่ใช้ขึ้นรูปสารตัวอย่างจะมีผลต่อค่าทั้งสองดังข้อมูล

4.1.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน

คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของ KNbO_3 และ BaTiO_3 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการที่ 3.5 คำนวณหาค่าแสดงได้ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-2) และภาพประกอบที่ 4.7



ภาพประกอบที่ 4.7 ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %ความพรุนกับอุณหภูมิเผาอบผนังของ KNbO_3



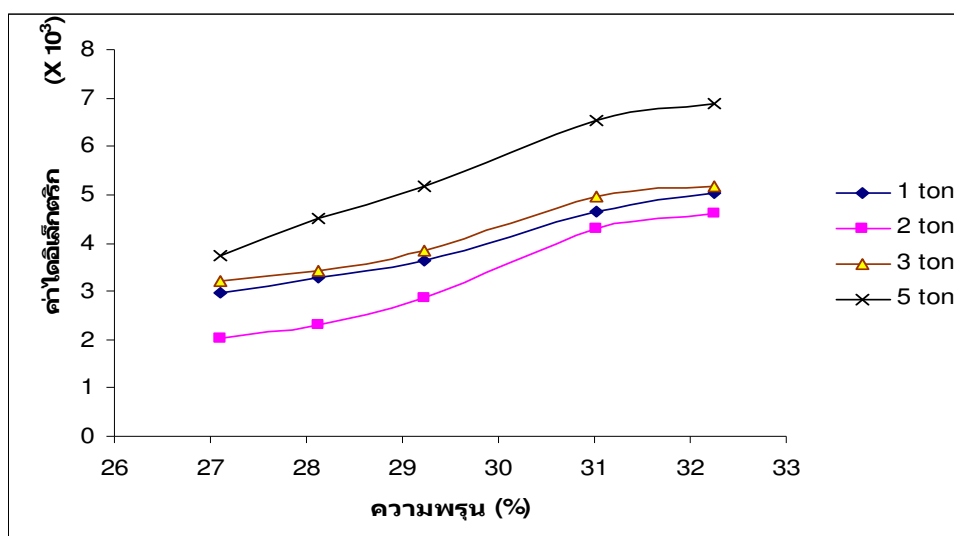
ภาพประกอบที่ 4.7 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % ความพรุนกับอุณหภูมิเผาอบผนังของ BaTiO_3

จากการศึกษาสมบัติกายภาพโดยใช้หลักการของ อะคีมีดีส์ในการหาค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 และ BaTiO_3 พบว่า อุณหภูมิเผา อบผนึกมีผลต่อขนาดเกรนและสมบัติทางกายภาพ จากค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ เผาอบผนึก สาเหตุมาจากขณะอุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของเกรนจะขยายใหญ่ขึ้นทำให้บริเวณขอบเกรนช่องว่างของอะตอมเล็กลง แต่ค่าความหนาแน่นจะแปรผกผันกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาอบผนึกที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Daoli Zang และคณะ (Daoli Zang *et. al.*, 2003) Millar และคณะ (Millar *et. al.*, 1995) ซึ่งพบว่าวัสดุไพโอโซอิเล็กทริกที่มีความพรุนตัวสูงเหมาะสมสำหรับการทำทรานสดิวเซอร์ที่ใช้งานได้ดีในของเหลวหรือน้ำ เช่น โซนาร์ ไฮโดรโฟน (Bowen *et. al.*, 2004); (Kara *et. al.*, 2003)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า KNbO_3 มีความพรุนน้อยกว่า BaTiO_3 ในเงื่อนไขการเตรียมที่เหมือนกันและมีความหนาแน่นสูงกว่า ค่าความพรุนก็น้อยกว่าด้วยและจากข้อมูลการถ่ายภาพ SEM ทำให้เห็นได้ว่าขนาดเกรนของ KNbO_3 มีขนาดเล็กกว่าเกรนของ BaTiO_3 และมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าด้วยเป็นไปตามโครงสร้างขนาดจุลภาคของสารทั้งสอง

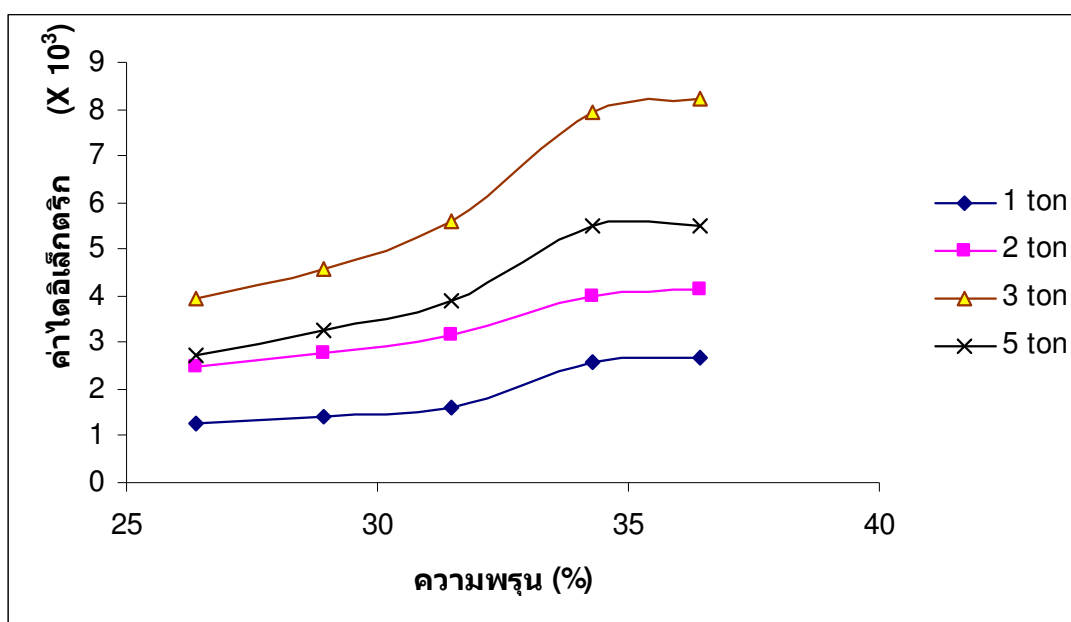
4.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

สำหรับค่าไดอิเล็กตริกของ BaTiO_3 ที่ผ่านการเผาอบผนึกที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริก โดยใช้สมการที่ 2.10 ได้กราฟความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกกับความพรุนที่เกิดจากการอัดสารที่แรงอัดต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-2) และแสดงดังภาพประกอบที่ 4.8



ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชันกับความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่ อุณหภูมิในช่วง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีการแปรผันตรงกับความพรุน โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนมีค่ามากขึ้นและเพิ่มมากที่สุดที่ความพรุน 35 % จะเริ่มลดลงเมื่อความพรุนเกิน 37 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Millar และคณะ (Millar *et. al.*, 1995) ที่ได้ค่าไดอิเล็กตริกของ PZT อยู่ในช่วง 1,800-4,000 มีความใกล้เคียงกับ KNbO_3 ที่เตรียมได้ที่ได้ค่าไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วง 1,200-8,200 แสดงดังภาพประกอบที่ 4.9

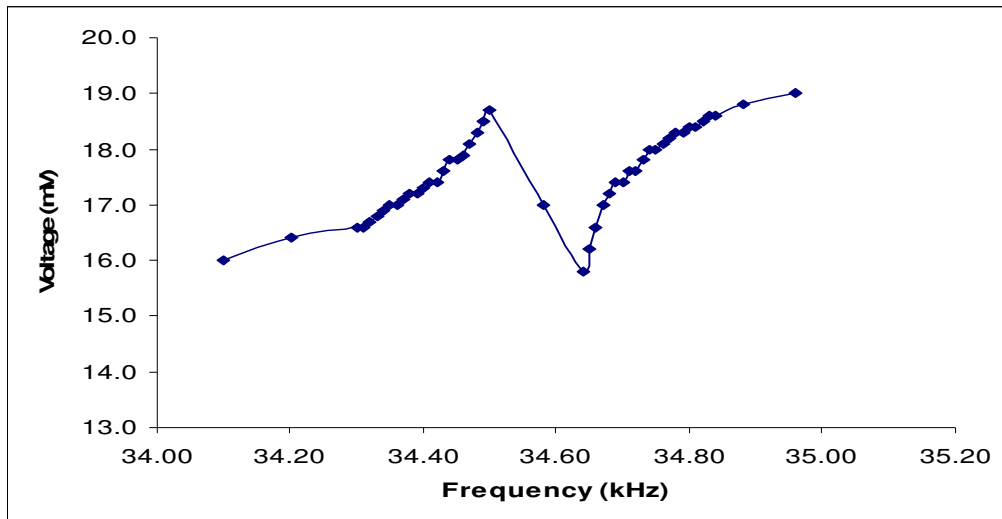


ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชันกับความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง 1.0- 5.0 ton

