การพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี

นายประวิทย์ บัวบาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

DEVELOPMENT OF CESIUM CALCIUM IODIDE CRYSTAL FOR RADIATION DETECTION

Mr. Prawit Buaban

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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	การพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี
โดย	นายประวิทย์ บัวบาน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณี แสงแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณี แสงแก้ว)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เพ่งวาณิชย์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ชัญชณา ธนชยานนท์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวิทย์ บัวบาน : การพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี. (DEVELOPMENT OF CESIUM CALCIUM IODIDE CRYSTRAL FOR RADIATION DETECTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พรรณี แสงแก้ว

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ ($CsCaI_3$) เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์มีสัดส่วนของสารประกอบตั้งต้น คือ ซีเซียมไอโอไดด์และแคลเซียมไอโอไดด์ ($CsI:CaI_2$) ในสัดส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน คือ 80:20 และ 97:3 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า ผลึกทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกของรูปแบบผลึก CsI ที่มีระนาบที่โดดเด่นคือ (110) และ (211) มีค่าคงที่แลตทิซ คือ 4.5721±0.0091 และ 4.5512±0.0107 Å เกิดสภาวะความเครียดในผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับผลึก CsI อ้างอิง ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ที่ระนาบ (110) และ (211) มีขนาดผลึก คือ 25.30 และ 25.32 nm ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ที่ระนาบ (110) และ (211) มีขนาดผลึก คือ 25.10 และ 26.12 nm เห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอโอไดด์ที่สูงขึ้นส่งผลทำให้การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเพียงเล็กน้อย สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 มีจุดเริ่มโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 439 nm เกิดโปร่งแสงเต็มที่ร้อยละ 65 และมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.82, 3.63 และ 3.87 eV ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 จุดเริ่มโปร่งแสงที่ความยาว 426 nm เกิดโปร่งแสงเต็มที่ร้อยละ 49 และมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.91 และ 3.45 eV ในส่วนผลตรวจสอบการเปล่งแสงของผลึกด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 และ 97:3 ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา 458 nm โดยเปรียบเทียบผลึก CsI(Tl) มีความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา 559 nm แสดงว่าการผสมด้วยแคลเซียมทำให้การเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นสั้นกว่า สำหรับผลการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 122 keV พบว่าผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 57.2 และความสามารถในการแยกพลังงานรังสีร้อยละ 79.0 สำหรับผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 4.64 และความสามารถในการแยกพลังงานรังสีร้อยละ 40.3

สาขาวิชา	เทคโนโลยีนิวเคลียร์	ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

6170431021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEYWORD: BRIDMAN-STOCKBARGER METHOD, CRYSTAL GROWTH, SCINTILLATION DETECTOR, CALCIUM IODIDE

Prawit Buaban : DEVELOPMENT OF CESIUM CALCIUM IODIDE CRYSTRAL FOR RADIATION DETECTION. Advisor: Asst. Prof. Phannee Saengkaew, Dr.rer.nat.

The CsI:CaI_2 crystals with 2 different compositions of 80:20 and 97:3 and CsI(Tl) for the reference scintillator were grown by Bridgeman-Stockbarger method. As the XRD results, lattice constants of $CsCaI_3$ crystals with 80:20 and 97:3 ratios are 4.5721±0.0091 Å with the tensile strain and 4.5512±0.0107 Å with the compressive strain in their crystals, respectively. Moreover, their crystallite size for (110) and (211) planes are 25.30 and 25.32 nm for the 80:20 crystal and 25.10 and 26.12 nm for the 97:3 crystal, respectively. To analyze the optical properties, in case of $CsCaI_3$ crystal with 80:20, the optical energy gaps are 2.83, 3.63 and 3.87 eV. For $CsCaI_3$ crystal with 97:3, the energy gaps are 2.91 and 3.45 eV. To investigate the emission wavelength, both $CsCaI_3$ crystals could emit the light of the same wavelength of 458 nm but for CsI(Tl) crystal, the emission wavelength was 559 nm. This result shows that the presence of calcium into CsI crystal could change the emission wavelength of the typical CsI:Tl crystals shifting to the blue light with the shorter wavelength. To investigate the detection efficiency of gamma-ray of 122 keV, $CsCaI_3$ crystal with 80:20 has the detection efficiency of 57.2% and the energy resolution of 79.0% and for $CsCaI_3$ crystal with 97:3, the detection efficiency of 4.64% and the energy resolution of 40.3%. In case of CsI:Tl crystal, results were the detection efficiency of 46.2% and the energy resolution of 40.2%.

Field of Study:	Nuclear Technology	Student's Signature ....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. พรรณี แสงแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ การพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดรังสี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่คอยให้คำปรึกษา แนะแนวทาง การสนับสนุน รวมถึงการตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ. ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว นางสาวนุชจรี คิ้วสกุลกาญจน์ และ นายนครินทร์ สิงคิบุรินทร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของผลึก

ขอขอบคุณ อาจารย์เดโช ทองอร่าม ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาสอนการติดตั้งหัววัดรังสีและการใช้งานระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

ขอขอบคุณ นายวศิน ชีวจรัสสกุล ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

ประวิทย์ บัวบาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 วิธีการดำเนินงานและขั้นตอนการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.6 สถานที่ทำการวิจัย 2

บทที่ 2 ทฤษฎี 6

2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร 6

2.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก 6

2.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน 7

2.1.3 แพร์โพรดักชัน 7

2.2 เครื่องวัดรังสีและหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง 8

2.2.1 เครื่องวัดรังสี 8

2.2.2 หัววัดรังสีชนิดชนิดเรืองแสง 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.3 ผลึกและความเป็นผลึก 11
2.3 การตรวจสอบคุณภาพผลึก 14
2.3.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffract meter, XRD) 14
2.3.2 เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ (Photoluminescence) 17
2.3.3 เทคนิคการส่องผ่านและดูดกลืนแสงอัตราไวโอเลตและแสง (UV-Vis) 18
2.4 การตรวจสอบคุณภาพการวัดรังสี 20
2.4.1 ประสิทธิภาพการวัดรังสี 20
2.4.2 ความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 21
2.5 การปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ (Bridgman–Stock Barger) 22
บทที่ 3 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ 24
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก 24
3.2 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาเตามาจากวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ 26
3.2.1 ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน 27
3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ 29
3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลหาเกรเดียนท์อุณหภูมิ 30
3.2.4 ระบบปั้มสุญญากาศและระบบควบคุมก๊าซอาร์กอน 31
3.2.5 ภาชนะปลูกผลึก (Crucible) 32
3.3 การติดตั้งผลึกเข้ากับหลอดทวีคูณแสง (PMT) และระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี 33
3.3.1 การติดตั้งผลึกกับหลอดทวีคูณแสง(PMT) 33
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 36
4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก 36
4.2 การทดลองปลูกผลึก 39
4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองปลูกผลึก 39
4.2.2 การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการปลูกผลึก 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.3 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมนสโต๊กบาร์เกอร์ 40
4.2.4 ผลการปลูกผลึก 42
4.3 การทดสอบความเป็นผลึก 44
4.4 ผลการวิเคราะห์การเรืองแสงของผลึก 47
4.4 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านและการดูดกลืนแสงของผลึก 50
4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก 53
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย 59
5.1 สรุปผลการวิจัย 59
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง 60
5.3 ข้อเสนอแนะ 61
ภาคผนวก 63
ภาคผนวก ก. 64
คุณสมบัติของซีเซียมไดโอไดด์ และแทลเลียมไอโอไดด์ 64
ภาคผนวก ข. 67
คุณสมบัติสมบัติของขดลวดความร้อน 67
ภาคผนวก ค. 70
คุณสมบัติของอิฐทนไฟ 70
ภาคผนวก ง. 71
ข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ 71
ภาคผนวก จ. 74
ข้อมูลการกำหนดของหลอดทวีคูณแสง 74
ภาคผนวก ฉ. 76
ฐานข้อมูล XRD ของ CsI 76
บรรณานุกรม 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน 81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางแสงที่ดีของผลึก 13

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางแสงของผลึกชนิดสารอนินทรีย์ที่มีการใช้งานทั่วไป 14

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับการปลูกผลึก 37

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของน้ำหนักสารตั้งต้นที่ใช้ปลูกผลึกทั้งสามก้อน 40

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้การปลูกผลึก 42

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าแลตทิซ ขนาดผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเครียดของผลึกทั้งสาม 44

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ของผลึกทั้งสาม 47

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านแสง และค่าช่องว่าแถบพลังงานของทั้งสามผลึก 50

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV และความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของผลึกทั้งสามก้อน ที่ระยะวัด 3 เซนติเมตร 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสาร 8

ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของระบบนับวัดปริมาณรังสีที่มีหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง 9

ภาพที่ 2.3 กระบวนการเรืองแสงของของผลึกวัดรังสี 11

ภาพที่ 2.4 การเติมสารเจือเพื่อเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงาน 12

ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณแสงที่อุณหภูมิต่างๆของผลึกชนิดอนินทรีย์ 13

ภาพที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในช่องว่างอะตอมของผลึกหรือสารตัวอย่าง 15

ภาพที่ 2.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (b) ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ค่ามุมต่างๆ 15

ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของวิเคราะห์ผลึกหรือสารตัวอย่างด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ 17

ภาพที่ 2.9 การกระตุ้นและการเปล่งความยาวคลื่นแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ 17

ภาพที่ 2.10 การทำงานของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer 18

ภาพที่ 2.11 (a) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่างๆ (b) ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่หาได้จากวิธีของ Tauc’s plot 19

ภาพที่ 2.12 ระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี 20

ภาพที่ 2.13 ค่า Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM) สำหรับคำนวณหาค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 21

ภาพที่ 2.14 เกรท์เดียนของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่เกิดขึ้นภายในเตาปลูกผลึก 22

ภาพที่ 2.15 การเกิดผลึกด้วยวิธีแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ 23

ภาพที่ 3.1 สารตั้งต้น CsI, CaI_2 และ TlI ที่ใช้ในการปลูกผลึก 25

ภาพที่ 3.2 โครงสร้างผลึก CsI, CaI_2 และ TlI 25

ภาพที่ 3.3 ระบบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ 26

ภาพที่ 3.4 แผนผังส่วนประกอบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สโต๊กบาร์เกอร์ 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.5 เตาปลูกผลึก 2 โซน 28

ภาพที่ 3.6 เตาหลอมที่มีขดลวดให้ความร้อนภายใน 29

ภาพที่ 3.7 ระบบควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ 30

ภาพที่ 3.8 ระบบปั้มสุญญากาศและระบบควบคุมก๊าซอาร์กอน 31

ภาพที่ 3.9 หลอดแก้วควอทซ์สำหรับใช้เป็นภาชนะปลูกผลึก 32

ภาพที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อหลอดแก้วควอทซ์และระบบสุญญากาศ 33

ภาพที่ 3.11 ส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง 33

ภาพที่ 3.12 การติดตั้งผลึกเข้ากับหลอดทวีคูณแสง 34

ภาพที่ 3.13 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาสำหรับวิเคราะห์คุณภาพหัววัดรังสี 35

ภาพที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาแบบหลายช่องพลังงาน (MCA) 35

ภาพที่ 4.1 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดการปลูกผลึกของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน CsI=80%, CaI_2=20% 37

ภาพที่ 4.2 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดช่วงการปลูกผลึกของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน CsI=97%,CaI_2=3% 38

ภาพที่ 4.3 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดช่วงการปลูกผลึกของผลึก CsI(Tl) 38

ภาพที่ 4.4 สารตั้งต้นที่บรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ 39

ภาพที่ 4.5 ภาชนะปลูกผลึกขณะอยู่ในเตาหลอม 41

ภาพที่ 4.6 ผลึกที่อยู่ในแก้วควอทซ์ของผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 97:3 ของ CsI:CaI_2 และผลึก CsI(Tl) 43

ภาพที่ 4.7 การเรืองแสงของผลึกภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี 43

ภาพที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 45

ภาพที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ CsI:CaI_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 46

ภาพที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ผลึก CsI(Tl) เจือสาร TlI 0.35 % ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึก CsI(Tl) เจือสาร TlI 0.35 % ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 47

ภาพที่ 4.12 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 48

ภาพที่ 4.13 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 48

ภาพที่ 4.14 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก CsI(Tl) ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 49

ภาพที่ 4.15 ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาของผลึกทั้งสามก้อนด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 49

ภาพที่ 4.16 การส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ 51

ภาพที่ 4.17 การส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 897:3 ของ $CsI:CaI_2$ 51

ภาพที่ 4.18 ผลการส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก CsI(Tl) 52

ภาพที่ 4.19 การค่าตอบสนองการส่องผ่านแสงของผลึกทั้งสามก้อน 52

ภาพที่ 4.20 ค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึกทั้งสามก้อนด้วยเทคนิค UV-visible 53

ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20% โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร 55

ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3% โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร 55

ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก CsI(Tl) โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร 56

ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึกทั้งสามก้อน วัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร 56

ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20% วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร 57

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3% วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร 57

ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก CsI(Tl) วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร 58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

หัววัดรังสีที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันแบ่งได้เป็นหลายประเภทและมีหลากหลายชนิด และที่นิยมใช้งานกันมากชนิดหนึ่งคือหัววัดรังสีชนิดเรืองแสงการพัฒนาหัววัดรังสีชนิดเรืองแสงเพื่อให้มีประสิทธิภาพและความสามารถในการตรวจวัดรังสีที่ดีตรงตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานที่หลากหลายด้าน ทั้งงานด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัยทางนิวเคลียร์และรังสีและอื่น ๆ ซึ่งหัววัดรังสีชนิดเรืองแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดคือ ผลึกเรืองแสงเป็นส่วนทำอันตรกิริยากับรังสีแล้วแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เข้าสู่ระบบวิเคราะห์สัญญาณ และแสดงผลเป็นค่านับวัดทางรังสี ดังนั้นผลึกเรืองแสงนี้จึงเป็นส่วนที่ถูกศึกษาพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติทางแสงของผลึก รวมถึงศึกษาสังเคราะห์ผลึกชนิดใหม่ มีหลายกลุ่มวิจัยที่ศึกษาการปลูกผลึกแคลเซียมไอโอไดด์ (CaI_2) ร่วมกับสารประกอบชนิดอื่นแล้วให้คุณสมบัติเป็นหัววัดรังสีชนิดเรืองแสงที่ดี อาทิ เช่น อัตราการเรืองแสงต่อพลังงานรังสีสูง ค่าความหนาแน่นสูง ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาอยู่ในช่วงตอบสนองของอุปกรณ์รับแสง มีความเสถียรต่อความชื้น เป็นต้น (Yanagida, 2018) ด้วยว่า แคลเซียมไอโอไดด์มีอัตราการเรืองแสงต่อพลังงานรังสี (Iida et al., 2020; Stand et al., 2019) แต่จะมีปัญหาเรื่องความชื้นได้ง่าย (Iida et al., 2020) งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยพัฒนาสังเคราะห์ปลูกผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ ($CsCaI_3$) โดยที่ใช้ซีเซียมไอโอไดด์เป็นวัสดุตั้งต้นหลักเพราะว่าเป็นสารประกอบเรืองแสงที่มีคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางแสงที่ดี ความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน ความทนทานต่อการได้รับรังสี เสถียรภาพต่อความชื้นในอากาศ และเมื่อประกอบเป็นหัววัดรังสีจึงมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลการตรวจวัดรังสีได้ดี (Zhang, Zhao, Li, & Ouyang, 2016; Zhao, Zhang, & Ouyang, 2017) โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของสารประกอบตั้งต้นสองชนิดนี้ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ได้ ซึ่งทำการปลูกผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ (Bridgeman-Stock Barger) ผลึกที่ปลูกได้นี้นำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้าง ตรวจสอบคุณสมบัติทางแสง ช่องว่างแถบพลังงานทางแสง (Optical energy band gap) และ คุณสมบัติการเปล่งแสง (Light emission) ของผลึก เมื่อได้สัดส่วนของสารประกอบตั้งต้นที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปประกอบเป็นหัววัดรังสีเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพหัววัดรังสีและความสามารถในการแยกพลังงานรังสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์สำหรับใช้ในการตรวจวัดรังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ปรับการควบคุมอุณหภูมิสำหรับหาโปรไฟล์อุณหภูมิของการปลูกผลึก

2. ปลูกผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ โดยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ที่มีอัตราส่วนของซีเซียมไอโอไดด์และแคลเซียมไอโอไดด์ ดังนี้ 20:80, 80:20 โดยน้ำหนัก

3. ตรวจสอบโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของผลึก

4. หาประสิทธิภาพและความสามารถในการแยกพลังงานของการตรวจวัดรังสีของผลึก

1.4 วิธีการดำเนินงานและขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาวิธีการปลูกผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

3. จัดเตรียมอุปกรณ์และทำการทดลองปลูกผลึก

4. ตรวจสอบคุณสมบัติของผลึก (โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของผลึก) และตรวจวัดประสิทธิภาพและความสามารถในการแยกพลังงานของผลึก

6. สรุปผลและทำรายงานรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางในการปลูกผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์สำหรับใช้ในการตรวจวัดรังสี

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

1. ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2019 Takashi Iida Takashi Iida, Kei Kamada, Masao Yoshino, Kyoung Jin Kim, Koichi Ichimurad, Akira Yoshikawa ปลูกผลึก CaI_2 ด้วยวิธีปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ ผลึกที่ได้มีขนาด 5x5x1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ผลึกใส่แต่มีรอยแตกร้าว เมื่อทดสอบคุณสมบัติทางแสง ความยาวคลื่นที่เปล่งออกมา คือ 410 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นอยู่ภายในช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสงหรือหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ค่าปริมาณแสง 107,000 Ph/MeV หรือประมาณ 2.7 เท่าของผลึก NaI(Tl) และความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 3.2 % ที่พลังงาน 662 keV

2. ปี ค.ศ. 2018 L. Standa, M. Zhuravleva, B. Chakoumakos, H. Weia, J. Johnsona, V. Martin, M. Loyd, D. Rutstrom, W. McAlexander, Y. Wu, M. Koschan, C.L. Melcher ปลูกผลึก $CsCaBrI_2$:Eu 7% ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ ตั้งค่าอุณหภูมิโซนสูงและต่ำที่ 720/600 ^{o}C อุณหภูมิโซนปลูกผลึกคือ 671 ^{o}C อัตราการลดลงของอุณหภูมิ 5 ^{o}C/hr อัตราการตกผลึก 1 mm/hr ผลึกขนาด 8x8x20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีลักษณะโปร่งแสง เมื่อทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โครงสร้างเป็นแบบคิวบิก และผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงผลึก ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาคือ 462 นาโนเมตร ค่าปริมาณรังแสง 51,800 Ph/MeV และความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 3.8 % ที่พลังงาน 662 keV

3. ปี พ.ศ 2560 อิมรอน วาเด็ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้การพัฒนาผลึกซีเซียมไอโอไดด์โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด ปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ผลการทดสอบคุณลักษณะเตาปลูก โดยผลึก CsI(Tl) มีการตอบสนองต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิในเวลา 7 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมงสำหรับ CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของผลึกโดยTlและCa สัดส่วนร้อยล่ะ0.35 โดยน้ำหนัก พบว่าผลึกทั้งสามมีโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐานและโครงสร้างการจัดเรียงตัวเด่นชัดที่ระนาบ(110) คุณสมบัติทางแสงของ ผลึก CsI(Tl) , CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร 425 นาโนเมตร และ 452 นาโนเมตร ตามลำลับ คุณสมบัติการส่องผ่านแสง พบ ผลึก CsI(Tl) มีการตอบสนองดีสุดที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าแถบช่องว่างพลังงาน 2.21 eV สำหรับผลึก CsI(Ca) มีการตอบสนองที่ความยาวคลื่นที่ 430 นาโนเมตร ค่าแถบช่องว่างพลังงาน 2.95 eV และผลึก CsI(Tl,Ca) มีการตอบสนองความยาวเคลื่อนที่ 500 นาโนเมตร ค่าแถบช่องว่างพลังงาน 2.48 eV และผลการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV พบว่า ผลึกCsI(Tl) , CsI(Ca) และ

CsI(Tl,Ca) มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 81, 60, 89 โดยมีค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี คือ 27.8%, 60.38% และ 40.98 % ตามลำดับ

4. ปี ค.ศ. 2013 Mikhail S. Alekhin, Daniel A. Biner, Karl W. Kramer และ Pieter Dorenbos ปลูกผลึกโดยการเจือสาร Ca^{2+} ในผลึก LaBr3: 5% Ce^{3+} ปลูกผลึกปลูกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ และผลตรวจสอบคุณสมบัติทางแสง พบว่าผลึกมีค่าการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 350-420 นาโนเมตร และค่าปริมาณแสง 71000 Ph/MeV ค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 2.9 % ที่พลังงาน 662 keV เมื่อนำไปทดสอบด้วยพลังงานรังสีที่ต่ำกว่า ผลค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีคือ 8.2% ที่พลังงาน 60 keV และ 11.5% ที่พลังงาน 32 keV

5. ปี ค.ศ. 2012 Mariya Zhuravleva, Bonnie Blalock, KanYang, Merry Koschan, Charles L. Melcher ปลูกผลึก $CsCaI_3$:Eu และ $CsCaCl_3$:Eu ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ โดยให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งปลูกผลึกอุณหภูมิ 686 และ 910 °C ตามลำดับ โดยให้อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเกรเดียนท์อุณหภูมิมีค่า 19.69 °C/cm ใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิ 5 °C /hr ได้อัตราการตกผลึก 1 mm/hr ผลึกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร และความยาว 4 และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ผลึกมีลักษณะโปร่งแสง เมื่อตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โครงสร้างเป็นแบบ orthorhombic และคิวบิก ตามลำดับ และผลตรวจสอบคุณสมบัติทางแสง พบว่าผลึกทั้งสองมีค่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาคือ 450 นาโนเมตร และค่าปริมาณแสง 38,500 และ 18,000 Ph/MeV ตามลำดับ และมีค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 8 % และ 8.9 ที่พลังงาน 662 keV

6. ปี ค.ศ. 1998 S. S. Novosad ปลูกผลึก CaI_2 ซึ่งเจือสารด้วยหมู่โลหะ คือ Fe^{2+}, Co^{2+} และ N^{2+} ด้วยเปอร์เซนต์สารเจือที่ค่าต่างๆ ปลูกผลึกด้วยวิธีสต๊อกบาร์เกอร์ เมื่อนำผลึกที่ได้ไปตรวจสอบสเปคตรัมและคุณสมบัติทางแสง ผลึก CaI_2 ที่เจือด้วยสารหมู่โลหะมีแนวโน้มให้ค่าปริมาณแสงที่วัดได้มีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือ และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีมีค่าแย่ลง แต่ช่วงความยาวคลื่นที่เปล่งออกมามีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยที่ผลึก CaI_2 ซึ่งเป็นผลึกอ้างอิงวัดค่าปริมาณแสงเป็น 1.7 เท่า ของ NaI(Tl) ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาในช่วง 410-425 นาโนเมตร และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 27% ที่พลังงาน 17.4 keV ผลึก CaI_2 (0.01 mol % $FeCl_2$) ค่าปริมาณแสง 0.73 เท่าของผลึกอ้างอิง และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 43 % ที่พลังงาน 17.4 keV ผลึก CaI_2 (1.0 mol % $FeCl_2$) ค่าปริมาณแสงเป็น 0.21 เท่าของผลึกอ้างอิง และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 80 % ที่พลังงาน 17.4 keV ผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

CaI_2 (0.03 mol % $CoCl_2$) ค่าปริมาณแสงเป็น 0.5 เท่าของผลึกอ้างอิง และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 45 % ที่พลังงาน 17.4 keV ผลึก CaI_2 (1.5 mol % $CoCl_2$) ค่าปริมาณแสงเป็น 0.14 เท่าของผลึกอ้างอิง และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 17.4 keV ผลึก CaI_2 (0.01 mol % NiI_2) ค่าปริมาณแสงเป็น 0.47 เท่าของผลึกอ้างอิง และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 48 % ที่พลังงาน 17.4 keV และผลึก CaI_2 (0.1 mol % NiI_2) ค่าปริมาณแสงเป็น 0.2 เท่าของผลึกอ้างอิงและค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี 95% ที่พลังงาน 17.4 keV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

รังสีแกมมาหรือรังสีเอกซเรย์อาจเรียกรวมว่าโฟตอน (Photon) หมายถึง กลุ่มของพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของโฟตอนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานของโฟตอน เลขมวลของสสาร โฟตอนอาจเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน นิวเคลียส หรือสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส ซึ่งอาจเป็นการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ส่วนอันตรกิริยาที่เกิดกับนิวเคลียสของสสารนั้นโฟตอนต้องมีพลังงานสูงมาก ซึ่งรังสีแกมมาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีพลังงานไม่สูงพอ จึงไม่สามารถทำให้เกิดอันตรกิริยานี้ อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสารที่สำคัญได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์คอมป์ตัน และแพร์โพรดักชัน

2.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของสสาร หากพลังงานที่ถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงนั้น อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอมได้ ซึ่งเรียกอิเล็กตรอนนี้ว่าโฟโตอิเล็กตรอน โดยโฟโตอิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานโฟตอนกับพลังงานยึดเหนี่ยว ความถี่ต่ำสุดของโฟตอนที่สามารถทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนในสสารใดๆได้ เรียกว่า ความถี่ขีดเริ่ม (Threshold frequency) ซึ่งพลังงานจลน์และจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานและความเข้มของโฟตอนสูงขึ้น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากเมื่อโฟตอนพลังงานต่ำทำอันตรกิริยากับสสารที่มีเลขเชิงอะตอมสูง(high atomic number) เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของสสารจะเกิดคู่ไอออนขึ้นเช่นเดียวกับการแตกตัวเป็นคู่ไอออน โฟโตอิเล็กตรอนมีสมบัติเช่นเดียวกับอนุภาคบีตา ซึ่งจะทำอันตรกิริยาต่อไปได้อีก สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกับโฟตอน และจะทำมุมกับแนวการเคลื่อนที่ของโฟตอน เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำโอกาสการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกพิจารณาจากค่าภาคตัดขวางของพลังงานโฟตอนและสสารนั้นๆ

$$\sigma = \frac{CZ^5}{E^3} \tag{2.1}$$

σ คือ ภาคตัดขวางปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric cross-section) Z คือ เลขอะตอม (Atomic number) E คือ พลังงานของโฟตรอน (eV)

