

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สภาวิจัยแห่งชาติที่ได้พิจารณาอนุมัติให้โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ขอขอบพระคุณ คุณคงศักดิ์ ตติยานุกูล ประธานกรรมการ บริษัท คงศักดิ์อิเล็กทรอนิกส์การแพทย์และอุตสาหกรรมจำกัด ที่ให้การสนับสนุน งานวิจัยในครั้งนี้โดยการบริจาคเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานทางด้านการแพทย์ มูลค่ากว่า เจ็ดแสนบาท เพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติของทีแอลดี ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่อำนวยความสะดวกทั้งสถานที่ ครุภัณฑ์การวิจัยรวมทั้งบุคลากรทางด้านการเงินคณะที่ช่วยดำเนินการเกี่ยวกับการเบิกจ่ายงบประมาณให้เป็นไปตามระเบียบราชการ

( นางจินตนา เหล่าไพบุลย์ )

หัวหน้าโครงการวิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การผลิตและคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ของผลึกเชิงเดี่ยวลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน

โดย : ลำพูน ออกอุ่น

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา : ฟิสิกส์

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์

ศัพท์สำคัญ : ลิเทียมฟลูออไรด์ เทอร์โมลูมิเนสเซนส์ ตัวแปรกับดักพลังงานจลน์ บริดจ์แมน

ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนส์และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์ของเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ชนิดลิเทียมฟลูออไรด์แมกนีเซียม คอปเปอร์ และซิลิกอนที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการเตรียม 2 แบบ คือ วิธีการหลอมที่อุณหภูมิสูง (ให้ชื่อว่า PMCS) โดยสารหลักลิเทียมฟลูออไรด์ถูกได้บดด้วยสารเจือแมกนีเซียม 0.20 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ ซิลิกอน 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์ และวิธีการปลูกผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิคบริดจ์แมน (ให้ชื่อว่า SMCS) ใช้สารหลักลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม 0.20 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ และทำการเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของสารเจือซิลิกอนตั้งแต่ 0.00 ถึง 2.00 โมลเปอร์เซ็นต์ ความเป็นผลึกโพลีและผลึกเชิงเดี่ยวถูกยืนยันด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยพบว่าผลึกที่ได้ อยู่ในรูปผลึกโพลีและผลึกเชิงเดี่ยว ทีแอลทั้งสองชนิดมีโครงสร้างโกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนส์คล้ายคลึงกัน มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองต่อรังสีตั้งแต่ 0.10 ถึง 3 mGy. ดีทีแอลดีชนิด SMCS มีความไวในการตอบสนองต่อรังสีสูงกว่าทีแอลดีชนิด PMCS 1.3 เท่า ความเข้มข้นของปริมาณซิลิกอนที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความไวในการตอบสนองต่อรังสีของทีแอลดีชนิด SMCS มีค่ามากขึ้น การตกค้างของปริมาณแสงที่หลงเหลืออยู่ในทีแอลดีชนิด SMCS มีค่าต่ำกว่าแอลดีชนิด PMCS โครงสร้างของโกลว์เคิร์ฟและความไวในการตอบสนองต่อรังสีของทีแอล ดีชนิด SMCS มีความคงที่เมื่อถูกใช้งานซ้ำ 5 ครั้ง แต่ไม่คงที่ในทีแอลดีชนิด PMCS จากการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ใช้ในการอ่านค่าสัญญาณแสงตั้งแต่ 1 ถึง 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที พบว่าความเข้มแสงเทอร์โมลู

มีนสเซนส์ของทีแอลดีทั้งสองชนิดไม่เปลี่ยนแปลงแต่ตำแหน่งอุณหภูมิของพีคหลักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อน โดยแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบพลังงานจลน์ลำดับที่หนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามโมเดลแรนดอลล์และวิลคินส์ ค่าพารามิเตอร์กับศักย์พลังงานจลน์ของทีแอลดีชนิด PMCS และทีแอลดีชนิด SMCS มีค่า  $E$  เท่ากับ 0.7449 eV ค่า  $s$  เท่ากับ  $1.481 \times 10^6$  ต่อวินาที และ  $E$  เท่ากับ 1.6657 eV ค่า  $s$  เท่ากับ  $5.882 \times 10^{15}$  ต่อวินาที ตามลำดับ และปริมาณความเข้มข้นสารเจือซิลิกอนที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $E$  และ  $s$  มีแนวโน้มลดลง