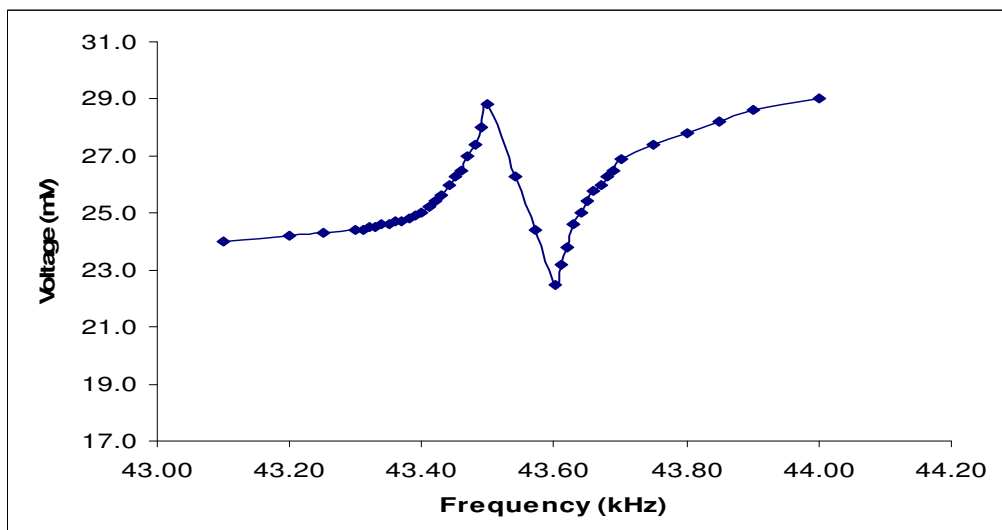
จากภาพประกอบที่ 4.8-4.9 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความพรุนของ BaTiO_3 ที่แรงอัด 5 ton มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดเพราะแรงอัดขนาดนี้จะสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคของ BaTiO_3 และของ KNbO_3 จะพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดที่แรงอัด 3 ton เพราะแรงอัดขนาดนี้จะสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคของ KNbO_3 ที่มีค่าความพรุนใกล้เคียงกัน และจากกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ KNbO_3 จะมากกว่าของ BaTiO_3 อยู่เล็กน้อยในช่วงความพรุนที่เท่ากัน

4.3 ค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์

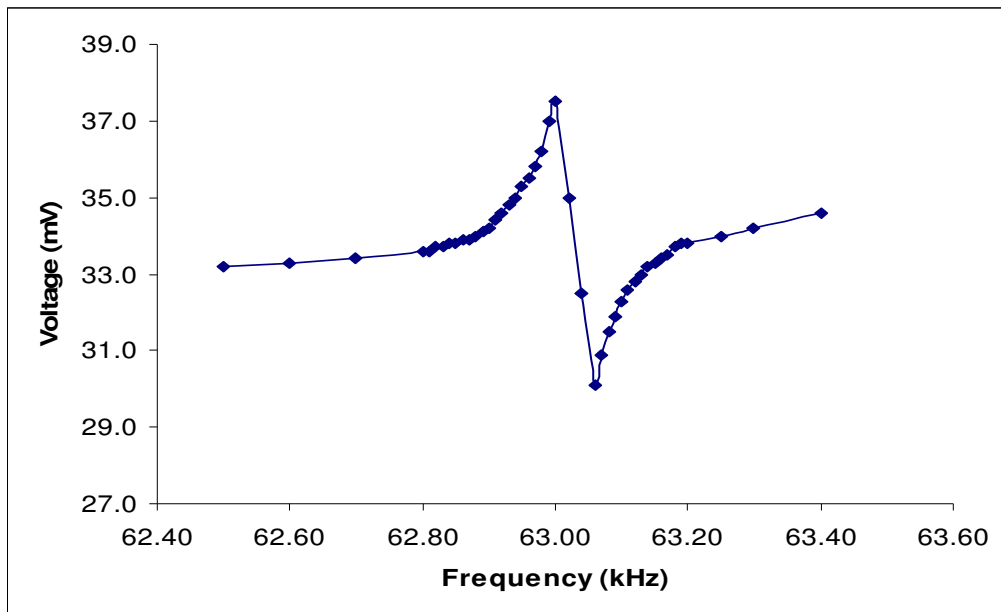
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความต่างศักย์ ของ KNbO_3 ที่เงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-3) และแสดงดังภาพประกอบที่ 4.10-4.16



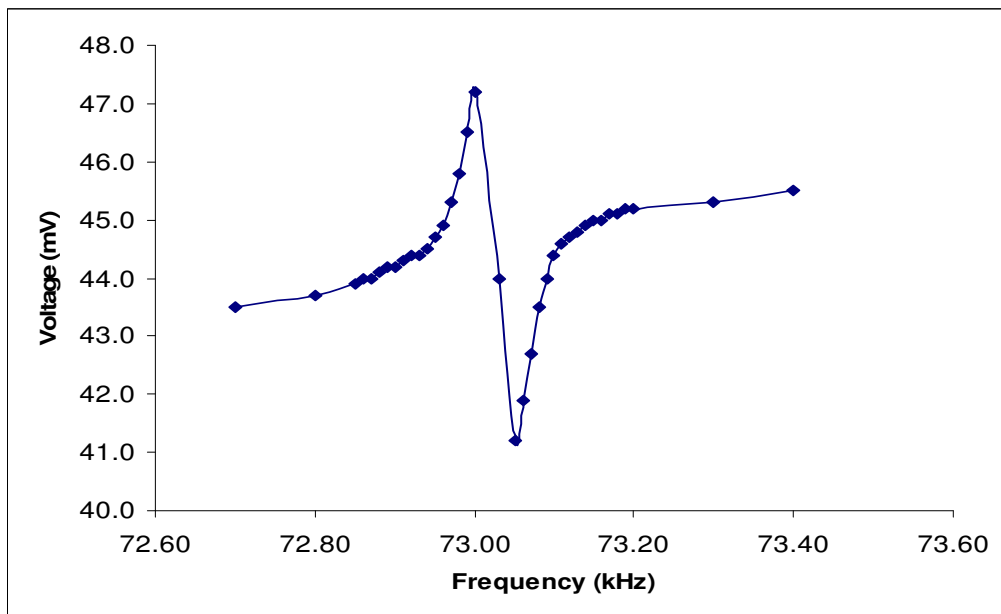
ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ ของ KNbO_3 ที่ความพรุน 31.16% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 34.50 และ 34.64 kHz ตามลำดับ



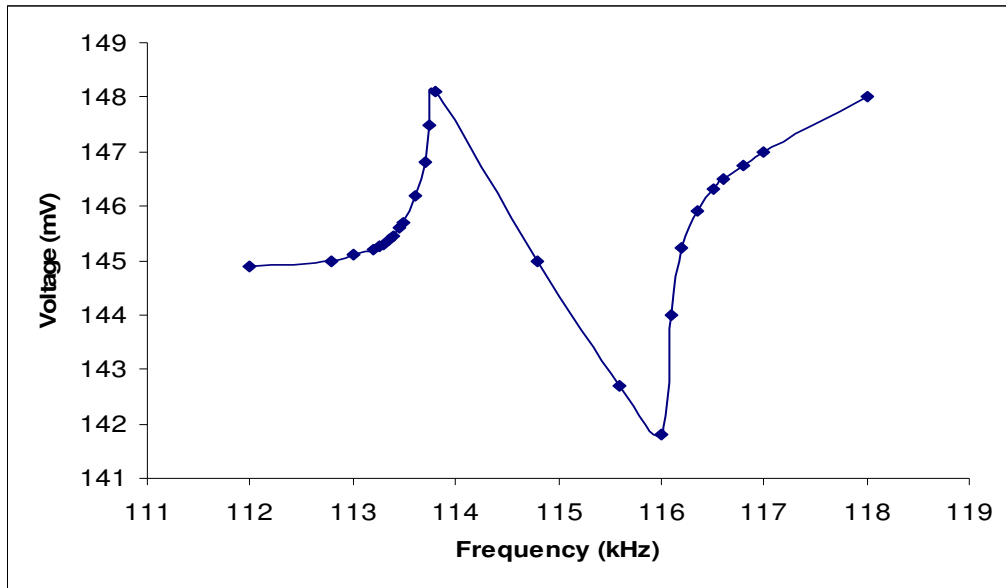
ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของ KNbO_3 ที่ความพรุน 26.98% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 43.5 และ 43.6 kHz