2.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ปรากฏการณ์นี้โฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารแบบยืดหยุ่นโฟตอนก็เกิดการสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่าคอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนโฟตอนมีพลังงานลดลงแล้วเกิดการกระเจิงออกจากอะตอมหรือเรียกว่า การกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering) ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิงเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง (อันตรกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง (0.5-3.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ถ้าโฟตอนที่กระเจิงออกไปมีพลังงานมากพอ ก็อาจเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ต่อไป ในส่วนของคอมป์ตันอิเล็กตรอนนั้นมีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาและพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ถ้าคอมป์ตันอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์มากพอ อาจทำอันตรกิริยาต่อไปอีกเช่นเดียวกับอนุภาค บีตา โดยโอกาสการเกิดปรากฏการณ์คอมตัน พิจารณาได้จากค่าภาคตัดขวางของพลังงานโฟตอนและสสารนั้นๆ

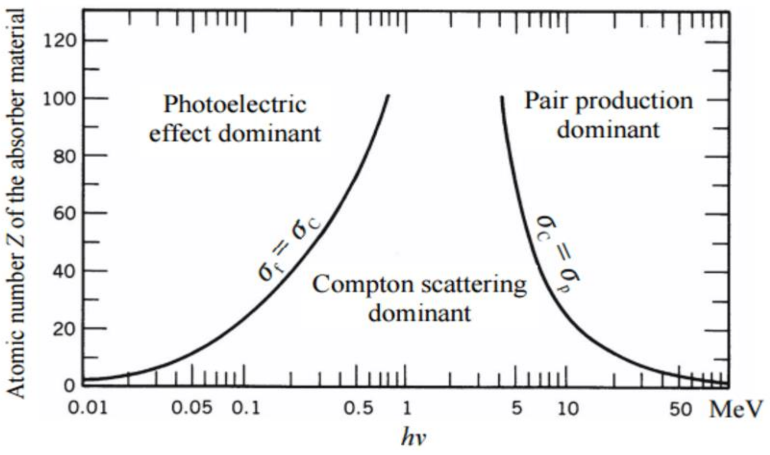
$$\sigma = \frac{C\,Z\,\rho}{AE} \tag{2.2}$$

σ คือ ภาคตัดขวางปรากฏการณ์คอมตัน (Compton scattering cross-section) Z คือ เลขอะตอม (atomic number) ρ คือ ความหนาแน่นของสสาร (Density, g/cm^3) และ E คือ ค่าพลังงานของโฟตอน (eV)

2.1.3 แพร์โพรดักชัน

แพร์โพรดักชันเป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนพลังงานสูงผ่านเข้าใกล้นิวเคลียสพลังงานโฟตอนเปลี่ยนเป็นอนุภาคอิเล็กตรอนและโพซิตรอน เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนรวมกับมวลของโพซิตรอนแล้วเทียบเท่าพลังงาน 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นโฟตอนต้องมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ถ้าพลังงานมากกว่า 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานส่วนที่เกินนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพซิตรอน อันตรกิริยาหลักของโฟตอนกับสสารทั้ง 3 แบบ นั้นขึ้นกับค่าพลังงานของโฟตอนและค่าเลขอะตอมของสสารแสดงดังในภาพที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 2.1 อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสาร
(Kharisov and Kharissova, 2013)

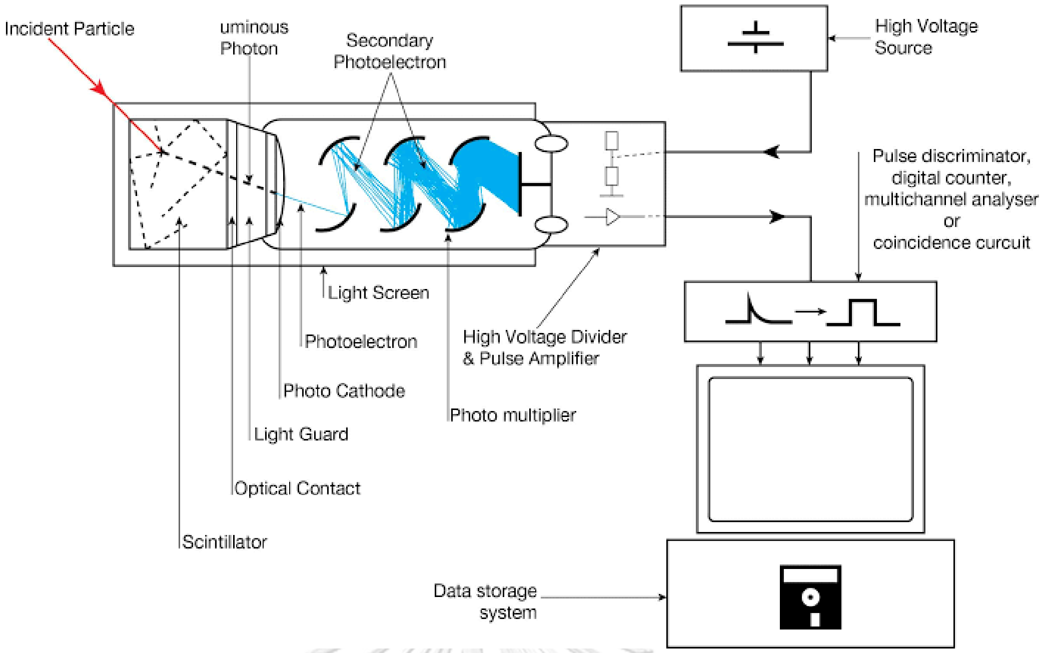
สำหรับผลึกหรือสารที่มีเลขอะตอมที่สูงและมีขนาดที่ใหญ่จะมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับรังสีมากกว่าผลึกหรือสารที่มีเลขอะตอมที่น้อย ดังนั้นการนำผลึกหรือสารที่มีเลขอะตอมที่สูงมาทำเป็นหัววัดรังสีชนิดเรืองแสงนั้นจะทำให้การวัดรังสีมีประสิทธิภาพที่มากกว่า

2.2 เครื่องวัดรังสีและหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง

2.2.1 เครื่องวัดรังสี

เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดรังสีอาจแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆด้วยกัน คือ ส่วนที่เป็นหัววัดรังสี กับส่วนที่เป็นเครื่องนับวัดที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนหัววัดรังสีเป็นส่วนที่รังสีทำให้เกิด ปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่งกับรังสี ส่วนที่เป็นเครื่องนับวัดรังสีเป็นส่วนที่วิเคราะห์ นับวัดสัญญาณ และแสดงผลอันเกิดจากปรากกฎการณ์อย่างใดอย่างหนึ่งของรังสีที่เกิดกับหัววัดรังสี โดยหัววัดรังสีก็มีหลากหลายชนิดด้วยกัน เช่น ชนิดบรรจุแก๊ส ชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเรืองแสงหรือซินทิลเลชั่น เป็นต้น โดยส่วนประกอบหลักของระบบวิเคราะห์ทางรังสีดังแสดงในภาพที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของระบบนับวัดปริมาณรังสีที่มีหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง (Connor, 2019)

ระบบนับวัดหรือวิเคราะห์พลังงานรังสีแกมมานั้นหัววัดรังสีส่วนมากจะทำงานในรูปของพัลส์สัญญาณ เมื่อมีรังสีเข้ามาตกกระทบ หัววัดรังสีทำการสร้างสัญญาณไฟฟ้าขึ้นตามจำนวนรังสีที่เข้ามาและนำสัญญาณมาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณ และคัดเลือกสัญญาณที่ต้องการโดยตั้งช่องพลังงานแคบๆเพื่อแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการหรือสัญญาณรบกวนออกจากการนับวัด หลักการทำงานของระบบนับวัดทางรังสีมีดังต่อไปนี้

ตัวขยายสัญญาณส่วนหน้าหรือปรีแอมป์ (Preamplifier) เมื่อมีรังสีเข้ามาตกกระทบกับหัววัดรังสีทำให้มีการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้น สัญญาณที่ได้ส่วนมากจะมีขนาดเล็กและหัววัดรังสีส่วนมากจะมีอิมพีแดนซ์เอาต์พุต (output impedance) ค่อนข้างสูงทำให้จำเป็นต้องหาอุปกรณ์ที่มาเชื่อมต่อที่มีอิมพีแดนซ์ที่สัมพันธ์กันมิฉะนั้นจะเกิดการบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของการนับวัดเสียไป ปรีแอมป์ที่ต่อกับหัววัดรังสีที่มีหน้าที่ขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีจะต่ำมาก ทำให้อิมพีแดนซ์ระหว่างหัววัดรังสีกับอุปกรณ์ส่วนอื่นๆ มีความใกล้เคียงกัน และปรับรูปร่างสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป ปรีแอมป์ที่ดีควรทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยความสูงของสัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสัญญาณที่มาจากหัววัดรังสี นั่นคือความสูงของสัญญาณสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานของรังสีที่นับวัดได้นั่นเองเพื่อให้การขยายสัญญาณได้ผลตามที่ต้องการ ปรีแอมป์ควรอยู่ใกล้กับหัววัดรังสีมากที่สุดทั้งนี้เพื่อเป็นการทำให้อัตราส่วนระหว่าง

สัญญาณและสัญญาณรบกวนสูงสุด นั่นคือต้องขยายสัญญาณก่อนที่จะมีสัญญาณจากสายเคเบิลมารบกวน

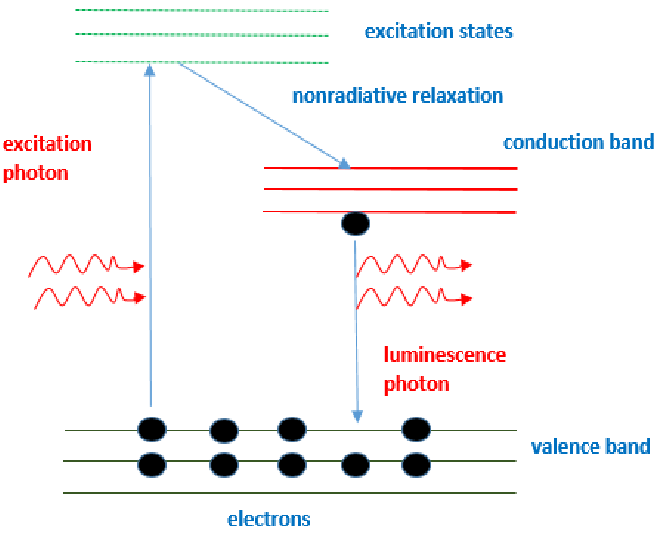
ตัวขยายสัญญาณหรือแอมปลิไฟร์ (Amplifier) เป็นส่วนเชื่อมต่อจากปรีแอมป์มีหน้าที่หลัก คือ ขยายสัญญาณที่ได้จากปรีแอมป์ซึ่งถือว่ามีขนาดเล็ก ให้มีความสูงพอเหมาะสำหรับที่จะส่งไปยังอุปกรณ์ส่วนอื่น เช่น เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณเป็นต้น สัญญาณออกจากกันได้ ในการตั้งค่าแอมปลิไฟร์จะใช้ค่าเกนแฟคเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีความสูงตามที่ต้องการโดยความสูงของสัญญาณต้องสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีที่ทำการนับวัด

เครื่องวิเคราะห์ความสูงสัญญาณ (Pulse high analyzer) เมื่อรังสีตกกระทบหัววัดรังสี ความสูงของสัญญาณที่ได้จาก แอมปลิไฟร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพลังงานที่ถูกดูดกลืนในหัววัดรังสี สัญญาณที่ได้ออกมาจะสามารถบอกพลังงานของรังสีได้จากความสูงของสัญญาณ ดังนั้นการคัดเลือกสัญญาณที่จะนับวัดก็คือ ดูจากความสูงของสัญญาณนั่นเอง

เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่องพลังงาน (Multichannel Analysis: MCA) ทำหน้าที่วิเคราะห์สัญญาณที่มีหลากหลายพลังงานโดยที่มีช่องพลังงานงานหลายช่องพลังงานงานเรียงต่อกัน สามารถแยกพลังงานงานที่เข้ามาได้ทำให้เห็นรูปสัญญาณทั้งหมด นั่นคือสามารถเห็นสเปกตรัมของรังสีที่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดรังสีได้ทั้งหมดในเวลาเดียวกัน โดยเป็นกราฟที่สร้างขึ้นจากแกน X จะเป็นพลังงานของรังสีหรือเป็นความสูงของสัญญาณ และแกน Y เป็นจำนวนค่านับวัดที่เข้ามาต่อหน่วยเวลา

2.2.2 หัววัดรังสีชนิดชนิดเรืองแสง

หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงหรือซินทิลเลชัน ประกอบด้วยผลึก และอุปกรณ์รับแสง ได้แก่ หลอดทวีคูณแสง (PMT) และ โฟโตไดโอด (Photodiode) หลักการทำงานของหัววัดรังสีชนิดนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เมื่อรังสีตกกระทบแล้วถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของผลึกทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมมีระดับพลังงานที่สูงขึ้น แล้วเคลื่อนที่ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นไม่สามารถอยู่ในสถานะนี้ได้ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงจึงจะลงสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าเป็นตามลำดับจนกระทั่งสู่สภาวะพื้น จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนแสง พลังงานที่ปลดปล่อยออกมานั้นก็ขึ้นอยู่กับค่าผลต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ระหว่างแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำ (Conduction band) โดยพลังงานที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งสารหรือผลึกแต่ชนิดก็มีระดับพลังงานนี้แตกต่างกันซึ่งนี้จะส่งผลให้คุณสมบัติทางแสงที่มีค่าแตกต่างกัน



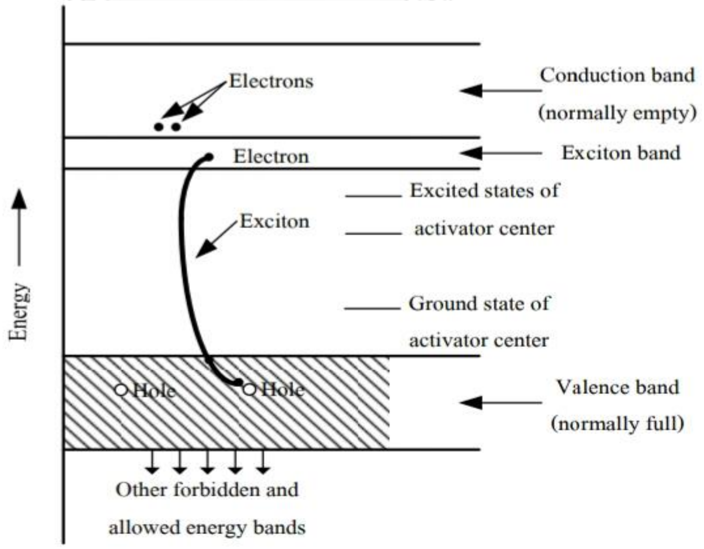
ภาพที่ 2.3 กระบวนการเรืองแสงของของผลึกวัดรังสี

2.2.3 ผลึกและความเป็นผลึก

ผลึกเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลมารวมกันจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนและเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องกันภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุเพียงชนิดเดียวหรือหลายชนิดก็ได้ หรืออาจจะประกอบด้วยหลายอะตอมหรือหลายโมเลกุล หน่วยที่เล็กที่สุดที่สามารถแสดงความเป็นผลึกหรือเป็นตัวแทนของผลึกได้เรียกว่าหน่วยเซลล์ (Unite cell) โดยที่ค่าความยาวแต่ละด้านของหน่วยเซลล์เรียกว่าค่าคงที่แลทติซมีหน่วยเป็นอังสตรอม เมื่อหน่วยเซลล์เรียงต่อกันเป็นระเบียบในขอบเขตหนึ่งๆ จะเรียกส่วนนี้ว่าเกรน (Grain) ผลึกในอุดมคติคือผลึกมีอะตอมหรือหน่วยเซลล์เรียงต่อกันเป็นระนาบอย่างต่อเนื่องและเป็นระเบียบทั่วทั้งผลึก ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะมีความเป็นผลึกที่สูง แต่ในความเป็นจริงแล้วผลึกไม่ได้มีความสมบูรณ์ทั้งหมด โดยที่ความไม่สมบูรณ์ของผลึกอาจเกิดจากการขาดหายไปของอะตอม(Vacancy) การมีอะตอมมากเกินไปในช่องว่างระหว่างอะตอม (Interstitial) อะตอมที่ขาดหายไปเข้าไปแทรกช่องว่างที่อยู่ใกล้เคียง (Frenkel imperfection) ประจุบวกหรือลบหายไป (Schottky imperfection) อะตอมของธาตุอื่นเข้าไปแทรก (Interstitial impurity atom) ความไม่สมบูรณ์จากการอยู่ผิดที่ของกลุ่มอะตอมตลอดทั้งแถวหรือระนาบภายในผลึก และอะตอมของขอบเกรนที่เรียงไม่เป็นระเบียบ เป็นต้น ซึ่งความไม่สมบูรณ์ต่างๆที่กล่าวมาอาจส่งผลในเรื่องของการแสดงคุณสมบัติทางแสงของผลึกเช่น ทำให้ระดับชั้นพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำ (Conduction band) ไม่ชัดเจน ทำให้ผลึกมีคุณสมบัติทางแสง

ไม่ดี สำหรับผลึกที่ให้คุณสมบัติทางแสงเช่นให้ค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาเป็นค่าเดียวหรือค่าใกล้เคียงกันจะเรียกผลึกชนิดนี้ว่าผลึกเดี่ยว (Single crystal)

การเปล่งพลังงานแสงหรือความยาวคลื่นที่แตกต่างขึ้นกับชนิดของสารหรือผลึกนั้นๆ สำหรับคุณสมบัติทางแสงของสารเรืองแสง เช่น สารเรืองแสงชนิดอินทรีย์ให้การเรืองแสงที่น้อย แต่กระบวนการเรืองแสงใช้เวลาน้อย และสารเรืองแสงชนิดอนินทรีย์ให้การเรืองแสงที่มากกว่า แต่กระบวนการเรืองแสงใช้เวลามากกว่า ตัวอย่างของผลึกเรืองแสงชนิดสารอนินทรีย์ เช่น CsI, NaI, BaF, CaF_2, Zn และ CsF เป็นต้น ผลึกเรืองแสงเหล่านี้เป็นกลุ่ม อัลคาร์ไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) คุณสมบัติของผลึกจะขึ้นกับสถานะของสาร และลักษณะโมเลกุลเป็นหลัก ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเปล่งแสงจะขึ้นกับลักษณะของผลึกและสารเจือ สำหรับสารหรือผลึกเรืองที่เป็นสารบริสุทธิ์ โดยส่วนใหญ่เมื่อมีพลังงานเข้ามาแล้วเกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้อะตอมของสารถูกกระตุ้น แล้วกลับเข้าสู่สถานะพื้น โดยการปลดปล่อยพลังแสงออกมาในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตาไม่สามารถมองเห็นและให้ความยาวคลื่นที่เปล่งออกมากว้างและไม่ตรงกับช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์แสง จึงต้องมีการเติมสารเจือลงไปเพื่อทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ของสารนั้นเปลี่ยนไป และเพื่อให้ได้แสงที่ได้มีความยาวคลื่นตามต้องการ และปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในสารหรือผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การเติมสารเจือเพื่อเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงาน

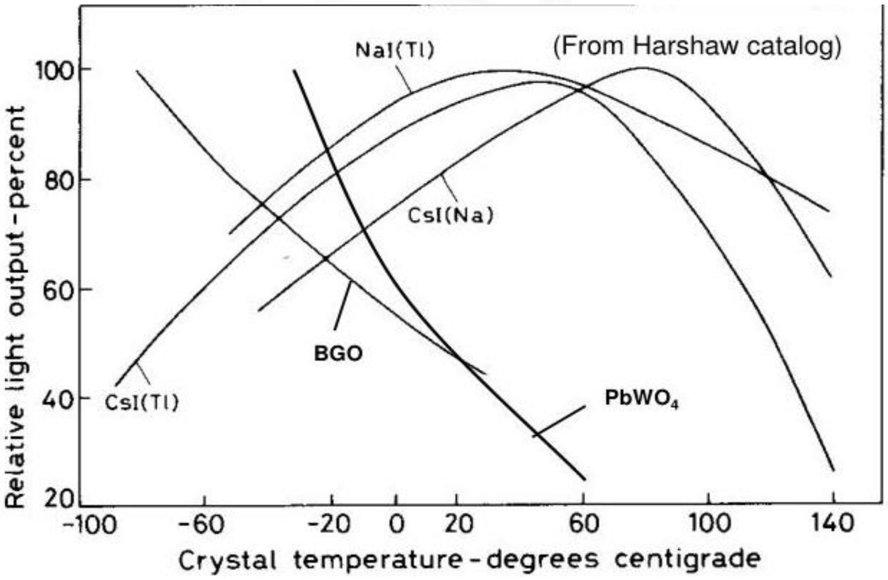
การเติมสารเจือลงไปในสารบริสุทธิ์เพื่อทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของสารหรือผลึกนั้นเปลี่ยนแปลงไปให้ตรงกับช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสง สำหรับผลึกเรืองแสงชนิดสารอนินทรีย์ที่เป็นของแข็ง

นั้นเป็นผลึกที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน เช่นเพื่อการค้นคว้าวิจัยต่างๆ ทางนิวเคลียร์และใช้ในด้านความปลอดภัยทางรังสี ผลึกเรืองแสงที่เหมาะสมในการทำหัววัดรังสีควรมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางแสงที่ดีของผลึก

1	เปลี่ยนพลังงานรังสีให้ได้แสงเรืองที่มาก (High light yield)
2	การแจกแจงหรือกำลังแยกพลังงานสูง (High energy resolution)
3	แสงเรืองไม่ถูกดูดกลืนในผลึกเอง (Transparent)
4	ปลดปล่อยสเปกตรัมแสงที่สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดแสงได้เหมาะสม (An emission spectra matched to the spectral sensitivity of the photo detector)
5	แสงเรืองในเวลาที่สั้น (Short decay time)
6	ไม่ไวต่อความชื้น (Non Hygroscopic)
7	ดัชนีการหักเห (Index) ควรใกล้เคียงกับแก้ว คือ 1.5
8	ความหนาแน่น(Density, high atomic number) 3-9 g/cm^3

สำหรับหัววัดชนิดเรืองแสงถ้านำไปใช้งานอาจต้องพิจารณาในเรื่องของอุณหภูมิด้วยเนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่าปริมาณแสง โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณแสงที่อุณหภูมิต่างๆดังแสดงในภาพที่ 2.5 สำหรับคุณสมบัติทางแสงของผลึกอนินทรีย์ที่มีใช้งานทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณแสงที่อุณหภูมิต่างๆของผลึกชนิดอนินทรีย์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางแสงของผลึกชนิดสารอนินทรีย์ที่มีการใช้งานทั่วไป

Properties	NaI(Tl)	BGO	CeF_3	BaF_2	CsI(Tl)	$PbWO_4$
Density (g cm^{-3})	3.67	7.13	6.16	4.89	4.53	8.28
Radiation						
Length (cm)	2.59	1.12	1.68	2.05	1.85	0.89
Moliere radius (cm)	4.5	2.4	2.6	3.4	3.8	2.2
dE/dx(MeV cm^{-1} per mip)	4.8	9.2	7.9	6.6	5.6	13.0
Decay time (ns)						
short	230	300	~5	0.6	>1000	5
long	150[ms]		30	620		15
Peak emission (nm)						
short	415	480	310	220	550	440
long			340	310		530
Refractive index						
at peak emission	1.85	2.20	1.68	1.56	1.80	2.16
Light yield						
(versus NaI(Tl))	1.00	0.15	0.10	0.05(fast) 0.20(slow)	0.40	0.01
Light yield γ/MeV	4×10^4	8×10^3	2×10^3	10^4	5×10^4	1.5×10^2

(Leroy and Rancoita, 2000)

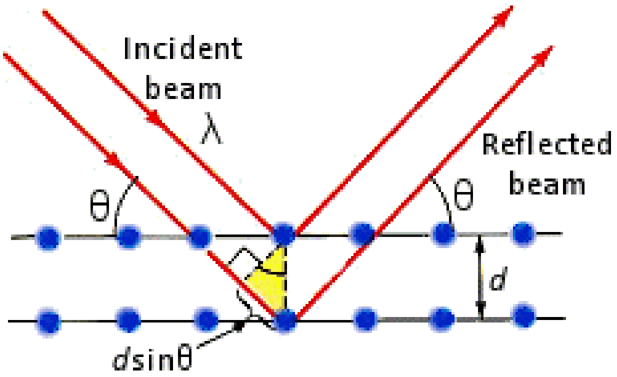
2.3 การตรวจสอบคุณภาพผลึก

การตรวจสอบคุณภาพผลึกเป็นการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของผลึก มีเทคนิค ที่ใช้ในการตรวจสอบดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

