

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



242976

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกเฟรโรอิเล็กทริกไว้สารตะกั่วจากระบบที่มี โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตเป็นองค์ประกอบหลัก

พลอยไพลิน ยงศิริ

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2554



242976

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วจากระบบที่มี
โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตเป็นองค์ประกอบหลัก



พลอยไพลิน ยงศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2554

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกเฟรโรอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วจากระบบที่มี
โพแทสเซียมโซเดียมในโอเบตเป็นองค์ประกอบหลัก

พลอยไพลิน ขงศิริ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจจินากุล

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัค

.....
ดร. สุชุม อีสเสงี่ยม

.....
ดร. สมนึก ศิริสุนทร

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัค

11 กุมภาพันธ์ 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยการค้นคว้าวิจัยนี้

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยความรู้จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัก อาจารย์ที่ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัย ผู้มอบความรู้คำแนะนำต่างๆและยังมอบโอกาสพร้อมกับความช่วยเหลือในทุกๆ สิ่ง ทั้งเรื่องงานและการใช้ชีวิต ตลอดจนสละเวลาเพื่อช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. สมนึก สิริสุนทร อาจารย์นักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจิณากุล ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุขุม อิศเร้งี่ยม ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว คุณภู่ เพื่อนๆ และทุกคนที่เป็นทั้งกำลังใจทั้งแรงผลักดันที่สำคัญและคอยช่วยเหลือเสมอมา

ขอขอบพระคุณสมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์โทรมิกที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ตลอดงานวิจัยจนทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยสำหรับผู้สนใจและหากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องในงานวิจัยนี้ ผู้เขียนก็ขอกราบอภัยไว้ ณ ที่นี้

พลอยไพลิน ขงศิริ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์แก้วเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกไร้สารตะกั่วจาก ระบบที่มีโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตเป็นองค์ประกอบหลัก
ผู้เขียน	นางสาวพลอยไพลิน ยงศิริ
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. กมลพรรณ เพ็งพัก

บทคัดย่อ

242976

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแก้วเซรามิกที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจากระบบโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตเป็นองค์ประกอบหลักโดยอาศัยกระบวนการอินคอร์ดปอร์เช้นเนื่องจากโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ หรือ (KNN) เป็นสารที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น อาทิ การมีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นต้น และสารชนิดนี้ยังเป็นสารที่ปราศจากสารตะกั่วที่เป็นพิษต่อร่างกายของมนุษย์ด้วยทำให้มีปลอดภัยต่อการใช้งานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กระบวนการอินคอร์ดปอร์เช้นคือการเตรียมผงของสารตั้งต้น KNN โดยการแคลไซน์ก่อนแล้วจึงนำมาผสมกับสารประกอบที่ทำให้เกิดแก้ว โดยผงตั้งต้น KNN ที่แคลไซน์แล้วจะเป็นเหมือนสารที่เหนียวนำไปแล้วเกิดผลึก ในการทดลองนี้ได้ศึกษาแก้วเซรามิกที่เตรียมจากสารตั้งต้น KNN ที่แตกต่างกัน 3 ชุดคือ จากชุด KNN ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ (ชุด A) ชุด KNN ที่มีเฟสอื่นปะปนอยู่เล็กน้อย (ชุด B) และชุด KNN ที่มีความบริสุทธิ์ (ชุด C) โดยเลือกใช้อัตราส่วนของ KNN: SiO_2 เท่ากับ 75:25 โมลเปอร์เซ็นต์ (จัดเป็นชุด A1, B1 และ C1) และ 80:20 โมลเปอร์เซ็นต์ (จัดเป็นชุด C2) ในขั้นตอนการเตรียมแก้ว นำผง KNN ที่เตรียมได้ไปผสมกับแก้วแล้วหลอมที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลานาน 15 นาที ในถ้วยหลอมทองคำขาว และทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วลงบนแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้แก้วที่มีความโปร่งใสมีสีอมเหลือง จากนั้นจึงนำแก้วที่ได้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 500 - 575 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดการตกผลึก พบว่าความหนาแน่นและความขุ่นของแก้วเซรามิกที่