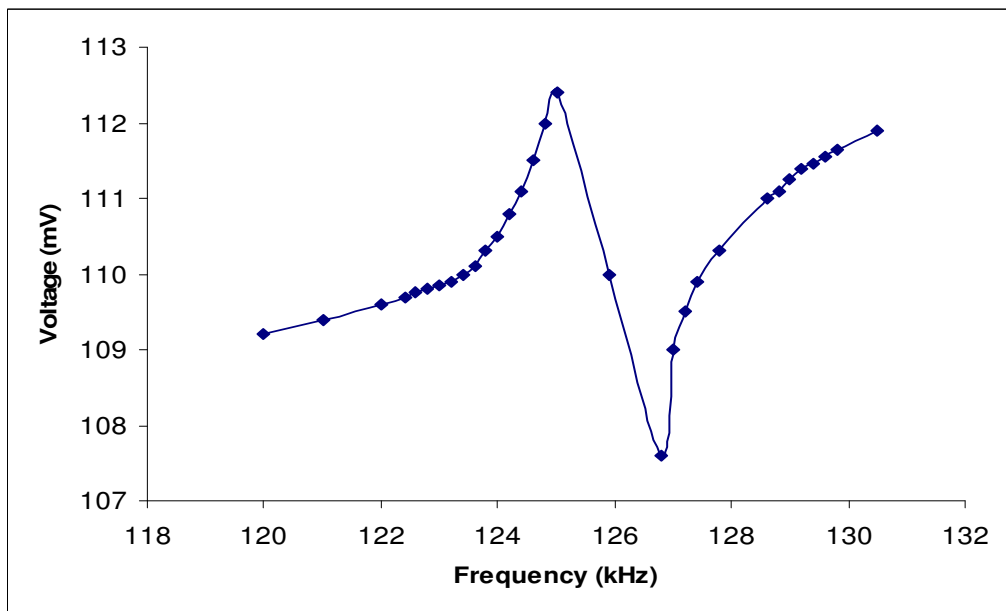
ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของ KNbO_3 ที่ความพรุน 22.22% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 63.00 และ 63.06 kHz ตามลำดับ



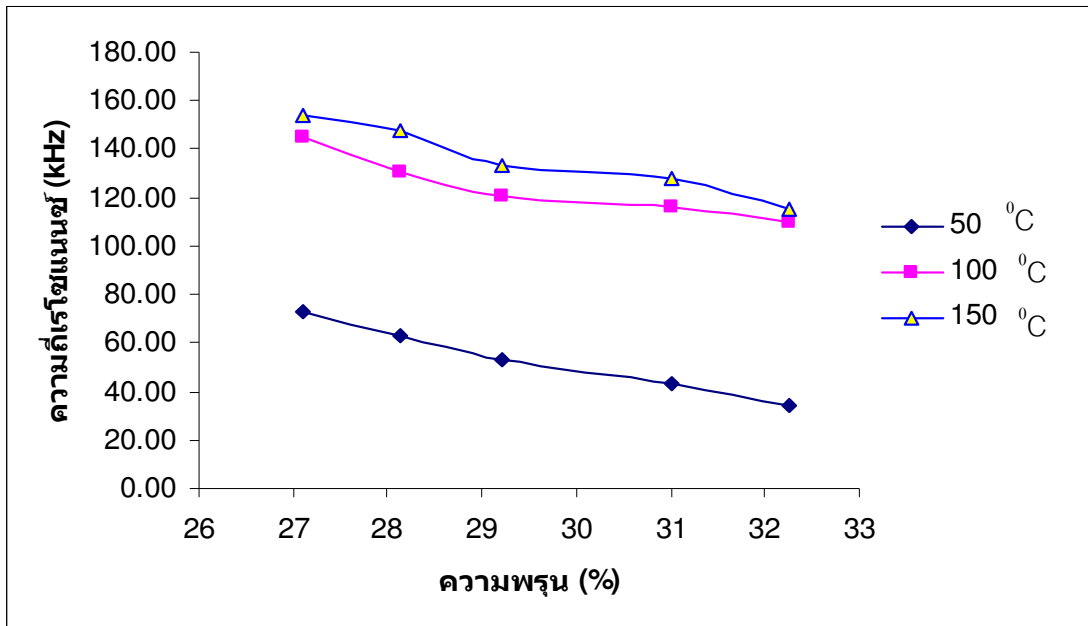
ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของ KNbO_3 ที่ความพรุน 19.42% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 73.00 และ 73.05 kHz ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของ KNbO₃ ที่ความพรุน 28.62% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 113.80 และ 116.00 kHz ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงค่าความต่างศักย์เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของ KNbO₃ ที่ความพรุน 26.34% มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์เท่ากับ 125.80 และ 126.80 kHz ตามลำดับ

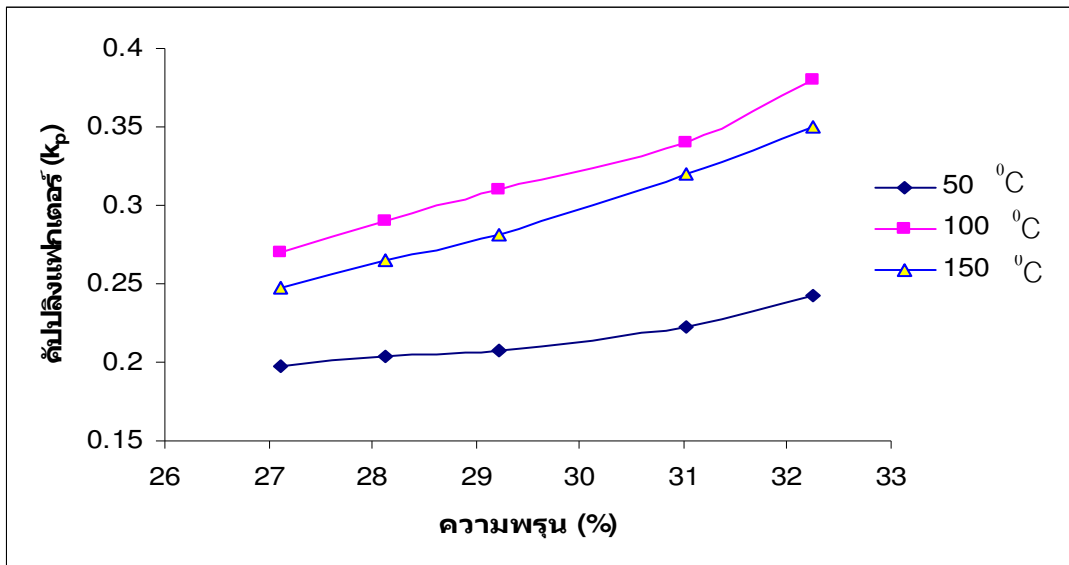


ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์เป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง $1.0\text{-}5.0\text{ ton}$

ค่าความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ของ KNbO_3 พบว่าจะมีค่าที่เหมือนกัน ค่าความถี่ทั้งสองจะลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่ามากขึ้นดังภาพประกอบที่ 4.16 ซึ่งจะมีผลต่อค่าผลต่างของความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ซึ่งนำไปคำนวณหาค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบและแนวความหนา

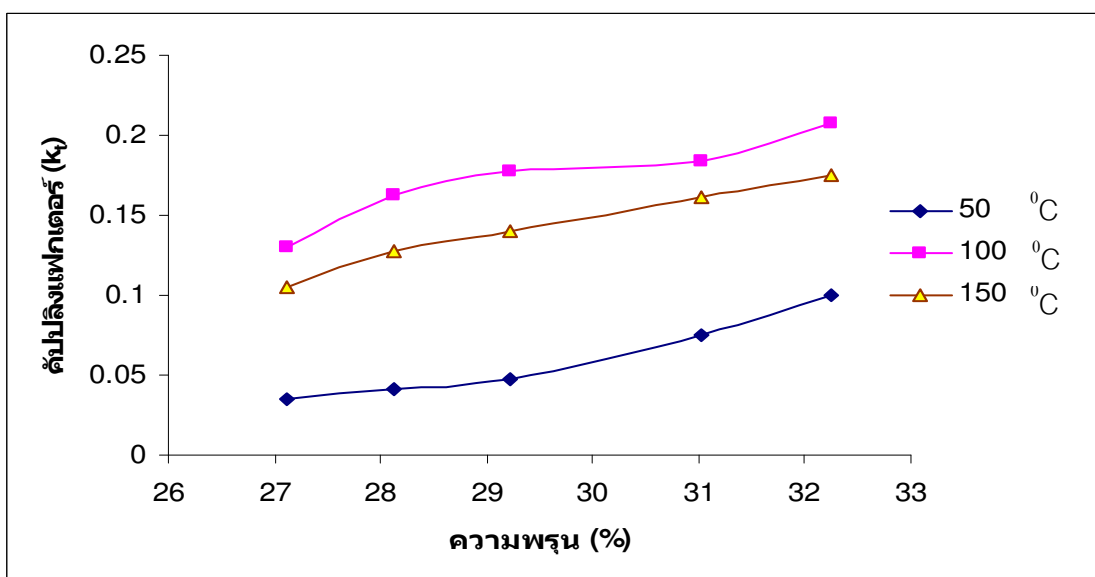
4.4 ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์

