

การพัฒนาผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF CESIUM STRONTIUM IODIDE CRYSTALS FOR RADIATION DETECTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื่อมสตรอนเทียมไอโอดีนเพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี
โดย	นายวศิน ชิวจรัสสกุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณี แสงแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุสิตพงศ์ วงศ์แสง)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณี แสงแก้ว)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชัยชญา ธนชยานนท์)	

วศิน ชีวรักษ์สกุล : การพัฒนาผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี. (DEVELOPMENT OF CESIUM STRONTIUM IODIDE CRYSTALS FOR RADIATION DETECTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พรณี แสงแก้ว

การตรวจวัดรังสีนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการตรวจวัดรังสี และอุปกรณ์วัดรังสีมีส่วนประกอบที่สำคัญคือหัววัดรังสี และหัววัดรังสีชนิดผลึกเรืองแสงเป็นที่นิยมใช้งานเนื่องด้วยมีประสิทธิภาพการวัดรังสีที่ดีแต่ยังมีราคาที่ยังค่อนข้างแพง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาผลึกเพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี ด้วยวิธีการปลูกแบบบริดจ์แมน-สโตกบาร์เกอร์ที่ปรับปรุงขึ้นเอง โดยศึกษาการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของสตรอนเชียมไอโอไดด์ร้อยละ 1, 3 และ 5 จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลึกและคุณสมบัติทางแสงของผลึกอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก คุณภาพผลึก และคุณสมบัติทางแสง พบว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนสตรอนเชียมไอโอไดด์เพิ่มขึ้นในปริมาณเล็กน้อยนี้ โครงสร้างผลึกและคุณภาพความเป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือเกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัดในผลึกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าคงที่แลตทิซเฉลี่ยเท่ากับ 4.4647 ± 0.0707 , 4.5156 ± 0.0370 และ 4.4574 ± 0.0958 Å ทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัดในผลึกเป็น -2.23%, -1.12% และ -2.39% และขนาดผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยคือ 16.47 ± 0.89 , 16.62 ± 0.93 และ 16.72 ± 1.15 nm ตามลำดับ โดยรวมถือว่าไม่ส่งผลเสียต่อโครงสร้างผลึกและคุณภาพความเป็นผลึกเมื่อผสมสตรอนเชียมปริมาณเล็กน้อย แต่ว่าสตรอนเชียมที่ผสมเข้าไปช่วยทำให้แสงที่เปล่งออกมาจากผลึกมีความเข้มของการเปล่งแสงสูงมากขึ้น และแสงมีความยาวคลื่นที่เพิ่มมากขึ้นเป็นประมาณ 595-600 nm สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีแกมมาของผลึกขนาด $f 1 \text{ cm.} \times 1 \text{ cm.}$ พบว่า ผลึกที่มีอัตราส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 (หนา 0.5 cm.) มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 78.92, 80.54 และ 61.19 และมีความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 76.72, 70.62 และ 47.62 ตามลำดับ ของการตรวจวัดรังสีพลังงาน 122 keV และประสิทธิภาพการวัดรังสีลดลงในกรณีการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV เท่ากับ 22.78, 26.10 และ 14.50 ตามลำดับ

สาขาวิชา เทคโนโลยีนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170507121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD: Scintillator crystal, Strontium iodide, Cesium iodide, Cesium-strontium iodide, Radiation detection

Wasin Chevajarassakul : DEVELOPMENT OF CESIUM STRONTIUM IODIDE CRYSTALS FOR RADIATION DETECTION. Advisor: Asst. Prof. PHANNEE SAENGKAEW, Dr.rer.nat.

The scintillation detectors are one of the most popular utilization because of their high suitable properties and radiation-measurement efficiency but they are quite expensive. Therefore, the development of scintillators is the attractive topic for long time. This work aims to investigate the new one of cesium strontium iodide. There are 3 different compositions of cesium iodide and strontium iodide of 99:1, 97:3 and 95:5. As the result of crystal analysis, the crystal structure and crystalline quality are slightly worse with the increased composition of strontium iodide due to the compressive strain in the grown crystal samples by decreasing their lattice parameters as 4.4647 ± 0.0707 , 4.5156 ± 0.0370 and 4.4574 ± 0.0958 Å. With the increased strontium composition, the crystal size was slightly bigger from 16.47 ± 0.89 , 16.62 ± 0.93 to 16.72 ± 1.15 nm, respectively. However, higher amount of strontium could enhance the optical properties with higher intensity and longer wavelength of 595-600 nm of light emission. To investigate the efficiency of radiation detection of 122 keV from Co-57, the crystals with a composition of 99:1, 97:3 and 95:3 have the intrinsic efficiency of 78.92, 80.54 and 61.19 and the energy resolutions of 76.72, 70.62 and 47.62, respectively. In case of the gamma spectroscopy of 662 keV from Cs-137, the crystals have the intrinsic efficiency of 22.78, 26.10 and 14.50, respectively.

Field of Study: Nuclear Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.พรรณี แสงแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและแนะนำ
แนวทางการทำงานวิจัย สนับสนุน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อ. เดโช ทองอร่าม และพงษ์ยุท ศรีพลอย คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การแนะนำและช่วยเหลือในการตรวจวัดประสิทธิภาพรังสี

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว นุชจรี คิวสกุลกาญจน์ และนครินทร์ สิงคิบุรินทร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจ
วิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติทางแสงของผลึก

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมสำหรับการทำงาน

สุดท้ายขอขอบพระคุณทุน 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ภาค
การศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2562 รุ่นที่ 46 ครั้งที่ 2/2563 ในการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

วศิน ชิวจรัสสกุล



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 คุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation Detector) และ อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photodetector).....	6
2.1.1 ผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ (Inorganic crystal scintillators).....	7
2.1.2 กลไกกระบวนการของซินทิลเลชัน (Mechanism of the scintillation process).....	7
2.1.3 หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube).....	10

2.1.4 โฟโตไดโอด (Photodiode).....	11
2.2 เทคนิคการปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger method)	12
2.2.1 กระบวนการปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	12
2.2.2 ส่วนประกอบของระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	13
2.2.2 การเกิดผลึก (Crystallization).....	14
2.2.3 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในผลึกที่ปลูกขึ้น (Crystal impactions)	15
2.3 เทคนิคการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของผลึก	17
2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD).....	17
2.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)...	20
2.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมแสงด้วยการส่องผ่านแสงเหนือม่วงและแสงย่านที่มองเห็นได้ (Ultraviolet and visible spectrophotometry, UV-VIS spectrophotometry)	21
2.4 เทคนิคการตรวจสอบศักยภาพในการตรวจวัดรังสีของผลึก	23
2.4.1 ประสิทธิภาพในการวัดรังสี (Detection efficiency).....	23
2.4.2 ความสามารถในการแยกพลังงานของรังสี (Energy resolution)	25
บทที่ 3	27
การปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์ด้วยเทคนิคบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	27
3.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการปลูกผลึก.....	27
3.2 การออกแบบเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	29
3.2.1 ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน.....	29
3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ	31
3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลเพื่อใช้หาเกรนเดียนท์ของอุณหภูมิ.....	32
3.2.4 ระบบสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซ	32

3.3 การออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก	33
3.3.1 การประกอบอุปกรณ์ผลึกวัดรังสี.....	33
3.3.2 ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา	34
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	35
4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก	35
4.1.1 การทดสอบผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียร	36
4.1.2 การหาเกรนเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient).....	36
4.2 การทดลองปลูกผลึก	43
4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	43
4.2.2 การเตรียมสารเพื่อการทดลองปลูกผลึก	43
4.2.3 การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์	44
4.2.4 ผลการปลูกผลึก.....	46
4.3 การตรวจสอบคุณภาพและคุณสมบัติทางแสงของผลึก	51
4.3.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึก	52
4.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของผลึก	55
4.4 การทดลองและเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการวัดปริมาณรังสีกับหัววัดรังสี.....	65
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย	75
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย	76
5.3 ข้อเสนอแนะ	79
ภาคผนวก.....	80
ภาค ก.	81
คุณสมบัติของขดลวดความร้อน	81
ภาคผนวก ข.	84

คุณสมบัติของอิฐทนไฟ	84
ภาคผนวก ค.	85
ข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี.....	85
ภาคผนวก ง.....	90
ข้อมูลการกำหนดเฉพาะของหลอดทวิคุณแสง.....	90
บรรณานุกรม.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	97



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติทั่วไปของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์.....	10
ตารางที่ 4.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณต่ำหรือบริเวณสูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิบริเวณ ปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 1 – 3	39
ตารางที่ 4.2 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำและอุณหภูมิบริเวณสูงของการทดลองที่ 1 – 3	40
ตารางที่ 4.3 อัตราการปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 1 – 3.....	40
ตารางที่ 4.4 ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณต่ำหรือบริเวณสูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิบริเวณ ปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 4 - 5.....	42
ตารางที่ 4.5 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำและอุณหภูมิบริเวณสูงของการทดลองครั้งที่ 4 – 5.	43
ตารางที่ 4.6 อัตราการปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 4 – 5.....	43
ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนปริมาณของสารตั้งต้นและสารเจือที่ใช้ในการปลูกผลึก	44
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของสารตั้งต้นและสารเจือที่ใช้ในการปลูก.....	44
ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขการกำหนดอุณหภูมิในแต่ละบริเวณเพื่อใช้ในการปลูกผลึก	45
ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขการกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นและการลดลงของอุณหภูมิเพื่อใช้ในการปลูกผลึก	46
ตารางที่ 4.11 ขนาดผลึก CsSrI ₃ (TI) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	55
ตารางที่ 4.12 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI ₃ (TI) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	64
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยก พลังงานของรังสีจากแหล่งกำเนิด Co-57 ของผลึก CsSrI ₃ (TI) ทั้งสามที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	74
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยก พลังงานของรังสีจากแหล่งกำเนิด Cs-137 ของผลึก CsSrI ₃ (TI) ทั้งสามที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน	74

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ระบบหัววัดซินทิลเลชัน (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015).....	6
ภาพที่ 2.2 กลไกการปลดปล่อยแสงซินทิลเลชันภายในซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ (Ahmed, 2015).....	8
ภาพที่ 2.3 การปลดปล่อยสเปกตรัมของ NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) และ Anthracence ซึ่งเปรียบเทียบสเปกตรัมที่ได้จาก PMT จำนวน 2 ชั้น (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015).....	9
ภาพที่ 2.4 หลักการทำงานของหลอดทวีคูณแสง	11
ภาพที่ 2.5 (A) โครงสร้างอย่างง่ายของโฟโตไดโอด (B) การกระจายตัวของประจุ และ (C) โครงสร้างของ PIN ที่เหมือนจริง (Hui, 2020)	12
ภาพที่ 2.6 ระบบการปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (อิมรอน วาเต็ง, 2560)	13
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของสารตั้งต้น CsI, SrI ₂ และสารเจือ Tl	28
ภาพที่ 3.2 แผนผังส่วนประกอบของเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (อิมรอน วาเต็ง, 2560).....	28
ภาพที่ 3.3 แผนภาพวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมผลึก (อิมรอน วาเต็ง, 2560).....	31
ภาพที่ 3.4 ระบบเตาหลอมผลึกโดยแบ่งเป็น 3 บริเวณ	32
ภาพที่ 3.5 ระบบทั้งหมดที่ใช้ในการปลูกผลึก	33
ภาพที่ 3.6 การประกอบผลึกที่ปลูกได้เข้ากับหลอดทวีคูณแสง (อิมรอน วาเต็ง, 2560)	34
ภาพที่ 3.7 ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีโดยใช้ผลึกที่ปลูกได้เป็นหัววัดรังสี (อิมรอน วาเต็ง, 2560).....	34
ภาพที่ 4.1 ตำแหน่งของการตรวจวัดอุณหภูมิในแต่ละบริเวณ	35
ภาพที่ 4.2 กราฟผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก	36
ภาพที่ 4.3 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI ₃ (Tl) ครั้งที่ 1. 37	
ภาพที่ 4.4 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI ₃ (Tl) ครั้งที่ 2. 37	

ภาพที่ 4.5 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI₃(Tl) ครั้งที่ 3. 38

ภาพที่ 4.6 กราฟช่วงการลดลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI₃(Tl) ครั้งที่ 1..... 38

ภาพที่ 4.7 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI₃(Tl) ครั้งที่ 4. 41

ภาพที่ 4.8 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI₃(Tl) ครั้งที่ 5. 42

ภาพที่ 4.9 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 70:30 หลังปลูกเสร็จ..... 47

ภาพที่ 4.10 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 70:30 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี..... 47

ภาพที่ 4.11 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 95:5 หลังปลูกเสร็จ..... 48

ภาพที่ 4.12 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 97:3 หลังปลูกเสร็จ..... 49

ภาพที่ 4.13 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 99:1 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี..... 49

ภาพที่ 4.14 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 95:5 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี
..... 50

ภาพที่ 4.15 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 97:3 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี
..... 50

ภาพที่ 4.16 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 99:1 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี
..... 51

ภาพที่ 4.17 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน หลังจากการตัดและขัด (ซ้าย) 99:1 (กลาง)
97:3 และ (ขวา) 95:5 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี 51

ภาพที่ 4.18 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน
95:5 52

ภาพที่ 4.19 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน
97:3..... 53

ภาพที่ 4.20 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน
99:1 53

ภาพที่ 4.21 กราฟการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก
CsSrI₃(Tl) ทั้งสามอัตราส่วนที่ต่างกัน 54

ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 95:5	56
ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 97:3	56
ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 99:1	57
ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 95:5	57
ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 97:3	58
ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 99:1	58
ภาพที่ 4.28 สเปกตรัมเทียบผลวิเคราะห์จากเทคนิคการกระตุ้นด้วยแสงของผลึก CsSrI ₃ (TL) ทั้งสามอัตราส่วนแตกต่างกัน	59
ภาพที่ 4.29 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 95:5	60
ภาพที่ 4.30 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 97:3	60
ภาพที่ 4.31 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 99:1	61
ภาพที่ 4.32 กราฟการเปรียบเทียบการส่องผ่านแสงในผลึก CsSrI ₃ (TL) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	61
ภาพที่ 4.33 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 95:5	62
ภาพที่ 4.34 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 97:3	62
ภาพที่ 4.35 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI ₃ (TL) อัตราส่วน 99:1	63
ภาพที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI ₃ (TL) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	63
ภาพที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำของผลึก CsSrI ₃ (TL) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	64
ภาพที่ 4.38 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างจากผลึกวัดรังสี CsSrI ₃ (TL) ที่มีอัตราส่วน 95:5	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำรังสีมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร ด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น เหตุผลที่มีการนำรังสีมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการนำรังสีมาใช้ประโยชน์นั้นต้องมีการคำนึงถึง หลักความปลอดภัยในการปฏิบัติงานและความเหมาะสมกับงานที่ใช้ เพราะเนื่องจากรังสีสามารถทำให้เกิดอันตรายกับมนุษย์ได้ หากจะตรวจวัดรังสีก็ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีหัววัดที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดรังสีเพื่อความปลอดภัยด้วย ดังนั้น หากต้องปฏิบัติงานกับการใช้รังสีแล้ว ก็ต้องคำนึงถึงประเภทของหัววัดรังสีซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพต่อการตรวจวัดรังสีด้วย

หัววัดรังสีชนิดเรืองแสง (Scintillation detector) ถือเป็นหัววัดรังสีที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดรังสีที่นิยมมากเนื่องจากเป็นหัววัดรังสีที่ค่อนข้างมีความไว (Sensitive) ต่อรังสีมาก โดยส่วนประกอบที่สำคัญก็คือ ผลึกวัดรังสี โดยส่วนใหญ่แล้วผลึกที่นิยมใช้ทำเป็นหัววัดรังสี คือผลึกวัดรังสีประเภทสารอนินทรีย์ที่เป็นผลึกเดี่ยวกลุ่มอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) เช่น ซีเซียมไอโอไดด์ (Cesium iodide, CsI) และโซเดียมไอโอไดด์ (Sodium iodide, NaI) เป็นต้น โดยผลึกที่มีคุณสมบัติในการวัดรังสีได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลายประการ เช่น คุณสมบัติการเกิดการเปล่งแสงวับในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม คุณสมบัติการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสง เป็นต้น

พบว่าผลึกสตรอนเชียมไอโอไดด์ (Strontium iodide, SrI₂) เป็นผลึกที่มีคุณสมบัติในการเปล่งแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นที่ 400-440 นาโนเมตร เมื่อเจือด้วยสารประกอบต่างชนิดกัน โดยผลึกสตรอนเชียมไอโอไดด์มีความสามารถในการเปล่งแสงได้ราวประมาณ 110,000 โฟตอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และด้วยการเจือด้วยสารเทลเลียมช่วยทำให้คุณสมบัติทางแสงของผลึกสตรอนเชียมไอโอไดด์ดีขึ้น (Hawrami, Ariesanti, Buliga, & Burger, 2020) และมีความสามารถในการแยกพลังงานในช่วงร้อยละ 4 ถึง 7 ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลึกสตรอนเชียมไอโอไดด์มีข้อเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือ มีความไวต่อความชื้นจากอากาศมาก ซึ่งหากผลึกเกิดการสัมผัสกับอากาศชื้นจะทำให้ผลึกมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดรังสีน้อยลง (Kawai, Sakuragi, & Hashimoto, 2016) แต่อย่างไรก็ตามยังคงถือได้ว่าเป็นผลึกที่มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นซินทิลเลเตอร์สำหรับใช้เพื่อ

วัตรังสี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจทำการศึกษาและทดลองปลูกผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดใหม่จากสารประกอบ 2 ชนิด คือ ซีเซียมไอโอไดต์และสตรอนเซียมไอโอไดต์ เพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการตอบสนองในการตรวจวัดรังสีได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการพัฒนาการปลูกผลึก CsSrI_3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสัดส่วนของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการปลูกผลึก CsSrI_3
2. ตรวจสอบคุณภาพของผลึก CsSrI_3 ที่ปลูกได้ ได้แก่ คุณลักษณะโครงสร้าง คุณภาพความเป็นผลึก และคุณสมบัติเชิงแสง
3. ตรวจสอบศักยภาพในการตรวจวัดรังสีของผลึก CsSrI_3 ที่ปลูกได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ปลูกผลึก CsSrI_3 จากเตาหลอม โดยวิธีการของบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบวิธีการควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ
3. ตรวจสอบคุณภาพและคุณสมบัติเชิงแสงของผลึก CsSrI_3 ที่ปลูกได้
4. ทดลองและเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการวัดปริมาณรังสีกับหัววัดรังสี เพื่อหาประสิทธิภาพของของผลึก CsSrI_3 ที่ปลูกได้
5. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางในการศึกษาค้นคว้าวิจัยในการปลูกและตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของผลึก CsSrI_3 โดยวิธีการปลูกผลึกของบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบวิธีการควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. (Jitpukdee, Wongsawaeng, & Punnachaiya, 2011) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่เจือด้วยทลเลียม (Thallium doped cesium iodide, CsI:TI) ด้วยการปลูกผลึกด้วยวิธีการของบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ด้วยวิธีการควบคุมแกรเดียนท์อุณหภูมิ โดยใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ อุณหภูมิในการปลูกที่ 400 ถึง 1200 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้า 4 กิโลวัตต์ และขนาดของเตาปลูก 45x45x39 ลูกบาศก์-เซนติเมตร จากนั้นได้ทำการปลูกผลึกโดยการตั้งค่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างโซนอุณหภูมิสูง และโซนอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ได้อัตราการปลูกผลึกที่สมบูรณ์แบบ โดยอัตราการปลูกผลึกคือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลื่อนของแกรเดียนท์อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสต่อชั่วโมง และแกรเดียนท์อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร จากการทดลองพบว่าได้อัตราการปลูกผลึกคือ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เมื่อปลูกผลึกได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาสเปกตรัมของพลังงานรังสีแกมมาที่ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าผลึกที่ปลูกได้มีความสามารถในการแยกพลังงานที่ร้อยละ 7.19 ของผลึกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x10 ตารางมิลลิเมตร และร้อยละ 8.17 ของผลึกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22x22 ตารางมิลลิเมตร

2. (Cherepy et al., 2009) ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผลึกสตรอนเทียมไอโอไดด์ที่เจือด้วยยูโรเปียม (Europium doped strontium iodide, SrI₂:Eu) และออกแบบเครื่องวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาโดยใช้ผลึกที่ปลูกได้ภายในควอตซ์ โดยวิธีของบริดจ์แมนแบบแนวตั้ง ก่อนที่ผลึกจะถูกนำไปใช้เพื่อออกแบบเครื่องวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา สารตั้งต้นที่ใช้ในการปลูกผลึก และผลึกที่ปลูกได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ เทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง (Differential scanning calorimetry, DSC) เทคนิคการวิเคราะห์วิเคราะห์ความเสถียรของผลึกเมื่อได้รับความร้อน (Thermal gravimetric analysis, TGA) และเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้น SrI₂ และ EuI₂ คือ 534 และ 541 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งสารตั้งต้นทั้งสองสามารถเข้ากันได้ดี นอกจากนี้ยังนำผลึกที่ปลูกได้ไปตรวจวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 และ 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าผลึกมีความสามารถในการแยกพลังงานเท่ากับ 2.6% และ 7.6% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำผลึกที่ปลูกได้ไปเทียบกับผลึกแลนทานัมโบรไมด์ที่เจือด้วยซีเลียม (Cerium doped lanthanum

bromide, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ และโซเดียมไอโอดด์ที่เจือด้วยเทลเลียม (Thallium doped sodium iodide, NaI:Tl) จากเชิงการค้า

3. (van Loef et al., 2009) ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผลึกและคุณสมบัติการเปล่งแสงของสตรอนเชียมไอโอดด์ (SrI_2) ด้วยการเจือสารร่วมสองชนิดได้แก่ การเจือด้วยยูโรเพียม (Eu) และการเจือด้วยซีรีเนียมและโซเดียม (Ce/Na) โดยใช้วิธีการปลูกของบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง (Vertical Bridgman technique) ซึ่งจากการปลูกผลึกได้ใช้อัตราการปลูกที่ 5 – 30 มิลลิเมตรต่อวัน และจากการตรวจสอบคุณสมบัติการเปล่งแสงด้วยการกระตุ้นด้วยรังสี (Radioluminescence) พบว่าผลึก $\text{SrI}_2(0.5\% \text{ Ce/Na})$ มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นที่ 404 และ 435 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า มีสิ่งบกพร่องหรือสิ่งเจือปนของ Ce^{3+} ที่มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร และผลึก $\text{SrI}_2(0.5\% \text{ Eu})$ มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นที่ 435 นาโนเมตร และจากการตรวจวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่ามีประสิทธิภาพของการวัดเท่ากับ 21% สำหรับผลึก $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ และ 23% สำหรับผลึก $\text{SrI}_2(\text{Ce/Na})$ นอกจากนี้พบว่ามีค่ากำลังแยกพลังงานที่ 3% สำหรับผลึก $\text{SrI}_2(5\% \text{ Eu})$ และ 6.4% สำหรับผลึก $\text{SrI}_2(0.5\% \text{ Ce/Na})$

4. (Raja et al., 2018) ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผลึกสตรอนเชียมไอโอดด์ที่เจือด้วยยูโรเพียม โดยใช้สารตั้งต้นสตรอนเชียมไอโอดด์ และยูโรเพียมไอโอดด์ที่ถูกกรองด้วยระบบควอดซ์ที่ถูกออกแบบขึ้น จากการใส่แผ่นกรองระดับไมครอนลงไป ผลึก $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ ถูกปลูกด้วยวิธีของบริดจ์แมนแบบปรับปรุงชนิดแนวตั้ง จากนั้นนำผลึกที่ปลูกได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง และการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าผลึกมีการปลดปล่อยความยาวคลื่นที่ 433 นาโนเมตร จากการกระตุ้นด้วยแสง และมีการปลดปล่อยความยาวคลื่นที่ 435 นาโนเมตร จากการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ได้นำผลึกไปวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662, 112 และ 1332 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ พบว่ามีความสามารถในการแยกพลังงานที่ร้อยละ 4.6, 7.5 และ 9.8 ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้ทราบว่า วิธีการใช้แผ่นกรองที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคมีตั้งต้น ก่อนทำการปลูกผลึกจะทำให้ได้ผลที่ดี เมื่อเทียบกับการทดลองก่อนของตนเอง

5. (Yao et al., 2019) ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอดด์ (Cesium strontium iodide, CsSrI_3) ที่เจือด้วยร้อยละความเข้มข้น 3, 5 และ 7 ของยูโรเพียม ด้วยวิธีการปลูกโดยกำหนดขอบการเติบโตเลี้ยงฟิล์ม (Edge-defined film-fed growth method, EFG method)

จากการหลอมเหลว ซึ่งมีการให้ความร้อนถึง 660 องศาเซลเซียสในการปลูกครั้งนี้ ทำให้ได้ผลึก $\text{CsSr}_{1-x}\text{Eu}_x\text{I}_3$ โดยที่ x คือ 0.03, 0.05 และ 0.07 จากนั้นนำผลึกที่ปลูกได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าแพทเทิร์นของผลึกที่มีความเข้มข้นของยูโรเพียมที่ 7% มีแพทเทิร์นของสารแปลกปลอมอื่น ๆ เช่น ออกซิเจนจากบรรยากาศ เป็นต้น น้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์ผลึกด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่าผลึกมีการปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่น 451, 452 และ 454 นาโนเมตร และพบว่ามีค่าคงที่การสลายตัว (decay constant) ของผลึกที่ 1.32, 1.35 และ 0.73 นาโนวินาที ตามลำดับของการเพิ่มความเข้มข้นของยูโรเพียม



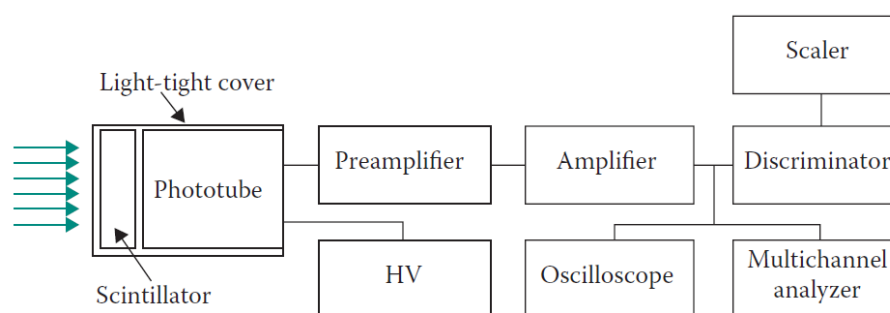
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation Detector) และ อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photodetector)

ซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) คือวัสดุที่เป็นได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สามารถเปล่งแสงวับ (Scintillation) ได้จากการที่รังสีก่อไอออนเดินทางผ่าน ในปีค.ศ. 1903 วิลเลียม ครูกส์ (William Crookes) ได้นำวัสดุของแข็งมาใช้ทำเป็นหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันเป็นครั้งแรกในการตรวจวัดปริมาณรังสีที่มาจากอนุภาคแอลฟาโดยการฉายด้วยแผ่นที่ทำมาจากวัสดุของแข็งคือแผ่นซิงค์ซัลไฟด์ (Zinc sulfide screen, ZnS screen) และต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีการในการวัดการเปล่งแสงวับที่มาจากซินทิลเลเตอร์ โดยในช่วงแรกแสงวับได้ถูกนับจากการใช้กล้องจุลทรรศน์ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่มีความแม่นยำ และใช้เวลายาวนานมาก ดังนั้นวิธีการวัดปริมาณรังสีโดยการใช้หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันนี้จึงถูกทิ้งไว้เป็นเวลามากกว่า 30 ปี และถูกนำมาใช้ใหม่อีกครั้งเมื่อสมัยที่ความรู้ทางไฟฟ้าก้าวหน้าแล้วจากการใช้วิธีนับวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์มาเป็นการใช้ตัวขยายสัญญาณของแสง (Amplification) แทน

จำนวนของแสงที่ออกมาจากซินทิลเลเตอร์นั้นมีจำนวนน้อยมาก ดังนั้นจำนวนของแสงที่ออกมาจึงต้องถูกขยายสัญญาณก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณ การขยายสัญญาณ คือ การเพิ่มแบบทวีคูณของแสงวับ สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) ซึ่งภาพที่ 1 แสดงให้เห็นถึงระบบการทำงานของหัววัดโดยการใช้ซินทิลเลเตอร์



ภาพที่ 2.1 ระบบหัววัดซินทิลเลชัน (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015)

2.1.1 ผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ (Inorganic crystal scintillators)

โดยปกติแล้วการจัดแบ่งชนิดของผลึกซินทิลเลเตอร์นั้น จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดซึ่งได้แก่ สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ และแก๊ส แต่ในการวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงเพียงผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ชนิดเดียวเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์คือ ผลึกของโลหะชนิดแอลคาไลด์ (Alkali) ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของสารเจือปน (Impurity) เล็กน้อย ตัวอย่างเช่น โซเดียมไอโอไดด์เจือด้วยเทลเลียม (Sodium iodide doped thallium, NaI:Tl) ซีเซียมไอโอไดด์เจือด้วยเทลเลียม (Cesium iodide doped iodide, CsI:Na) แคลเซียมไอโอไดด์เจือด้วยโซเดียม (Calcium iodide doped sodium, CaI:Na) ลิเทียมไอโอไดด์เจือด้วยยูโรเพียม (Lithium iodide doped europium, LiI:Eu) และแคลเซียมฟลูออไรด์เจือด้วยยูโรเพียม (Calcium iodide doped europium, CaI:Eu) เป็นต้น ซึ่งสารที่ถูกนำมาเจือปนนั้นมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงของผลึก ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลึกซินทิลเลเตอร์มีดังต่อไปนี้

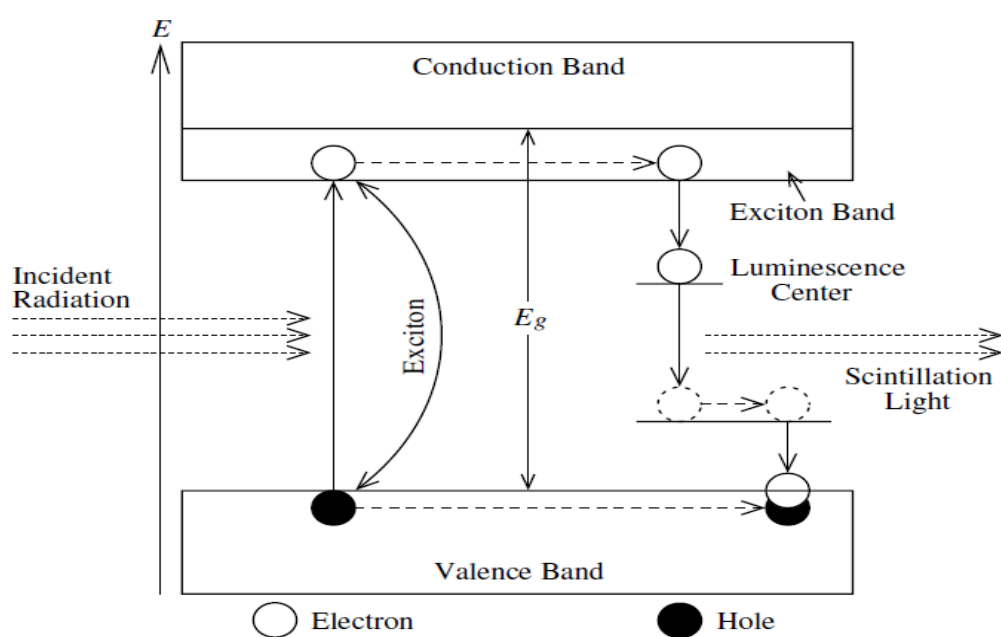
- 1) สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์ของรังสีตกกระทบไปเป็นแสงเรืองทันทีได้ในสัดส่วนสูง
- 2) อัตราปริมาณการเปล่งแสงได้ (light yield) คือ จำนวนโฟตอนหรือแสงที่เปล่งออกมาต่อพลังงานที่สูญเสียไป ต้องเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่วัสดุได้รับ
- 3) เกิดการเรืองแสงด้วยระยะเวลาอันสั้น
- 4) เนื้อวัสดุสม่ำเสมอ (homogeneous) และมีคุณภาพเชิงแสง (optical quality) ที่ดี

2.1.2 กลไกกระบวนการของซินทิลเลชัน (Mechanism of the scintillation process)

การเรืองแสง (Luminescence) ของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์เกิดมาจากการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมซึ่งระดับของพลังงานจะถูกแสดงเป็นเส้นที่ไม่ต่อเนื่องกัน แสดงให้เห็นในภาพที่ 2.2 ในสถานะพื้น (Ground state) ของผลึก คือแถบอนุญาตที่อยู่ชั้นบนสุด (Allowed band) ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานเต็มอยู่แล้ว เรียกแถบพลังงานนี้ว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบอนุญาตต่อไป คือ แถบพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ภายในแถบเลยเรียกว่า แถบคอนดักชัน (Conduction band) อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเพียงพอจากรังสีที่เคลื่อนที่เข้ามาทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปแถบคอนดักชัน อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจะทำให้เกิดช่องว่าง (Hole) ขึ้นภายในแถบวาเลนซ์ บางครั้งพลังงานที่ให้กับอิเล็กตรอนก็ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปยังชั้นของแถบคอนดักชันได้ นั่นเป็นเพราะอิเล็กตรอนยังคงถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตกับช่องว่าง