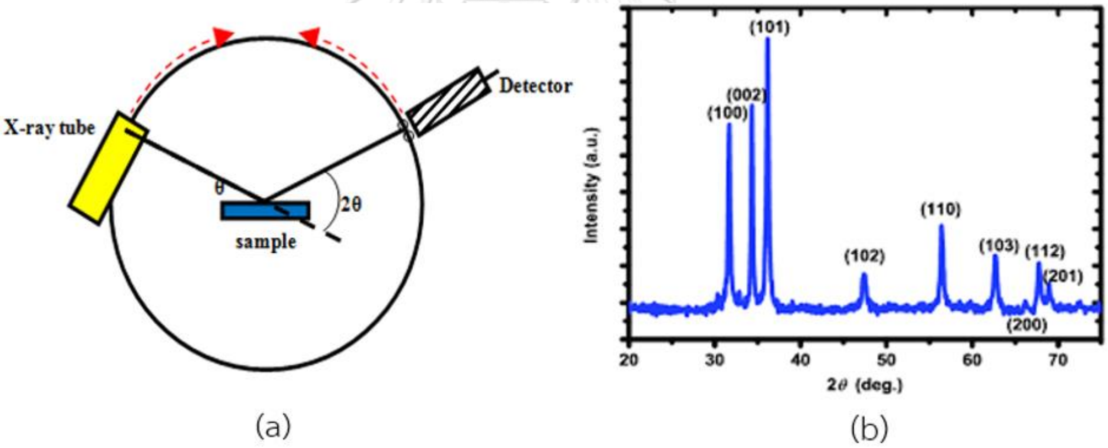
2.3.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffract meter, XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกตัวอย่างเป็นการวิเคราะห์ แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยให้รังสีเอกซ์ตกกระทบ สะท้อน และเลี้ยวเบนผ่านไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมด้วยค่ามุมต่างๆ แล้ววัดความเข้มที่เกิดขึ้น เนื่องจากสารแต่ละชนิด มีขนาดของหน่วยเซลล์และการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกันดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาจึงมีรูปแบบที่แตกต่างกัน สารตัวอย่างที่เป็นผลึกมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ โดยการจัดเรียงตัวข องอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน แต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก



ภาพที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในช่องว่างอะตอมของผลึกหรือสารตัวอย่าง
(ChemViews, 2012)

เมื่อรังสีเอกซ์เกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนผ่านช่องว่างอะตอมด้วยมุมต่างๆแล้วเข้าสู่หัววัดรังสี จะทำให้เกิดความเข้มที่ตำแหน่ง 2θ ต่างๆ มีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในภาพที่ 2.7 (a) และ 2.7 (b) ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับโครงสร้างผลึกอ้างอิง



ภาพที่ 2.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (b) ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ค่ามุมต่างๆ
(http://content.inflibnet.ac.in)

การสะท้อนและการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึก สามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยสมการของ Bragg’ s Law ดังสมการที่ 2.3

$$2d\sin(\theta) = n\lambda \qquad (2.3)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบนเป็นเลขจำนวนเต็ม **λ** คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ และ **θ** คือ ค่ามุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏเป็นค่าความเข้มและมุม 2**θ** สามารถทำการวิเคราะห์โครงร้างของผลึกได้ โดยการหาค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \tag{2.4}$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ d คือ ค่าความยาวระนาบ h, k, l คือ ค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ สำหรับผลึกที่ได้จากการปลูกนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการจัดเรียงตัวในระนาบที่เปลี่ยนไปจากเดิม แสดงว่าเกิดความเครียดในโครงผลึกขึ้น โดยค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในโครงผลึก เป็นค่าอัตราส่วนค่าคงที่แลตทิซที่เปลี่ยนไปต่อค่าคงที่แลตทิซมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$\%\,strain = \left(\frac{a-a_0}{a_0}\right) \mathrm{x}\, 100 \tag{2.5}$$

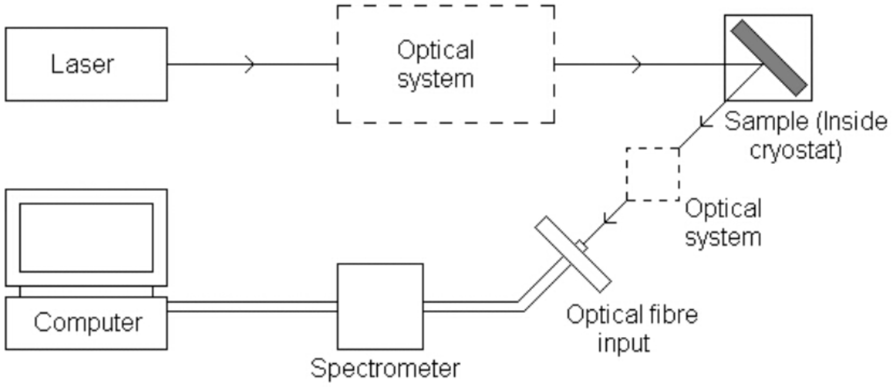
เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซที่วิเคราะห์ได้ a_o คือ ค่าคงที่แลตทิซมาตรฐาน ดังนั้นสภาวะความเครียดของผลึกจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สภาวะเครียดแบบถูกบีบอัด (Compressive strain) ในกรณีที่ค่าคงที่แลตทิซที่วิเคราะห์ได้ของผลึกมีขนาดสั้นกว่าหรือหดตัว และ สภาวะเครียดแบบดึงขยาย (Tensile strain) สำหรับกรณีที่ค่าคงที่แลตทิซที่วิเคราะห์ได้ของผลึกมีขนาดยาวกว่าหรือยืดขยายตัว ในส่วนของการหาเกรนผลึก ซึ่งเป็นสิ่งที่บอกถึงความเป็นผลึกนั้นสามารถหาได้จากสมการเชอร์เรอร์ (Sherrer) ดังแสดงในสมการที่ 2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$D = \frac{K\lambda COS(\theta)}{\beta} \tag{2.6}$$

K คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ มีค่า 0.9, **β** คือ ขนาดความกว้างของพีคที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข็มสูงสุด (FWHM)

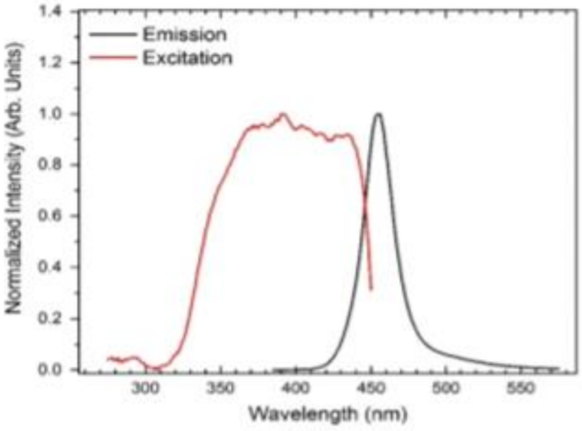
2.3.2 เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ (Photoluminescence)



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของวิเคราะห์ผลึกหรือสารตัวอย่างด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ (http://warwick.ac.uk)

เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของผลึกหรือสารตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยการที่ให้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ผ่านตัวกรองความยาวคลื่นแสง เพื่อให้ได้ช่วงความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมที่จะกระตุ้นผลึกหรือสารตัวอย่าง เมื่อเกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่สูงกว่าและเพื่อกลับเข้าสู่สถานะเดิมอิเล็กตรอนจึงทำการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมานั้นเป็นค่าเฉพาะของแต่ละผลึกตัวหรือสารอย่างนั่นๆ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ตัวอย่างการดูดกลืนพลังงานหรือการกระตุ้น และการเปล่งพลังงานจะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.9

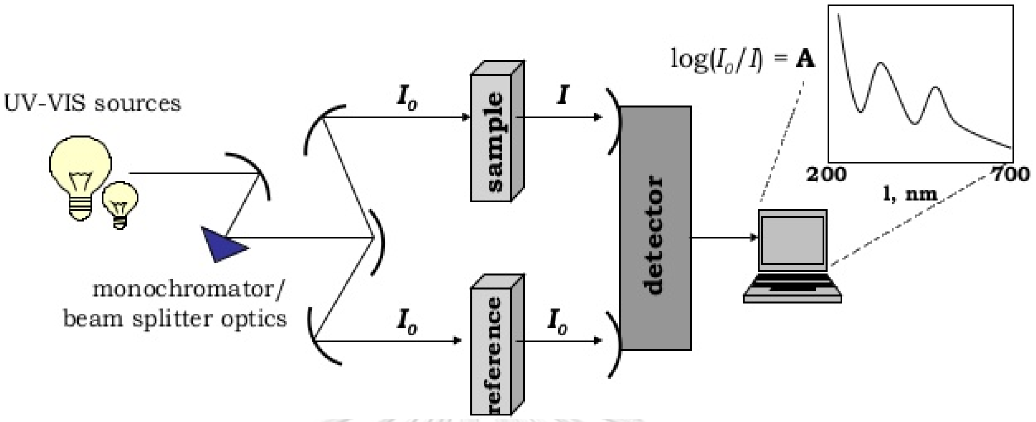
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2.9 การกระตุ้นและการเปล่งความยาวคลื่นแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์

2.3.3 เทคนิคการส่องผ่านและดูดกลืนแสงอัตราไวโอเลตและแสง (UV-Vis)

เทคนิคการส่องผ่านและดูดกลืนแสงอัตราไวโอเลตใช้ตรวจคุณสมบัติทางแสงของผลึก โดยให้แสงยูวีและแสงมีความยาวคลื่นช่วง 190-1000 นาโนเมตรผ่านเข้าไปในผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.10



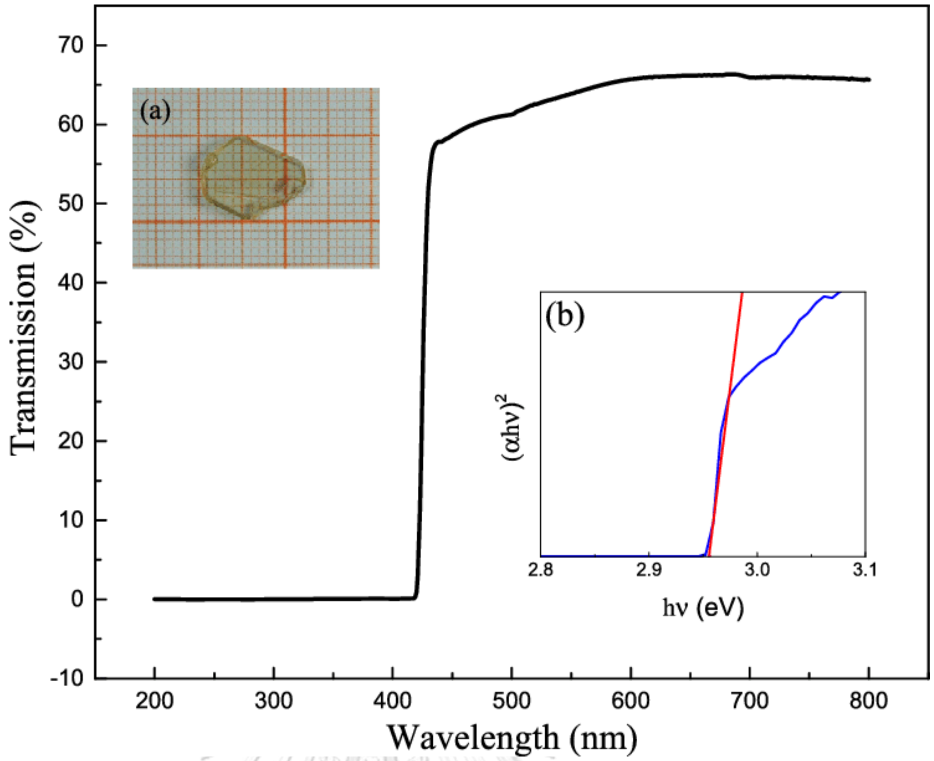
ภาพที่ 2.10 การทำงานของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

เมื่อผลึกหรือตัวอย่างต่างชนิดกันมีการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงในช่วงที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์สามารถใช้หลักการส่งผ่าน (Transmittance) และ การดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าผกผันกับความโปร่งแสงของผลึกตัวอย่าง ผลของการวิเคราะห์จะได้กราฟความสัมพันธ์ร้อยละการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ และยังสามารถแปลงค่าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (a) และ 2.11 (b) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านและค่าการดูดกลืนแสงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\% T = e^{-(A)} \text{ x } 100 \qquad (2.7)$$

เมื่อ % T คือ ร้อยละการส่องผ่าน (Transmittance) และ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)



ภาพที่ 2.11 (a) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่างๆ (b) ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่หาได้จากวิธีของ Tauc’s plot
(http://www.researchgate.net)

นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ของผลึกตัวอย่าง ได้จากวิธีของ Tauc’s plot ซึ่งได้จากการประมาณค่าจุดตัดแกน x ซึ่งเกิดจากการกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ ณ จุด $(\alpha h\nu)$ = 0 ดังสมการที่ 2.7

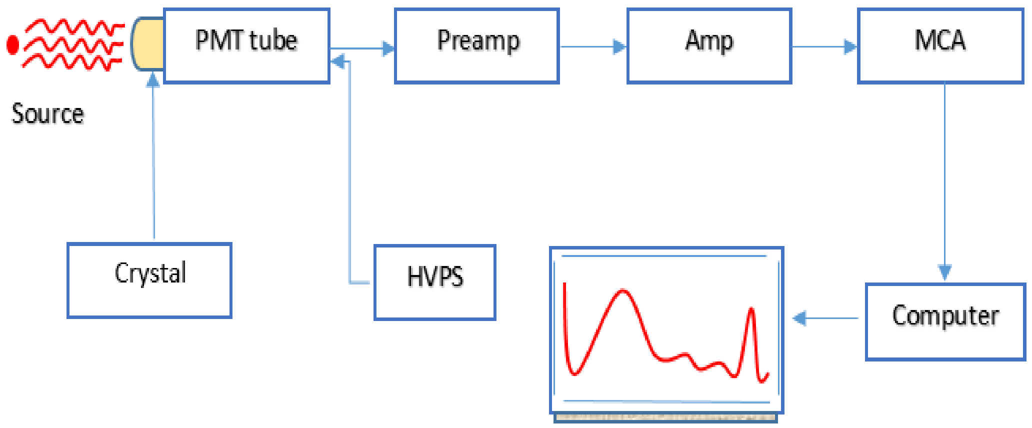
$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \qquad (2.7)$$

เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของผลึกเมื่อ $\alpha = \frac{1}{t} ln\frac{1}{T}$ และ t คือ ความหนาผลึก $h\nu$ คือ พลังงานแสง (eV)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 การตรวจสอบคุณภาพการวัดรังสี

การตรวจสอบคุณภาพการวัดรังสีโดยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยเริ่มจากการนำผลึกที่ผ่านการขัดให้ผิวเรียบแล้วติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์รับแสงหรือหลอดทวีคูณแสง เมื่อติดตั้งสองส่วนนี้เข้าด้วยกันแล้วจะเรียกส่วนนี้ว่าหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง สำหรับขั้นตอนการวัด สเปกตรัมรังสีแกมมามีขั้นตอนคือต้องติดตั้งหัววัดรังสีเข้ากับตัวขยายสัญญาณส่วนแรกและส่วนที่ขยายสัญญาต่อจากส่วนแรกให้มีขนาดที่มากขึ้นโดยขนาดของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีแกมมา สัญญาที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) หลังจากติดตั้งทุกอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้ว ทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับหัววัด และทำการตรวจวิเคราะห์ทางรังสี เพื่อประเมินคุณภาพของระบบวัดรังสี โดยคุณภาพการวัดรังสีก็ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการวัด (Efficiency) และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี (Energy resolution)



ภาพที่ 2.12 ระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

2.4.1 ประสิทธิภาพการวัดรังสี

ประสิทธิภาพการวัดรังสีมีอยู่ 2 ประเภท คือ ประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบสัมบูรณ์ (Absolute peak efficiency, E_{abs}) และประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบแท้จริง (Intrinsic peak efficiency, E_{int}) ประสิทธิภาพการวัดรังสีคือความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานรังสีเป็นค่านับวัดทางรังสี ซึ่งก็ขึ้นกับชนิดของผลึกและระบบการวิเคราะห์รังสี สำหรับประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบสัมบูรณ์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

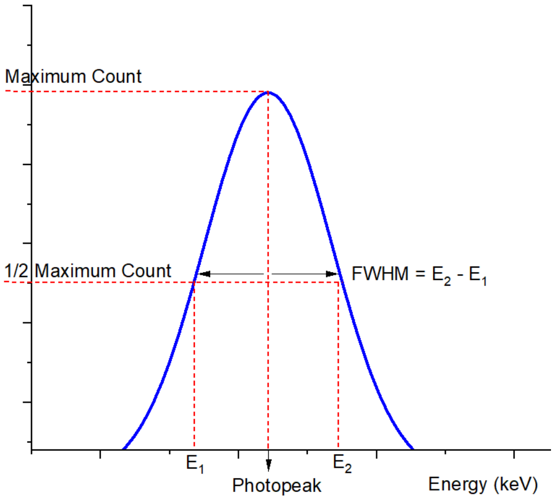
$$\varepsilon = \frac{N(cpc)4\pi}{S(dps)\Omega} \qquad (2.8)$$

เมื่อ ε แทน ประสิทธิภาพการวัดรังสี N แทน ค่าจำนวนรังสีที่นับวัดได้ (cps) S แทน ค่าความแรงของกัมมันตภาพรังสี (dps) และ Ω แทน มุมตันกรณีแหล่งกำเนิดรังสีเป็นจุด (ค่าระยะหัววัดถึงแหล่งกำเนิด, d มีค่ามากกว่าค่าระยะรัศมีหัววัด, $\Omega = \frac{\pi a^2}{d^2}$) สำหรับค่าประสิทธิภาพในการวัดปริมาณรังสีแบบแท้จริงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$\varepsilon = \frac{N(cpc)}{S(dps)} \tag{2.9}$$

2.4.2 ความสามารถในการแยกพลังงานรังสี

ความสามารถในการแยกพลังงานงานรังสีที่เข้าสู่หัววัดและระบบการวัดทางรังสีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของผลึก ระบบการวัดรังสี และค่าพลังงานจากแหล่งกำเนิดรังสี เช่น Co-57, Am-241, Cs-137 และอื่นๆ



ภาพที่ 2.13 ค่า Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM) สำหรับคำนวณหาค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี

ค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของหัววัดวัดรังสีหาได้จากสมการที่ 2.10 โดยการพิจารณาค่าของ Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM) ที่ได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีกับค่าพลังงานของรังสีดังแสดงในภาพที่ 2.13

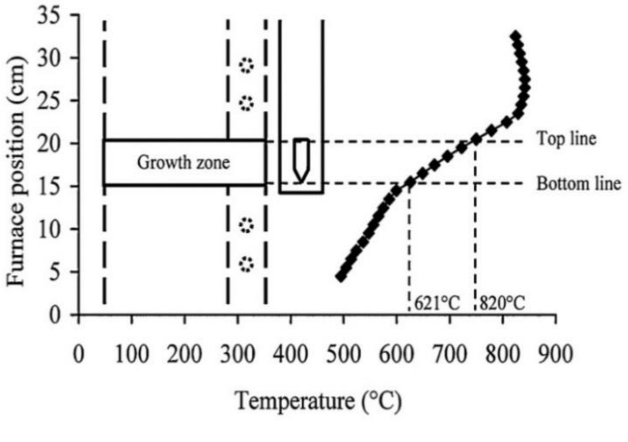
$$\text{Energy resolution (\%)} = \frac{\Delta E \text{ at FWHM x } 100}{E \text{ at photopeak}} \tag{2.10}$$

เมื่อ FWHM คือ ความกว้างของพลังงานที่ตำแหน่งค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัดสูงสุด และ E คือ ค่าพลังงานที่ตำแหน่งตรงกลางโฟโตพีค

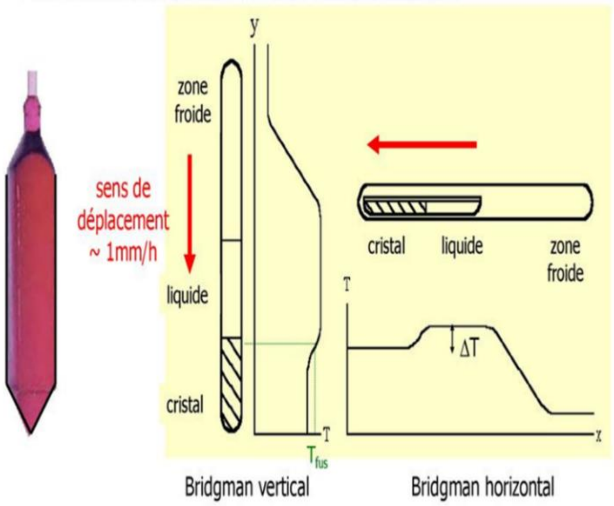
2.5 การปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ (Bridgman–Stock Barger)

การปลูกผลึกด้วยวิธี เป็นการปลูกผลึกด้วยการหลอมละลายสารด้วยความร้อน โดยการใส่สารตั้งต้นที่เป็นผงแล้วใส่ในภาชนะปลูกผลึก (Crucible) ซึ่งภายในภาชนะปลูกนี้จะทำให้เป็นสุญญากาศแล้วเติมก๊าซอาร์กอนเข้าไปภายในภาชนะปลูกผลึกเพื่อไม่เกิดการทำปฏิกิริยาของสารและภาชนะ สำหรับเตาหลอมละลายแบ่งเป็น 2 โซน คือ โซนอุณหภูมิสูงและโซนอุณหภูมิต่ำ โดยโซนอุณหภูมิสูงจะเป็นการให้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารและโซนเย็นจะให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวสาร การปลูกผลึกนั้นต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยระยะทางที่เปลี่ยนไป หรือ เกรท์เดียนของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่เกิดขึ้นภายในเตาปลูกผลึก ค่าเกรท์เดียนอุณหภูมิทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่เหมาะสมในการปลูกผลึก และยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการการเกิดผลึกได้ด้วย หลักการให้ความร้อนที่ตำแหน่งปลูกผลึกจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อยเพื่อให้สารที่ใช้ปลูกผลึกเกิดการหลอมเหลว แต่ต้องไม่ตั้งค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของสารที่ใช้ปลูกผลึก สำหรับเกรท์เดียนอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาหลอมละลายมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.14 และการเกิดผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ จะเป็นการลดอัตราของอุณหภูมิทั้ง 2 โซนลงอย่างช้าเพื่อให้ผลึกเริ่มก่อตัวที่ส่วนปลายแหลมของภาชนะปลูก โดยเวลาที่ใช้ในการปลูกอาจใช้เวลาหลายสัปดาห์ ลักษณะการเกิดผลึกแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.14 เกรท์เดียนของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ที่เกิดขึ้นภายในเตาปลูกผลึก (Jitpukdee, Wongsawaeng, & Punnachaiya, 2011)



ภาพที่ 2.15 การเกิดผลึกด้วยวิธีแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์

การทำให้ได้ผลึกที่มีลักษณะที่ดีคือมีความใส่ ไม่มีรอยแตกร้าวขึ้นกับอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ช้า แต่ถ้าจะให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพ มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงที่ดีนั้นก็ขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้นนั้นๆด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์

งานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกผลึกชนิดเรืองแสง โดยทำการปลูกผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ ($CsCaI_3$) โดยใช้สารตั้งต้นซีเซียมไอโอไดด์ต่อแคลเซียมไอโอไดด์ (CsI: CaI_2) ด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนัก คือ 80:20, 97:3 และปลูกผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ (CsI(Tl)) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของผลึก การวิจัยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของสารแต่ละชนิดเพื่อกำหนดอุณหภูมิแต่ละโซนของเตาปลูกผลึก สำหรับการปลูกผลึกจะใช้วิธีของบริดจ์แมน-สต็กบาร์เกอร์ คือ การควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) และอุณหภูมิ (Temperature profile) ตลอดการปลูกผลึก เตาปลูกผลึกที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ โซนอุณหภูมิสูง และโซนอุณหภูมิต่ำ ทำการตั้งค่าอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ได้อุณหภูมิตรงกลางที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึก ควบคุมเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงสภาวะเสถียรให้เป็นเวลาให้นานพอเพื่อให้สารเกิดการละลายตัวได้อย่างเต็มที่ หลังจากนั้นทำการลดอัตราอุณหภูมิ (Temperature gradient drift rate) เพื่อให้เกิดการตกผลึก สำหรับผลึกที่ได้จะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางแสงเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับช่วงการตอบสนองของหลอดทวีคูณแสงและทำการตรวจวัดประสิทธิภาพและความสามารถในการแยกรังสี

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก

สารตั้งต้นใช้ในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สโต๊กบาร์เกอร์ คือ สารซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) สารแคลเซียมไอโอไดด์ (CaI_2) และสารแทลเลียมไอโอไดด์ (TlI) มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

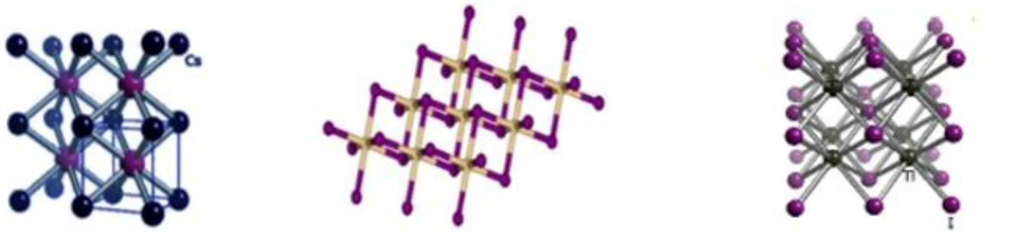
1. สารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 มีความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ จุดหลอมเหลว 626 ^{o}C จุดเดือด 1280 ^{o}C และความหนาแน่น 4.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นสารประกอบในกลุ่มอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halides) มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (body center cubic) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (a) และสามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย

2. สารประกอบแคลเซียมไอโอไดด์ (CaI_2) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ จุดหลอมเหลว 779 ^{o}C จุดเดือด 1100 ^{o}C และความหนาแน่น 3.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นสารประกอบไอโอนิกที่มีความไวต่อความชื้น มีโครงสร้างผลึกแบบ Rhombohedral ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (b) และสามารถละลายน้ำได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. สารแทลเลียมไอโอไดด์ (TlI) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 มีความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ จุดหลอมเหลว 442 °C จุดเดือด 823 °C และความหนาแน่น 7.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (body center cubic) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (c) และสามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย

ภาพที่ 3.1 สารตั้งต้น CsI, CaI_2 และ TlI ที่ใช้ในการปลูกผลึก



(a) โครงผลึก CsI (body center cubic)

(b) โครงผลึก CaI_2 (Rhombohedral)

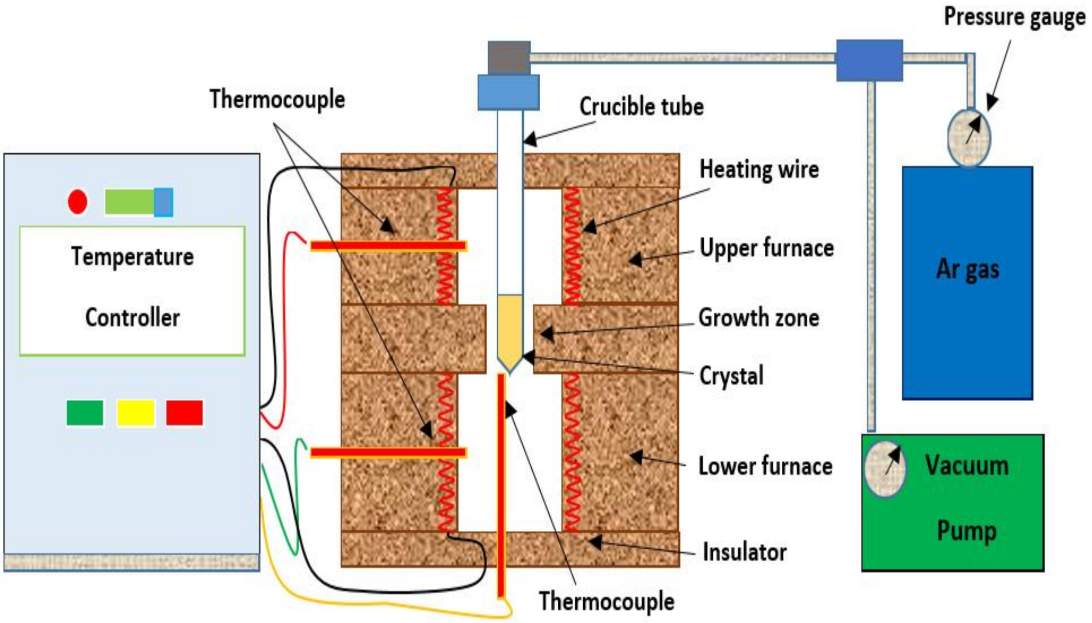
(C) โครงผลึก TlI (Orthorhombic)

ภาพที่ 3.2 โครงสร้างผลึก CsI, CaI_2 และ TlI

3.2 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาเตามาจากวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์

เตาปลูกผลึกและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยถูกพัฒนาเตามาจากวิธีบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์ มีอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปลูกผลึกดังแสดงในภาพที่ 3.3 คือ เตาปลูกผลึกแบบ 2 โซน คือ โซนอุณหภูมิสูง และโซนอุณหภูมิต่ำ หัววัดอุณหภูมิ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบบันทึกอุณหภูมิ ระบบสูบสุญญากาศ ขดลวดให้ความร้อน อิฐมวลเบา และระบบจ่ายก๊าซอาร์กอนในภาชนะปลูก (Crucible)

ภาพที่ 3.3 ระบบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต๊อกบาร์เกอร์



ภาพที่ 3.4 แผนผังส่วนประกอบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สโต๊กบาร์เกอร์

เตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากการปลูกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโต๊กบาร์เกอร์ มีแผนผังดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ 3 ตำแหน่ง คือ โซนอุณหภูมิสูง โซนอุณหภูมิต่ำ และโซนปลูกผลึก ตำแหน่งตรงกลางเตาปลูก ซึ่งติดตั้งไว้เพื่อการวัดอุณหภูมิภายในเตาหลอม เมื่ออุณหภูมิภายในเตาไม่อยู่ในค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ระบบควบคุมจะทำการจ่ายหรือตัดกระแสไฟฟ้า ภายในเตามีฉนวนกันความร้อนทำจากอิฐมวลเบาใช้สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อนของเตาปลูกผลึก และภายในเตาทั้งสองโซนได้ติดตั้งขดลวดให้ความร้อน โดยที่ขดลวดทั้งสองมีตัวควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แยกจากกัน บริเวณตรงกลางระหว่างอุณหภูมิทั้งสองโซนเป็นตำแหน่งภาชนะที่ใช้ในการปลูกผลึก ภาชนะปลูกผลึกมีส่วนปลายที่แหลมซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่อยู่โซนปลูกผลึก และปลายอีกด้านของภาชนะปลูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบสุญญากาศ และระบบจ่ายก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาตลอดช่วงที่ทำการปลูกผลึกถูกบันทึกด้วยระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ

3.2.1 ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน

เตาปลูกผลึกที่ใช้ถูกออกแบบให้มีเตาหลอมที่แบ่งเป็น 2 โซน คือ โซนอุณหภูมิสูง (High zone) และโซนอุณหภูมิต่ำ (Low zone) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เตาหลอมโซนอุณหภูมิสูง มีความยาว 15 เซนติเมตร และเตาหลอมโซนอุณหภูมิต่ำ มีความยาว 22 เซนติเมตร โดยแต่ละโซนออกแบบภายในให้เป็นทรงกระบอกและมีขดลวดให้ความร้อนอยู่ภายใน สำหรับขดลวดให้ความร้อนและระบบ

อุปกรณ์ควบคุมความร้อนนั้นแยกเป็นอิสระออกจากกัน และบริเวณที่ใช้ในการปลูกผลึก(growth zone) อยู่ตรงกลางระหว่าง 2 โซน ขดลวดที่ใช้เป็นชนิด Kanthal-AF ที่สามารถให้ความร้อนสูงสุด 1400 องศาเซลเซียส และออกแบบให้มีกำลังไฟฟ้า 1.2 กิโลวัตต์ ขดลวดมีลักษณะพันเป็นเกรียวมีเส้นภายศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ถูกบรรจุในช่องของอิฐมวลเบาดังแสดงในภาพที่ 3.6 การตั้งค่าอุณหภูมิของเตาหลอมบริเวณโซนอุณหภูมิสูงจะตั้งให้มีอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลว (Melting point) ของสารที่ใช้ปลูกผลึก และการตั้งค่าอุณหภูมิของเตาหลอมบริเวณโซนอุณหภูมิต่ำจะตั้งให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่ใช้ปลูกผลึก ดังนั้นจะทำให้เกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิขึ้น โดยค่าเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทางที่เปลี่ยนไปภายในบริเวณโซนปลูกผลึก ค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าอุณหภูมิของทั้งสองโซนปลูกผลึก บริเวณรอบเตาปลูกผลึกจะมีฉนวนที่ทำจากอิฐทนความร้อน ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สูญเสียความร้อนและทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาปลูกผลึกได้

ภาพที่ 3.5 เตาปลูกผลึก 2 โซน

ฉนวนอิฐมวลเบาที่สร้างเป็นเตาหลอมบริเวณอุณหภูมิสูงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร และเตาหลอมบริเวณอุณหภูมิต่ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันแต่มีความสูงที่มากกว่าคือ สูง 22 เซนติเมตร ระหว่างเตาหลอมสองโซนจะมีโซนตรงกลางที่ไม่มีขดลวดพันรอบเป็น

บริเวณที่ใช้สำหรับปลูกผลึกหรือบัฟเฟิล (Baffle zone) สำหรับฉนวนด้านนอกทำหน้าที่ป้องกันความร้อนออกสู่ภายนอกและทำให้สามารถกักเก็บความร้อนไว้ภายในเตาหลอมให้คงที่ได้ และป้องกันบริเวณรอบนอกของเตาไม่ให้เกิดความเสียหายจากความร้อน

ภาพที่ 3.6 เตาหลอมที่มีขดลวดให้ความร้อนภายใน

3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ระบบควบคุมอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 3.7 เป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาหลอม โดยระบบสามารถตั้งค่าอัตราการเพิ่ม อัตราการลดลงของอุณหภูมิ และยังสามารถควบคุมเวลาในการให้ความร้อนกับเตาหลอมได้โดยระบบควบคุมอุณหภูมิจะมี 2 ระบบที่แยกออกจากกัน คือระบบควบคุมอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยทั้งสองระบบมีหลักการทำงานที่เหมือนกัน สำหรับการควบคุมอุณหภูมินั้นต้องควบคุมอุณหภูมิให้มีความเสถียรเพราะจะมีผลต่อการตกผลึกและคุณสมบัติของผลึกที่ได้ เตาหลอมอุณหภูมิสูงและเตาหลอมอุณหภูมิต่ำ มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 $^{\circ}$C ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ พีไอดี ของบริษัท TAIE รุ่น F400 และมีวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 6 kW ระบบสามารถทำการควบคุมอัตราการเพิ่มและอัตราการลดลงของอุณหภูมิได้ในช่วง 0-500 $^{\circ}$C/min หลักการทำงานและควบคุมอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิภายในเตามีค่าอุณหภูมิไม่ตรงตามที่ได้ตั้งค่าไว้ ระบบควบคุมจะสั่งให้วงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มหรือลดลงเพื่อทำให้อุณหภูมิตรงตามค่าที่ตั้งไว้ และเมื่อถึงระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้แล้วระบบก็จะทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.7 ระบบควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ

3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลหาเกรเดียนท์อุณหภูมิ

ระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิมีอยู่ 2 ส่วนคือ ระบบบันทึกเพื่อหาเกรเดียนท์อุณหภูมิและระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ตลอดช่วงการปลูกผลึก ระบบบันทึกข้อมูลเพื่อหาเกรเดียนท์อุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิลบริเวณตรงกลางเลื่อนขึ้นหรือลงภายในโซนปลูกผลึกแล้วบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง การขับเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ การอ่านค่าอุณหภูมิจะอ่านข้อมูลทุกระยะ 1 มิลลิเมตร หลังจากหยุดรอ 5 นาที เพื่อให้การอ่านได้ค่าที่คงที ข้อมูลการอ่านที่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะทางที่เปลี่ยนไป นำข้อมูลที่บันทึกได้เพื่อหาเกรเดียท์ของอุณหภูมิ และสามารถหาตำแหน่งปลูกที่เหมาะสมได้ สำหรับระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตลอดช่วงการปลูกผลึก ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของอัตราเพิ่มอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิคงที่ และช่วงอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature gradient drift rate) ซึ่งเป็นช่วงที่สารถูกหลอมละลายแล้วเย็นตัวลง ทำให้เกิดการตกผลึกของสาร โดยอัตราการตกผลึกหรืออัตราการปลูกผลึกหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Growth rate } \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}}\right) = \frac{\text{Temperature gradient drift rate (°C/hr)}}{\text{Temperature gradient(°C/mm)}} \qquad (3.1)$$

สำหรับค่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิต่อเวลา (Temperature gradient drift rate) สามารถหาได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature profile) ในช่วงกราฟที่แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอโมคัปเปิลบริเวณตรงกลางหรือบริเวณโซนปลูกผลึก

3.2.4 ระบบปั้มสุญญากาศและระบบควบคุมก๊าซอาร์กอน

ภาพที่ 3.8 ระบบปั้มสุญญากาศและระบบควบคุมก๊าซอาร์กอน

ปั้มสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น rotary pump ทำหน้าที่ดึงอากาศภายในภาชนะปลูกผลึก(crucible) ออกสู่บรรยากาศภายนอกทำให้ภายในภาชนะปลูกมีความดันเป็นสุญญากาศ และระบบควบคุมก๊าซอาร์กอนจะควบคุมผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure regulator) ทำหน้าที่ในการจ่ายก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 เข้าไปในภาชนะปลูก เพื่อลดการทำปฏิกิริยาของสารที่ใช้ปลูกผลึกกับภาชนะปลูกผลึกโดยควบคุมความดันของก๊าซอาร์กอนภายในภาชนะปลูกให้มีค่าเท่ากับ 1 ความดันบรรยากาศ โดยระบบปั้มสุญญากาศและระบบควบคุมก๊าซอาร์กอน ดังแสดงในภาพที่ 3.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.5 ภาชนะปลูกผลึก (Crucible)

ภาชนะปลูกผลึกที่ใช้เป็นหลอดแก้วควอทซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.9 เป็นภาชนะที่ใช้บรรจุสารที่ต้องการปลูกผลึก มีขนาดความยาว 42 มิลลิเมตรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร สามารถทนต่อความร้อนสูงได้ โดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1730 °C หลอดแก้วจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆระหว่างการหลอดละลายผลึกเนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่น้อยกว่าผลึก ขณะที่ผลึกมีการเย็นตัวลงผลึกจะหดตัวได้มากกว่าหลอดแก้วปลูกผลึก ดังนั้นเมื่อการปลุกผลึกเสร็จสิ้นลงจะสามารถนำหรือแกะผลึกออกได้ง่าย

ภาพที่ 3.9 หลอดแก้วควอทซ์สำหรับใช้เป็นภาชนะปลูกผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

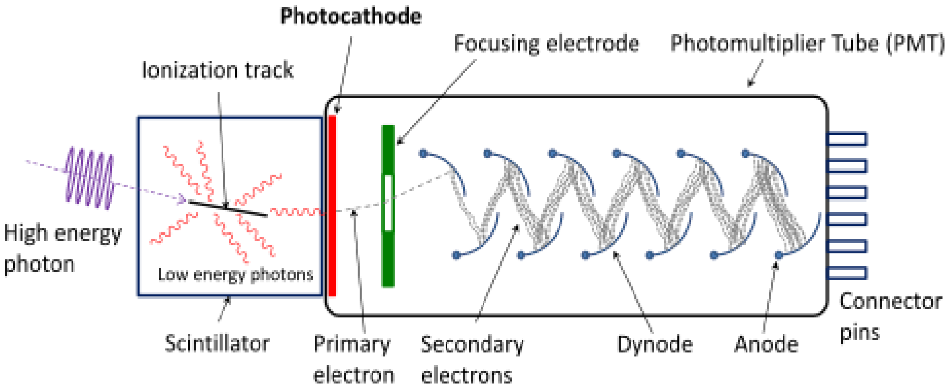
สำหรับการติดตั้งหลังจากที่บรรจุสารแล้วจะนำไปติดตั้งเข้ากับท่ออลูมิเนียมสองชิ้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายขนาด 1.2 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 3.10 โดยท่ออลูมิเนียมนี้ทำขึ้นมาเพื่อให้สามารถเชื่อต่อเข้ากับระบบสุญญากาศ และ ระบบความคุมกาซอาร์กอนได้

ภาพที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อหลอดแก้วควอทซ์และระบบสุญญากาศ

3.3 การติดตั้งผลึกเข้ากับหลอดทวีคูณแสง (PMT) และระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี

ผลึกที่ได้จากการปลูกนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิ์ภาพและกำลังแยกพลังงานรังสีแกมมา โดยการนับผลึกที่ได้มาเชื่อมต่อเข้ากับหลอดทวีคูณแสงและนำหัววัดรังสีนี้ไปเชื่อมต่อเข้ากับส่วนขยายสัญญาและระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานงานรังสีแกมมาต่อไป

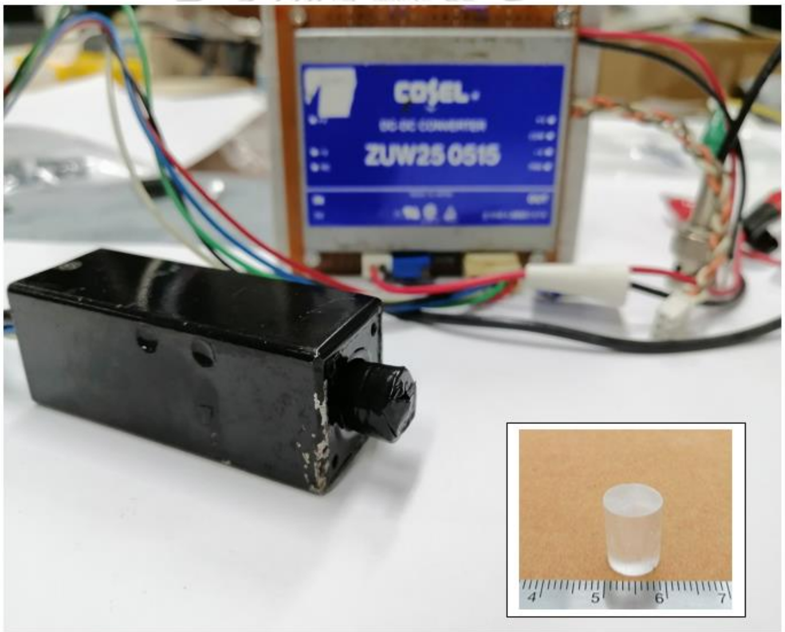
3.3.1 การติดตั้งผลึกกับหลอดทวีคูณแสง(PMT)



ภาพที่ 3.11 ส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดเรืองแสง

(https://scionix.nl/read-out/)

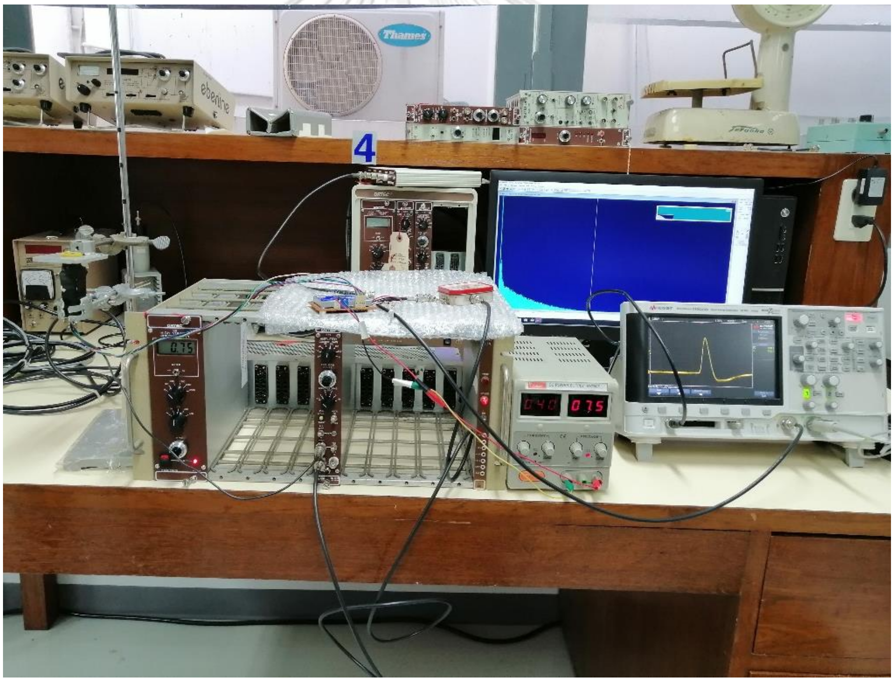
ผลึกที่ได้จากการปลูกนั้นต้องนำมาเข้ากับหลอดทวีคูณแสงดังแสดงในภาพที่ 3.11 การติดตั้งผลึกเข้ากับหลอดทวีคูณแสงต้องทำการตัดและขัดผลึกให้ผิวเรียบ และให้มีขนาดพอดีกับช่องรับแสงของหลอดทวีคูณแสง นำเทปขาวพันรอบผลึกและพันด้วยเทปดำอีกหนึ่งชั้นให้เหลือส่วนปลายอีกด้านของผลึกสำหรับทาน้ำยาประสาน (Coupling) ก่อนการติดตั้งเข้ากับหลอดทวีคูณแสง เพื่อลดการหักเหแสงออกนอกบริเวณที่รับแสง โดยหลอดทวีคูณแสงที่เลือกใช้ทดสอบคุณภาพหัววัดคือ PMT ยี่ห้อ Hamamatsu รุ่น H5783 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณ Photocathode โดยประมาณ 1 เซนติเมตร การตรวจคุณภาพของระบบวัดรังสีและการแจกแจงหรือกำลังแยงพลังงานรังสีนั้น ที่สำคัญในการเลือกใช้หลอดทวีคูณแสงนั้น ต้องพิจารณาจากคุณสมบัติทางแสงของผลึก โดยความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากผลึกนั้นควรจะมีความยาวคลื่นแสงที่หลอดทวีคูณแสงสามารถรับได้ เมื่อประกอบสองส่วนนี้เข้าด้วยกันแล้วจะเรียกว่าหัววัดรังสีดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การติดตั้งผลึกเข้ากับหลอดทวีคูณแสง

หลังจากขั้นตอนการติดตั้งผลึกกับหลอดทวีคูณแสงแล้วให้ทำการเชื่อมต่อหัววัดรังสีเข้ากับส่วนขยายสัญญาณ ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาแบบหลายช่องพลังงาน (MCA) เมื่อต่อครบทุกอุปกรณ์แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับหัววัดรังสี ทำการทดสอบประสิทธิภาพและค่าความสามารถในการแยกรังสีกับต้นกำเนิดรังสีต่างๆ โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาดังแสดงในภาพที่ 3.14 สำหรับแหล่งกำเนิดรังสีหรือสารกัมมันตรังสีที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.13

ภาพที่ 3.13 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาสำหรับวิเคราะห์คุณภาพหัววัดรังสี



ภาพที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาแบบหลายช่องพลังงาน (MCA)

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

การวิจัยพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วนของสาร CsI และ CaI_2 ที่แตกต่างกันนั้นจะใช้วิธีการอย่างง่ายด้วยอุปกรณ์ของห้องปฏิบัติการที่มีอยู่ การปลูกผลึกด้วยวิธีแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ที่มีการแบ่งโซนของเตาหลอมออกเป็น 2 โซน แต่ละโซนก็ถูกควบคุมอุณหภูมิที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นการตั้งค่าอุณหภูมิของทั้งสองโซนแล้วให้ได้อุณหภูมิบริเวณปลูกผลึกที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสม หลังจากที่มีการกำหนดอุณหภูมิโซนสูงและต่ำแล้วต้องทำการทดสอบกราฟอุณหภูมิเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้นั้นสามารถทำการปลูกผลึกได้ โดยอุณหภูมิตรงบริเวณปลูกผลึกนั้นต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้น เมื่อสามารถปลูกผลึกได้แล้วนั้นผลึกจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางแสง และคุณภาพในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมาโดยการประกอบเข้ากับหลอดทวีคูณแสงที่ที่มีการตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงที่ตรงกันหรืออยู่ในช่วงที่สามารถทำการวัดได้ และหลังจากนั้นนำหัววัดที่ได้เชื่อมต่อเข้าระบบขยายสัญญา และระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมา

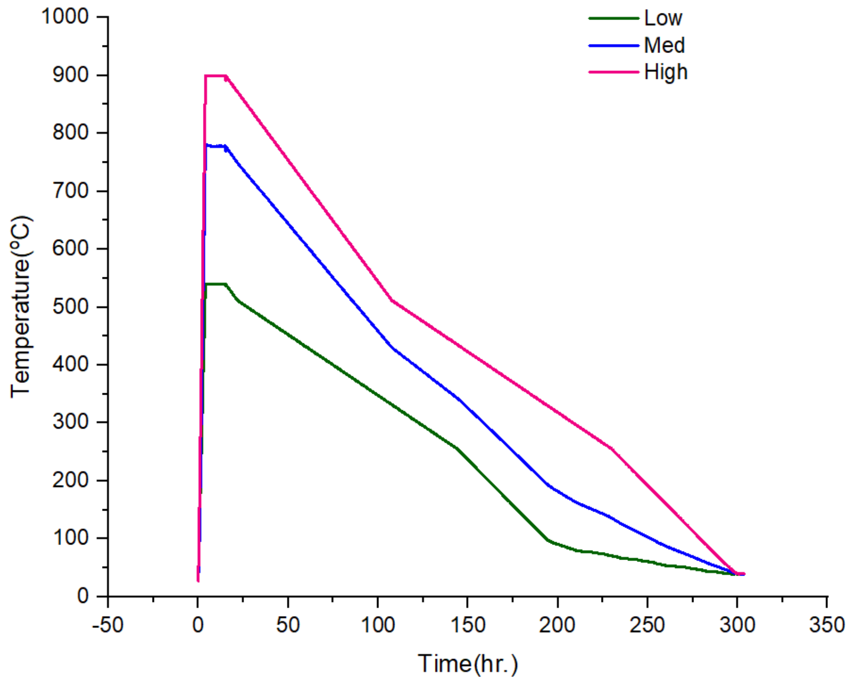
4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก

การตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับการปลูกผลึกด้วยการกำหนดการตั้งค่าอุณหภูมิโซนสูงและอุณหภูมิโซนต่ำ เพื่อให้ได้อุณหภูมิโซนปลูกผลึกตามที่ต้องการนั้น โดยในการทดลองนี้กำหนดการตั้งค่าอุณหภูมิโซนสูงไว้ที่ 900 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิโซนต่ำไว้ที่ 540 องศาเซลเซียสสำหรับผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 และ 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และตั้งค่าอุณหภูมิโซนสูงไว้ที่ 780 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิโซนต่ำไว้ที่ 450 สำหรับผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ โดยเงื่อนไขการตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับการปลูกผลึกแสดงในตารางที่ 4.1 หลังจากนั้นทำการตั้งอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิโซนสูงที่ 2.8 องศาเซลเซียสต่อวินาที และการตั้งอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิโซนต่ำที่ 1.7 องศาต่อวินาที เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ให้ระบบควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ประมาณราว 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปรับอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature gradient drift rate) 0.05 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้สำคัญมากเพราะเป็นช่วงที่จะมีการตกผลึก ถ้าปรับอัตราการลดลงของอุณหภูมิเร็วเกินไปอาจเกินความเสียหายแก่ผลึกได้ ผลกราฟอุณหภูมิที่ได้จากระบบบันทึกข้อมูลตลอดการทดลองปลูกผลึก ดังแสดงในภาพที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