นำค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ที่ได้ ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-4) และ ภาพประกอบที่ 4.10 - 4.15 มาคำนวณค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ตามแนวระนาบ (k_p) โดยใช้สมการที่ 2.5 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.17



ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตามแนวระนาบเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 50-150 °C และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

ทำนองเดียวกัน นำค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ที่ได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านความหนา (k_v) โดยใช้สมการที่ 2.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านความหนากับเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.18

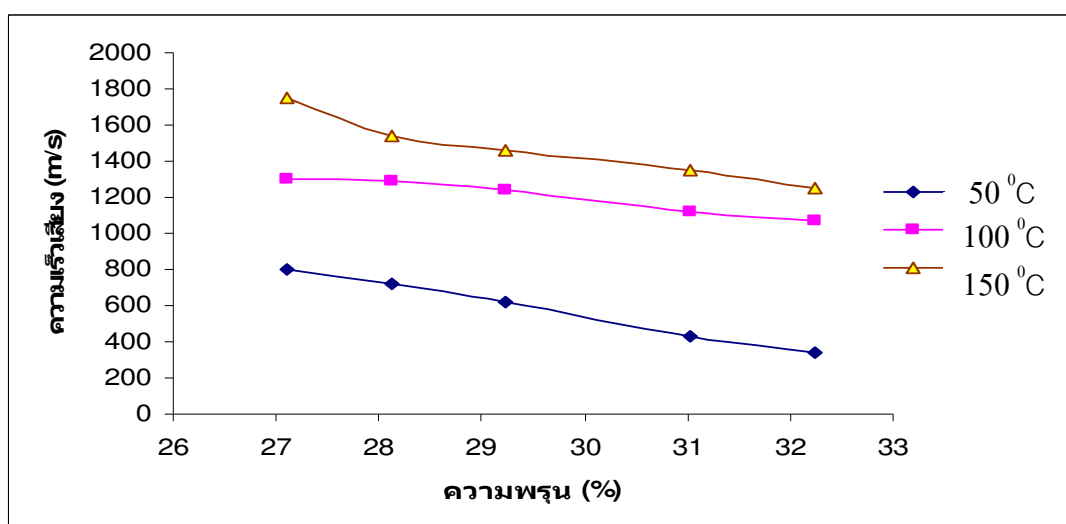


ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์ตามแนวความหนาเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง $1.0\text{-}5.0\text{ ton}$

จากกราฟในภาพประกอบที่ 4.17-4.18 จะเห็นว่าค่าของ KNbO_3 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของทาง k_p และ k_t เหมือนกัน คือ จะลดลงตามเปอร์เซ็นต์ความพรุน หรือแปรผกผันกับความพรุน แสดงว่า KNbO_3 มีการสั่นทั้งในแนวรัศมีและแนวความหนา และจะเห็นว่าค่าของ k_p จะมากกว่าค่าของ k_t เสมอ แสดงว่า KNbO_3 มีการสั่นทั้งในแนวรัศมีมากกว่าแนวความหนา ซึ่งจากงานวิจัยของ Bao-Jin Chu และคณะ (Bao-Jin Chu *et. al.*, 2002) เตรียม BaTiO_3 โดยมีการเติม Na_2CO_3 จะมีค่า k_p และ k_t เท่ากับ 0.29 และ 0.40 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ KNbO_3 ที่เตรียมได้ จะเห็นว่า เม็ดสารที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 25-30% มีค่า k_p สูงกว่า BaTiO_3 แต่เมื่อดูค่า k_t แล้วจะเห็นว่า KNbO_3 ที่เตรียมได้ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 10-30% ไม่มีค่าใดสูงกว่า BaTiO_3

4.5 ค่าความเร็วเสียงในตัวกลาง

ค่าความเร็วเสียงในตัวกลางของ KNbO_3 อาศัยสมการที่ 2.7 ซึ่งค่าที่คำนวณได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19

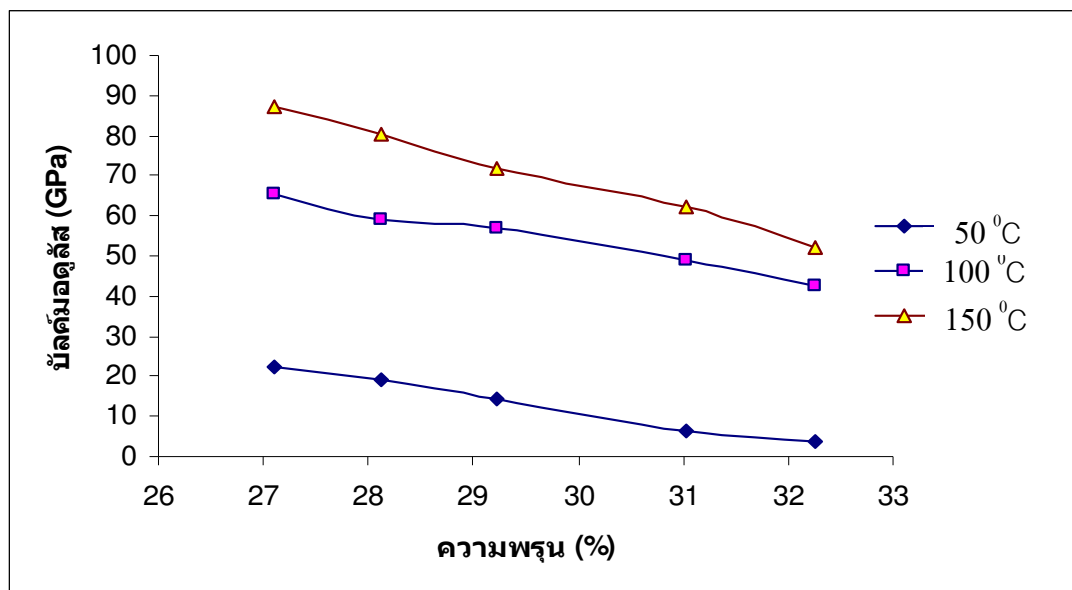


ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงค่าความเร็วเสียงในตัวกลางเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง $1.0\text{-}5.0\text{ ton}$

จากกราฟจะเห็นว่า ค่าความเร็วเสียงของ KNbO_3 จะแปรผกผันกับค่าคงที่ยืดหยุ่น โดยที่ค่าความเร็วเสียงจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าคงที่ยืดหยุ่นมีค่าลดลงและจะแปรผกผันกับความพรุน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roncari และคณะ (Roncari *et. al.*, 2001)

4.6 ค่าบัลค์มอดุลัส

ค่าบัลค์มอดุลัสหาได้จากสมการ 2.8 โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าความเร็วเสียง และค่าความหนาแน่นในวัสดุค่าที่ได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.20

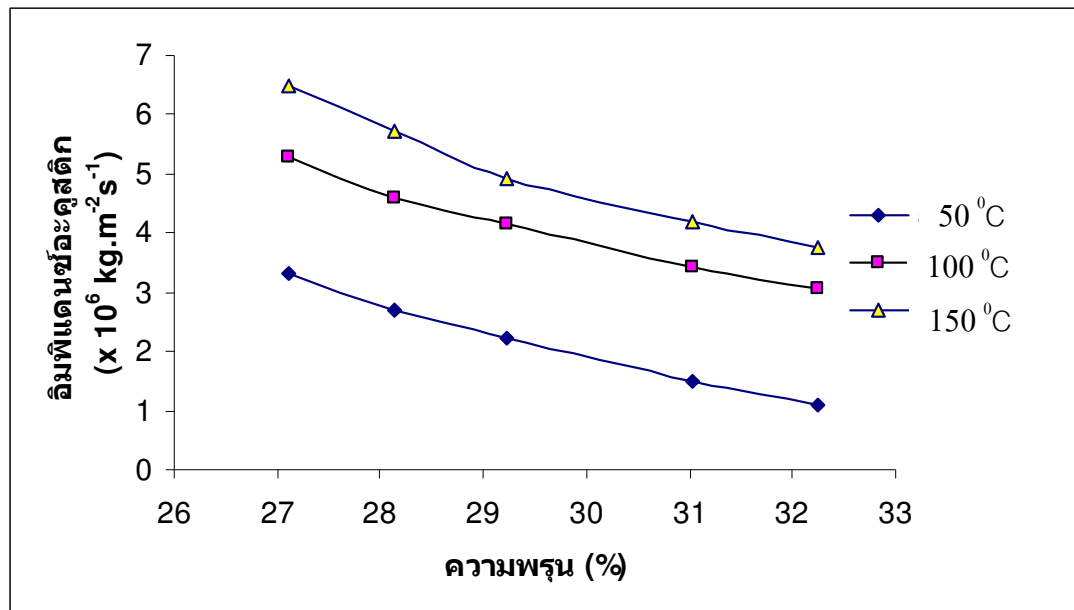


ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 50-150 °C และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