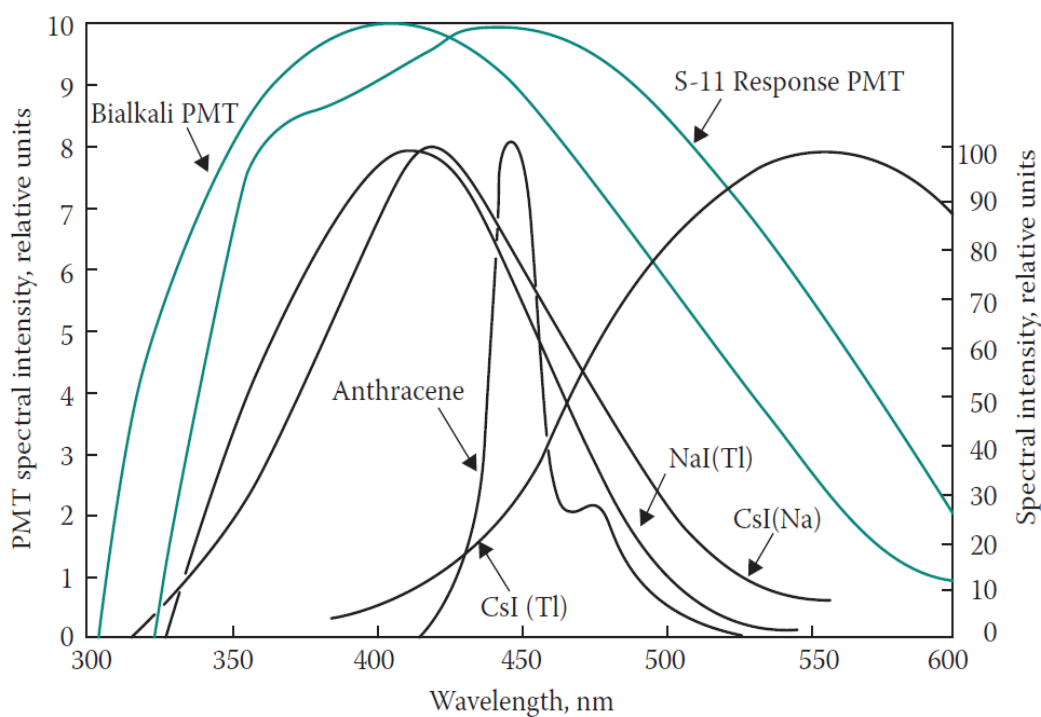
ภายในแถบวาเลนซ์อยู่ คู่ของอิเล็กตรอนและช่องว่าง (Electron-hole pair) ดังกล่าวถูกเรียกว่า เอ็กซิตอน (Exciton) ซึ่งเอ็กซิตอนมีลักษณะเหมือนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ แต่อยู่ต่ำกว่าแถบคอนดักชัน

นอกจากแถบเอ็กซิตอนแล้ว ยังมีสถานะพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันอันเนื่องมาจากการเจือสารเจือปนลงไปในผลึก เหตุผลที่สำคัญในการเจือสารเจือปนลงไปในนั้นคือ การสร้างสถานะโดยอะตอมตัวกระตุ้นเช่น แทเลียม เป็นต้น โดยอะตอมตัวกระตุ้นนี้จะยังคงอยู่ในสถานะพื้นหรือในสถานะกระตุ้น ซึ่งการยกระดับขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้นนี้เองเป็นผลของการดูดซับแสง (Photo absorption) หรือการจับเอ็กซิตอน หรือการจับอิเล็กตรอนและช่องว่างอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมที่เจือจากสถานะกระตุ้นไปสู่สถานะพื้นนั้นทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงในเวลาเพียง 10^{-8} วินาที ถ้าแสงนั้นมีความยาวคลื่นในช่วงแสงที่มองเห็นได้ แสงนั้นจะกลายเป็นการเปล่งแสงวับขึ้น



ภาพที่ 2.2 กลไกการปลดปล่อยแสงซินทิลเลชันภายในซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ (Ahmed, 2015)

แสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยซินทิลเลเตอร์ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมตัวกระตุ้นที่เจือในผลึก ดังนั้นพลังงานจากรังสีที่มากกระทบส่วนมากที่ผ่านแลตทิซของผลึกแล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานระดับพลังงานความร้อนขึ้นที่ส่งผลทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้นโดยอะตอมของตัวกระตุ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานถูกถ่ายเทจากผลึกสู่อะตอมสารเจือสำหรับในการทำให้เกิดการเรืองแสงวับในย่านที่ตามองเห็น โดยที่ ปริมาณความเข้มแสงหรืออัตราการเปล่งแสงออกมาและความยาวคลื่นของแสงที่ปลดปล่อยออกมาถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับซินทิลเลเตอร์ แสงที่เปล่งเรืองออกมาจากผลึกจะถูกประมวลผลนับวัด โดยจะนับผลลัพท์เป็นจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ที่ผลิตมาจากหลอดทวีคูณแสงที่ใช้ประกบกับผลึกตัวรังสี โดยที่จำนวนนี้จะส่งผลต่อขนาดความสูงของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ระบบนับวัดสัญญาณของระบบตรวจวัดรังสี



ภาพที่ 2.3 การปลดปล่อยสเปกตรัมของ NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) และ Anthracene ซึ่งเปรียบเทียบสเปกตรัมที่ได้จาก PMT จำนวน 2 ชิ้น (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015)

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติทั่วไปของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์

ชนิดของผลึก	ความ ถ่วงจำเพาะ	ความยาวคลื่น ที่ปลดปล่อย (nm)	เวลาในการปลดปล่อย (μ s)	ค่าเฉลี่ยของแสง ที่ได้ (photons/MeV)
Alkali Halides				
NaI(Tl)	3.67	415	0.23	38,000
CsI(Tl)	4.51	540	0.68 (64%), 3.34 (36%)	65,000
CsI(Na)	4.51	420	0.46, 4.18	39,000
LiI(Eu)	4.08	470	1.4	11,000
Other Slow Inorganics				
BGO	7.13	480	0.30	8,200
CdWO ₄	7.90	470	1.1 (40%), 14.5 (60%)	15,000
ZnS(Ag)	4.09	236	0.2	-

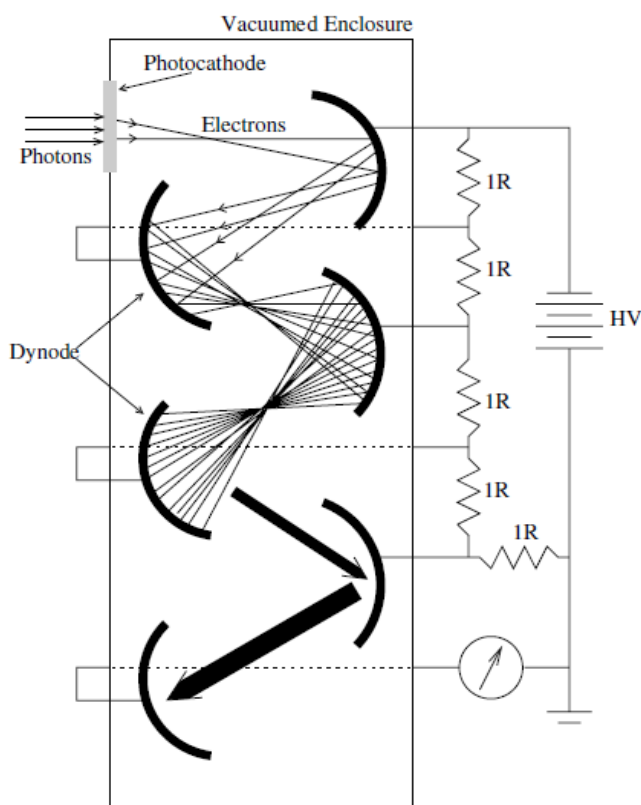
อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

แสงที่ได้โดยซินทิลเลเตอร์สามารถวัดได้โดยจำนวนเฉลี่ย ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและรู้จักกันเป็นอย่างดีก็คือ หลอดทวิคูณแสงและโฟโตไดโอด (Photodiode, PD) ซึ่งทั้งคู่ก็มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น หลอดทวิคูณแสงมีโครงสร้างทางกลที่ไวต่อการถูกทำลายในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เสถียรเชิงกล ในขณะที่โฟโตไดโอดถูกสร้างขึ้นจากวัสดุกึ่งตัวนำและมีความเสถียรเชิงกลมากกว่าหลอดทวิคูณแสง ในทางตรงกันข้ามเวลาในการตอบสนองของหลอดทวิคูณแสงนั้นมากกว่าโฟโตไดโอดเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้รับความนิยมไปใช้มากกว่า

2.1.3 หลอดทวิคูณแสง (Photomultiplier tube)

หลอดทวิคูณแสงเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนแสงให้เป็นอิเล็กตรอนจำนวนมาก โครงสร้างพื้นฐานของหลอดทวิคูณแสงประกอบไปด้วย โฟโตแคโทด (Photocathode) โครงสร้างสำหรับการทวีคูณของอิเล็กตรอน (Electron multiplication structure) และอิเล็กโทรดที่อ่านได้ (Readout electrode) กระบวนการสำคัญภายในหลอดทวิคูณแสงนี้เกิดขึ้นเมื่อแสงเข้ามายังโฟโตแคโทดแล้วแสงถูกเปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนผ่านปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) อิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกเร่งและเข้าชนกับโครงสร้างที่เป็นโลหะ

เรียกว่า ไดโนด (Dynode) ผลที่ได้จากการเข้าชนคือเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนมากกว่าเดิม อิเล็กตรอนที่ได้นี้จะเข้าชนกับไดโนดอื่น ๆ อีกครั้งจึงเกิดจำนวนของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอิเล็กตรอนเข้าชนกับไดโนดตัวสุดท้าย กระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกวัดโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิด

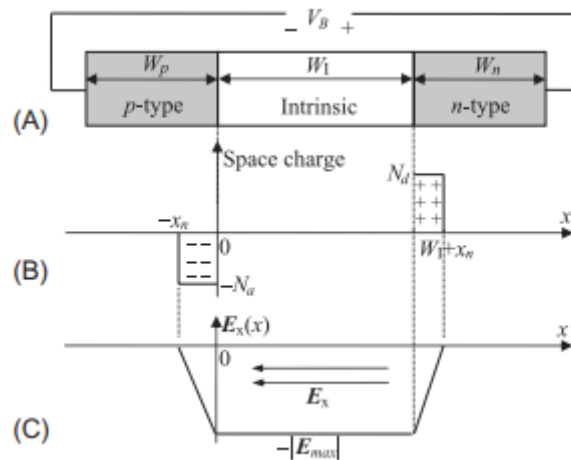


CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 2.4 หลักการทำงานของหลอดทวีคูณแสง

2.1.4 โฟโตไดโอด (Photodiode)

ข้อดีในการพัฒนาโฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำได้ถูกนำมาใช้แทนที่อุปกรณ์อย่างหลอดทวีคูณแสงในการใช้งานบางประเภทนั่นก็คือ โดยปกติแล้วโฟโตไดโอดจะให้ข้อดีคือ มีประสิทธิภาพทางควอนตัมสูงกว่าและสมรรถนะสำหรับการแยกพลังงานได้ดีกว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า มีขนาดกะทัดรัดกว่า และถูกพัฒนาให้มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับหลอดทวีคูณแสงที่ถูกใช้ในหัววัดซินทิลเลชัน โฟโตไดโอดไม่มีความไวต่อสนามแม่เหล็ก และสามารถนำไปแทนที่การใช้งานของหลอดทวีคูณในกรณีเมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง

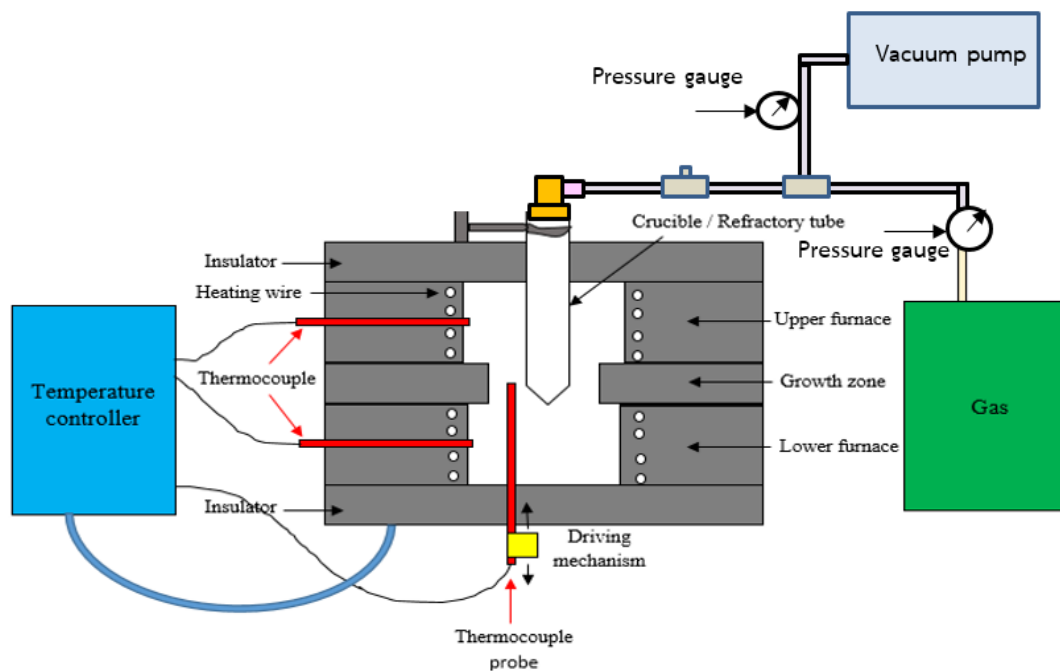


ภาพที่ 2.5 (A) โครงสร้างอย่างง่ายของโพลีไดโอด (B) การกระจายตัวของประจุ และ (C) โครงสร้างของ PIN ที่เหมือนจริง (Hui, 2020)

2.2 เทคนิคการปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger method)

2.2.1 กระบวนการปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งพัฒนามาจากการปลูกผลึกเดี่ยวของบริดจ์แมน โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเพียงพอจะทำให้สารหลอมเหลว แล้วหลังจากนั้นจะปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ภายในภาชนะบรรจุสาร หลังจากนั้นสต็อกบาร์เกอร์ ได้ทำการปรับปรุงเทคนิคการปลูกผลึกต่อจากของบริดจ์แมน โดยมีการเพิ่มการเคลื่อนที่ภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวผ่านเตาหลอมในแนวตั้ง แล้วเกิดผลึกขึ้นที่ปลายสุดของภาชนะปลูกผลึก



ภาพที่ 2.6 ระบบการปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (อิมรอน วาเต็ง, 2560)

2.2.2 ส่วนประกอบของระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์
มีส่วนประกอบที่สำคัญดังภาพที่ 2.6 ดังต่อไปนี้

- 1) ชุดเตาหลอมและฉนวนกันความร้อน (Baffle)
- 2) ระบบควบคุมอุณหภูมิ
- 3) หลอดแก้วหรือภาชนะปลูกผลึก
- 4) ระบบควบคุมสุญญากาศและความดันก๊าซ

จะเห็นว่าชุดเตาหลอมปลูกผลึกมีลักษณะเป็นเตาหลอม 2 โซน โดยเตาหลอมส่วนบนเรียกว่าเตาหลอมชุดอุณหภูมิสูง (High temperature furnace) และเตาหลอมส่วนล่างเรียกว่าเตาหลอมชุดอุณหภูมิต่ำ (High temperature furnace) ที่หุ้มด้วยฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนจากความร้อนระหว่างกัน โดยอุณหภูมิของแต่ละโซนนั้นจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิที่เป็นอิสระจากกัน เพื่อเป็นการกำหนดแกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้มีโปรไฟล์ที่เหมาะสมกับการปลูกผลึก ทั้งนี้อุณหภูมิของแต่ละโซนจะสามารถตั้งได้ก็องศาเซลเซียส ก็ขึ้นอยู่กับรุ่นของตัวควบคุมอุณหภูมิที่ใช้

ท่อที่ใช้ปลูกผลึกจะต้องทำมาจากวัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิในการปลูกผลึกได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อปลายปิดเพื่อลดการพาความร้อน (Heat convection) ที่อาจส่งผลกระทบต่อแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ระบบของท่อปิดสามารถสร้างความดันสุญญากาศในระดับต่าง ๆ ภายในท่อที่ปลูกผลึกได้ และสามารถอัดก๊าซเฉื่อยให้สูงกว่าความดันบรรยากาศเพื่อป้องกันการระเหยของสารได้

2.2.2 การเกิดผลึก (Crystallization)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรือผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กรวมเข้าด้วยกัน แล้วทำให้เกิดรูปแบบของโมเลกุลขนาดใหญ่หรือชั้นของน้ำแข็งขึ้น โดยเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของกลุ่มก่อนอย่างช้า ๆ จากภายในแพร่ขยายออกไปภายนอก ซึ่งทำให้สารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวเปลี่ยนไปเป็นสถานะของแข็ง หรืออยู่ในรูปของผลึก โดยมี 2 ขั้นตอนในการเกิดผลึก ได้แก่

- การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นตอนแรกที่เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลของสารที่มีลักษณะเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะเติบโตไปเป็นผลึกในขั้นตอนถัดไป โดยกลไกการเกิดนิวเคลียสนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ 1) การเกิดแบบเนื้อเดียว (Homogenous nucleation) เริ่มต้นกระบวนการในเฟสของ Supercooling ซึ่งเป็นเฟสที่สารในสถานะของเหลวกำลังแข็งตัวอันเนื่องมาจากการลดลงของอุณหภูมิแข็งตัวของสารหลอมเหลว นั้น จากนั้นจำนวนของนิวเคลียสจะก่อตัวขึ้นแล้วเกิดพันธะของอะตอมอย่างช้า ๆ หากอะตอมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กขนาดวิกฤต (Critical size) จะเรียกว่า เอ็มบริโอ (Embryo) ซึ่งอาจจะสลายตัวกลับมาเป็นของเหลวเหมือนเดิม หรืออาจจะมีความใหญ่ขึ้นกว่าเดิม และหากอะตอมที่เกิดขึ้นมีความใหญ่กว่าขนาดวิกฤต จะเรียกว่า นิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งจะกลายไปเป็นผลึกในภายหลัง กระบวนการเกิดแบบเนื้อเดียวกันสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.7 และนอกจากนี้ยังสามารถหาค่ารัศมีวิกฤตและค่าพลังงานวิกฤตได้ดังสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3)

$$\Delta G_{\text{homo}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (2.1)$$

$$r^* = \frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_V} = \left(\frac{2\gamma_{SL} T_m}{L_v} \right) \frac{1}{\Delta T} \quad (2.2)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3\Delta G_V^2} = \left(\frac{16\pi\gamma_{SL}^3 T_m^2}{3L_v^2} \right) \frac{1}{(\Delta T)^2} \quad (2.3)$$

กำหนดให้	ΔG_{homo}	=	การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวม
	r	=	รัศมีของเอมบริโอหรือนิวเคลียส
	ΔG_V	=	พลังงานอิสระต่อปริมาตร
	γ_{SL}	=	พลังงานพื้นผิว
	r^*	=	รัศมีวิกฤต
	ΔT	=	Supercooling

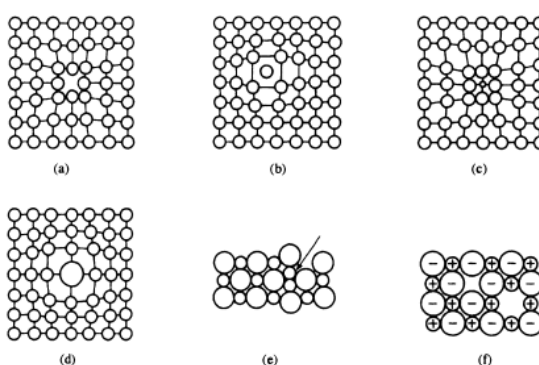
และส่วน 2) การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อผสม (Heterogenous nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสบนผิวภาชนะของสิ่งเจือปน ซึ่งการเกิดลักษณะนี้มีค่าพลังงานอิสระต่ำ แล้วทำให้เกิด Supercooling ที่ไม่สูง จึงได้ขนาดเกรนที่ใหญ่

2.2.3 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในผลึกที่ปลูกขึ้น (Crystal impactions)

ผลึกที่ปลูกขึ้นนั้นอาจมีโครงสร้างที่มีความบกพร่องจากกระบวนการปลูกผลึกที่มีเงื่อนไขหรือสภาวะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกนั้น และความบกพร่องนี้จะเป็นผลที่มีความเกี่ยวข้องกับการเจือสารเข้าไปในผลึก สามารถเกิดขึ้นได้โดยแบ่งเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ ความบกพร่องแบบที่ไม่มีมิติหรือแบบจุด (Point defect) ความบกพร่องแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น (Line defect) ความบกพร่องเชิงพื้นที่ผิว (Surface defect) และ ความบกพร่องเชิงปริมาตร (Volume defect)

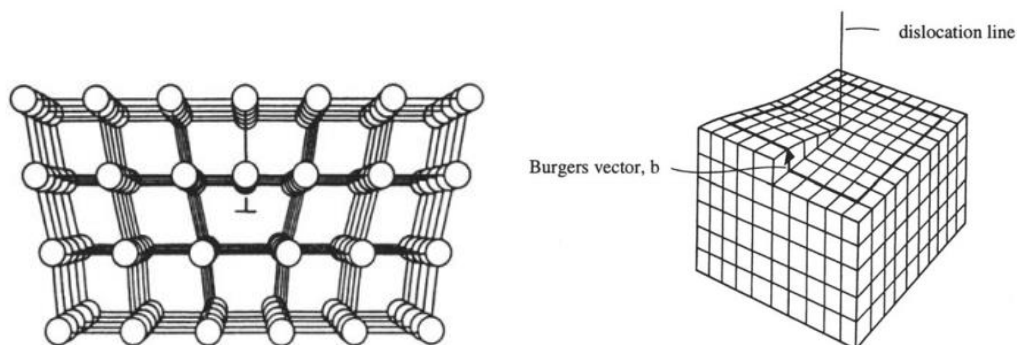
- ความบกพร่องแบบจุด ได้แก่ 1) การเกิดช่องว่าง (Vacancy) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมบางอะตอมภายในแลตทิซหายไป ซึ่งอาจเกิดขึ้นในช่วงกระบวนการเกิดผลึกของโลหะในขณะที่กำลังแข็งตัวจากสภาพหลอมละลายของสารตั้งต้น 2) การแทรกอยู่ของอะตอมอื่นระหว่างอะตอมเดิม (Interstitial atoms) เกิดขึ้นจากอะตอมที่เกินมามากกว่าปกติ แล้วเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมภายในผลึก ซึ่งอาจทำให้ตำแหน่งของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิม 3) การแทนที่อะตอมเดิมด้วยอะตอมขนาดเล็ก (Small substitutional atom) เกิดขึ้นจากอะตอมของสารตัวอื่นเข้ามาแทนที่อะตอมของสารตั้งต้น แต่อะตอมของสารตัวอื่นนั้นมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของสารตั้งต้น

4) การแทนที่อะตอมเดิมด้วยอะตอมขนาดใหญ่ (Large substitution atom) เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับการแทนที่อะตอมเดิมด้วยอะตอมขนาดเล็ก แต่อะตอมที่เข้ามาแทนที่มีขนาดใหญ่ 5) ความบกพร่องแบบเฟรนเคิล (Frenkel defect) เกิดขึ้นจากอะตอมตรงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งขาดหายไป แล้วเข้าไปแทรกอยู่ในช่องระหว่างอะตอมใกล้เคียง ซึ่งอาจทำให้ผลึกมีโครงสร้างอัดแน่น และ 6) ความบกพร่องแบบชอตต์กี (Schottky defect) โดยเกิดขึ้นจากประจุบวกและประจุลบที่อยู่ภายในอะตอมหายไป



ภาพที่ 2.7 ชนิดของความบกพร่องแบบจุด (a) การเกิดช่องว่าง (b) การแทรกอยู่ของอนุภาคระหว่างอนุภาคเดิม (c) การแทนที่อนุภาคเดิมด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (d) การแทนที่อนุภาคเดิมด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (e) ความบกพร่องแบบเฟรนเคิล (f) ความบกพร่องแบบชอตต์กี

- ความบกพร่องเชิงเส้น เกิดขึ้นเนื่องจากการอยู่ผิดที่ของกลุ่มอะตอมตลอดทั้งระนาบภายในผลึก (Dislocation) ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภท 1) การมีแถวหรือระนาบของอะตอมมากกว่าผิดปกติ (Edge dislocation) เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้เกิดแรงและความไม่สมดุลขึ้น จึงเกิดการบิดเบี้ยว (Lattice distortion) ขึ้นภายในผลึก และ 2) การมีแถวหรือระนาบของอะตอมที่อยู่ผิดสภาพ (Screw dislocation) ซึ่งมีลักษณะคล้ายเกลียวหรือเป็นขั้นบันได แทนที่ระนาบขนานกัน



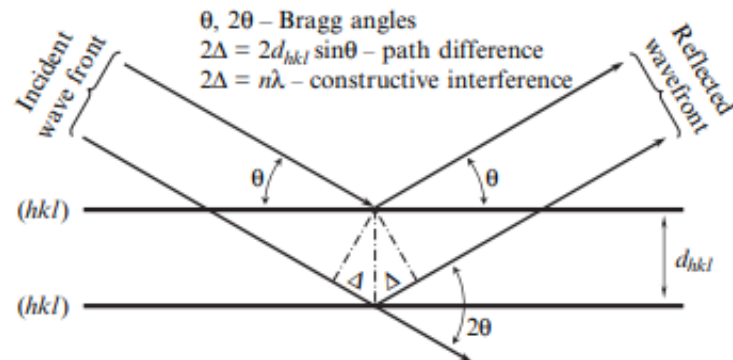
ภาพที่ 2.8 ชนิดของความบกพร่องแบบเส้น (ซ้าย) การเกิด Edge dislocation และ (ขวา) การเกิด Screw dislocation (Gottstein, 2004)

- ความบกพร่องเชิงพื้นที่ผิว ได้แก่ ขอบเกรน (Grain boundary) ซึ่งเป็นความบกพร่องที่ผิวหน้าโดยแบ่งผลึกที่มีการเรียงตัวทิศทางต่างกัน ออกเป็นหลาย ๆ เกรนเป็นรูป 3 มิติ ทำให้อะตอมที่ขอบของทั้งสองเกรนมีการจัดเรียงตัวกันที่ไม่เป็นระเบียบ โดยความบกพร่องชนิดนี้สามารถมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยแบ่งชนิดของความบกพร่องเชิงพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ ขอบเกรนแบบเงา (Twist boundary) ขอบเกรนแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical tilt boundary) และขอบเกรนแบบสมมาตร (Symmetrical tilt boundary)

2.3 เทคนิคการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของผลึก

2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

เป็นเทคนิคมาตรฐานที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีของผลึกในวัสดุ ซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุได้ เช่น ขนาดของผลึก และค่าคงที่แลตทิซ เป็นต้น โดยมีหลักการคือ อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากการใช้รังสีเอกซ์ตกกระทบเข้าไปภายในผลึกของวัสดุ แล้วรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบนั้น จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นตามช่องระหว่างอะตอมของวัสดุ แล้วสะท้อนกลับทำให้เกิดมุมกับระนาบของอะตอมที่ตกกระทบขึ้น



ภาพที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบอะตอมของผลึก (Pecharsyk & Zavalij, 2009)

จากภาพที่ 2.9 ข้างต้น สามารถอธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกได้ ตามกฎของแบร็ก (Bragg's law) ดังนี้

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.4)$$

กำหนดให้	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	n	คือ	ลำดับของการสะท้อน
	d_{hkl}	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ (h, k, l)
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากระนาบที่กำลังพิจารณา

เมื่อได้ค่าของระยะห่างระหว่างระนาบ (h, k, l) แล้วจะสามารถนำไปหาค่าคงตัวของแลตทิซ (Lattice's constant) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2} \quad (2.5)$$

กำหนดให้	h, k, l	คือ	ค่าของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนั้น ๆ
	a	คือ	ค่าคงตัวของแลตทิซ

หลังจากทราบค่าคงตัวของแลตทิซแล้วจะสามารถนำไปคำนวณค่าร้อยละความเครียดที่เกิดขึ้นภายในผลึกได้ โดยสมการดังต่อไปนี้

$$\% \varepsilon = \frac{a - a_{\text{std}}}{a_{\text{std}}} \times 100 \quad (2.6)$$

กำหนดให้	ε	คือ	ค่าความเครียด
	a	คือ	ค่าคงตัวของแลตทิซของผลึกที่คำนวณได้
	a_{std}	คือ	ค่าคงตัวของแลตทิซของผลึกที่เป็นมาตรฐาน

ดังนั้นสถานะความเครียดของผลึกจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สภาวะเครียดแบบถูกบีบอัด (Compressive strain) ในกรณีที่ค่าคงที่แลตทิซที่วิเคราะห์ได้ของผลึกมีขนาดสั้นกว่าหรือหดตัว และ สภาวะเครียดแบบดึงขยาย (Tensile strain) สำหรับกรณีที่ค่าคงที่แลตทิซที่วิเคราะห์ได้ของผลึกมีขนาดยาวกว่าหรือยืดขยายตัว

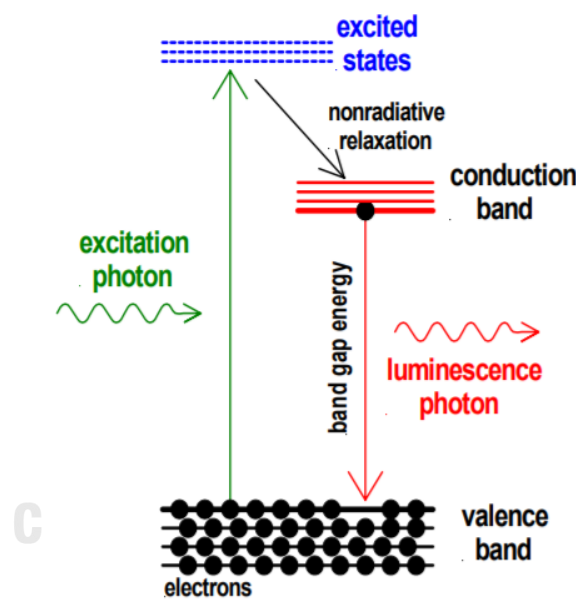
หลังจากนั้นสามารถหาค่าขนาดผลึกได้ โดยใช้สมการของเซอร์เรอร์ (Scherrer's Equation)

$$T = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.7)$$

กำหนดให้	T	คือ	ขนาดผลึก
	K	คือ	ค่าคงที่ของเซอร์เรอร์ เท่ากับ 0.94
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสี (Cu, $K\alpha = 0.15405$ nm)
	β	คือ	ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสุดของกราฟระฆัง (Full Width Half Maximum, FWHM)
	θ	คือ	มุมของแบร็ก (Bragg's Angle)

2.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Photoluminescence spectrophotometer โดยอาศัยปรากฏการณ์ของแสงอยู่ 3 ประเภท คือ การสะท้อน (Reflection) การดูดกลืน (Absorbance) และการส่องผ่านแสง (Transmission) ในตัวกลางของผลึก ซึ่งผลึกที่นำมาทดสอบจะมีอันตรกิริยากับแสงที่ผ่านเข้ามาในผลึก โดยแสงจะเข้าไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์ จากนั้นแสงจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน แล้วอิเล็กตรอนจะขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะไม่มีเสถียรภาพ จึงทำให้อิเล็กตรอนจำเป็นต้องคายพลังงานออกไปแล้วกลับลงมาสู่แถบวาเลนซ์อีกครั้ง โดยพลังงานที่ปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนนั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟตอน (Photon) สามารถอธิบายได้จากภาพที่ 2.10

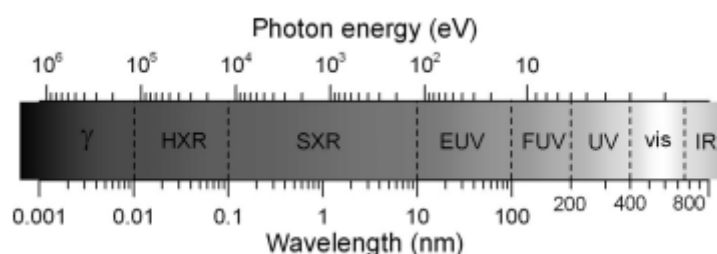


ภาพที่ 2.10 ปรากฏการณ์การปลดปล่อยแสงเรืองจากภายในอะตอม

2.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติแสงด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมแสงด้วยการส่องผ่านแสงเหนือม่วงและแสงย่านที่มองเห็นได้

(Ultraviolet and visible spectrophotometry, UV-VIS spectrophotometry)

เป็นวิธีการในห้องปฏิบัติการที่ส่วนมากใช้เพื่อการระบุสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์จากกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการตรวจสอบ เทคนิคการส่องผ่านแสงนี้เป็นเทคนิคที่รวดเร็วแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือ โดยเทคนิคนี้อาศัยช่วงความยาวของแสงเหนือม่วงหรือรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นในช่วง 200 – 380 นาโนเมตร และแสงที่มองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 380 – 770 นาโนเมตร ในปัจจุบันเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้ความยาวคลื่นได้ในช่วง 190 – 1100 นาโนเมตรซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่นในช่วงของรังสีใต้แดงหรืออินฟราเรด (Infrared)



ภาพที่ 2.11 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงชนิดต่าง ๆ (Larruquert, 2018)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะอาศัยการดูดกลืนแสง โดยวัสดุแต่ละชนิดจะสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละวัสดุ โดยลักษณะดังกล่าวเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) สามารถแสดงออกมาในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (2.8)$$

กำหนดให้	%T	คือ	ร้อยละการส่องผ่านของแสง
	I	คือ	ความเข้มของแสงหลังทะลุออกจากวัสดุ
	I ₀	คือ	ความเข้มของแสงก่อนทะลุออกจากวัสดุ