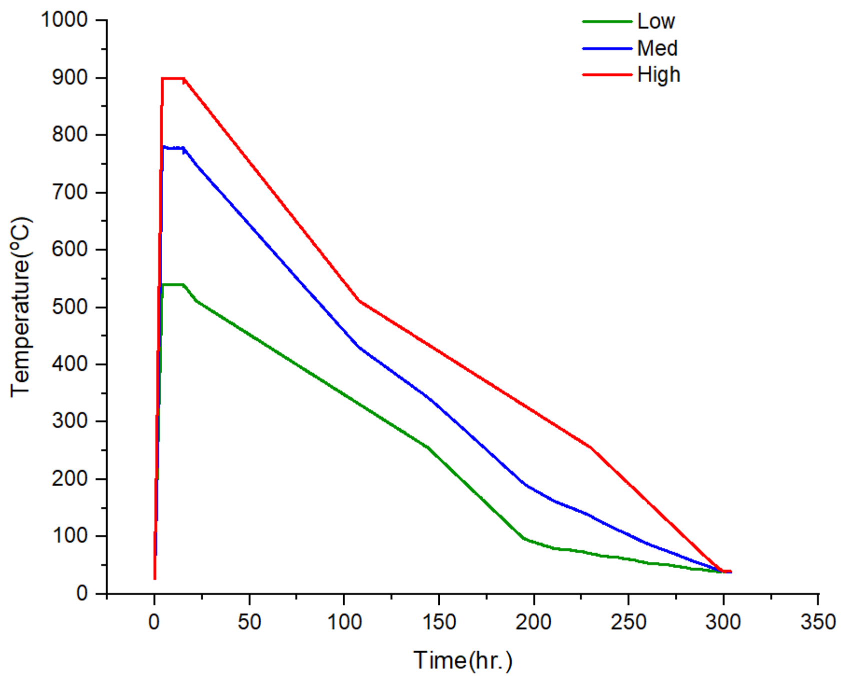
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการตั้งค่าอุณหภูมิสำหรับการปลูกผลึก

โซนอุณหภูมิ	$CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20%	$CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3%	CsI(Tl)=0.35%)
ต่ำ	540 °C	540 °C	450 °C
กลาง	790 °C	790 °C	660 °C
สูง	900 °C	900 °C	780 °C

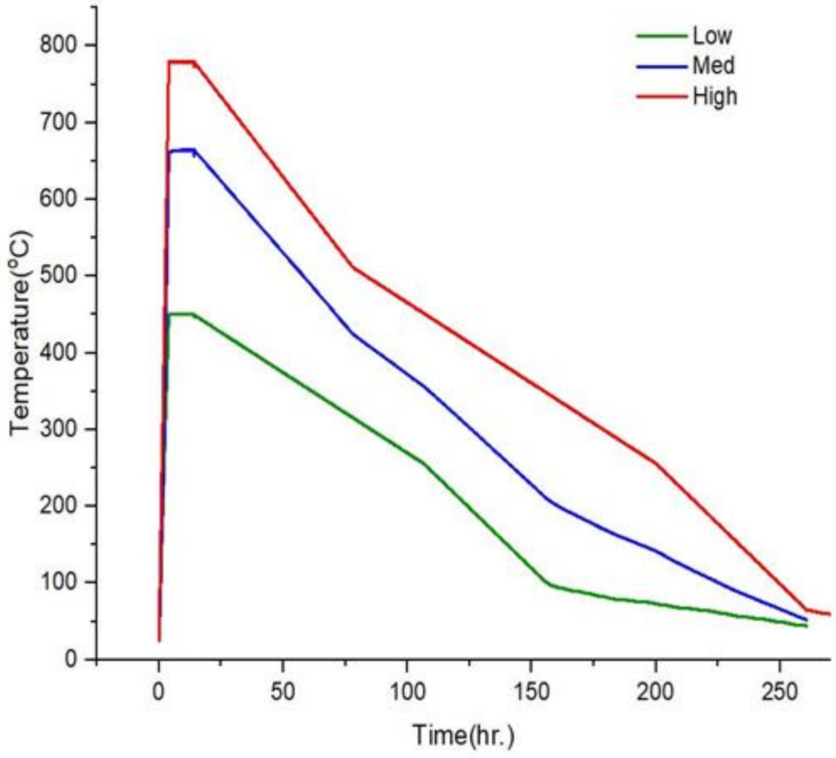


CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.1 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดการปลูกผลึกของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน CsI=80%, CaI_2=20%



ภาพที่ 4.2 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดช่วงการปลูกผลึกของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน $CsI=97\%,CaI_2=3\%$



ภาพที่ 4.3 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิตลอดช่วงการปลูกผลึกของผลึก CsI(Tl)

4.2 การทดลองปลูกผลึก

4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองปลูกผลึก

1. สารตั้งต้นซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ชนิดผงที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9
2. สารตั้งต้นแคลเซียมไอโอไดด์ (CaI_2) ชนิดผงที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
3. เตาปลูกผลึกแบบ 2 โซน
4. เครื่องชั่งน้ำหนักสาร มีความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA323S-CW
5. หลอดแก้วควอทซ์สำหรับเป็นภาชนะบรรจุสารตั้งต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 เซนติเมตร ความยาว 42 เซนติเมตร
6. ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ
7.ปั๊มสุญญากาศชนิดโรตารี่

4.2.2 การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการปลูกผลึก

ทำการช่างน้ำหนักสาร CsI, CaI_2, CsI(Tl) โดยการคำนวณจากสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก สัดส่วน 80:20 และ 97:3 ชั่งน้ำหนักสารตั้งต้นให้ได้ตามสัดส่วนที่คำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.2 บรรจุสารตั้งต้นลงในหลอดแก้วควอทซ์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตรจะทำให้ได้ความสูงของสารตั้งต้นก่อนการหลอมละลายที่ความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ผลึกที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ลักษณะสารตั้งต้นที่บรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ดังแสดงในภาพที่ 4.4

ภาพที่ 4.4 สารตั้งต้นที่บรรจุในหลอดแก้วควอทซ์

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของน้ำหนักสารตั้งต้นที่ใช้ปลูกผลึกทั้งสามก้อน

ชนิดผลึก	น้ำหนักสาร CsI (กรัม)	น้ำหนักสาร CaI_2 (กรัม)	น้ำหนักสาร Tl (กรัม)
$CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20%	13.90	3.43	-
$CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3%	17.12	0.53	-
CsI(Tl=0.35%)	17.72	-	0.1534

4.2.3 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมนสโต๊กบาร์เกอร์

การวิจัยนี้ทำการปลูกผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์โดยวิธีการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ โดยทำการปลูกผลึกทั้งหมด 3 ก้อน ที่มีสัดส่วนสารตั้งต้นของปริมาณสารซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ต่อแคลเซียมไอโอไดด์ (CaI_2) ที่แตกต่างกัน จำนวน 2 ค่า 80:20 และ 97:3 และผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ (CsI(Tl)) สำหรับเป็นผลึกอ้างอิง การคำนวณสัดส่วนโดยน้ำหนักสารของสารประกอบตั้งต้น ซีเซียมไอโอไดด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเป็นลักษณะผงละเอียดระดับเกรดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยบริษัท เทอร์โม ฟิชเชอร์ ไซเอนทิฟิค จุดหลอมเหลว 626 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 4.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และแคลเซียมไอโอไดด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดย บริษัท เทอร์โมฟิชเชอร์ ไซเอนทิฟิค จุดหลอมเหลว 779 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 3.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนแทลเลียมไอโอไดด์(TlI) ที่ใช้เป็นสารเจือเป็นลักษณะผงละเอียดระดับเกรดที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดย บริษัท พีฟัลซ์แอนด์เบาเออร์ จุดหลอมเหลว 442 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับกรณีปลูกผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์โดยเจือแทลเลียมไอโอไดด์ที่ปริมาณร้อยละ 0.35 เมื่อเตรียมสารตั้งต้นให้ได้ตามสัดส่วนดังกล่าวข้างต้น จะนำบรรจุในหลอดปลูกผลึกคือเป็นหลอดแก้วควอทซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร และยาว 42 เซนติเมตร โดยออกแบบให้หลอดแก้วมีปลายแหลมมากเป็นรูปตัววี ซึ่งหลอดก่อนทำการปลูกผลึกจะต้องผ่านการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิคเป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์ ทำซ้ำจำนวน 3 รอบ และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไม่ให้ความชื้นเหลือในหลอดแก้วปลูกผลึก หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารตั้งต้นไว้แล้วนำบรรจุลงในเตาปลูกผลึก และทำการติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ เพื่อดึงอากาศภายในหลอดแก้วควอทซ์ให้เป็นสุญญากาศแล้วทำการแทนที่ด้วยก๊าซอาร์กอน เตาปลูกผลึกนี้เป็นเตาปลูกผลึกอย่างง่ายแบ่งออกเป็น 3 โซน สำหรับผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ทั้งสองสัดส่วนโซนอุณหภูมิสูงตั้งไว้ที่ 900 องศาเซลเซียส โซนอุณหภูมิต่ำตั้งไว้ที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

540 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ช่วงอุณหภูมิโซนปลูกผลึก 790 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งโซนนี้เป็นโซนที่มีความสำคัญมากที่สุดในการหลอมละลายสารตั้งต้น สำหรับผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ทั้งสองสัดส่วนโซนอุณหภูมิสูงตั้งไว้ที่ 780 องศาเซลเซียส โซนอุณหภูมิต่ำตั้งไว้ที่ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้อุณหภูมิโซนปลูกผลึก 660 องศาเซลเซียส การควบคุมระดับความร้อนของเตาจะแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการเพิ่มความร้อน ช่วงสภาวะคงที่ทางความร้อน และช่วงลดอุณหภูมิสำหรับการตกผลึก โดยเมื่อถึงค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ให้ควบคุมรักษาอุณหภูมิให้คงที่ไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสภาวะคงตัวของสารละลายที่มีการหลอมละลายทั้งหมด หลังจากนั้นจึงเริ่มช่วงขั้นตอนการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้เกิดการตกผลึกของสารละลาย โดยจะให้มีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าด้วยอัตรา 0.05 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำให้ได้เวลารวมที่ใช้ในการปลูกผลึกราว 2 สัปดาห์ โดยภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นขณะอยู่ในเตาหลอมดังแสดงในภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.5 ภาชนะปลูกผลึกขณะอยู่ในเตาหลอม

4.2.4 ผลการปลูกผลึก

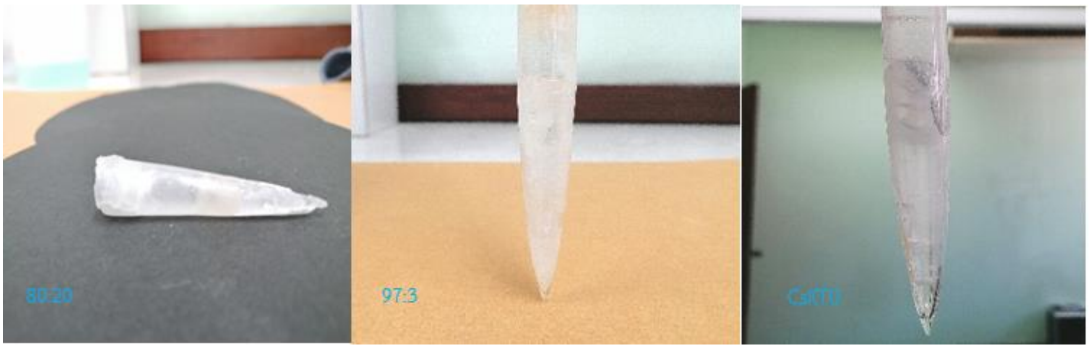
ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 และ 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ที่ได้จากการทดลองมีอัตราการตกผลึกดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้การปลูกผลึก

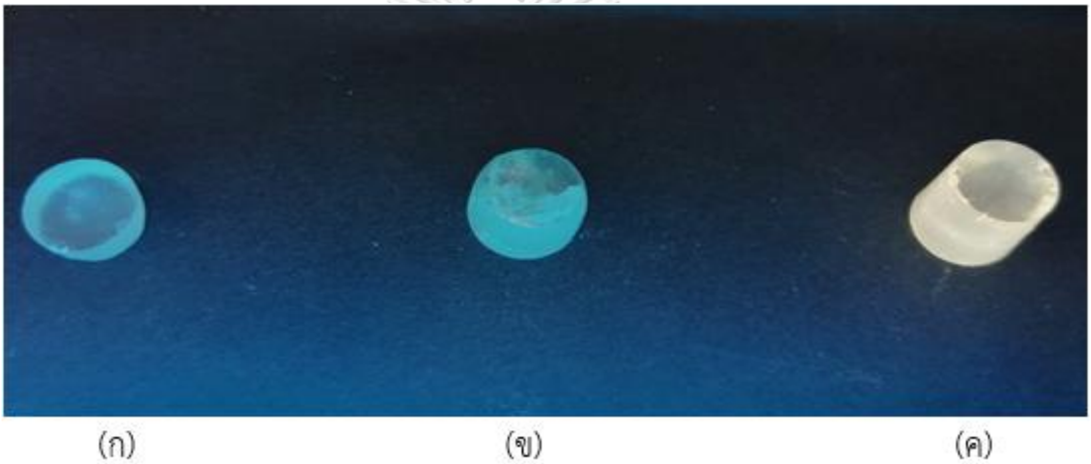
ผลึก	Gradient $(\frac{℃}{mm})$	Growth rate $(\frac{mm}{hr})$
$CsCaI_3$: 80:20	4.6	0.82
$CsCaI_3$: 97:3	4.6	0.82
CsI (Tl)	4.8	0.78

สำหรับลักษณะผลึกที่ปลูกได้ทั้ง 3 ก้อน ขณะที่ยังบรรจุอยู่ในหลอดแก้วควอทซ์ดังแสดงในภาพที่ 4.6 จากนั้นจึงนำผลึกมาตัดเป็นแว่นหนาประมาณ 1 ซม. โดยสังเกตลักษณะกายภาพของผลึกที่ปลูกทั้ง 3 ก้อน แสดงดังภาพที่ 4.7 (ก) ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์($CsCaI_3$) ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 0.5 ซม. มีลักษณะใสและโปร่งแสง ผลึกมีรอยร้าวเล็กน้อย มีความไวต่อความชื้นไม่มากนัก ภาพที่ 4.7 (ข) ผลึก $CsCaI_3$ ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 1 ซม. มีลักษณะใสและโปร่งแสง แต่ผลึกมีรอยแตกร้าวมากกว่าผลึกที่มีสัดส่วน 80:20 มีความไวต่อความชื้นไม่มากนัก ภาพที่ 4.8 (ค) ผลึก CsI(Tl) เจือสาร Tl 0.35% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 1 ซม. มีลักษณะใสและโปร่งแสง และผลึกเป็นเนื้อเดียวกัน มีความไวต่อความชื้นไม่มากนัก และภายใต้แสงยูวีที่ส่องให้กับผลึกทั้ง 3 ก้อนจะเห็นได้ว่าผลึกทั้ง 3 ก้อน มีการเปล่งแสงออกมาที่แสงย่านความยาวคลื่นต่างกัน คือ ก้อนผลึก $CsCaI_3$ ที่มีสัดส่วน 80:20 และ 97:3 เปล่งแสงสว่างย่านแสงสีฟ้า และก้อนผลึก CsI:Tl เปล่งแสงสว่างย่านแสงสีเหลือง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.6 ผลึกที่อยู่ในแก้วควอทซ์ของผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึก CsI(Tl)



ภาพที่ 4.7 การเรืองแสงของผลึกภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(ก) ผลึก $CsCaI_3$ ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 0.5 ซม.

(ข) ผลึก $CsCaI_3$ ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 1 ซม.

(ค) ผลึก CsI(Tl) เจือสาร Tl 0.35% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ความยาว 1 ซม.

4.3 การทดสอบความเป็นผลึก

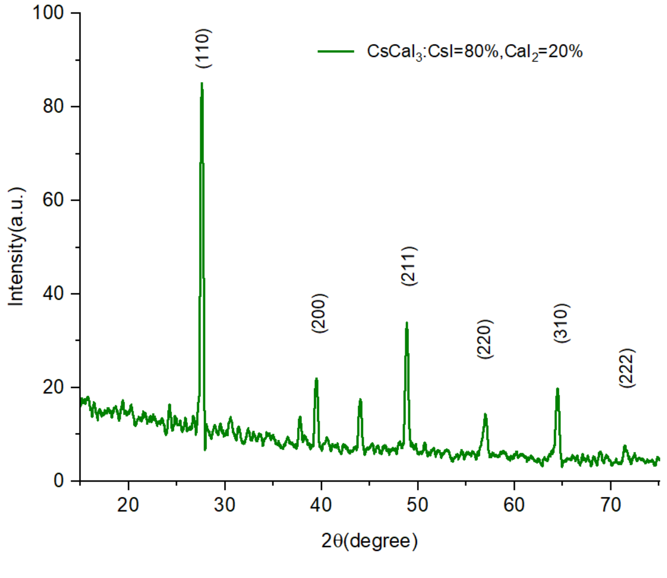
ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 และ 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึก CsI(Tl) เจือสาร TlI 0.35 % มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังแสดงในภาพที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกทั้งสามมีรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 4.11 ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ทั้ง 2 ก้อน ได้แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกของผลึกซีเซียมไอโอไดด์มาตรฐานทั่วไปซึ่งเป็นโครงสร้างแบบคิวบิกที่มีอะตอมตรงกลาง (body-center cubic) หรือโครงสร้างแบบ BCC โดยแสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทั้งหมด 6 พีคของตำแหน่ง 2θ คือพีคของระนาบ (110) (200) (211) (220) (310) และ (222) และมีโครงสร้างผลึกที่เด่นชัด คือโครงสร้างผลึกระนาบ (110) ที่เด่นชัดมากที่สุดและรองถัดลงมาด้วยระนาบ (211) และพบว่าผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีพีคที่ตำแหน่งค่ามุม 2θ ที่ 45 องศา ซึ่งเป็นพีคของแคลเซียมไอโอไดด์ (Persson and Kristin, 2014; Yee et al., 2019) ซึ่งแสดงว่ามีสารแคลเซียมไอโอไดด์บางส่วนที่ยังไม่หลอมรวมกันกับสารซีเซียมไอโอไดด์ ส่วนผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือแทลเลียม มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC โดยมีโครงสร้างผลึกที่เด่นชัดพอกัน 2 ระนาบ คือโครงสร้างผลึกระนาบ (110) และระนาบ (211) ดังแสดงในภาพที่ 4.8 สำหรับค่าคงที่แลตทิซ ความเครียด และขนาดผลึกที่ได้จากคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าแลตทิซ ขนาดผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเครียดของผลึกทั้งสาม

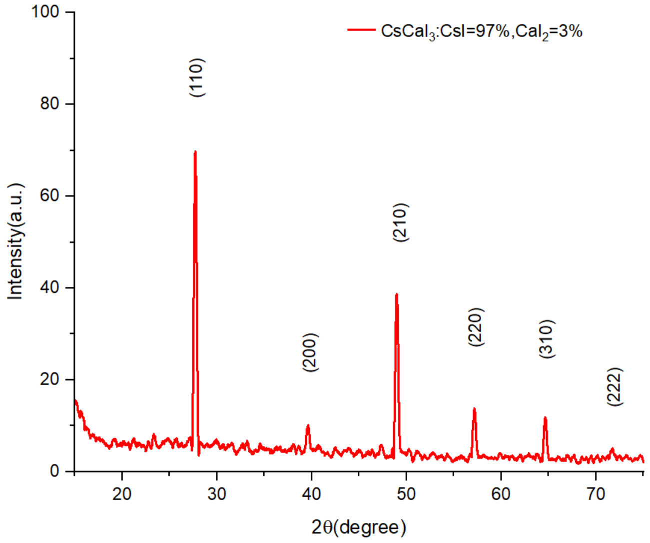
ผลการทดสอบผลึก	$CsCaI_3$:CsI=80%, CaI_2=20%	$CsCaI_3$:CsI=97%, CaI_2=3%	CsI(Tl
ระนาบเด่น	(110) และ (211)	(110) และ (211)	(110) และ (211)
ค่าคงที่แลตทิซ	4.5721±0.0091 °A	4.5512±0.0107 °A	4.5484±0.0022 °A
(%) Strain	0.34	-0.12	-0.18
ขนาดผลึกที่ระนาบเด่น (nm)	25.30 และ 25.32	25.10 และ 26.12 nm	21.78 และ 23.59

ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5721±0.0091 อังสตรอม โดยทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบดึงขยาย (Tensile strain) ในผลึกเล็กน้อย 0.34% เมื่อเทียบกับผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5567 อังสตรอม (Klimmonsky et al., 2011)

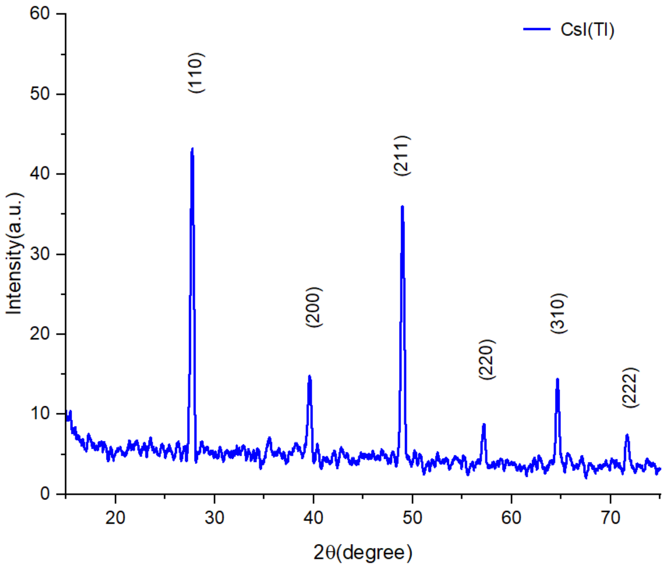
ขนาดผลึกระนาบ (110) 25.30 นาโนเมตร และ ขนาดผลึกระนาบ (211) 25.32 นาโนเมตร และผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5512±0.0107 อังสตรอม โดยทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัด (Compressive strain) ในผลึกเล็กน้อย -0.12% และมีขนาดผลึกระนาบ (110) 25.10 นาโนเมตร และ ขนาดผลึกระนาบ (211) 26.12 นาโนเมตร และ ผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือแทลเลียม มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5484±0.0022 อังสตรอม โดยทำให้เกิดสภาวะความเครียดแบบบีบอัด (Compressive strain) ในผลึกเล็กน้อย -0.18% ขนาดผลึกระนาบ (110) 21.78 นาโนเมตร และ ขนาดผลึกระนาบ (211) 23.59 นาโนเมตร ซึ่งจากผลสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซียมไอโอไดด์ผสมในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าคงที่แลตทิซของผลึกเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอโอไดด์สูงถึงร้อยละ 20 ส่งผลให้เปลี่ยนรูปแบบสภาวะความเครียดในผลึกเปลี่ยนจากแบบบีบอัดกลายไปเป็นแบบดึงขยาย ซึ่งหมายถึงการส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกที่มีปริมาณสัดส่วนของแคลเซียมเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกัน สำหรับขนาดผลึกค่อนข้างใกล้เคียงกันมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเล็กน้อย แต่สังเกตเห็นว่าขนาดผลึกระนาบ (211) มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า คือ เมื่อมีสัดส่วนปริมาณแคลเซียมไอโอไดด์สูงกว่านั้นมีขนาดผลึกเล็กลง แสดงว่าผลึกที่มีสัดส่วนของ $CsI:CaI_2$ ต่างกันนั้นน่าจะมีการจัดเรียงตัวหน้าระนาบของโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปที่เป็นผลมาจากปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น



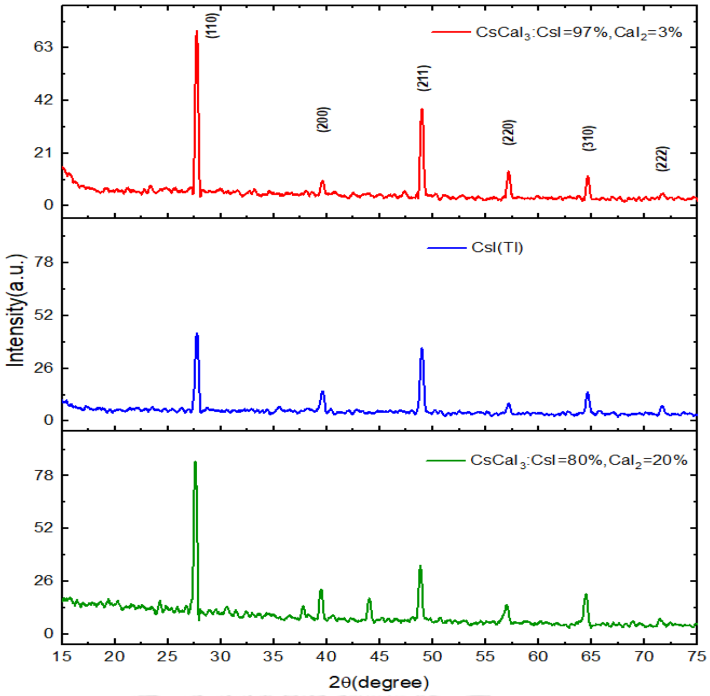
ภาพที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



ภาพที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



ภาพที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ผลึก CsI(Tl) เจือสาร TlI 0.35 % ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



ภาพที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึก CsI(Tl) เจือสาร TlI 0.35 % ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