จากกราฟพบว่า ค่าบัลค์มอดุลัสจะแปรผกผันกับค่าความพรุน เนื่องจากในขณะที่ความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้ค่าความเร็วเสียงและค่าความหนาแน่นในวัสดุลดลง ทำให้ค่าบัลค์มอดุลัส ซึ่งแปรผันโดยตรงกับสองค่าดังกล่าวมีค่าลดลง

4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติก

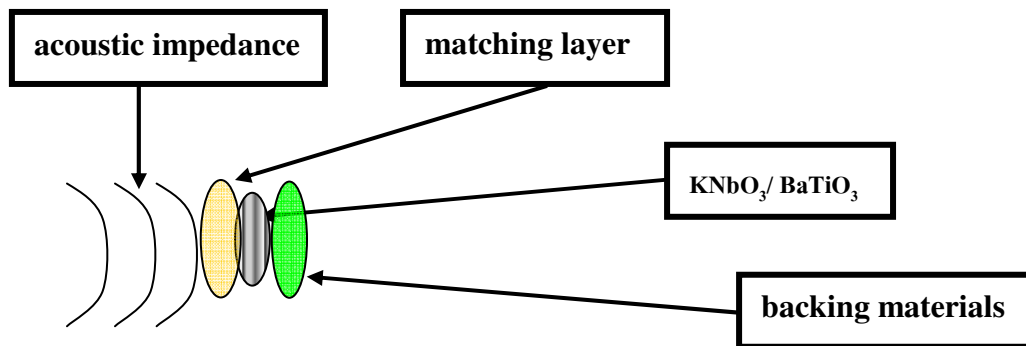
ค่าความเร็วเสียงในวัสดุที่หาได้ สามารถนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติกโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการ 2.11 ค่าที่ได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.21



ภาพประกอบที่ 4.21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติกเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงอัดในช่วง $1.0\text{-}5.0$ ton

ค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติกของ KNbO_3 ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ จะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นของสารตัวอย่างและค่าความเร็วเสียงในวัสดุ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้นนั้น จะทำให้ความหนาแน่นและค่าความเร็วเสียงในวัสดุมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติกของ KNbO_3 มีค่าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ของ KNbO_3 ที่ขึ้นรูปที่ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ ($1 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ซึ่งจากงานวิจัยของ Roncari และคณะ (Roncari *et. al.*, 2001) เติร์ยม PZT ที่มีความพรุนสูง ได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติก มีค่าเท่ากับ $6.4 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับ KNbO_3 ที่เตรียมได้ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน $10\text{-}30\%$ จะเห็นว่า จะมีค่าสัมประสิทธิ์อะคูสติกต่ำกว่า ซึ่งจะเป็นผลที่ดีกว่าในการใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับใช้งานในของเหลว เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติกใกล้เคียงกับน้ำมากกว่า

นอกจากนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์ทางอะคูสติกในหัวข้อ 4.2.6 สามารถเขียนรูปอย่างง่ายของการใช้ KNbO_3 เป็นทรานสดิวเซอร์ ได้ดังนี้



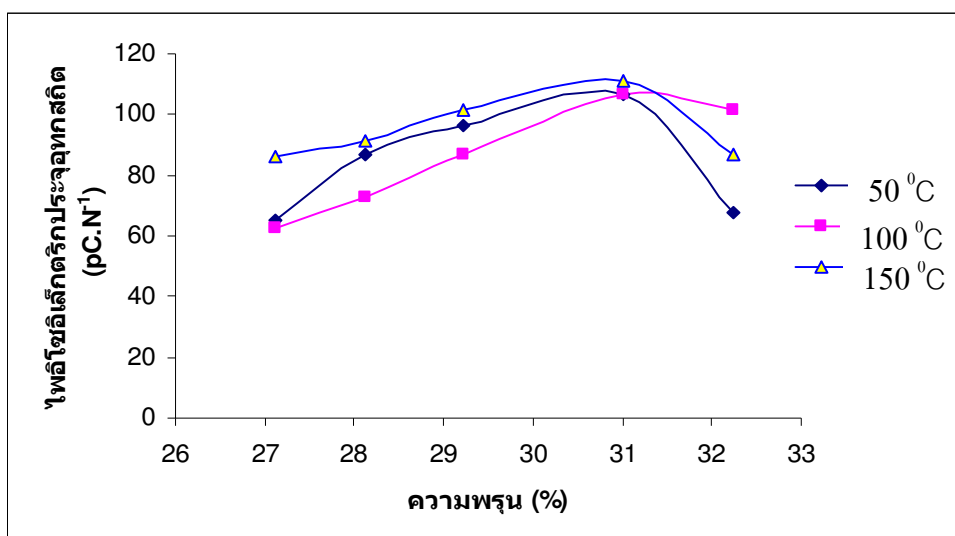
ภาพประกอบที่ 4.22 แผนภาพอย่างง่ายของการใช้ KNbO_3 เป็นทรานสดิวเซอร์

ค่า Z ที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุไพโซอิเล็กทริกกับตัวกลางที่ต้องการส่งผ่านคลื่นสามารถทำได้โดยการเติมวัสดุที่มีค่า Z สูงกว่าเซรามิกมาเป็นตัวเสริมด้านหลังเรียกว่า backing materials ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นทองเหลือง ขณะเดียวกันก็เพิ่มขึ้นของ matching layer ซึ่งหมายถึงวัสดุที่มีค่า Z อยู่ระหว่างเซรามิกกับตัวกลางที่ต้องการส่งผ่านคลื่นในงานวิจัยนี้ใช้โพลีเมอร์ (PDF) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในการส่งผ่านคลื่นมายังเซรามิกที่เป็นทรานสดิวเซอร์ ($\text{KNbO}_3/\text{BaTiO}_3$)

4.8 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกอุทกสถิต

4.8.1 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุอุทกสถิต (d_p)

คำนวณค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุอุทกสถิต คำนวนจากสมการที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์ของค่า d_p ของ KNbO_3 กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-5) และแสดงดังภาพประกอบที่ 4.22

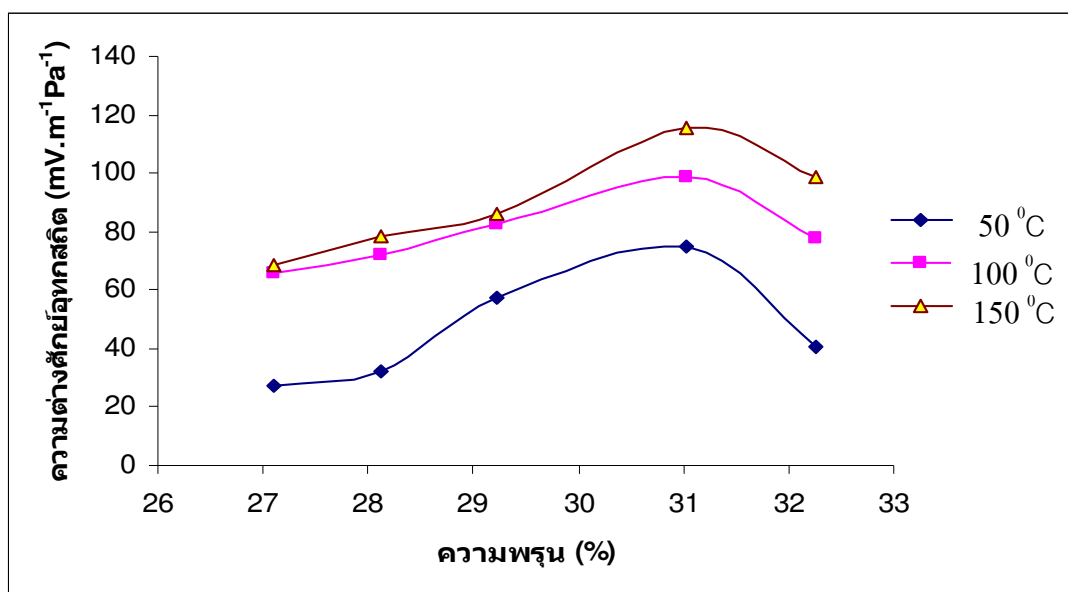


ภาพประกอบที่ 4.23 แสดงค่าคงที่ประจุกทุกสติดเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพูนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง $50\text{-}150\text{ }^\circ\text{C}$ และแรงอัดในช่วง $1.0\text{-}5.0\text{ ton}$

จากกราฟจะเห็นว่า ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุกทุกสติดจะมีค่าที่ดี เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพูนมีค่าเพิ่มขึ้น KNbO_3 ที่ความพูน 31% จะมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุกทุกสติดสูงสุดที่ 114.50 pC.N^{-1} เปรียบเทียบจากงานวิจัยของ Bao-Jin Chu และคณะ (Bao-Jin Chu *et. al.*, 2002) เตรียม BaTiO_3 โดยมีการเติม Na_2CO_3 จะมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุกทุกสติด 112 pC.N^{-1} ซึ่งจะเห็นได้ว่า KNbO_3 ที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kara และคณะ (Kara *et. al.*, 2003) เตรียม PZT ที่มีความพูนแตกต่างกัน จะมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกประจุกทุกสติดเท่ากับ 152 และ 72.8 pC.N^{-1} ซึ่งจะเห็นได้ว่า KNbO_3 ที่เตรียมได้มีค่าอยู่ในช่วงนี้