เตรียมได้จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ผลการศึกษาทางความร้อนด้วย DTA และ TG-DSC พบว่าแก้วชุด A1, B1, C1 และ C2 จะมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเป็นแก้วที่อุณหภูมิ 560, 530, 532 และ 520 องศาเซลเซียสและจะมีช่วงอุณหภูมิการตกผลึกอยู่ที่ 648, 648, 645 และ 620 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าผลึกของ KNN มีลักษณะเป็นก้อนที่มีเหลี่ยมมุมกระจายทั่วในเนื้อแก้ว โดยความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการปลูกผลึกเพิ่มสูงขึ้น ในแก้วเซรามิกชุด C2 จะพบการเกิดเฟสแปลกปลอมร่วมอยู่ด้วยโดยจะเห็นได้ชัดในแก้วที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบสมบัติทางสเปกโทรสโกปี จะพบการทำพันธะ O-Nb-O ที่เลขคลื่น 3 ช่วงคือ ช่วง 230, 620 และ 890 cm^{-1} และพบการเกิดโครงสร้างที่ยังไม่สามารถระบุได้ในแก้วเซรามิกชุด C2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าแก้วเซรามิกทุกชุดจะมีค่าไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการปลูกผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น ชุดแก้วที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดพบในแก้วชุด C1 คือมีค่าไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เหมาะสม พร้อมทั้งยังมีความโปร่งใส นอกจากนี้แก้วเซรามิกจากชุด C1 ที่มีการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียสยังพบคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกเกิดขึ้นเล็กน้อยในแก้วเซรามิกที่เตรียมได้ทั้งหมด

Thesis Title	Fabrication of Lead-free Ferroelectric Glass-ceramics from Potassium Sodium Niobate-based Systems
Author	Ms. Ploypailin Yongsiri
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Kamonpan Pengpat

Abstract

242976

In this research, the fabrication of lead-free ferroelectric glass-ceramics from $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ based systems via incorporation method has been carried out. Potassium sodium niobate $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ (KNN) was recognized as a material with good electrical properties, for examples piezoelectric and ferroelectric properties. Besides, it is a lead free material which promotes environmental friendly. For incorporation method, the calcined potassium sodium niobate was added in glass batches as heterogeneous nucleating agent. Starting powders of K_2CO_3 , Na_2CO_3 and Nb_2O_5 were used to prepare KNN powder by mixed oxide method. All compositions were mixed by wet ball milling method for 24 h then dried for 24 h. The dried powder was calcined at 600-900 °C for 2 h and then was mixed with SiO_2 . In this, glass-ceramics KNN were prepared from three compositions of KNN- SiO_2 system; composition A with high impurity; B with low impurity KNN; and C with high purity KNN. The KNN- SiO_2 ratios were 75:25 for composition series A1, B1 and C1 and 80:20 for composition series C2. It was found that transparent glasses were successfully produced by using conventional melting-quenching method. The batches were melted at 1300 °C in an electric furnace. It was found that transparent glasses were successfully produced by using conventional melting-quenching method. Finally, the prepared glasses were heat treated in a range of 525-575 °C for crystallization. XRD results