4.4 ผลการวิเคราะห์การเรืองแสงของผลึก

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของผลึกเป็นการทดสอบถึงประสิทธิภาพการเรืองแสงเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น โดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ ซึ่งผลที่ได้การวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

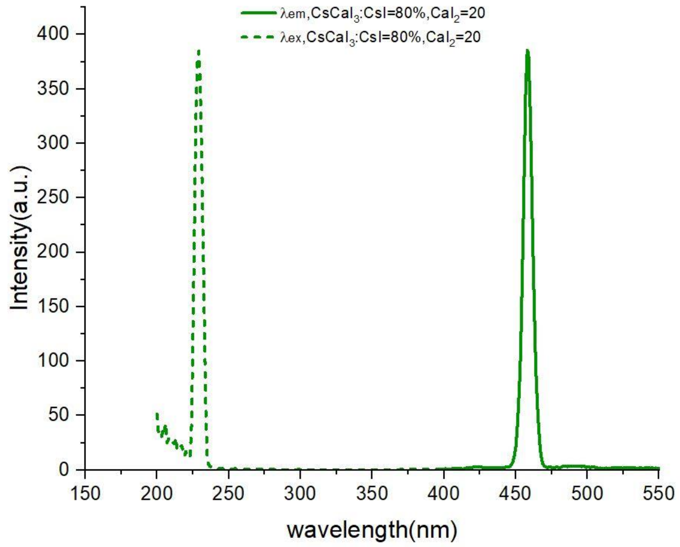
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนต์ของผลึกทั้งสาม

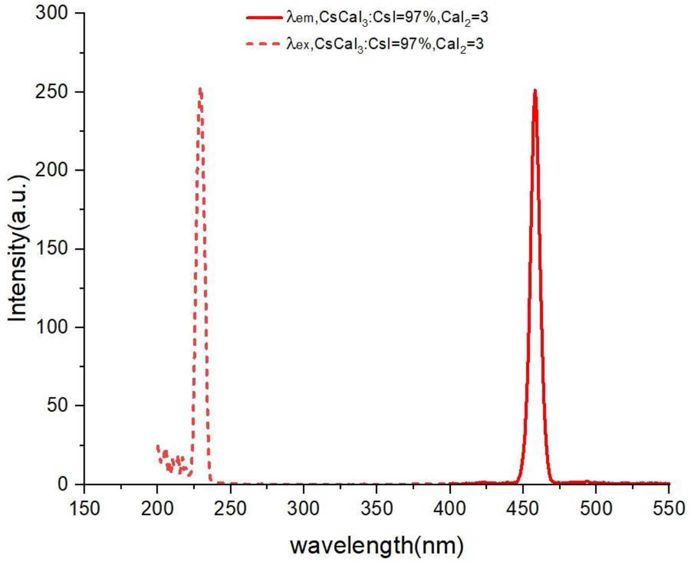
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางแสงของผลึก	$CsCaI_3$:CsI=80%, CaI_2=20%	$CsCaI_3$:CsI=97%, CaI_2=3%	CsI(Tl)
ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา	458 nm	458 nm	559 nm

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติการเปล่งแสงของผลึกเมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 229 นาโนเมตร สำหรับผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ทั้ง 2 ก้อน พบว่าผลึก ซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 458 นาโนเมตร เป็นย่านของแสงสีเขียว ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 458 นาโนเมตร ซึ่งเป็นย่านของแสงสีเขียวเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.13 และผลึก

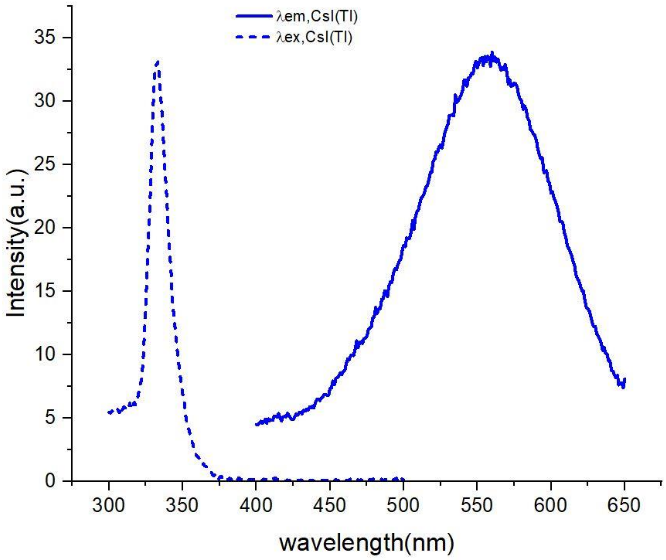
ซีเซียมไอโอไดด์ที่เจือด้วยแทลเลียม มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 559 นาโนเมตร ซึ่งเป็นย่านของแสงสีส้ม โดยถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 332 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.14 สำหรับผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปล่งแสงของผลึก 3 ก้อน ดังแสดงในภาพที่ 4.15



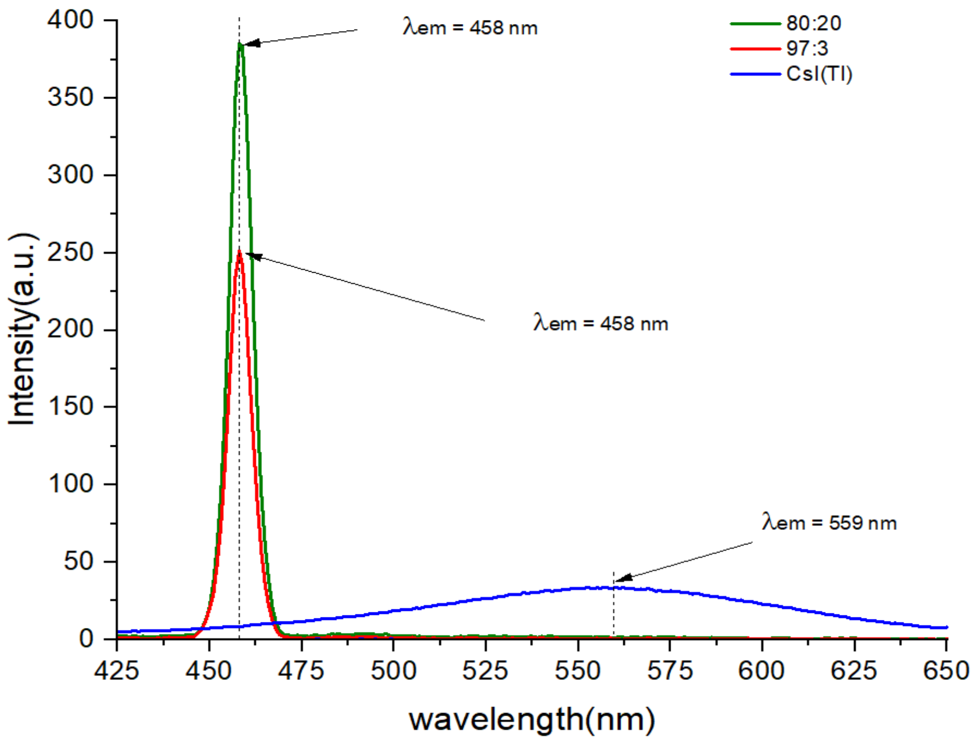
ภาพที่ 4.12 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์



ภาพที่ 4.13 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ CsI:CaI_2 ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์



ภาพที่ 4.14 ความยาวคลื่นที่กระตุ้นและเปล่งออกมาของผลึก CsI(Tl) ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์



ภาพที่ 4.15 ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาของผลึกทั้งสามก้อนด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

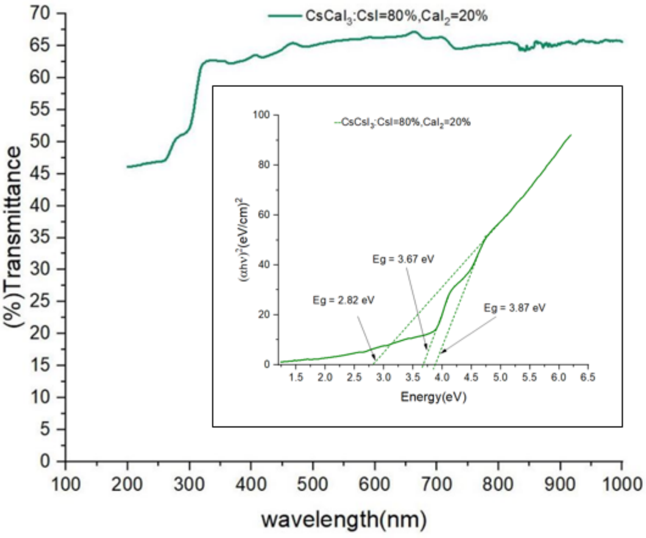
4.4 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านและการดูดกลืนแสงของผลึก

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของผลึกถึงความสามารถในการส่องผ่านแสง การดูดกลืนแสง และช่องว่างแถบพลังงานทางแสง ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมแสงย่านแสงยูวีและช่วงตามองเห็น ตามหลัก Beer-Lambert (Chen and Jaramillo, 2017) คือแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 190-1000 นาโนเมตร ผลจากการวิเคราะห์การส่องผ่านแสง และค่าช่องว่าแถบพลังงานของทั้งสามผลึกดังแสดงในตารางที่ 4.6

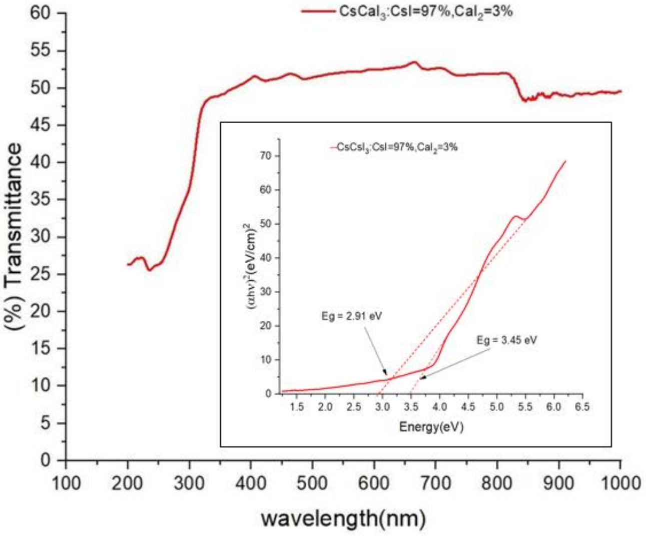
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านแสง และค่าช่องว่าแถบพลังงานของทั้งสามผลึก

ผลการทดสอบผลึก	$CsCaI_3$:CsI=80%, CaI_2=20%	$CsCaI_3$:CsI=97%, CaI_2=3%	CsI(Tl
การโปร่งแสงเต็มที่ (%)	65	49	76
ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	2.82, 3.63, 3.87	2.91, 3.45	2.38, 3.61, 4.66

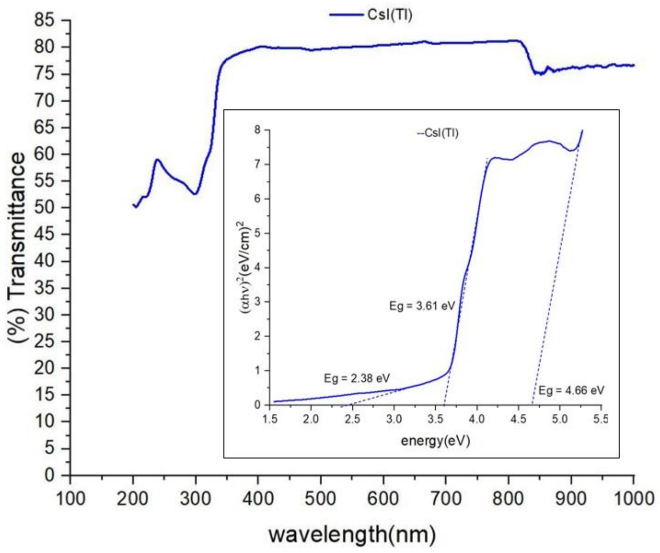
ผลการตอบสนองการส่องผ่านแสงของผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 แสดงจุดเริ่มโปร่งแสงที่ความยาวคลื่นช่วง 439 นาโนเมตร และเกิดการโปร่งแสงเต็มที่ที่ประมาณร้อยละ 65 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ 2.82, 3.63 และ 3.87 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 ผลการตอบสนองการส่องผ่านแสงของผลึก ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ CsI:CaI_2 แสดงจุดเริ่มโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 426 นาโนเมตร และเกิดการโปร่งแสงเต็มที่ที่ประมาณร้อยละ 49 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ 2.91 และ 3.45 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และผลการตอบสนองการส่องผ่านแสงของผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือด้วยแทลเลียม มีจุดเริ่มโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 521 นาโนเมตร และเกิดการโปร่งแสงเต็มที่ที่ประมาณร้อยละ 76 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ 2.38, 3.61 และ 4.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 สำหรับผลการตอบสนองการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆของผลึกทั้งสามก้อนดังแสดงในภาพที่ 4.19 และเมื่อทำการแปลงผลการตอบสนองทางแสงให้เป็นค่าการดูดกลืนแสง เพื่อที่จะค่าช่องว่างแถบพลังงานตามหลักการหาความสัมพันธ์ของทาว (Tauc’s plot) (Chen and Jaramillo, 2017) ซึ่งผลค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึกทั้งสามก้อนที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.20



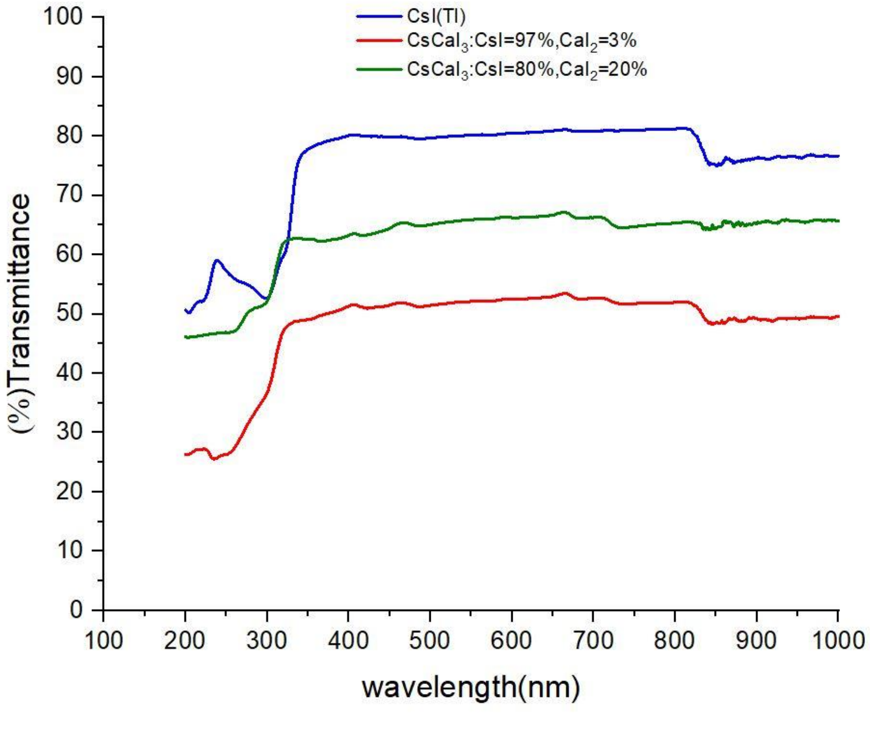
ภาพที่ 4.16 การส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$



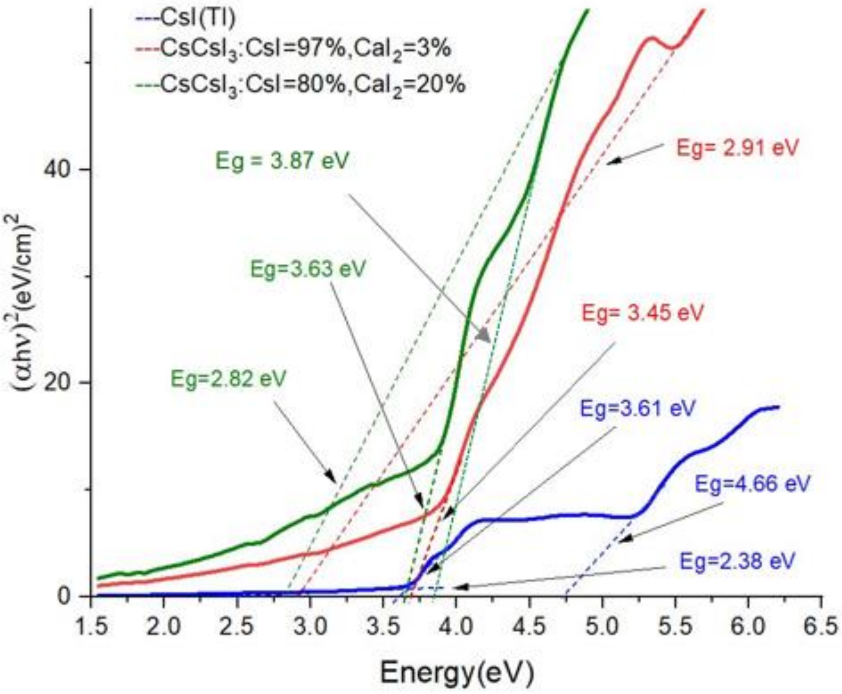
ภาพที่ 4.17 การส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 897:3 ของ $CsI:CaI_2$



ภาพที่ 4.18 ผลการส่องผ่านแสงและช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก CsI(Tl)



ภาพที่ 4.19 การค่าตอบสนองการส่องผ่านแสงของผลึกทั้งสามก้อน



ภาพที่ 4.20 ค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึกทั้งสามก้อนด้วยเทคนิค UV-visible

4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก

การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก โดยการนำผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกมาตัดและขัดเพื่อทำให้ผิวหน้าของผลึกมีความเรียบเพื่อที่จะนำไปประกอบเข้ากับส่วนของหลอดทวีคูณแสง (PMT)และส่วนวิเคราะห์สเปกตรัม ผลึกที่นำไปทดสอบประสิทธิภาพ คือ ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ยาว 0.5 เซนติเมตร ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ยาว 1.0 เซนติเมตร และ ผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือด้วยแทลเลียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ยาว 1.0 เซนติเมตร การทดสอบประสิทธิภาพการวัดโดยการนำผลึกที่ขัดแล้วใช้น้ำยาประสานผิวหน้า (Fluid coupling) ทาบนผิวหน้าของผลึกและนำไปติดตั้งเข้ากับหลอดทวีคูณแสง ซึ่งน้ำยาประสานที่ใช้จะช่วยลดการหักเหและสูญเสียความเข้มของแสง นำเทปกาวสีดำมาปิดเพื่อป้องกันไม่ให้มีแสงจากผ่านนอกมารบกวนและเป็นการป้องกันความเสียหายของหลอดทวีคูณแสง แล้วนำหัววัดที่ได้ไปติดตั้งเข้ากับระบบวิเคราะห์สัญญาณ สำหรับสารกัมมันตรังสีที่ใช้ในการทดสอบคือ โคบอลต์ 57 ที่มีระดับพลังงานของรังสีแกมมา 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลจากการทดสอบพบว่า ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

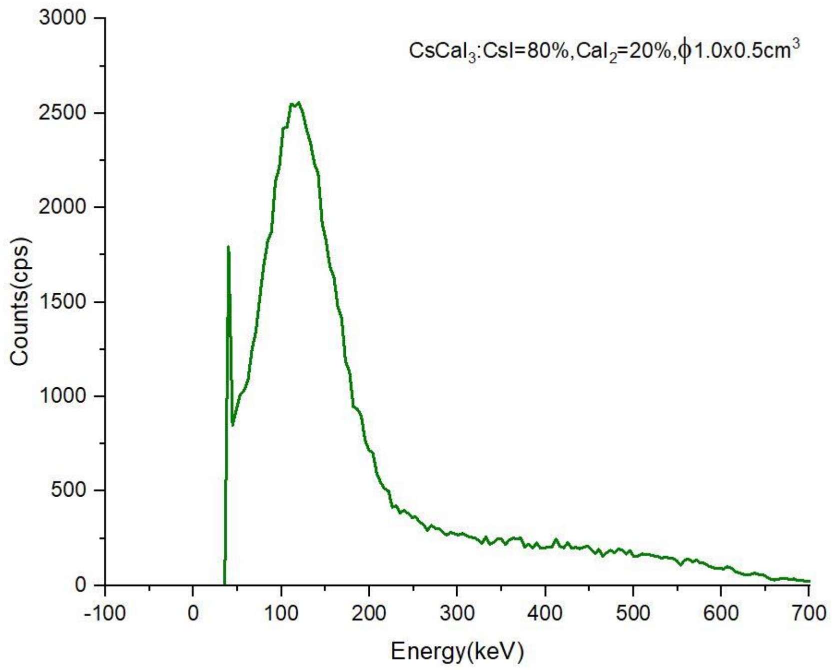
57.2 และกำลังแยกพลังงานร้อยละ 79.0 ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 4.64 และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีร้อยละ 40.3 และผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือด้วยแทลเลียมมีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 46.2 และค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีร้อยละ 40.2 แต่ด้วยว่าผลึกที่มีสัดส่วน 97:3 นั้นมีค่าอัตรานับวัดรังสีที่ได้จากระบบวัดรังสีนี้ไม่เหมาะสมในส่วนของวงจรขยายสัญญาณและปรับรูปสัญญาณจึงทำให้ผลของการหาประสิทธิภาพการวัดรังสีและกำลังแยกของการวัดรังสีของผลึกนี้ยังไม่ถูกต้องเท่าไรนัก

โดยผลการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาเพื่อหาประสิทธิภาพและค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสีแสดงดังตารางที่ 4.7 และสเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้ของทั้งสามผลึกดังแสดงในภาพที่ 4.21, 4.22, และ 4.23 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีแกมมาที่วัดได้ดังแสดงในภาพที่ 4.24 สำหรับสเปกตรัมรังสีแกมมาวัดที่ระยะ 0 , 3, 5 และ 15 เซนติเมตร ของผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 80:20 ของ $CsI:CaI_2$ ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีสัดส่วน 97:3 ของ $CsI:CaI_2$ และผลึกซีเซียมแทลเลียมไอโอไดด์ มีสเปกตรัมรังสีแกมมาดังแสดงในภาพที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

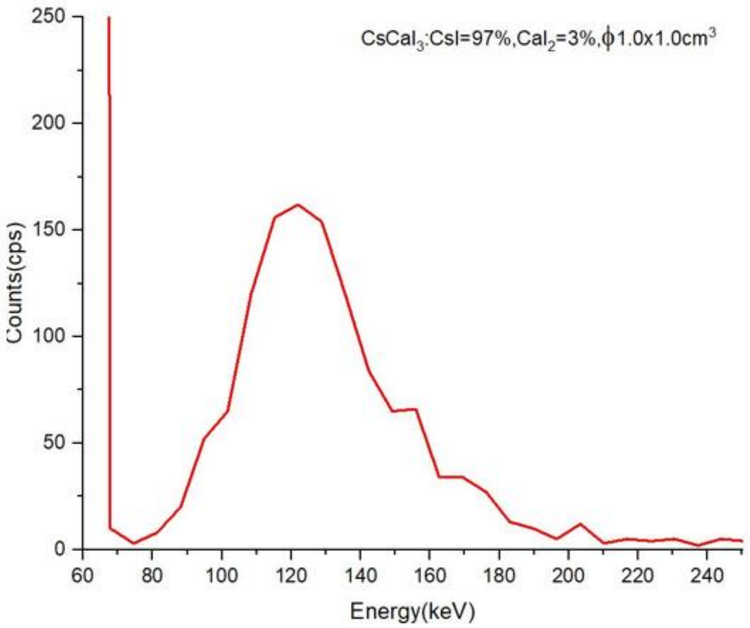
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV และความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของผลึกทั้งสามก้อน ที่ระยะวัด 3 เซนติเมตร

ผลึก	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัดรังสี (E_{abs})	ประสิทธิภาพการวัดรังสี (E_{int})	ความสามารถในการแยกพลังงานรังสี (R)
$CsCaI_3$:CsI=80%, CaI_2=20%	0.4 %	57.2 %	79.0 %
$CsCaI_3$:CsI=97%, CaI_2=3%	0.01 %	4.64 %	40.3 %
CsI(Tl)	0.3 %	46.2 %	40.2 %

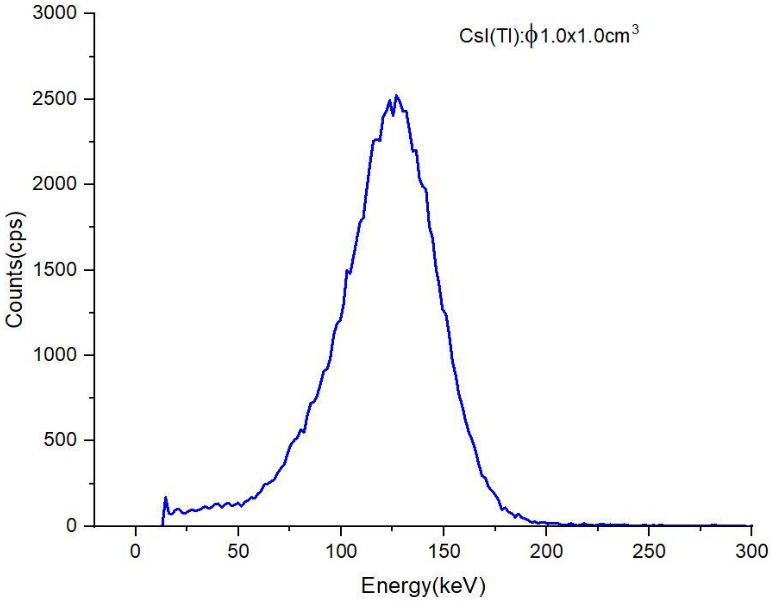
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