นอกจากนี้การดูดกลืนของแสงยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของวัสดุและความหนาของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's law) สามารถแสดงออกมาในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$A = \epsilon cl \quad (2.9)$$

กำหนดให้	A	คือ	การดูดกลืนของแสง
	ϵ	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมลาร์ของวัสดุ
	c	คือ	ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของวัสดุ
	l	คือ	ระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่างหรือความหนาของวัสดุ

โดยเมื่อนำทั้งกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต (Beer and Lambert's law) รวมเข้าด้วยกัน จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสงได้ ดังสมการ

$$A = \log \frac{100}{T} \quad (2.10)$$

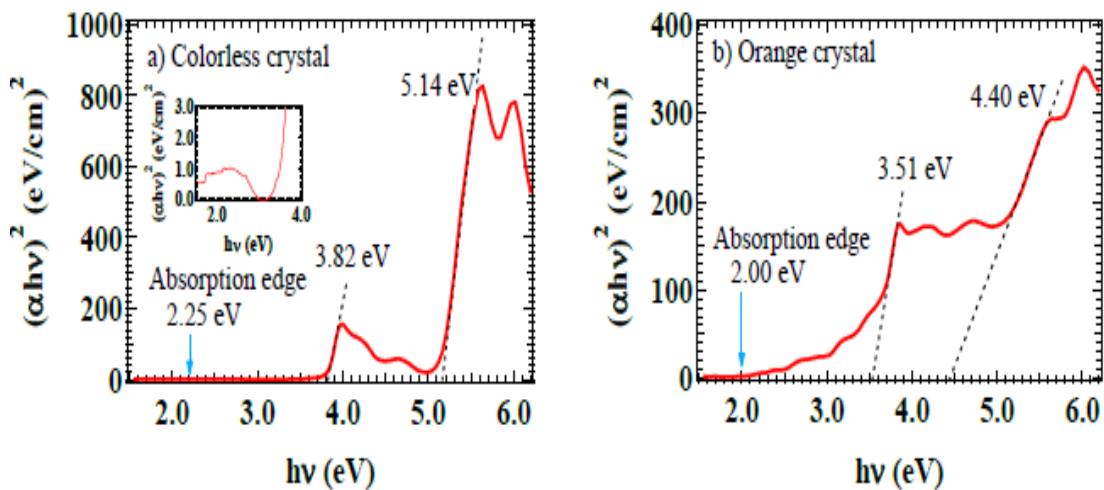
จากความสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของการส่องผ่านแสงและค่าความยาวคลื่นของวัสดุ หรือผลึกในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จะสามารถคำนวณค่าพลังงานแถบช่องว่าง (Energy gap, E_g) ได้จาก Tauc's Plot ซึ่งคือ การสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ และค่า $h\nu$ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถแสดงดังสมการ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.11)$$

กำหนดให้ $h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

โดย $\alpha = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{T}$ เมื่อ t คือ ความหนาของผลึก



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และค่า $h\nu$ ของ (a) ผลึกไม่มีสี และ (b) ผลึกสีส้มของ ซีเซียมไอโอไดต์ (Sintham, Saengkaew, & Sanorpim, 2018)

2.4 เทคนิคการตรวจสอบศักยภาพในการตรวจวัดรังสีของผลึก

2.4.1 ประสิทธิภาพในการวัดรังสี (Detection efficiency)

หัววัดรังสีทุกชนิดในเชิงหลักการจะให้สัญญาณออกมาในแต่ละควอนตัมของรังสีที่เกิดอันตรกิริยาภายในหัววัด สำหรับรังสีชนิดอนุภาคจำพวกแอลฟาหรือเบต้า การเกิดอันตรกิริยาขึ้นในรูปของการแตกตัวเป็นไอออนหรือการกระตุ้น จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อรังสีผ่านเข้ามาภายในหัววัด ซึ่งทำให้เกิดขนาดของสัญญาณที่ใหญ่เพียงพอต่อการนับวัด จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพในการวัดรังสีเป็นร้อยละ 100

ในทางตรงกันข้ามรังสีชนิดไม่ไอออนูภาค เช่น รังสีแกมมาหรือนิวตรอน การเกิดอันตรกิริยาภายในหัววัดเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้ยาก เพราะว่ารังสีเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกล จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพในการวัดรังสีไม่ถึงร้อยละ 100 ตามหลักการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างค่าแก้ไขขึ้นเพื่อการวัดรังสีให้ถูกต้องแม่นยำ โดยแบ่งประสิทธิภาพในการวัดเป็น 2 แบบคือ

- ประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบสัมบูรณ์ (Absolute peak efficiency, E_{abs})

$$E_{abs} = \frac{N}{S \times f} \quad (2.12)$$

กำหนดให้	N	คือ	จำนวนรังสีที่นับวัดได้
	S	คือ	จำนวนรังสี ณ เวลาปัจจุบันจากแหล่งกำเนิดรังสี
	f	คือ	ค่าคงที่สัดส่วนการสลายตัวของแหล่งกำเนิดรังสี

- ประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบแท้จริง (Intrinsic peak efficiency, E_{int})

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$E_{int} = \frac{N}{S \times f \times G} \quad (2.13)$$

กำหนดให้ G คือ ค่าคงที่ทางเรขาคณิต

จะได้ว่า $G \cong \frac{\text{พื้นที่ของหัววัดรังสี}}{4\pi d^2}$ เมื่อ d คือ ระยะห่างจากหัววัดรังสีถึงแหล่งกำเนิดรังสี

2.4.2 ความสามารถในการแยกพลังงานของรังสี (Energy resolution)

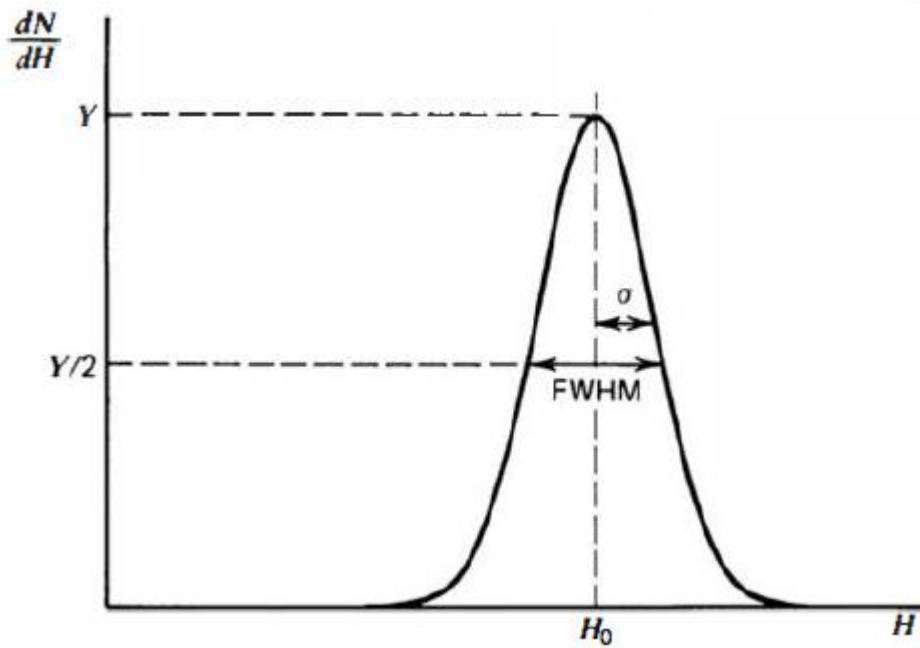
เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของหัววัด เพื่อใช้วัดพลังงานของรังสีที่เข้ามาภายในหัววัด หากพลังงานของรังสีที่เข้ามาภายในหัววัดมีพลังงานใกล้เคียงกันมาก ถ้าหัววัดมีความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีได้ดี นั้นหมายความว่า หัววัดสามารถแยกพลังงานที่ใกล้เคียงกันมากได้ ซึ่งจะปรากฏเป็นเส้นสเปกตรัมของพลังงานทั้ง 2 แยกออกจากกันอย่างชัดเจน แต่ถ้าหากหัววัดชนิดนั้น มีความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีที่ไม่ดี หัววัดชนิดนั้น จะไม่สามารถแยกพลังงานที่ใกล้เคียงกันได้ ซึ่งจะปรากฏเป็นเส้นสเปกตรัมของพลังงานทั้ง 2 ที่รวมกันเป็นพีกเดียวกัน

- การหาค่าความสามารถในการแยกพลังงานของรังสี สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\% \text{ Energy resolution} = \frac{\text{FWHM}}{H_0} \times 100 \quad (2.14)$$

กำหนดให้ FWHM คือ ค่าความแตกต่างด้านซ้ายและขวาที่ได้จากตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโฟโตพีก

H_0 คือ ค่าพลังงานที่ตำแหน่งของโฟโตพีก



ภาพที่ 2.13 การหาความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของหัววัดรังสีจากโฟโตพีค
(Knoll, 2010)

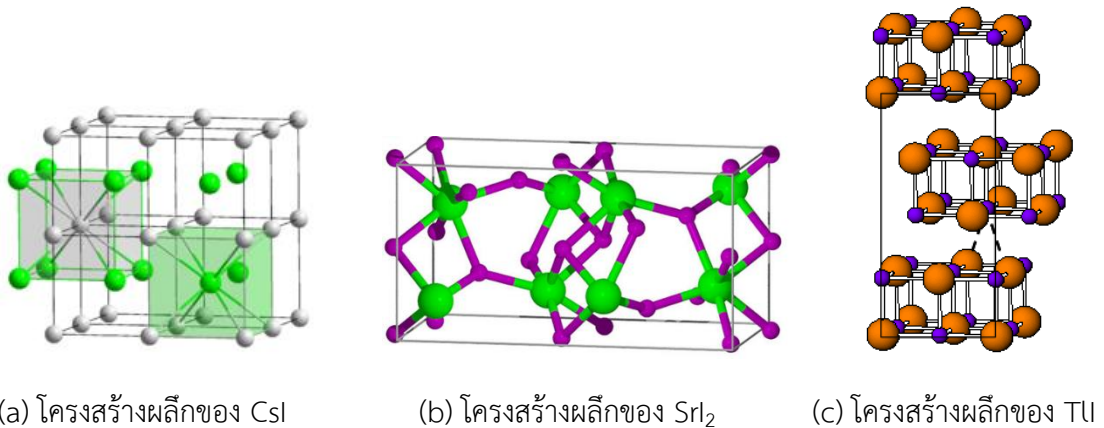
บทที่ 3

การปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์ด้วยเทคนิคบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

งานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะพัฒนาการปลูกผลึกวัตรังสีชนิดซินทิลเลชันชนิด $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นซีเซียมไอโอไดต์ (Cesium iodide, CsI) และสตรอนเชียมไอโอไดต์ (Strontium iodide, SrI_2) แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งอัตราส่วนเป็น 3 ส่วนคือ อัตราส่วนระหว่าง CsI และ SrI_2 เท่ากับ 95:5, 97:3 และ 99:1 ซึ่งผลึกทั้งสามจะถูกปลูกขึ้นจากเตาหลอมผลึกที่พัฒนาขึ้นเองมาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิโดยอาศัยคุณสมบัติของสารที่จะนำมาปลูกผลึก และสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature profile) หลังจากนั้นผลึกจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางโครงสร้างและวิเคราะห์คุณภาพเชิงแสง และสุดท้ายจะนำไปทดลองและเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการวัดปริมาณรังสีกับหัววัตรังสี เพื่อหาประสิทธิภาพของผลึกที่ปลูกได้

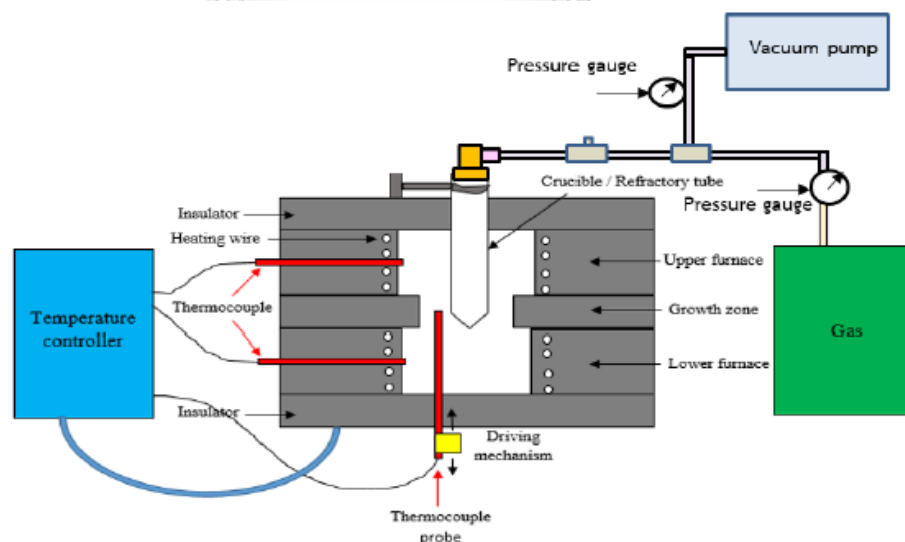
3.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการปลูกผลึก

สารตั้งต้นจะใช้สารประกอบซีเซียมไอโอไดต์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999% เป็นระดับเกรดคุณภาพการทดลองมาตรฐานโดยบริษัท อัลฟาเอซาร์ จำกัด โดยทั่วไปสารประกอบซีเซียมไอโอไดต์มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมตรงกลาง (Body-centered cubic, BCC) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 626 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 1280 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 4.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นสารประกอบอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) สำหรับสารตั้งต้นสตรอนเชียมไอโอไดต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงละเอียดมีความบริสุทธิ์ 99.9% เป็นเกรดระดับคุณภาพการทดลองมาตรฐานโดยบริษัท อัลฟาเอซาร์ จำกัด เช่นเดียวกัน โดยสารประกอบสตรอนเชียมไอโอไดต์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 645 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 1173 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 4.55 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสำหรับสารแคลเซียมไอโอไดต์ที่เป็นสารเจือมีความบริสุทธิ์ 99.999% เป็นระดับเกรดคุณภาพการทดลองมาตรฐานซึ่งมีลักษณะผงละเอียดโดยบริษัท ซิกม่าอัลดริช จำกัด มีจุดหลอมเหลว 442 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 824 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 7.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral)



ภาพที่ 7 โครงสร้างผลึกของสารตั้งต้น CsI, SrI₂ และสารเจือ TI

จากข้อมูลเบื้องต้นของสารเคมีที่จะใช้ในการปลูกผลึกนำไปสู่การออกแบบท่อปลูกผลึกแบบปิด โดยใช้กระบวนการปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาหลอมแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายใต้ความดันบรรยากาศของอาร์กอนบริสุทธิ์ เพื่อไม่ให้อากาศจากภายนอกหรือภายในเตาหลอมที่ตกค้างอยู่เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น CsI หรือ SrI₂ และสารเจือ TI โดยเตาปลูกผลึกจะใช้อุปกรณ์พื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้



ภาพที่ 8 แผนผังส่วนประกอบของเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (อิมรอน วาเต็ง, 2560)

1) ชุดเตาหลอม – ระบบเตาหลอมถูกแบ่งเป็น 3 โซน คือ โซนอุณหภูมิสูง (Zone of high temperature) โซนอุณหภูมิต่ำ (Zone of low temperature) และโซนอุณหภูมิกลาง (Zone of middle temperature) หรือเรียกว่า โซนอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก (Growth zone) ซึ่งทั้งสามโซนจะถูกกั้นด้วยฉนวนกันความร้อน ซึ่งทำให้ทั้งสามบริเวณนั้นมีอุณหภูมิที่เป็นอิสระต่อกันด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ

2) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) – เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิของระบบเตาหลอม ซึ่งในระบบเตาหลอมนั้น จะมีเทอร์โมคัปเปิลวางไว้ 3 ตำแหน่งโดยแบ่งตามตำแหน่งของโซน คือ ตำแหน่งโซนอุณหภูมิสูง ตำแหน่งโซนอุณหภูมิต่ำ และตำแหน่งโซนอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก

3) ระบบบันทึกข้อมูล – เป็นระบบที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะถูเก็บข้อมูลเอาไว้ภายในการ์ดหน่วยความจำจัดเก็บข้อมูล (Secure digital card, SD card)

4) หลอดควอตซ์ (Quartz) – เป็นภาชนะที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร และยาว 42 เซนติเมตร ด้านกันแก้วเป็นแหลมขนาดมุมประมาณ 30 องศา โดยอีกด้านเป็นปลายเปิดสำหรับใส่สารเคมี และต่อเข้ากับท่อสุญญากาศพร้อมทั้งอัดก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์

5) ระบบสุปั๊มเพื่อสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอน – เป็นระบบที่ใช้ในการดูดอากาศภายในหลอดควอตซ์ให้ภายในระบบเตาหลอมเปรียบเสมือนกับสุญญากาศ แล้วถ่ายเทก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบ เพื่อให้ในระบบเตาหลอมเต็มไปด้วยก๊าซอาร์กอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 การออกแบบเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

3.2.1 ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน

เตาหลอมจะถูกออกแบบโครงสร้างในส่วนที่เป็นโซนอุณหภูมิสูงมีความยาว 15 มิลลิเมตร และโซนอุณหภูมิต่ำมีความยาว 22 มิลลิเมตร ซึ่งภายในระบบเตาหลอมจะมีขดลวดความร้อนขนาด 1.3 มิลลิเมตร ชนิด Kanthal-AF ที่สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส และกำลังไฟฟ้าของเตาหลอมถูกออกแบบให้เท่ากับ 1.2 กิโลวัตต์ อันเนื่องมาจากการปลูกผลึกจำเป็นต้องเปิดเตาในระยะเวลาอันยาวนาน และต่อเองกันนั่นเอง ซึ่งขดลวดความร้อนดังกล่าวจะถูกพันเป็นรูปคอยล์ (Helix) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร แล้วบรรจุไว้ในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร โดยขดลวดจะถูกแบ่งบรรจุใส่ไว้ในบริเวณ 2

โชนคือ ขดลวดความร้อนชุดบน (Primary heater) ที่บรรจุอยู่ในโชนอุณหภูมิสูง เป็นชุดที่สามารถตั้งอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารปลุกผลึกอย่างน้อย 20 องศาเซลเซียส และขดลวดความร้อนชุดล่าง ที่บรรจุอยู่ในโชนอุณหภูมิต่ำ

ชุดเตาหลอมจะมฉนวนเพื่อป้องกันการรบกวนของความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่อาจกระทบต่ออุณหภูมิในบริเวณโชนปลุกผลึก และก่อให้เกิดการสูญเสียความร้อน ดังนั้นการออกแบบให้มีความเสถียรของอุณหภูมิ ภายในระบบเตาหลอมจึงมีชุดฉนวนกันความร้อน โดยทำมาจากอิฐเบาเนื้ออ่อนทนไฟที่มีความหนา 7.5 เซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 11.5×23 ตารางเซนติเมตร แล้วนำมาตัดและก่อเป็นส่วนประกอบของระบบเตาปลุกผลึก ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) ฉนวนที่ใช้ก่อเป็นตัวเตาหลอม จะถูกห่อหุ้มด้วยอิฐเบาเนื้ออ่อนที่ถูกทำให้เป็นร่องโดยจะมีขดลวดความร้อนทรงกระบอกบรรจุอยู่ ซึ่งเตาหลอมส่วนล่างหรือโชนอุณหภูมิต่ำจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 23×23 ตารางเซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร และเตาหลอมส่วนบนหรือโชนอุณหภูมิสูงจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับเตาหลอมส่วนล่าง แต่มีความสูงเพียงแค่ 15 เซนติเมตร

2) บัฟเฟิล (Baffle) เป็นบริเวณรอยต่อระหว่างบริเวณโชนอุณหภูมิสูงและโชนอุณหภูมิต่ำ ซึ่งบริเวณนี้ก็คือบริเวณอุณหภูมิกลาง หรือเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับปลุกผลึก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อปลุกผลึก และมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาปลุกผลึก อันเนื่องมาจากการป้องกันการรบกวนของอากาศที่ไหลผ่านในบรรยากาศแล้วเกิดการพาความร้อนขึ้นระหว่างโชนบัฟเฟิล การรบกวนที่เกิดจะทำให้อุณหภูมิของเตาเกิดความคลาดเคลื่อนได้

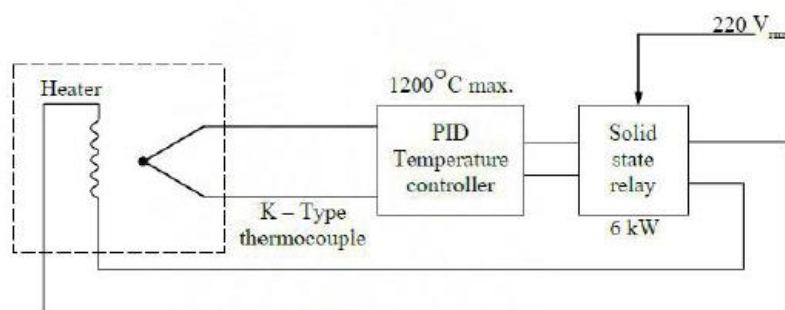
3) ฉนวนชั้นนอก เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ในการป้องกันความร้อนโดยรอบของเตาหลอมทั้งบริเวณอุณหภูมิต่ำและบริเวณอุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายในระบบเตาหลอมน้อยลง และยังช่วยรักษาให้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตาไม่เกิดความร้อนมากจนเกินไป นอกจากนั้นยังทำให้กระบวนการในการปลุกผลึกเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น โดยทำให้เกรนเดียนท์ของอุณหภูมิกคงตัว

3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

สิ่งสำคัญสำหรับระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ก็คือการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้มีความเสถียรภาพมากที่สุด โดยเมื่อระบบเตาปลุกผลึกที่มี 2 โซนที่มีการควบคุมอุณหภูมิอย่างมีอิสระต่อกัน หมายความว่าสามารถตั้งค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay, SSR) ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID temperature controller) และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) ซึ่งมีการต่อวงจรดังแสดงในภาพที่ 3.3

1) บริเวณอุณหภูมิต่ำ จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1200 องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิของระบบปลุกผลึกไว้ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเพื่อวัดอุณหภูมิที่บริเวณด้านในเตา แล้วส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปยังระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี ซึ่งเครื่องควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Ramp rate) ตั้งแต่ 0 – 999.99 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

2) บริเวณอุณหภูมิสูง จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ไว้เช่นเดียวกับบริเวณอุณหภูมิต่ำ และนอกจากนั้นยังคงใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิได้เหมือนกับบริเวณอุณหภูมิต่ำ ในการควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมินั้นไม่ได้เป็นปัจจัยหลักในการปลุกผลึกมากนัก แต่อัตราการลดของอุณหภูมิต่างหากที่เป็นปัจจัยหลักในการปลุกผลึก ดังนั้นในการควบคุมอัตราการลดของอุณหภูมิ (Cool-down rate) ควรจะตั้งค่าน้อย ๆ เพื่อให้สารที่ใช้ปลุกผลึกไม่เกิดการหลอมหลวมกันเร็วเกินไป และเพื่อให้แน่ใจว่าผลึกที่ปลุกเสร็จแล้วจะเกิดความผิดปกติที่น้อยที่สุด



ภาพที่ 9 แผนภาพวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมผลึก (อิมรอน วาเต็ง, 2560)



ภาพที่ 10 ระบบเตาหลอมผลึกโดยแบ่งเป็น 3 บริเวณ

3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลเพื่อใช้หาเกรนเดียนท์ของอุณหภูมิ

การจัดเกรนเดียนท์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับกระบวนการปลูกผลึกนั้นสามารถทำได้โดยการเก็บข้อมูลของกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature profile) ในช่วงของกราฟที่แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่วัดค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่วางเอาไว้ในตำแหน่งบริเวณอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก โดยเมื่อได้ค่าของเกรนเดียนท์ของอุณหภูมิแล้วจะสามารถนำไปหาอัตราการตกผลึก (Growth rate) ได้ ซึ่งจะแสดงวิธีการคำนวณให้เห็นในส่วนของผลการทดลอง

3.2.4 ระบบสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซ

ก่อนการปลูกผลึกจะเริ่มต้นขึ้น จำเป็นต้องทำการดูดอากาศภายในท่อปลูกผลึกเพื่อให้ระบบภายในท่อเป็นสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการถ่ายก๊าซเฉื่อย ก็คือก๊าซอาร์กอนเข้าไปสู่ระบบภายในท่อปลูกผลึก เพื่อให้ก๊าซอาร์กอนแทนที่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในท่อปลูกผลึกให้หมดเสียก่อน เพราะถ้าหากมีก๊าซออกซิเจนหลงเหลืออยู่ภายใน จะทำให้ก๊าซออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีที่ใช้ปลูกผลึก แล้วทำให้ผลึกมีสภาพที่เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่สมบูรณ์ และในส่วนของระบบสุญญากาศ

จะใช้เป็นเครื่องสุบชนิดโรเตอรี (Rotary pump) โดยทำการสุบอากาศจนถึงระดับที่ต้องการ ก็จะทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบ แล้วปิดระบบสุบสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซ จึงจะสามารถดำเนินการปลูกผลึกต่อได้



ภาพที่ 11 ระบบทั้งหมดที่ใช้ในการปลูกผลึก
CHULALONGKORN UNIVERSITY

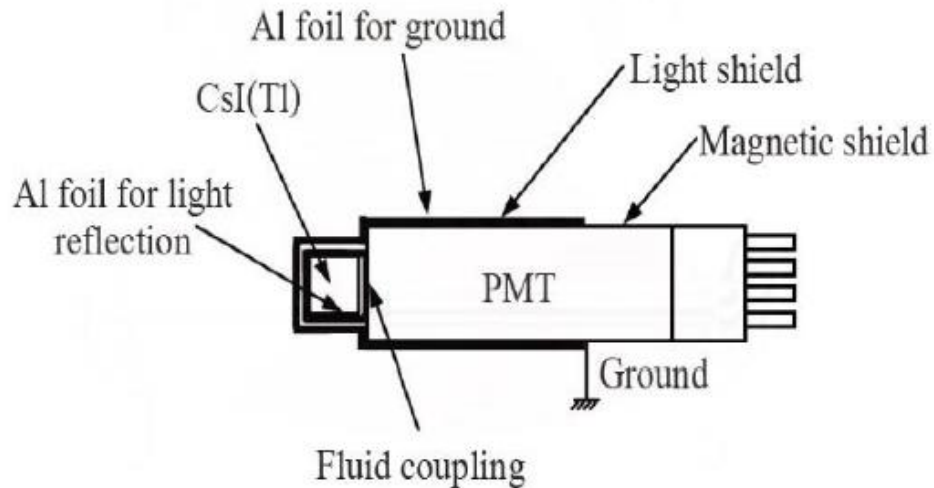
3.3 การออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก

ผลึกวัดรังสีที่ถูกปลูกขึ้นจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางโครงสร้างและคุณภาพเชิงแสงแล้ว หลังจากนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์การวัดประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของผลึก

3.3.1 การประกอบอุปกรณ์ผลึกวัดรังสี

ทำการนำผลึกที่ปลูกได้มาประกบเข้ากับอุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อแสง นั่นคือ หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube, PMT) ซึ่งมีผิวหน้าที่ใช้ในการรับแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1

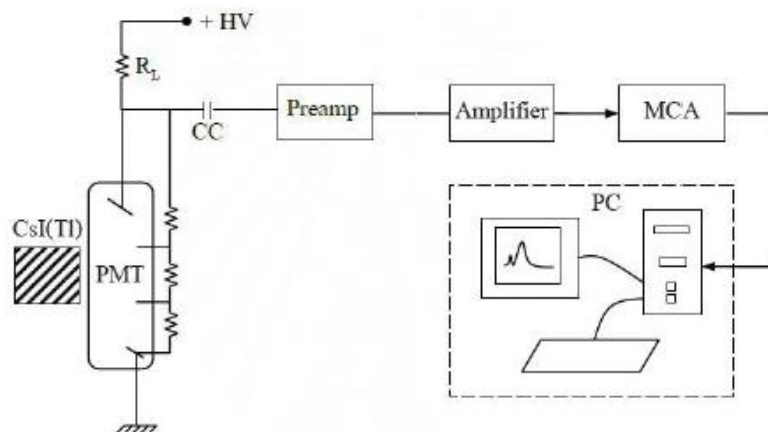
เซนติเมตร โดยจะประกบเข้ากับผลึกวัดรังสีแล้วถูกพันด้วยเทปกาวสีดำด้านหน้าส่วนที่รับแสงของหลอดทวีคูณแสงและผลึกให้มืดสนิท



ภาพที่ 12 การประกอบผลึกที่ปลูกได้เข้ากับหลอดทวีคูณแสง (อิมรอน วาเต็ง, 2560)

3.3.2 ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา

นำเอาผลึกที่ถูกประกบเข้ากับหลอดทวีคูณแสงไปต่อเข้ากับระบบการวิเคราะห์พลังงานรังสีแกมมา ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพที่ 3.7 ซึ่งระบบดังกล่าวจัดเป็นวงจรชนิดพัลส์ (Pulse type) และในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเลือกใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 7-9 กิโลโวลต์



ภาพที่ 13 ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีโดยใช้ผลึกที่ปลูกได้เป็นหัววัดรังสี (อิมรอน วาเต็ง, 2560)

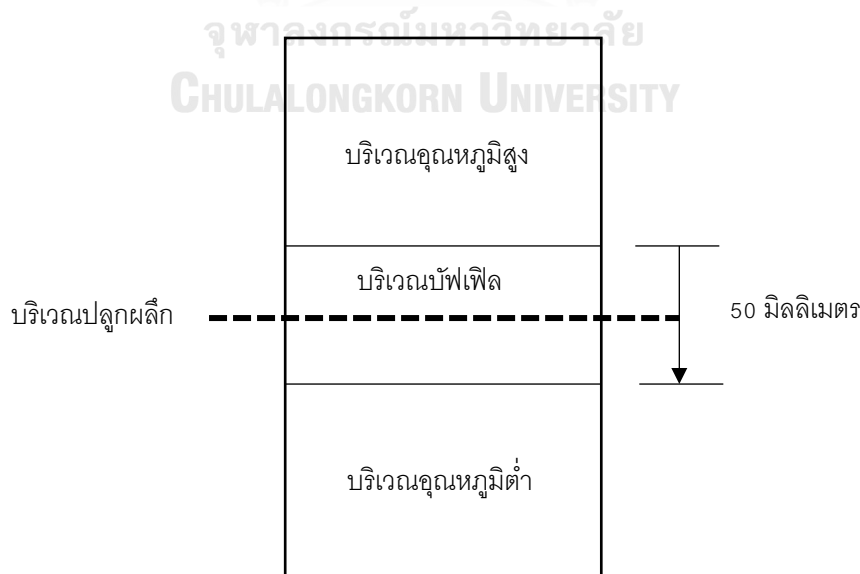
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์ที่เจือด้วยเทลเลียมนั้น ประกอบด้วยการทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก โดยใช้ระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ด้วยวิธีการควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และทดลองปลูกผลึก $CsSrI_3(Tl)$ ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันของสารตั้งต้นซีเซียมไอโอไดต์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 และสารตั้งต้นสตรอนเชียมไอโอไดต์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ซึ่งผลึกทุกก้อนจะถูกเจือด้วยเทลเลียมที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.035 ของสารตั้งต้น เมื่อปลูกผลึกเสร็จสิ้น ผลึกจะถูกนำมาทดสอบความเป็นผลึก ทดสอบคุณสมบัติเชิงแสง และคุณภาพในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมาโดยประกบผลึกเข้ากับหลอดทวิคูณแสง

4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก

การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียร และการทดสอบเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่บริเวณปลูกผลึก โดยจะกำหนดอุณหภูมิของเตาหลอมไว้ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งของอุณหภูมิสูง และตำแหน่งของอุณหภูมิต่ำ ทั้ง 2 ตำแหน่งจะถูกคั่นกลางด้วยบริเวณที่เรียกว่า บัฟเฟิล (Baffle) หรือบริเวณปลูกผลึกนั่นเอง ซึ่งภายในบริเวณนี้เองจะถูกตรวจวัดอุณหภูมิอีกด้วยดังภาพที่ 4.1