showed that KNN phase occurred in most of the glass-ceramic samples excepted C2 which show unidentified phase together with KNN phase. Thermal property resulting from DTA and TG-DSC showed glass transition temperatures of samples A1, B1, C1 and C2 at 560, 530, 532 and 520 °C and crystallization temperature at 648, 648, 645 and 620 °C, respectively. From SEM observation, it was found that bulk crystals with equiaxed shape of KNN phase dispersed well in all glass-ceramic matrices. A crystal sizes increased with increasing heat treatment temperature. In C2 glass-ceramics, unidentified phase was found together with KNN phase. The result from Raman spectroscopy showed O-Nb-O bonding at wave number 230, 620 and 890 cm^{-1} and unidentified structure was found in C2 glass-ceramics. Dielectric result showed the values of dielectric constant (ϵ_r) and dielectric loss ($\tan\delta$) which were found to increase with increasing heat treatment temperature. The optimum condition of all glass-ceramic samples was C1, which possessed the appropriate values of ϵ_r , $\tan\delta$ and high transparency, and trace of the ferroelectric behavior.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญ	๗
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	น
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 จุดประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เจริญทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 แก้ว	3
2.1.1 คำนิยามของแก้ว	3
2.1.2 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว (Kinetic theories of glass formation)	8
2.1.2.1 การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)	8
2.1.2.2 การเติบโตของผลึก (crystal growth)	11
2.1.3 กลไกควบคุมการตกผลึก	13
2.2 แก้วเซรามิก	14
2.2.1 ความเป็นมาของแก้วเซรามิก	14
2.2.2 ทฤษฎีของแก้วเซรามิก	15
2.3 เฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric)	16
2.3.1 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส	17
2.3.2 โพลาไรเซชัน (Polarization)	17

2.3.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)	18
2.3.4 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity; ϵ_r)	18
2.3.5 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss; $\tan\delta$)	21
2.4 โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต (Sodium Potassium Niobate; $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$)	21
2.4.1 ความเป็นมาของโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$)	26
2.5 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	29
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 วิธีการทดลอง	40
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง	40
3.3.1.1 การเตรียมสารตั้งต้นโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	40
3.3.1.2 การเตรียมแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	44
3.3.1.3 การเตรียมแก้วเซรามิกโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	47
3.3.2 วิธีการวัดและตรวจวิเคราะห์หลักคุณสมบัติเฉพาะของสารตัวอย่าง	50
3.3.2.1 การหาความหนาแน่น	50
3.3.2.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	51
3.3.2.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้เทคนิค FESEM-EDS	53
3.3.2.4 การตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DTA	55
3.3.2.5 การตรวจสอบสมบัติเชิงพลังงานด้วยเทคนิค DSC	55
3.3.2.6 การตรวจสอบสมบัติเชิงสเปกโทรสโกปีด้วยเทคนิค Raman spectroscopy	56
3.3.2.7 การตรวจสอบสมบัติเชิงแสง	57
3.3.2.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	60
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	63
4.1 การเตรียมสารตั้งต้นโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	63
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	64
4.1.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงด้วยเทคนิค SEM- EDS	70
4.2 ผลการศึกษากการเตรียมแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	71

4.2.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ	71
4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	75
4.2.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางสเปกโทรสโกปี	76
4.3 ผลการศึกษาการเตรียมแก้วเซรามิกโพแทสเซียมโซเดียมในโอเบตที่ได้	77
หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)	
4.3.1 ผลของการเตรียมแก้วเซรามิกที่ได้จากผงตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A)	78
4.3.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ	78
4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA และ TG-DSC	79
4.3.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	81
4.3.1.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางสเปกโทรสโกปี	82
4.3.1.5 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค FESEM-EDS	83
4.3.1.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis	86
และ refractometer	
4.3.1.7 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	87
4.3.2 ผลของการเตรียมแก้วเซรามิกที่ได้จากผงตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อย	93
เกิดขึ้นเล็กน้อย (B)	
4.3.2.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ	93
4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA	94
4.3.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	95
4.3.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค FESEM-EDS	97
4.3.2.5 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis	99
และ refractometer	
4.3.2.6 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	101
4.3.3 ผลของการเตรียมแก้วเซรามิกที่ได้จากผงตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ (C)	107
4.3.3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ	107
4.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA และ TG-DSC	110
4.3.3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD	113
4.3.3.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางสเปกโทรสโกปี	115
4.3.3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค FESEM-EDS	117
4.3.3.6 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis	122

