

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



249133

สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมีที่เชื่อมด้วยโครเมียม

จิราพันธ์ ธรรมนิเพช

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตุลาคม 2554

600253679

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



249133

สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมัทเจือด้วยโครเมียม



จिरาพันธ์ ธรรมณีเพชร

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

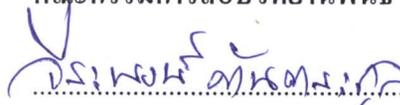
บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
ตุลาคม 2554

# สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมัทเจือด้วยโครเมียม

จิราพันธ์ ธรรมณีเพชร

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
รองศาสตราจารย์ ดร. จีรพงษ์ ต้นตระกูล

  
.....กรรมการ  
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์

  
.....กรรมการ  
อาจารย์ ดร. อธิพงษ์ งามजारุโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

  
.....  
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์

19 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อชิพงศ์ งามजारุโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ และ รศ.ดร. จีรพงษ์ ดันตระกูล ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ให้คำแนะนำต่างๆ ใน วิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ และเจ้าหน้าที่ผู้ดูแล เครื่อง XRD และ ellipsometer ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทำวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่าง สูง และ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์บ้างไม่มากนักน้อยสำหรับผู้สนใจที่จะศึกษา รายละเอียดต่อไป

จิราพันธ์ ธรรมณีเพชร

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมีทเจือด้วยโครเมียม
ผู้เขียน	นางสาวจิราพันธ์ ธรรมณีเพชร
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. นรินทร์ สิริกุลรัตน์

### บทคัดย่อ

249133

ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาถึงผลของโครเมียมที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมีทซึ่งถูกเตรียมขึ้นจากส่วนผสมของ ซิลิกอนไดออกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมไนเตรด โพแทสเซียมคาร์บอเนต โบรอนออกไซด์ บิสมีทออกไซด์ และเจือด้วยโพแทสเซียมโครเมต ตั้งแต่ร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมถูกหลอมที่อุณหภูมิ 1,275 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปด้วยความร้อนและกดอัดให้เป็นแผ่น และอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ตัวอย่างแผ่นแก้วถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และวัดสมบัติทางกายภาพ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ผลการทดลองพบว่า แก้วยังคงมีโครงสร้างอสัณฐาน และพบเฟสของแก้วสองเฟสที่มีความเข้มข้นของบิสมีทแตกต่างกัน สำหรับความหนาแน่นสูงสุดของแก้วพบในตัวอย่างที่เจือด้วยโพแทสเซียมโครเมตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก คือ 3.35 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ธรรมณีหักเหมีค่าเฉลี่ย 1.6 ที่ความยาวคลื่นแสง 589 นาโนเมตร ผลการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าตัวอย่างแก้วที่เจือด้วยโครเมียมทุกตัวดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลต โดยมีขอบการดูดกลืนกระจายช่วงแสงสีน้ำเงิน ถึงแสงสีเขียว ในตัวอย่างที่เจือด้วยโครเมียมมากขึ้น ความยาวคลื่นที่ขอบการดูดกลืนจะเลื่อนสูงขึ้น จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะสังเกตเห็นได้ว่าพีคการดูดกลืนต่ำสุดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 530-570 นาโนเมตร ซึ่งแสดงลักษณะสีของตัวอย่างแก้วที่ส่วนผสมนั้น ๆ ผลการวัดสมบัติไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของแก้วมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 15-30 ที่ความถี่ต่ำ และลดลงอยู่ในช่วง 10-17 ที่ความถี่สูง ค่าแทนเจนต์การสูญเสียมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 1 ที่ความถี่ต่ำ ยกเว้นในตัวอย่างแก้วที่เจือด้วยโครเมียมร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ที่ความถี่สูงขึ้น ค่าแทนเจนต์การสูญเสียมีค่าต่ำมาก

๓

<b>Thesis Title</b>	Physical Properties and Structures of Chromium Doped Bismuth Glasses
<b>Author</b>	Miss Jirapan Dutchaneephet
<b>Degree</b>	Master of Science (Materials Science)
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Narin Sirikulrat

#### ABSTRACT

249133

In this research work, the effects of chromium dopant on physical properties and structures of bismuth glasses were investigated. Glasses were prepared from the mixtures of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  with the content of  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  varied from 0 wt% to 10 wt%. The mixtures were melted at 1275 °C with dwell time of 4 hours and cooling to room temperature in furnace. The glass specimens were softened and press into a plate and annealed at 500 °C for 20 minutes in an electrical furnace. The glass structures were investigated with the scanning electron microscope and X-rays diffractometer. The physical properties, refractive index, and dielectric properties of glass at a frequency 100 Hz - 1 MHz at room temperature were measured. Results from the experiments found that all glass specimens are amorphous and two different phases are observed due to the different content of bismuth. The highest density of 3.35  $\text{g/cm}^3$  is observed in the glass specimen doped with 0.5%wt chromium. From the UV-VIS spectroscopy measurement, all chromium doped glass specimens absorb ultraviolet with the increase of the absorption edge from blue to green as the chromium content increased. The minimum absorption peaks which indicate the glass color occur in the wave length range of 530-570 nm. Results from measurements of the dielectric properties found that the average dielectric

249133

constant at low frequency of about 15-30 decreases to be 10-17 at the higher frequency. The loss tangent of lower than 1 are found in all specimens at a low frequency except the glass specimens doped with 0.5-1 wt% chromium and a very low loss tangent is observed at high frequency.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความหมายของแก้ว	3
2.2 ประวัติความเป็นมาของแก้ว	3
2.3 การเกิดแก้ว (Glass Formation) และจุดของการอบแก้ว (Annealing Point)	5
2.4 หลักในการเกิดแก้ว	8
2.5 โครงสร้างของแก้ว	8
2.5.1 Glass-Forming Oxide	8
2.5.2 Glass-Modifying Oxide	9
2.5.3 Intermediate Oxide ในแก้ว	10
2.6 ชนิดของแก้ว	10
2.6.1 แก้วทางการค้า เป็นแก้วที่มีการนำมาใช้งานทั่วไป	10
2.6.1.1 ควอทซ์ (Fused Quartz)	10

2.6.1.2	แก้วอ่อนหรือแก้วโซดา (Soft Glass หรือ Soda Glass)	11
2.6.1.3	แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass)	11
2.6.1.4	แก้วตะกั่ว (Lead Glass)	11
2.6.1.5	แก้วไวคอร์ (Vycor Glass)	11
2.6.1.6	แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass)	11
2.6.1.7	แก้วที่ใช้สำหรับงานแสง (Optical Glass)	11
2.6.2	แก้วพิเศษ (Special Glass)	11
2.6.2.1	แก้วปลอดซิลิกอน (Silicon-Free Glass)	12
2.6.2.2	แก้วฟอสเฟต (Phosphate Glass)	12
2.6.2.3	แก้วที่มีตะกั่วสูง (High Lead Content Glass)	12
2.6.2.4	Fused silica glass	12
2.6.2.5	High Silica Glass	12
2.6.2.6	Glass – Ceramic	12
2.6.2.7	แก้วนิรภัย (Safety Glass)	12
2.6.2.8	แก้วเปลี่ยนสี (Photo Chromic Silicate)	13
2.7	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว	13
2.7.1	วัตถุดิบหลัก (Major Ingredients)	13
2.7.1.1	วัตถุดิบที่เป็นโครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว (Glass Former)	13
2.7.1.2	วัตถุดิบที่เป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing Agent)	13
2.7.1.3	วัตถุดิบที่ทำหน้าที่เสริมให้แก้วมีความคงทน (Stabilizer)	15
2.7.2	วัตถุดิบรอง (Minor Ingredients)	15
2.7.2.1	สารฟอกสี (Decolorizing Ingredients)	15
2.7.2.2	สารไล่ฟอง (Refining Agents)	15
2.7.2.3	สารควบคุมความหนืดหรือการไหลของแก้ว	15
2.7.2.4	สารให้สี (Colorant)	16

2.8	คุณสมบัติของแก้ว (Properties of Glass)	17
2.9	การหักเหและค่าดัชนีหักเหของแก้ว	18
2.10	โพลาไรเซชันของแสง (Polarization of Light)	22
2.10.1	โพลาไรเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization)	22
2.10.2	โพลาไรเซชันวงกลม (Circular Polarization)	22
2.10.3	โพลาไรเซชันวงรี (Elliptical Polarization)	23
2.11	สมบัติไดอิเล็กทริก ( Dielectric properties)	23
2.11.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)	23
2.11.2	การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent)	27
2.12	อุตตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรเมตรี	28
2.12.1	กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)	29
2.12.2	ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น	29
2.13	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
2.13.1	สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)	33
2.13.1.1	สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE)	33
2.13.1.2	สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิง	34
2.14	การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	34
2.14.1	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	34
2.14.2	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เพาเคอร์	36
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินวิจัย		41
3.1	การเตรียมตัวอย่างแก้ว	41
3.1.1	วัสดุและอุปกรณ์	41
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแก้ว	41
3.1.3	วิธีการเตรียมแก้ว	41

3.2 การทดลองสมบัติของแก้ว	42
3.2.1 การหาค่าความหนาแน่น (Density)	42
3.2.2 การวัดค่าดัชนีหักเห (Refractive Index)	42
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณรอยแตกและ การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	44
3.2.4 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก	44
3.2.5 การดูคลื่นแสงยูวี-วิสิเบิล	45
3.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	45
บทที่ 4 ผลและกำรอภิปรายผลการวิจัย	47
4.1 สมบัติทางกายภาพ	47
4.1.1 ลักษณะของเนื้อแก้วที่ได้จากการทดลอง	47
4.1.2 ความหนาแน่นของแก้ว (Density)	47
4.1.3 ดรรชนีหักเหของแก้ว (Refractive Index)	49
4.1.4 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	52
4.1.5 การดูคลื่นแสงยูวี-วิสิเบิล	55
4.2 โครงสร้างของแก้ว	55
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยแตกของแก้ว	55
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วด้วยเทคนิคเอ็นเอ็นจีดีสเพอร์ซีฟ สเปคโตรสโกปี (EDS)	61
4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ประวัติผู้เขียน	74