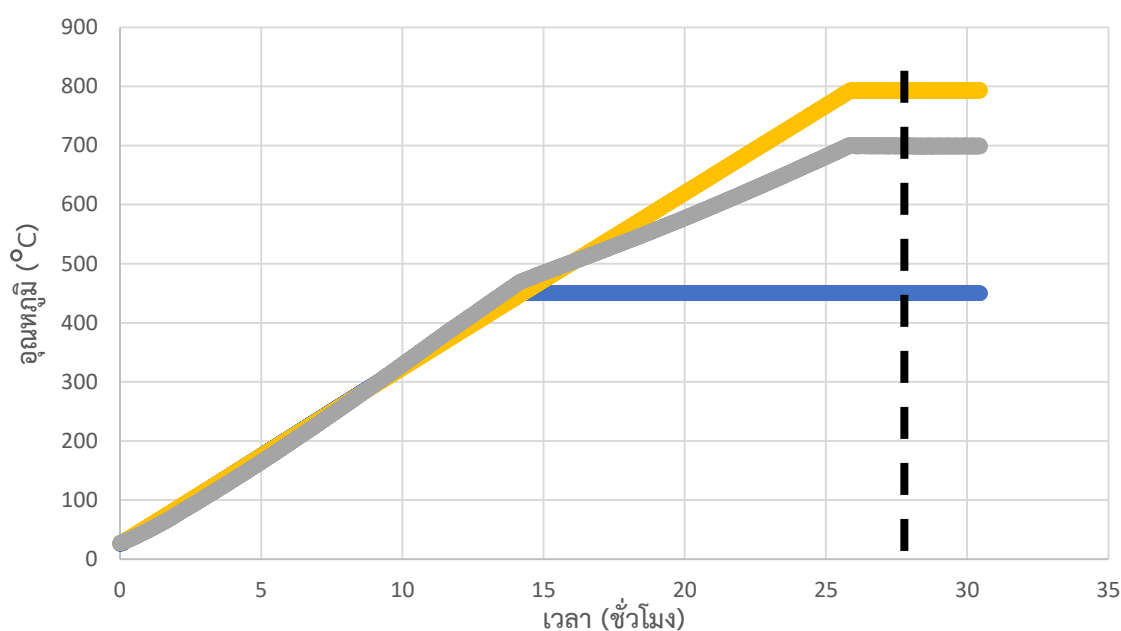


ภาพที่ 14 ตำแหน่งของการตรวจวัดอุณหภูมิในแต่ละบริเวณ

4.1.1 การทดสอบผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียร

ภายในท่อปลูกผลึกจะมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 บริเวณ และมีการสูบลuft ออกจากท่อปลูกผลึกโดยใช้เครื่องสูบลuft เพื่อให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ จากนั้นจะอัดก๊าซอาร์กอนสู่อุณหภูมิเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าสู่ในระบบ หลังจากนั้นเริ่มให้ความร้อนภายในระบบ โดยมีการบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 22 วินาที ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองการทดสอบผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรสำหรับเตาที่จะใช้ปลูกผลึก $\text{CsSrF}_3(\text{TV})$ ดังภาพที่

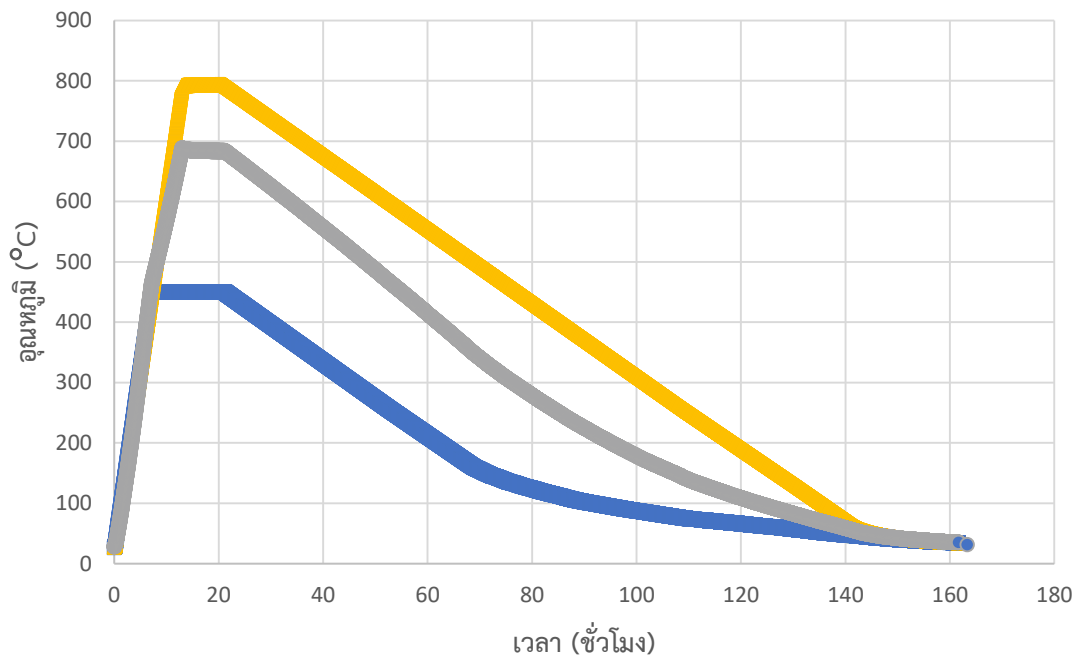
4.2



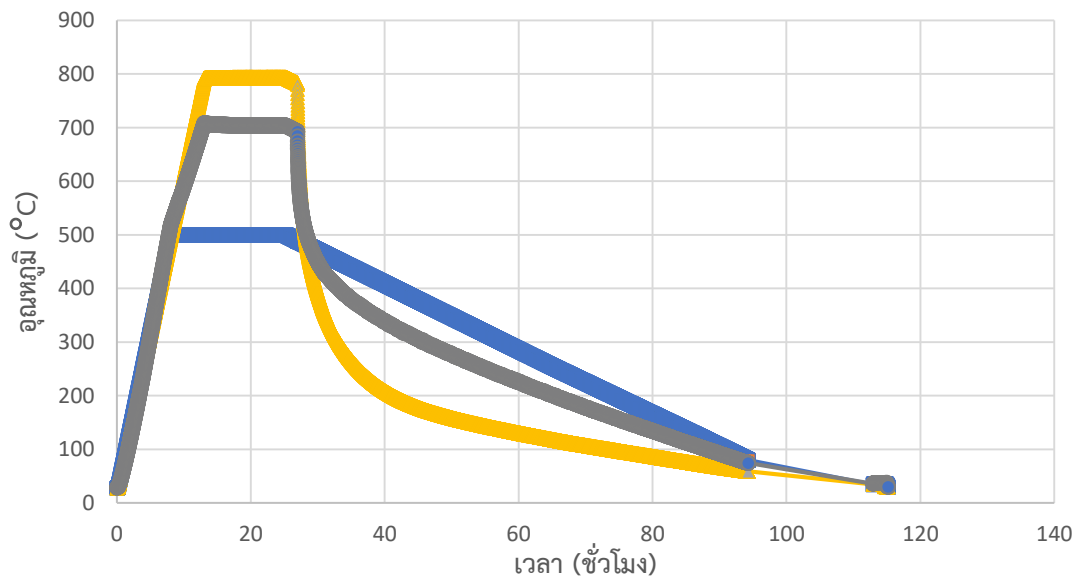
ภาพที่ 15 กราฟผลการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก

4.1.2 การหาเกรนเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

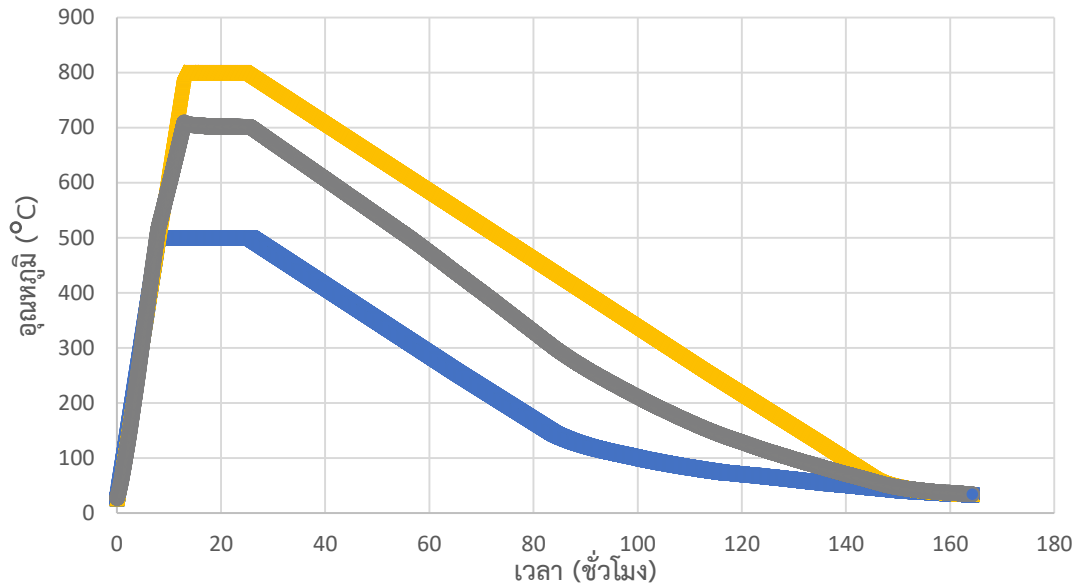
ในการหาเกรนเดียนต์ของอุณหภูมินั้น เป็นวิธีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึก ซึ่งเป็นการปรับเทอร์โมคัปเปิลที่บริเวณกลางเตาปลูกผลึกให้ค่อย ๆ เคลื่อนที่แล้วอ่านค่าอุณหภูมิในตำแหน่งนั้น ๆ จากนั้นจะนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลและอุณหภูมิที่วัดได้ แต่ในการทดลองนี้จะคำนวณจากการกราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature profile) และลักษณะทางกายภาพของเตาปลูกผลึก



ภาพที่ 16 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ครั้งที่ 1

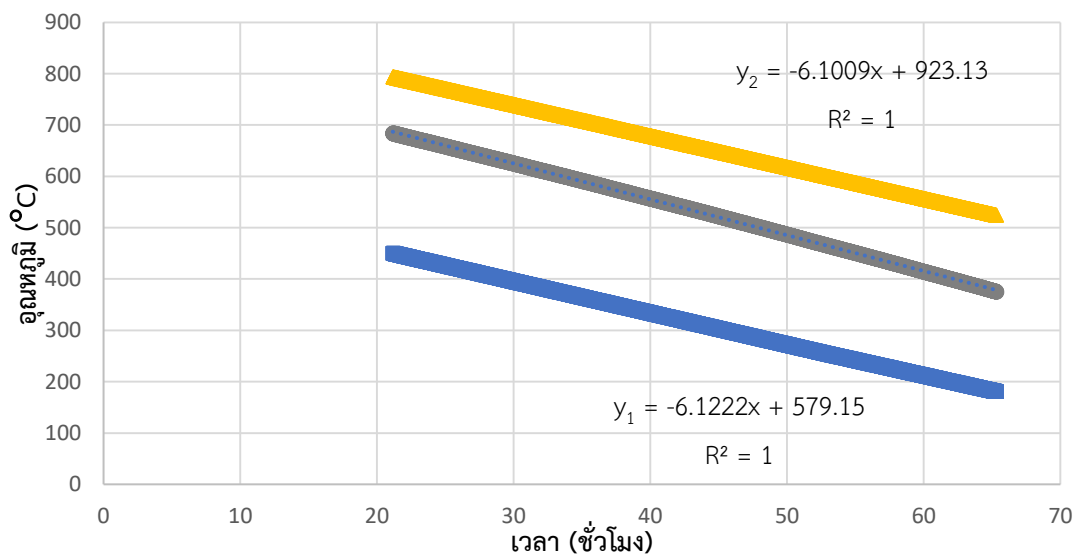


ภาพที่ 17 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ครั้งที่ 2



ภาพที่ 18 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ครั้งที่ 3

ภาพที่ 4.3 – 4.5 เป็นกราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ได้ขณะการปลูกผลึก ซึ่งจะสามารถนำมาคำนวณเกรเดียนต์ของอุณหภูมิได้ ซึ่งจะแสดงการคำนวณจากผลการทดลองครั้งที่ 1 ดังต่อไปนี้ โดยเริ่มต้นจากการนำภาพที่ 4.3 มาขยายให้เห็นเพียงช่วงกราฟที่เป็นช่วงการลดลงของอุณหภูมิ ซึ่งข้อมูลทั้ง 3 เส้นของกราฟจะต้องขนานกันทั้ง 3 เส้น ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 19 กราฟช่วงการลดลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ครั้งที่ 1

จากภาพที่ 4.6 จะทำให้ได้สมการเส้นตรงของแต่ละกราฟทั้งบริเวณอุณหภูมิสูงและบริเวณอุณหภูมิต่ำซึ่งเท่ากับ $y_2 = -6.1009x + 923.13$ และ $y_1 = -6.1222x + 579.15$ ตามลำดับ เพื่อใช้ในการคำนวณหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิต่อไป โดยความชันจากสมการเส้นตรงดังกล่าว คืออัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature rate) นั่นเอง ส่วนเกรเดียนต์ของอุณหภูมินั้นมาจากลักษณะทางกายภาพของเตาปลูกผลึก ซึ่งจากภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าบริเวณที่ใช้ปลูกผลึกมีระยะห่างจากบริเวณอุณหภูมิสูงและบริเวณอุณหภูมิต่ำเป็น 25 มิลลิเมตร จากนั้นหาความแตกต่างของอุณหภูมিবริเวณสูงและอุณหภูมিবริเวณปลูกผลึก กับความแตกต่างของอุณหภูมিবริเวณต่ำและอุณหภูมিবริเวณปลูกผลึก จะได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของอุณหภูมিবริเวณต่ำหรือบริเวณสูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมিবริเวณปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 1 - 3

การทดลอง	ความแตกต่างของอุณหภูมিবริเวณต่ำและอุณหภูมিবริเวณปลูกผลึก (องศาเซลเซียส)	ความแตกต่างของอุณหภูมিবริเวณสูงและอุณหภูมিবริเวณปลูกผลึก (องศาเซลเซียส)
ครั้งที่ 1	236	108
ครั้งที่ 2	205	88
ครั้งที่ 3	201	99

จากนั้นนำความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าว มาคำนวณเพื่อหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ} = \frac{\text{ความแตกต่างของบริเวณอุณหภูมิปลูกผลึกกับบริเวณอุณหภูมิอื่น}}{\text{ระยะห่างของบริเวณอุณหภูมิปลูกผลึกกับบริเวณอุณหภูมิอื่น}} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำและอุณหภูมิบริเวณสูงของการทดลองที่ 1 – 3

การทดลอง	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำ (องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร)	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณสูง (องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร)
ครั้งที่ 1	9.44	4.32
ครั้งที่ 2		
ครั้งที่ 3	8.04	3.96

เนื่องจากการทดลองครั้งที่ 2 เกิดเหตุการณ์ความผิดปกติของขดลวดทำความร้อนขาดออกจากกัน ทำให้การปลูกผลึกในการทดลองนี้ล้มเหลว จึงไม่ถูกนำมาคำนวณหาเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำและบริเวณสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อได้ค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิมาแล้วจะสามารถคำนวณหาอัตราการปลูกผลึก (Growth rate) ได้จาก

$$\text{อัตราการปลูกผลึก} = \frac{\text{อัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก}}{\text{เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ}} \quad (4.2)$$

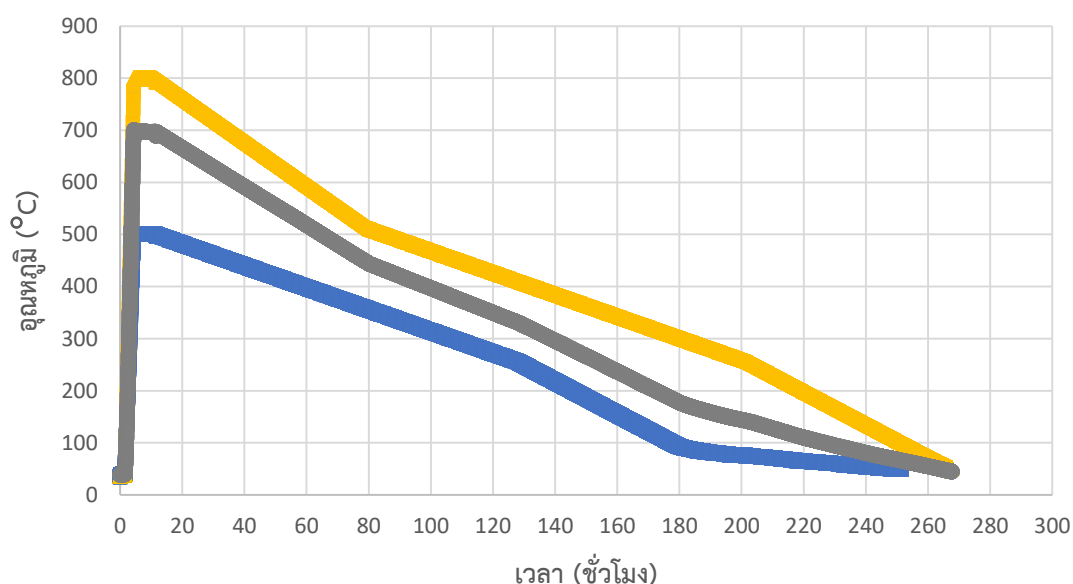
ในการคำนวณอัตราการปลูกผลึก จะใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณสูงเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึกนั้น มีค่าใกล้เคียงหรือค่อนข้างต่ำกับอุณหภูมิบริเวณสูง ดังนั้นจึงต้องใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิสูงในการคำนวณ ซึ่งจะแสดงอัตราการปลูกผลึกที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อัตราการปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 1 – 3

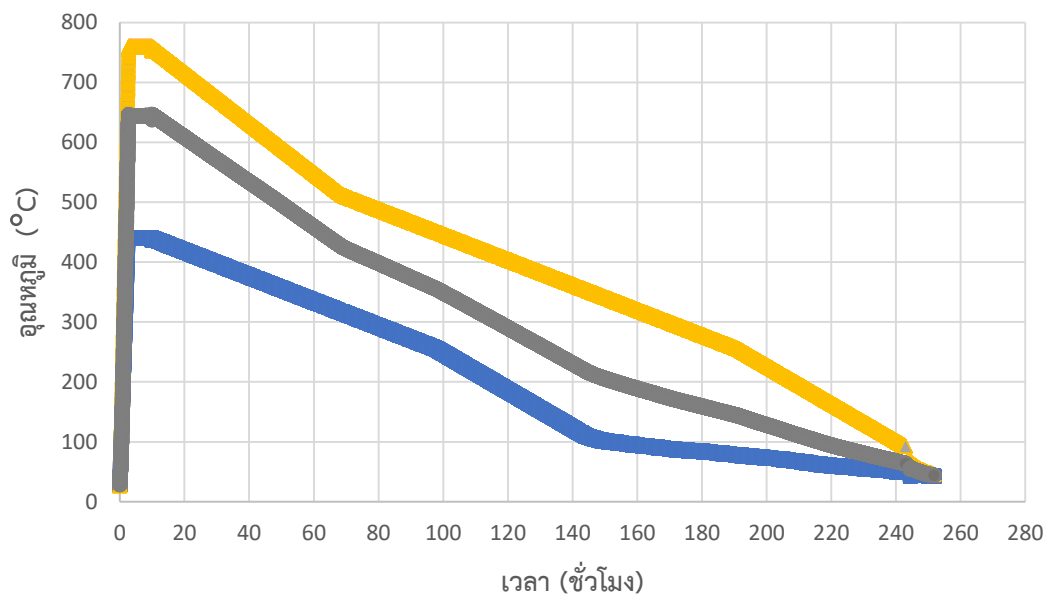
การทดลอง	อัตราการปลูกผลึก (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)
ครั้งที่ 1	1.61
ครั้งที่ 2	
ครั้งที่ 3	1.72

จากการทดลองครั้งที่ 1 – 3 เป็นการทดลองโดยใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิในการปลูกผลึกเท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเมื่อปลูกผลึกสำเร็จพบว่า ผลึกที่ได้มีลักษณะขุ่นมัว และมีบางส่วนของผลึกมีรอยแตกขึ้นภายในเนื้อของผลึก จึงได้จัดหาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่หือใหม่ แทนอุปกรณ์ตัวเก่า เนื่องจากอุปกรณ์ตัวเก่าไม่สามารถตั้งค่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกได้น้อยกว่านี้ได้

จากปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการปลูกผลึกในครั้งที่ 4 – 5 โดยใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิในการปลูกผลึกเท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที และในการทดลองครั้งที่ 5 ได้ปรับการตั้งค่าอุณหภูมิสูงและต่ำที่แตกต่างจากการทดลองอื่น ๆ อีกด้วย จึงได้กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึกดังภาพที่ 4.7 และ 4.8



ภาพที่ 20 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ครั้งที่ 4



ภาพที่ 21 กราฟผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก CsSrI₃(TL) ครั้งที่ 5

จากนั้นจึงสามารถนำมาคำนวณเกรเดียนต์ของอุณหภูมิได้ ซึ่งใช้วิธีการคำนวณเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1 – 3 จะได้ตารางต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณต่ำหรือบริเวณสูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 4 - 5

การทดลอง	ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณต่ำและอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึก (องศาเซลเซียส)	ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณสูงและอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึก (องศาเซลเซียส)
ครั้งที่ 4	198	102
ครั้งที่ 5	204	116

ตารางที่ 4.6 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำและอุณหภูมิบริเวณสูงของการทดลองครั้งที่ 4 – 5

การทดลอง	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณต่ำ (องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร)	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณสูง (องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร)
ครั้งที่ 4	7.92	4.08
ครั้งที่ 5	8.16	4.64

ตารางที่ 4.7 อัตราการปลูกผลึกของการทดลองครั้งที่ 4 – 5

การทดลอง	อัตราการปลูกผลึก (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)
ครั้งที่ 4	1.02
ครั้งที่ 5	0.90

4.2 การทดลองปลูกผลึก

4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1) สารเคมี ได้แก่ CsI ชนิดผงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999%

SrI ชนิดผงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9%

TlI ชนิดผงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999%

2) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.0001 กรัม

3) ภาชนะปลูกผลึกทำด้วยแก้วควอทซ์ (Quartz) ขนาด 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ยาว 42 เซนติเมตร ก้นแก้วเป็นแหลมขนาดมุมประมาณ 30°

4) เต้าปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น

5) ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์

6) เครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner)

4.2.2 การเตรียมสารเพื่อการทดลองปลูกผลึก

ทำการเตรียมสารเพื่อการทดลองปลูกผลึก CsSrI₃(Tl) โดยคำนวณหาปริมาณสารต่อปริมาตรหลังการหลอม และเป็นผลึกในภาชนะบรรจุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 12.7 เซนติเมตร และต้องการปลูกผลึกขึ้นให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 5

เซนติเมตร ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีการเตรียมสัดส่วนของสารที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองปลูกผลึก ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนปริมาณของสารตั้งต้นและสารเจือที่ใช้ในการปลูกผลึก

การทดลอง	อัตราส่วนปริมาณของสารตั้งต้น CsI (ร้อยละ)	อัตราส่วนปริมาณของสารตั้งต้น Srl ₂ (ร้อยละ)	ปริมาณของสารเจือ TU (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ครั้งที่ 1	70	30	0.35
ครั้งที่ 2	95	5	0.35
ครั้งที่ 3	95	5	0.35
ครั้งที่ 4	97	3	0.35
ครั้งที่ 5	99	1	0.35

ตารางที่ 4.9 ปริมาณของสารตั้งต้นและสารเจือที่ใช้ในการปลูก

การทดลอง	ปริมาณของสารตั้งต้น CsI (กรัม)	ปริมาณของสารตั้งต้น Srl ₂ (กรัม)	ปริมาณของสารเจือ TU (มิลลิกรัม)
ครั้งที่ 1	11.330	6.438	9.57
ครั้งที่ 2	16.565	1.156	10.31
ครั้งที่ 3	16.565	1.156	10.31
ครั้งที่ 4	17.019	0.698	10.37
ครั้งที่ 5	17.479	0.234	10.44

ทั้งนี้ในการบรรจุสารตั้งต้นลงในภาชนะปลูกผลึก จะต้องทำความสะอาดภาชนะบรรจุด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกด้วย หลังจากนั้นผสมสารตั้งต้นให้เข้ากัน แล้วบรรจุลงในภาชนะปลูกผลึก และนำไปประกบกับฝาท่ออะลูมิเนียมให้สนิทก่อนติดตั้งไว้ที่บริเวณเตาปลูกผลึก

4.2.3 การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

ภาชนะปลูกผลึกที่บรรจุสารตั้งต้นไว้จะถูกนำมายึดติดกับฝาท่อชนิดอะลูมิเนียมด้วยกาวทนความร้อนสูง เพื่อป้องกันไม่ให้หลุดแก้วหลุดออกจากท่อในขณะที่ทำการปลูกผลึกอยู่ ซึ่งภาชนะปลูกผลึกจะถูกยึดติดกับอุปกรณ์จับยึดหลอดทดลอง เพื่อจับยึดให้ภาชนะปลูกผลึกอยู่บริเวณกึ่งกลาง

ของเตาปลูกผลึก หลังจากนั้นจะทำการสูบอากาศออกจากท่อปลูกผลึกประมาณ 15 นาที เมื่อเสร็จสิ้นจะอัดก๊าซอาร์กอนไปเพื่อให้ในระบบการปลูกผลึก เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้าสู่ในระบบขณะปลูกผลึก จากนั้นทำการกำหนดแหล่งจ่ายความร้อนแก่ระบบเตาปลูกผลึกที่บริเวณอุณหภูมิสูง (High temperature) และบริเวณอุณหภูมิต่ำ (Low temperature) ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

ในการกำหนดแหล่งจ่ายความร้อนแก่ระบบเตาปลูกผลึกที่บริเวณทั้งสองดังกล่าว อาศัยหลักการจากคุณสมบัติของจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารตั้งต้นและสารเจือ ซึ่งจะต้องกำหนดอุณหภูมิให้มากกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อให้สารที่อยู่ในรูปของผงกลายเป็นของเหลว และจะต้องกำหนดอุณหภูมิให้น้อยกว่าจุดเดือด เพื่อป้องกันไม่ให้สารเคมีสูญเสียบนรูปของก๊าซจากการระเหย เมื่อรู้ว่าคุณสมบัติของจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของสารเป็นเช่นไรแล้ว จะทำการสมมติอุณหภูมิที่จะกำหนดในการปลูกของบริเวณอุณหภูมิปลูกผลึก (Growth temperature) ไว้ เช่น หากต้องการใช้อุณหภูมิเพื่อปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TI})$ ต้องการกำหนดอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสในการปลูกผลึก จะต้องตั้งอุณหภูมิที่บริเวณสูงและต่ำเท่ากับ 700 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยการทดลองในแต่ละครั้งได้กำหนดเงื่อนไขในการปลูกผลึกที่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่บริเวณปลูกผลึกนั้น เป็นอุณหภูมิที่คาดการณ์เพื่อจะใช้ในการปลูกผลึก ไม่ได้มาจากการทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึกดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขการกำหนดอุณหภูมิในแต่ละบริเวณเพื่อใช้ในการปลูกผลึก

การทดลอง	อุณหภูมิที่บริเวณ อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่บริเวณ ปลูกผลึก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่บริเวณ อุณหภูมิสูง (องศาเซลเซียส)
ครั้งที่ 1	450	700	800
ครั้งที่ 2	500	700	800
ครั้งที่ 3	500	700	800
ครั้งที่ 4	500	650	760
ครั้งที่ 5	440	640	760

นอกจากเงื่อนไขในการกำหนดอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกเงื่อนไขที่สำคัญต่อการปลูกผลึกอีกด้วย ซึ่งก็คือ การกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้น (Ramp-up rate) และการลดลง (Cool-down rate) ของอุณหภูมิในขณะที่ปลูกผลึกอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดอัตราการลดลงของอุณหภูมิ เพราะหากกำหนดให้อัตราการลดลงเร็วมากเกินไป จะส่งผลให้ผลึกที่ปลูกได้เกิดการแตกหัก ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการกำหนดอัตราดังกล่าวด้วย ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นและการลดลงของอุณหภูมิเพื่อใช้ในการปลูกผลึก

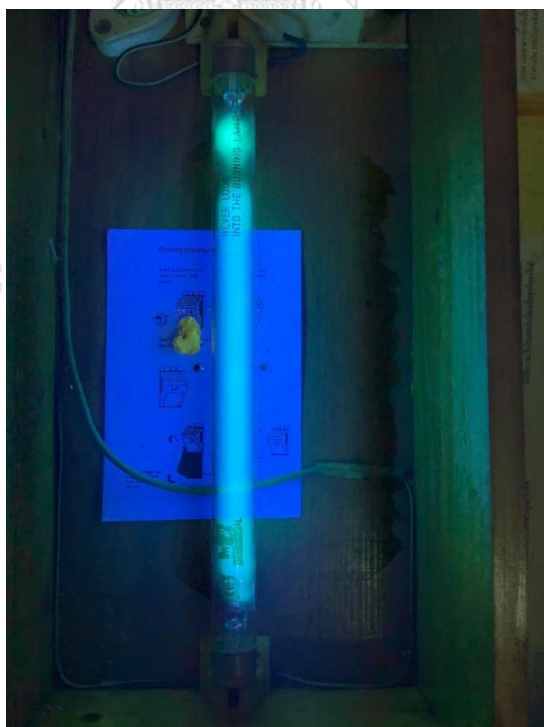
การทดลอง	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)	อัตราการลดลงของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)
ครั้งที่ 1	1	0.1
ครั้งที่ 2	1	0.1
ครั้งที่ 3	1	0.1
ครั้งที่ 4	1	0.05
ครั้งที่ 5	1	0.05

4.2.4 ผลการปลูกผลึก

- การปลูกผลึกรอบที่ 1 ใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการทดลองปลูกผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TV})$ ทั้ง 3 ครั้ง พบว่าผลึกจากการทดลองครั้งที่ 1 มีลักษณะเป็นสีส้ม ไม่ใส และมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการนำผลึกออกจากภาชนะปลูกผลึกพบว่า ผลึกเกิดการแตกหักออกเป็นเศษ ๆ นอกไปจากนั้นผลึกที่ได้ยังมีลักษณะที่เป็นผง ๆ อยู่ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจเกิดมาจากการที่ขดลวดภายในเตาปลูกผลึกมีปัญหาขึ้น โดยพบว่าขดลวดภายในเตาปลูกผลึกเกิดการขาดออกจากกันในขณะที่มีการปลูกผลึกครั้งที่ 2 ทำให้การปลูกผลึกครั้งนี้ไม่สำเร็จ และสุดท้ายในการทดลองครั้งที่ 3 ผลึกที่ได้มีลักษณะค่อนข้างใส แต่พบปัญหาว่าเมื่อนำผลึกออกจากภาชนะปลูกผลึกแล้ว มีบางส่วนของภาชนะปลูกผลึกหลอมรวมไปกับผลึกทำให้บางส่วนของผลึกนั้นมีรอยแตกและเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ซึ่งผลึกจากการทดลองที่ 3 นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติอื่น ๆ สำหรับการใช้งานเพื่อเป็นผลึกวัดรังสีต่อไป



ภาพที่ 22 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 70:30 หลังปลุกเสร็จ



ภาพที่ 23 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 70:30 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี



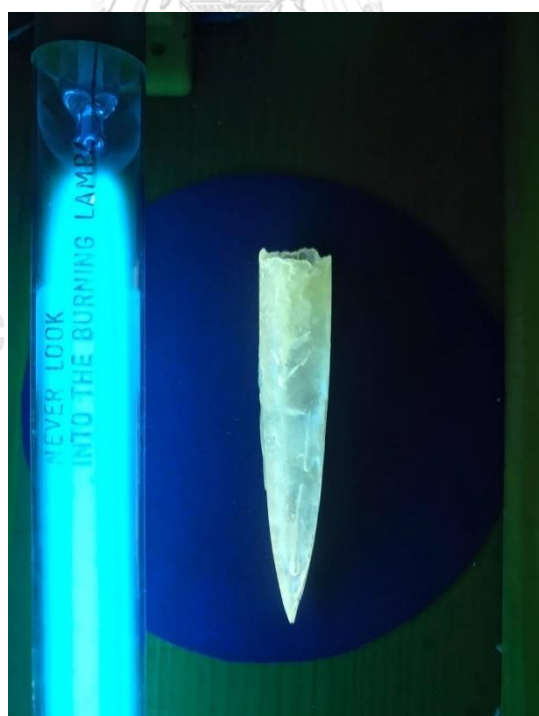
ภาพที่ 24 ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5 หลังปลูกเสร็จ

- การปลูกผลึกรอบที่ 2 ใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที เนื่องจากการทดลองครั้งที่ 1 – 3 พบว่าเมื่อปลูกผลึกเสร็จสิ้น ในบางส่วนของผลึกมีลักษณะที่ขุ่นมัว และมีรอยแตกเกิดขึ้นค่อนข้างมาก จึงได้ทำการเปลี่ยนอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาทีแทน ในการทดลองครั้งที่ 4 – 5

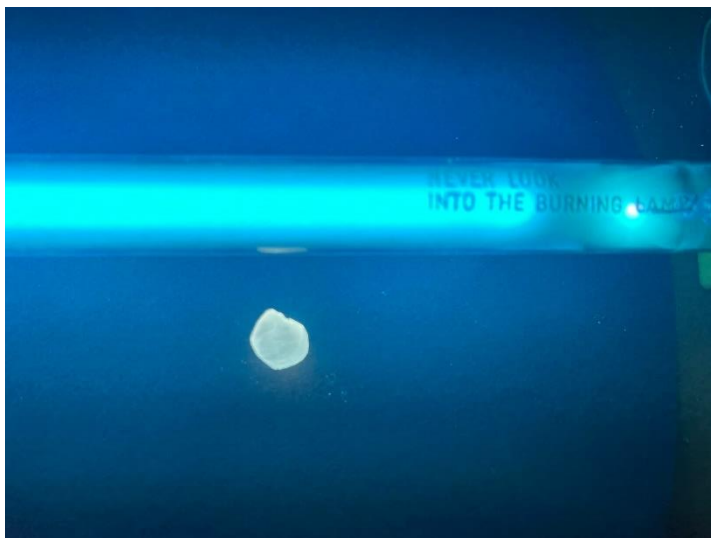
CHULALONGKORN UNIVERSITY



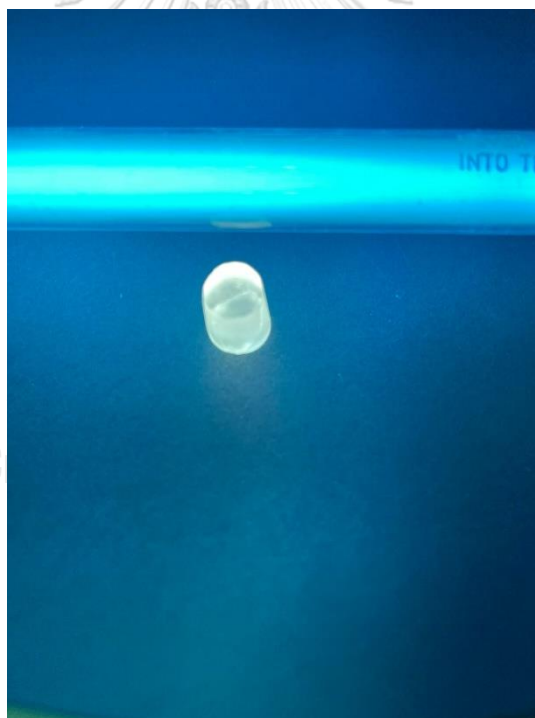
ภาพที่ 25 ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3 หลังปลูกเสร็จ