และ Refractometer

4.3.3.7 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	124
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	135
5.1 สรุปผลการทดลอง	135
5.1.1 ผลการเตรียมสารตั้งต้น โพลีเอทเธนเซมิคอนดักเตอร์ในโอเบต	135
5.1.2 ผลการศึกษาแก้วโพลีเอทเธนเซมิคอนดักเตอร์ในโอเบต	136
5.1.3 ผลการศึกษาแก้วเซรามิกโพลีเอทเธนเซมิคอนดักเตอร์ในโอเบต	137
5.2 ข้อเสนอแนะ	139
บรรณานุกรม	140
ภาคผนวก	145
ภาคผนวก ก	145
ภาคผนวก ข	148
ภาคผนวก ค	149
ประวัติผู้เขียน	150

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	22
2.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบขนาดของผลึกกับค่าโพลาไลเซชันของระบบโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$) โดย $E = 16\text{ kV/cm}$	31
2.3 ตารางแสดงขนาดผลึกของแก้วที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ	36
3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้นโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	41
3.2 ปริมาณอัตราส่วนระหว่าง KNN และ SiO_2 ที่ใช้ในการเตรียมแก้วแต่ละชุด	45
4.1 ปริมาณอัตราส่วนระหว่าง KNN และ SiO_2 ที่ใช้ในการเตรียมแก้วแต่ละชุด	71
4.2 แสดงลักษณะที่แตกต่างกันของชิ้นงานแต่ละชนิด	74

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 (ก) ภาพโครงสร้างอะตอมของแก้ว (glass structures) ของแบบสองมิติ (ข) ภาพเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึก (crystal structures) ของ โครงสร้าง แบบผลึกและ โครงสร้างที่ไม่มีผลึกของแก้วแบบสองมิติ	4
2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้ว หลังจากการทำให้เย็นตัวลง แบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน	5
2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปีของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว	6
2.4 แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)	8
2.5 กราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก (ΔG) กับขนาดของนิวเคลียส (r)	10
2.6 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึกเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยน ไปของของเหลวที่มีความหนืดสูง (viscous liquid)	12
2.7 กราฟแสดงกระบวนการให้ความร้อนในการปลูกผลึกของแก้ว (heat treatment) a. คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (heating rate) b. คืออุณหภูมิที่ใช้ในการ ปลูกผลึก (crystallisation temperature) และ c. คือระยะเวลาที่ใช้ในการ ปลูกผลึก (dwell time)	13
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) กับโพลาริเซชัน (P) ของ สารเฟอร์โรอิเล็กทริก	16
2.9 แสดงการจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารก่อน และภายหลังจากให้สนามไฟฟ้า	18
2.10 ตัวเก็บประจุของแผ่นคู่ขนานเมื่อไม่มีสาร ไดอิเล็กทริก	19
2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบเพอร์อฟไกต์ของ โพแทสเซียม โซเดียม ใน โอเบต	22
2.12 แสดง โครงสร้างผลึกของ โพแทสเซียม โซเดียม ใน โอเบต ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	22
2.13 แผนภาพเฟสไคอะแกรมแบบทวิภาค (Binary phase diagram) ของ $\text{KNbO}_3\text{--NaNbO}_3$	24
2.14 กราฟแสดง โพลาริเซชันต่อสนามไฟฟ้า (ก) แก้วเซรามิก BaTiO_3 ที่ผ่านการ ปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 1075 °C (ขนาดผลึก ~1 ไมโครเมตร) และ 975 °C (ขนาดผลึก	30