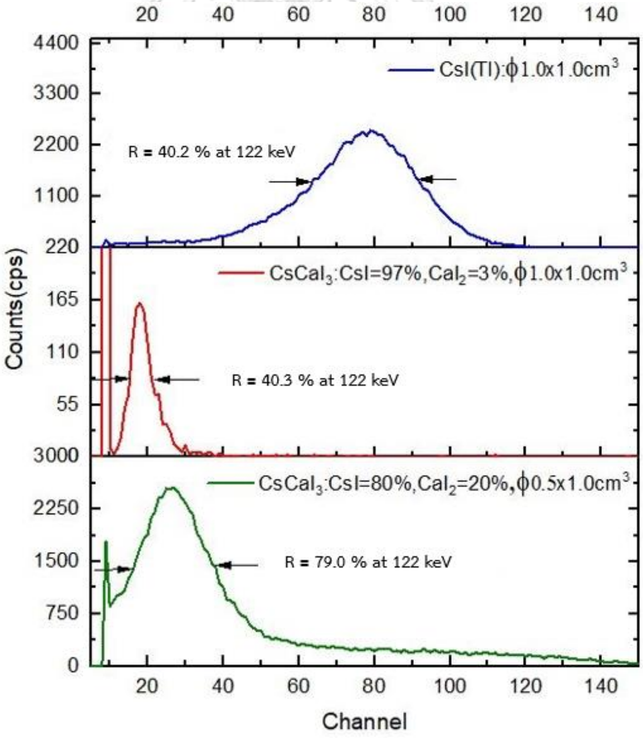
ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20% โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร



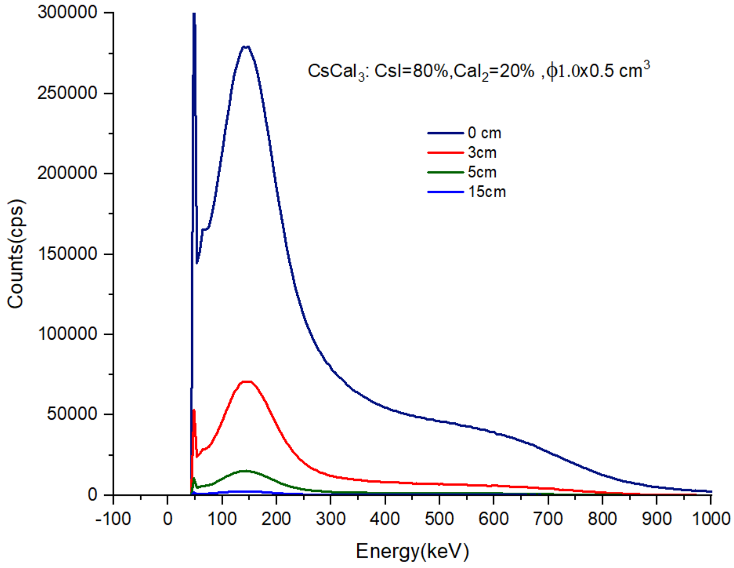
ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3% โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร



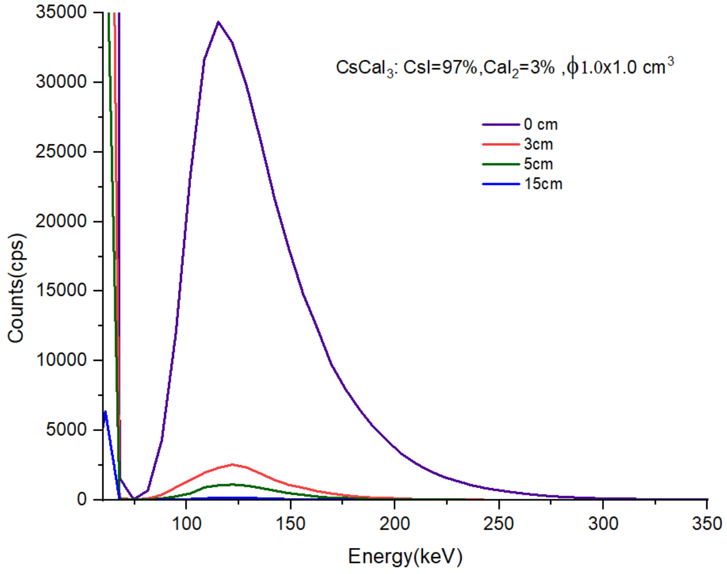
ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก CsI(Tl) โดยวัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร



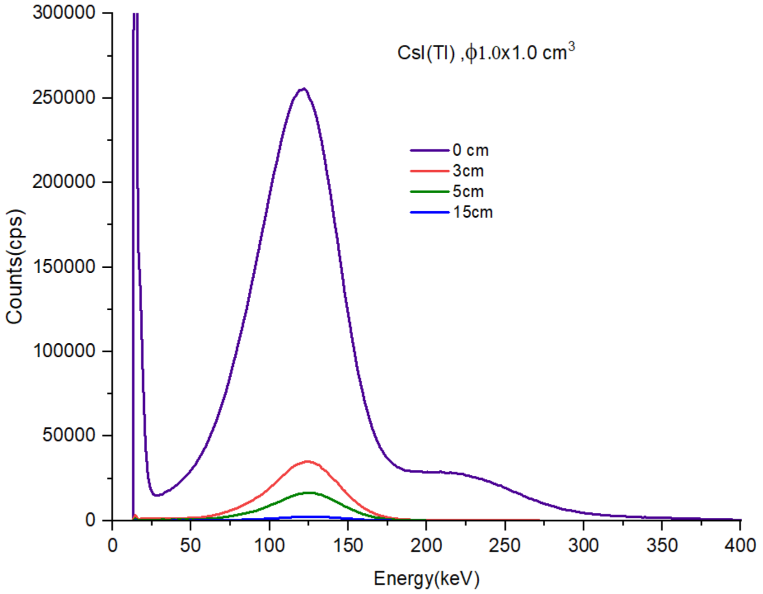
ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึกทั้งสามก้อน วัดที่ระยะ 3 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=80%,CaI_2=20% วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก $CsCaI_3$:CsI=97%,CaI_2=3% วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของผลึก CsI(Tl) วัดที่ระยะ 0-15 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เพื่อใช้วัดรังสีในงานวิจัยนี้ ได้ทำการปลูกผลึกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้ CsI และ CaI_2 ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 80:20 และ 97:3 การวิจัยแบ่งออกเป็นการทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก โครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางแสง และการตรวจวัดประสิทธิภาพและความสามารถในการวัดรังสี โดยผลการวิจัยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก ผลึก $CsCaI_3$ ทั้งสองสัดส่วน และผลึก CsI(Tl) ควบคุมเวลาเมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้เป็นเวลาโดยประมาณ 10 ชั่วโมง แล้วทำการปรับอัตราการลดลงของอุณหภูมิด้วยอัตรา 0.05 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ซึ่งผลจากการวัดค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ทำให้ได้ค่าอัตราการตกผลึกของผลึก $CsCaI_3$ ทั้งสองสัดส่วน 0.82 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และผลึก CsI(Tl) มีอัตราการตกผลึก 0.78 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

5.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสง

เมื่อปริมาณ CaI_2 ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของระนาบในโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปด้วยโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน โดยที่ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 มีขนาดผลึกที่ระนาบ (110) และ (211) คือ 25.30 และ 25.32 นาโนเมตร มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5721$\pm$0.0091 อังสตรอม เกิดความเครียดแบบดึงขยาย 0.34 % เมื่อเทียบกับผลึก CsI อ้างอิงที่มีค่า 4.5567 อังสตรอม ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5512$\pm$0.0107 อังสตรอม เกิดความเค้นแบบบีบอัด -0.12 % และผลึก CsI(Tl) มีค่าคงที่แลตทิซ 4.5484$\pm$0.0022 อังสตรอม เกิดความเค้นแบบบีบอัด -0.18 % สำหรับผลึก $CsCaI_3$ ที่มีปริมาณสัดส่วน CaI_2 ที่สูงกว่าแต่ยังคงส่งผลการเปลี่ยนแปลงต่อคุณสมบัติทางแสงของผลึกได้ใกล้เคียงกันโดยให้ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาประมาณ 458 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นและอยู่ในช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสง เช่น หลอดทวีคูณแสง (PMT) ที่ใช้งานทั่วไป และช่วยเพิ่มความเข้มแสงที่เปล่งออกมาสูงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณสัดส่วนแคลเซียมมากกว่า สำหรับผลการส่องผ่านและการดูดกลืนแสงทำให้ทราบว่า ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.82, 3.63 และ 3.87 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.91 และ 3.45 อิเล็กตรอน

โวลต์ สำหรับผลึก CsI(Tl) มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.38, 3.61 และ 4.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าเหล่ามีความใกล้เคียงกับผลวิเคราะห์ของงานวิจัยอื่น (Sintham, 2017)

5.1.3 ผลการตรวจวัดประสิทธิภาพของการวัดรังสีที่พลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 มีประสิทธิภาพการวัดรังสีมากที่สุดคือ 57.2 % ซึ่งมากกว่า ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 มีค่า 4.64 % และผลึก CsI(Tl) มีค่า 46.2 % สำหรับค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสี ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 มีค่ามากที่สุด (แยกพลังงานได้ไม่ดี) 79.0% ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 มีค่า 40.3% ในขณะที่ผลึกที่มีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีที่สุด คือ ผลึก CsI(Tl) ที่มีค่า 40.2% แต่ด้วยว่าเงื่อนไขของระบบนับวัดรังสีของผลึกที่มีสัดส่วน 97:3 ยังมีความไม่เหมาะสมจึงทำให้ได้ค่าอัตรานับวัดรังสีต่ำมากไป ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีและกำลังแยกพลังงานของผลึกวัดรังสีนี้เบี่ยงเบนไปจากค่าแท้จริงได้

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพผลึก ได้ว่าขนาดผลึกของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 คือ ขนาดผลึกระนาบ (110) และระนาบ (211) มีขนาด 25.30 nm. และ 25.32 nm. ตามลำดับ สำหรับผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ CsI: CaI_2 คือ ขนาดผลึกระนาบ (110) และระนาบ (211) มีขนาด 25.10 nm. และ 26.12 nm. ตามลำดับ โดยผลึกที่มีสัดส่วนแคลเซียมเพิ่มมากขึ้นมีขนาดผลึกระนาบ (211) เล็กลงแต่ของระนาบ (110) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าเมื่อมีแคลเซียมเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย แล้วค่าคงที่แลตทิซก็เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดสภาวะความเครียดเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบบีบอัดกลายเป็นแบบดึงขยายแทน ซึ่งนี้อาจจะมาจากการที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันของผลึกแคลเซียมไอโอไดด์ที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอน และผลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของผลึกที่มีสัดส่วน 80:20 ยังแสดงถึงพีคของโครงสร้างผลึกแคลเซียมไอโอไดด์ที่เพิ่มเติมขึ้นมาแต่ความเข้มพีคไม่สูงมากนัก ในขณะที่ผลึกสัดส่วน 97:3 และผลึก CsI:Tl ไม่ปรากฏพีคนี้ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ที่มีส่วนที่เป็นผลึกแคลเซียมไอโอไดด์หลอมปนรวมอยู่ในผลึก $CsCaI_3$ นี้บ้างเล็กน้อย และสำหรับผลึก CsI(Tl) พบว่ามีขนาดผลึกระนาบ (110) และระนาบ (211) คือ ขนาด 21.78 nm. และ 23.59 nm. ตามลำดับ ซึ่งขนาดผลึกค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับผลึกที่ใช้งานทั่วไปที่รายงานค่าใหญ่กว่าราว 2-3 เท่า อาจจะด้วยว่าเป็นการปลูกภายใต้สภาวะเงื่อนไขการปลูกที่ยังไม่เหมาะสมนัก

สำหรับค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงของผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 มีค่า 2.82, 3.63 และ 3.87 อิเล็กตรอนโวลต์ และผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ CsI:CaI_2 มีค่า 2.91 และ

3.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสำหรับสองค่าระดับนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับผลึกที่มีสัดส่วนแคลเซียมไอโอไดด์สูงอาจเป็นไปได้ที่จะเกิดช่องว่างแถบพลังงานแยกกันระหว่างของผลึก CsI กับผลึก CaI_2 ได้จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นค่าเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งระดับ ผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 และผลึก $CsCaI_3$ สัดส่วน 97:3 ของ CsI:CaI_2 มีค่าความยาวแสงที่เปล่งออกมาประมาณ 458 นาโนเมตร โดยสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอโอไดด์ช่วยส่งเสริมให้ความเข้มแสงที่เปล่งออกมาสูงขึ้น ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการไปเพิ่มระดับชั้นพลังงานในแถบช่องว่างพลังงาน ก็ช่วยเพิ่มโอกาสในการปลดปล่อยโฟตอนแสงออกมาได้จำนวนมากขึ้น ซึ่งเมื่อนำผลึก $CsCaI_3$ ทั้งสองสัดส่วนไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการวัดรังสีผลที่ได้คือ ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 มีประสิทธิภาพการวัด 57.2% ที่ถือว่ายังไม่ดีเท่าไรนัก แต่ยังมีค่ามากกว่าผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 และผลึก CsI(Tl) ซึ่งสาเหตุที่ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 80:20 ของ CsI:CaI_2 ประสิทธิภาพการวัดที่ดีกว่าอาจเป็นเพราะมีสัดส่วนของ CaI_2 ที่มากกว่าที่ช่วยส่งเสริมทำให้ค่าอัตราปริมาณความเข้มแสงที่เปล่งออกมาต่อพลังงานที่สูงมากขึ้น เมื่อนำผลการวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีลักษณะการวิจัยที่ใกล้เคียงกัน (Iida et al., 2019) ที่ปลูกผลึก CaI_2 ขนาด 5x5x1 mm^3 มีความยาวแสงที่เปล่งออกมาที่ 410 นาโนเมตร โดยผลึกมีความสามารถในการแยกพลังงานรังสี คือ 3.2 % ที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับผลึก $CsCaI_3$ ทั้งสองสัดส่วนที่มีค่าความยาวแสงที่เปล่งออกมาคือ 458 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปลูกผลึกที่มีส่วนประกอบของ CaI_2 กับ CsI สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงได้ดีขึ้นและปรับความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาให้อยู่ในช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสงได้เหมาะสมมากขึ้น สำหรับค่าความสามารถในการแยกพลังงานรังสียังถือว่าไม่ดีนัก ด้วยว่าคุณภาพผลึกทั้งสองนี้ยังไม่ดีนัก ผลึกยังมีโครงสร้างผลึกเป็นลักษณะพหุสัณฐานด้วยระนาบที่โดดเด่นพอกันสองระนาบ โดยเฉพาะกรณีของที่ผลึก $CsCaI_3$ ที่สัดส่วน 97:3 นั้นมีผลการทดสอบการตรวจวัดรังสีด้วยระบบวงจรขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณที่มีความไม่เหมาะสมหรือยังไม่สอดคล้องกันกับการเรืองแสงของผลึกนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยปลูกผลึก $CsCaI_3$ อุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกมีค่าสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้นเพียงเล็กน้อยอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สารตั้งต้นไม่หลอมละลายรวมกันได้ทั้งหมดและสามารถส่งผลทำให้ผลึกเกิดรอยร้าวขึ้นในบางส่วนของผลึก แต่ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงมากเกินไป อาจจะทำให้ภาชนะปลูกผลึกมีการกักความร้อนไว้สูงมากเกิน หรือส่งผลทำให้หลอดแตกได้ในขณะที่ทำการ

ปลูกผลึกอยู่ หรือส่งผลต่อการลดระดับความร้อนเพื่อทำการตกผลึก ดังนั้นประเด็นนี้จึงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่จะต้องมีการศึกษาอย่างเป็นระบบ

ในส่วนของการทดสอบหาประสิทธิภาพการวัดรังสีและความสามารถในการแยกพลังงานรังสีของผลึกได้ไม่ดีนัก อาจมาจากสาเหตุคือการขัดผลึกไม่เรียบมากพอ หรือ อาจจะมาจากคุณสมบัติหรือสัดส่วนสารตั้งต้นที่ยังไม่เหมาะสมจึงทำให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพผลึกยังไม่ดีพอจึงส่งผลทำให้ได้ประสิทธิภาพการตรวจวัดรังสีและความสามารถแยกพลังงานรังสีได้ไม่ดีมากนัก อีกทั้งควรต้องมีวงจรขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติการเรืองแสงของผลึกชนิดนี้ที่เปล่งแสงความยาวคลื่น 458 นาโนเมตร ที่แม้ว่าจะมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสงแล้วก็ตาม

ดังนั้นเพื่อการพัฒนาให้ได้ผลึกซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์ที่ดีขึ้นในงานวิจัยต่อไป ควรพิจารณาในการตั้งค่าอุณหภูมิปลูกผลึก การขัดผลึกให้เรียบ และต้องศึกษาหาสัดส่วนผสมของสารตั้งต้นทั้งสองที่เหมาะสมที่จะช่วยส่งเสริมทำให้คุณสมบัติแสงดีขึ้นโดยที่ไม่ส่งผลทำให้คุณภาพผลึกแย่ลงไปมากนักและอาจจะพิจารณานำสารอื่นเจือร่วมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติของซีเซียมไดโอไดด์ และแทลเลียมไอโอไดด์

CsI	
Cesium iodide	
Description Cesium iodide or cesium iodide (chemical formula CsI) is the ionic compound of cesium and iodine. It sometimes used for components in the widest range spectrophotometers. An extremely soft material it difficult to polish and so performance is compromised for range. Cesium iodide photocathodes are highly efficient at extreme ultraviolet wavelengths	
Properties	
Chemical formula	CsI
Molar mass	259.809 g/mol
Appearance	white crystalline solid
Density	4.51 g/cm^3
Melting point	632 °C (1,170 °F; 905 K)
Boiling point	1,280 °C (2,340 °F; 1,550 K)
Solubility in water	848 g/L (25 °C)
Magnetic susceptibility (χ)	-82.6·10−6 cm^3/mol
Decay Constant (μs)	0.03, 0.1
Emission spectra rage(nm)	250 to 500
Photons/MeV	16,800
Peak scintillation wavelength (nm)	310
Cleavage planes	None
Reflective index	1.78 at 10 °C
Shear modulus (G) (GPa)	6.24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Stability	Deliquescent
Temperature coefficient of light output (%K^{-1})	-0.53
Thermal expansion (K-1)	48.3x10-6 at 293 K
Youngs modulus (E)(GPa)	5.3
Bulk modulus(K) (GPa)	12.67
Apparent elastic limite (MPa)	5.6 (810psi)
Refractive index (nD)	1.9790 (0.3 µm)
Crystal structure	CsCl, cP2
Space group	Pm3m, No. 221
Lattice constant(nm)	0.4503
Lattice volume (V)	0.0913 nm^3
Formula units (Z)	1
Coordination geometry	Cubic (Cs^+), Cubic (I^-)
Heat capacity (C)	52.8 J/mol·K

<table>
<tr><td colspan="2">CsI(Tl)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Thallium doped Cesium iodide</td></tr>
<tr><td colspan="2">Description
Thallium doped Cesium iodide (chemical formula CsI(Tl)) is one of the brightest scintillation material. It can be used in security inspection</td></tr>
<tr><td colspan="2">Properties</td></tr>
<tr><td>Chemical formula</td><td>CsI(Tl)</td></tr>
<tr><td>Structure</td><td>BCC</td></tr>
<tr><td>Density</td><td>4.51 g/cm3</td></tr>
<tr><td>Melting point</td><td>894</td></tr>
<tr><td>Specific heat (J.kg^{-1}.K^{-1})</td><td>0.048</td></tr>
<tr><td>Solubility in Alcohol</td><td>yes</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Water solubility (g/100ml H_2O)	44 at 273 K
Decay Constant (μs)	1.0
Emission spectra rage(nm)	375 to 725
Photons/MeV	60,000
Peak scintillation wavelength (nm)	550
Cleavage planes	No
Reflective index	1.79
Stability	Slightly hygroscopic
Temperature coefficient of light output (% $^{o}C^{-1}$)	+0.32
Youngs modulus (GPa)	5.3
After Grow	Approx. 2.0% after 2 ms Approx. 2.8% after 1 ms
Light escape from one face to air (%)	8.6 %
Light escape from one face to glass (%)	22.9 %
Gamma and x-ray absorption	10.00 at 100 keV
Gamma and x-ray coefficient (cm^{-1})	0.48 to 660 keV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติสมบัติของขดลวดความร้อน

Physical and Mechanical Properties
KANTHAL Alloys

Heating Alloys	APM	A-1	A	AF	AE
Max continuous operating temperature (element temperature in air), °C *°F*	1425…*2595*	1400…*2550*	1350…*2460*	1300…*2370*	1300…*2370*
Nominal composition, % Cr	22				
Al	5.8		5.3		
Fe	Balance				
Density, g/cm³ *lb/in³*	7.10…*0.256*		7.15…*0.258*		
Electrical resistivity at 20 °C, Ω mm²m⁻¹ *at 68 °F, Ω/cmf*	1.45…*872*		1.39…*836*		
Temperature factor of the resistivity, C_t 250 °C *480 °F* 500 °C *930 °F* 800 °C *1470 °F* 1000 °C *1830 °F* 1200 °C *2190 °F*	 1.00 1.01 1.03 1.04 1.04		 1.01 1.03 1.05 1.06 1.06		
Coefficient of thermal expansion, K^{-1} 20-100°C *68-210°F* 20- 250 °C *68- 480 °F* 20- 500 °C *68- 930 °F* 20- 750 °C *68-1380 °F* 20-1000 °C *68-1830 °F*	 – $11 \cdot 10^{-6}$ $12 \cdot 10^{-6}$ $14 \cdot 10^{-6}$ $15 \cdot 10^{-6}$				
Thermal conductivity at 50 °C, W m⁻¹ K⁻¹ *122 °F, Btu in ft⁻²h⁻¹°F⁻¹*	11…*76*				
Specific heat capacity, kJ kg⁻¹K⁻¹, 20 °C *Btu lb⁻¹°F⁻¹, 68 °F*	0.46 *0.110*				
Melting point (approx.), °C *°F*	1500…*2730*				
Mechanical properties *(approx.) Tensile strength, N mm⁻² *psi*	680…*98600***	760…*110200*	725…*105200*	700…*101500*	720…*104400*
Yield point, N mm⁻² *psi*	470…*68200***	545…*79000*	550…*798000*	500…*72500*	520…*75400*
Hardness, Hv	230	240	230		
Elongation at rupture, %	20**	20	22	23	20
Tensile strength at 900 °C, N mm⁻² *at 1650 °F, psi.* Deformation rate 6.2 x 10⁻²min⁻¹	40 *5800*	34 *4900*		37 *5400*	34 *4900*
Creep strength*** at 800 °C, N mm⁻² *at 1470 °F, psi* at 1000 °C, N mm⁻² *at 1830 °F, psi* at 1100 °C, N mm⁻² *at 2010 °F, psi* at 1200 °C, N mm⁻² *at 2190 °F, psi*	 8.2….*1190* – – –	 1.2….*170* 0.5…*70* – –		 – – 0.7…*100* 0.3…*40*	 1.2…*170* – – –
Magnetic properties	Magnetic (Curie point approx. 600 °C *1100 °F)*				
Emissivity, fully oxidized condition	0.70				

KANTHAL A, AF, AE

Wire inch SWG

A: 0.325 – 0.002 in
AE: 0.039 – 0.008 in
AF: 0.325 – 0.004 in
Resistivity Ω/cir.mil ft 837
Density, lb/cu.in 0.258

$$in^2/\Omega = \frac{I^2 C_t}{p}$$

I = Current
C_t = Temperature factor
p = Surface load W/in²

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

°F	68	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372
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 SWG	Diameter inch	Resistance at 68°F Ω/ft	in²/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in²/ft	Cross sectional area in² x 1000
0	0.324	0.00796	1530	255	12.2	82.4
1	0.300	0.00929	1220	219	11.3	70.7
2	0.276	0.0110	948	185	10.4	59.8
3	0.252	0.0132	722	154	9.50	49.9
4	0.232	0.0155	563	131	8.75	42.3
5	0.212	0.0186	430	109	7.99	35.3
6	0.192	0.0227	319	89.6	7.24	29.0
7	0.176	0.0270	246	75.3	6.64	24.3
8	0.160	0.0327	185	62.2	6.03	20.1
9	0.144	0.0403	135	50.4	5.43	16.3
10	0.128	0.0510	94.6	39.8	4.83	12.9
11	0.116	0.0621	70.4	32.7	4.37	10.6
12	0.104	0.0773	50.7	26.3	3.92	8.49
13	0.0920	0.0988	35.1	20.6	3.47	6.65
14	0.0800	0.131	23.1	15.6	3.02	5.03
15	0.0720	0.161	16.8	12.6	2.71	4.07
16	0.0640	0.204	11.8	10.0	2.41	3.22
17	0.0560	0.267	7.92	7.63	2.11	2.46
18	0.0480	0.363	4.99	5.60	1.81	1.81
19	0.0400	0.523	2.89	3.89	1.51	1.26
20	0.0360	0.645	2.10	3.15	1.36	1.02
21	0.0320	0.816	1.48	2.49	1.21	0.804
22	0.0280	1.07	0.990	1.91	1.06	0.616
23	0.0240	1.45	0.623	1.40	0.905	0.452
24	0.0220	1.73	0.480	1.18	0.829	0.380
25	0.0200	2.09	0.361	0.973	0.754	0.314
26	0.0180	2.58	0.263	0.788	0.679	0.254
27	0.0164	3.11	0.199	0.654	0.618	0.211
28	0.0148	3.82	0.146	0.533	0.558	0.172
29	0.0136	4.52	0.113	0.450	0.513	0.145
30	0.0124	5.44	0.0860	0.374	0.467	0.121
31	0.0116	6.21	0.0704	0.327	0.437	0.106
32	0.0108	7.17	0.0568	0.284	0.407	0.0916
33	0.0100	8.36	0.0451	0.243	0.377	0.0785
34	0.00920	9.88	0.0351	0.206	0.347	0.0665
35	0.00840	11.8	0.0267	0.172	0.317	0.0554
36	0.00760	14.5	0.0198	0.140	0.287	0.0454
37	0.00680	18.1	0.0142	0.112	0.256	0.0363
38	0.00600	23.2	0.00974	0.0875	0.226	0.0283
39	0.00520	30.9	0.00634	0.0658	0.196	0.0212
40	0.00480	36.3	0.00499	0.0560	0.181	0.0181
41	0.00440	43.2	0.00384	0.0471	0.166	0.0152
42	0.00400	52.3	0.00289	0.0389	0.151	0.0126
43	0.00360	64.5	0.00210	0.0315	0.136	0.0102
44	0.00320	81.6	0.00148	0.0249	0.121	0.00804
45	0.00280	107	0.000990	0.0191	0.106	0.00616
46	0.00240	145	0.000623	0.0140	0.0905	0.00452
47	0.00200	209	0.000361	0.00973	0.0754	0.00314
48	0.00160	327	0.000185	0.00622	0.0603	0.00201