## ABSTRACT

TITLE : FABRICATION AND THERMOLUMINESCENCE PROPERTIES OF LiF :  
Mg Cu Si SINGLE CRYSTAL  
BY : LUMPOON OOXOON  
DEGREE : MASTER OF SCIENCE  
MAJOR : PHYSICS  
CHAIR : ASSOC. PROF. JINTANA LAOPAIBOON

KEYWORDS : LiF / THERMOLUMINESCENCE / KINETIC TRAPPING PARAMETER /  
BRIDGEMAN

Two types of thermoluminescence properties and kinetic trapping parameters of LiF:Mg,Cu,Si thermoluminescence with difference production have been studied. LiF based were doped with the fixed concentration of Mg 0.2 mole%, Cu 0.05 mole% and Si 0.9 mole%, were obtained by Melting method (denoted as PMCS), single crystal form LiF based were doped with the fixed concentration of Mg 0.2 mole%, Cu 0.05 mole%, and vary with eleven different Si concentrations range from 0.00 to 2.00 mole% were obtained by Bridgeman method (denoted as SMCS), the poly crystals and single crystals were confirmed with power X-ray diffraction (XRD) techniques. Two types of difference TLD have been shown similarity of TL glow curve structure, they are show good linearity from dose response 0.10 to 3 mGy. The SMCS TLD sensitivity is higher than PMCS TLD 1.3 times, and the SMCS TLD sensitivity increase with the increasing of Si concentration. The residual signal of SMCS TLD are significantly lower than PMCS TLD. The glow curve structure and sensitivity of SMCS TLD remain stable when 5 cycles reuses but not stable in PCMS TLD. Two types of TLD did not exhibit any significant reduction in the response with increasing heating rate in the range from 1 to 20 °C /s. The glow curve structure gave the main dosimetric glow peak and the main dosimetric peak temperature( $T_m$ ) increase with the increasing of

heating rate according to the Randall and Wilkins model, the peak temperature of the glow peaks change with the heating rate are indicated as the first order of kinetics. The results of trapping parameters determined by the heating rate method  $E$  and  $s$  are  $0.744 \text{ eV}$  and  $1.481 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$  for PMCS TLD and  $1.665 \text{ eV}$  and  $5.882 \times 10^{15} \text{ sec}^{-1}$  for SMCS TLD and the increasing of Si concentration, the  $E$  and  $s$  are decrease.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาในการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า	4
<b>2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 หลักการทฤษฎี	6
2.1.1 ปฏิกิริยาการเรืองแสง	6
2.1.2 หลักการทั่วไปของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	6
2.1.3 แบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	9
2.1.4 ลิเทียมฟลูออไรด์	11
2.1.5 เครื่องวัดรังสีชนิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์โดสิมิเตอร์	12
2.1.5.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทีแอลดี	14
2.1.6 เครื่องอ่านค่าทีแอลดี	17
2.1.7 เทคนิคการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับศักย์พลังงานจลน์	18
2.1.8 กระบวนการเตรียมวัสดุ	19
2.1.8.1 กระบวนการเตรียมผลึกโพลี (Polycrystalline)	19

2.1.8.2 กระบวนการเตรียมผลึกเชิงเดี่ยว (Crystal Growth)	19
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

### สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการปลูกผลึก	26
3.1.1 สารเคมีที่ใช้	26
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง	26
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกโพลี	27
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวด้วยเทคนิค แบบบริดจ์แมน	28
3.1.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ ทางรังสี	29
3.1.6 เครื่องมือทดสอบโครงสร้างผลึก	30
3.2 กระบวนการเตรียมผลึก	31
3.2.1 กระบวนการเตรียมที่แอลดีชนิดผลึก โพลีด้วยเทคนิคการ หลอมที่อุณหภูมิสูง	31
3.2.2 กระบวนการเตรียมที่แอลดีชนิดผลึกเชิงเดี่ยว	32
3.3 การทดสอบคุณสมบัติ	33
3.3.1 ลักษณะทางกายภาพ	33
3.3.2 ระบายของผลึก	33
3.3.3 คุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนส์	33
3.3.4 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับศักพลังงานจลน์ของผลึกลิเทียม ฟลูออไรด์: แมกนีเซียม, คอปเปอร์, ซีลีเนียม	34
<b>4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย</b>	
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึก	36
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผลึก โพลี	36
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของผลึกเชิงเดี่ยว	38
4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึก	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนส์	45
4.3.1 ลักษณะ โกลว์เคิร์ฟ	45
4.3.2 ความไวต่อการตอบสนองทางรังสี	49
4.3.3 ความเป็นเชิงเส้น	50
4.3.4 การตกค้างของปริมาณแสง	53
4.3.5 การนำกลับมาใช้งานซ้ำ	54
4.4 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์ของผลึก	60
<b>5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>70</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>73</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ก ผลการทดสอบคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนส์	79
ข ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์	86
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>88</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	
ค่าพารามิเตอร์กับดัคพลังงานจลน์ของผลึกลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน	68