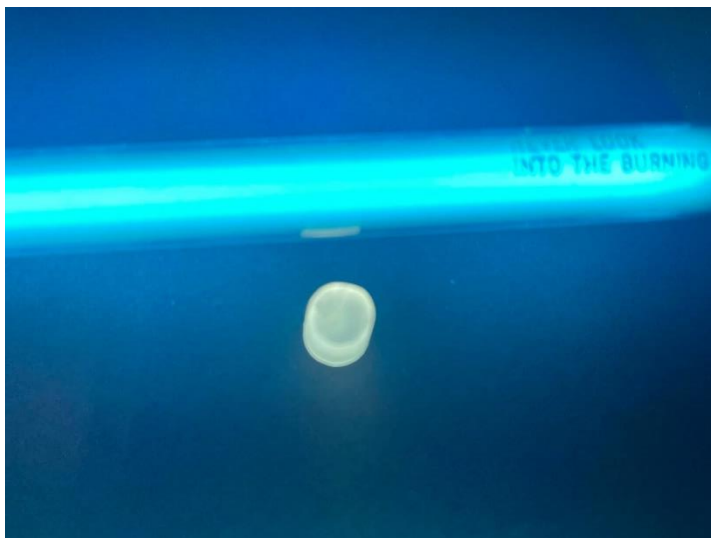
ภาพที่ 26 ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี



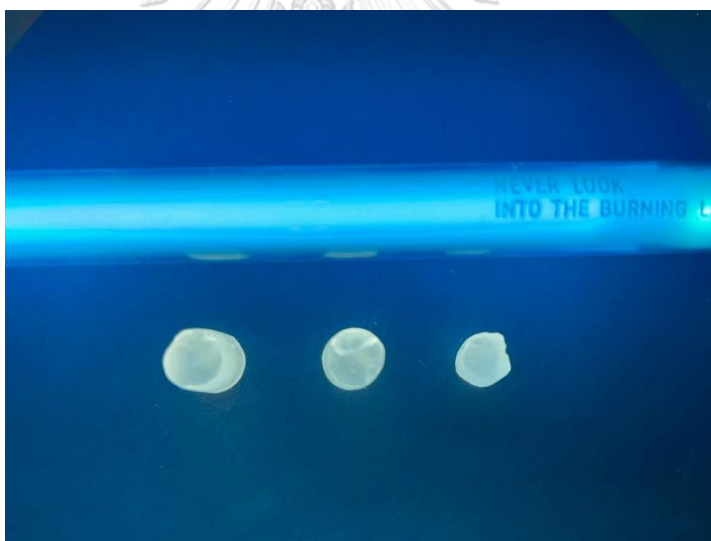
ภาพที่ 27 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 95:5 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี



ภาพที่ 28 ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 97:3 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี



ภาพที่ 29 ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1 หลังจากการตัดและขัด ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี



ภาพที่ 30 ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน หลังจากการตัดและขัด (ซ้าย) 99:1 (กลาง) 97:3 และ (ขวา) 95:5 ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงยูวี

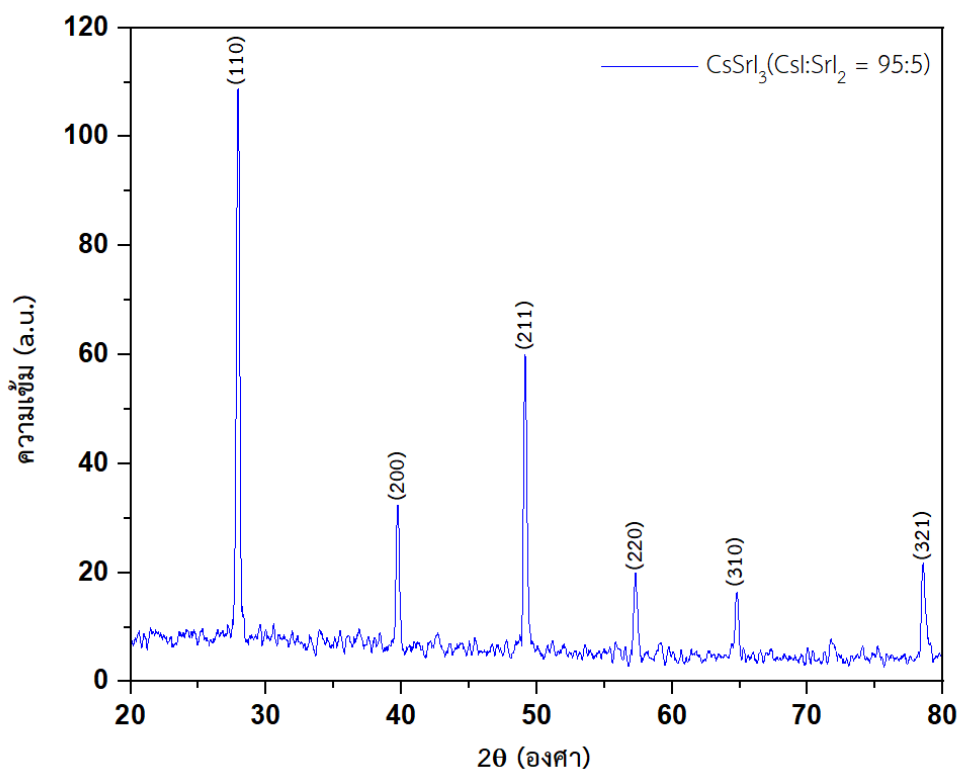
4.3 การตรวจสอบคุณภาพและคุณสมบัติทางแสงของผลึก

มีเพียง 3 การทดลองเท่านั้น ที่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลคุณภาพและคุณสมบัติทางแสงได้ นั่นคือ ผลึกจากการทดลองที่ 3 – 5 ผลึกทั้งหมดที่ถูกปลุกขึ้นจะถูกนำมาทดสอบคุณภาพและคุณสมบัติทางแสงด้วยการวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังนั้นจึงต้องทำการตัดหลอดแก้ว แล้วนำผลึกออกมาขัด

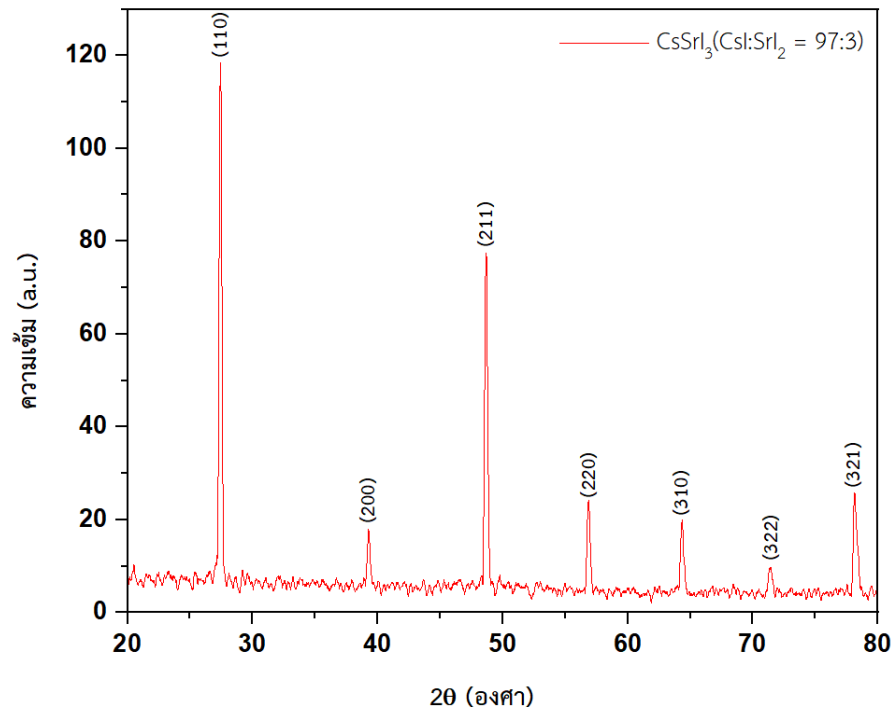
ผิวให้เรียบ แต่ผลึกที่มีอัตราส่วน 95:5 นั้นจะไม่สามารถขัดให้เรียบได้เนื่องจากผลึกเกิดการแตกหักขึ้น หลังจากผ่านการตัดแล้ว จึงมีขนาดเล็กและไม่สามารถขัดผิวหน้าให้เรียบอย่างผลึก 97:3 และ 99:1

4.3.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึก

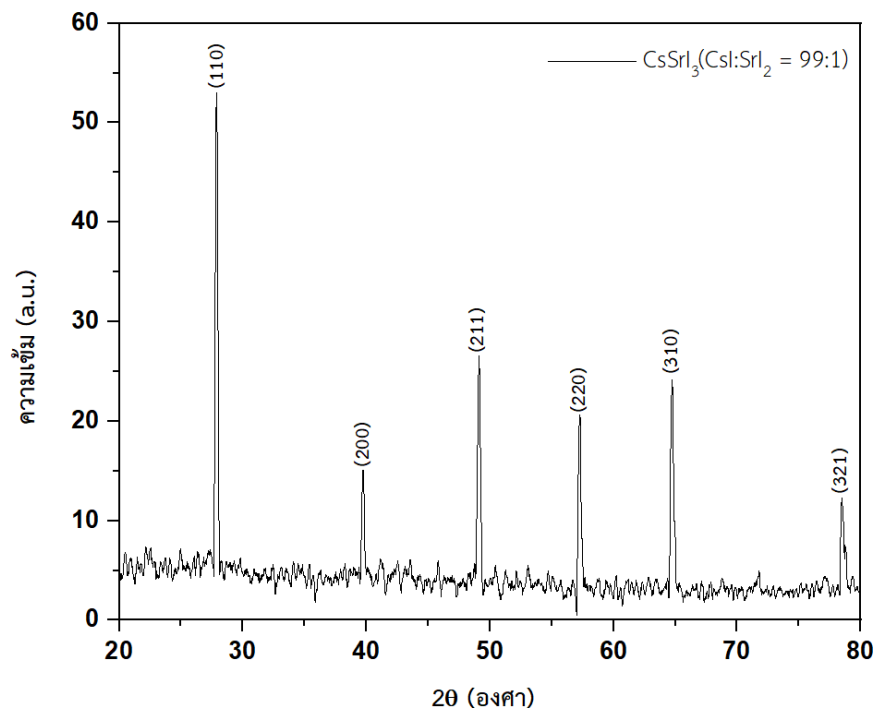
เมื่อนำผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ทั้ง 3 อัตราส่วน $\text{CsI}:\text{SrI} = 95:5$, $\text{CsI}:\text{SrI} = 97:3$ และ $\text{CsI}:\text{SrI} = 99:1$ ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray diffraction (XRD) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น Lab X XRD-6100 ของบริษัท ซิมัดสึ จำกัด (Shimadzu Ltd.) ทำให้พบว่าผลึกทั้งสามมีโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐานหรือมีโครงสร้างที่ปนกันหลายแบบในผลึกชนิดเดียวกัน โดยโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมแบบคิวบิกและมีโครงสร้างที่โดดเด่นชัดเจน คือ โครงสร้างผลึก ระบาย (110) และลำดับรองลงมาคือ ระบาย (211)



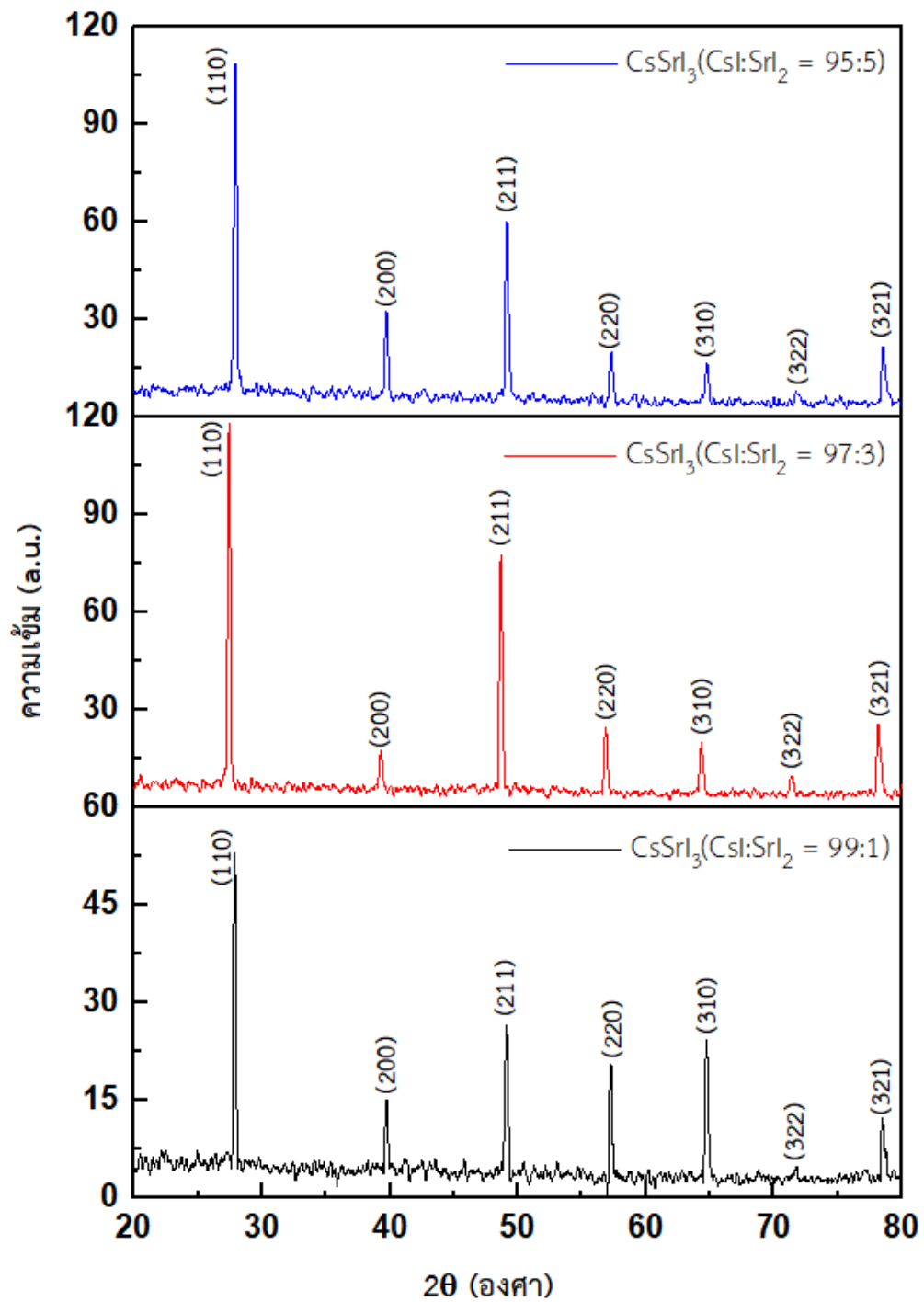
ภาพที่ 31 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5



ภาพที่ 32 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3



ภาพที่ 33 กราฟผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1



ภาพที่ 34 กราฟการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก CsSrI_3 (TI) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ซึ่งภาพที่ 4.18 – 4.20 จะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึกทั้ง 3 อัตราส่วนดังตารางต่อไปนี้ โดยสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบตามกฎของแบรกก์ และสามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซของผลึกได้ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับขนาดค่าคงที่แลตทิซของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ 4.5567 อังสตรอม ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าผลึกที่ปลูกได้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัดนั่นเอง

ตารางที่ 4.12 ขนาดผลึก CsSrI₃(TI) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

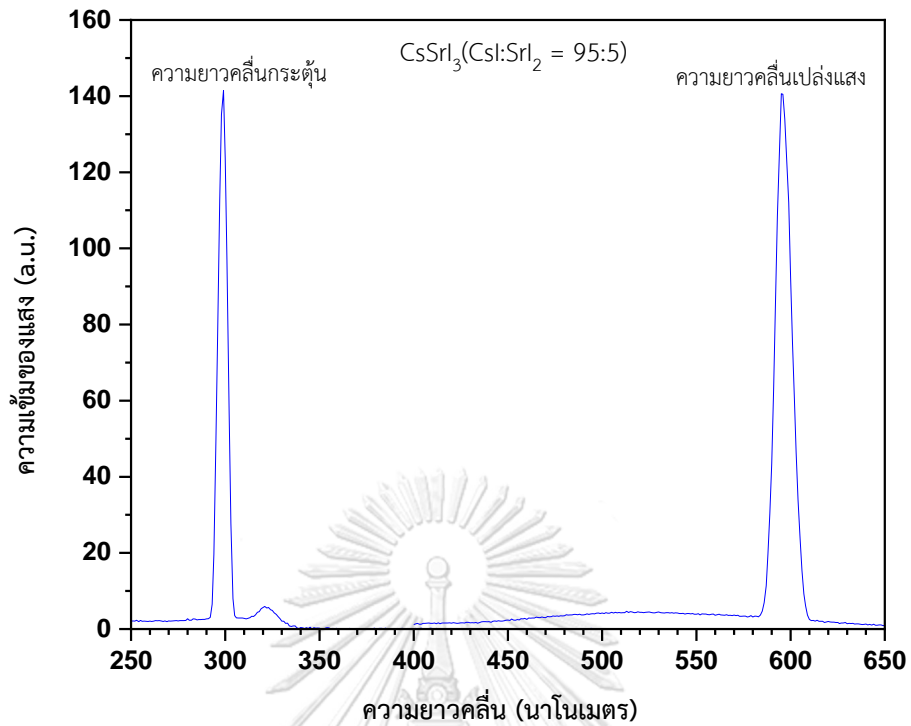
ผลึก	อัตราส่วน CsI:SrI ₂	FWHM	ค่าคงที่แลตทิซ (อังสตรอม)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ความเครียด (ร้อยละ)
CsSrI ₃ (TI)	95:5	0.5545	4.4574 ± 0.0958	16.72 ± 1.15	-2.39
	97:3	0.5563	4.5156 ± 0.0370	16.62 ± 0.93	-1.12
	99:1	0.5623	4.4647 ± 0.0707	16.47 ± 0.89	-2.23

4.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของผลึก

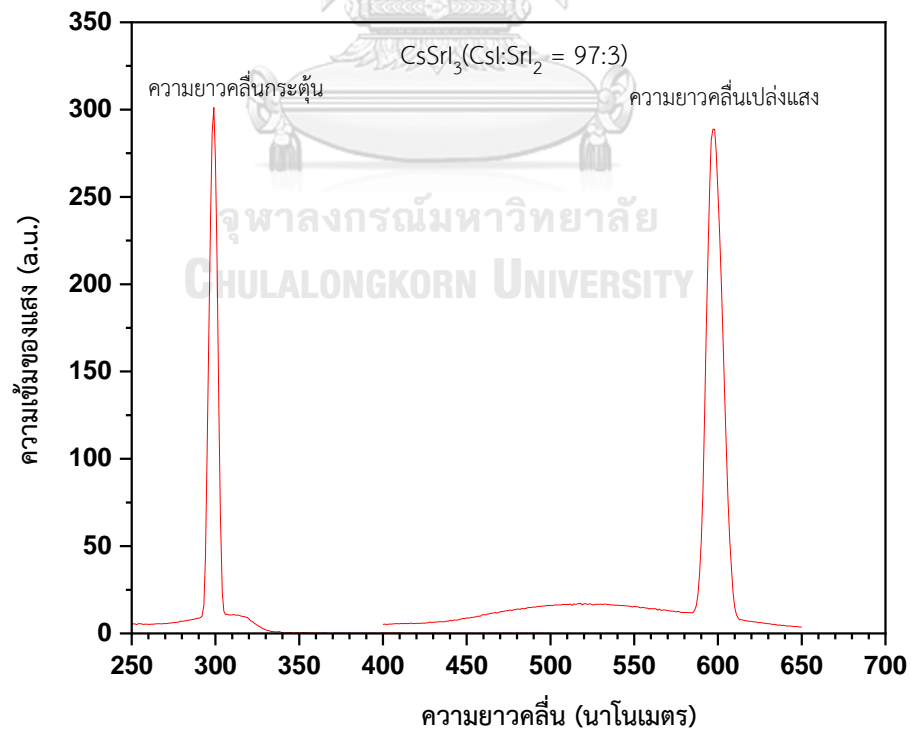
การทดลองในครั้งนี้ ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของผลึกโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ 2 แบบ ซึ่งก็คือ เทคนิคการกระตุ้นด้วยแสง (Photoluminescence spectroscopy) และเทคนิคการส่องผ่านแสงของผลึก (UV-visible spectroscopy)

- เทคนิคการกระตุ้นด้วยแสง (Photoluminescence Spectroscopy)

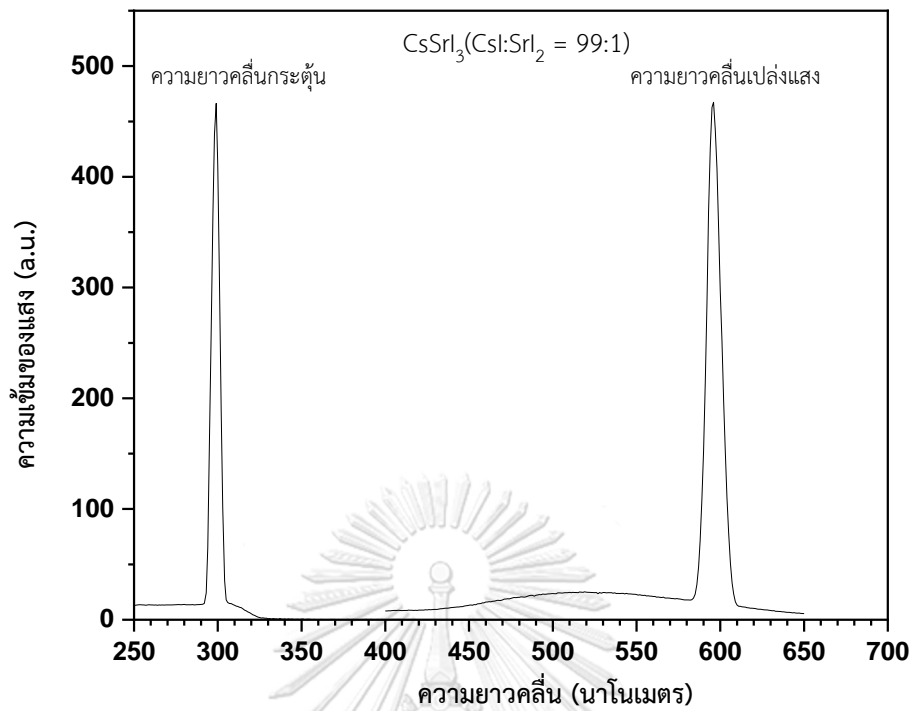
เทคนิคการกระตุ้นด้วยแสง ทำการทดลองโดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 300 นาโนเมตร กระแทกเข้ากับผลึก เมื่อผลึกได้รับการกระตุ้นด้วยแสงดังกล่าว จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในผลึกถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปเป็นสถานะกระตุ้น จากนั้นจะกลับมาสู่สถานะพื้นอีกครั้ง แล้วปลดปล่อยแสงออกมา ซึ่งแสงดังกล่าวเป็นคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละสารประกอบ ทำให้ได้สเปกตรัมดังต่อไปนี้



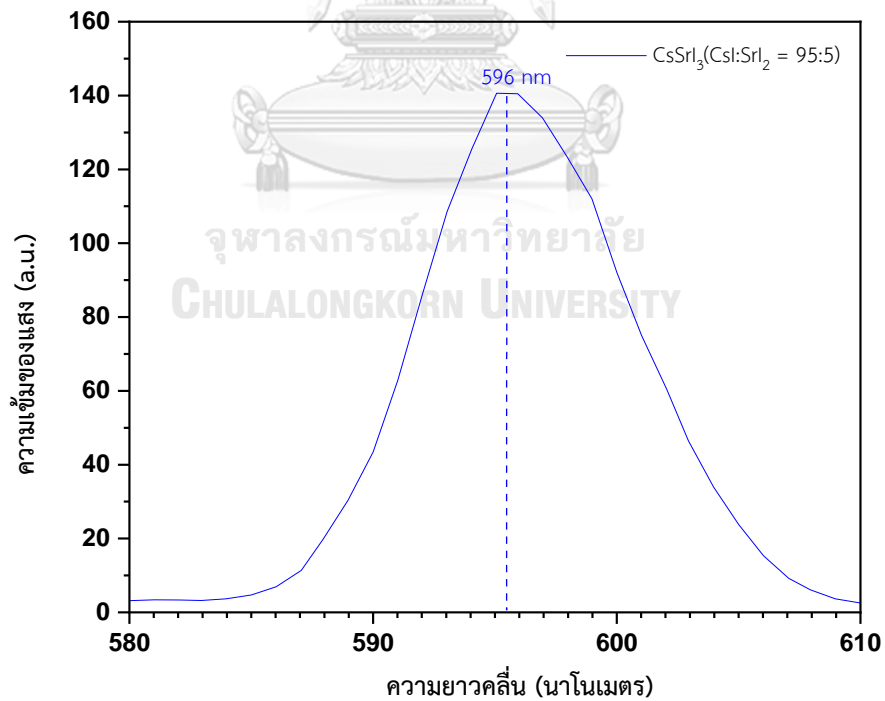
ภาพที่ 35 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5



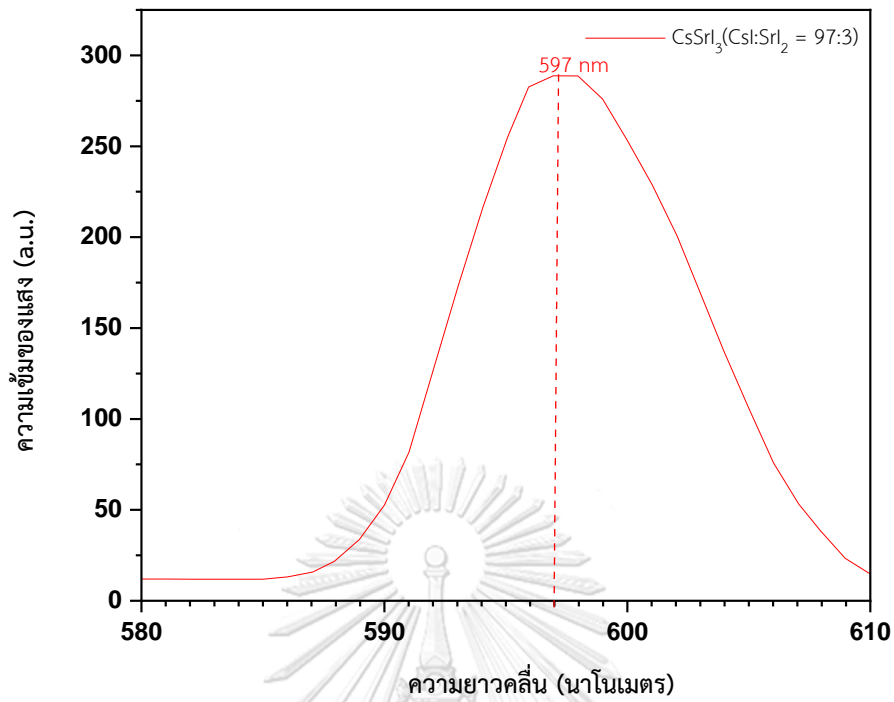
ภาพที่ 36 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3



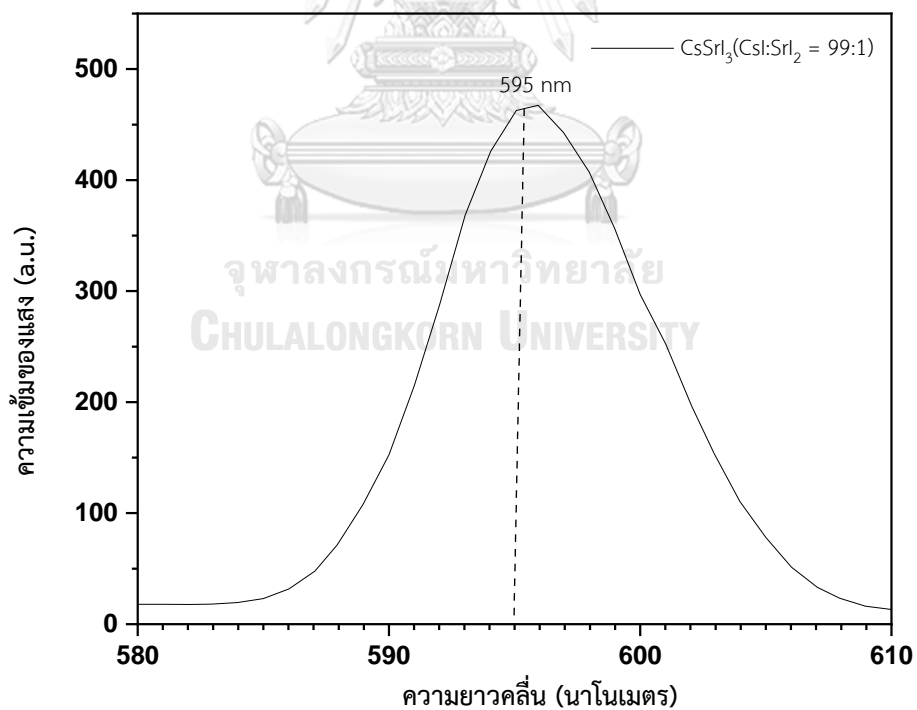
ภาพที่ 37 สเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 300 นาโนเมตร และความยาวคลื่นเปล่งแสงโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1



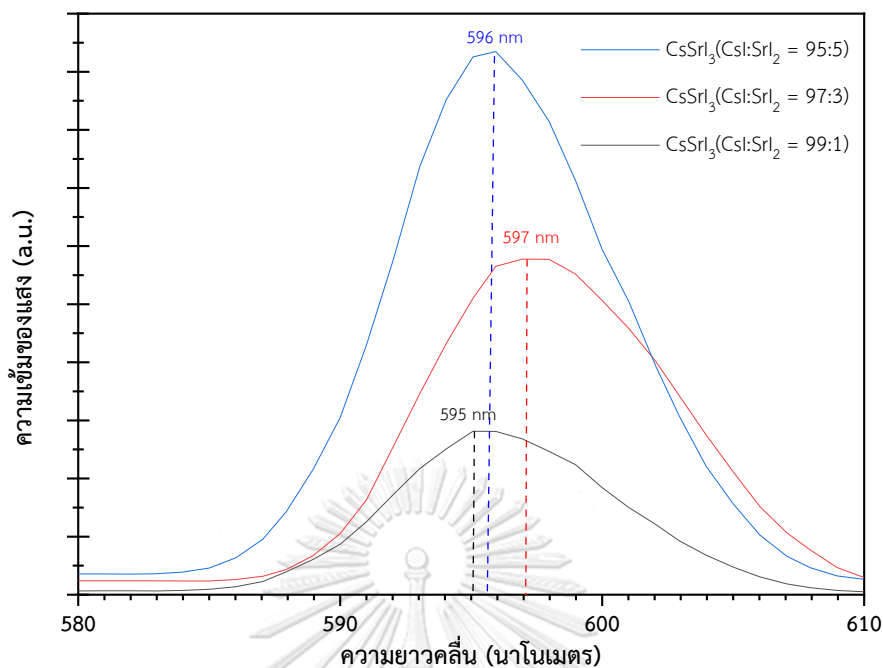
ภาพที่ 38 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5



ภาพที่ 39 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3



ภาพที่ 40 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยโดยผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1



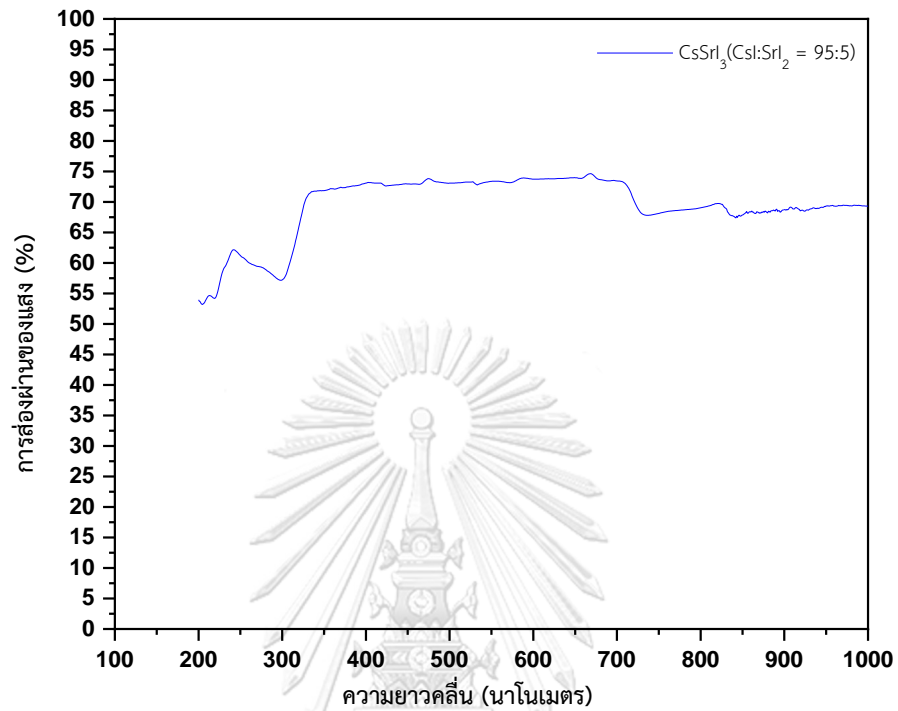
ภาพที่ 41 สเปกตรัมเทียบผลวิเคราะห์จากเทคนิคการกระตุ้นด้วยแสงของผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ทั้งสามอัตราส่วนแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.28 สเปกตรัมความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยพบว่า ผลึกทั้ง 3 อัตราส่วนมีการปลดปล่อยความยาวคลื่นใกล้เคียงกันคือช่วงประมาณ 595-597 นาโนเมตร อันเนื่องมาจากคุณลักษณะที่สำคัญของเทลเลียมนั่นเอง แต่ทั้งสามผลึกแตกต่างกันที่ความเข้มของแสงที่ปลดปล่อยออกมาเท่านั้น