KANTHAL A, AF, AE

Ribbon inch

Resistivity Ω/sq.mil ft 657
Density, lb/cu.in 0.258

$in^2/\Omega = \frac{I^2 C_t}{p}$

I = Current
C_t = Temperature factor
p = Surface load W/in²

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

°F	68	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372
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

Width in	Thickness in	Resistance at 68°F Ω/ft	in²/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in²/ft	Cross sectional area in² x 1000
1/8	0.057	0.100	43.6	20.3	4.37	6.56
	0.051	0.112	37.7	18.2	4.22	5.87
	0.045	0.127	32.2	16.0	4.08	5.18
	0.040	0.143	27.7	14.2	3.96	4.60
	0.036	0.159	24.4	12.8	3.86	4.14
	0.032	0.178	21.1	11.4	3.77	3.68
	0.029	0.197	18.8	10.3	3.70	3.34
	0.025	0.228	15.8	8.90	3.60	2.88
	0.023	0.248	14.3	8.19	3.55	2.65
	0.020	0.286	12.2	7.12	3.48	2.30
	0.018	0.317	10.8	6.41	3.43	2.07
	0.016	0.357	9.48	5.70	3.38	1.84
	0.014	0.408	8.18	4.98	3.34	1.61
	0.013	0.439	7.54	4.63	3.31	1.50
	0.011	0.519	6.29	3.92	3.26	1.27
	0.010	0.571	5.67	3.56	3.24	1.15
	0.0089	0.642	5.01	3.17	3.21	1.02
	0.0080	0.714	4.47	2.85	3.19	0.920
	0.0071	0.804	3.94	2.53	3.17	0.817
	0.0063	0.906	3.48	2.24	3.15	0.725
3/32	0.057	0.134	27.1	15.2	3.62	4.92
	0.051	0.149	23.3	13.6	3.47	4.40
	0.045	0.169	19.7	12.0	3.33	3.88
	0.040	0.190	16.9	10.7	3.21	3.45
	0.036	0.211	14.7	9.61	3.11	3.11
	0.032	0.238	12.7	8.54	3.02	2.76
	0.029	0.263	11.2	7.74	2.95	2.50
	0.025	0.305	9.36	6.68	2.85	2.16
	0.023	0.331	8.46	6.14	2.80	1.98
	0.020	0.381	7.17	5.34	2.73	1.73
	0.018	0.423	6.34	4.81	2.68	1.55
	0.016	0.476	5.54	4.27	2.63	1.38
	0.014	0.544	4.76	3.74	2.59	1.21
	0.013	0.586	4.37	3.47	2.56	1.12
	0.011	0.692	3.63	2.94	2.51	0.949
	0.010	0.761	3.27	2.67	2.49	0.863
	0.0089	0.855	2.88	2.38	2.46	0.768
	0.0080	0.952	2.57	2.14	2.44	0.690
	0.0071	1.07	2.26	1.90	2.42	0.612
	0.0063	1.21	1.99	1.68	2.40	0.543
	0.0056	1.36	1.75	1.50	2.38	0.483
	0.0050	1.52	1.56	1.34	2.37	0.431
1/16	0.032	0.357	6.35	5.70	2.27	1.84
	0.029	0.394	5.58	5.16	2.20	1.67
	0.025	0.457	4.60	4.45	2.10	1.44
	0.023	0.497	4.13	4.09	2.05	1.32
	0.020	0.571	3.47	3.56	1.98	1.15
	0.018	0.634	3.04	3.20	1.93	1.04
	0.016	0.714	2.64	2.85	1.88	0.920
	0.014	0.816	2.25	2.49	1.84	0.805
	0.013	0.879	2.06	2.31	1.81	0.748
	0.011	1.04	1.70	1.96	1.76	0.633
	0.010	1.14	1.52	1.78	1.74	0.575
	0.0089	1.28	1.34	1.58	1.71	0.512
	0.0080	1.43	1.19	1.42	1.69	0.460
	0.0071	1.61	1.04	1.26	1.67	0.408
	0.0063	1.81	0.911	1.12	1.65	0.362
	0.0056	2.04	0.801	0.997	1.63	0.322
	0.0050	2.28	0.709	0.890	1.62	0.288
	0.0045	2.54	0.634	0.801	1.61	0.259
	0.0040	2.86	0.559	0.712	1.60	0.230

Width in	Thickness in	Resistance at 68°F Ω/ft	in²/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in²/ft	Cross sectional area in² x 1000
3/64	0.029	0.525	3.47	3.87	1.82	1.25
	0.025	0.609	2.83	3.34	1.73	1.08
	0.023	0.662	2.53	3.07	1.68	0.992
	0.020	0.761	2.11	2.67	1.61	0.863
	0.018	0.846	1.84	2.40	1.56	0.776
	0.016	0.952	1.59	2.14	1.51	0.690
	0.014	1.09	1.34	1.87	1.46	0.604
	0.013	1.17	1.23	1.74	1.44	0.561
	0.011	1.38	1.00	1.47	1.39	0.474
	0.010	1.52	0.896	1.34	1.37	0.431
	0.0089	1.71	0.782	1.19	1.34	0.384
	0.0080	1.90	0.692	1.07	1.32	0.345
	0.0071	2.14	0.604	0.948	1.30	0.306
	0.0063	2.42	0.528	0.841	1.28	0.272
	0.0056	2.72	0.463	0.748	1.26	0.242
	0.0050	3.05	0.409	0.668	1.25	0.216
	0.0045	3.38	0.364	0.601	1.23	0.194
	0.0040	3.81	0.321	0.534	1.22	0.173
	0.0035	4.35	0.278	0.467	1.21	0.151
	0.0031	4.91	0.244	0.414	1.20	0.134
1/32	0.016	1.43	0.794	1.42	1.13	0.460
	0.014	1.63	0.666	1.25	1.09	0.403
	0.013	1.76	0.604	1.16	1.06	0.374
	0.011	2.08	0.488	0.979	1.01	0.316
	0.010	2.28	0.433	0.890	0.990	0.288
	0.0089	2.57	0.375	0.792	0.964	0.256
	0.0080	2.86	0.330	0.712	0.942	0.230
	0.0071	3.22	0.286	0.632	0.920	0.204
	0.0063	3.63	0.249	0.561	0.901	0.181
	0.0056	4.08	0.217	0.498	0.884	0.161
	0.0050	4.57	0.190	0.445	0.870	0.144
	0.0045	5.08	0.169	0.401	0.858	0.129
	0.0040	5.71	0.148	0.356	0.846	0.115
	0.0035	6.53	0.128	0.312	0.834	0.101
	0.0031	7.37	0.112	0.276	0.824	0.0891
	0.0028	8.16	0.100	0.249	0.817	0.0805
	0.0025	9.14	0.0887	0.223	0.810	0.0719
	0.0022	10.4	0.0773	0.196	0.803	0.0633
1/64	0.0089	5.13	0.115	0.396	0.589	0.128
	0.0080	5.71	0.0993	0.356	0.567	0.115
	0.0071	6.43	0.0848	0.316	0.545	0.102
	0.0063	7.25	0.0726	0.280	0.526	0.0906
	0.0056	8.16	0.0624	0.249	0.509	0.0805
	0.0050	9.14	0.0542	0.223	0.495	0.0719
	0.0045	10.2	0.0476	0.200	0.483	0.0647
	0.0040	11.4	0.0412	0.178	0.471	0.0575
	0.0035	13.1	0.0352	0.156	0.459	0.0503
	0.0031	14.7	0.0305	0.138	0.449	0.0446
	0.0028	16.3	0.0271	0.125	0.442	0.0403
	0.0025	18.3	0.0238	0.111	0.435	0.0359
	0.0022	20.8	0.0206	0.0979	0.428	0.0316

ภาคผนวก ค.
คุณสมบัติของอิฐทนไฟ

Properties Type	INSULATING FIREBRICK	
	C 1	C 2
Maximum service Temperature (°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 Shushing 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 Si O2 Fe2 O3	30 65 1.8	35 61 1.6
Raw material	Fire clay	

ภาคผนวก ง.
ข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

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	SPDT type
		3A , 220V , electrical life:100,000 times or more (under rated load)				
	Voltage pulse	For SSR drive. ON : 24V , OFF : 0V , max load current : 20mA				
	mA dc	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 SV:7mm	PV:7mm SV:7mm	PV:14mm SV:10mm	PV:7mm SV:7mm	PV:14mm SV:10mm

4

- **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 SPST type	Available SPST type	Available SPST type	Available 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	4~20mA , 0~20mA , 0~1V , 0~5V , 0~10V , 1~5V , 2~10V				
Communication	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)**

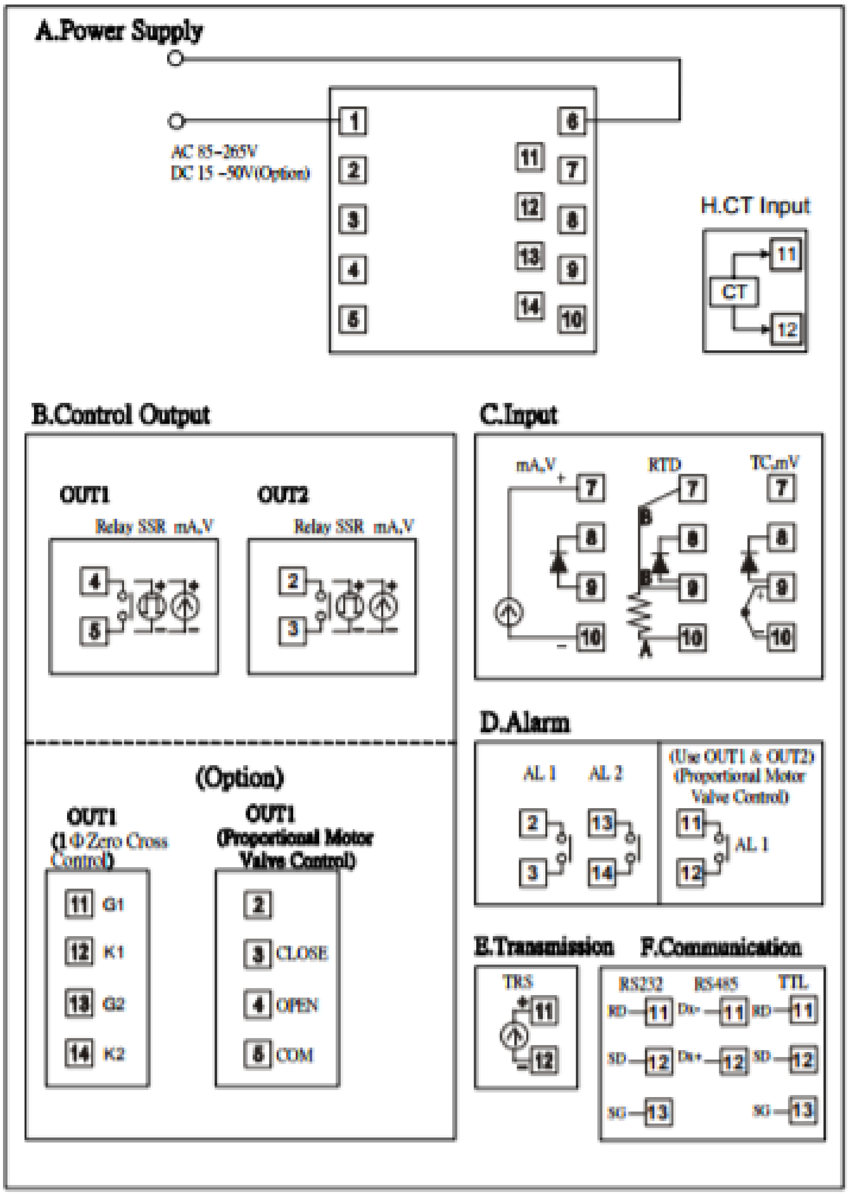
Model	FY400	FY600	FY700	FY800	FY900
1φ zero crossing control(1φSSR)	Available	Not available	Available	Not available	Available
3φ zero crossing control(3φSSR)	Not available				Available
Motor valve control	Available				
1φ phase angle control(1φSCR)	Not available	Available			
3φ phase angle control(3φSCR)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



ภาคผนวก จ.

ข้อมูลการกำหนดของหลอดทวีคูณแสง

Photosensor Modules H5773/H5783/H6779/H6780 Series

The H5773/H5783/H6779/H6780 series are photosensor modules housing a metal package PMT and high-voltage power supply circuit. The metal package PMTs have a metallic package with the same diameter as a TO-8 package used for semi-conductor photodetectors, and deliver high gain, wide dynamic range and high-speed response while maintaining small dimensions identical to those of photo-diodes. The internal high-voltage power supply circuit is also compact, making the module easy to use.

Considering the mounting methods, a cable output type and a pin output type are provided, and a total of 7 types are available according to the wavelength range to be measured. A P-type is also available with selected gain and dark count ideal for photon counting under extremely low light conditions.

Product Variations

Type No. \ Suffix	None	-01	-02	-03	-04	-06	-20	Output Type	Features
H5773	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	On-board	Low power consumption
H5783	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	Cable output	
H5773P	yes	no	no	no	no	no	no	On-board	For photon counting
H5783P	yes	no	no	no	no	no	no	Cable output	Low power consumption
H6779	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	On-board	Low ripple noise
H6780	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	Cable output	Fast settling time

Suffix	Spectral Response
None	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

The suffix -06 type (synthetic silica window) has higher sensitivity than the -03 type below 300 nm in wavelength range.

Specifications

Parameter				H5773 / H5783 / H6779 / H6780 Series					Unit
Suffix				None	-03, -06	-01, -04	-02	-20	—
Input Voltage				+11.5 to +15.5					V
Max. Input Voltage				+18					V
Max. Input Current				H5773 / H5783 Series: 9 H6779 / H6780 Series: 30					mA
Max. Output Signal Current				100					µA
Max. Control Voltage				+1.0 (Input impedance 100 kΩ)					V
Recommended Control Voltage Adjustment Range				+0.25 to +0.9					V
Effective Area				φ8					mm
Sensitivity Adjustment Range				1: 10^4					—
Peak Sensitivity Wavelength				420	420	400	500	630	nm
Cathode		Luminous Sensitivity	Min.	40	40	80	200	350	µA/lm
			Typ.	70	70	150	250	500	
		Blue Sensitivity Index (CS 5-58)		8	8	—	—	—	—
		Red/White Ratio		—	—	0.2	0.25	0.45	—
		Radiant Sensitivity *1		62	62	60	58	78	mA/W
Anode	Standard Type	Luminous Sensitivity	Min.	10	10	15	25	35	A/lm
			Typ.	50	50	75	125	250	
		Radiant Sensitivity *1 *2		4.3×10^4	4.3×10^4	3.0×10^4	2.9×10^4	3.9×10^4	A/W
		Dark Current *2 *3	Typ.	0.2	0.2	0.4	2	2	nA
			Max.	2	2	4	20	20	
	P Type	Gain *2	Min.	7.5×10^5	—				—
			Typ.	1×10^6	—				
		Radiant Sensitivity *1 *2		6.2×10^4	—				A/W
		Dark Count *2 *3	Typ.	80	—				s^{-1}
			Max.	400	—				
Rise Time *2				0.78					ns

Parameter		H5773 Series	H5783 Series	H6779 Series	H6780 Series	Unit
Ripple Noise *2 *4 (peak to peak)	Max.	1.2		0.6		mV
Settling Time *5		2		0.2		s
Operating Ambient Temperature		+5 to +50		+5 to +45		°C
Storage Temperature		-20 to +50				°C
Weight		60	80	60	80	g

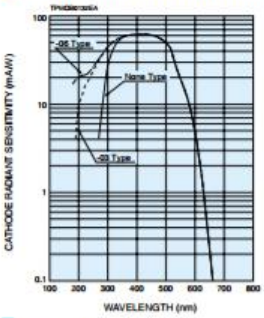
*1: Measured at the peak sensitivity wavelength *2: Control voltage = +0.8 V *3: After 30 minute storage in darkness

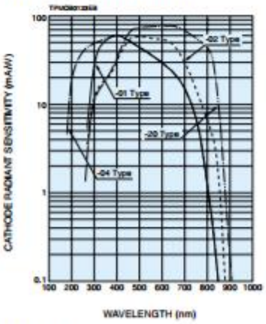
*4: Cable RG-174/U, Cable length 450 mm, Load resistance = 1 MΩ, Load capacitance = 22 pF

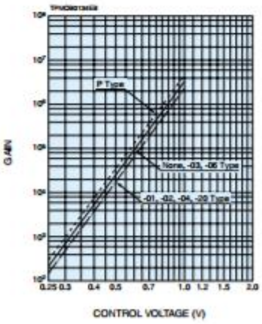
*5: The time required for the output to reach a stable level following a change in the control voltage from +1.0 V to +0.5 V.

16

Characteristics (Cathode radiant sensitivity, Gain)

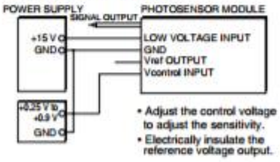






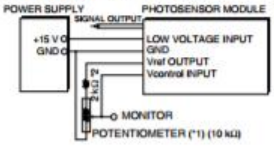
Sensitivity Adjustment Method

Voltage Programming



- Adjust the control voltage to adjust the sensitivity.
- Electrically insulate the reference voltage output.

Resistance Programming

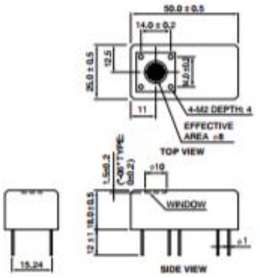


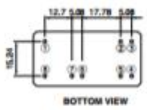
*1: When using a potentiometer to adjust sensitivity, monitor the control voltage so it does not exceed +1.0 V.

*2: H6779/H6780 series has this 2 kΩ resistor. No external resistor is needed.

Dimensional Outlines (Unit: mm)

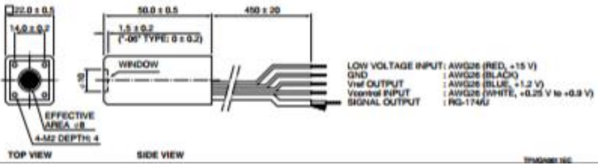
H5773/H6779 Series





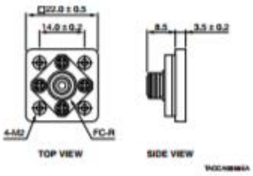
① NO CONNECTION
② Vref OUTPUT (+1.2 V)
③ Vcontrol INPUT (+0.25 V to +0.9 V)
④ LOW VOLTAGE INPUT (+15 V)
⑤ GND
⑥ SIGNAL GND
⑦ SIGNAL OUTPUT
⑧ NO CONNECTION

H5783/H6780 Series

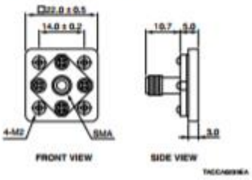


Option (Optical Fiber Adapter) (Unit: mm)

E5776 (FC Type)



E5776-51 (SMA Type)



ภาคผนวก ฉ.

ฐานข้อมูล XRD ของ CsI

00-006-0311 Jul 6, 2021 5:37 PM (User)

Status Primary **QM:** Star **Pressure/Temperature:** Ambient **Chemical Formula:** Cs I
Empirical Formula: Cs I **Weight %:** Cs51.16 I48.84 **Atomic %:** Cs50.00 I50.00
Compound Name: Cesium Iodide

Radiation: CuKá : 1.5405Å **Filter:** Ni Beta **Intensity:** Diffractometer

SYS: Cubic **SPGR:** Pm-3m (221)
Author's Cell [AuthCell a: 4.5679Å **AuthCell Vol:** 95.31Å³ **AuthCell Z:** 1.00 **AuthCell MolVol:** 95.31 **]**
Density [Dcalc: 4.526g/cm³ **] SS/FOM:** F(15) = 49.0(0.0113, 27)
Temp: 299.000K (Author provided temperature)

Space Group: Pm-3m (221) **Molecular Weight:** 259.81
Crystal Data [XtlCell a: 4.568Å **XtlCell b:** 4.568Å **XtlCell c:** 4.568Å **XtlCell :** 90.00° **XtlCell :** 90.00°
XtlCell : 90.00° **XtlCell Vol:** 95.31Å³ **XtlCell Z:** 1.00 **]**
Crystal Data Axial Ratio [a/b: 1.000 **c/b:** 1.000 **]**
Reduced Cell [RedCell a: 4.568Å **RedCell b:** 4.568Å **RedCell c:** 4.568Å **RedCell :** 90.00°
RedCell : 90.00° **RedCell :** 90.00° **RedCell Vol:** 95.31Å³ **]**

Crystal (Symmetry Allowed): Centrosymmetric

CAS: 7789-17-5 **Pearson:** cP2.00 **Prototype Structure:** Cs Cl **Prototype Structure (Alpha Order):** Cl Cs
Subfile(s): Educational Pattern, Common Phase, NBS Pattern, Inorganic, Primary Pattern
Last Modification Date: 01/11/2013
Cross-Ref PDF #'s: 04-002-7015, 04-005-4225, 04-006-2282, 04-006-2818, 04-006-9243, 04-007-3148

References:

Type	DOI	Reference
Primary Reference		Swanson et al. Natl. Bur. Stand. (U. S.), Circ. 539 IV, 47 (1955).

Database Comments: Analysis: Spectroscopic analysis: 0.0025% K; 0.001% Na, Br, Cl; <0.001% Ca, Mg. Color: Colorless. Sample Source or Locality: Sample from the Harshaw Chemical Company. Temperature of Data Collection: Pattern taken at 299 K. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

d-Spacings (15) - 00-006-0311 (Fixed Slit Intensity) - Cu K1 1.54056Å

2	d(Å)	I	h	k	l	*	2	d(Å)	I	h	k	l	*	2	d(Å)	I	h	k	l	*
27.5933	3.230000	100	1	1	0		71.4630	1.319000	4	2	2	2		104.5285	0.974000	20	3	3	2	
39.4189	2.284000	20	2	0	0		78.2272	1.221000	10	3	2	1		111.4237	0.932300	2	4	2	2	
48.7892	1.865000	35	2	1	1		84.8216	1.142100	2	4	0	0		118.6277	0.895700	4	5	1	0	
56.9732	1.615000	18	2	2	0		91.3642	1.076600	6	4	1	1		134.9155	0.834000	2	5	2	1	
64.4257	1.445000	8	3	1	0		97.8879	1.021500	4	4	2	0		145.0725	0.807500	2	4	4	0	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

Iida, T., Kamada, K., Yoshino, M., Kim, K. J., Ichimura, K., & Yoshikawa, A. (2020). High-light-yield calcium iodide (CaI_2) scintillator for astroparticle physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 958*, 162629. doi:https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162629

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. doi:10.1080/18811248.2011.9711813

Stand, L., Zhuravleva, M., Chakoumakos, B., Wei, H., Johnson, J., Martin, V., . . . Melcher, C. L. (2019). Characterization of mixed halide scintillators: CsSrBrI2:Eu, CsCaBrI2:Eu and CsSrClBr2:Eu. *Journal of Luminescence, 207*, 70-77. doi:https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.10.108

Yanagida, T. (2018). Inorganic scintillating materials and scintillation detectors. *Proceedings of the Japan Academy, Series B, 94*(2), 75-97. doi:10.2183/pjab.94.007

Zhang, Z., Zhao, Q., Li, Y., & Ouyang, X.-P. (2016). Electronic structure and optical properties of CsI, CsI(Ag), and CsI(Tl). *Journal of the Korean Physical Society, 68*, 1069-1074. doi:10.3938/jkps.68.1069

Zhao, Q., Zhang, Z., & Ouyang, X. (2017). Electronic structure and optical properties of CsI under high pressure: a first-principles study. *RSC Advances, 7*(83), 52449-52455. doi:10.1039/C7RA08777B

Sintham. P. (2017). Effects of Gamma ray Irradiation on Structural and Optical properties of CsI: Tl Crystals. Thesis. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Klimonsky S, K. F. Sheberstov, A. E. Gold'dt, A. S. Sinitskii, V. Yu. Yokovlev and L. N. Trefilova. (2011). Synthessis and Properties of Nanocrystalline CsI. Inorganic Materials, Vol. 47, No. 9, pp. 1033-1038

Persson and Kristin. (2014). Materials data on CaI_2 (SG: 164) by materials project.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Accessed 14 Aug. 2021. https://materialsproject.org/materials/mp-30031/

Wadeng I. (2017). Development of CsI crystal by multi-doping technique. Thesis. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Liaw. Pho Yee, N. K. Farhana, Fatin Saiha Omar, V.Sundarajan, Shahid Bashir, Norshahirah M. and saidi, S. Ramesh. (2019). Enhancing efficiency of dye sentivity solar cells based on poly (propylene) carbonate polymer gel electrolytes incorporating double salts. Springer nature. 26:493-502

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายประวิทย์ บัวบาน
วัน เดือน ปี เกิด	19 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	12/11 หมู่ 7 ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี 71180

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University