~0.1 ไมโครเมตร) (ข) แก้วเซรามิก $K_{0.4}Na_{0.6}NbO_3$ ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 1075 °C (ขนาดผลึก ~1 ไมโครเมตร) และ 975 °C (ขนาดผลึก ~0.2 ไมโครเมตร)	
(ค) แก้วเซรามิก $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ ที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 1075 °C (ขนาดผลึก ~1 ไมโครเมตร) และ 960 °C (ขนาดผลึก ~0.2 ไมโครเมตร)	
2.15 กราฟ DTA แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของแก้ว $38K_2O-38Nb_2O_5-24SiO_2$	32
2.16 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกต่อสมบัติทางไฟฟ้าในแก้ว $5Na_2O - 33K_2O - 38Nb_2O_5 - 24SiO_2$	33
2.17 ผลของอุณหภูมิต่ำค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแก้วเบสที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 925 °C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง	34
2.18 ลักษณะชั้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	35
2.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในแก้วที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	36
2.20 รูปแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของแก้วที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	37
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผงโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	42
3.2 เครื่องบดผสมด้วยลูกบอล	43
3.3 ขวดบดสารชนิดโพลีเอทิลีนและลูกบดเซอโรโคเนีย	43
3.4 แผนผังแสดงเงื่อนไขของการหลอมแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	45
3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	46
3.6 ถ้วยหลอมทองคำขาวหรือถ้วยหลอมแพลตตินัม (Platinum crucible)	46
3.7 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel plate) สำหรับกดทับแก้ว	47
3.8 โกร่งบดสารขนาดเล็ก (agate mortar)	47
3.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูกผลึกของแก้วเซรามิกโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	48
3.10 แผนผังเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต	49
3.11 เตาเผาไฟฟ้า (electric furnace)	49
3.12 เครื่องจักรระบบดิจิทัล สำหรับวัดค่าความหนาแน่นผลิตโดยบริษัท AND รุ่น HM-300	51
3.13 การทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)	52
3.14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer), JEOL	53
3.15 เครื่อง sputtering รุ่น JFC-1100E	54
3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM 5910LV) รุ่น 7274	54
3.17 แสดงเครื่อง High Temperature DTA Cell Adaptor	55

3.18 แสดงเครื่อง DSC รุ่น STA 409 PC LUX ^R NETZSCH	56
3.19 เครื่อง Raman spectrometer (JOBIN YVON HORIBA, T6400 triplemonochromator)	57
3.20 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer รุ่น VARIAN Cary 50 Conc	59
3.21 เครื่องมือ Digital ABBE Refractometer รุ่น D-22976 Hamburg	60
3.22 แสดงเครื่อง LCZ มิเตอร์ รุ่น Agilent E4980A	61
3.23 เครื่อง Hysteresis analyzer ผลิตโดยบริษัท RADIANT (Technologie, inc.) model 6093	62
4.1 กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (*) แสดงเฟสลำดับที่สอง	64
4.2 กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ (*) แสดงเฟสลำดับที่สองเทียบกับ JCPDF number 77-0038 ซึ่งเป็นเฟสองค์ประกอบของ $K_{0.65}Na_{0.35}NbO_3$	65
4.3 กราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($K_{0.65}Na_{0.35}NbO_3$) ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ $K_{5.75}Nb_{10.85}O_{30}$, $K_2Nb_8O_{21}$ และ $K_{0.65}Na_{0.35}NbO_3$	66
4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบออกไซด์โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเทียบกับ JCPDF หมายเลข 77-0038 ซึ่งเป็นเฟสองค์ประกอบของ $K_{0.65}Na_{0.35}NbO_3$	68
4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบออกไซด์โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 425 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ และ อุณหภูมิสุดท้ายที่เลือกใช้คือ 800 องศาเซลเซียสแช่เย็น 2 ชั่วโมงเทียบกับ JCPDF หมายเลข 77-0038 ซึ่งเป็นเฟสองค์ประกอบของ $K_{0.65}Na_{0.35}NbO_3$	68
4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบออกไซด์โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 แช่เย็น 4 ชั่วโมง	69
4.7 รูปแสดงลักษณะวิทยาของผงโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ที่ได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง	70

4.8 ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในผงโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ที่ได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง	70
4.9 แสดงแผนภาพชุดของผงโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตที่ใช้ในการเตรียมแก้ว	72
4.10 แสดงลักษณะชิ้นงานแก้วที่ได้จากการทดลองหลอม เพื่อหาช่วงเวลาการเทแก้ว ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแก้วที่มีความโปร่งใส โดยเลือกศึกษาที่องค์ประกอบ ของโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตต่อซิลิกาหรือร้อยละ 75:25 โดยโมล	73
4.11 กราฟแสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแก้ว	74
4.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแก้วโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ของแก้วเซรามิกที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ต่างกัน โดยมีอัตราส่วน ของ KNN:SiO ₂ เท่ากับร้อยละ 75:25 โดยโมล (A1, B1 และ C1) และ KNN:SiO ₂ เท่ากับร้อยละ 80:20 โดยโมล (C2)	75
4.13 แสดงรูปแบบของรามานสเปกตรัมของแก้วเซรามิกที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่มี ความบริสุทธิ์ต่างกันชุด A1 คือ แก้วที่ใช้สารตั้งต้นที่ไม่บริสุทธิ์, ชุด C1 คือแก้วที่ใช้สารตั้งต้นที่บริสุทธิ์ โดยมีอัตราส่วนของ KNN:SiO ₂ คือ 75:25 โมลร้อยละ และชุด C2 คือแก้วที่ใช้สารตั้งต้นที่บริสุทธิ์ โดยมีอัตราส่วน ของ KNN:SiO ₂ คือร้อยละ 80:20 โดยโมล	76
4.14 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้น ที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วง อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	78
4.15 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มี ความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วง อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	79
4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วเซรามิกที่ ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1)	80
4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TG-DSC ของแก้วเซรามิก ที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1)	81
4.18 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มี ความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ แตกต่างกัน	82
4.19 แสดงรูปแบบของรามานสเปกตรัมของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มี	83

ความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	
4.20 แสดงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยกำลังขยาย 20,000 และ 50,000 เท่า	84
4.21 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานแก้วเซรามิกได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อน (ก) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (ข) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส (ค) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	85
4.22 ร้อยละการส่องผ่านและดัชนีหักเหแสงของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อน	86
4.23 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) ณ อุณหภูมิห้องของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อน	88
4.24 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส	89
4.24 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	90
4.25 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	91
4.25 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของแก้วเซรามิกที่สร้างจากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูง (A1) และผ่านความร้อนเพื่อใช้ในการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 525, 550 และ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง	92
4.26 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปน	93

เพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	
4.27 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปน	94
เพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	
4.28 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วเซรามิกที่มีสิ่งเจือปน	95
เพียงเล็กน้อยและหลอมเหลวกันคนละชุด โดยที่ B1 คือชุดการหลอมครั้งที่ 1 B2 คือชุดการหลอมครั้งที่ 2	
4.29 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแก้วเซรามิกที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อย	96
โดยหลอมเหลวกันคนละชุด และผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) คือชุดการหลอมครั้งที่ 1 ; B1 (ข) คือชุดการหลอมครั้งที่ 2 ; B2	
4.30 แสดงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกได้จากสาร	98
ตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วง อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยกำลังขยาย 10,000 และ 30,000 เท่า	
4.31 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานแก้วเซรามิกได้จากสาร	99
ตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อน (ก) ผ่านความ ร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส (ข) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	
4.32 แสดงร้อยละการส่องผ่านและดัชนีหักเหแสงของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้น	100
ที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อย (B2) และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วง อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	
4.33 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) ณ อุณหภูมิ	102
ห้อง ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อยและ ผ่านกระบวนการทางความร้อน	
4.34 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ	103
เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปน เพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส	
4.34 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อ	104
มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปน เพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
4.34 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อ	105
มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปน เพียงเล็กน้อยและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	