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของแก้วทางการค้า	14
2.2 แสดงสีที่เกิดขึ้นจากไอออนของธาตุในแก้ว	16
2.3 แสดงสารเคมีที่นิยมเติมลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแก้ว	17
4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของแก้วบิสมีทที่เจือด้วยโครเมียม	49
4.2 แสดงค่าดัชนีหักเหของแก้วที่ความยาวคลื่น 589.3 nm	51

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของการเกิดแก้ว	6
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวของแก้วกับอุณหภูมิ	7
2.3 แสดงภาพจำลอง (a) Silicon-Oxygen Tetrahedron (b) โครงผลึกของซิลิกา (Cristobalite) (c) โครงผลึกของแก้ว	9
2.4 Network-Modified Glass (Soda-Lime Glass)	10
2.5 แสดงการหักเหเมื่อลำแสงเดินทางผ่านอากาศไปสู่แก้ว	18
2.6 แสดงการหักเหแสงผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน	20
2.7 แสดงการวัดค่าดัชนีหักเหด้วยเครื่อง Refractometer	21
2.8 แสดงระบบการทำงานของเครื่อง Rayner Refractometer	21
2.9 กระบวนการโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ	24
2.10 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชัน	25
2.11 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ	25
2.12 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสาร ไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ	27
2.13 แสดงลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุใส	28
2.14 ภาพแสดงอำนาจแยกแยะของ SEM	32
2.15 ภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
2.16 แผนภาพแสดงสัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร	33
2.17 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ	34
2.18 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ	34
2.19 (a) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (b) ทางเดินรังสีเอ็กซ์	35
2.20 XRD patterns ของแก้วเซรามิก $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}(\text{R}_2\text{O})$ ที่เจือโครเมียม 1 และ 3%wt	37
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณเหล็กออกไซด์	37
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับปริมาณเหล็กออกไซด์	38
2.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแก้ว $2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (a) ก่อนอบ (b) หลังอบ	39

2.24 x-ray pattern ของแก้ว 40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -10Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -50MoO <sub>3</sub>	40
3.1 เครื่อง ellipsometer J.A. Woollam Co.,Inc. รุ่น alpha-SE	43
3.2 เครื่อง Refractometer KRUSS D-22976	43
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	44
3.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)	46
4.1 แสดงแก้วบิสมาทที่เจือด้วย K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ด้วยปริมาณต่างๆ	48
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแก้วและปริมาณบิสมาทที่เจือลงในแก้ว	49
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแก้วและความยาวคลื่นแสง	50
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแก้วและปริมาณบิสมาทที่เจือลงในแก้ว	51
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความถี่	52
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและปริมาณโครเมียมที่เจือในแก้ว	53
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและความถี่	53
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและปริมาณโครเมียมที่เจือในแก้ว	54
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกและปริมาณโครเมียมที่เจือในแก้ว ที่ความถี่ 1MHz	54
4.10 แสดงการส่องผ่านของแสงผ่านแก้วที่ความยาวคลื่น 300-800 nm	55
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	56
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.02 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	56
4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.04 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	57
4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.06 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	57
4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.08 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	57
4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.1 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	58
4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.2 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	58
4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.3 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	58
4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 0.5 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	59
4.20 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 1 %wt K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	59

4.21 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 2 %wt $K_2CrO_4$	60
4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 3 %wt $K_2CrO_4$	60
4.23 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 5 %wt $K_2CrO_4$	60
4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วที่เจือด้วย 10 %wt $K_2CrO_4$	61
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุที่วัดได้ด้วยเทคนิค EDS และปริมาณ $K_2CrO_4$ ที่เจือในแก้ว	62
4.26 แสดงปริมาณโครเมียมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ปริมาณ $K_2CrO_4$ ที่เจือในแก้ว	62
4.27 แสดงปริมาณธาตุในบริเวณต่างๆด้วยซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในแก้วที่เจือ $K_2CrO_4$ 10 % wt	63
4.28 แสดงปริมาณธาตุในบริเวณต่างๆด้วยซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในแก้วที่เจือ $K_2CrO_4$ 0.02 % wt	64
4.29 แสดงปริมาณธาตุในบริเวณต่างๆด้วยซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในแก้วที่เจือ $K_2CrO_4$ 0.2 % wt	65
4.30 แสดงปริมาณธาตุในบริเวณต่างๆด้วยซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในแก้วที่เจือ $K_2CrO_4$ 0.5 % wt	66
4.31 แสดงปริมาณธาตุในบริเวณต่างๆด้วยซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในแก้วที่เจือ $K_2CrO_4$ 5 % wt	67
4.32 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในแก้วที่เจือด้วย $K_2CrO_4$ ในปริมาณต่างๆ	69
4.28 แสดงค่าความหนาแน่นและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ 1 MHz ของแก้วที่เจือด้วย $K_2CrO_4$ ในปริมาณต่างๆ	70