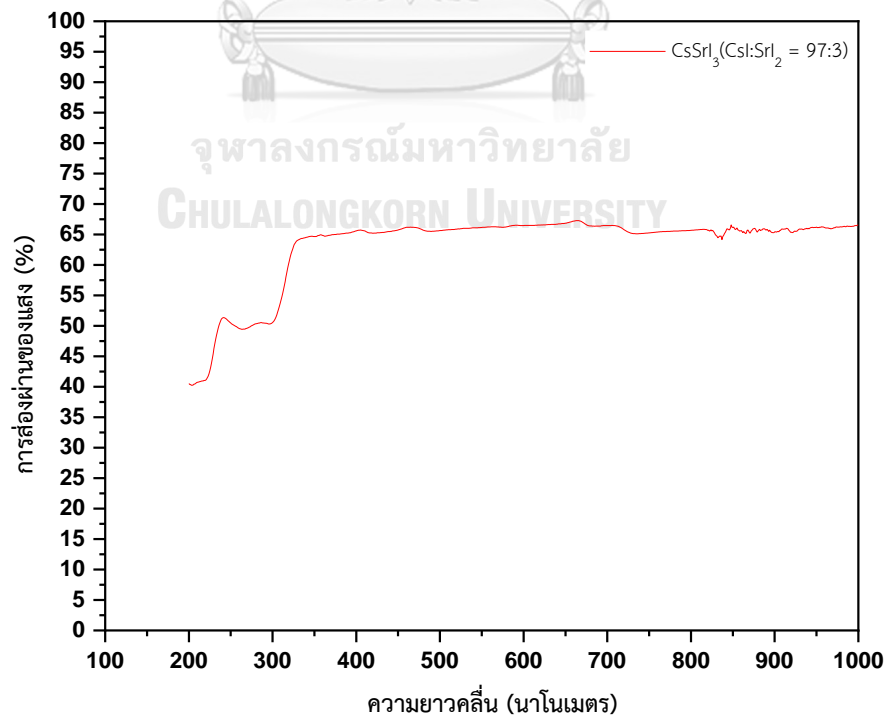
- เทคนิคการส่องผ่านแสง (UV-Vis Spectroscopy)

จากนั้นผลึกทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์การส่องผ่านแสงหรือการดูดกลืนแสงของผลึก โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วงของแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) และแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-3600 ของบริษัท Shimadzu พบว่า ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ มีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ 2 ช่วงความยาวคลื่น โดยช่วงแรกคือช่วงความคลื่นที่ 250 nm และช่วงที่สองคือช่วงความยาวคลื่นที่ 350 nm แต่จะพบว่าภาพที่ 4. กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{Tl})$ ที่มีอัตราส่วน CsI ต่อ SrI_2 เท่ากับ 95:5 มีความผิดปกติไปจากกราฟของผลึกอื่น อัน

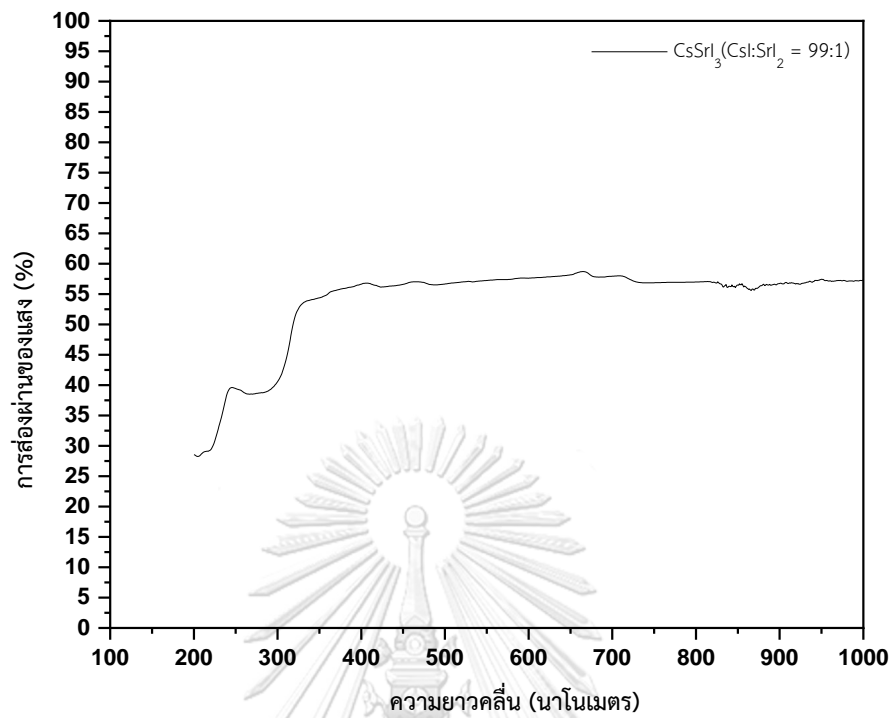
เนื่องมาจากการทำการทดลองปลูกผลึกในตอนต้น ซึ่งทำให้ภายในผลึกอาจมีการปนเปื้อนเกิดขึ้น และผลึกไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน



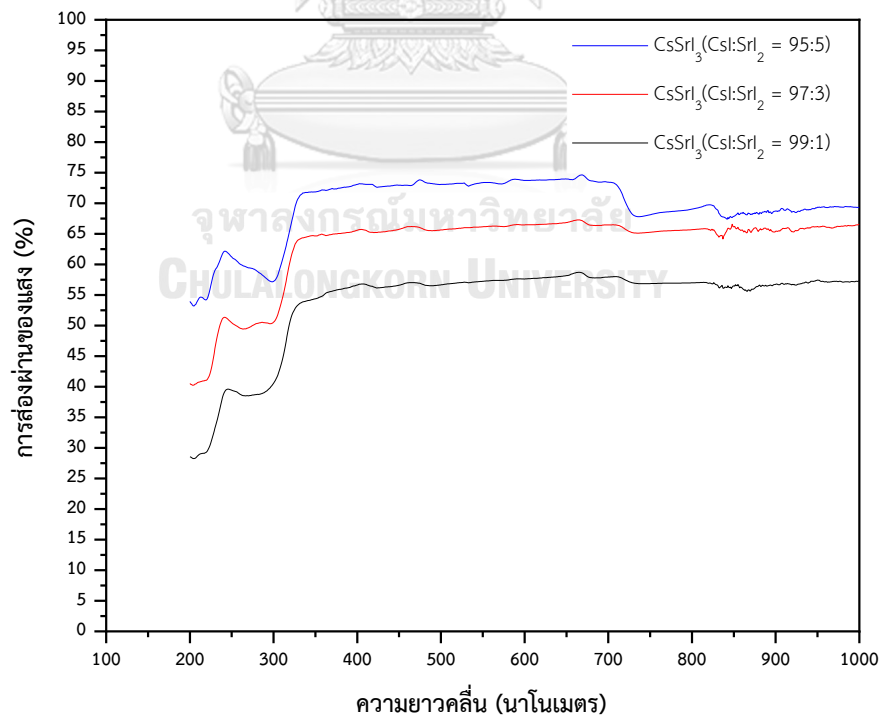
ภาพที่ 42 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ อัตราส่วน 95:5



ภาพที่ 43 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ อัตราส่วน 97:3

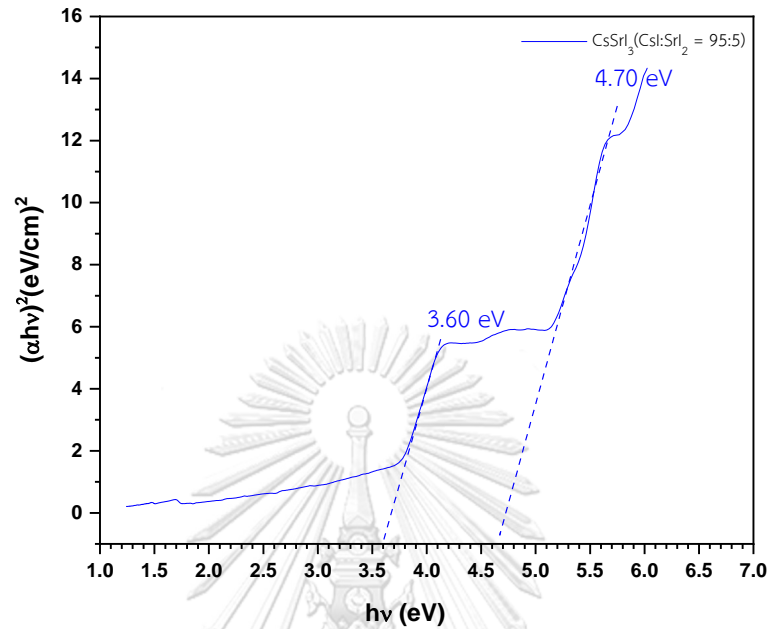


ภาพที่ 44 กราฟการส่องผ่านแสงในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ อัตราส่วน 99:1

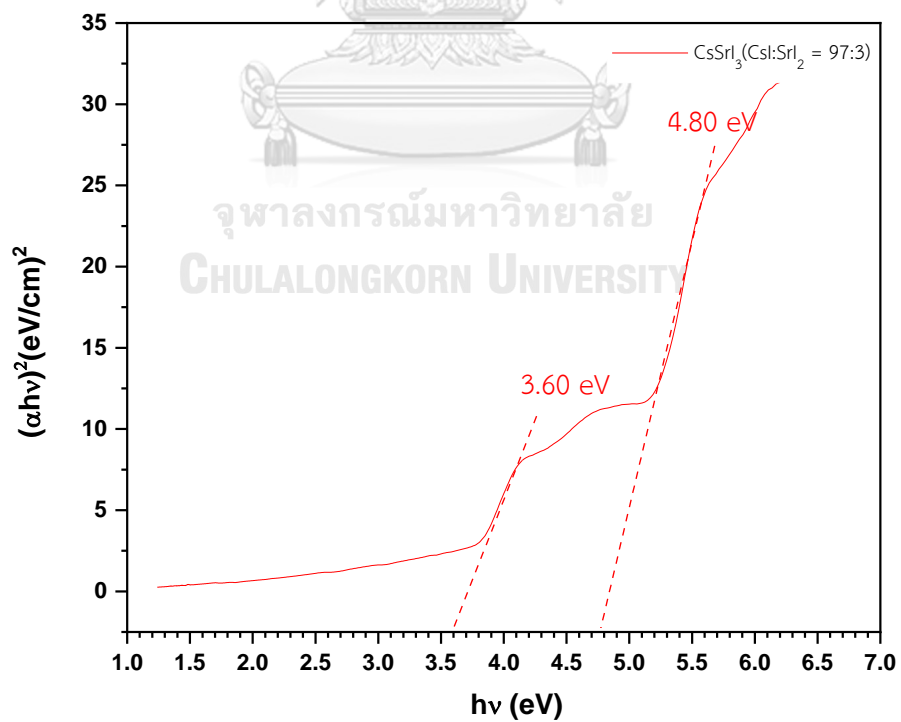


ภาพที่ 45 กราฟการเปรียบเทียบการส่องผ่านแสงในผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ทั้งสามอัตราส่วนที่ต่างกันอย่าง

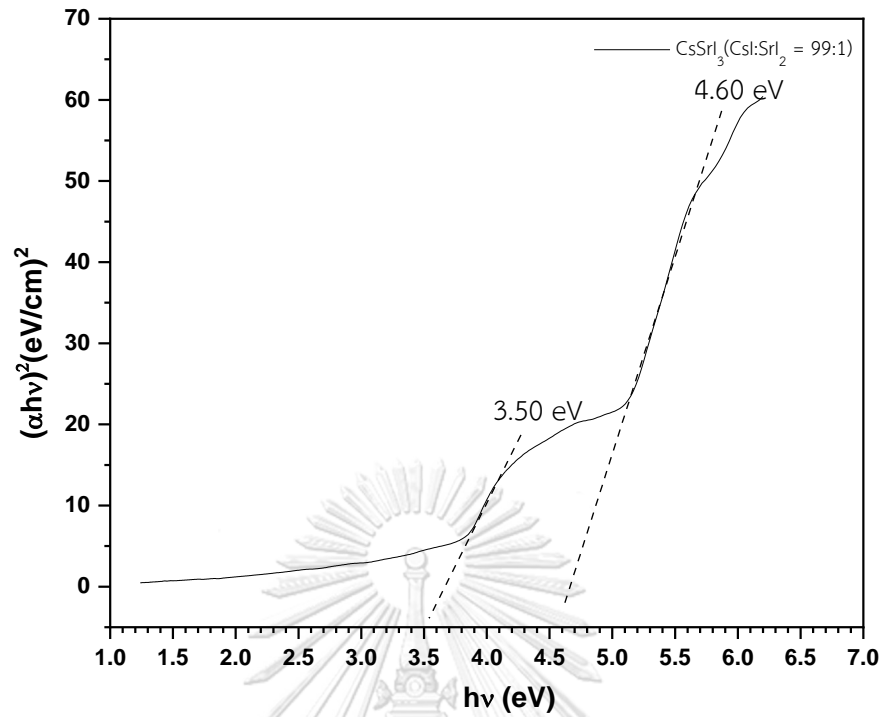
จากภาพที่ 4.29 – 4.31 สามารถนำมาสร้างกราฟต่อเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกได้ จากสมการที่ (2.11) จะทำให้ได้กราฟดังภาพที่ 4.33 – 4.37



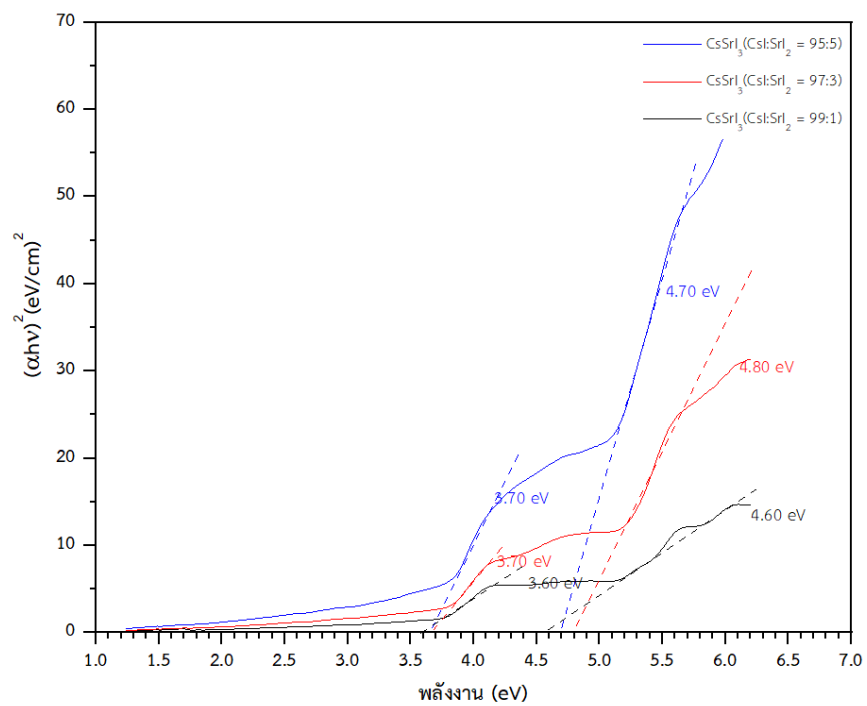
ภาพที่ 46 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI_3 (TI) อัตราส่วน 95:5



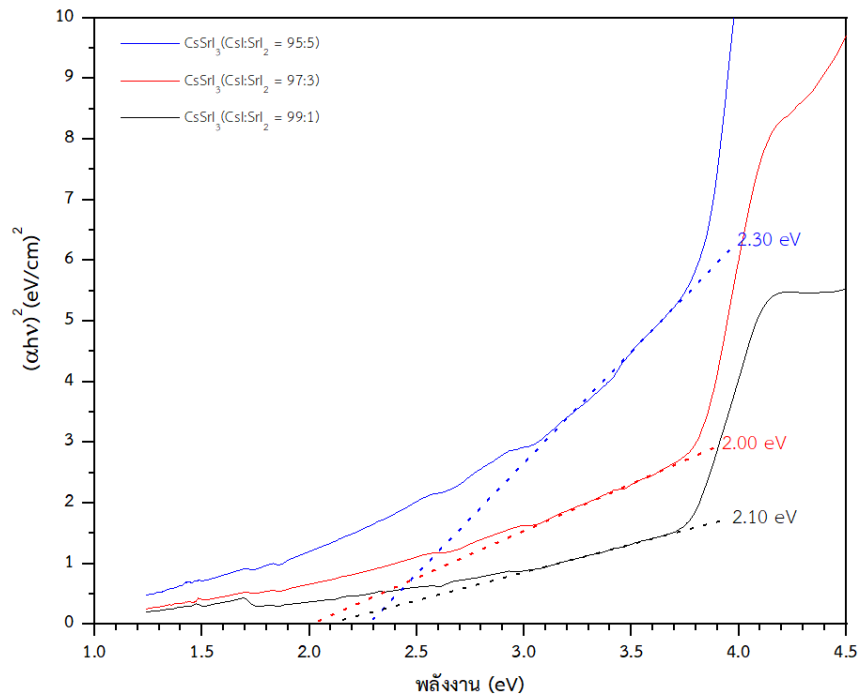
ภาพที่ 47 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI_3 (TI) อัตราส่วน 97:3



ภาพที่ 48 กราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI_3 (Tl) อัตราส่วน 99:1



ภาพที่ 49 กราฟเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI_3 (Tl) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 50 กราฟเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำของผลึก CsSrI₃(TL) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

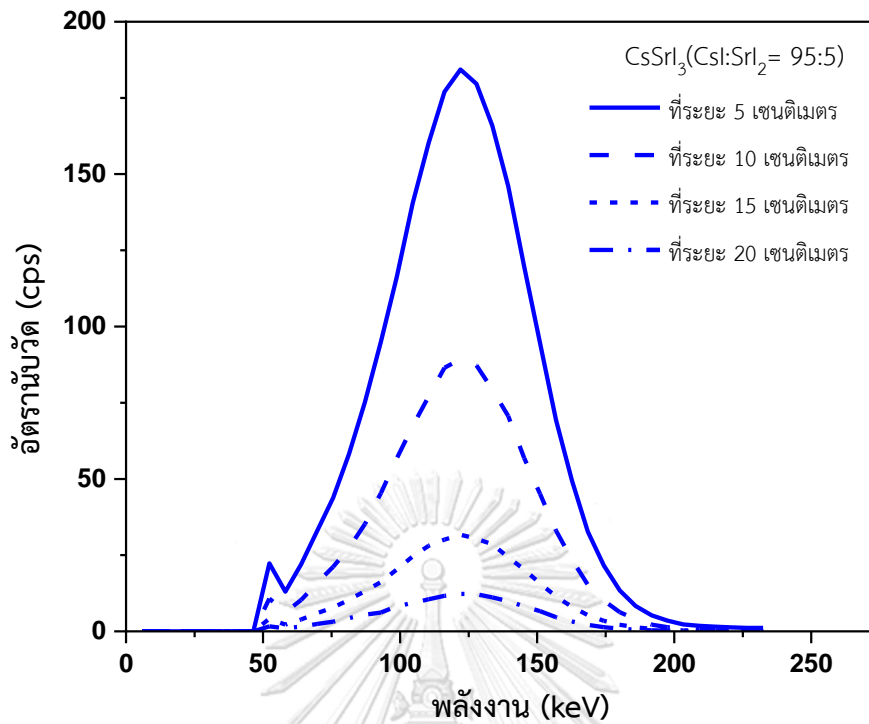
จากกราฟ 4.37 จะทำให้ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกทั้งสาม ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.13 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsSrI₃(TL) ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

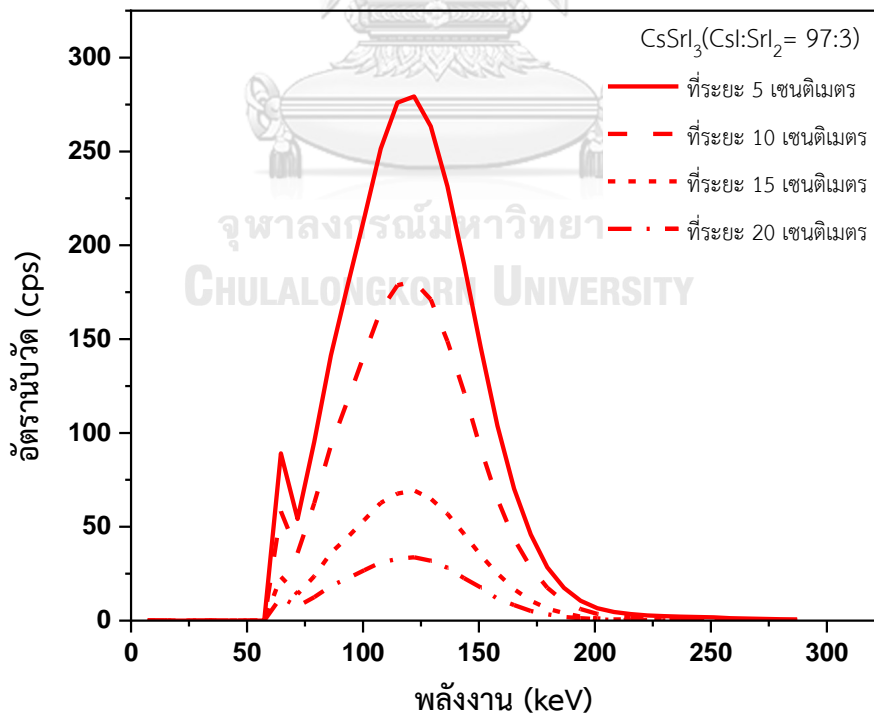
ผลึก	อัตราส่วน Cs:I:Sr ₂	ค่าช่องว่าง แถบพลังงานต่ำ (อิเล็กตรอนโวลต์)	ค่าช่องว่าง แถบพลังงานกลาง (อิเล็กตรอนโวลต์)	ค่าช่องว่าง แถบพลังงานสูง (อิเล็กตรอนโวลต์)
CsSrI ₃ (TL)	95:5	2.30	3.60	4.70
	97:3	2.00	3.60	4.80
	99:1	2.10	3.50	4.60

4.4 การทดลองและเปรียบเทียบผลการตอบสนองในการวัดปริมาณรังสีกับหัววัดรังสี

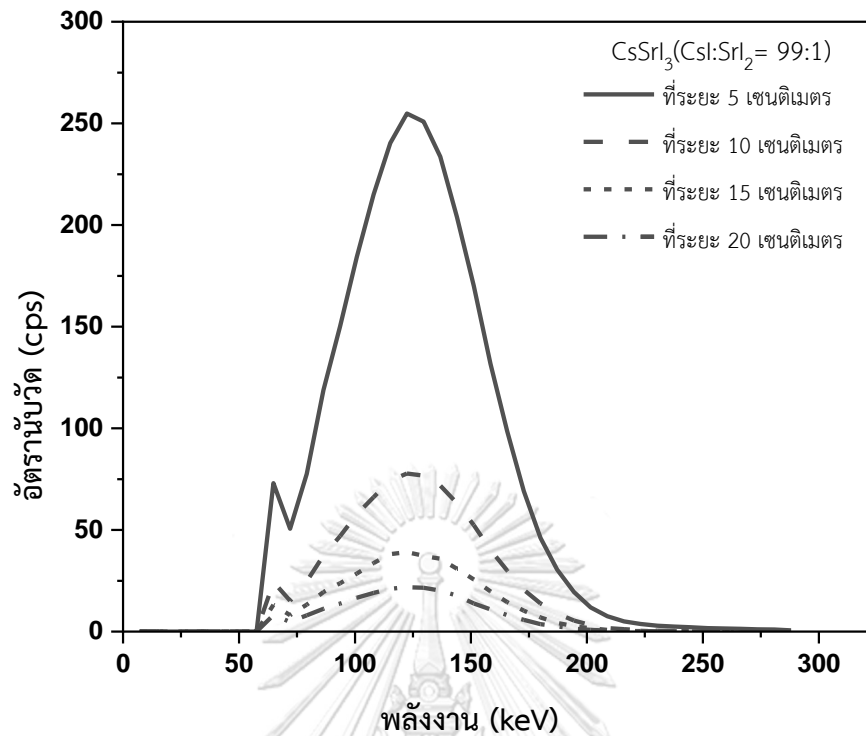
หลังจากผลึกถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางโครงสร้าง และคุณสมบัติทางแสงแล้ว การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก เริ่มต้นจากการนำผลึกที่ปลูกได้ทั้ง 3 อัตราส่วน ซึ่งผลึกได้ถูกตัดให้มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร และความหนา 1.0 เซนติเมตร แต่ผลึกที่มีอัตราส่วน 95:5 ที่มีความหนาเพียง 0.5 เซนติเมตร ด้วยว่าผลึกก้อนนี้เนื้อผลึกมีรอยร้าวค่อนข้างเยอะ โดยนำผลึกเหล่านี้ประกบกับหลอดทวิคูณแสงแล้วต่อเข้ากับระบบการวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (Multi-channel analyzer, MCA) เพื่อใช้วิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-57 และที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากแหล่งกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ในการประกบผลึกเข้ากับหลอดทวิคูณแสงจะต้องขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดมาก และทำความสะอาดผลึกด้วยแอลกอฮอล์กับผ้าสะอาด จากนั้นจะใช้สารเชื่อมประสานผิวหน้า (Fluid coupling) เพื่อให้ผิวหน้าของผลึกแนบสนิทกับผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสง และเพื่อลดการสูญเสียความเข้มของแสงที่หักเหออกจากผลึกอีกด้วย จากนั้นจะปิดเทปกาวสีดำแสงเพื่อป้องกันการรบกวนของแสงที่มาจากภายนอก จากนั้นจะต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับระบบการวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง พบว่า ผลึก CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 99:1, 97:3 และ 95:5 มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 78.92, 80.54 และ 61.19 ตามลำดับ ที่ระดับพลังงาน 112 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนความสามารถในการแยกพลังงานร้อยละ 76.72, 70.62 และ 47.62 ตามลำดับ ที่ระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 51 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก
วัดรังสี $\text{CsSr}_{13}(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5

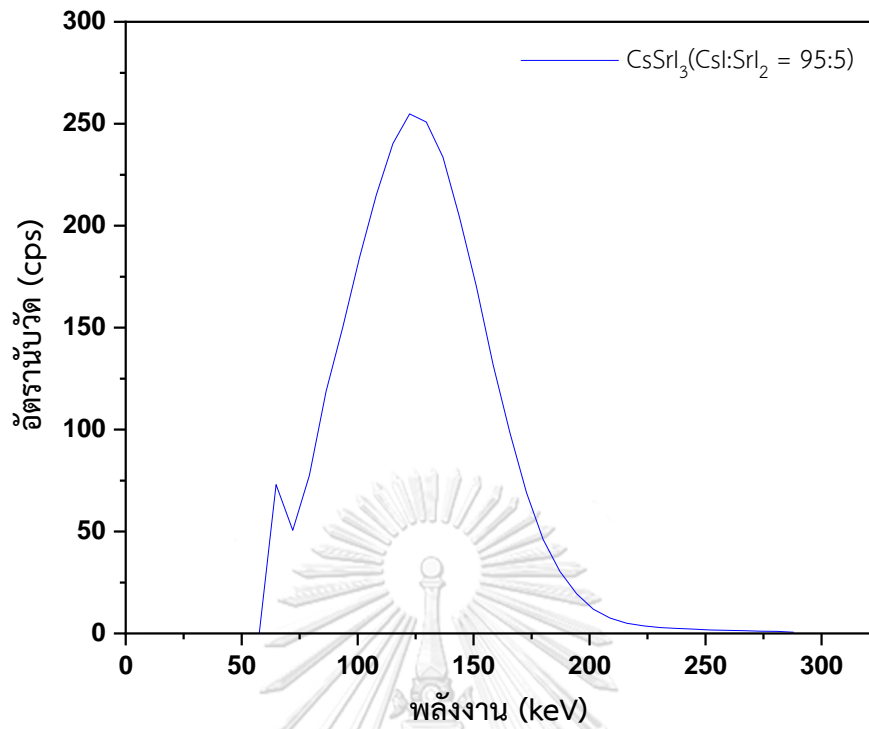


ภาพที่ 52 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก
วัดรังสี $\text{CsSr}_{13}(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3

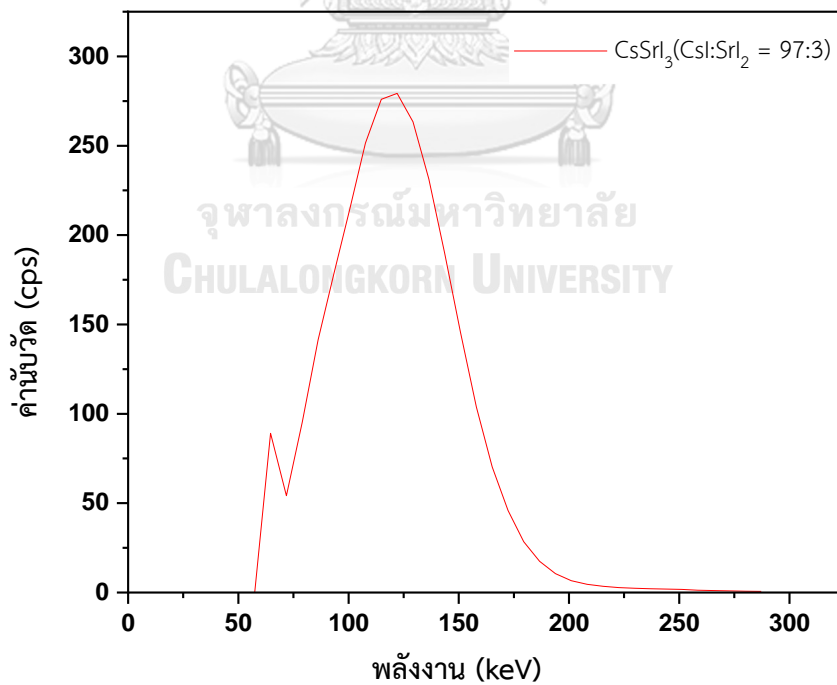


ภาพที่ 53 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก
วัดรังสี CsSrI₃(Tl) ที่มีอัตราส่วน 99:1

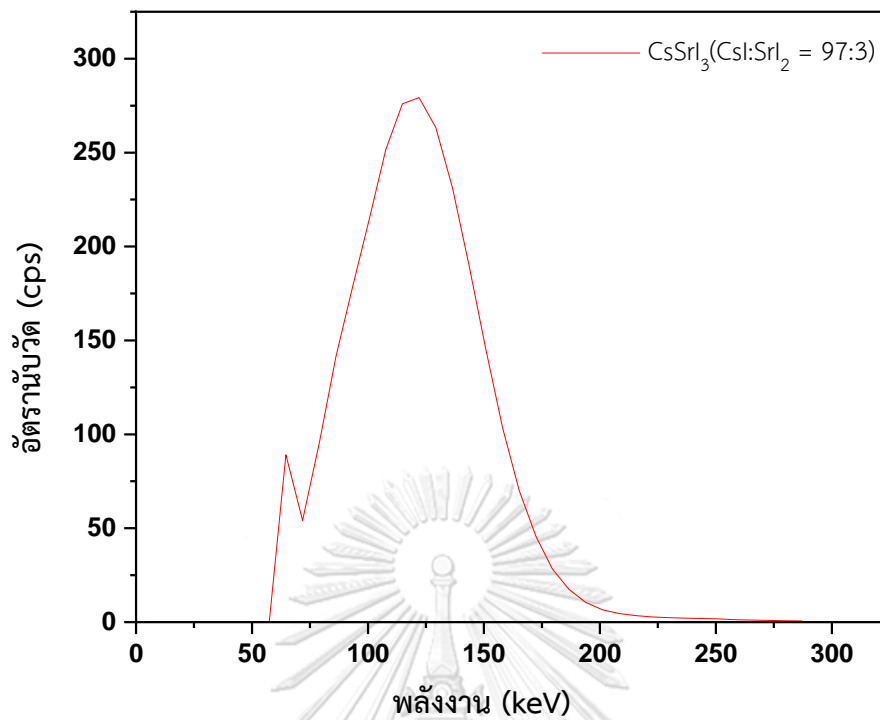
จากภาพที่ 4.38 – 4.40 พบว่าสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้ ที่ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีนั้น หัววัดจากผลึกทั้งสามอัตราส่วนที่มีระยะ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร มีสเปกตรัมกว้างทำให้ไม่สามารถนำมาคำนวณความสามารถในการแยกแยะพลังงานรังสีแกมมาได้ ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะระยะ 5 เซนติเมตรที่สามารถนำมาคำนวณความสามารถในการแยกแยะพลังงาน จึงแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ระยะ 5 เซนติเมตรดังภาพที่ 4.41 – 4.43 ดังต่อไปนี้