4.35 แสดงวงฮีสเทอรีซิสของแก้วเซรามิกที่สร้างจากสารตั้งต้นที่มีสิ่งเจือปนเพียงเล็กน้อย และผ่านความร้อนเพื่อใช้ในการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 525, 550 และ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง	106
4.36 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้น ที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ชุด C1 คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบตร้อยละ 75 โดยโมล และชุด C2 คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบตร้อยละ 80 โดยโมล	108
4.37 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้น ที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (ก) ระบบแก้วที่มีโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ในโอเบตร้อยละ 75 โดยโมล (C1) (ข) ระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบต ร้อยละ 80 โดยโมล (C2)	109
4.38 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วเซรามิกชุด C1 และชุด C2 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์สูง	110
4.39 (ก) แสดงผลการวิเคราะห์เชิงพลังงานด้วยเทคนิค TG-DSC ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์ชุด C1 (ข) แสดงผลการวิเคราะห์เชิงพลังงานด้วยเทคนิค TG-DSC ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์ชุด C2	112
4.40 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแก้วเซรามิกที่ได้จากสารตั้งต้นที่ ไม่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ชุด C1 (ก) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบต ร้อยละ 75 โดยโมล และชุด C2 (ข) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบต ร้อยละ 80 โดยโมล	114
4.41 แสดงรูปแบบของรามานสเปกตรัมของแก้วเซรามิกชุด C1 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่ บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ชุด C1 (ก) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบตร้อยละ 75 โดยโมล และชุด C2 (ข) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบตร้อยละ 80 โดยโมล	116
4.42 แสดงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกชุด C1 ได้จากสารตั้งต้น ที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยกำลังขยาย 10,000 และ 30,000 เท่า	118
4.42 (ต่อ) แสดงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกชุด C2 ได้จากสาร ตั้งต้นที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยกำลังขยาย 10,000 และ 30,000 เท่า	119

4.43 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานแก้วเซรามิกชุด C1 ได้จากสาร ตั้งต้นบริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อน (ก) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส (ข) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	120
4.43 (ต่อ) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานแก้วเซรามิกชุด C2 ได้จากสารตั้งต้นบริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อน (ก) ผ่านความร้อน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ข) ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	121
4.44 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานแก้วเซรามิกเปรียบเทียบค่าความสามารถ ในการส่องผ่านที่ได้จากสารตั้งต้นที่ไม่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความ ร้อน ชุด C1 (ก) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบคร์ร้อยละ 75 โดยโมล และชุด C2 (ข) คือระบบแก้วที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโอเบคร์ร้อยละ 80 โดยโมล	123
4.45 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) ณ อุณหภูมิห้อง ของแก้วเซรามิกชุด C1 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อน	125
4.45 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) ณ อุณหภูมิ ห้องของแก้วเซรามิกชุด C2 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทาง ความร้อน	126
4.46 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C1 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และ ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส	127
4.46 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C1 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และ ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	128
4.46 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C1 ที่ได้จากสารตั้งต้นไม่บริสุทธิ์และ ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	129
4.46 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C2 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และ ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	130
4.46 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C2 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และ ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส	131

4.46 (ต่อ) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ของแก้วเซรามิกชุด C2 ที่ได้จากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	132
4.47 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของแก้วเซรามิกที่สร้างจากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์ชุด C1 และผ่านความร้อนเพื่อใช้ในการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง	133
4.47 (ต่อ) แสดงวงฮิสเทอรีซิสของแก้วเซรามิกที่สร้างจากสารตั้งต้นที่บริสุทธิ์ชุด C2 และผ่านความร้อนเพื่อใช้ในการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง	134

อักษรย่อและสัญลักษณ์

KNN	Potassium Sodium Niobate
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
DTA	Differential Thermal Analysis
DSC	Differential Scanning Calorimetry
XRD	X-ray Diffraction technique
SEM	Scanning Electron Microscopy
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry
UV-Vis	Ultraviolet-Visible Spectrophotometry
°C	Degree Celsius
°C/min	Degree Celsius per minute
°C/h	Degree Celsius per hour
Mol%	Percent molar
mW	Milliwatt
nm	Nanometer
θ	Theta
T_c	Crystallization temperature
T_g	Glass transition temperature
T_F	Fictive temperature
P_r	Remnant Polarization
E_c	Coercive electric field
C	Capacity
$\tan\delta$	Dielectric loss
ϵ_r	Dielectric constant
ρ	Density

Hz	Frequency (Hertz)
kHz	Frequency (Kilo-Hertz)
MHz	Frequency (Mega-Hertz)
pC	Pico coulomb
pC/N	Pico coulomb per Newton
kV	Kilovolt
μ C	Micro coulomb
μ s	Microsecond