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างแผ่นวัดรังสีทีแอลดี (TLD Card) ซึ่งประกอบด้วยเม็ดทีแอลดี 4 เม็ดที่ ผนึกอยู่บนแผ่นโลหะที่มีบาร์โค้ทและแสดงตัวเลขวัดรังสีทีแอลดี (TLD Badge) ซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องโพลีเมอร์สำหรับบรรจุทีแอลดีการ์ดที่อยู่ใน ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์จากต่างประเทศ	2
2.1	ความไม่สมบูรณ์แบบจุดชนิดต่าง ๆ (a) vacancy (b) interstitial atom (c) small substitutinal atom (d) large substitutinal atom (e) Frenkel defect (f) Schottky defect	9
2.2	การแทนที่ cation $2^+$ ในอะตอมหลักจะทำให้ cation $1^+$ ที่อยู่ใกล้หลุดออกจาก โครงสร้างเพื่ออนุรักษ์ประจุและทำให้เกิดช่องว่างขึ้น	9
2.3	การเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ตามแบบจำลองแถบพลังงาน โดยที่วงกลมที่บ แทน อิเล็กตรอนและวงกลมกลวงแทน โฮลคู่กรที่บแทนการส่งผ่าน อิเล็กตรอนส่วนลูกศรกลวงแทนการส่งผ่าน โฮล	9
2.4	โครงสร้างผลึกของลิเทียมฟลูออไรด์ ซึ่งเป็นแบบ fcc (face center cubic) ประกอบด้วย $Li^+$ และ $F^-$ ไอออน	11
2.5	โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ	14
2.6	การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของโกลว์เคิร์ฟ	15
2.7	ผลของปริมาณรังสีที่มีผลต่อโกลว์เคิร์ฟ	15
2.8	โกลว์เคิร์ฟของลิเทียมฟลูออไรด์ซึ่งนำไปฉายรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา	16
2.9	ตัวอย่างความเป็นเชิงเส้นของ TL ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	17
2.10	แผนผังของเครื่องอ่านค่าของทีแอลดี	18
2.11	ลักษณะภาชนะบรรจุสารที่มีปลายแหลมรูปทรงที่แตกต่างกัน	20
2.12	แผนภาพการเตรียมผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิคแบบ บริดจ์แมน	21
3.1	เตาหลอมอุณหภูมิสูง 1400 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	27
3.2	เบ้าหลอมแพลตตินัม	27
3.3	เครื่องปลูกผลึกเชิงเดี่ยวของวัสดุแบบบริดจ์แมน	28

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.4	เบ้าหลอมทรงกระบอกที่ทำจากแกรไฟต์	28
3.5	เครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล (Electronic Pocket Dosimeter)	29
3.6	เครื่องฉายรังสีเอกซ์และเครื่องฉายรังสีแกมมา	29
3.7	เครื่องอ่าน TLD Harshaw รุ่น 3500 บริษัท Harshaw – Bicron	30
3.8	เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น X' Pert MPD ยี่ห้อ Philips	30
3.9	แผนภาพการปลูกผลึกโพลีด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูง	31
3.10	ลักษณะเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน	32
3.11	ลักษณะแกรเดียนท์ของอุณหภูมิของเตาหลอมแบบสองโซน ปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน	ของเครื่อง 33
4.1	ผลึกโพลีที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูง	36
4.2	ผลึกโพลีที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก	36
4.3	การอัดเม็ดผลึกโพลีให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร	37
4.4	เม็ดผลึกโพลีที่ได้หลังจากเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที	37
4.5	ผลึกที่ได้จากการทดสอบระบบการเลื่อนเตาหลอมด้วยอัตรา 2 มิลลิเมตร ต่อชั่วโมง ด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	38
4.6	ลักษณะทางกายภาพของผลึกลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ และทำการเปลี่ยนปริมาณสารเจือซิลิกอน	38
4.7	ลักษณะทางกายภาพของผลึกที่ปลูกได้เมื่อทำการตัดผลึกตามระนาบคืบ ที่เกิดขึ้น	39
4.8	แสดงการตัดผลึกที่แอลดี	39
4.9	เม็ดที่แอลดีที่ได้ มีขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร และ หนา 0.5 มิลลิเมตร	39
4.10	ระนาบของสารหลักลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ก่อนผ่านกระบวนการปลูกผลึก	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.11	ระนาบของผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยใช้เทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูง	40
4.12	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.00 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	41
4.13	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.15 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	41
4.14	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.30 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	42
4.15	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	42
4.16	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.70 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	43
4.17	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	43
4.18	ระนาบผลึกชนิคลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอนที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.20 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.19	ระนาบผลึกชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกด้วยเทคนิคแบบบริดจ์แมน	44
4.20	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกโพลีชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้น 0.20, 0.05 และ 0.9 โมลเปอร์เซ็นต์	45
4.21	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วย แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.00 โมลเปอร์เซ็นต์	46
4.22	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.15 โมลเปอร์เซ็นต์	46
4.23	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.30 โมลเปอร์เซ็นต์	46
4.24	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์	47
4.25	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.70 โมลเปอร์เซ็นต์	47
4.26	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์	47
4.27	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซีลีคอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.20 โมลเปอร์เซ็นต์	48