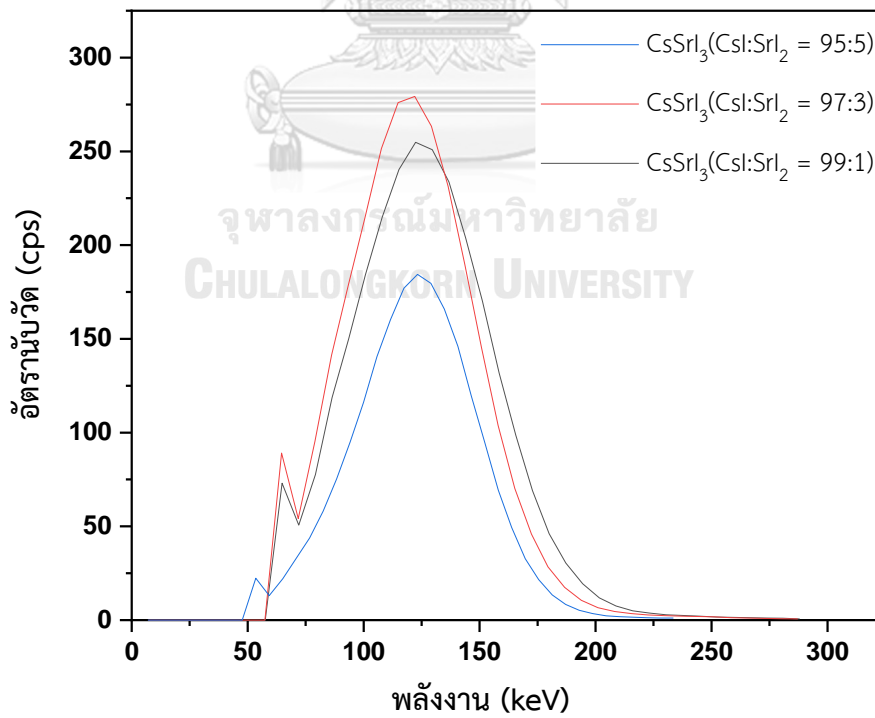
ภาพที่ 54 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร
จากผลึกวัดรังสี CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 95:5



ภาพที่ 55 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร
จากผลึกวัดรังสี CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 97:3

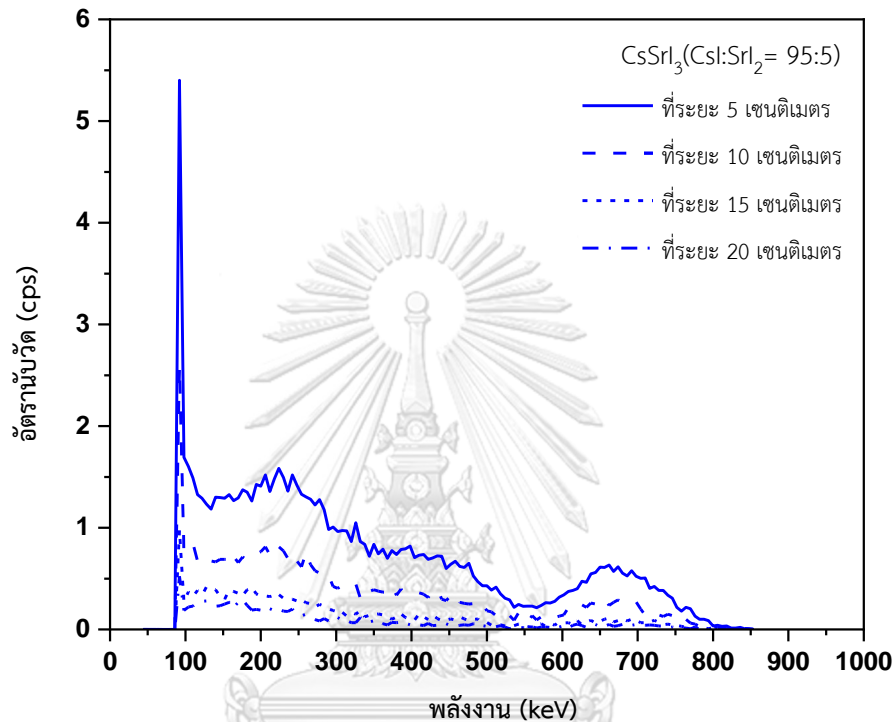


ภาพที่ 56 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัดรังสี $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1

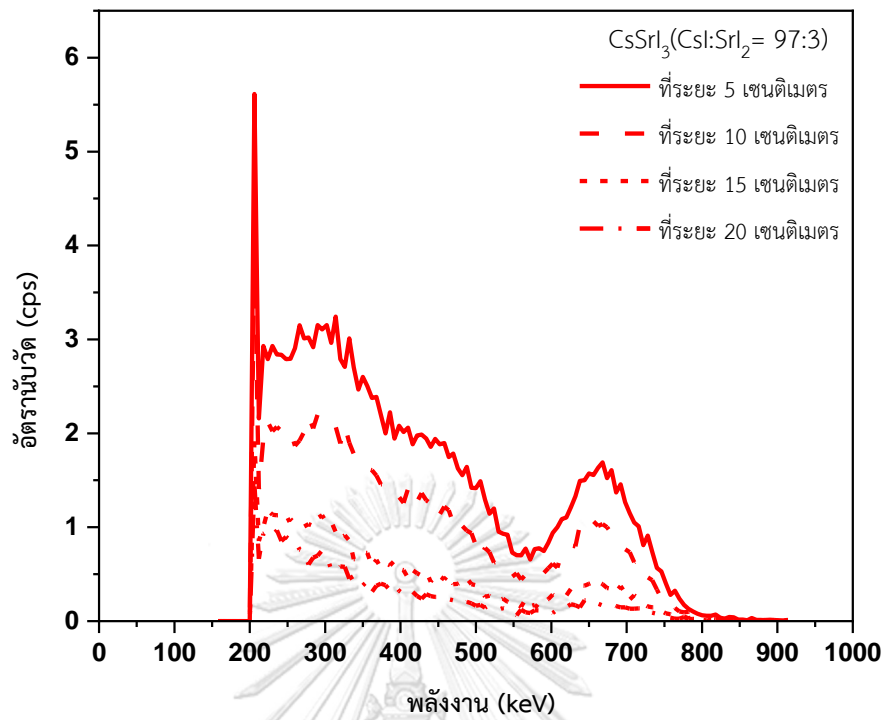


ภาพที่ 57 สเปกตรัมเปรียบเทียบของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัดรังสี $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ทั้งสามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

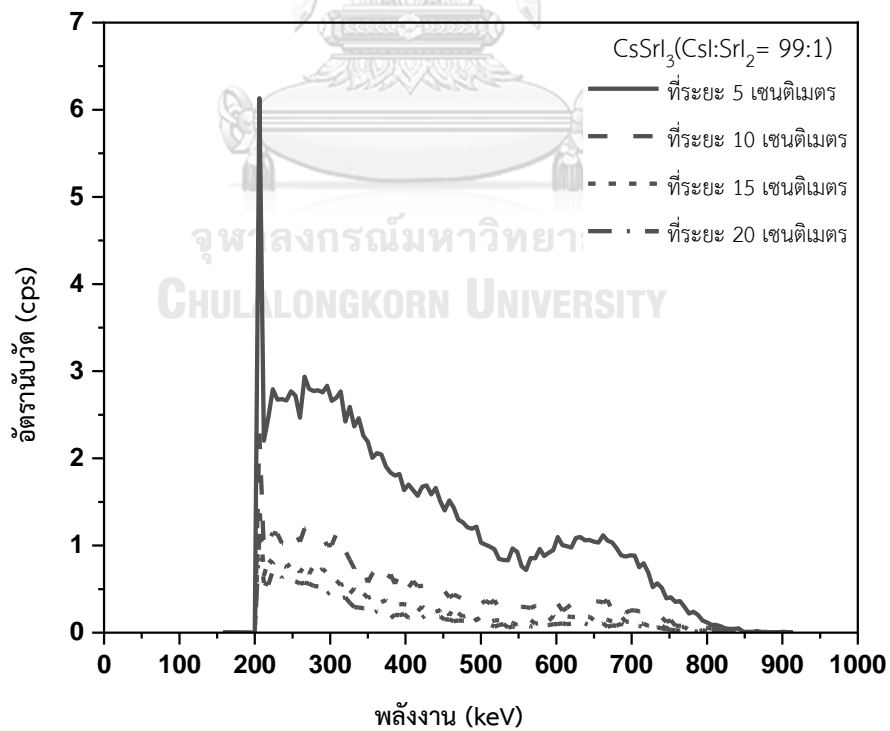
และพบว่า ผลึก CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 99:1, 97:3 และ 95:5 มีประสิทธิภาพการวัดรังสี ร้อยละ 22.78, 26.10 และ 14.50 ตามลำดับ ที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอน ตามลำดับ ส่วน ความสามารถในการแยกพลังงานร้อยละ 23.87, 21.15 และ 29.91 ตามลำดับ ที่ระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์



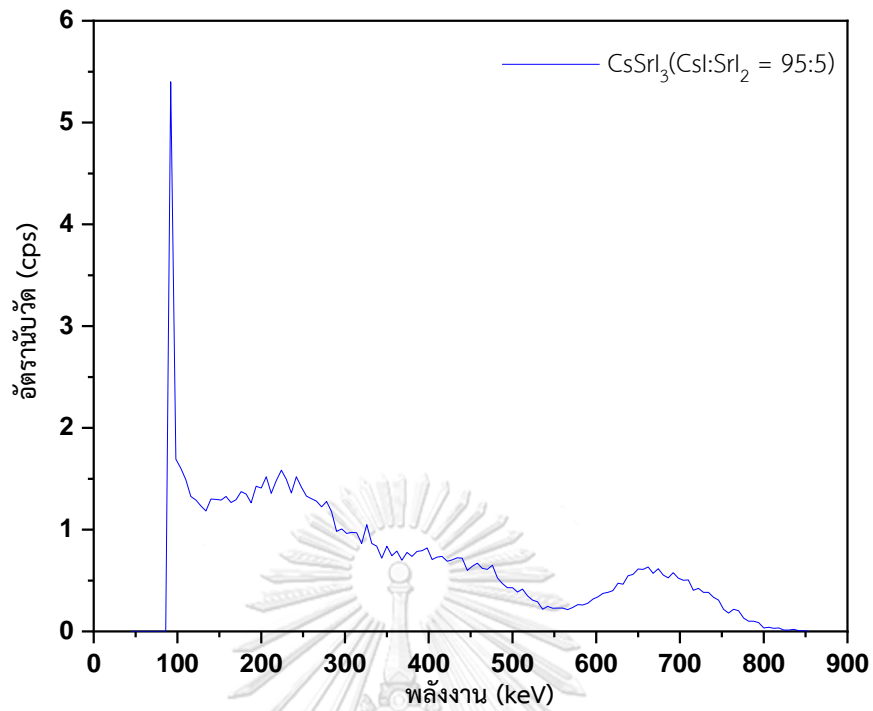
ภาพที่ 58 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก วัดรังสี CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 95:5



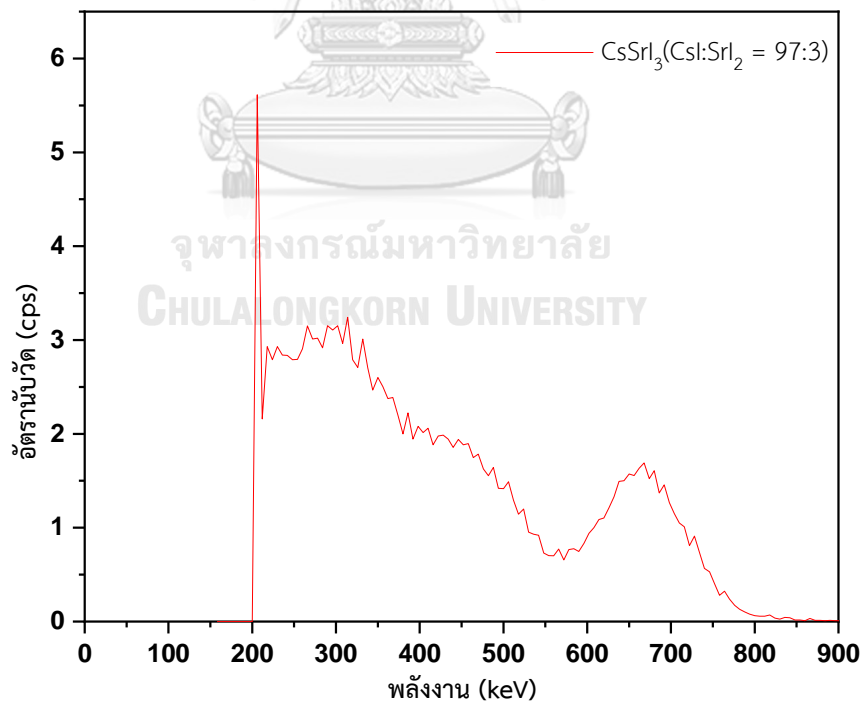
ภาพที่ 59 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก
วัตรังสี CsSrI_3 (TL) ที่มีอัตราส่วน 97:3



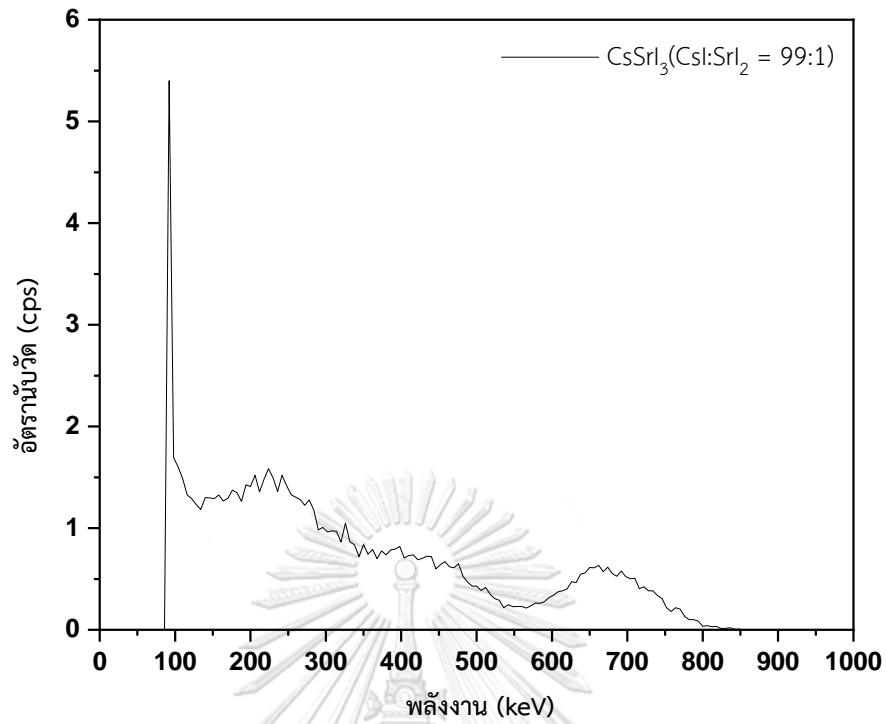
ภาพที่ 60 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะต่างกันจากผลึก
วัตรังสี CsSrI_3 (TL) ที่มีอัตราส่วน 99:1



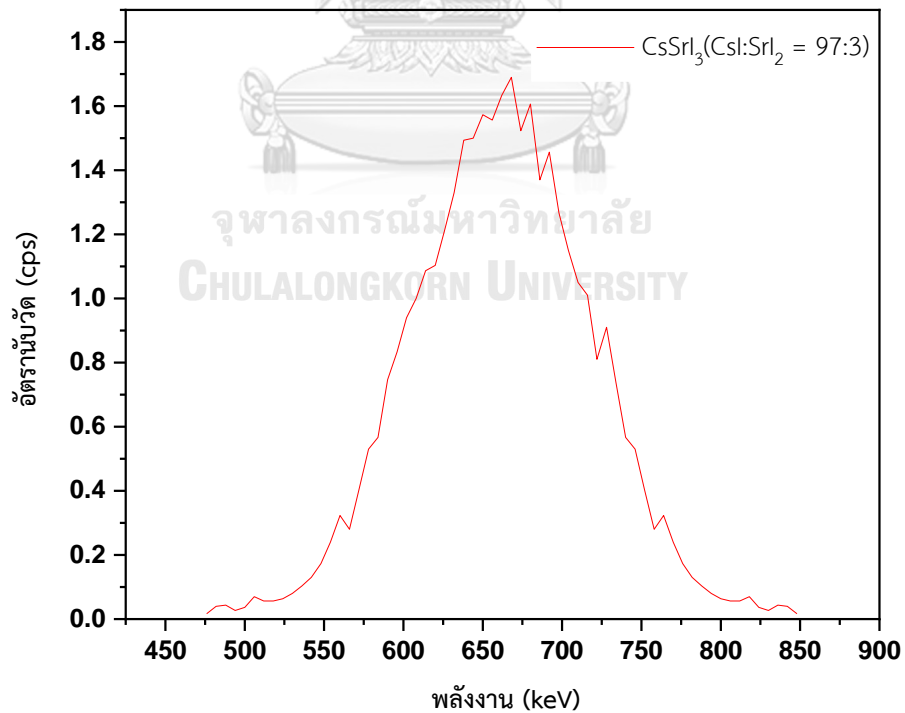
ภาพที่ 61 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัสดุรังสี $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5



ภาพที่ 62 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัสดุรังสี $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 97:3



ภาพที่ 63 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัดรังสี CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 99:1



ภาพที่ 64 สเปกตรัมจำลองของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร จากผลึกวัดรังสี CsSrI₃(TL) ที่มีอัตราส่วน 97:3

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีจากแหล่งกำเนิด Co-57 ของผลึก CsSrI₃(TU) ทั้งสามที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน

ผลึก	อัตราส่วน CsI:SrI ₂	แหล่งกำเนิดรังสี	ประสิทธิภาพ สัมบูรณ์ของพลังงาน (E _{abs} , %)	ประสิทธิภาพ การวัดรังสี (E _{int} , %)	ความสามารถ ในการแยก พลังงาน (%)
CsSrI ₃ (TU)	99:1	Co-57	5.57	78.92	76.72
	97:3	Co-57	8.44	80.54	70.62
	95:5	Co-57	7.70	61.19	47.62

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีจากแหล่งกำเนิด Cs-137 ของผลึก CsSrI₃(TU) ทั้งสามที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน

ผลึก	อัตราส่วน CsI:SrI ₂	แหล่งกำเนิดรังสี	ประสิทธิภาพ สัมบูรณ์ของพลังงาน (E _{abs} , %)	ประสิทธิภาพ การวัดรังสี (E _{int} , %)	ความสามารถ ในการแยก พลังงาน (%)
CsSrI ₃ (TU)	99:1	Cs-137	0.649	22.78	-
	97:3	Cs-137	0.622	26.10	21.15
	95:5	Cs-137	1.468	14.50	-

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์โดยการปลูกด้วยวิธีการบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบวิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ได้ผลการวิจัยทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนแรกการทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก จากนั้นส่วนที่สองคือ การตรวจสอบคุณภาพผลึกและคุณสมบัติเชิงแสงของผลึกที่ปลูกได้ และส่วนสุดท้ายการหาประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีของผลึกที่ปลูกได้ ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึกพบว่า เงื่อนไขการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เหมาะสมคือมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เข้าสู่สถานะเสถียรในเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับผลึก CsSrI₃(TI) ในทุกอัตราส่วน และพบว่าเงื่อนไขที่สำคัญในการปลูกผลึก คืออัตราการลดลงของอุณหภูมิควรอยู่ที่ 0.05 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงสำหรับผลึก CsSrI₃(TI) ที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 99:1 และ 97:3 ซึ่งเมื่อได้ผลเกรเดียนต์ของอุณหภูมิจะทำให้สามารถคำนวณอัตราการตกผลึกของ CsSrI₃(TI) ที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 99:1 และ 97:3 เท่ากับ 1.02 และ 0.92 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนผลึก CsSrI₃(TI) ที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 95:5 เท่ากับ 1.72 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.2 การตรวจสอบคุณภาพและคุณสมบัติเชิงแสงของผลึกที่ปลูกได้ โดยเมื่อตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างของผลึกทั้ง 3 อัตราส่วนแล้วพบว่าผลึกทั้งหมดที่ปลูกมีโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐาน และมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมดังต่อไปนี้ (110), (200), (211), (220), (310), (322) และ (321) และแสดงพีคการเลี้ยวเบนผ่านระนาบที่เด่นชัดที่สุดคือระนาบ (110) และถัดไปคือพีคของระนาบ (211) ซึ่งรูปแบบตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนลักษณะนี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวของผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เมื่อมีส่วนของสตรอนเชียมเพิ่มมากขึ้น พบว่าพีคของระนาบ (110) มีความเด่นชัดน้อยลง และพบว่าเมื่ออัตราส่วนของสตรอนเชียมไอโอไดต์เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าขนาดเม็ดผลึกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดย 16.47 ± 0.89 , 16.62 ± 0.93 และ 16.72 ± 1.15 นาโนเมตร และค่าคงที่

แอลทิซเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.4647 ± 0.0707 , 4.5156 ± 0.0370 และ 4.4574 ± 0.0958 อังสตรอม ตามลำดับ ทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัดในผลึกเป็น -2.23% , -1.12% และ -2.39% และพบว่า ผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 595-597 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่มีค่าในช่วง 2.10-2.30 อิเล็กตรอนโวลต์

5.1.3 การทดลองหาประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีของผลึกที่ปลูกได้ โดยเมื่อนำผลึกวัดรังสีประกบกับหลอดทวิคูณแสงเพื่อวัดสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระยะวัด 5 เซนติเมตร ผลการวัดได้ว่าผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 99:1, 97:3 และ 95:5 มีประสิทธิภาพการวัดรังสีเท่ากับร้อยละ 78.92, 80.54 และ 61.19 และมีความสามารถในการแยกพลังงานเท่ากับร้อยละ 76.72, 70.62 และ 47.62 ที่พลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการวัดรังสีเท่ากับร้อยละ 22.78, 26.10 และ 14.50 สำหรับการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีเพียงผลึกที่มีอัตราส่วน 97:3 ที่มีความสามารถในการแยกพลังงานเท่ากับร้อยละ 21.15 จะเห็นว่าความสามารถในการแยกพลังงานนั้นยังไม่สามารถเทียบเท่ากับผลึกที่ใช้กันทางการค้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพื่อให้ได้คุณภาพที่สามารถเทียบเท่าผลึกที่ใช้กันทางการค้าได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 พบว่าผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยวิธีของบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์จากเตาหลอมผลึกนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ครบถ้วนและเรียบร้อยก่อน เช่น เทอร์โมคัปเปิลที่ต้องผ่านการสอบเทียบอุณหภูมิเพื่อความแม่นยำในการตรวจวัดอุณหภูมิที่อยู่ภายในเตาหลอมผลึก เพราะถ้าหากอุณหภูมิไม่เป็นไปตามที่ตั้งค่าเอาไว้จะผลึกที่ปลูกได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ นอกจากนั้นจำเป็นที่จะต้องหาเงื่อนไขการปลูกผลึกให้เหมาะสมจึงจะทำการปลูกผลึก จะเห็นว่าผลึก $\text{CsSrI}_3(\text{TL})$ ที่มีอัตราส่วน 95:5 มีเงื่อนไขการปลูกผลึกที่แตกต่างจากผลึกอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ทำให้ได้ผลึกที่เกิดรอยแตกขึ้นมาก และผลึกที่ปลูกได้มีส่วนที่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลต่อได้ เป็นชิ้นส่วนที่เล็กกว่าผลึกอัตราส่วนอื่น ซึ่งทำให้ผลที่ได้อาจ

มีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิม และเงื่อนไขในการปลูกไม่เหมือนกับผลึกชิ้นอื่น ในกรณีนี้จึงอาจนำมาเปรียบเทียบผลการวิจัยร่วมกับผลึกอื่น ๆ ไม่ได้

5.2.2 จากการวิเคราะห์คุณภาพโครงสร้างของผลึก พบว่าการที่ผสมสตรอนเซียมไอโอไดต์เข้าไปในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดต์ในปริมาณอัตราส่วนเล็กน้อย ส่งผลทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัดในผลึกได้มากขึ้น และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดผลึกเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการเข้าไปผสมหรือแทนที่ในตำแหน่งแลตทิซของอะตอมซีเซียมหรืออะตอมไอโอดีนในผลึกซีเซียมไอโอไดต์ซึ่งมีขนาดอะตอมของสตรอนเซียมที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมซีเซียม เมื่อไปแทนที่จึงสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการลดขนาดค่าคงที่แลตทิซและคุณภาพของผลึกได้ และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติแสง พบว่าผลึกซีเซียมสตรอนเซียมไอโอไดต์มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 596 นาโนเมตร หรือประมาณ 2.08 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปล่งแสงของผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่เจือด้วยเทลเลียมทั่วไปจะถือว่าผลึกที่ปลูกขึ้นมาใหม่นั้นเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่เจือด้วยสารอื่นร่วมกับเทลเลียม และช่วงในการเพิ่มความเข้มแสงที่เปล่งออกมาขึ้นเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนปริมาณการผสมของสตรอนเซียม และเมื่อพิจารณาโดยละเอียดถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานระดับอื่นอีก 2 ระดับ ที่ระดับพลังงานราว 3.6-3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 4.6-4.8 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแสงจากงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติแสงของผลึกที่มีความบริสุทธิ์จากสารปนเปื้อนที่ต่างกัน (ปรมินทร์ ศิลธรรม, 2560) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ทำให้สังเกตเห็นได้ว่า ผลึกซีเซียมสตรอนเซียมไอโอไดต์ที่ปลูกได้นี้ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานสองช่วงนี้อยู่ในระหว่างช่วงระดับพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่มีสารเจือปนหรือปนเปื้อนอื่นผสมทำให้มีความบริสุทธิ์น้อยกว่าผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่เจือเทลเลียมที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า คือ มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 3.51 กับ 3.82 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 4.4 กับ 5.14 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นผลการทดลองนี้ค่อนข้างสอดคล้องไปทางเดียวกันกับงานวิจัยดังกล่าว คือ ผลึก $CsSrI_3(Tl)$ ที่ปลูกได้นี้มีสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูงและควบคุมการเจือสตรอนเซียมในสัดส่วนค่อนข้างน้อยโดยไม่ต่างกันมากนัก จึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ว่าการเจือสตรอนเซียมนี้ก็ยังคงสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติแสง

โดยรวมของผลึกซีเซียมไอโอไดต์เจอผลเสียอย่างเดียวกันได้โดยทำให้เกิดค่าช่องว่างแถบพลังงานทั้งสองระดับนี้มีค่าลดลงเล็กน้อย

5.2.3 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีที่ระดับพลังงาน 122 และ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์กับผลึก CsI(Tl) จากงานวิจัยอื่น ๆ เช่น (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552) ได้ผลึก CsI(Tl) ที่มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีร้อยละ 2.50 และมีความสามารถในการแยกพลังงานร้อยละ 7.19% ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แต่จากงานวิจัยนี้จะพบว่าผลึก CsSrI₃(Tl) ที่ปลูกได้ยังไม่สามารถตรวจวัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ได้ดีเท่าไรนัก มีเพียงผลึกที่มีอัตราส่วน 97:3 โดยมีประสิทธิภาพการตรวจวัดเพียงร้อยละ 26.10 และกำลังแยกพลังงานร้อยละ 21.15 ซึ่งนี้อาจเกิดมาจากกระบวนการปลูกผลึกยังคงไม่ได้สภาวะเงื่อนไขการปลูกผลึกที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ที่สามารถสังเกตเห็นได้จากคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของผลึก ด้วยว่าผลึกที่ปลูกได้ยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบพหุฐานแบบที่มีระนาบโดดเด่นสองระนาบ และคุณภาพความเป็นผลึกและขนาดผลึกของผลึกที่ปลูกได้มีขนาดเล็กกว่าขนาดผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่ใช้งานทั่วไปที่จะใหญ่กว่าประมาณ 2-3 เท่า จึงส่งผลให้ผลึกที่ปลูกได้เมื่อนำมาทำเป็นผลึกวัดรังสี ยังคงมีประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีได้ไม่ดีเท่าไรนัก แต่ว่าคุณภาพผลึกนั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีได้โดยสังเกตได้จากผลึกที่มีอัตราส่วน 97:3 นั้นมีสภาวะความเครียดในผลึกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเฉพาะกับผลึกอัตราส่วน 99:1 ที่มีความหนาผลึกเท่ากัน โดยที่เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดรังสีระดับพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพการวัดที่ดีกว่า และมีความสามารถในการแยกพลังงานของรังสีได้ดีกว่าผลึกอีกก้อนที่มีคุณภาพผลึกแยกว่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดรังสีและกำลังแยกพลังงานรังสีได้ดี ผลึกที่ปลูกด้วยปริมาณสัดส่วนของสตรอนเชียมที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะช่วยส่งเสริมทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงได้ความเข้มแสงมากขึ้น แต่ควรต้องศึกษาหาสภาวะเงื่อนไขการปลูกผลึกที่สามารถปลูกผลึกซีเซียมสตรอนเชียมไอโอไดต์ที่มีสัดส่วนผสมของสตรอนเชียมได้มากขึ้นจนกระทั่งได้สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะช่วยเรื่องคุณสมบัติแสงดีมากขึ้นโดยที่อย่าไม่ทำให้คุณภาพผลึกแยกลงไปมาก

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาส่วนประกอบและตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก โดยเฉพาะเตาหลอมผลึก และระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมผลึก เนื่องจากหากไม่ตรวจสอบบำรุงรักษาเตาหลอมผลึก หรือทำการสอบเทียบยืนยันอุปกรณ์ภายในระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมผลึก อาจจะทำให้การปลูกผลึกครั้งใดครั้งหนึ่งเกิดความผิดพลาดและทำให้ผลึกที่ปลูกได้เกิดรอยแตก หรือไม่สามารนำไปใช้วิเคราะห์ผลต่อได้

5.3.2 ในการปลูกผลึกในอัตราส่วนและเงื่อนไขการปลูกเดียวกัน ควรจะปลูกผลึกให้ได้อย่างน้อยสามตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลและเทียบผลการวิเคราะห์กัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ของผลึกทั้งสามที่มีอัตราส่วนและเงื่อนไขการปลูกเดียวกันควรมีผลลัพธ์ใกล้เคียง





ภาค ก.

คุณสมบัติของขดลวดความร้อน

2. Physical and Mechanical properties

		KANTHAL				
		APM	A-1	A	AF	AE
Max continuous operating temperature (element temperature in air),	°C	1425	1400	1350	1300	1300
	°F	2600	2550	2460	2370	2370
Nominal composition, %	Cr	22	22	22	22	22
	Al	5.8	5.8	5.3	5.3	5.3
	Fe	Balance	Balance	Balance	Balance	Balance
	Ni	–	–	–	–	–
Density,	g/cm ³	7.10	7.10	7.15	7.15	7.15
	lb/in ³	0.256	0.256	0.258	0.258	0.258
Resistivity at 20 °C, at 68 °F	Ω mm ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.39	1.39
	Ω/cm ²	872	872	836	836	836
Temperature factor of the resistivity, C _t						
250 °C	480 °F	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
500 °C	930 °F	1.01	1.01	1.03	1.03	1.03
800 °C	1470 °F	1.03	1.03	1.05	1.05	1.05
1000 °C	1830 °F	1.04	1.04	1.06	1.06	1.06
1200 °C	2190 °F	1.05	1.04	1.06	1.06	1.06
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹						
20-100 °C	68-210 °F	–	–	–	–	–
20-250 °C	68-480 °F	11·10 ⁻⁶	11·10 ⁻⁶	11·10 ⁻⁶	11·10 ⁻⁶	11·10 ⁻⁶
20-500 °C	68-930 °F	12·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶
20-750 °C	68-1380 °F	14·10 ⁻⁶	14·10 ⁻⁶	14·10 ⁻⁶	14·10 ⁻⁶	14·10 ⁻⁶
20-1000 °C	68-1840 °F	15·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶
Thermal conductivity at 50 °C at 122 °F	W m ⁻¹ K ⁻¹	11	11	11	11	11
	Btu in ft ² h ⁻¹ °F ⁻¹	76	76	76	76	76
Specific heat capacity, 20 °C 68 °F	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
	Btu lb ⁻¹ °F ⁻¹	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
Melting point (approx.),	°C	1500	1500	1500	1500	1500
	°F	2730	2730	2730	2730	2730
Mechanical properties* (approx.)						
Tensile strength,	N mm ⁻²	680	680	725	700	720
	psi	98600**	110200	105200	101500	104400
Yield point,	N mm ⁻²	470	545	550	500	520
	psi	68200**	79000	79800	72500	74500
Hardness,	Hv	230	240	230	230	230
Elongation at rupture,	%	20**	20	22	23	20
Tensile strength at 900 °C, at 1650 °F,	N mm ⁻²	40	34	34	37	34
	psi	5800	4900	4900	5400	4900
Creep strength ***						
at 800 °C, at 1470 °F,	N mm ⁻²	8.2	1.2	1.2	–	1.2
	psi	1190	70	70	–	170
at 1000 °C, at 1830 °F,	N mm ⁻²	–	0.5	0.5	–	–
	psi	–	70	70	–	–
at 1100 °C, at 2010 °F,	N mm ⁻²	–	–	–	0.7	–
	psi	–	–	–	100	–
at 1200 °C, at 2190 °F,	N mm ⁻²	–	–	–	0.3	–
	psi	–	–	–	40	–
Magnetic properties		1)	1)	1)	1)	1)
Emissivity, fully oxidized condition		0.70	0.70	0.70	0.70	0.70

* The values given apply for sizes of approx. 1.0 mm diameter 0.04 in.