4.8.2 ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสติด (g_{33})

คำนวณค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสติด คำนวนจากสมการที่ 2.2 จะได้ความสัมพันธ์ของค่า g_{33} ของ KNbO_3 กับเปอร์เซ็นต์ความพูนต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.24

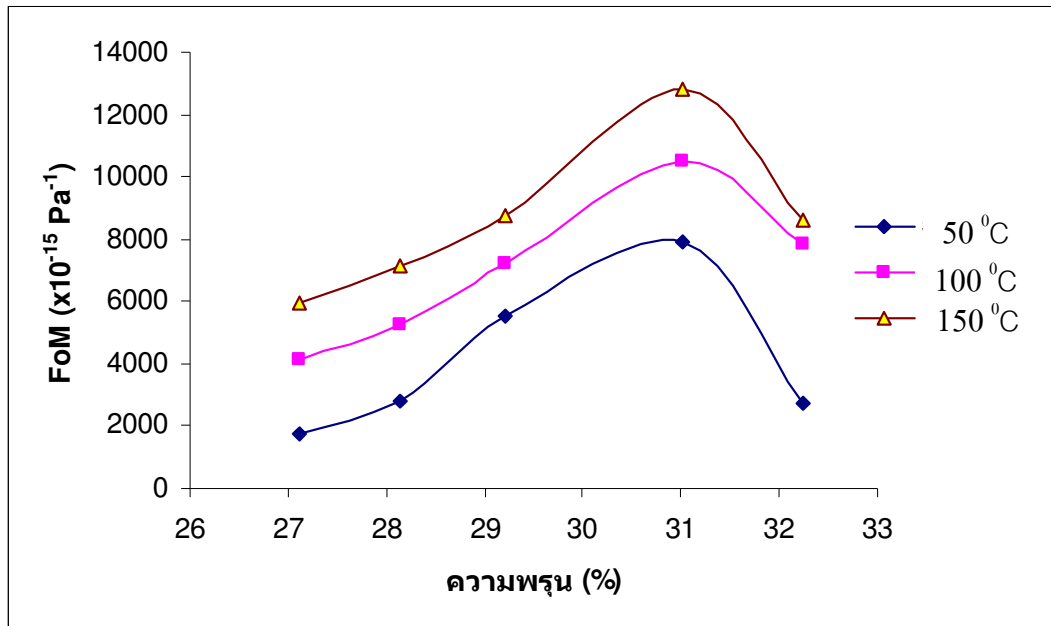


ภาพประกอบที่ 4.24 แสดงค่าคงที่ความต่างศักย์อุทกสถิตเป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 50-150 °C และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสถิตที่วัดได้จะมีเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสถิตจะแปรผกผันกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและจากกราฟ ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงนั้นจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง เนื่องจากมีช่องว่างอากาศมากขึ้นและอากาศจัดเป็นสารไดอิเล็กทริกที่เลวทำให้ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสถิตที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสถิตสูงสุดของ KNbO_3 ที่วัดได้อยู่ในช่วง 25-120 $\text{mV.m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ที่ความพรุนช่วง 27-31% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kara และคณะ (Kara *et. al.*, 2003) เตรียม PZT ที่มีความพรุนแตกต่างกันจะมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความต่างศักย์อุทกสถิต เท่ากับ 54.2 และ 2.87 $\text{V.m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า KNbO_3 ที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่ามาก

4.8.3 ค่า Figure of merit (FoM)

คำนวณค่า Figure of merit คำนวณจากสมการที่ 2.3 โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่า d_{31} และ g_{31} ของ KNbO_3 กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.25

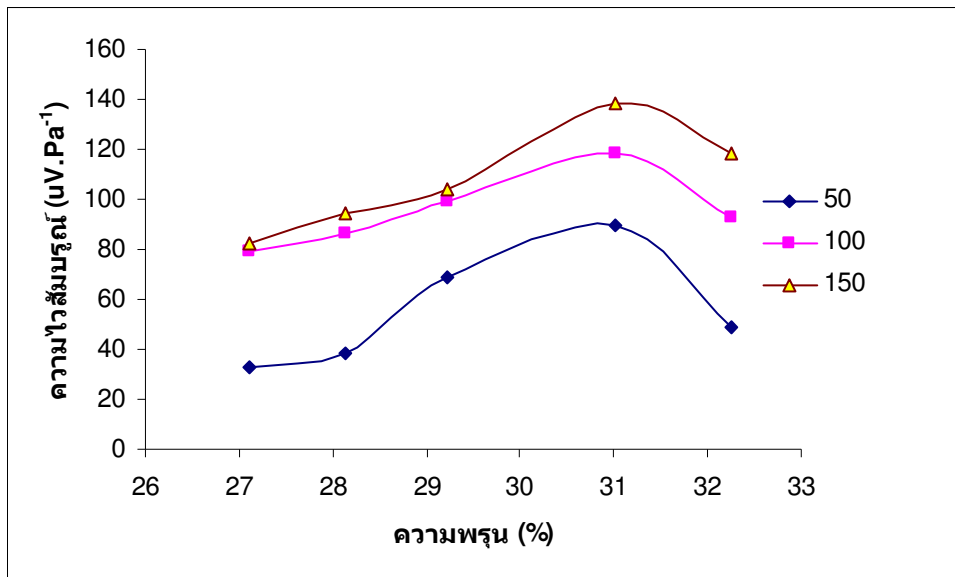


ภาพประกอบที่ 4.25 แสดงค่า Figure of merit เป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพหุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 50-150 °C และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

ค่า Figure of Merit เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหมาะสมของวัสดุในการประยุกต์ใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Kara และคณะ (Kara *et. al.*, 2003) และงานวิจัยของ Roncari และคณะ (Roncari *et. al.*, 2001) ที่ได้เตรียม PZT ที่มีความพหุนสูงและแตกต่างกันจะมีค่า Figure of Merit เท่ากับ 614×10^{-15} และ $125 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า KNbO_3 ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพหุน 26.61% มีค่า Figure of Merit $2715 \times 10^{-15} \text{ Pa}^{-1}$ จะมีค่าสูงกว่า

4.8.4 ค่าความไวสัมบูรณ์ (M)

คำนวณค่าความไวสัมบูรณ์ (M) คำนวณโดยอาศัยสมการ 2.4 ค่าที่ได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.26



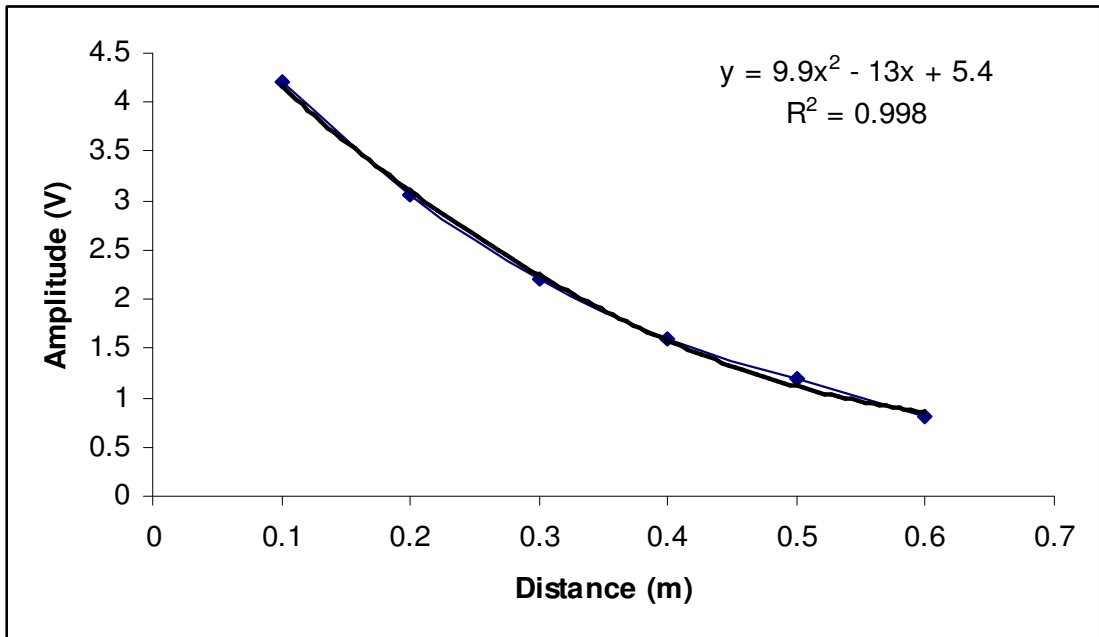
ภาพประกอบที่ 4.26 แสดงค่าความไวสัมบูรณ์ เป็นฟังก์ชันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของ KNbO_3 ที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิในช่วง 50-150 °C และแรงอัดในช่วง 1.0-5.0 ton

จากค่าคงที่ไพโอโซอิเล็กทริกอุทกสถิต ได้แก่ ค่า d_h , g_h , FoM และค่า M ของ KNbO_3 ที่วัดและคำนวณได้จากการทดลองพบว่าค่าต่างๆ จะตอบสนองและแสดงคุณสมบัติได้ดีจากสารตัวอย่างที่เตรียมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่สูง ค่าที่วัดได้นี้ใช้บ่งบอกได้ถึงสารตัวอย่างไพโอโซอิเล็กทริกที่ไม่มีตะกั่ว KNbO_3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นไฮโดรโฟนที่ใช้งานในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bowen และคณะ (Bowen *et al.*, 2004) และ Kara และคณะ (Kara *et al.*, 2003)

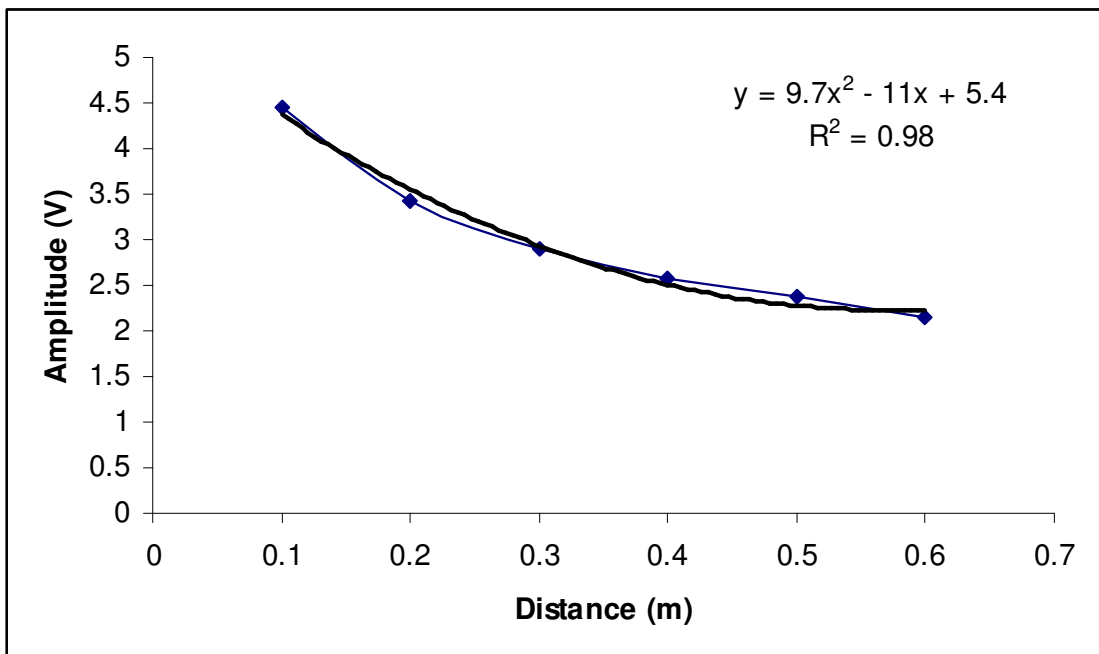
4.9 ทดสอบเป็นตัวส่งคลื่นอะคูสติก

4.9.1 การทดลองปรับคลื่นส่งคลื่นในตัวกลางที่เป็นอากาศ

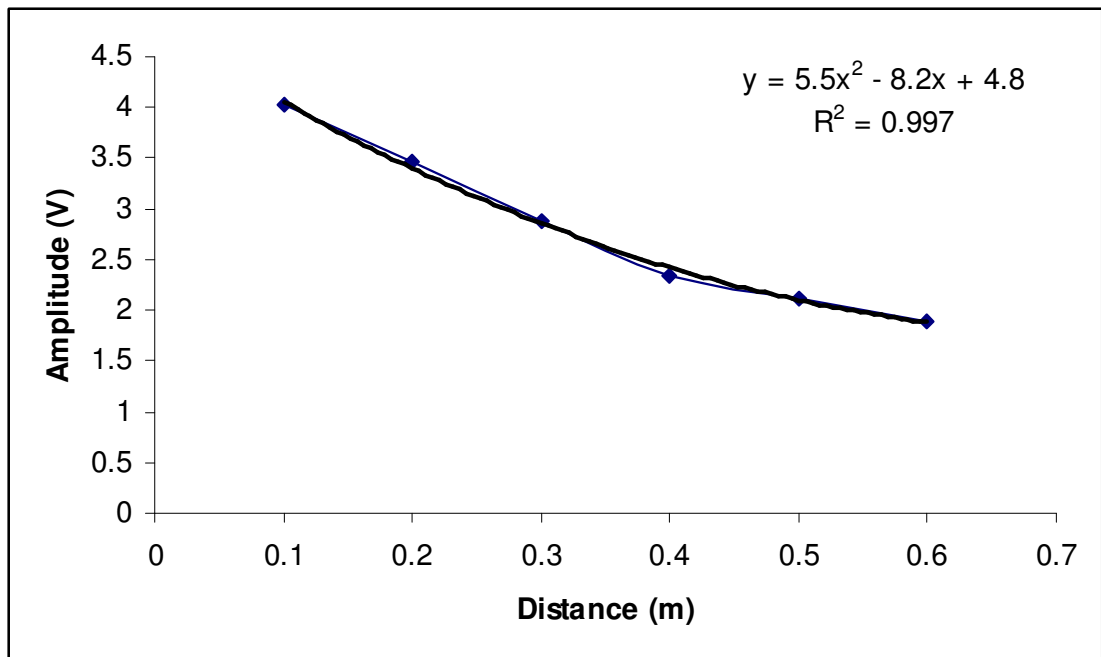
ความถี่ในการทดลองที่ใช้ ช่วง 4,000-12,000 Hz กับระยะห่างที่ใช้ ทำการเพิ่มระยะห่างครั้งละ 0.1 m โดยการแยกตัวส่งกับตัวรับสัญญาณออกจากกัน จะได้ข้อมูลการลดทอนพลังงานเสียงโดยเขียนกราฟระหว่างระยะทางกับแอมพลิจูดของเสียงที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ดังแสดงในภาคผนวก (ตาราง ก-6) และดังภาพประกอบที่ 4.27 - 4.29 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นเดินทางกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดลง ณ ความถี่ 4.7 kHz ของ BaTiO₃



ภาพประกอบที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นเดินทางกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดลง ณ ความถี่ 4.7 kHz ของ PZT



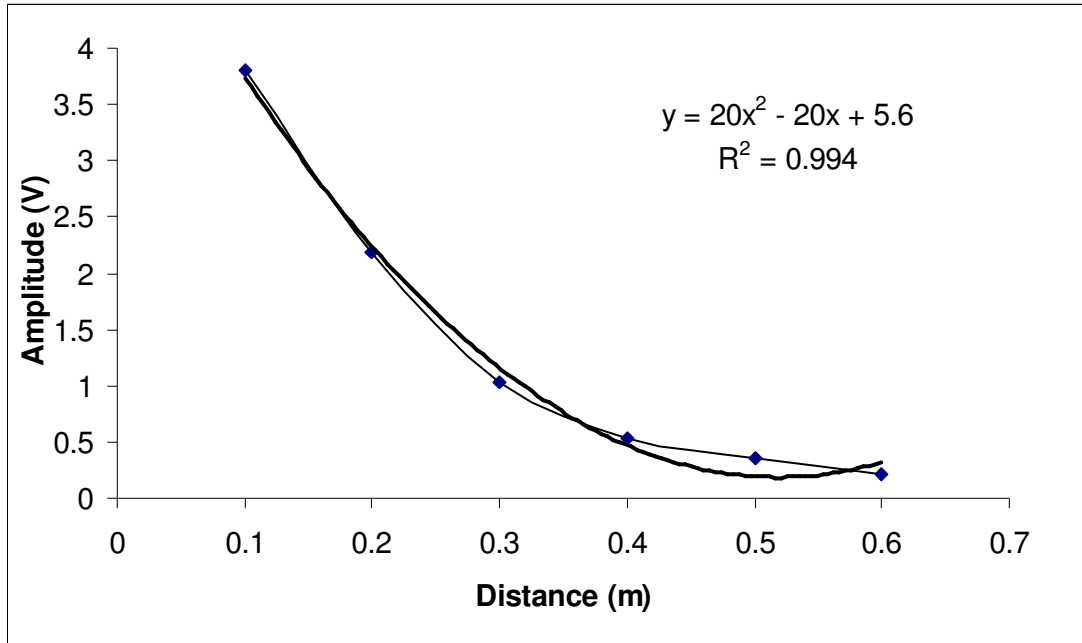
ภาพประกอบที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นเดินทางกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดลง ณ ความถี่ 4.7 kHz ของ KNbO_3

เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 4.29 จะพบว่าสัญญาณคลื่นออกดิเบิ้ลที่ส่งไปในอากาศจะมีการลดทอนแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล นอกจากนี้ลักษณะของสัญญาณที่รับได้ยังไม่เป็นรูปไซน์ที่สวยงามเหมือนกับที่ส่งไป สาเหตุน่าจะมาจากการรบกวนสัญญาณคลื่นอะคูสติกจากแหล่งอื่น เช่น เสียงจากเครื่องปรับอากาศ เสียงเดิน เสียงจากเครื่องมือวัด เป็นต้น หรือสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากเครื่องมือทดลอง เช่น ออสซิลโลสโคป เครื่องกำเนิดสัญญาณ แหล่งจ่ายไฟฟ้าการแสดตรงที่แปลงมาจากไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น

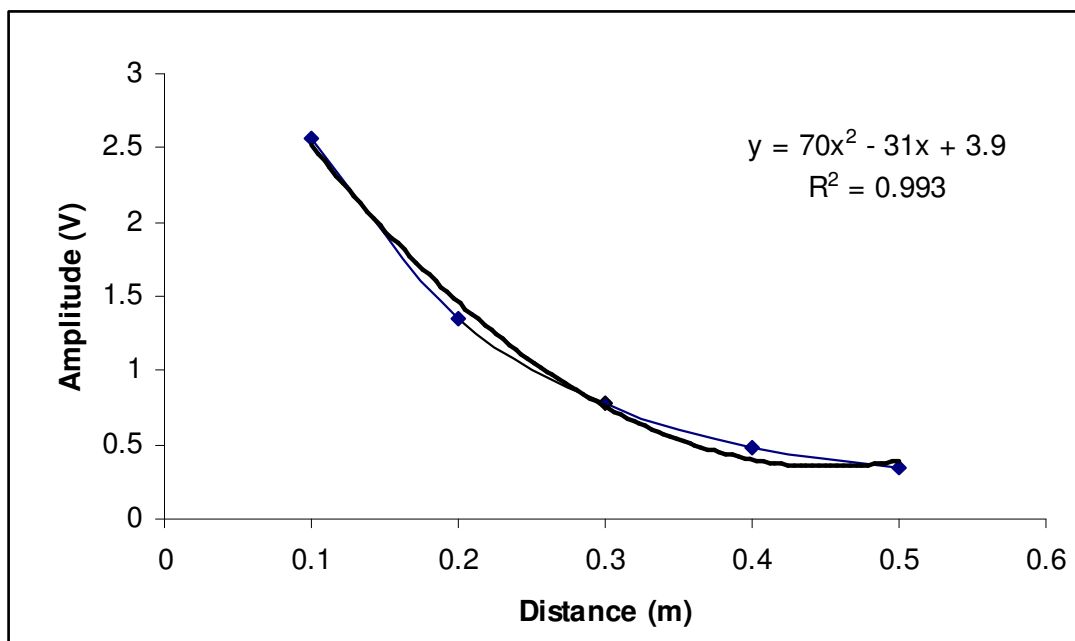
4.9.2 การเปรียบเทียบสารตัวอย่างในตัวกลางที่เป็นน้ำ

โดยการส่งคลื่นความถี่ในช่วง 4,000-12,000 Hz ลงไปในน้ำแล้วใช้โซนาร์เป็นตัวรับและส่งคลื่นโดยใช้ระยะ 5-15 cm โดยทำการเพิ่มระยะครั้งละ 5 cm เพื่อหาความเร็วคลื่นอะคูสติกในน้ำโดยที่เครื่องโซนาร์จะบอกข้อมูลของเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปและกลับ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าความเร็วคลื่นอะคูสติกในน้ำทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาจะได้ข้อมูลดังภาพประกอบที่ 4.30 และภาพประกอบที่ 4.31 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบการรับคลื่นในน้ำในหัวข้อที่ 3.75 พบว่าความถี่ที่ดีที่สุดในการส่งคลื่นในน้ำคือความถี่ 3.8 kHz จึงได้ใช้ค่าความถี่นี้ในการที่จะนำมาทดสอบการลดทอนคลื่นเสียงในน้ำ ซึ่งได้ผลดังนี้



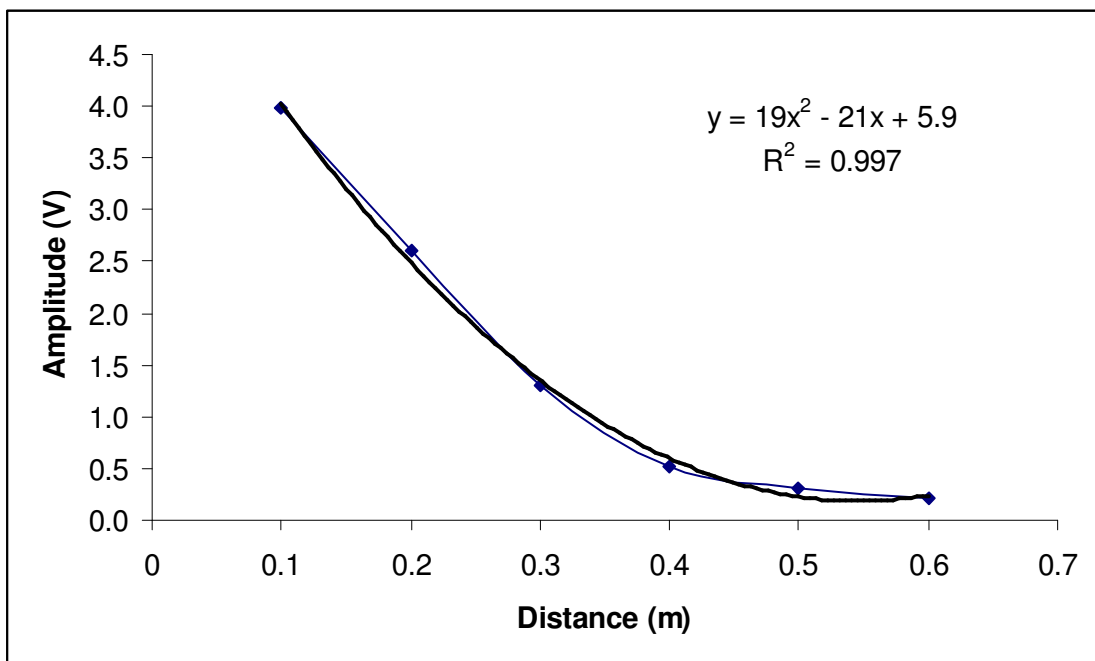
ภาพประกอบที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นเดินทางกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดลง ณ ความถี่ 3.8 kHz ของ BaTiO₃



ภาพประกอบที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นเดินทางกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ลดลง ณ ความถี่ 3.8 kHz ของ KNbO_3

4.10 การใช้งานไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลอง

ทำการปล่อยคลื่นจากตัวส่งคลื่นลงไปใต้น้ำและใช้ตัวรับคลื่นรับคลื่นที่ได้จากตัวปล่อยแล้ววิเคราะห์ขนาดวัตถุที่ได้จากออสซิลโลสโคปและระยะทางที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของการที่สัญญาณเกิดการลดทอนไปเปลี่ยนเป็นระยะทางว่าวัตถุอยู่ในระยะห่างเท่าไรและนำข้อมูลที่ได้อามาเทียบกับระยะทางที่วัดได้จริงจะได้ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.32



ภาพประกอบที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับแอมพลิจูดที่วัดได้จากการทดลองใช้ไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลอง

การทดลองวัดคลื่นใต้น้ำในสภาวะแวดล้อมจริงจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกสูงมากและความลึกของระดับน้ำและอุณหภูมิของน้ำก็จะมีผลต่อค่าที่ได้และกระบวนการนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์หรือจำลองเป็นภาพขึ้นนั้นยังเป็นเรื่องยากต้องใช้หัววัดไฮโดรโฟนแบบต่อพวงเป็นชุด (Array) แล้วนำสัญญาณที่ได้จากแต่ละตัวมาวิเคราะห์เพื่อจำลองภาพของคลื่นที่ได้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ชัดเจนได้และยังไม่สามารถบอกขนาดของวัตถุที่อยู่ในน้ำได้ชัดเจนมากนักเพราะหากมุมในการวัดตัวสะท้อนเปลี่ยนไป

สัญญาณสะท้อนที่กลับมาจะมีค่าแอมพลิจูดไม่เท่าเดิมทำให้การวิเคราะห์ขนาดของวัตถุได้น้ำ
ผิดพลาดได้เช่นกันและการที่จะใช้ไฮโดรโฟนเป็นตัวรับ-ส่งเพียงตัวเดียวนั้นยังไม่สามารถทำได้ใน
งานวิจัยนี้