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.28	ลักษณะ โกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ : แมกนีเซียมคอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์	48
4.29	ความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อทำการเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของสารเจือซิลิกอน 0.00 ถึง 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์	49
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงที่ปล่อยออกมากับปริมาณรังสีเอกซ์ที่ปริมาณต่าง ๆ กันของผลึกโพลีชนิด LiF:Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.90)	50
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.00)	50
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.15)	51
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.30)	51
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.50)	51
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.70)	52
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (0.90)	52
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (1.20)	52
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับปริมาณรังสีที่ให้กับผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg (0.20), Cu(0.05), Si (1.50)	53
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจำนวนครั้งในการอ่านค่าซ้ำทั้ง 5 ครั้งกับปริมาณแสงที่อ่านได้	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงกับจำนวนครั้งที่ใช้งานซ้ำของเม็ดผลึก	54
4.41	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกโพลีซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้น 0.20, 0.05 และ 0.9 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังการใช้งานซ้ำ ๆ	55
4.42	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.00 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	56
4.43	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.15 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	56
4.44	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.30 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	57
4.45	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.50 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	57
4.46	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.70 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	58
4.47	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	58
4.48	ลักษณะโกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวซินคลิเทียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.20 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.49	ลักษณะ โกลว์เคิร์ฟของผลึกเชิงเดี่ยวชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ : แมกนีเซียมคอปเปอร์ ซิลิกอน ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ 0.20, 0.05 และ 1.50 โมลเปอร์เซ็นต์ ก่อนและหลังผ่านการใช้งานซ้ำ ๆ	60
4.50	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกโพลี บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	61
4.51	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.00) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	61
4.52	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.15) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	62
4.53	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.30) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	62
4.54	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.50) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	63
4.55	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.70) บันทึกลงด้วย โปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	63
4.56	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.90) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	64
4.57	ตำแหน่งอุณหภูมิพีกหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(1.20) บันทึกลงด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	64

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.58	ตำแหน่งอุณหภูมิพีคหลัก ( $T_m$ ) ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(1.50) บันทึกด้วยโปรแกรม CGCD เมื่อเปลี่ยนอัตราอุณหภูมิที่ให้กับเม็ดผลึก	65
4.59	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ให้กับผลึกโพลีที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	65
4.60	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.00) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	65
4.61	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.15) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	66
4.62	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.30) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	66
4.63	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.50) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	66
4.64	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.70) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	67
4.65	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(0.90) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	67
4.66	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(1.20) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	67

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.67	ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>Logarithm</i> ของ $T_m^2 / \beta$ กับ $1/T_m$ ของผลึกเชิงเดี่ยว ชนิด LiF : Mg(0.20), Cu(0.05), Si(1.50) เมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 1, 5, 7, 11 และ 17 °C/s	68

## คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

ความหมาย	สัญลักษณ์	หน่วย SI
Activation energy	$E$	eV
Frequency factor	$s$	1/s
ตำแหน่งอุณหภูมิพิคหลัก	$T_m$	K
อัตราความร้อนที่ให้กับเม็ดที่แอลดี-		
ขณะอ่านปริมาณแสง	$\beta$	K/s
ค่าคงที่ของ โบลต์ซมันน์	$k$	มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23}$ J/K