** 4.0 mm 0.16 in. Thinner gauges have higher strength and hardness values while the corresponding values are lower for thicker gauge.

*** Calculated from observed elongation in a Kanthal standard furnace test. 1 % elongation after 1000 hours.

Maximum Temperature per Wire Size

The table below gives maximum wire temperatures as a function of wire diameter when operating in air.

Table 2
Maximum Permissible Temperature as a Function of Wire Size

	Diameter, mm (in):			
	0.15-0.4 (0.0059-0.0157)	0.41-0.95 (0.0061-0.0374)	1.0-3.0 (0.039-0.118)	>3.0 (>0.118)
	°C	°C	°C	°C
	°F	°F	°F	°F
KANTHAL AF	900-1100 1650-2010	1100-1225 2010-2240	1225-1275 2240-2330	1300 2370
KANTHAL A	925-1050 1700-1920	1050-1175 1920-2150	1175-1250 2150-2300	1350 2460
KANTHAL AE	950-1150 1740-2100	1150-1225 2100-2240	1225-1250 2240-2300	1300 2370
KANTHAL D	925-1025 1700-1880	1025-1100 1880-2010	1100-1200 2010-2190	1300 2370
NIKROTHAL 80	925-1000 1700-1830	1000-1075 1830-1970	1075-1150 1970-2100	1200 2190
NIKROTHAL 60	900-950 1650-1740	950-1000 1740-1830	1000-1075 1830-1970	1150 2100
NIKROTHAL 40	900-950 1650-1740	950-1000 1740-1830	1000-1050 1830-1920	1100 2010



KANTHAL A, AF, AE Wire

Standard stock items	Alloy	Diameter range mm	Resistivity $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$	Density gcm^{-3}
■	KANTHAL A	10.0-0.05	1.39	7.15
■	KANTHAL AF	10.0-0.10	1.39	7.15
—	KANTHAL AE	10.0-0.20	1.39	7.15

To obtain resistance at working temperature, multiply by the factor C_t in the following table:

$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
C_t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06

Diameter mm	A	AF	at 20 $^{\circ}\text{C}$ Ω/m	Resistance $\text{cm}^2/\Omega^{(1)}$ at 20 $^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	Surface area cm^2/m	Cross sectional area mm^2
10	10.0		0.0177	17751	562	314	78.
	8.25		0.0260	9968	382	259	53.5
	8.0		0.0277	9089	359	251	50.3
	7.5		0.0315	7489	316	236	44.2
	7.35		0.0328	7048	303	231	42.4
	7.0		0.0361	6089	275	220	38.5
	6.54		0.0414	4965	240	205	33.6
	6.5		0.0419	4875	237	204	33.2
	6.0		0.0492	3834	202	188	28.3
	5.83		0.0521	3517	191	183	26.7
	5.5		0.0585	2953	170	173	23.8
	5.2		0.0655	2496	152	163	21.2
	5.0		0.0708	2219	140	157	19.6
	4.75		0.0784	1902	127	149	17.7
	4.62		0.0829	1750	120	145	16.8
	4.5		0.0874	1618	114	141	15.9
	4.25		0.0980	1363	101	134	14.2
	4.11		0.105	1232	94.9	129	13.3
	4.0		0.111	1136	89.8	126	12.6
	3.75		0.126	936	79.0	118	11.0
	3.65		0.133	863	74.8	115	10.5
	3.5		0.144	761	68.8	110	9.62
	3.25		0.168	609	59.3	102	8.30
	3.2		0.173	582	57.5	101	8.04
	3.0		0.197	479	50.5	94.2	7.07
	2.9		0.210	433	47.2	91.1	6.61
	2.8		0.226	390	44.0	88.0	6.16
	2.6		0.262	312	38.0	81.7	5.31
	2.5		0.283	277	35.1	78.5	4.91
	2.4		0.307	245	32.3	75.4	4.52
	2.3		0.335	216	29.7	72.3	4.15
		2.25	0.350	202	28.4	70.7	3.98
		2.2	0.366	189	27.2	69.1	3.80
		2.0	0.442	142	22.5	62.8	3.14
		1.8	0.546	104	18.2	56.5	2.54
		1.7	0.612	87.2	16.2	53.4	2.27
		1.65	0.650	79.7	15.3	51.8	2.14
		1.6	0.691	72.7	14.4	50.3	2.01
		1.5	0.787	59.9	12.6	47.1	1.77
		1.4	0.903	48.7	11.0	44.0	1.54
		1.3	1.05	39.0	9.49	40.8	1.33
		1.2	1.23	30.7	8.09	37.7	1.13
		1.1	1.46	23.6	6.79	34.6	0.950
		1.0	1.77	17.8	5.62	31.4	0.785
		0.95	1.96	15.2	5.07	29.8	0.709
	0.90	0.90	2.18	12.9	4.55	28.3	0.636
	0.85	0.85	2.45	10.9	4.06	26.7	0.567
	0.80	0.80	2.77	9.09	3.59	25.1	0.503
	0.75	0.75	3.15	7.49	3.16	23.6	0.442
	0.70	0.70	3.61	6.09	2.75	22.0	0.385
	0.65	0.65	4.19	4.87	2.37	20.4	0.332
	0.60	0.60	4.92	3.83	2.02	18.8	0.283
	0.55	0.55	5.85	2.95	1.70	17.3	0.238
	0.50	0.50	7.08	2.22	1.40	15.7	0.196
	0.45	0.45	8.74	1.62	1.14	14.1	0.159
	0.40	0.40	11.1	1.14	0.898	12.6	0.126
	0.35	0.35	14.4	0.761	0.688	11.0	0.0962
	0.30	0.30	19.7	0.479	0.505	9.42	0.0707
	0.25		28.3	0.277	0.351	7.85	0.0491
	0.20		44.2	0.142	0.225	6.28	0.0314
	0.15		78.7	0.0599	0.126	4.71	0.0177

¹⁾ $\text{cm}^2/\Omega = I^2 \cdot C_t / p$ (I = Current, C_t = temperature factor, p = surface load W/cm^2)

ภาคผนวก ข.
คุณสมบัติของอิฐทนไฟ

Properties Type	INSULATING FIREBRICK	
	C. 1	C. 2
Maximum Service Temperature (0°C)	1300	1400
Bulk Density G/Cm ³	1.06	1.14
Thermal Conductivity K Cal/mh C at 300°C (Mean)	0.28	0.32
Rehead shrinkage % at () C x 8 hrs	0.57 (1300)	0.59 (1400)
Cold Srushing Strength Kg/Cm ²	63	78
Modulus of Rupture (Kg/cm.)	25	32
Thermal Expansion % at () °C	0.51 (1000)	0.49 (1000)
Chemical Composition %		
AL2 O3	30	35
Si O2	65	61
Fe2 O3	1.8	1.6
Raw material	Fire clay	

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอเอตี

1. Specifications

● Standard spec.

Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900
Dimension	48X48mm	96X48mm	72X72mm	48X96mm	96X96mm
Supply voltage	AC 85~265V · DC 15~50V (Option)				
Frequency	50 / 60 HZ				
Power consumption	approx 3VA	approx 4VA	approx 3VA	approx 4VA	approx 4VA
Input	Accuracy	0.2 % FS ± 1digit			
	Sample time	250ms			
	TC	K , J , R , S , B , E , N , T , W5Re/W26Re , PLII , U , L			
	RTD	PT100,JPT100,JPT50			
	mA dc	4~20mA , 0~20mA			
	mV / V dc	0~1V,0~5V,0~10V,1~5V,2~10V -10~10mV,0~10mV,0~20mV,0~50mV,10~50mV			
	Decimal point position	0000 , 000.0 , 00.00 , 0.000 Available for linear input (mA / mV / V)			
Output 1	Relay	SPST type	SPDT type	SPST type	SPDT type
	Voltage pulse	3A , 220V , electrical life:100,000 times or more (under rated load)			
	mA dc	For SSR drive. ON : 24V , OFF : 0V , max load current : 20mA 4~20mA, 0~20mA. Maximum load resistance:560 Ω			
	Voltage dc	0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V . Max load current:20mA			
Alarm 1	3A , 220V , electrical life:100,000 times or more (under rated load)				
Control algorithm	PID · PI · PD · P · ON / OFF(P=0) · FUZZY ·				
PID range	P: 0.0 ~ 200.0 % · I: 0~3600s · D: 0~900s				
Isolation	Output terminals(control output , alarm , transmission) and input terminals are isolated separately				
Isolated resistance	10MΩ or more between input and case (ground) at DC 500 V				
	10MΩ or more between output and case (ground) at DC 500 V				
Dielectric strength	1000V AC for 1 minute between input terminal and case (ground)				
	1500V AC for 1 minute between output terminal and case (ground)				
Operating temperature	0~50℃				
Humidity range	20~90%RH				
Weight	150g	225g	225g	225g	300g
Display Height	PV:7mm	PV:7mm	PV:14mm	PV:7mm	PV:14mm
	SV:7mm	SV:7mm	SV:10mm	SV:7mm	SV:10mm

● **Optional Spec.**

Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900
Output 2	For heating and cooling control use. Relay , SSR , 4~20mA , 0~20mA , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V				
Alarm 2	SPST type	SPDT type	SPST type	SPDT type	SPDT type
	3A , 220V , electrical life:100,000 times or more (under rated load)				
Alarm 3	Not available	Available	Available	Available	Available
		SPST type	SPST type	SPST type	SPST type
	3A , 220V , electrical life:100,000 times or more (under rated load)				
Heater Break Alarm (HBA)	Display range of heater current : 0.0~99.9A , Accuracy : 1%FS				
	Included CT : SC-80-T				
	Alarm relay : AL1				
Transmission	Available for PV or SV transmission				
	4~20mA , 0~20mA , 0~1V , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V				
Remote SV Communication	4~20mA , 0~20mA , 0~1V , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V				
	Protocol : MODBUS RTU , MODBUS ASCII , TAIE				
	RS232 , RS485 , TTL				
	Baud rate: 2400 , 4800 , 9600 , 19200 , 38400 bps.				
	Data bits : 8 , Stop bit : 1 or 2bit , Odd or Even parity.				
Water/Dust proof	IP65				

● **Special control output (OUT1)**

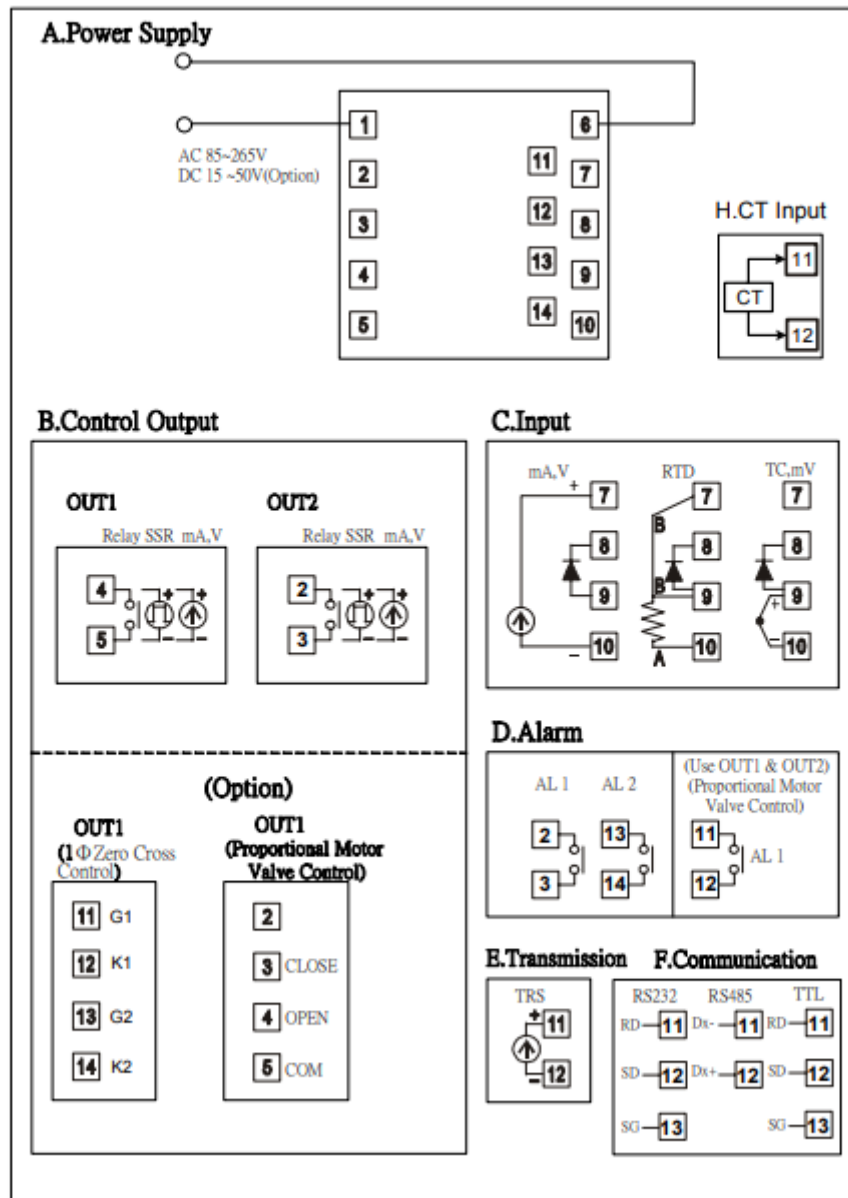
Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900
1φ zero crossing control(1φSSR)	Available	Not available	Available	Not available	Available
3φ zero crossing control(3φSSR)	Not available				Available
Motor valve control	Available				
1φ phase angle control(1φSCR)	Not available	Available			
3φ phase angle control(3φSCR)	Not available				Available

● **Programmable RAMP/SOAK**

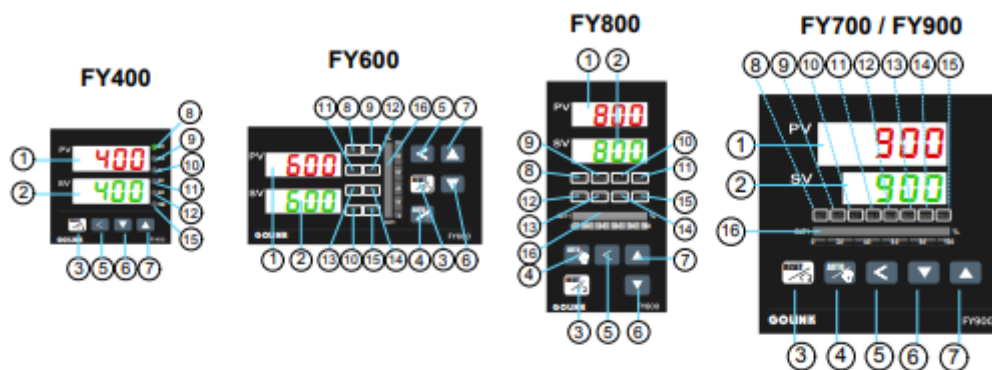
Model	PFY400	PFY600	PFY700	PFY800	PFY900
Programmable RAMP/SOAK	2 patterns with 8 segments each. The 2 patterns can be linked together as 16 segments use.				






3. Terminal arrangement

3.1 FY400 Terminals (48mm x 48mm , DIN 1/16)



5. Parts description

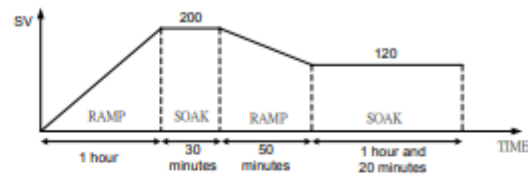


SYMBOL	NAME	FUNCTION
PV	① Measured value (PV) display	Displays PV or various parameter symbols (Red)
SV	② Set value (SV) display	Displays SV or various parameter set values (Green)
	③ Set key	Used for parameter calling up and set value registration
	④ Auto/Manual key	Switches between Auto(PID) output mode and Manual output mode.
	⑤ Shift key	Shift digits when settings are changed
	⑥ Down key *Program hold	Decrease numbers (-1000,-100,-10,-1) * Program hold (Programmable controller)
	⑦ Up key *Program run	Increase numbers (+1000,+100,+10,+1) * Program run (Programmable controller)
OUT1	⑧ OUT1 lamp	Lights when OUT1 is activated (Green)
OUT2	⑨ OUT2 lamp	Lights when OUT2 is activated (Green)
AT	⑩ Auto tuning lamp	Lights when Auto tuning is activated (Orange)
AL1	⑪ Alarm 1 lamp	Lights when Alarm 1 is activated (Red)
AL2	⑫ Alarm 2 lamp	Lights when Alarm 2 is activated (Red)
AL3	⑬ Alarm 3 lamp	Lights when Alarm 3 is activated (Red)
MAN	⑭ Manual output lamp	Lights when manual output is activated (Orange)
PRO	⑮ *Program running lamp	*Flashes when program is running (Programmable controller)
OUT1%	⑯ OUT% bar-graph display	Output% is displayed on 10-dot LED.

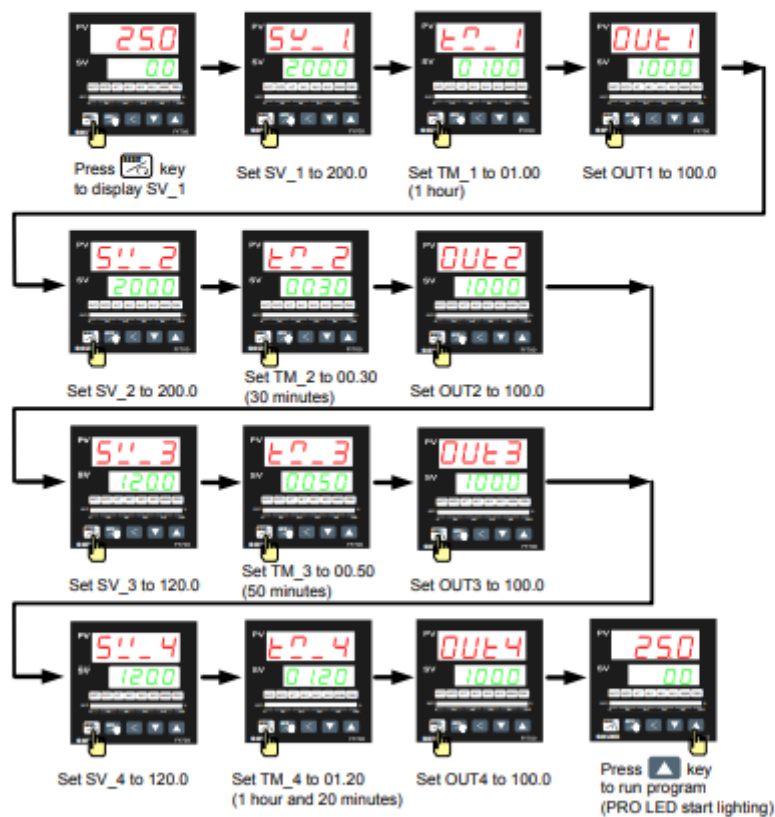
6.5 Programmable RAMP / SOAK (Only available for PFY model)

*For detail of the programmable instruction, please refer with page 25.

Assume the temperature profile is as below (use total 4 segments)



Please operate controller as following steps:



ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการกำหนดเฉพาะของหลอดทวีคูณแสง

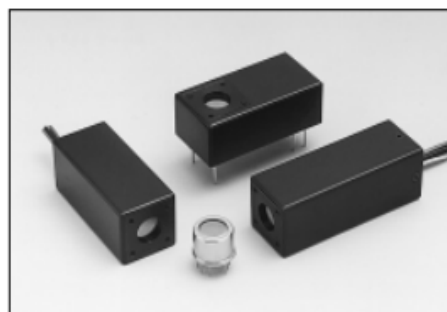
HAMAMATSU**PHOTOSENSOR MODULES
H5773/H5783/H6779/
H6780/H5784 SERIES****High Sensitivity, Wide Dynamic Range
Fast Time Response**

The Photosensor Module is an optical sensor with extremely high sensitivity, capable of detecting light levels 1/10000 as low as those detectable with semiconductor photodiodes.

The H5773, H5783 series comprise a Metal Package Photomultiplier tube and a Cockcroft-Walton type high voltage power supply assembled in a compact housing. They feature excellent output linearity and low power consumption, which is low enough to enable battery powered operation. Photon Counting type is also available in these series.

The H6779, H6780 series incorporate an active voltage divider, which provide a faster settling time and lower ripple noise compared to the H5773, H5783 series.

The H5784 series have a low noise amplifier, which eliminates an external amplifier.



▲ Left: H6780 Center: H6779 Right H5784
Front: Metal Package PMT

FEATURES

- Low Power Consumption
- Low Voltage Drive
- Easy to Use
- High Sensitivity
- Wide Dynamic Range
- Fast Time Response

APPLICATIONS

- O/E Converter
- Ultra Low Light Level Detection
- Portable Optical Detection Instrument

MODULE SELECTION

Type No.	Suffix No.	No	-01	-02	-03	-04	-06	-20
H5773/H5783		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
H5773P/H5783P		<input type="radio"/>	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
H6779/H6780		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
H5784		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

: available N.A.: not available

EXPLANATION OF TYPE & SUFFIX NUMBER

Ex) **H5783** - **01** → Suffix
→ Type No.

Type No.	Lead Type	Feature
H5773/P	On-board	Low power consumption
H5783/P	Cable Out	Photon Counting type available
H6779	On-board	Low ripple noise
H6780	Cable Out	Faster settling time
H5784	Cable Out	Built in amplifier

Suffix	Spectral Response
No	300 nm to 650 nm
-01	300 nm to 850 nm
-02	300 nm to 880 nm
-03	185 nm to 650 nm
-04	185 nm to 850 nm
-06	185 nm to 650 nm
-20	300 nm to 900 nm

NOTE: suffix 06 has higher sensitivity at less than 300 nm in comparison with suffix 03.

PHOTOSENSOR MODULES H5773/H5783/H6779/H6780/H5784 SERIES

SPECIFICATIONS

GENERAL

Parameter	H5773 Series H5783 Series	H5773P H5783P	H6779 Series H6780 Series	H5784 Series	Unit
Supply Voltage Range Vcc & Vee	+11.5 to +15.5			±11.5 to ±15.5	V
Supply Current Requirement (Max.)	12		30	12/1 *2	mA
Supply Adjustable Range (Relative Sensitivity)	1: 10 ⁴				—
Settling Time (Sensitivity Control) *1	2		0.2	2	s
Induced Ripple in Signal (Max.) (peak to peak) *3	1.2		0.6	2	mV
Effective Area	8				mm dia.
Weight	H5773/P H6779/P Series H5783 H6780 Series H5784 Series			Approx. 50 Approx. 80 Approx. 100	g

*1: Stabilized time in the control voltage adjustment from +1.0 V to +0.5 V.

*2: Vee "Minus Voltage" requires 1 mA current.

*3: Measured across 1 MΩ/22 pF load

MAXIMUM RATING (Absolute Maximum Values)

Parameter	H5773 Series H5783 Series	H5773P H5783P	H6779 Series H6780 Series	H5784 Series	Unit
Supply Voltage Vcc & Vee	+18			±18	V
Operating Temperature	+5 to +50		+5 to +45	+5 to +50	°C
Storage Temperature	-20 to +50				°C
Output Current	100			—	μA
Output Voltage	—			10	V
Control Voltage *1 Vcontrol	+1.0 (Input Impedance for Vcont. is 100 kΩ)				V

*1: Applying the maximum value for more than 30 seconds continuously may cause a damage.

H5773/H5783/H6779/H6780 SERIES CHARACTERISTICS (at 25 °C)

Parameter	-00, -03, -06	P Type	-01, -04	-02	-20	Unit
Radiant Sensitivity (at peak wavelength) ②	4.3×10^{-5}	6.2×10^{-5}	3.0×10^{-5}	2.9×10^{-5}	4.1×10^{-5}	A/nW
Dark Current (Typ./Max.) ③	0.2/2	—	0.4/4	2/10	2/20	nA
Dark Count (Typ./Max.)	—	80/400	—	—	—	s ⁻¹
Time Response Anode Pulse Rise Time ④	0.78					ns
Recommended Control Voltage Range Vcontrol	+0.25 to +0.9					V

H5784 SERIES CHARACTERISTICS (at 25 °C)

Parameter	-00, -03, -06	-01, -04	-02	-20	Unit
Radiant Sensitivity (at peak wavelength) ②	43	30	29	41	V/nW
Output Offset ③	±3				mV
Current Voltage Conversion Factor	1				V/μA
Frequency Bandwidth	DC to 20				kHz
Recommended Control Voltage Range	+0.25 to +0.9				V

② Control voltage +0.8 V

In the output signal, there is a shot noise associated with the signal.

Figure 1: Typical Spectral Response

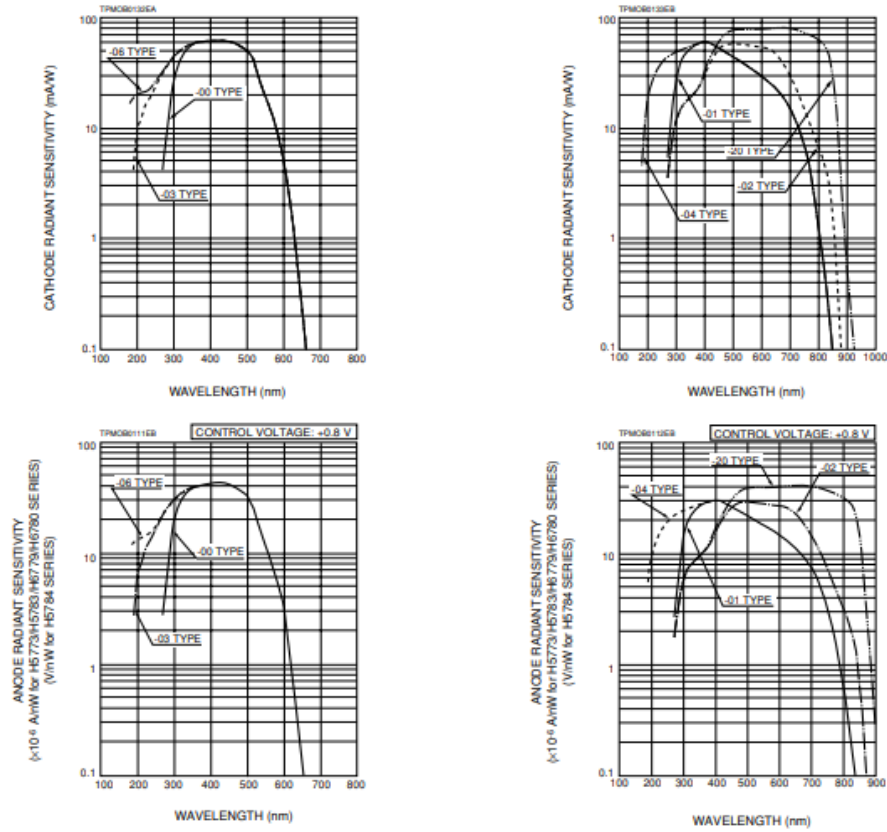


Figure 2: Typical Sensitivity Adjustable Characteristics

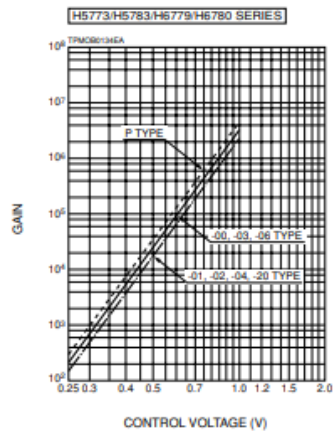
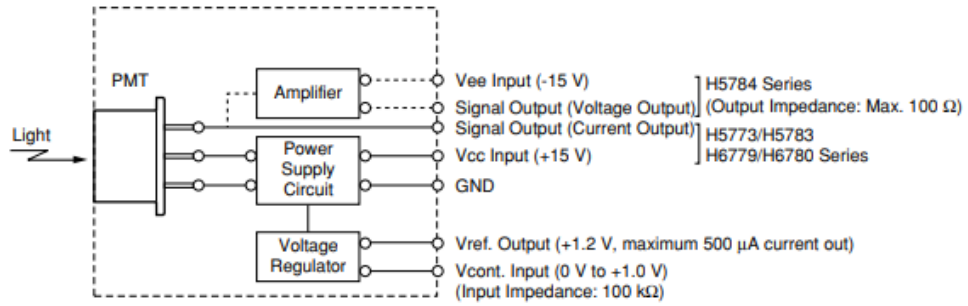
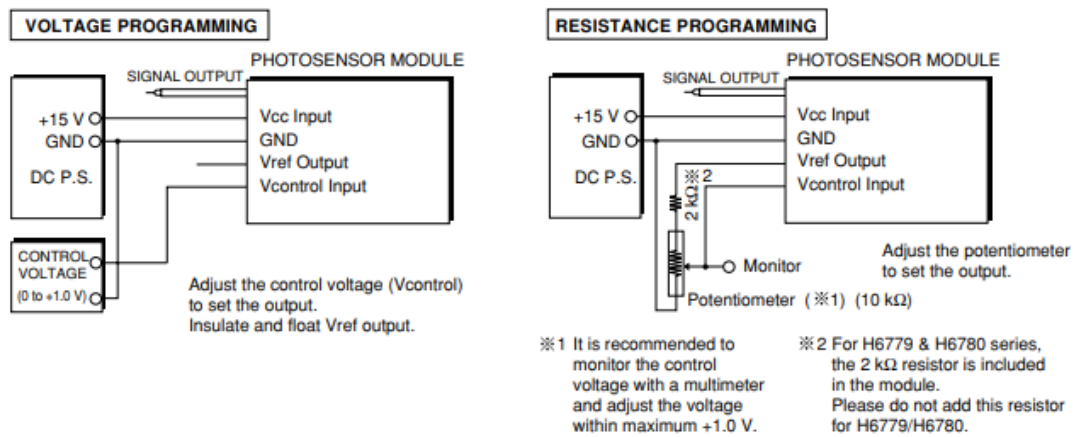


Figure 3: Module Functional Diagram



TPM000135CA

Figure 4: Wiring Examples For Sensitivity Adjustment



Note: DC -11.5 V to -15.5 V power supply is also necessary for Vee of H5784series.

TPM000135EA

บรรณานุกรม

1. Ahmed, S. N. (2015). 6 - Scintillation detectors and photodetectors. In S. N. Ahmed (Ed.), *Physics and Engineering of Radiation Detection (Second Edition)* (pp. 331-433): Elsevier.
2. Cherepy, N., Sturm, B., Drury, O., Hurst, T., Sheets, S., Ahle, L., . . . Ramey, J. (2009). Srl2 scintillator for gamma ray spectroscopy. *Proc SPIE*, 7449.
3. Gottstein, G. (2004). Crystal Defects. In *Physical Foundations of Materials Science* (pp. 63-106). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
4. Hawrami, R., Ariesanti, E., Buliga, V., & Burger, A. (2020). Thallium strontium iodide: A high efficiency scintillator for gamma-ray detection. *Optical Materials*, 100, 109624.
5. Hui, R. (2020). Chapter 4 - Photodetectors. In R. Hui (Ed.), *Introduction to Fiber-Optic Communications* (pp. 125-154): Academic Press.
6. Jitpukdee, M., Wongsawaeng, D., & Punnachaiya, S. (2011). Applied Moving-Temperature-Gradient Technique for CsI(Tl) Crystal Growth. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48(9), 1250-1255.
7. Kawai, T., Sakuragi, S., & Hashimoto, S. (2016). Luminescence properties of pure and Eu-doped Srl2 crystals purified by a "Liquinert" process and grown by vertical Bridgman method. *Journal of Luminescence*, 176, 58-64.
8. Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*: John Wiley & Sons, Inc.,
9. Larruquert, J. I. (2018). Chapter 7 - Optical properties of thin film materials at short wavelengths. In A. Piegari & F. Flory (Eds.), *Optical Thin Films and Coatings (Second Edition)* (pp. 291-356): Woodhead Publishing.
10. Pecharsyk, V. K., & Zavalij, P. Y. (2009). Fundamentals of Diffraction. In *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials* (pp. 133-149). Boston, MA: Springer US.
11. Raja, A., Joseph Daniel, D., Ramasamy, P., Singh, S. G., Sen, S., & Gadkari, S. C. (2018). Difficulties and improvement in growth of Europium doped Strontium Iodide (Srl2:Eu2+) scintillator single crystal for radiation detection applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 747, 989-993.

12. Sintham, P., Saengkaew, P., & Sanorpim, S. (2018). Optical properties of CsI:Tl crystals grown using different precursors purities. *Journal of Physics: Conference Series*, 1144, 012105.
13. Tsoulfanidis, N., & Landsberger, S. (2015). *Measurement detection of radiation, 4th edition*.
14. van Loef, E., Wilson, C., Cherepy, N., Hull, G., Payne, S., Choong, W.-S., . . . Shah, K. (2009). Crystal Growth and Scintillation Properties of Strontium Iodide Scintillators. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 56, 869-872.
15. Yao, Q., Liu, L., Dong, W., Wen, H., Wang, Q., Li, J., & Wang, J. (2019). High-speed growth of CsSr_{1-x}EuxI₃ (x=0.03, 0.05, 0.07) single crystals by the edge-defined film-fed growth method. *Optical Materials Express*, 9(12), 4742-4750.
16. ปรมินทร์ ศีลธรรม. (2560). ผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและเชิงแสงของผลึก CsI:Tl. (วิทยาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
17. มานิตย์ จิตรภักดี. (2552). การพัฒนาผลึกวัสดุรังสีชนิดสารอนินทรีย์ที่มีสมรรถนะสูงในการวิเคราะห์พลังงานรังสีแกมมา. (วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
18. อิมรอน วาเต็ง. (2560). การพัฒนาผลึกซีเซียมไอโอไดด์โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วศิน ชีวจรัสสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	27 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพรังสี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	45/538 ถนนมาเจริญ แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY