

การพัฒนาผลึกซีเอ็มไอโอไดต์โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด



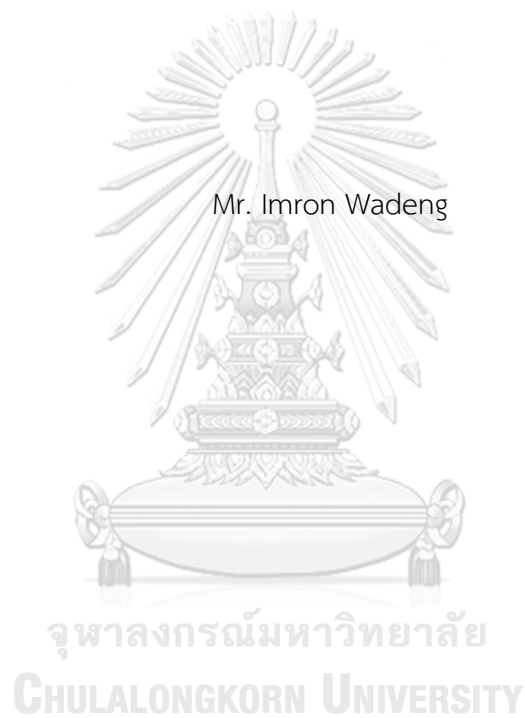
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF CsI CRYSTALS BY MULTI-DOPING TECHNIQUE

Mr. Imron Wadeng



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5770369121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: GAMMA SPECTROMOTRY / BRIDGMAN-STOCKBARGER TECHNIQUE / CRYSTAL GROWTH / CESIUM IODIDE SCINTILLATOR

IMRON WADENG: DEVELOPMENT OF CsI CRYSTALS BY MULTI-DOPING TECHNIQUE. ADVISOR: PHANNEE SAENKAEW, Ph.D., 81 pp.

Cesium Iodide (CsI) crystals have been grown to develop the radiation detectors by modified homemade Bridgman-Stockbarger technique. In this research, CsI crystals have been investigated by variation of dopants as Ca, Tl and both of Ca and Tl. CsI(Tl) crystal was grown at the growth rate of 0.65 mm/hr and 0.57 mm/hr for CsI(Ca) and CsI(Tl,Ca) crystals. The composition of dopant was constant of 0.35%wt. All CsI crystals were characterized for the crystal structure and its quality by x-ray diffraction. The CsI(Tl) and CsI(Tl,Ca) crystals have a quite similar structure of cubic with a dominant (110) plane. But CsI(Ca) crystal has two dominant planes of (110) and (211). By PL measurements to investigate the optical properties, CsI(Ca) and CsI(Tl,Ca) crystals emitted the blue light with a wavelength of 420-450 nm after excitation and the orange light emission of 590-nm wavelength from CsI(Tl) crystal. The results showed that the CsI(Tl) crystal has the highest relative efficiency of light emission and then CsI(Tl,Ca) and the last one of CsI(Ca). The results are in a good agreement with the finding from UV-VIS spectrophotometry: the lowest E_g of CsI(Tl) crystal of 2.21 eV and 2.48 eV of CsI(Ca) and the highest of 2.88 eV of CsI(Ca) crystal. The light transmittance of all crystals was analyzed: the highest one of CsI(Tl) and then CsI(Ca) and the last of CsI(Tl,Ca) crystal. Eventually the efficiency of radiation detection were performed by coupling with a photomultiplier tube (PMT), the CsI(Tl) and CsI(Tl,Ca) crystals have the best detection efficiency of 81% and 89% at 122 keV but only 60% in case of CsI(Ca) crystal. This is due to their different optical properties about the light emission efficiency. Furthermore, the radiation spectrum measured by CsI(Tl) crystal has the best energy resolution of 27.87% and 40.98% of CsI(Tl,Ca) but the highest one of 60.38%.

Department: Nuclear Engineering Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. พรรณี แสงแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและ
แนะนำแนวทางการทำงานวิจัย สนับสนุน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. นพดล นันทวงศ์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์
แห่งชาติ (NECTEC) และดร. ชัญชนา ธนชยานนท์, ศิษฏพงษ์ ยอดศรี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ
วัสดุแห่งชาติศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิค รวมถึงให้
ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุ

ขอขอบคุณ กุศลวิช ชีวะเจริญ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมสำหรับการทำงาน

สุดท้ายขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างสูง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

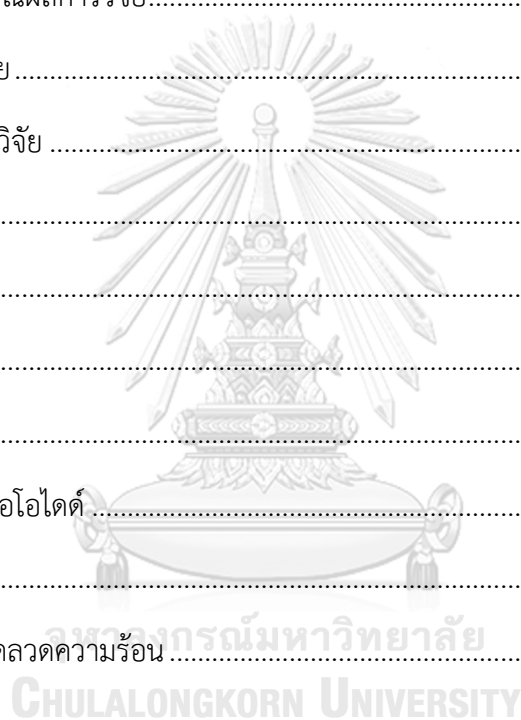
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 หัววัดรังสี.....	6
2.1.1 เครื่องตรวจวัดรังสีแกมมา (Gamma detectors) ชนิดหัววัดรังสีซินทิลเลชัน.....	6
2.1.2 หัววัดสารเรืองแสงชนิดสารอินทรีย์.....	9
2.1.3 คุณสมบัติของผลึกหัววัดรังสีที่ดี.....	12
2.2 การตรวจสอบคุณภาพของผลึก.....	14
2.2.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction).....	14
2.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ของวัสดุ.....	15
2.2.3 การส่องผ่านแสงด้วยเทคนิคแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นได้ (Ultraviolet and Visible).....	16

2.3	วิธีการตรวจสอบความสามารถการตรวจวัดรังสีของผลึก	19
2.3.1	ประสิทธิภาพของการวัดรังสี	19
2.3.2	การแจกแจงพลังงาน (Energy resolution)	21
2.4	การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์	22
บทที่ 3	การปลูกผลึกซีเอ็มไอโอไดต์โดยเทคนิคบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์	25
3.1	ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการปลูกผลึก	25
3.2	ออกแบบเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์	27
3.2.1	ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน	27
3.2.2	ระบบควบคุมอุณหภูมิ	29
3.2.3	ระบบบันทึกข้อมูลหาเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)	31
3.2.4	ระบบสุบสูญญากาศและควบคุมความดันก๊าซ	32
3.2.5	ภาชนะปลูกผลึก	33
3.3	ออกแบบอุปกรณ์	35
3.3.1	การประกอบอุปกรณ์ผลึกวัดรังสี	35
3.3.2	ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา	35
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	37
4.1	การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก	37
4.1.1	การทดสอบผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิ	38
4.1.2	การหาเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)	40
4.2	การทดลองปลูกผลึก	43
4.2.1	วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	43
4.2.2	การเตรียมสารปลูกผลึก	43
4.2.3	การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง	44

4.2.4 ผลการปลูกผลึก.....	45
4.3 ทดสอบความเป็นผลึก.....	46
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก.....	47
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเรียงแสงของผลึก.....	49
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ส่องผ่านแสงภายในผลึก.....	53
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
คุณสมบัติของซีเซียมไอโอดด์.....	67
ภาคผนวก ข.....	70
แสดงคุณสมบัติของขดลวดความร้อน.....	70
ภาคผนวก ค.....	73
แสดงคุณสมบัติของอิฐทนไฟ.....	73
ภาคผนวก ง.....	74
แสดงข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี.....	74
ภาคผนวก จ.....	77
ข้อมูลการกำหนดเฉพาะของ PMT.....	77
ภาคผนวก ฉ.....	79
ฐานข้อมูลของ XRD ของ Cal.....	79



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 81



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของผลึกรังสีชนิดสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ.....	9
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของผลึกซีซีเอ็มไอโอไดต์ (Csi) ชนิดต่างๆ	13
ตารางที่ 4.1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เมื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรของผลึก	38
ตารางที่ 4.2 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิของผลึก.....	40
ตารางที่ 4.3 อัตราการตกผลึก.....	41
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของส่วนผสมของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก (มานิตย์ จิตรภักดี, 2009).....	44
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขข้อกำหนดการปลูกผลึก.....	45
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD	47
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์	50
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านแสงภายในผลึก	53
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก.....	58

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนปล่อยพลังงานออกมา(Glenn F. Knoll, 3 rd Edition)	7
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบการเรืองแสงของผลึก(สำหรับรังสีแกมมา) และหลอดทวิคูณแสง (H. A. Enge, 1966).....	8
รูปที่ 2.3 ธาตุพื้นฐานของหลอด PM (Glenn F. Knoll, 3 rd Edition).....	8
รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์พลังงานของรังสี (K.S. Krane, 1988).....	9
รูปที่ 2.5 พลังงานที่ถูกปล่อยเมื่อเจือสารเข้าไป (Kenneth S.Krane, 1988).....	11
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาที่มีพลังงานลดลง หรือความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อเจือสารเข้าไป (Glenn F. Knoll, 3 rd Edition).....	11
รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาจากสารเรืองแสงชนิดต่างๆ เช่น BGO, Na(Tl), CsI(Na) และCsI(Tl) รวมทั้ง light response ของ photocathode (Glenn F. Knoll, 3 rd Edition).....	12
รูปที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของรังเอกซ์บนระนาบของอะตอม (Touloukian, Y.S., 1977).....	14
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการปล่อยแสงโฟตอนเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงาน (D. Heiman, 2004).....	15
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม CsI ในช่วงความยาวคลื่น 190 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร โดยในส่วนของรูปขยายเป็นช่วงการดูดกลืนของรังสียูวี (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015).....	17
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการร้อยละของการส่องผ่านแสงและค่าความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม CsI ในช่วงความยาวคลื่น 190 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015).....	18
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ ความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม CsI (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015).....	19
รูปที่ 2.13 มุมต้นสำหรับการหาประสิทธิภาพการวัดรังสีในกรณีแหล่งกำเนิดรังสีเป็นจุดหรือระยะ $d \gg a$ (Glenn F. Knoll, 3 rd edition).....	20
รูปที่ 2.14 การหาค่าประสิทธิภาพของการวัดรังสีจากโฟโตพีคของสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา (Glenn F. Knoll, 3 rd edition)	20

รูปที่ 2.15 การหาค่าการแจกแจงพลังงานรังสีของหัววัดรังสีจากโฟโตพีคของสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา(Glenn F. Knoll, 3 rd edition).....	21
รูปที่ 2.16 ระบบการปลูกผลึกแบบ Verneuil (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552).....	22
รูปที่ 2.17 ระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552).....	23
รูปที่ 2.18 รูปทรงของภาชนะปลูกผลึกในรูปแบบต่างๆ (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552).....	24
รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของสาร CsI, Tl และ CaI_2	25
รูปที่ 3.2 แผนผังส่วนประกอบของเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ	26
รูปที่ 3.3 ลักษณะของขดลวดความร้อนที่บรรจุลงในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอก	28
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของชุดเตาหลอม.....	29
รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม.....	30
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งโครงสร้างของเตาปลูกผลึก	31
รูปที่ 3.7 ระบบสูญญากาศและควบคุมความดันก๊าซ	32
รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของวัสดุที่จะใช้เป็นภาชนะสำหรับปลูกผลึก	34
รูปที่ 3.9 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น.....	34
รูปที่ 3.10 การประกอบผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์.....	35
รูปที่ 3.11 ระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสีโดยใช้ผลึก CsI(Tl) เป็นหัววัดรังสี	36
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของการอ่านค่าของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก	37
รูปที่ 4.2 กราฟผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Tl).....	38
รูปที่ 4.3 กราฟผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Ca).....	39
รูปที่ 4.4 กราฟผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Tl,Ca).....	39
รูปที่ 4.5 กราฟการเคลื่อนของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิในโซนปลูกผลึกของผลึก CsI(Tl).....	40
รูปที่ 4.6 กราฟการเคลื่อนของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิในโซนปลูกผลึกของผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca).....	41
รูปที่ 4.7 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่จะใช้ปลูกผลึกCsI(Tl).....	42

รูปที่ 4.8 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่จะใช้ปลูกผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca).....	42
รูปที่ 4.9 รูปร่างผลึกและลักษณะของสารในภาชนะบรรจุสาร.....	43
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างผลึกวัดรังสีที่ปลูกขึ้น.....	46
รูปที่ 4.11 การตัดผลึกเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์.....	46
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Tl) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุ สัณฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของ ระนาบ (110).....	47
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Ca) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุ สัณฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของระนาบ (110) และระนาบ (211).....	48
รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Tl,Ca) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุ สัณฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของ ระนาบ (110).....	48
รูปที่ 4.15 การเทียบผลวิเคราะห์จากXRD ของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และCsI(Tl,Ca) ที่แสดงถึง โครงสร้างผลึกแบบเด่นชัดของ ระนาบ พหุสัณฐาน โดยมีโครงสร้าง (110).....	49
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Tl).....	50
รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Ca).....	51
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Tl,Ca).....	51
รูปที่ 4.19 การเทียบผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของ ผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)	52
รูปที่ 4.20 ภาพการส่องด้วยแสงด้วยหลอด UV เบื้องต้นของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca).....	52
รูปที่ 4.21 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 320 นา โนเมตร.....	54
รูปที่ 4.22 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl).....	54

รูปที่ 4.23 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร.....	55
รูปที่ 4.24 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Ca).....	55
รูปที่ 4.25 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl,Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 310 นาโนเมตร.....	56
รูปที่ 4.26 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl,Ca).....	56
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบการส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร, 240 นาโนเมตร และ 310 นาโนเมตรตามลำดับ.....	57
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca).....	57
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl).....	59
รูปที่ 4.30 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน.....	59
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Ca).....	60
รูปที่ 4.32 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Ca) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน.....	60
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl,Ca).....	61
รูปที่ 4.34 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl,Ca) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน.....	61
รูปที่ 4.35 การเทียบสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca).....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โดยปกติแล้วรังสีที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์ในหลายๆด้าน เช่น ทางการแพทย์ ทาง การเกษตร ทางอุตสาหกรรม ทางการสืบสวนสอบสวน ทางธรณีวิทยาและทางการทหาร ซึ่งการนำ รังสีมาใช้ประโยชน์นั้นส่วนสำคัญมากที่สุดคือการตรวจวัดรังสี รวมไปถึงการตรวจวัดรังสีเพื่อควบคุม ถึงการใช้งานอย่างเหมาะสมและปลอดภัย ซึ่งในกระบวนการวัดรังสีจะใช้หัววัดรังสีในการตรวจวัด โดยหัววัดรังสีถูกแบ่งประเภทตามความสอดคล้องของอันตรกิริยากับสสาร ดังนี้ หัววัดรังสีอนุภาคที่มี ประจุ (Charged particles detectors), หัววัดรังสีแกมมา (Gamma detectors) และหัววัดรังสี อนุภาคนิวตรอน (Neutron detectors) สำหรับหัววัดรังสีแกมมาในปัจจุบันนิยมใช้มีชนิดของ เครื่องวัดรังสีซินทิลเลชัน (Scintillation detector) และเครื่องวัดรังสีเจอร์แมนเนียม (Germanium detectors)

เครื่องวัดรังสีซินทิลเลชันเป็นเครื่องวัดชนิดหนึ่งที่มีความไวสูงมาก ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วน สำคัญ 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ไวแสง และหัววัดรังสี โดยเครื่องมือชนิดนี้มีหัววัดอยู่ 2 ประเภท คือ ผลึก วัดรังสีประเภทสารอินทรีย์ (Organic scintillator) และผลึกวัดรังสีประเภทสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic scintillator) ซึ่งสองหัววัดนี้มีความแตกต่างทั้งรูปร่าง และลักษณะการเรืองแสง ในส่วน ของผลึกวัดรังสีประเภทสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นผลึกเดี่ยวของสารกลุ่ม อัลคาล์ไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) เช่น ซีเซียมไอโอไดด์ (CsI), โซเดียมไอโอไดด์ (NaI), แบเรียมฟลูออไรด์ (BaF₂), แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂), ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และ ซีเซียมฟลูออไรด์ (CsF) เป็นต้น ลักษณะการ เรืองแสงของสารกลุ่มนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากรังสีที่มากกระทบ ทำให้ อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นข้ามช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) แล้วตกกลับลงมาโดยการปล่อย แสง เพื่อลดการถูกดูดกลืนของแสง และเพิ่มโอกาสการปล่อยแสงมากขึ้น ทำให้มีการเจือสาร แปรกปลอม (Impurities) เข้าไปจำนวนเล็กน้อย เช่น แทลเลียม (Tl), ยูโรเพียม (Eu) เป็นต้น

ในปัจจุบันหลายงานวิจัยได้มีการปลูกผลึกจากสารที่หลากหลาย และมีการเจือสารต่างๆ ลง ไปเพื่อทำให้ผลึกที่ปลูกขึ้นมา มีคุณสมบัติใช้เป็นหัววัดรังสีได้ เช่น ซีเซียมแคลเซียมไอโอไดด์เจือ ยูโรเพียม (CsCaI₃:Eu), ซีเซียมแคลเซียมคลอไรด์เจือยูโรเพียมCsCaCl₃:Eu และซีเซียมไอโอไดด์เจือ แทลเลียม(CsI:Tl) เป็นต้น เพื่อให้ได้งานวิจัยการปลูกผลึกที่มีคุณสมบัติใหม่ เหมาะสมในการ ประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น จึงมีความสนใจที่จะปลูกผลึกขึ้นมาใหม่จากกระบวนการ

ปลูกผลึกอย่างง่ายในห้องปฏิบัติการ โดยจะเป็นผลึก CsI ที่เจือสารอื่นร่วม กล่าวคือ CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึกซีเซียมไอโอไดต์โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกผลึก CsI โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด
2. ปลูกผลึกโดยวิธีการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบวิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
3. ทดสอบคุณภาพผลึกที่ปลูกได้ ได้แก่ ความเป็นผลึก คุณสมบัติการเปล่งแสง
4. หาประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึกที่ปลูกได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาคุณสมบัติของสารและขั้นตอนการเตรียมสาร
3. ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ด้วยวิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
4. ศึกษาคุณภาพของโครงผลึก
5. ปลูกผลึก และวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) และวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence, PL)
6. ทดสอบและเปรียบเทียบผลตอบสนองการวัดรังสีกับหัววัดรังสีพร้อมหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีและกำลังแยกพลังงานของการวัด
7. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดต์ที่มีประสิทธิภาพการวัดรังสีเพิ่มขึ้นโดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิด โดยวิธีการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี พ.ศ. 2538 วิญญู สกกุลจรรยาพร ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปลูกผลึก CsI(Na) ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman–Stockbarger) โดยการเจือสารโซเดียมไอโอไดด์ด้วยความเข้มข้น 0.2% - 0.3% โดยน้ำหนัก ลงในผงซีเซียมไอโอไดด์โดยมีความบริสุทธิ์อย่างละ 99.5% บรรจุภายในภาชนะสำหรับปลูกผลึกซึ่งทำด้วยควอทซ์ขนาดรัศมีภายใน 5 มม. แขนงอยู่ในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% ที่เป็นระบบปิด พบว่าผลึก CsI(Na) ไม่ไวต่อความชื้นมาก ชัดผิวเรียบได้ง่าย และมีความใส เมื่อตัดผลึกให้หนาประมาณ 2-3 มม. นำมาประกอบกับฟิโนโฟโตไดโอด พบว่า ประสิทธิภาพการวัดรังสีต่ำมากเนื่องจากความยาวคลื่นของการเปล่งแสงไม่เหมาะสมกับความไวแสงของฟิโนโฟโตไดโอด แต่เมื่อประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) แล้วนำไปวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ของ Am-241 พลังงาน 60 keV พบว่ามีกำลังแยกพลังงานอยู่ที่ 59.6 keV ซึ่งอยู่ในช่วง 26% - 28%

2. ปี พ.ศ. 2546 มานิตย์ จิตรภักดี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทดลองปลูกผลึก CsI(Tl) ด้วยวิธีปลูกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยการเจือสารทลเลียมไอโอไดด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ลงในผงซีเซียมไอโอไดด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% บรรจุภายในภาชนะสำหรับปลูกผลึกซึ่งทำด้วยควอทซ์ขนาดรัศมีภายใน 5 มม. แขนงอยู่ในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้ความดัน 2 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% ซึ่งเป็นระบบปิด ในการปลูกผลึกมีการปรับเงื่อนไขของอุณหภูมิ อัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก และสัดส่วนสารให้ความเหมาะสม ณ บริเวณโซนปลูกผลึก พบว่าสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกโดยให้มีสารเจือทลเลียมที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0256 - 0.0806 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งผลึกที่ปลูกได้แล้วตัดให้มีขนาดความหนา 8 มม. เมื่อนำไปประกอบกับฟิโนโฟโตไดโอดมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 662 keV ซึ่งอยู่ในช่วง 15.48% นอกจากนี้ได้นำผลึกหนา 8 มม. และ 4 มม. นำไปประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) แล้วทำการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา พบว่ากำลังแยกพลังงาน 34.18% ที่พลังงาน 59.6 keV และ 13.67% ที่พลังงาน 662 keV ตามลำดับ

3. ปี พ.ศ. 2550 มานิตย์ จิตรภักดี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนาผลึกวัดรังสีชนิดสารอินทรีย์ที่มีสมรรถนะสูงเพื่อ

ใช้วีเคราะห์พลังงานรังสีแกมมา โดยทำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งได้ออกแบบเตาปลูกผลึกแบบสองโซน โดยควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ประยุกต์กับระบบปลูกผลึกบริดจ์แมน ทำให้ไม่ต้องใช้ระบบกลไกสำหรับการขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก จึงทำให้ลดการสั่นสะเทือนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ทำให้ผลึกที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น ส่วนที่สองได้พัฒนาอุปกรณ์และการเตรียมสารสำหรับปลูกผลึก จากนั้นทำการปลูกผลึก CsI:Tl, LaCl₃:Ce และ Ba₂CsI₅:Tl พบว่ามีความคลาดเคลื่อนของเกรเดียนท์อุณหภูมิน้อยกว่า 2% และสามารถปลูกผลึก CsI:Tl ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing 22 \times 22$ มม. ได้ง่าย จากสารตั้งต้นที่ความบริสุทธิ์ต่ำ 99.9% เมื่อใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ 25.5°C/cm อัตราการตกผลึก 1 mm/hr และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ 2.5°C/hr พบว่า สเปกตรัมพลังงาน 662 keV ของ Cs-137 มีกำลังแยกพลังงานอยู่ที่ 7.53% ประสิทธิภาพฟิคพลังงาน 10.35% ที่มีอัตราฟิคต่อคอมป์ตัน (P/C) เท่ากับ 4.58:1 ส่วนผลึก LaCl₃:Ce และ Ba₂CsI₅:Tl ที่ปลูกได้พบว่าผลึกก่อตัวไม่สมบูรณ์มีความขุ่นและแตกออกเป็นชิ้นเล็ก เนื่องจากมีปัญหาการไวต่อออกซิเจน และความชื้นของสารในระหว่างการเตรียมสารเริ่มต้น

4. ปี ค.ศ. 2012 Mariya Zhuravleva, Bonnie Blalock, Kan Yang, Merry Koschan, Charles L. Melcher ได้ทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีปลูกผลึกแบบบริดจ์แมนโดยการเจือสารใหม่ คือ Eu²⁺ เพื่อให้ได้ผลึก CsCaI₃:Eu และ CsCaCl₃:Eu ที่มีความหนา 12 มม. แล้วทำการศึกษาคูณสมบัติของผลึกโดยเทียบกับผลึกอ้างอิง คือ NaI:Tl พบว่า การเรืองแสงด้วยรังสี (Radioluminescence max) ของ CsCaI₃:Eu และ CsCaCl₃:Eu คือ 460 nm และ 450 nm ตามลำดับ พลังงานแสงที่ออกมา (Light output) ของ CsCaI₃:Eu และ CsCaCl₃:Eu คือ 18,000 ph/MeV และ 38,500 ph/MeV ตามลำดับ, และกำลังแยกพลังงานที่ 662 keV ของ CsCaI₃:Eu และ CsCaCl₃:Eu คือ 8.9% และ 8% ตามลำดับซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติของผลึกที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ NaI:Tl

5. ปี ค.ศ. 2015 A. Lindsey, W. McAlexander, L. Stand, Y. Wu, M. Zhuravleva, C.L. Melcher ได้ศึกษาและพัฒนาผลึก CsCaI₃:Eu ที่ปลูกด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15, 22 และ 35 มม. เพื่อใช้ในการประกอบเป็นหัววัดรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ พบว่ามีคุณภาพที่ดีเหมาะกับการเป็นหัววัดรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ กำลังแยกพลังงานที่ 662 keV ของผลึกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15, 22 และ 35 มม. มีค่า 4.5%, 11% และ 13% ตามลำดับ และพลังงานแสงที่ออกมาจากผลึกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15, 22 และ 35 มม. มีค่า 24,000 ph/MeV, ไม่ปรากฏ และ 22,000 ph/MeV โดยที่เวลาการเรืองแสงเพิ่มขึ้นตามขนาดของปริมาตรผลึก

6. ปี พ.ศ. 2559 พรรณี แสงแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศึกษาและพัฒนาผลึก CsI(Tl) สองก้อนที่ได้จากการปลูกด้วยวิธีปลูกแบบ

บริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยการเจือสารสารทลเลียมไอโอไดต์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ลงในผงซีเซียมไอโอไดต์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ซึ่งผลึกนี้มีความแตกต่างกัน คือ ก้อนแรกมีลักษณะใส ไม่มีสี และก้อนที่สองมีลักษณะใส มีสีส้ม โดยเมื่อนำผลึกไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า โครงสร้างการจัดเรียงอะตอมของผลึกทั้งสองที่เด่นชัด คือ โครงสร้างผลึกระนาบ (110) โดยผลึก CsI(TL) ที่ก้อนที่ 1 มีค่าคงที่แลตทิซ 0.4574 nm และขนาดของจุลผลึก 43.539 nm สำหรับผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 2 พบว่ามีการปนเปื้อนของสารแคลไซต์(Calcite) CaCO_3 อยู่ ซึ่งมีค่าคงที่แลตทิซ 0.4560 nm และขนาดของจุลผลึก 43.089 nm จากนั้นนำผลึกทั้งสองไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence : PL) พบว่าผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 1 เปล่งแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 nm และสำหรับกรณีผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 2 เปล่งแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 600 nm ต่อได้นำผลึกไปส่องดูพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด SEM (scanning electron microscope) พบว่า ผลึกทั้งสองมีผิวหน้าที่เรียบ และเมื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 1 มีความต้านทาน $230 \pm 16 \text{ M}\Omega$ และความต้านทาน $714 \pm 136 \text{ M}\Omega$ สำหรับผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 2 ต่อมานำผลึกไปวิเคราะห์โครงสร้างการจัดเรียงภายในผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด TEM (Transmission Electron Microscope) พบว่า ผลึกทั้งสองจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยก้อนที่ 1 มีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบสูง และเมื่อนำมาทดสอบการตรวจวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 keV ของ Co-57 พบว่า ผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีประสิทธิภาพการวัดรังสี 78.4% และ 75.9 % ตามลำดับ โดยผลึก CsI(TL) ก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 มีกำลังแยกพลังงาน 23.3% และ 34.6 % ตามลำดับ

บทที่ 2

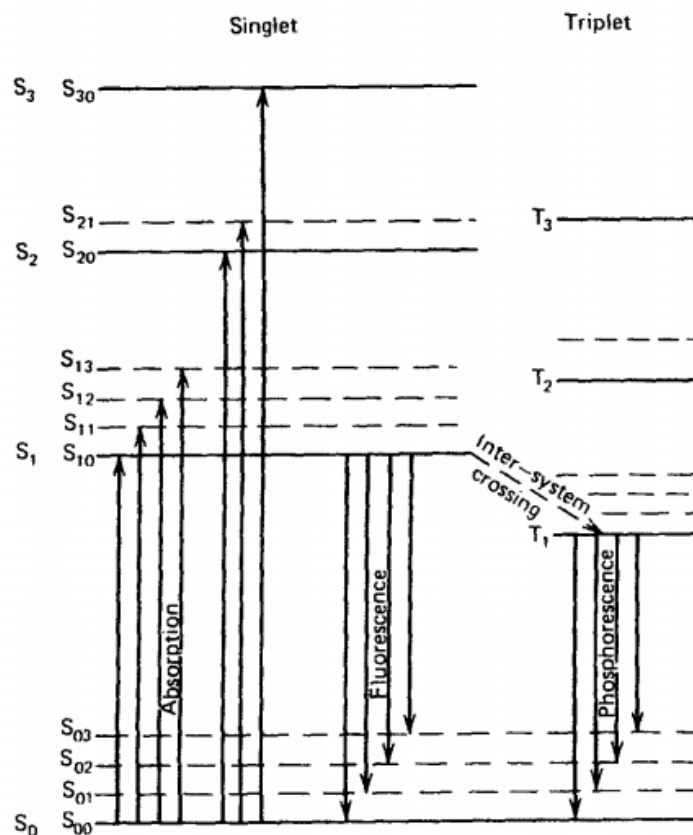
ทฤษฎี

2.1 หัววัดรังสี

เครื่องมือตรวจวัดรังสีถูกแบ่งออกตามอันตรกิริยาของรังสีกับสสาร จึงแบ่งเครื่องมือตรวจวัดรังสีออกเป็น ดังนี้ เครื่องตรวจวัดอนุภาคที่มีประจุ (Charged particles detectors), เครื่องตรวจวัดรังสีแกมมา (Gamma detectors) และเครื่องตรวจวัดอนุภาคนิวตรอน (Neutron detectors)

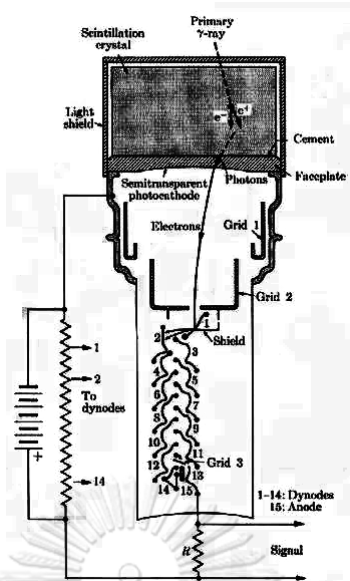
2.1.1 เครื่องตรวจวัดรังสีแกมมา (Gamma detectors) ชนิดหัววัดรังสีซินทิลเลชัน

เครื่องมือวัดรังสีชนิดหัววัดซินทิลเลชันเป็นเครื่องมือวัดรังสีชนิดหนึ่งที่มีความไวสูงมาก โดยการทำงานเบื้องต้นของเครื่องมือนี้อาศัยหลักการเดิมในสมัยที่นักวิทยาศาสตร์ค้นพบกัมมันตภาพรังสี กล่าวคือจะเห็นลักษณะเรืองแสงเกิดขึ้น เมื่อมีกัมมันตภาพรังสีตกกระทบสารบางชนิด เช่น ซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulfide, ZnS) ที่ฉาบไว้บนฉากรับ ลักษณะปรากฏการณ์การประกายแสง ณ ที่จุดรังสีตกกระทบที่เกิดขึ้นนั้น เรียกว่า การเรืองแสงหรือซินทิลเลชัน (Scintillation) โดยเมื่อรังสีผ่านสสารหรือวัสดุตัวกลางจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนนั้นคืออะตอมเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน (Excitation) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะกลับคืนสู่สถานะพื้นโดยการปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอน เรียกว่า การเรืองแสง (Fluorescent) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อโฟตอนผ่านในเครื่องแยก ปริซึมหรือเกรตติงจะทำให้เกิดเป็นสเปกตรัมออกมา เรียกสารลักษณะนี้ว่า สารเรืองแสง (Scintillator) เช่น โซเดียมไอโอไดด์ (sodium iodide), ซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulfide), แอนทราซีน (anthracene) และสารพลาสติกบางชนิด เป็นต้น

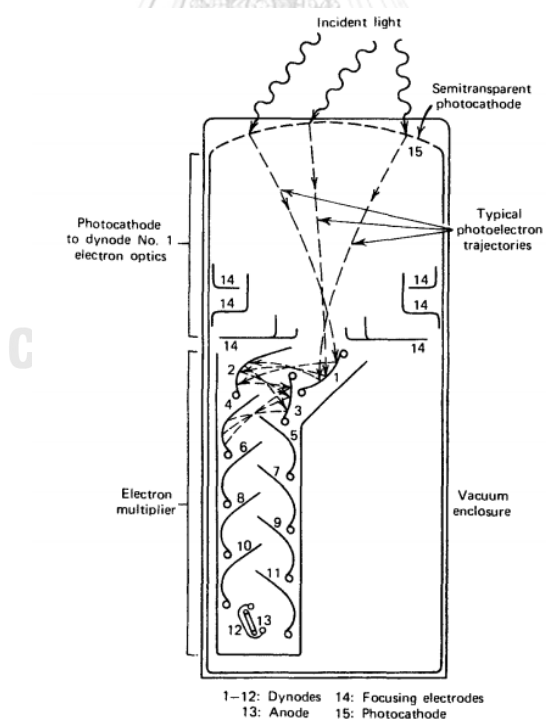


รูปที่ 2.1 ระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนปล่อยพลังงานออกมา (Glenn F. Knoll, 3rd Edition)

การนับโฟตอนหรือรังสีที่ตกกระทบจะใช้เครื่องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีชื่อว่า หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) แทนการมองดูด้วยตาของมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยโฟตอนที่เกิดในสารเรืองแสงที่ถูกผนึกกับผิวของหลอดขยายแสงโดยตรงหรือเชื่อมต่อด้วยตัวนำแสง (Light guide) ไปกระทบกับแผ่น โฟโตแคโทด (Photocathode) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าประมาณ 100-150 โวลต์ ในช่วงแรกระหว่างแผ่นไดโนด (Dynode) กับ โฟโตแคโทด แล้วไปตกกระทบกับไดโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ไดโนดตัวแรกถูกทำมาจากสารเคลือบพิเศษเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบแล้วจะปล่อยอิเล็กตรอนที่สองออกมาด้วยจำนวน 2-5 เท่าของอิเล็กตรอนรุ่นแรก จากนั้นอิเล็กตรอนรุ่นแรกจะถูกเร่งข้ามช่องว่างถึงไดโนดตัวที่สอง ทำให้เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นประมาณ 2-5 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าโวลต์ที่ใช้ระหว่างไดโนด



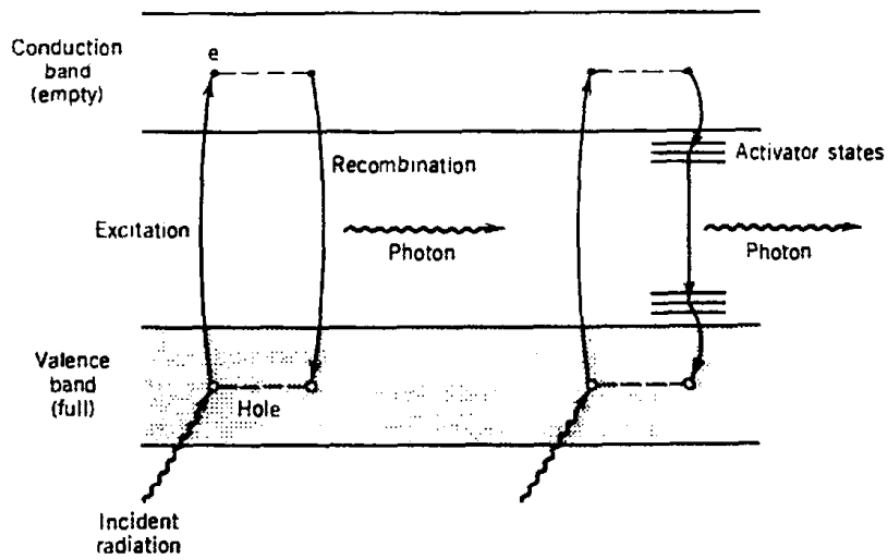
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบการเรืองแสงของผลึก(สำหรับรังสีแกมมา) และหลอดทวีคูณแสง (H. A. Engle, 1966)



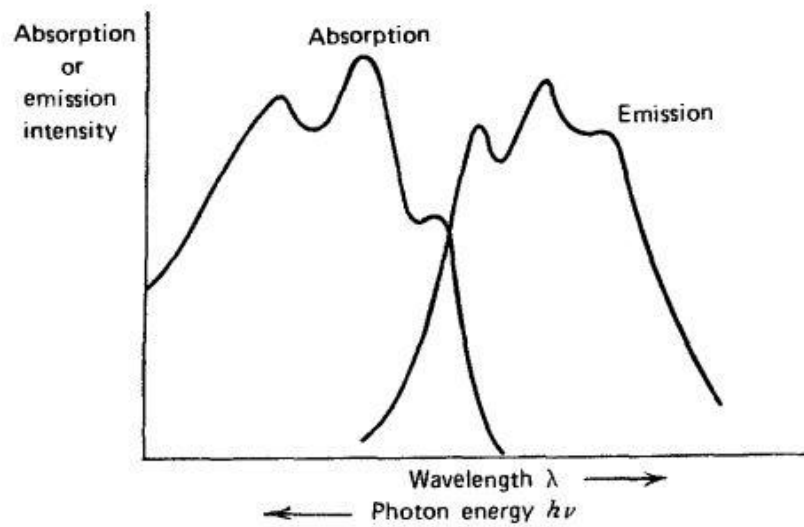
รูปที่ 2.3 ชาติพื้นฐานของหลอด PM (Glenn F. Knoll, 3rd Edition)

							(%)
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38,000	11.3
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.00	4	52,000	11.9
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39,000	11.4
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.40	-	11,000	2.8
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8,200	2.1
BaF ₂ (slow)	4.89	310	1.49	0.62	3	10,000	4.5
BaF ₂ (Fast)	4.89	220	-	0.0006	-	-	-
ZnS(Ag)	4.09	450	2.36	0.2	-	-	-
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7
CsF	4.11	390	1.48	0.004	-	-	-
Li glass [*]	2.50	395	1.55	0.075	-	-	1.5

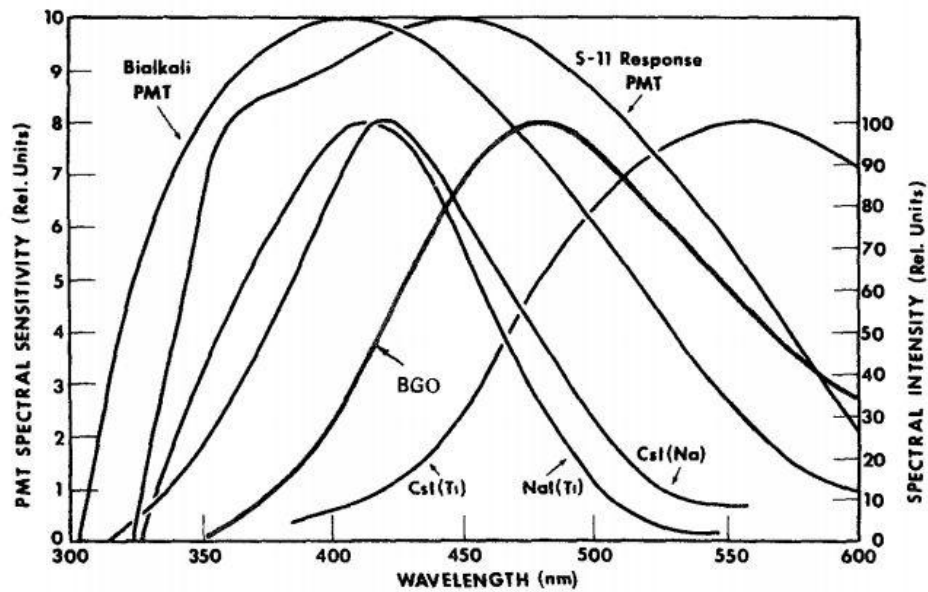
ลักษณะการเรืองแสงสำหรับสสารกลุ่มนี้จะเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ได้รับพลังงานกระตุ้นจากรังสีที่มากกระทบแล้วกระโดดข้ามช่องว่างของระดับพลังงาน (Energy gap) แล้วตกกลับลงมาโดยการปล่อยแสงออกมา และเมื่อเจือสารแปลกปลอม (Impurities) เข้าไปจำนวนเล็กน้อย เรียกว่า “Activators” ส่งผลให้ลดการถูกดูดกลืนพลังงานของแสงที่เปล่งออกมาโดยอะตอมชนิดเดียวกันที่ยังไม่ถูกกระตุ้น (self-absorption) และเพิ่มโอกาสการปล่อยแสงมากขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.5, 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.5 พลังงานที่ถูกปล่อยเมื่อเจือสารเข้าไป (Kenneth S.Krane, 1988)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาที่มีพลังงานลดลง หรือความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อเจือสารเข้าไป (Glenn F. Knoll, 3rd Edition)



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแสงที่ปล่อยออกมาจากสารเรืองแสงชนิดต่างๆ เช่น BGO, Na(Tl), CsI(Na) และCsI(Tl) รวมทั้ง light response ของ photocathode (Glenn F. Knoll, 3rd Edition)

2.1.3 คุณสมบัติของผลึกวัดรังสีที่ดี (มานิตย์ จิตรภักดี, 2546)

ผลึกวัดรังสีที่ดีนั้นควรมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีสูง โดยเป็นไปตามคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของรังสีเป็นพลังงานของแสงที่ออกมาสูง (High scintillator efficiency)
- 2) ความเข้มของแสงที่ออกมาควรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสี (Linearity)
- 3) แสงเรืองที่เกิดขึ้นภายในผลึกต้องสามารถผ่านผลึกออกสู่ภายนอกได้ดี (Transparent)
- 4) เวลาในการหายไปของแสงเรืองที่ออกมาจากผลึกต้องสั้น (Short decay time)
- 5) ดัชนีหักเหของแสงควรมีค่าใกล้เคียงกับแก้ว โดยแก้วมีดัชนีหักเห คือ 1.5 (Good coupling with detector)

ในการปลูกผลึกวัดรังสี สารประกอบซีเซียมไอโอดด์ (CsI) จัดเป็นสารประกอบหนึ่งที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม เนื่องจากมีคุณสมบัติมีความหนาแน่นสูง มีความอ่อนตัว ไม่แตกหักง่าย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของอุณหภูมิ และไม่ไวต่อความชื้น โดยผลึกวัดรังสีที่ได้จากสารประกอบซีเซียมไอโอดด์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในลักษณะผลึกเดี่ยวที่เจือสารเข้าไป และผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์ เช่น undoped CsI, CsI(Na), และCsI(Tl) เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของผลึกซีเซียมไอโอไดต์ (CsI) ชนิดต่างๆ

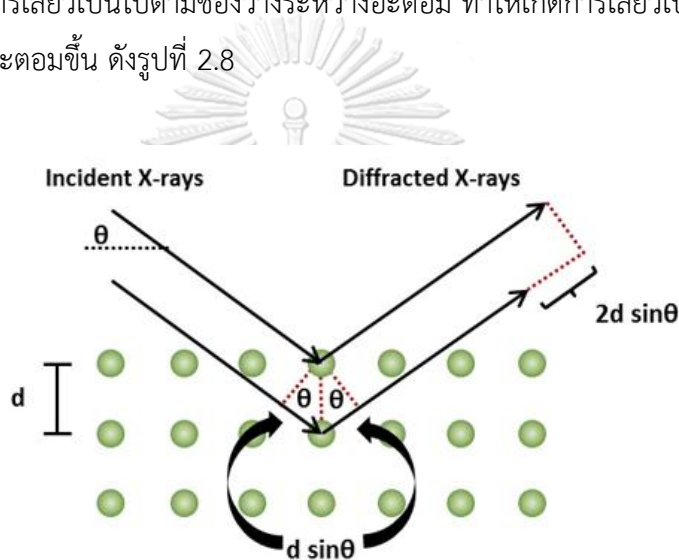
คุณสมบัติของผลึกซีเซียมไอโอไดต์	CsI(Tl)	CsI(Na)	CsI(ไม่มีสารเจือ)
ความหนาแน่น (Density)	4.51 กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร	4.51 กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร	4.51 กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว (Melting point)	894 เคลวิน	894 เคลวิน	894 เคลวิน
ค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient)	54×10^{-6} เคลวิน ⁻¹	49×10^{-6} เคลวิน ⁻¹	49×10^{-6} เคลวิน ⁻¹
การดูดความชื้น (Hygroscopic)	เล็กน้อย	มาก	เล็กน้อย
ความยาวคลื่น ของการเปล่งแสง (Wavelength of emission maximum)	550 นาโนเมตร	420 นาโนเมตร	315 นาโนเมตร
ความยาวคลื่นเริ่ม เปล่งแสง(Lower wavelength cutoff)	320 นาโนเมตร	300 นาโนเมตร	260 นาโนเมตร
ดัชนีหักเหสูงสุด ของการปล่อยแสง (Refractive index at emission maximum)	1.79	1.84	1.95
ระยะเวลาการ สลายปฐมภูมิ (Primary decay)	1 ไมโครวินาที	0.63 ไมโครวินาที	0.016 ไมโครวินาที

time)			
ผลผลิตทางแสง (Light yield)	52-56 โฟตอน/กิโล อิเล็กตรอนโวลต์	38-44 โฟตอน/กิโล อิเล็กตรอนโวลต์	2 โฟตอน/กิโล อิเล็กตรอนโวลต์

2.2 การตรวจสอบคุณภาพของผลึก

2.2.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction)

เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีการที่ทำให้ลำรังสีตกกระทบผลึก โดยลำรังสีจะเกิดการเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอม ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนทำมุมกับระนาบของอะตอมขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของอะตอม (Touloukian, Y.S., 1977)

จากรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยใช้สมการของ Bragg's Law คือ

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

n แทน ลำดับการสะท้อน

d แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ แทน มุมการเลี้ยวเบน

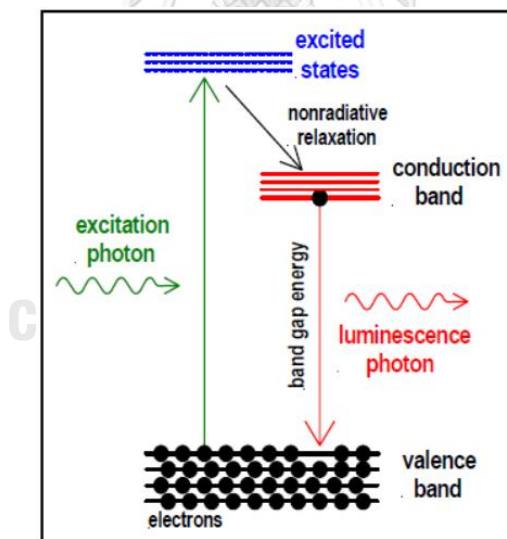
จากสมการที่ (2.1) สามารถนำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก และความเป็นผลึก โดยการวัดค่าความเข้มของลำรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการวัด อีกทั้งยังสามารถทราบค่าคงตัวของแลตทิซ (lattice constant) ได้จากสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ d_{hkl} แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ
 h, k, l แทน คาของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบนั้นๆ
 a แทน ค่าคงตัวของแลตทิซ

2.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ของวัสดุ

เป็นปรากฏการณ์การแผ่รังสีออกมาจากวัสดุหลังจากดูดกลืนแสงกระตุ้นมาตกกระทบที่ได้รับจากแหล่งกำเนิด โดยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากได้รับพลังงาน



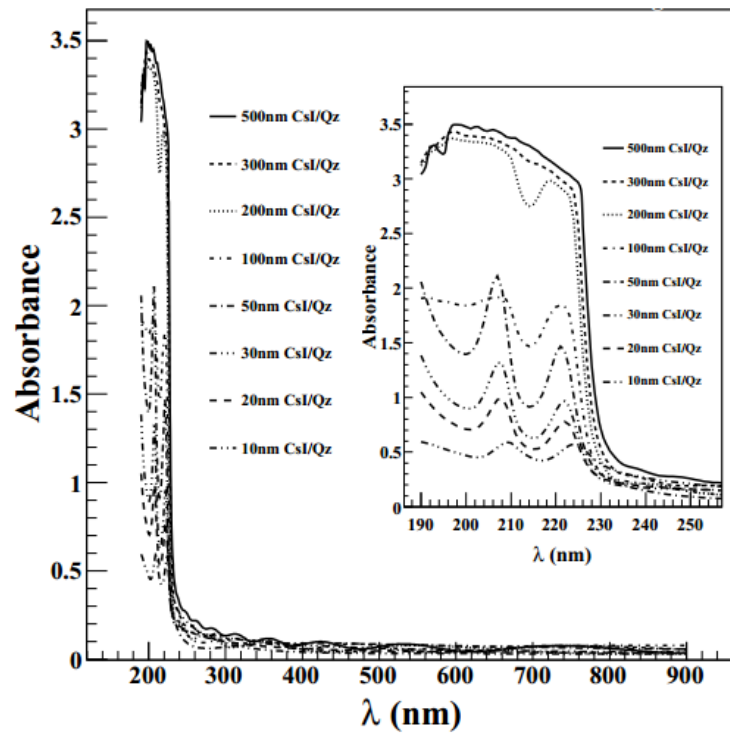
รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์การปล่อยแสงโฟตอนเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงาน (D. Heiman, 2004)

จากรูปที่ 2.9 ค่าพลังงานแถบช่องว่าง (energy gap, E_g) จะมีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวกั้นระหว่างค่าพลังงานชั้นนำ (conduction band) และชั้นวาเลนซ์ (valence band) เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง และพลังงาน

นี้มีค่ามากกว่าพลังงาน ช่องว่าง อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานงานนั้นและถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในชั้นนำ แต่สถานะที่ถูกกระตุ้นนี้เป็นสถานะที่ไม่เสถียร อิเล็กตรอนจึงจำเป็นต้องคายพลังงานออกไปและย้ายกลับมาอยู่ในชั้นที่มีพลังงานต่ำเหมือนเดิม ซึ่งการย้ายกลับมานี้จะเป็นการย้ายเป็นชั้น ๆ โดยผ่านชั้นพลังงานก่อนหน้านั้น หรือกลับมาโดยตรงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะออกมาในรูปของโฟตอน (photon)

2.2.3 การส่องผ่านแสงด้วยเทคนิคแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นได้ (Ultraviolet and Visible)

เป็นการส่องผ่านแสง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร เพื่อให้วัสดุเกิดการดูดกลืนรังสี โดยสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน โดยปริมาณการดูดกลืนรังสีจะขึ้นอยู่กับความโปร่งแสงของสารนั้น เมื่อการดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความโปร่งแสงของสาร ทำให้ Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ดังรูปที่ 2.10

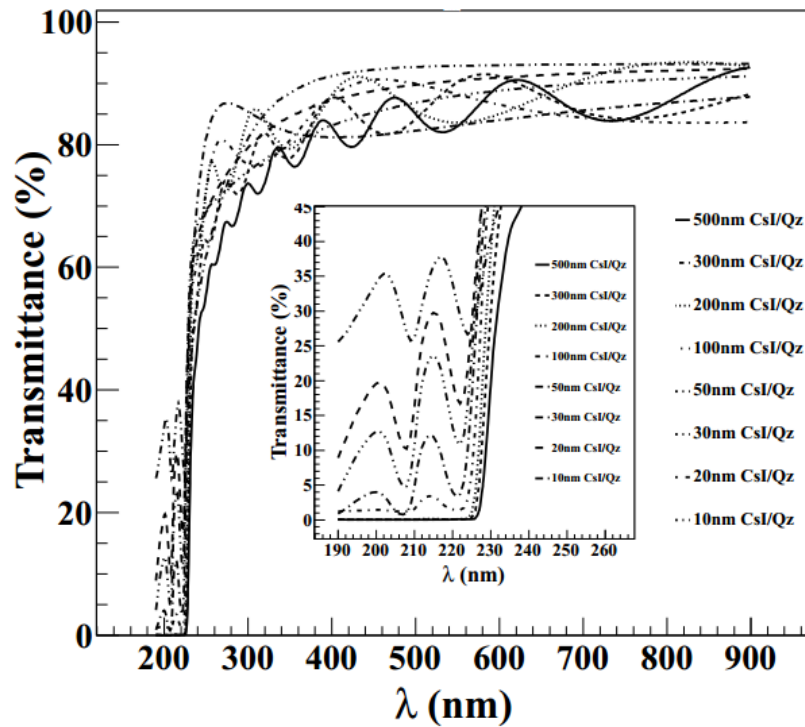


รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม CsI ในช่วงความยาวคลื่น 190 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร โดยในส่วนของรูปขยายเป็นช่วงการดูดกลืนของรังสียูวี (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015)

จากรูปที่ 2.10 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านแสง (%Transmittance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ได้จากสมการที่

$$%T = \exp(-A) \times 100\% \quad (2.3)$$

เมื่อ %T แทน ร้อยละของการส่องผ่านแสง
A แทน ค่าการดูดกลืนแสง



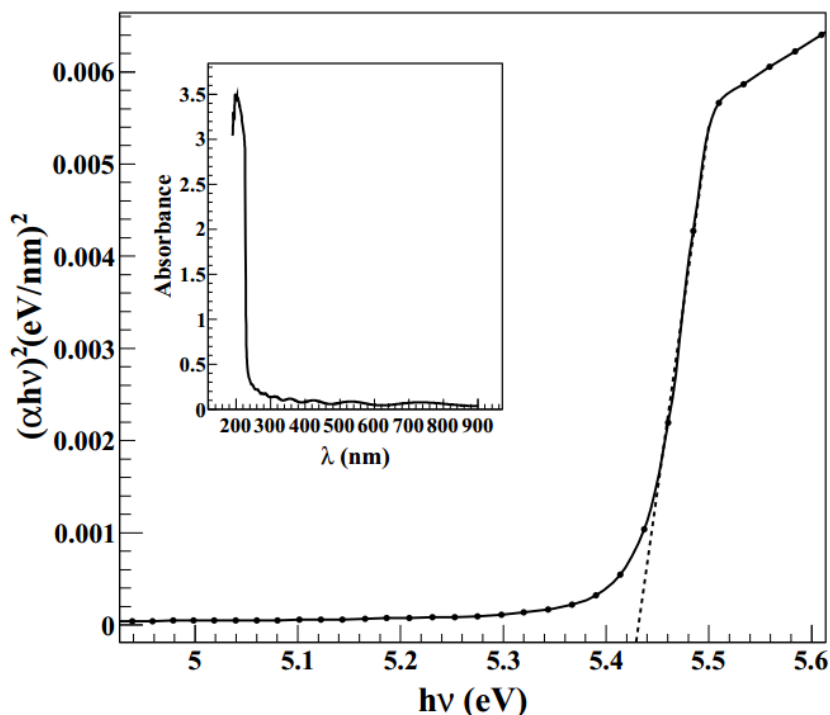
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการร้อยละของการส่องผ่านแสงและค่าความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม CsI ในช่วงความยาวคลื่น 190 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015)

จากรูปที่ 2.11 สามารถคำนวณค่าพลังงานแถบช่องว่าง (energy gap, E_g) ได้จาก Tauc's Plot คือ การประมาณค่าจุดตัดแกน x จากเส้นลากสัมผัสกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ ณ จุด $(\alpha h\nu) = 0$ ดังสมการ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.4)$$

เมื่อ $h\nu$ แทน พลังงานโฟตอน

α แทน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง โดย $\alpha = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{T}$; t = ความหนาของผลึก



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ $h\nu$ ความยาวคลื่นของแผ่นฟิล์ม Csl (Triloki, R. Rai, N. Gupta, N.F.A. Jammal, B.K. Singh, 2015)

2.3 วิธีการตรวจสอบความสามารถการตรวจวัดรังสีของผลึก

สิ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพของการวัดรังสี (Intrinsic peak efficiency : E_{ip}) และการจำแนกระดับพลังงานของผลึก (Energy resolution)

2.3.1 ประสิทธิภาพของการวัดรังสี

เมื่อนำผลึกวัดรังสีประกบกับหลอด PMT โดยกำหนดระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสี เมื่อบันทึกสเปกตรัมรังสีแกมมาด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณชนิดหลายช่อง (Multichannel Analyzer : MCA) ดังรูปที่ 2.13 แล้วคำนวณค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของพลังงาน (Energy absolute efficiency, E_{peak}) และประสิทธิภาพของการวัดรังสี (Intrinsic peak efficiency, E_{int}) จากสมการ

$$E_{abs} = \left(\frac{N}{S} \right) \quad (2.4)$$

$$E_{\text{int}} = \left(\frac{N}{S}\right) \left(\frac{4\pi}{\Omega}\right) \quad (2.5)$$

และ

$$E_{\text{int}} = E_{\text{abs}} \left(\frac{4\pi}{\Omega}\right) \quad (2.5)$$

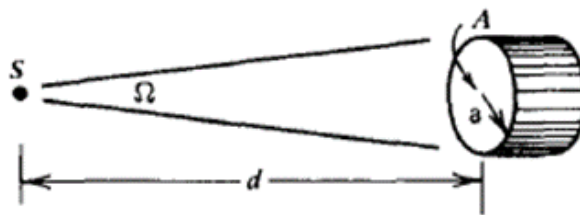
เมื่อ N คือ จำนวนรังสีที่วัดได้ (Counts per second ; cps)

S คือ ความแรงของรังสีในเวลาปัจจุบันจากแหล่งกำเนิดรังสี (dps)

Ω คือ มุมตันในกรณีต้นกำเนิดรังสีเป็นจุด (dot source) หรือ ระยะที่ $d \gg a$ จะได้ว่า

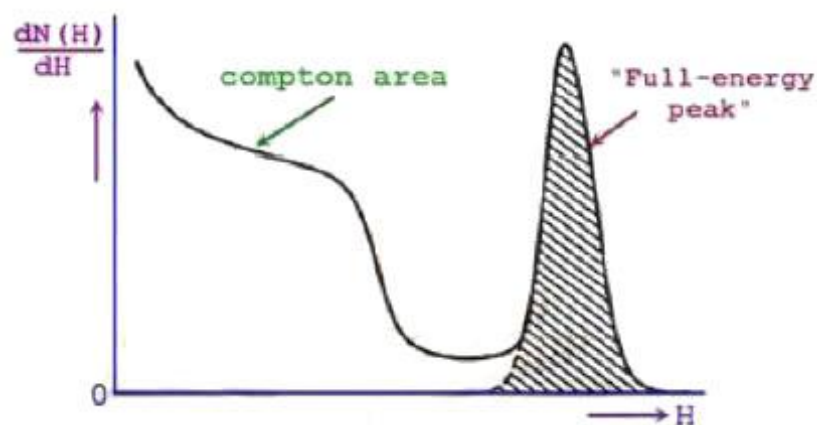
$$\Omega \cong \frac{\pi a^2}{d^2} \quad \text{โดยที่ } d \text{ คือ ระยะห่างจากหัววัดรังสีถึงแหล่งกำเนิดรังสี และ}$$

a คือ รัศมีของหัววัดรังสี



รูปที่ 2.13 มุมตันสำหรับการหาประสิทธิภาพการวัดรังสีในกรณีแหล่งกำเนิดรังสีเป็นจุดหรือระยะ $d \gg a$ (Glenn F. Knoll, 3rd edition)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 การหาค่าประสิทธิภาพของการวัดรังสีจากโฟโตพีคของสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา (Glenn F. Knoll, 3rd edition)

2.3.2 การแจกแจงพลังงาน (Energy resolution)

ค่าการแจกแจงพลังงานเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแปรปรวนของพลังงานรังสีที่หัววัดสามารถวัดได้ หรือเป็นความสามารถของหัววัดรังสีในการวัดพลังงานของรังสีที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการแจกแจงพลังงานจะขึ้นอยู่กับประเภทของหัววัด และค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามพลังงานของรังสี สำหรับหัววัดรังสีแกมมาจะมีการกำหนดมาตรฐานของการวัดเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าการแจกแจงพลังงานโดยกำหนดค่าหัววัดรังสี NaI(Tl) ในหน่วยของร้อยละ(%) ที่พลังงาน 661.6 keV ของCs-137

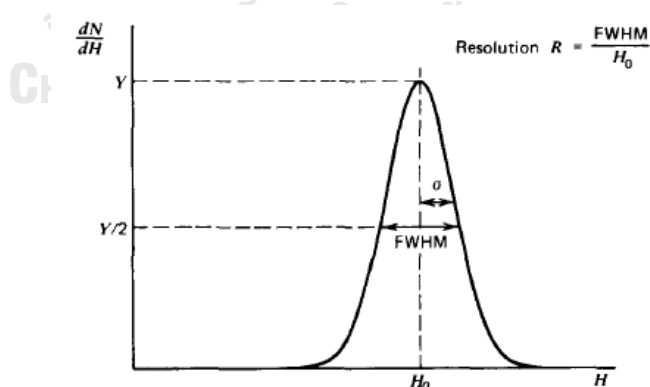
การหาความกว้างของพีค (Full Width at Half Maximum : FWHM) สามารถหาได้จากสมการ

$$\% \text{ Energy resolution (FWHM)} = \frac{\text{FWHM}_{\text{PH}}}{H_0} \times 100\% \quad (2.6)$$

เมื่อ FWHM_{PH} = เป็นค่าความแตกต่างซ้าย-ขวาที่ได้จากตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโฟโตพีค (Photopeak)

H_0 = ค่าพลังงานที่ตำแหน่งโฟโตพีค

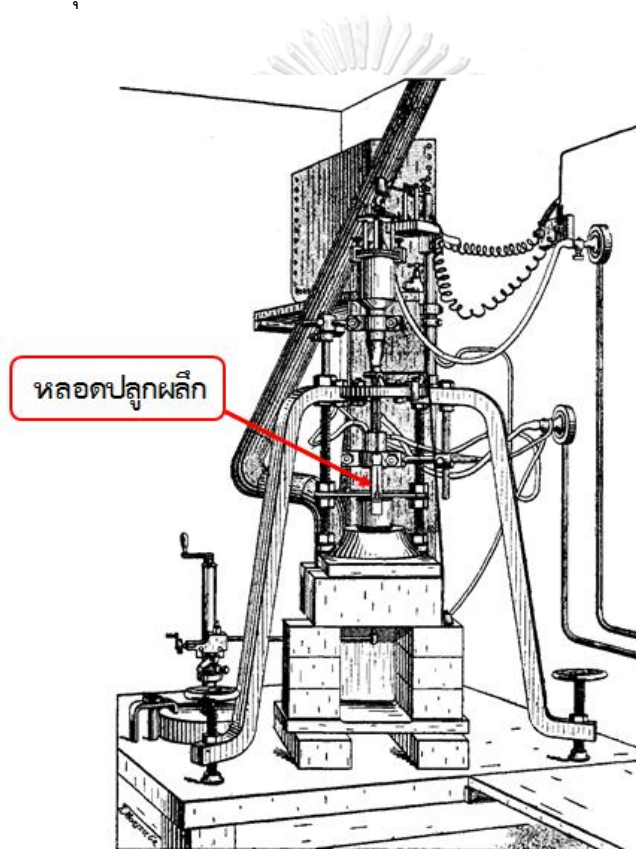
ค่า % FWHM ยิ่งน้อยแสดงว่าค่าการแจกแจงพลังงานยิ่งดี โดยทั่วไปแล้วค่าการแจกแจงพลังงานของหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) จะอ้างอิงกับ Cs-137 ซึ่งจะมีค่าการแจกแจงพลังงาน ระหว่าง 6-7% ของ Cs-137



รูปที่ 2.15 การหาค่าการแจกแจงพลังงานรังสีของหัววัดรังสีจากโฟโตพีคของสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา(Glenn F. Knoll, 3rd edition)

2.4 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

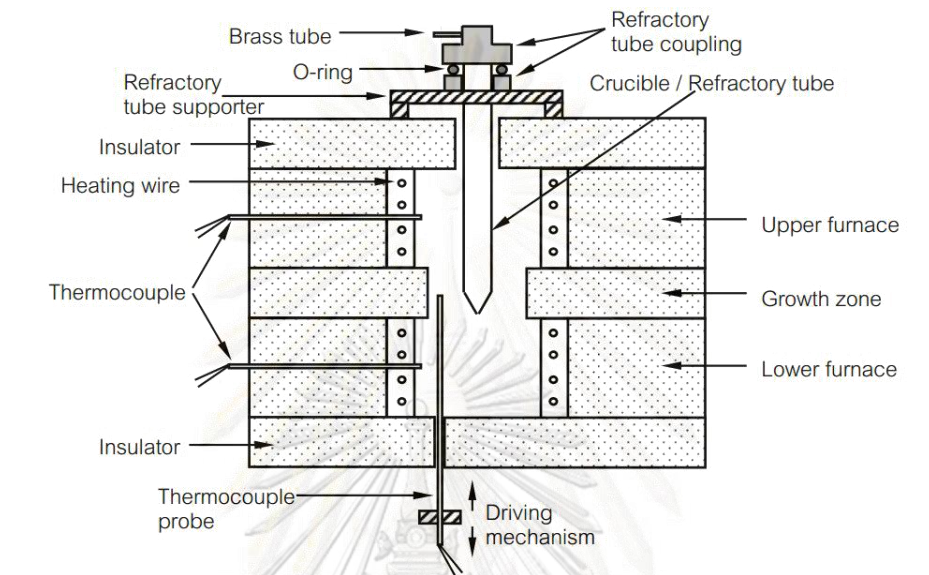
Verneuil เป็นบุคคลที่สามารถปลูกผลึกเดี่ยวของทับทิม (Ruby) และบุษราคัม (Sapphire) ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 2000°C ด้วยวิธี Flame-fusion Growth ได้ในปี 1902 ดังนั้น Verneuil จึงเป็นคนแรกที่ค้นพบเทคโนโลยีการปลูกผลึก โดยหลักการต่างๆ ของ Verneuil นำไปสู่หลักการเบื้องต้นสำหรับวิธีการปลูกผลึกของ Tammann 1914, Bridgman 1923, Stöber 1925, Stockbarger 1936, Czochralski 1950 and Wilke-Bohm 1988 ซึ่งในปัจจุบันการปลูกผลึกที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การปลูกผลึกแบบ Czochralski เพราะเป็นวิธีปลูกผลึกที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด



รูปที่ 2.16 ระบบการปลูกผลึกแบบ Verneuil (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552)

ในปี ค.ศ. 1925 Bridgman ได้ปลูกผลึกขึ้นมาโดยใช้วิธีการทำให้สารหลอมเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะเกิดการเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1936 Stockbarger ได้นำเทคนิคการปลูกผลึกของ Bridgman มาปรับปรุงโดยทำการบรรจุสารหลอมเหลวลงในภาชนะ แล้วทำให้ภาชนะที่บรรจุสารเคลื่อนที่ผ่านเตาหลอมในแนวตั้ง โดยผลึกที่เกิดขึ้นที่ปลายสุดของภาชนะ สำหรับ

ผลึกบางชนิดเพื่อให้เกิดผลึกง่ายขึ้นอาจจำเป็นต้องใส่ผลึกเดี่ยวเริ่มต้น (Seed crystal) ในภาชนะที่บรรจุสาร



รูปที่ 2.17 ระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552)

1. ส่วนประกอบของระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

ระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ได้มีการพัฒนาการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมคือแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง (Conventional Vertical Bridgman) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญดังใน รูปที่ 2.17 ดังนี้

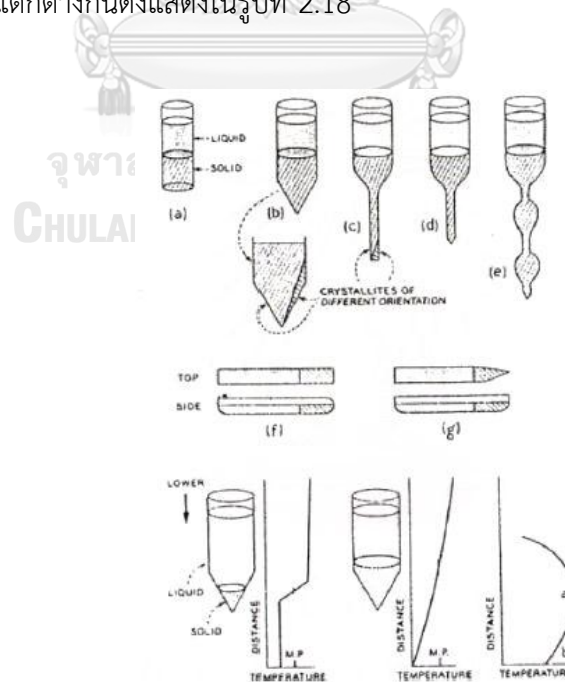
- 1) ชุดเตาหลอม และฉนวนกันความร้อน
- 2) ภาชนะปลูกผลึก
- 3) ท่อปลูกผลึก
- 4) ระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก
- 5) ระบบควบคุมอุณหภูมิ
- 6) ระบบควบคุมสุญญากาศ และความดัน

ลักษณะชุดเตาหลอมปลูกผลึกมีลักษณะเป็นเตาหลอม 2 โซน และเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนความร้อนระหว่างกันจึงมีการคั่นแต่ละโซนด้วยฉนวนความร้อน และมีการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละโซนด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิที่อิสระจากกัน เพื่อจัดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมกับการก่อผลึก เตาหลอมส่วนบนจะออกแบบให้มีอุณหภูมิเหนือระดับจุดหลอมเหลวของสารที่ต้องการปลูกผลึก จึงจัดเป็นชุดอุณหภูมิสูง (High temperature furnace)

ท่อปลูกผลึกถูกออกแบบระบบควบคุมความดันก๊าซ และความดันสุญญากาศไว้กับท่อ โดยท่อปลูกผลึกต้องมีลักษณะเป็นท่อปลายปิด และเลือกวัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิในกระบวนการปลูก เพื่อลดการเกิดการพาความร้อน (Heat convection) และผลการเคลื่อนของอากาศในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างภาชนะปลูกผลึกกับท่อปลูกผลึก อันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ ขณะเดียวกันท่อปลายปิดยังสามารถสร้างความดันสุญญากาศในระดับต่างๆ และเพื่อไม่ให้ระเหยที่อุณหภูมิสูงๆ ยังสามารถอัดก๊าซเฉื่อยให้สูงกว่าความดันบรรยากาศได้

ในการปลูกผลึกกลไกการขับเคลื่อนของท่อปลูกผลึกต้องออกแบบให้ภาชนะปลูกผลึกมีความสม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ และมีการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด รวมทั้งต้องจัดอัตราการเคลื่อนที่ของบริเวณก่อกผลึกของสารในภาชนะปลูกผลึกให้เคลื่อนที่ผ่านบริเวณเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ด้วยอัตราที่เหมาะสมกับการก่อกผลึก ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการออกแบบระบบปลูกผลึกขนาดเล็กโดยมีการจัดให้ชุดเตาหลอมเคลื่อนที่ หรือตั้งค่าให้อุณหภูมิในบริเวณโซนที่ 1 กับโซนที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแทนการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก

ภาชนะปลูกผลึกควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีสารแปลกปลอมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่ปลูกผลึก และต้องเป็นวัสดุที่ทนความร้อนสูง รวมถึงการออกแบบมุมปลายภาชนะปลูกผลึกมีความสำคัญในกระบวนการก่อกผลึกเดียวในตัวเองเช่นกัน โดยต้องออกแบบให้มีความเหมาะสมกับสาร และอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก ซึ่งหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการออกแบบมุมปลายภาชนะปลูกผลึกในรูปแบบที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปทรงของภาชนะปลูกผลึกในรูปแบบต่างๆ (มานิตย์ จิตรภักดี, 2552)

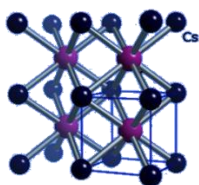
บทที่ 3

การปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดต์โดยเทคนิคบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

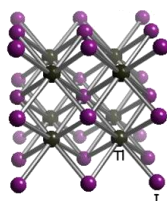
งานวิจัยนี้มีความประสงค์เพื่อปลูกผลึกวัดรังสีซินทิลเลชันชนิด CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) สำหรับใช้งานร่วมกับหลอดทวิคูณแสงอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงเริ่มจากการศึกษาเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ, คุณสมบัติของสารที่จะนำมาปลูกผลึก และกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Profiles) พร้อมทั้งการเตรียมสารเริ่มต้นปลูกผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) แล้วนำผลึกที่ได้มาศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนประกอบกับ PMT เพื่อหาคุณภาพการวัดรังสีของผลึก

3.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการปลูกผลึก

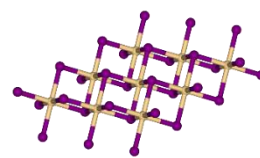
ข้อมูลทั่วไปของสารตั้งต้นจะใช้สารประกอบซีเซียมไอโอไดต์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยมีเทลเลียมไอโอไดต์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.999 และแคลเซียมไอโอไดต์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เป็นสารเจือ โดยซีเซียมไอโอไดต์มีจุดหลอมเหลว (Melting point) 626 องศาเซลเซียส, จุดเดือด (Boiling point) 1,280 องศาเซลเซียส และความหนาแน่น 4.53 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC (Body - Center Cubic) เป็นสารประกอบกลุ่มอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย สำหรับเทลเลียมไอโอไดต์เป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย มีจุดหลอมเหลว 442 องศาเซลเซียส จุดเดือด 823 องศาเซลเซียส และความหนาแน่น 7.1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC สำหรับซีเซียมไอโอไดต์เป็นสารประกอบไอออนิกที่ไวต่อความชื้น และสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 784 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,100 องศาเซลเซียส และความหนาแน่น 3.956 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ Rhombohedral



(a) โครงสร้างผลึกของ CsI



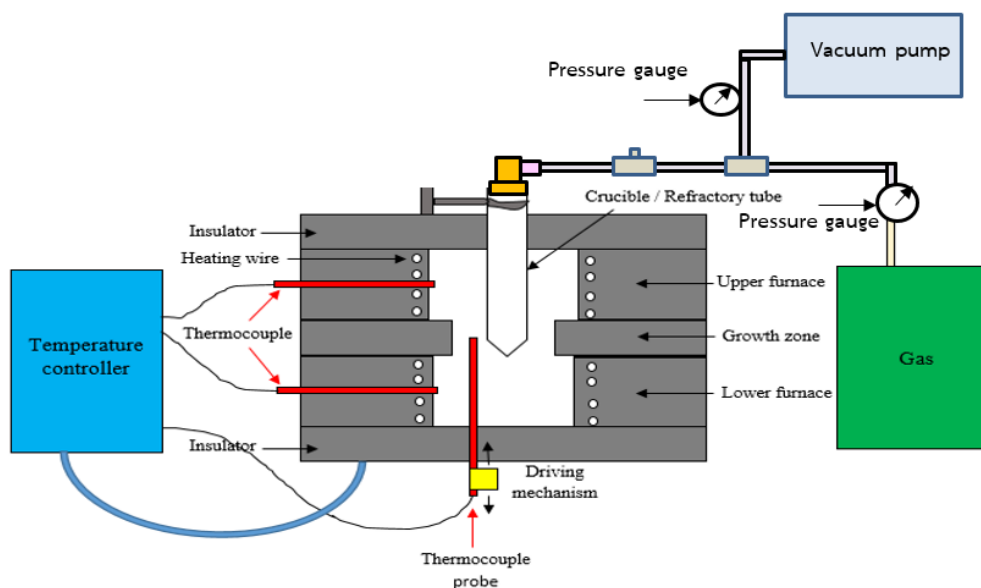
(b) โครงสร้างผลึกของ TlI



(c) โครงสร้างผลึกของ CaI₂

รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของสาร CsI, TlI และ CaI₂

จากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวนำไปสู่การออกแบบท่อปลูกผลึกแบบปิด โดยเลือกใช้กระบวนการปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายใต้ความดันบรรยากาศของอาร์กอนเพื่อไม่ให้อากาศเกิดปฏิกิริยาระหว่าง CsI, Tl และ CaI_2 โดยเตาปลูกผลึกจะใช้อุปกรณ์พื้นฐานในการออกแบบ และให้มีกำลังเพียงพอต่อการปลูกผลึกของสารดังกล่าว ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนผังส่วนประกอบของเตาปลูกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

- 1) ชุดเตาหลอม : ระบบเตาหลอม 2 โซน คือ โซนอุณหภูมิร้อน (High Temp) และโซนอุณหภูมิต่ำ (Low Temp) กันด้วยฉนวนกันความร้อน ซึ่งควบคุมอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำให้มีอิสระต่อกันด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ
- 2) เทอโมคัปเปิล : ใช้วัดอุณหภูมิของระบบเตาหลอม ซึ่งถูกจัดตำแหน่งไว้สามตำแหน่ง คือ วัดตำแหน่งอุณหภูมิสูง (High Temperature), อุณหภูมิกลาง (Middle Temperature) และอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature)
- 3) ระบบบันทึกข้อมูล : ใช้บันทึกข้อมูลที่วัดค่าได้จากเทอโมคัปเปิลในภาพแบบไมโครคอมพิวเตอร์

4) ภาชนะปลุกผลึก (Crucible) : มีลักษณะเป็นวัสดุประเภทควอทซ์ยาว 42 เซนติเมตร แบบปลายแหลมหนึ่งด้าน และอีกด้านเป็นปลายเปิดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สำหรับใส่สาร และต่อกับท่อสุญญากาศพร้อมความดันก๊าซอาร์กอน

5) ระบบปั๊มสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอน : ใช้สำหรับปั๊มอากาศภายในระบบ และปั๊มก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบ เพื่อให้ในระบบมีความดันของก๊าซอาร์กอน

3.2 ออกแบบเตาปลุกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

จากรายละเอียดส่วนประกอบของโครงสร้างเตาปลุกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนท์ของอุณหภูมิสามารถออกแบบสร้างส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

3.2.1 ชุดเตาหลอมระบบ 2 โซน

เตาหลอมออกแบบโครงสร้างในส่วนที่เป็นโซนความร้อนให้เป็นรูปทรงกระบอก โดยเตาหลอมอุณหภูมิสูงมีโซนความร้อนยาว 15 มิลลิเมตร และเตาหลอมอุณหภูมิต่ำมีโซนความร้อนยาว 22 มิลลิเมตร ซึ่งจะเลือกใช้ขดลวดความร้อนขนาด 1.3 มิลลิเมตร ชนิด Kanthal-AF ที่มีอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1,400 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าของเตาหลอมถูกออกแบบไว้ที่ 1.2 กิโลวัตต์ เนื่องจากการปลุกผลึกจำเป็นต้องเปิดเตาให้ทำงานหนักได้อย่างต่อเนื่องโดยสามารถคำนวณหาความยาวของขดลวดความร้อนแล้วพันเป็นรูปคอยล์ (Helix) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร เพื่อบรรจุขดลวดความร้อนในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขดลวดความร้อนชุดบน (Primary heater) เป็นชุดที่ต้องตั้งอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารปลุกผลึกอย่างน้อย 20 องศาเซลเซียส โดยจะทำการพันให้มีความถี่สูงกว่าขดลวดความร้อนชุดล่าง (Secondary heater) ทั้งนี้เนื่องจากการปรับระยะห่างของขดลวดความร้อนมีผลต่อการจัดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลุกผลึก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะตั้งอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารตามความเหมาะสมของการจัดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่กำหนดไว้



ก. ร่องบรรจุขดลวด



ข. ขดลวดความร้อน

รูปที่ 3.3 ลักษณะของขดลวดความร้อนที่บรรจุลงในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอก

ชุดเตาหลอมต้องจัดฉนวนให้มีการป้องกันการรบกวนของอุณหภูมิแวดล้อมจากภายนอกต่อ บริเวณโซนปลุกผลึก และการสูญเสียความร้อน เพื่อออกแบบให้มีความเสถียรของอุณหภูมิ โดยชุด ฉนวนกันความร้อนจะเลือกใช้อิฐเบาเนื้ออ่อนหนาไฟหนา 7.5 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัด 11.5×23 ตารางเซนติเมตร นำมาตัดแต่งเป็นส่วนประกอบของระบบเตาปลุกผลึกซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ก. ฉนวนที่ใช้ก่อเป็นตัวเตาหลอม จะหุ้มร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอก โดยเตา หลอมส่วนล่างหรือชุดอุณหภูมิต่ำจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 23×23 ตารางเซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร และเตาหลอมชุดบนหรือชุดอุณหภูมิสูงมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันแต่สูง 15 เซนติเมตร

ข. บัฟเฟิล (Baffle) จะเป็นช่วงรอยต่อของโซนที่ใช้สำหรับปลุกผลึก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ไกล่เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อปลุกผลึก และมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ปลุกผลึก เนื่องจากการป้องกันการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านในบรรยากาศเกิดการพาความร้อนขึ้น ระหว่างโซน ซึ่งจะเป็นการรบกวนของอุณหภูมิของเตาทั้งสองโซน

ค. ฉนวนชั้นนอกที่ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนโดยรอบของเตาหลอมทั้งอุณหภูมิต่ำและสูงทำ ให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อย และช่วยรักษาให้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตาไม่สูงเกินไป ซึ่งการ สูญเสียความร้อนที่มากเกินไปไม่เพียงแต่จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการปลุกผลึกยังทำให้เกรดเดย นท์ของอุณหภูมิไม่คงตัวอีกด้วย ทั้งนี้จะมีการเพิ่มฉนวนโดยรอบของเตาปลุกผลึกด้านละ 5 เซนติเมตร เพื่อให้อุณหภูมิที่ผิวเตามีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 95 องศาเซลเซียส ขณะทำงาน



ก. อิฐทนไฟสำหรับเตาความร้อนและฉนวน



ข. บัฟเฟิล



ค. ฉนวนกันความร้อนรอบนอกที่ถ่ายจากมุมบนของระบบเตาปลุกผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

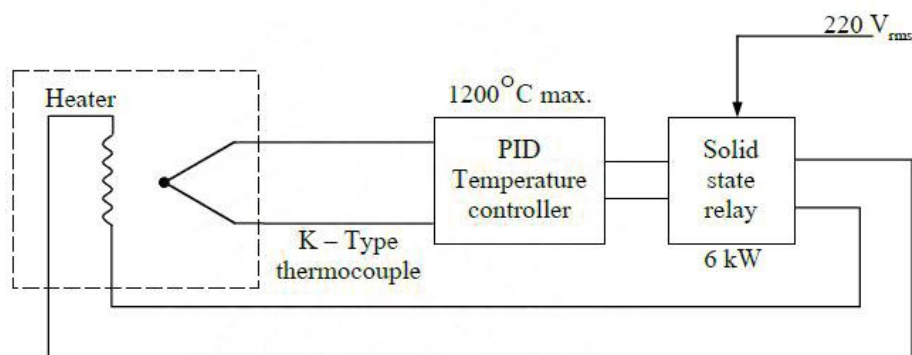
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของชุดเตาหลอม

3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

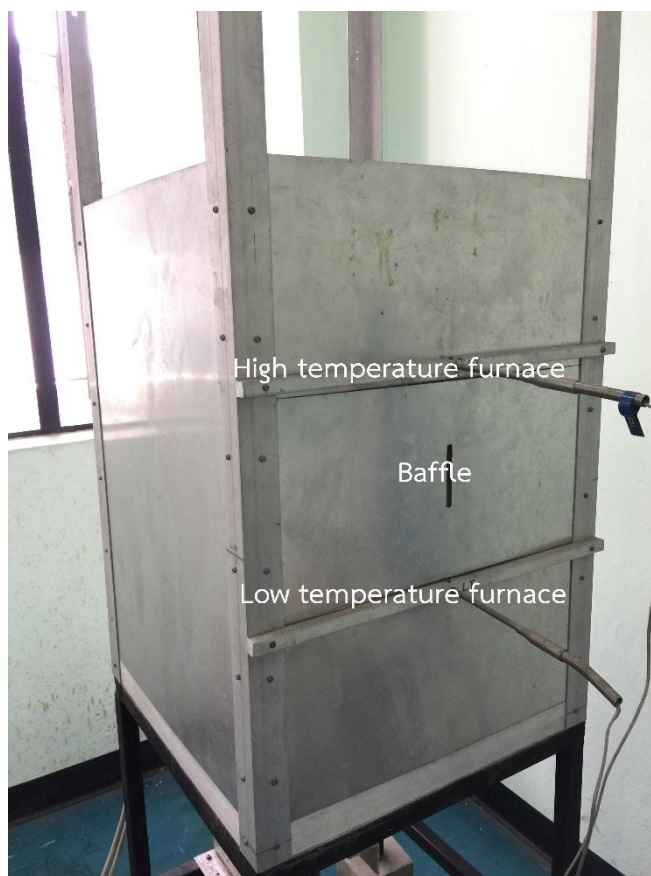
การควบคุมอุณหภูมิของเตาปลุกผลึกจัดเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีอ์กบาร์เกอร์ เนื่องจากต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้มีความเสถียรมากที่สุด โดยในระบบเตาปลุกผลึกจะมีสองโซนที่ควบคุมอุณหภูมิให้อิสระจากกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิสองชุดซึ่งมีส่วนประกอบที่เหมือนกันคือ โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay) ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID temperature controller) และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) จัดวางแสดงในรูปที่ 3.5

ก. เตาอุณหภูมิต่ำ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิของระบบปลุกผลึกไว้ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านในเตา ซึ่งจะเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เนื่องจากสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดถึง 1200°C แล้วส่งสัญญาณเอาท์พุทไปยังระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของบริษัท PRIMUS รุ่น TOHO TTM-004 ซึ่งมีฟังก์ชันสำหรับควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Ramp rate) ตั้งแต่ 0 – 999.9 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยจะเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิกับค่าที่ต้องการ (Set point) แล้วส่งสัญญาณควบคุมการเปิดปิดวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านโซลิดสเตทรีเลย์ของบริษัท PRIMUS รุ่น P2425DL ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถึง 6 กิโลวัตต์

ข. เตาอุณหภูมิสูง จะเลือกใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของบริษัท SIGMA รุ่น SF49 ซึ่งมีฟังก์ชันสำหรับควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Ramp rate) ตั้งแต่ 0 – 500 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ซึ่งระบบควบคุมอุณหภูมิเช่นเดียวกับเตาอุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเตาอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิสูงมากประมาณ 900 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องควบคุมการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้สารที่ใช้ปลุกผลึกไม่เกิดการหลอมละลายเร็วเกินไป และควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิของผลึก (Cool down) ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการปลุกผลึก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Temperature shock) ซึ่งจะทำให้หลุดในเตาหลุดขาด และได้ผลึกออกมาไม่สมบูรณ์



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งโครงสร้างของเตาปลูกผลึก

3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการปลูกผลึก จำเป็นต้องจัดเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งเพื่อทดสอบอัตราการตอบสนองของอุณหภูมิขณะเพิ่มและลด หรือการจัดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับกระบวนการปลูกผลึกจึงได้ออกแบบระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบมอเตอร์ (Driving mechanism) อ่านค่าอุณหภูมิจากบริเวณโซนปลูกผลึก โดยจะอ่านข้อมูลทุกระยะการเคลื่อนที่ของเทอร์โมมิเตอร์ 1 มิลลิเมตร หลังจากหยุดรอ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ และบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลระหว่างระยะทางกับอุณหภูมิเพื่อหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางหลอดภาชนะปลูกผลึก และอัตราการตกผลึก (Growth rate) ซึ่งอัตราการตกผลึกสามารถหาได้จากสมการ (3.1)

$$\text{Growth rate (mm/hr)} = \frac{\text{Temperature gradient drift rate (}^{\circ}\text{C/hr)}}{\text{Temperature gradient (}^{\circ}\text{C/mm)}} \quad (3.1)$$

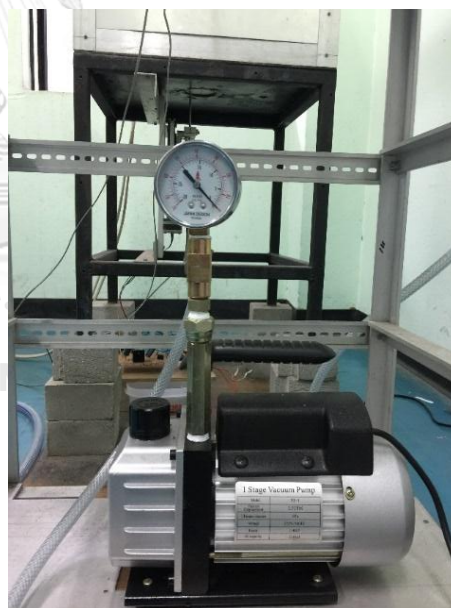
สำหรับอัตราการการลดลงอุณหภูมิต่อเวลา (Temperature gradient drift rate) หาได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Profiles) ในช่วงกราฟที่แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่วัดค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่วางตำแหน่งตรงกลาง (Middle Temperature) ในบริเวณโซนปลูกผลึก (Growth zone)

3.2.4 ระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซ

ในการปลูกผลึกจำเป็นต้องดูดอากาศภายในห้องปลูกผลึกเพื่อให้ระบบภายในห้องเป็นสุญญากาศ จากนั้นทำการอัดก๊าซเฉื่อย (Inert gas) เข้าสู่ห้องปลูกผลึก ทั้งนี้เพื่อให้ภายในห้องปลูกผลึกไม่มีก๊าซออกซิเจนหรือสารอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดปฏิกิริยาใดๆ ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ระบบสุญญากาศที่ใช้จะเป็นเครื่องสูบลมชนิดโรตารี (Rotary pump) โดยเมื่อสูบลมถึงระดับที่ต้องการก็ทำการปล่อยก๊าซเข้าไปเพื่อใช้งานเป็นระบบควบคุมความดันก๊าซ ซึ่งจะใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 ทำหน้าที่ควบคุมความดันผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ (Pressure regulator) แล้วอ่านมาตรวัดให้ได้ 2 ปาสคาล



ก. ถังก๊าซอาร์กอน



ข. เครื่องสูบลมชนิดโรตารี

รูปที่ 3.7 ระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซ

3.2.5 ภาชนะปลูกผลึก

การปลูกผลึกครั้งนี้จะใช้หลอดแก้วควอทซ์ทรงกระบอกปลายเปิดหนึ่งด้านอีกด้านเป็นปลายแหลมเป็นภาชนะปลูกผลึก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ยาว 42 เซนติเมตร หลอดแก้วที่เลือกใช้ปลูกผลึกมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนสูงถึง 1,730 องศาเซลเซียส ไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับสารที่จะทำการปลูกผลึก และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนน้อยกว่าผลึก เนื่องจากในขณะที่ลดอุณหภูมิของผลึกจะทำให้ผลึกและหลอดปลูกผลึกเกิดการหดตัว ซึ่งเมื่อผลึกหดตัวได้มากกว่าหลอดปลูกผลึกจะนำผลึกออกจากภาชนะได้ง่าย ทั้งนี้ในขณะที่ลดอุณหภูมิของผลึก หากหลอดปลูกผลึกสามารถหดตัวได้มากกว่าอาจทำให้ทั้งผลึกหรือหลอดปลูกผลึกแตกออกจากกันได้

ด้านบนของหลอดปลูกผลึกจะถูกเชื่อมด้วยกาวที่ทนต่อความร้อนสูงกับท่ออลูมิเนียมสองชิ้น มาประกบกันด้วยแผ่นยาง และสกรู โดยท่ออลูมิเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.2 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร ซึ่งชิ้นที่สองจะออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อกับข้อต่อทองเหลืองสำหรับระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซด้วยวาว ดังรูป 3.8

ในการปลูกผลึกหลอดปลูกผลึกจะต้องอยู่ตำแหน่งตรงกลางหลุมของเตาปลูกผลึก และที่ทราบระดับอุณหภูมิที่แน่นอน ดังนั้นจึงใช้ขาตั้งพร้อมที่จับหลอดทดลองมายึดภาชนะปลูกผลึก ซึ่งขาตั้งนี้สามารถปรับเลื่อนตำแหน่งในแนวตั้งได้



ก.ขาตั้งพร้อมที่จับหลอดแก้วควอทซ์



ข.หลอดแก้วควอทซ์



ค. วัสดุที่จะนำมาต่อกับหลอดปลุกผลึก

ง. หลอดปลุกผลึกที่ถูกเชื่อมด้วยกาว

รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของวัสดุที่จะใช้เป็นภาชนะสำหรับปลุกผลึก

อุปกรณ์ต่างๆ ที่สร้างและออกแบบขึ้นเมื่อนำมาประกอบเป็นโครงยึดมีขนาด 45x45 ตารางเซนติเมตร ส่วนขาตั้งสี่ขาของโครงสร้างจะวางบนก้อนอิฐเพื่อปรับระดับให้สูงขึ้นโดยอิฐจะวางอยู่บนแผ่นเหล็กที่วางบนแผ่นยางอีกชั้นเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นจากพื้นที่ติดตั้ง เตาปลุกผลึกที่พัฒนามาจากเตาแบบปริตจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แสดงในภาพถ่ายรูปที่ 3.9

1. เตาปลุกผลึก
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบบันทึกข้อมูล
3. ระบบขับเคลื่อนเทอร์โมมิเตอร์
4. ระบบสุญญากาศ
5. ระบบควบคุมความดันก๊าซ
6. ท่อปลุกผลึก



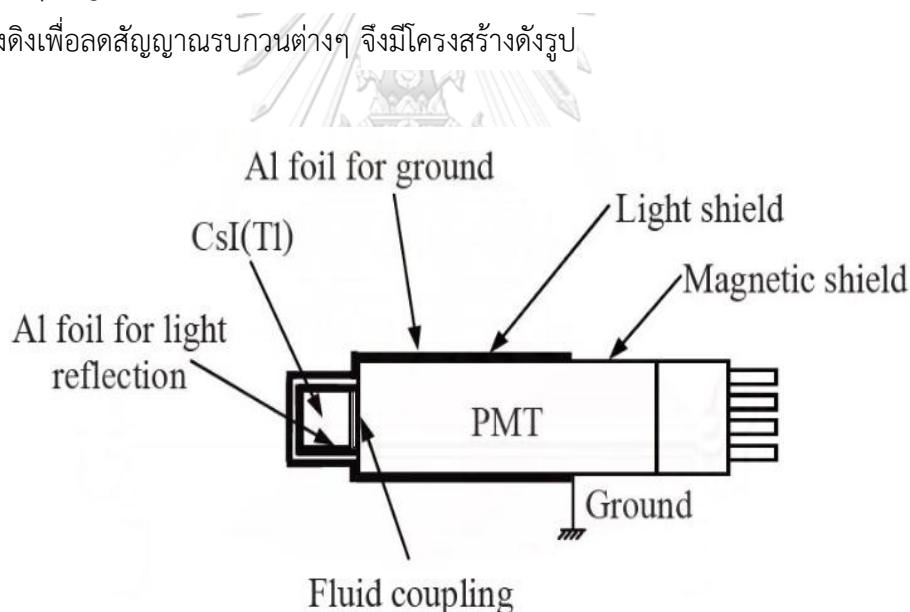
รูปที่ 3.9 เตาปลุกผลึกที่พัฒนาขึ้น

3.3 ออกแบบอุปกรณ์

ผลึกวัดรังสีที่ปลูกได้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา ดังนั้นต้องออกแบบระบบวัดรังสีและอุปกรณ์การทดลองที่สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสีได้ ทั้งนี้จึงเลือกใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าที่เหมาะสมที่จะประกอบเข้ากับอุปกรณ์ไวแสงที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การประกอบอุปกรณ์ผลึกวัดรังสี

นำผลึกที่ได้มาประกอบเข้ากับอุปกรณ์ไวแสง คือ หลอดไวแสงชนิดทวีปริมาณอิเล็กตรอน (PMT) ซึ่งรับแสงด้านหน้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โดยการประกอบผลึกวัดรังสีเข้ากับอุปกรณ์ไวแสงต้องคำนึงถึงการประสานผลึกกับผิวรับแสงของ PMT รุ่น H5783 ยี่ห้อ Hamamatsu, แสงจากภายนอกบริเวณ และสิ่งรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงใช้สารเชื่อมประสานผิวหน้า (Fluid coupling) แล้วเทพกาวสีดำพันด้านหน้าส่วนที่รับแสงของ PMT ให้มิดชิด และมีการต่อสายกราวด์ลงดินเพื่อลดสัญญาณรบกวนต่างๆ จึงมีโครงสร้างดังรูป

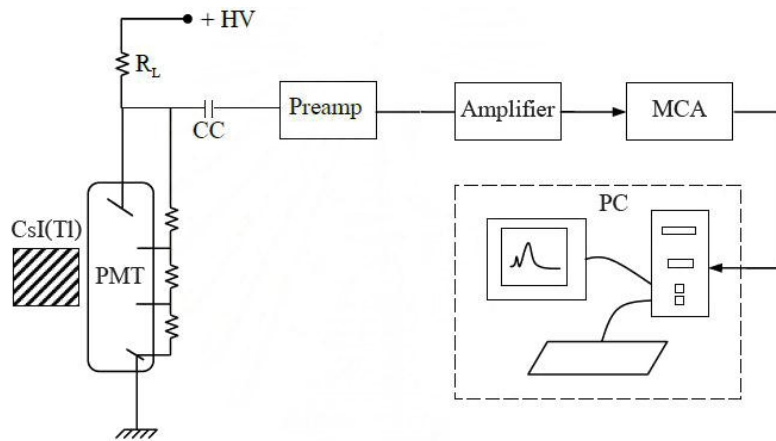


รูปที่ 3.10 การประกอบผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

3.3.2 ระบบการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา

ระบบการวิเคราะห์พลังงานรังสีแกมมาแสดงในรูปที่ 3.11 ประกอบด้วยอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าของการทดลองโดยใช้หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนกับผลึกวัดรังสี และเลือกใช้อุปกรณ์ขยายที่ไวต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensitive) ซึ่งจัดวงจรแบบ pulse type สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเลือกใช้

แหล่งจ่ายที่มีแรงดันสูงสำหรับไบอัสหัววัดรังสี ในส่วนของเครื่องขยายสัญญาณพัลส์จะใช้ที่สามารถเลือกค่า shaping time ได้ และเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) ใช้วัดสเปกตรัม



รูปที่ 3.11 ระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสีโดยใช้ผลึก CsI(Tl) เป็นหัววัดรังสี

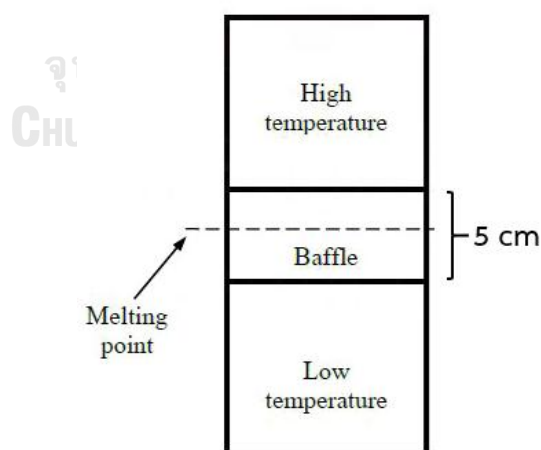
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การพัฒนากระบวนการปลูกผลึกไว้ได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์โดยใช้วิธีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ และทดลองปลูกผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) จากสารเริ่มต้นของผง CsI ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยเจือสาร TlI หรือ CaI_2 ในรูปผง ด้วยเงื่อนไขของการปลูกผลึกและอัตราส่วนของสารเจือต่างๆ ซึ่งการปลูกจะเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย เพื่อนำมาทดสอบทดสอบความเป็นผลึก ทดสอบสมบัติเชิงแสงของผลึก และคุณภาพในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมาโดยการประกอบผลึกเข้ากับ PMT

4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก

คุณลักษณะของเตาปลูกผลึกถูกแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ทดสอบผลตอบการตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าสู่สถานะเสถียร (Temperature response) และทดสอบเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) บริเวณโซนปลูกผลึก เมื่อกำหนดอุณหภูมิของเตาหลอม ตำแหน่งอุณหภูมิสูงและตำแหน่งอุณหภูมิต่ำที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ โดยที่แบ่งตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิ ณ บริเวณโซนปลูกผลึก ดังในรูปที่ 4.1



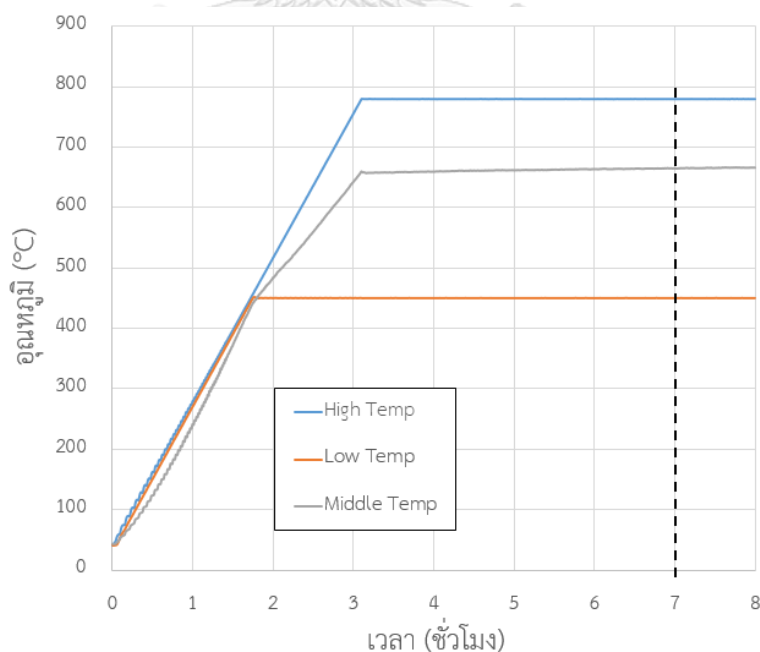
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของการอ่านค่าของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก

4.1.1 การทดสอบผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิ

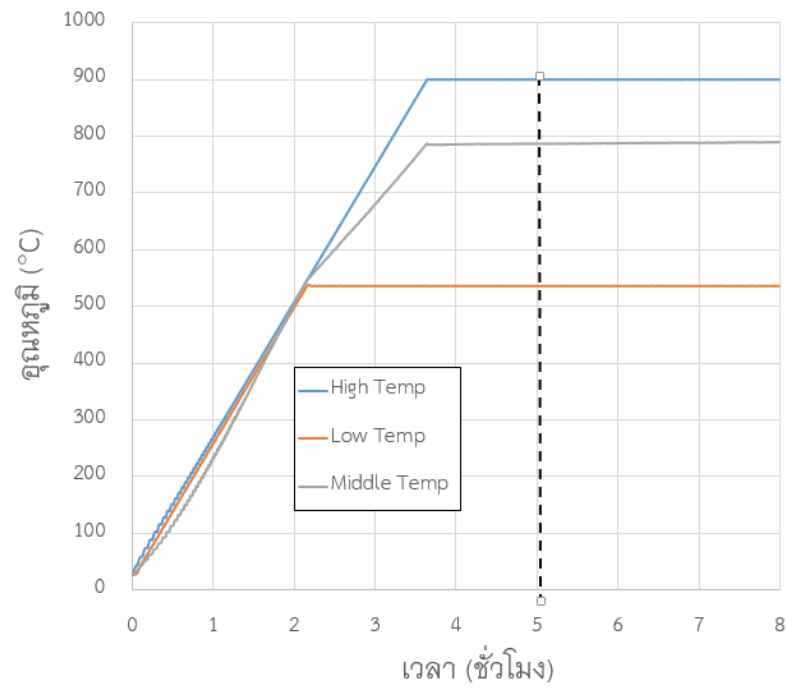
เริ่มต้นด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดไว้ 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุด ตำแหน่งอุณหภูมิต่ำสุด และตำแหน่งบริเวณโซนปลูกผลึก โดยปลายเทอร์โมคัปเปิลที่อยู่บริเวณโซนปลูกผลึกจัดให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นของการปลูกผลึก แล้วทำให้ภายในท่อปลูกผลึกเป็นสุญญากาศ ด้วยการสูบอากาศออกจากท่อปลูก จากนั้นทำการอัดก๊าซอาร์กอนสู่ท่อปลูกผลึกที่ความดัน 2 เท่าของบรรยากาศ จากนั้นเริ่มให้ความร้อนกับระบบพร้อมบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 22 วินาที โดยผลการทดสอบสำหรับเตาที่จะใช้ปลูกผลึก CsI(Tl) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เมื่อเข้าสู่สภาวะเสถียร คือเร็วที่สุดในเวลา 7 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง สำหรับผลึก CsI(Ca) และCsI(Tl,Ca) ดังแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เมื่อเข้าสู่สภาวะเสถียรของผลึก

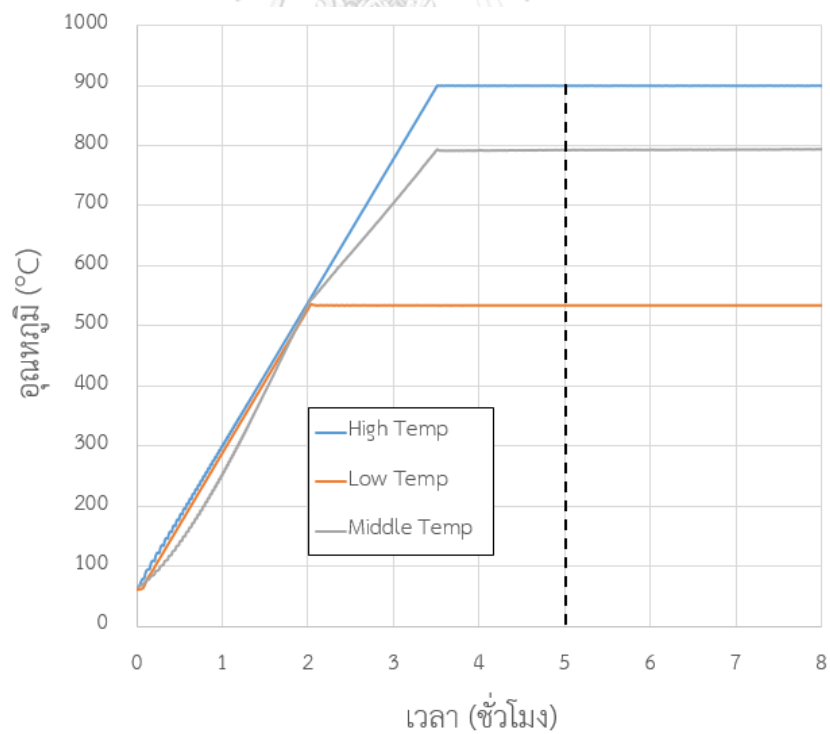
ผลึก	CsI(Ca)	CsI(Ca)	CsI(Tl,Ca)
ระยะเวลาการเพิ่มของอุณหภูมิที่เมื่อเข้าสู่สภาวะเสถียร	7 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 กราฟผลตอบสนองการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Tl)



รูปที่ 4.3 กราฟผลตอบแทนการเข้าสู่สถานะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Ca)



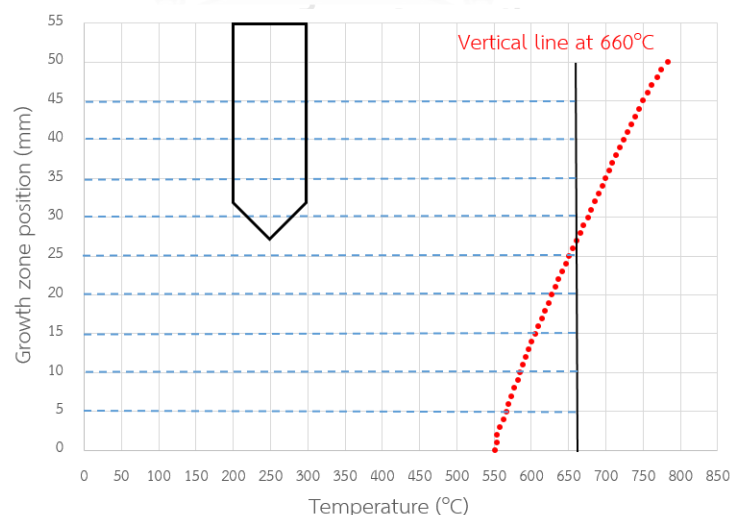
รูปที่ 4.4 กราฟผลตอบแทนการเข้าสู่สถานะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก CsI(Tl,Ca)

4.1.2 การหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

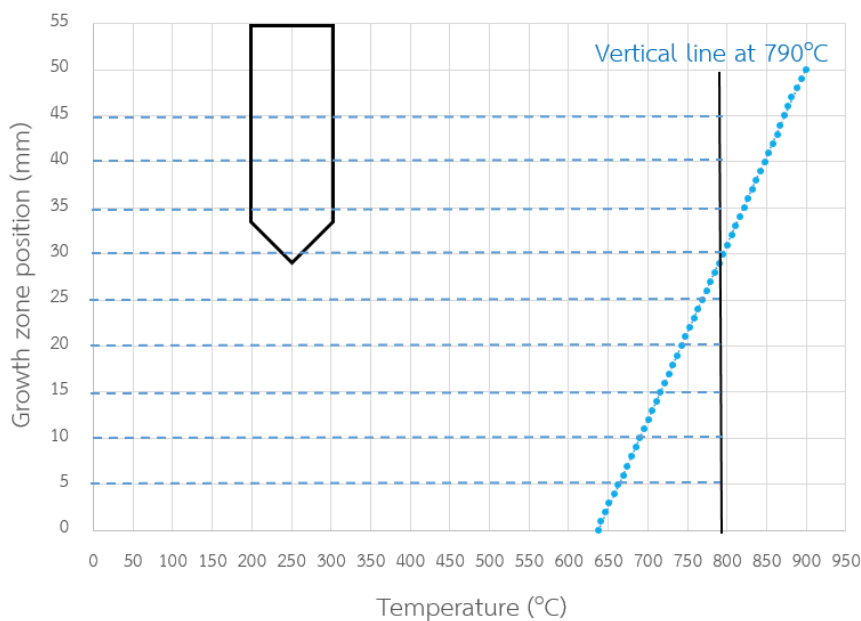
การปรับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมต่อกระบวนการปลูกผลึก เป็นการปรับกราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature profile) ในบริเวณโซนปลูกผลึกของเตาปลูก ซึ่งเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเกิดจากการตั้งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเตาหลอมตำแหน่งอุณหภูมิสูง (High temperature) และของเตาหลอมตำแหน่งอุณหภูมิต่ำ (Low temperature) และเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิลในท่อปลูกผลึกเพื่อวัดค่าอุณหภูมิตลอดโซนปลูกผลึกเพื่อหาตำแหน่งของจุดหลอมเหลวของสารปลูกผลึกบริเวณกึ่งกลางของแบบเฟิล โดยเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิลจากด้านล่าง (อุณหภูมิต่ำ) สู่ด้านบน (อุณหภูมิสูง) ซึ่งในการทดลองนี้จัดให้ระบบ โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของเทอร์โมคัปเปิลพร้อมอ่านค่าอุณหภูมิหลังจากหยุดการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกเป็นเวลา 5 นาที ทุกระยะทาง 1 มิลลิเมตร ผลการทดลองหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิของผลึก CsI(Tl) คือ 4.65 องศาเซลเซียส/มิลลิเมตร และสำหรับผลึก CsI(Ca) และCsI(Tl,Ca) จะใช้กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเดียวกันทำให้ได้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิของผลึก คือ 5.26 องศาเซลเซียส/มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.2 เกรเดียนต์ของอุณหภูมิของผลึก

ผลึก	CsI(Ca)	CsI(Ca)	CsI(Tl,Ca)
เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ	4.65 องศาเซลเซียส/ มิลลิเมตร	5.26 องศาเซลเซียส/ มิลลิเมตร	5.26 องศาเซลเซียส/ มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 กราฟการเคลื่อนของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในโซนปลูกผลึกของผลึก CsI(Tl)

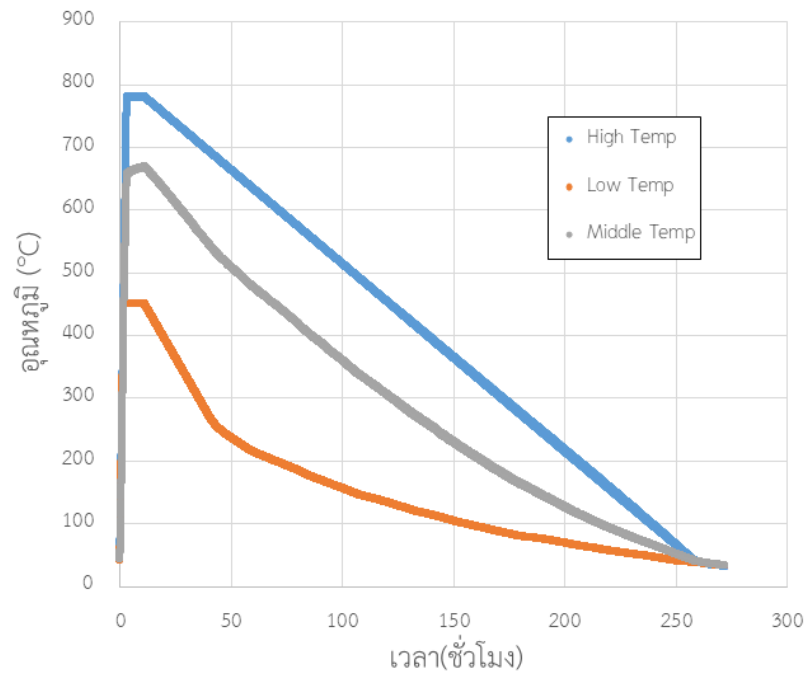


รูปที่ 4.6 กราฟการเคลื่อนที่ของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในโซนปลูกผลึกของผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

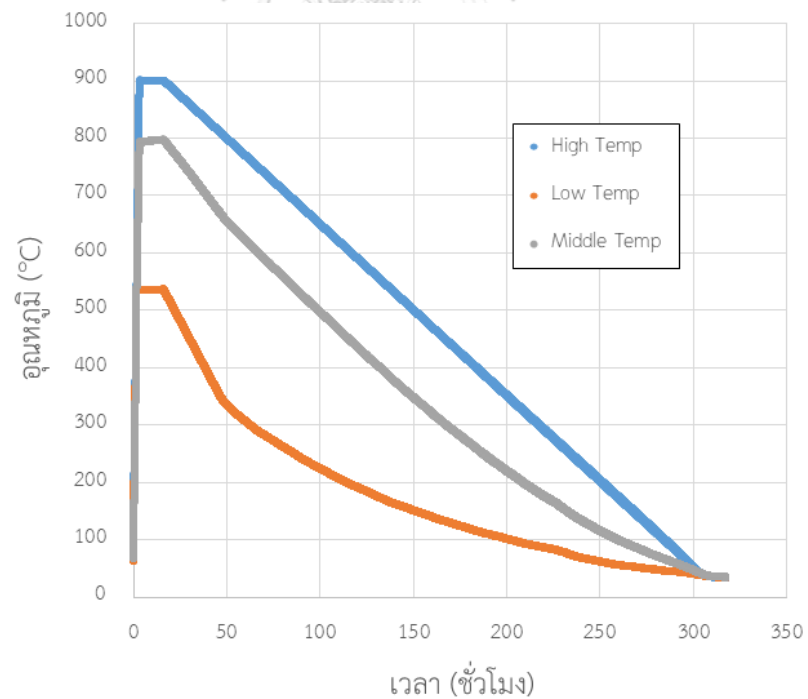
จากการกำหนดอุณหภูมิสำหรับปลูกผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) ทำให้ได้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิคือ 4.65 องศาเซลเซียส/มิลลิเมตร และ 5.26 องศาเซลเซียส/มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อหาควบคุมการตกผลึกด้วยอัตรา 0.05 องศาเซลเซียส/นาทิจึงคำนวณหาจากโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (Temperature profile) ให้ พบว่าอัตราการตกผลึกของ CsI(Tl) คือ 0.65 มิลลิเมตร/ชั่วโมง และ CsI(Ca), CsI(Tl,Ca) คือ 0.57 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.3 อัตราการตกผลึก

ผลึก	CsI(Ca)	CsI(Ca)	CsI(Tl,Ca)
อัตราการตกผลึก	0.65 มิลลิเมตร/ชั่วโมง	0.57 มิลลิเมตร/ชั่วโมง	0.57 มิลลิเมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่จะใช้ปลุกผลึกCsI(Tl)



รูปที่ 4.8 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเตาที่จะใช้ปลุกผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

4.2 การทดลองปลูกผลึก

4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

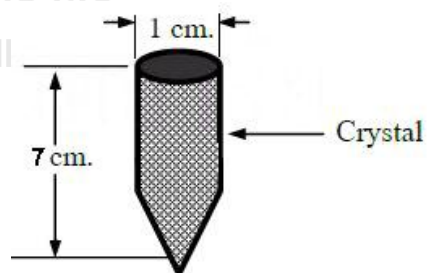
1. สารเคมี ที่ใช้ คือ CsI ชนิดผงความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 และ Tl, CaI_2 ชนิดผง
2. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA Series
3. ภาชนะปลูกผลึกทำด้วยแก้วควอทซ์ (Quartz) ขนาด 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร ยาว 42 เซนติเมตร ก้นแก้วเป็นแหลมขนาดมุมประมาณ 30°
4. เต้าปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น
5. ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์
6. เครื่องทำความสะอาดชนิดอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)

4.2.2 การเตรียมสารปลูกผลึก

ได้ทำการเตรียมสารปลูกผลึกเพื่อทดลองปลูกผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ Cs(Tl,Ca) โดยคำนวณหาปริมาณสารต่อปริมาตรหลังการหลอมและก่อผลึกในภาชนะบรรจุ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้เตรียมสัดส่วนของสารเพื่อบรรจุในภาชนะปลูกผลึกไวคอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 12.7 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ผลึกที่ปลูกขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 7 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.9



ก. แสดงเริ่มต้นเตรียมสาร



ข. ขนาดผลึกหวังผล

รูปที่ 4.9 รูปร่างผลึกและลักษณะของสารในภาชนะบรรจุสาร

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของส่วนผสมของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก (มานิตย์ จิตรภักดี, 2009)

ชนิดผลึก	ปริมาณสารเจือ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	น้ำหนักของผง CsI (กรัม)	น้ำหนักของผง TI (มิลลิกรัม)	น้ำหนักของผง CaI ₂ (มิลลิกรัม)
CsI(Tl)	0.35	22.614	81.02	-
CsI(Ca)	0.35	22.614	-	80.25
CsI(Tl,Ca)	0.71	22.614	80.02	81.27

ก่อนบรรจุสารเริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดภาชนะบรรจุด้วย Ultrasonic cleaner และผสมสารเริ่มต้นให้เข้ากัน แล้วบรรจุลงในภาชนะปลูกผลึกด้วยการสั่นให้เนื้อแน่นและปิดกับฝาท่ออลูมิเนียมให้สนิทเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของสารขณะทำการปลูกผลึก

4.2.3 การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง

หลอดแก้วที่บรรจุสารไว้จะถูกนำมาครอบติดกับท่ออลูมิเนียมด้วยกาวทนความร้อนสูง เพื่อให้หลอดแก้วหลุดออกจากท่ออลูมิเนียมขณะทำการปลูกผลึก ซึ่งจะใช้ขาตั้งพร้อมที่จับหลอดทดลองจับท่ออลูมิเนียมไว้ให้ภาชนะปลูกผลึกอยู่กึ่งกลางเตาหลอม และทำการสูบอากาศออกจากท่อปลูกผลึกประมาณ 1 ชั่วโมง ก่อนอัดก๊าซอาร์กอนความดัน 2 เท่าบรรยากาศ การปลูกผลึกเริ่มต้นด้วยการหกรายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Profiles) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกายภาพของเตาและระดับอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเป็นปัจจัยเงื่อนไขที่สำคัญในการควบคุมการปลูกผลึก ดังนั้นเพื่อหาตำแหน่งการวางหลอดภาชนะปลูกผลึกและระดับของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกของสารประกอบแต่ละชนิดโดยการกำหนดค่าจะต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลว และต่ำกว่าจุดเดือดของสารที่จะทำการปลูก สำหรับผลึก CsI(Tl) ที่ต้องการปลูกในครั้งนี้ กำหนดให้แหล่งจ่ายความร้อนแก่ระบบเตาที่โซนอุณหภูมิสูง (High Temp) ที่ 780 องศาเซลเซียส และโซนอุณหภูมิต่ำ (Low Temp) ที่ 450 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิการปลูกที่บริเวณโซนตรงกลาง (Middle temp) เริ่มต้นที่ 660 องศาเซลเซียส และสำหรับการปลูกผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) กำหนดให้แหล่งจ่ายความร้อนแก่ระบบที่โซน High Temp ที่ 900 องศาเซลเซียส และที่โซน Low Temp ที่ 540 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมให้อุณหภูมิการปลูกที่บริเวณโซนตรงกลาง เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 790 องศาเซลเซียส โดยการปลูกผลึกหรือตกผลึกสารประกอบนั้น เริ่มต้นจากการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิการปลูก โดยขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการหลอมละลายของสารประกอบนั้นที่สภาวะอุณหภูมิที่พร้อมสำหรับการปลูกคงที่ไว้นานกว่า 11-12 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการหลอม

ละลายของสารตั้งต้นได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิของเตาหลอมลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิประมาณ 0.05 องศาเซลเซียสต่ออนาที ซึ่งขั้นตอนนี้เป็น การเข้าสู่กระบวนการตกผลึกของสารประกอบ ซึ่งอาจจะใช้เวลานานมากบางครั้งอาจจะใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์ หรือจนถึงประมาณ 1 เดือน สำหรับกระบวนการตกผลึกอย่างช้าๆ เพื่อให้มีการตกผลึกอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขข้อกำหนดการปลูกผลึก

โซนอุณหภูมิ	ผลึก CsI(Tl)	ผลึก CsI(Ca)	ผลึก CsI(Tl,Ca)
สูง	780 องศาเซลเซียส	900 องศาเซลเซียส	900 องศาเซลเซียส
กลาง	660 องศาเซลเซียส	790 องศาเซลเซียส	790 องศาเซลเซียส
ต่ำ	450 องศาเซลเซียส	540 องศาเซลเซียส	540 องศาเซลเซียส

4.2.4 ผลการปลูกผลึก

จากการทดลองปลูกผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานด้านต่างๆ พบว่าหากทำความสะอาดภาชนะปลูกผลึกไม่สะอาดพอ จะทำให้ผลึกเกิดความขุ่นและมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากสิ่งสกปรกจะปะปนกับการจัดเรียงตัวขณะก่อผลึกทำให้สูญเสียระเบียบโครงสร้าง หลังจากทำความสะอาดภาชนะปลูกผลึกด้วยแอลกอฮอล์ และเครื่องอัลตราโซนิก ผลึกที่ปลูกได้จะมีลักษณะใส ขณะเดียวกันอัตราเร็วอัตราการลดอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกที่ทดลองยังอยู่ในช่วงที่สามารถก่อผลึกได้ดี จึงไม่ให้เกิดความแตกต่างของผลึก สิ่งที่พบในการทดลองเบื้องต้น คือ หากหลุดปลูกผลึกไหลออกจากเตาหลอมมากเกินไปขณะระบบเย็นตัวจะทำให้เกิดการแตกหักตรงตำแหน่งผลึกกับหลอดเปล่า เนื่องจากความแตกต่างของความจุความร้อนภายในหลอด ทั้งนี้ได้มีการทดลองปลูกผลึก CsI โดยการเจือร่วมสองชนิด คือ ผงเทลเลียมไอโอไดด์ (Tl) และสารตีบุก (Tin, Sn) ที่อยู่ในรูปของก้อนโลหะ พบว่า ผลึก CsI(Sn,Tl) ที่ได้ไม่เป็นสารเนื้อเดียวกันและมีรอยแตกของผลึกเกิดขึ้น เพราะตีบุกมีค่าแรงยึดเหนี่ยวในตัวเองสูงทำให้ไม่ไปทำปฏิกิริยากับสารอื่น หากเลือกใช้ตีบุกที่อยู่ในรูปผง (SnI) อาจได้ผลึกสมบูรณ์



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างผลึกวัดรังสีที่ปลูกขึ้น

4.3 ทดสอบความเป็นผลึก

การเตรียมผลึกสำหรับนำมาทดสอบคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ จึงใช้เกลือยฉลูซึ่งมีขนาดเล็กตัดชิ้นงานได้ จากนั้นนำไปขัดผิวผลึกให้เรียบและได้ระนาบ โดยใช้กระดาษทรายแบบละเอียด ชนิดกระดาษทรายน้ำ ยี่ห้อ TOA เบอร์ 600 ขัดร่วมกับแอลกอฮอล์ และทำตามด้วยการขัดกับผ้ากำมะหยี่



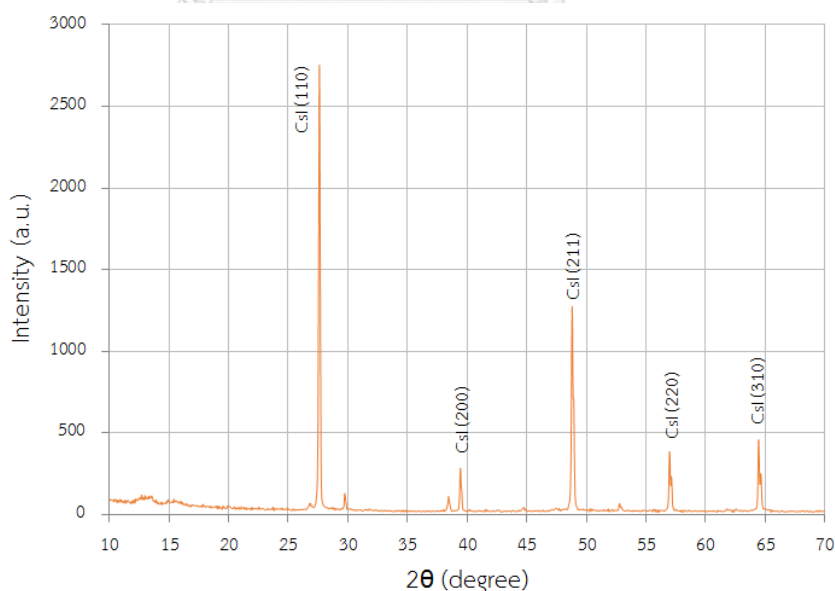
รูปที่ 4.11 การตัดผลึกเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึก

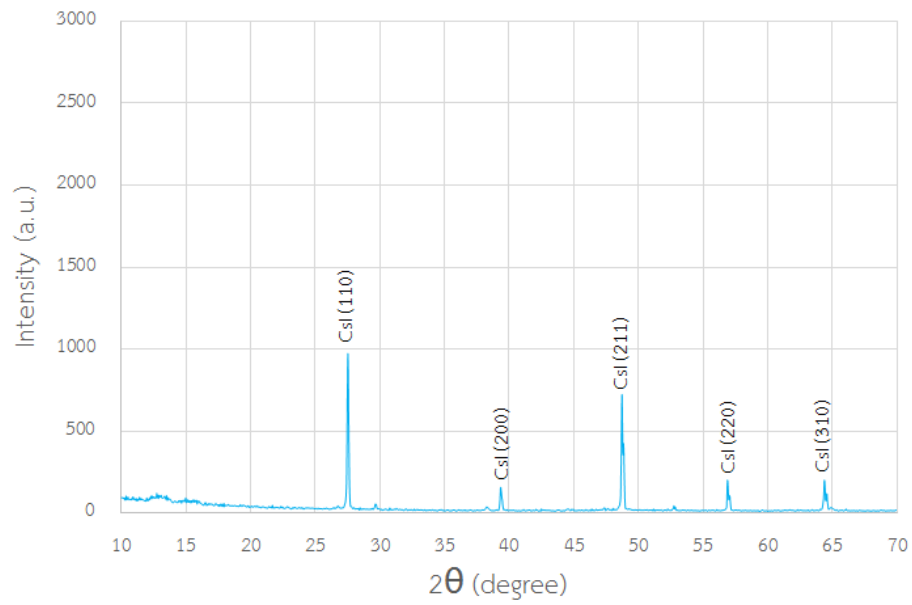
จากการนำผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น X'Pert PRO MPD ของบริษัท PANalytical B.V. ผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งสามผลึกมีโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐานหรือมีโครงสร้างปนกันหลายแบบของผลึกชนิดเดียวกันของโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมแบบคิวบิกและมีโครงสร้างที่โดดเด่นชัดเจนคือ โครงสร้างผลึกระนาบ (110) ดังแสดงในรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 และค่าคงตัวของแลตทิซของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) คือ 0.4564 นาโนเมตร 0.4577 นาโนเมตร และ 0.4551 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าแลตทิซที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลึก CsI คือ 0.455 นาโนเมตร ซึ่งการคาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากการที่มีสารเจือเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอะตอมของผลึก CsI

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

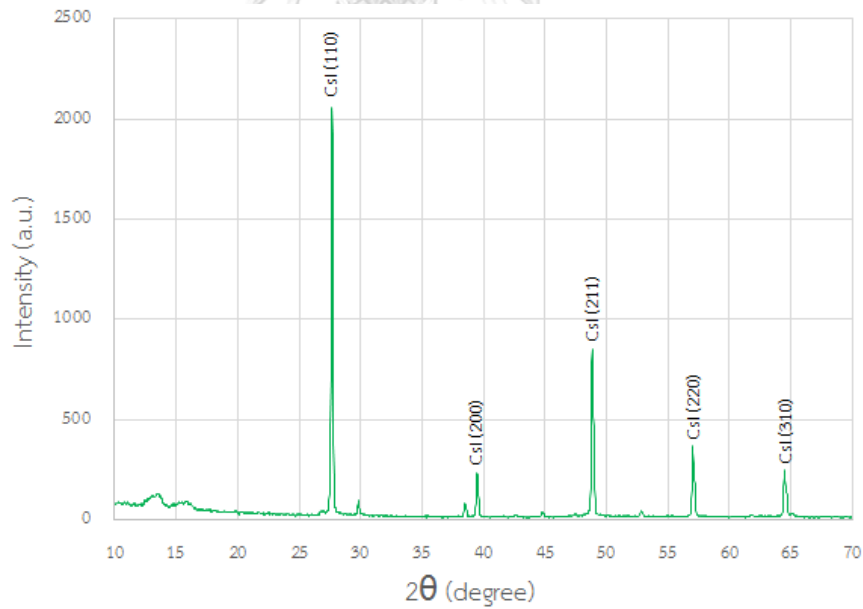
ผลการวิเคราะห์	ผลึก CsI(Tl)	ผลึก CsI(Ca)	ผลึก CsI(Tl,Ca)
โครงสร้างผลึก	พหุสัณฐาน	พหุสัณฐาน	พหุสัณฐาน
ระนาบที่โดดเด่น	(110)	(110), (211)	(110)
ค่าคงตัวแลตทิซ	0.4564 นาโนเมตร	0.4577 นาโนเมตร	0.4551 นาโนเมตร



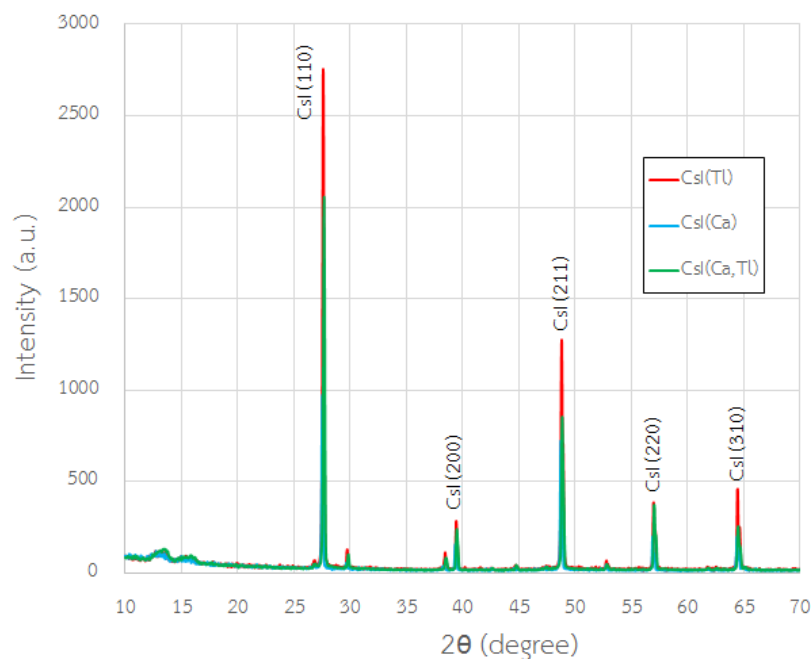
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Tl) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของ ระนาบ (110)



รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Ca) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุสัมพันธ์ฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของระนาบ (110) และระนาบ (211)



รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์จากเทคนิค XRD ของผลึก CsI(Tl,Ca) แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบพหุสัมพันธ์ฐานที่มีโครงสร้างเด่นชัดของ ระนาบ (110)



รูปที่ 4.15 การเทียบผลวิเคราะห์จากXRD ของผลึก CsI(TL), CsI(Ca) และCsI(Tl,Ca) ที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบเด่นชัดของ ระบาย พหุสัญญาณ โดยมีโครงสร้าง (110)

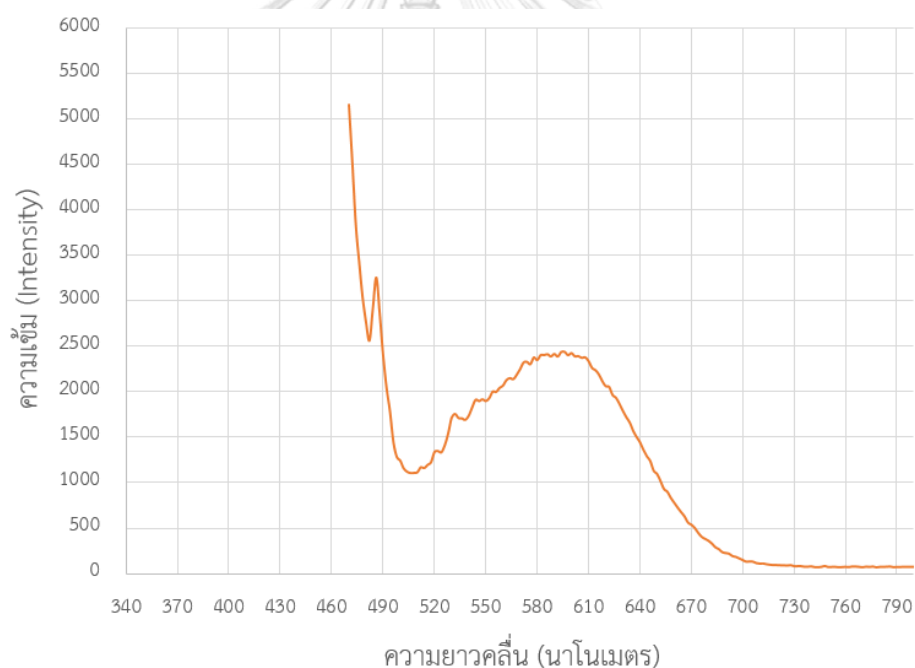
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเรืองแสงของผลึก

การวิเคราะห์สมบัติแสงของผลึกถึงประสิทธิภาพการเรืองแสงเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น โดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งทำการทดลองโดยการส่องแสงกระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ผ่านแผ่นฟิล์มกรองความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ก่อนตกกระทบมายังก้อนผลึก จากนั้นเมื่อผลึกได้รับการกระตุ้นระดับพลังงานและเมื่อกลับสู่ภาวะพื้นก็จะมีเปล่งแสงออกมาซึ่งนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละสารประกอบ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการเปล่งแสงหรือการเรืองแสงของผลึก พบว่า ผลึก CsI(TL) มีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร สำหรับกรณีผลึก CsI(Ca) โดยการส่องแสงกระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร และให้มีการผ่านแผ่นฟิล์มกรองความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ผลึกมีการเปล่งแสงลักษณะพีคหลายพีคในช่วง 420-450 นาโนเมตร โดยมีพีคที่เด่นชัดที่มีความยาวคลื่นประมาณ 425 และ 450 นาโนเมตร และผลึก Cs(Tl,Ca) ทำการส่องแสงกระตุ้นที่มีความคลื่น 350 นาโนเมตร โดยผ่านแผ่นฟิล์มกรองความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ซึ่งผลึกมีการเปล่งแสงลักษณะพีคหลายพีคเช่นเดียวกันกับผลึก CsI(Ca) คือในช่วง 420-450 นาโนเมตร ทั้งสองผลึกแสดงให้เห็นว่า มีการเปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่น ซึ่งอาจมาจากการที่ผลึกมีโครงสร้างแบบพหุผลึกชัดเจนกว่าผลึก CsI(TL) ดังผลที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค XRD โดยที่สเปกตรัมการเรืองแสงของผลึกทั้งสองโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.16,

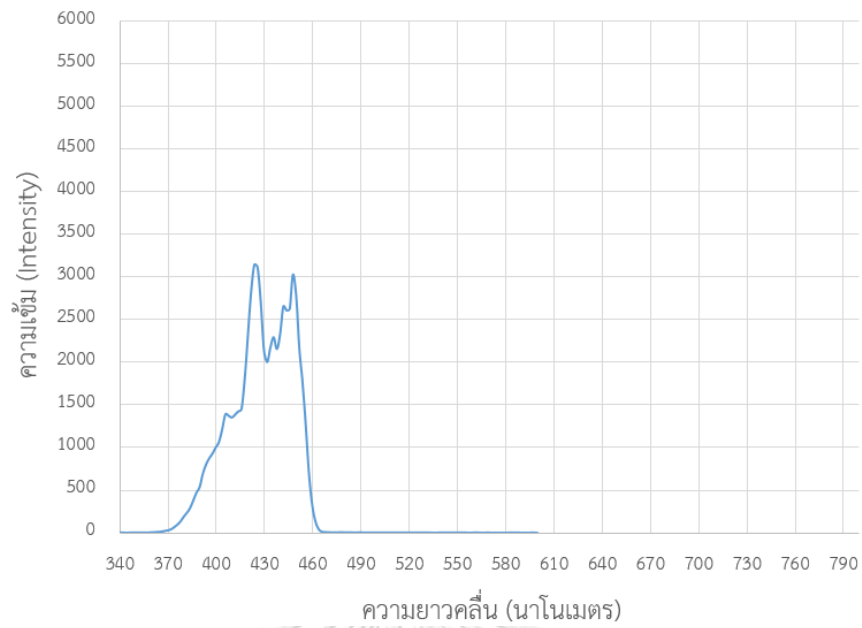
4.17 และ 4.18 สำหรับผลึก Cs(Tl,Ca) ได้มีการส่องด้วยแสงด้วยหลอด UV เบื้องต้นพบว่าผลึกมีการเรืองแสงในย่านที่ตาสามารถมองเห็นได้เป็นสีเหลืองอมส้ม ทำให้สันนิษฐานได้ว่ามีสาร Tl หลงเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ จนไม่แสดงผลด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างที่มากเกินไปของจุดหลอมเหลวระหว่าง Ca_2 กับ Tl

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

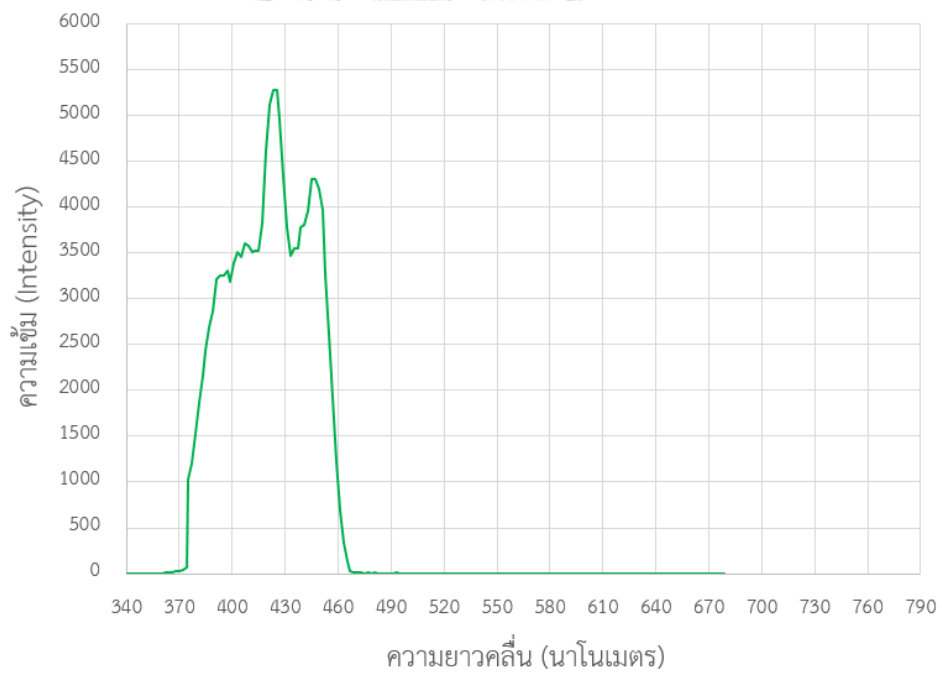
ผลึก	แสงกระตุ้น	แผ่นฟิล์มกรองแสง	การเปล่งแสงของผลึก
Cs(Tl)	450 นาโนเมตร	500 นาโนเมตร	590 นาโนเมตร
Cs(Ca)	200 นาโนเมตร	450 นาโนเมตร	420-450 นาโนเมตร
Cs(Tl,Ca)	350 นาโนเมตร	450 นาโนเมตร	420-450 นาโนเมตร



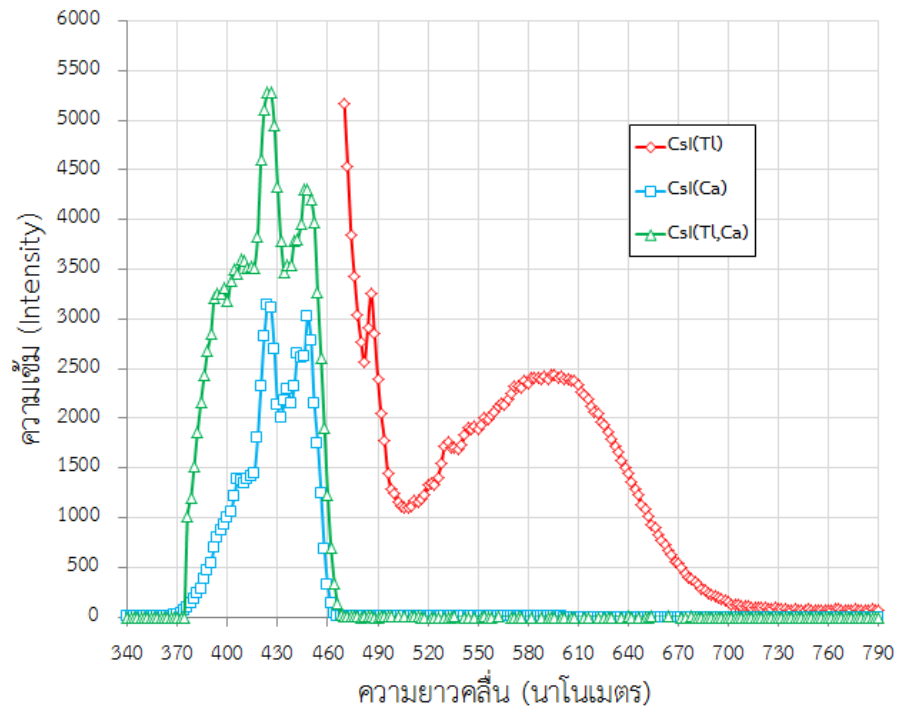
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Tl)



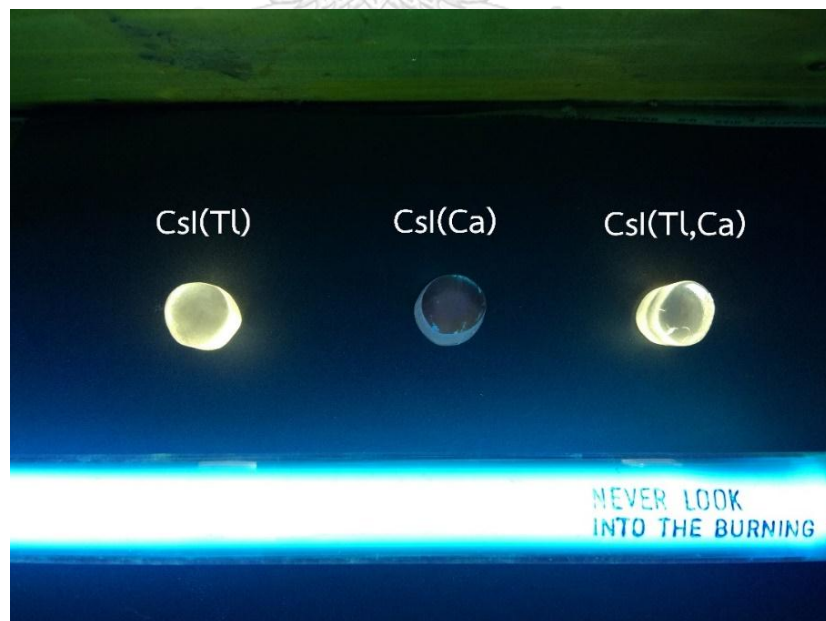
รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Ca)



รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Tl,Ca)



รูปที่ 4.19 การเทียบผลวิเคราะห์จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงคุณลักษณะการเรืองแสงของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)



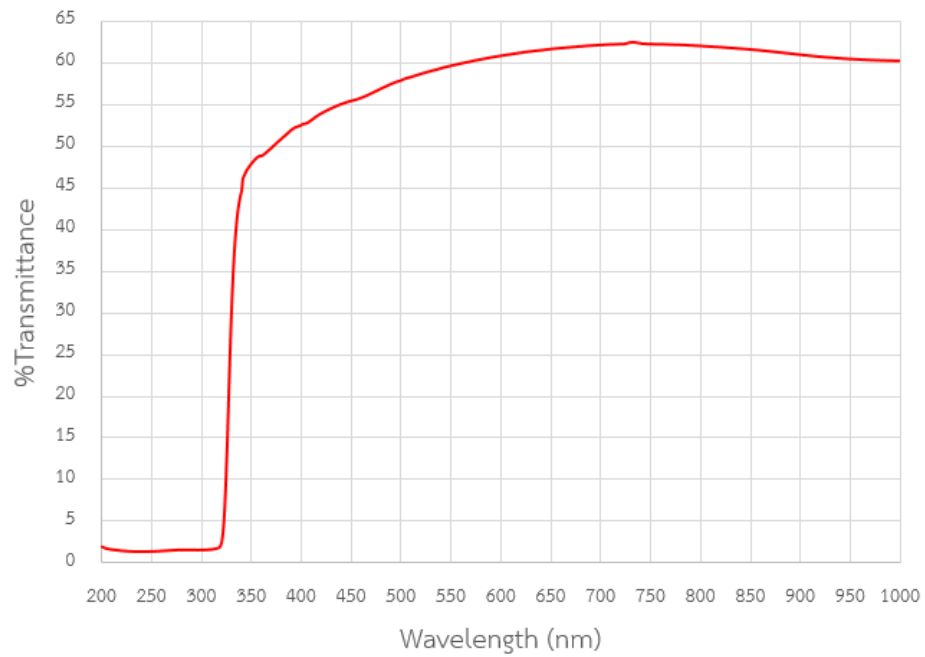
รูปที่ 4.20 ภาพการส่องด้วยแสงด้วยหลอด UV เบื้องต้นของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ส่องผ่านแสงภายในผลึก

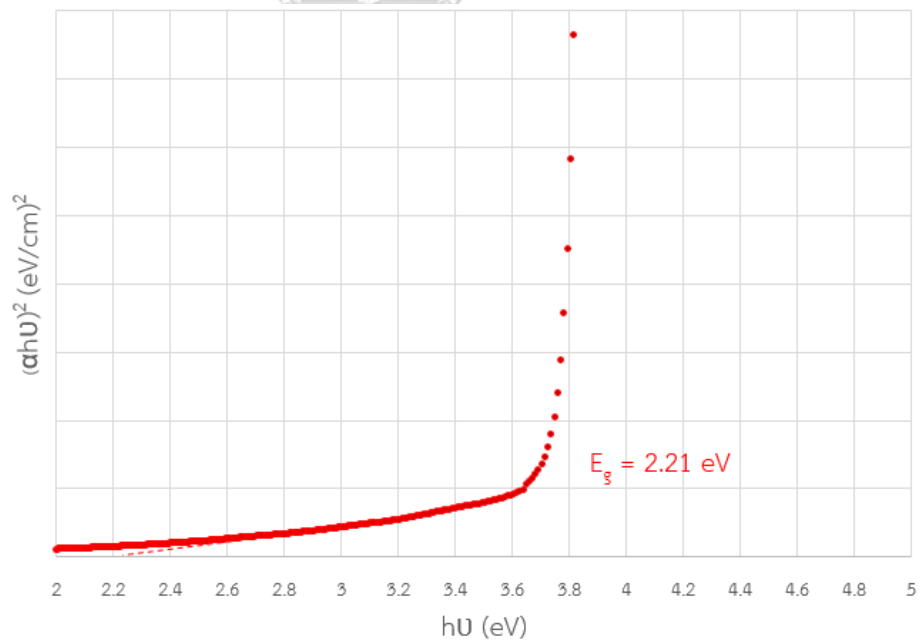
การวิเคราะห์สมบัติแสงของผลึกถึงการตอบสนองการส่องผ่านหรือการดูดกลืนแสงของผลึกสำหรับความยาวคลื่นในแต่ละย่านด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrometry พบว่า ผลึก CsI(Tl) มีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร และเกิดสภาวะโปร่งแสงเต็มที่เพียงประมาณ 60% ที่ความยาวคลื่นประมาณ 561 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.21$ อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับผลึก CsI(Ca) พบว่า มีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร และสภาวะโปร่งแสงเต็มที่เพียงประมาณ 55% ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.88$ อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อนำผลึก CsI(Tl,Ca) มาทำการวิเคราะห์ พบว่า มีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 310 นาโนเมตร และเกิดสภาวะโปร่งแสงเต็มที่เพียงประมาณ 55% ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.48$ อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์สมบัติแสงทั้งสองเทคนิคนี้มีความสอดคล้องกัน โดยสรุปได้ว่า ผลึก CsI(Ca) ที่ปลูกนี้มีสมบัติแสงที่มีการตอบสนองได้ดีในย่านความคลื่นประมาณ 420-430 นาโนเมตร หรือคลื่นแสงใกล้ย่านแสงยูวี ส่วนผลึก CsI(Tl,Ca) มีสมบัติแสงที่มีการตอบสนองได้ดีในย่านความคลื่นประมาณ 500-600 นาโนเมตร และผลึก CsI(Tl) ที่ปลูกนี้มีสมบัติแสงที่มีการตอบสนองได้ดีในย่านความยาวคลื่นประมาณ 550-600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของผลึก CsI(Tl) ที่ใช้งานทั่วไป

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การส่องผ่านแสงภายในผลึก

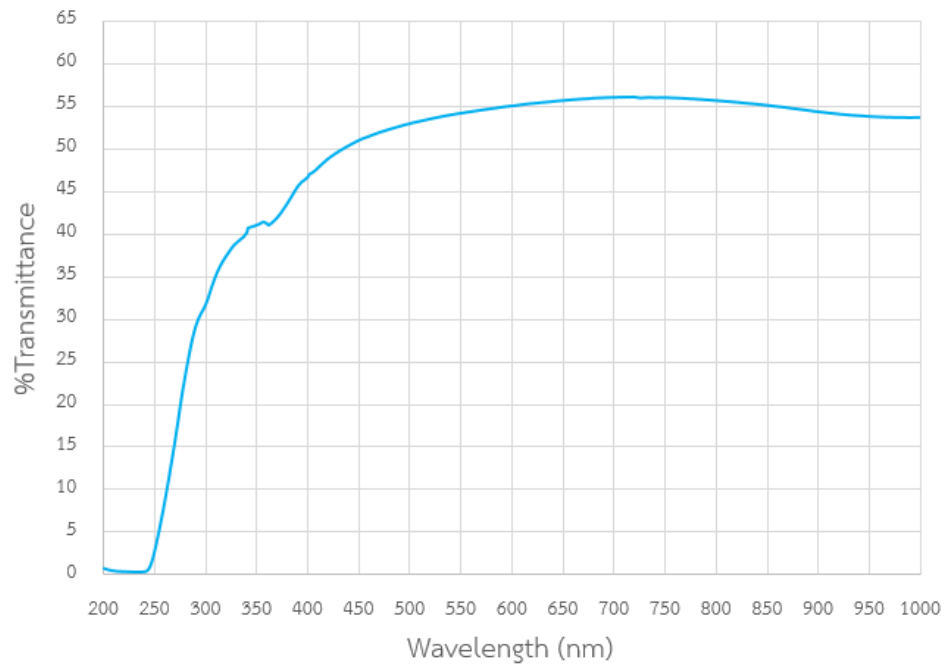
ผลึก	จุดเริ่มต้นการ โปร่งแสง	ความยาวคลื่น ที่สภาวะโปร่ง แสงเต็มที่	ร้อยละของการ เกิดสภาวะโปร่ง แสง	ค่า E_g (อิเล็กตรอน โวลต์)
CsI(Tl)	320 นาโนเมตร	561 นาโนเมตร	60	2.21
CsI(Ca)	240 นาโนเมตร	430 นาโนเมตร	55	2.88
CsI(Tl,Ca)	310 นาโนเมตร	500 นาโนเมตร	55	2.48



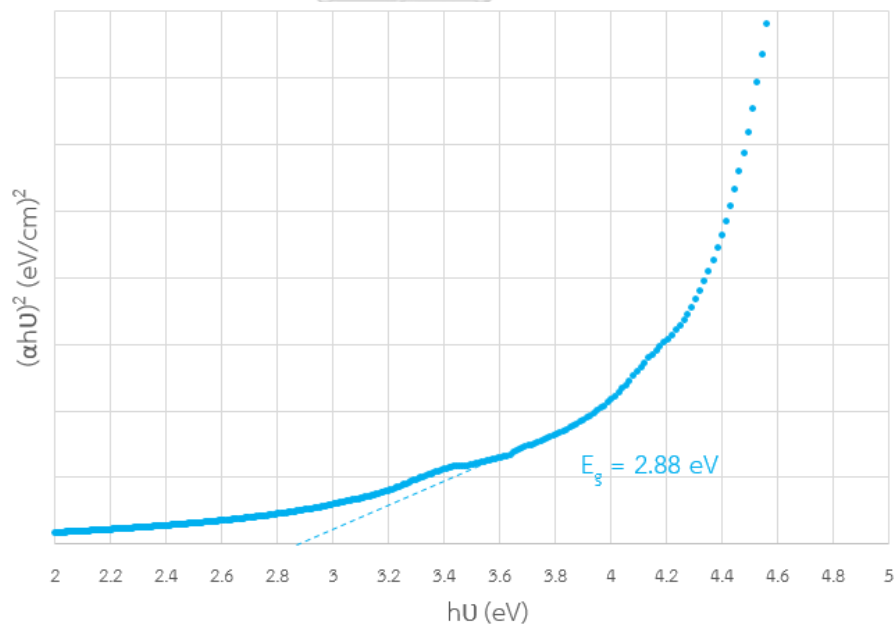
รูปที่ 4.21 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร



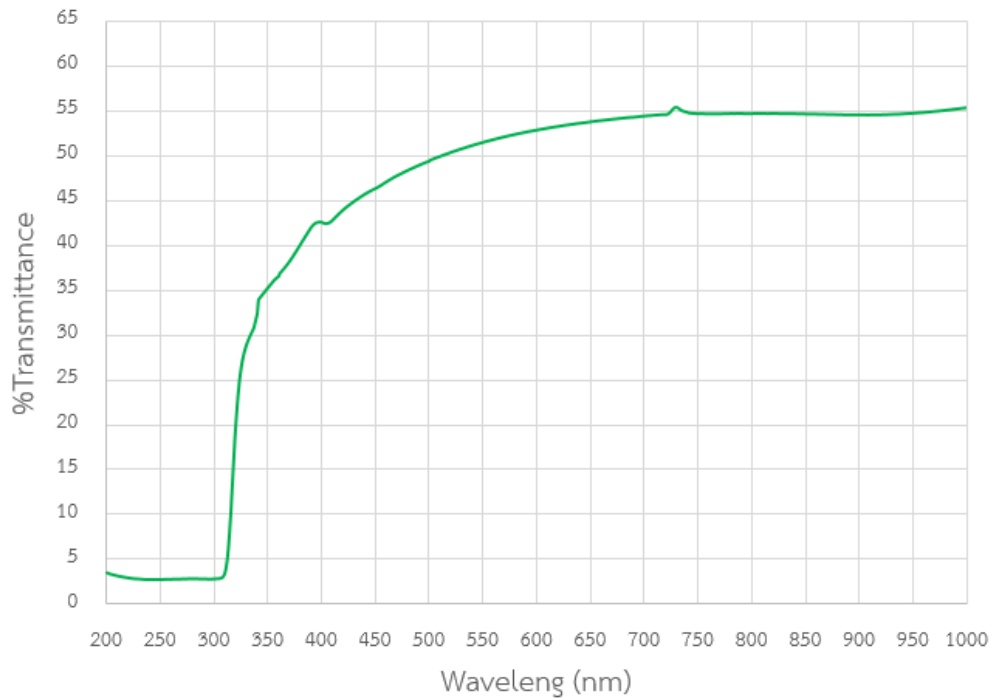
รูปที่ 4.22 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl)



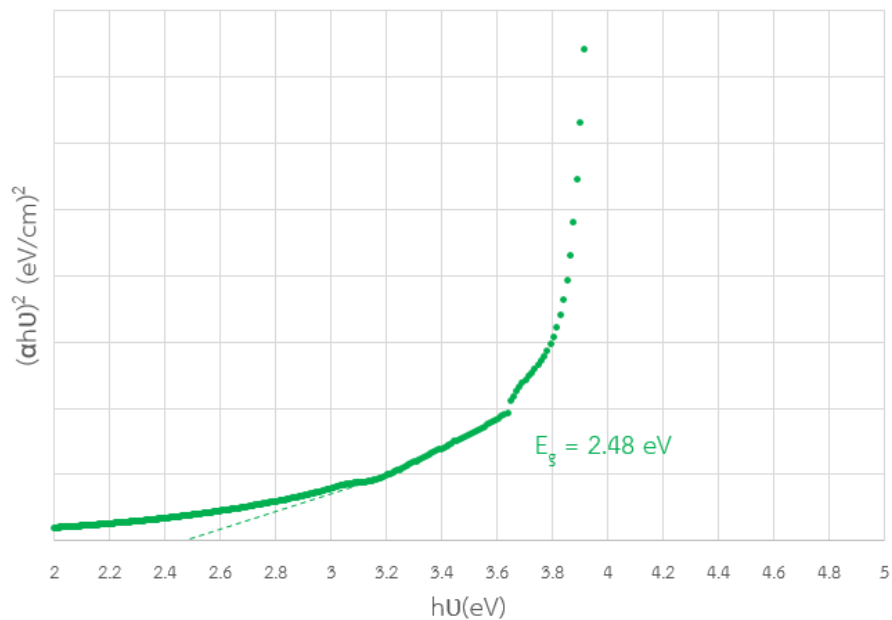
รูปที่ 4.23 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร



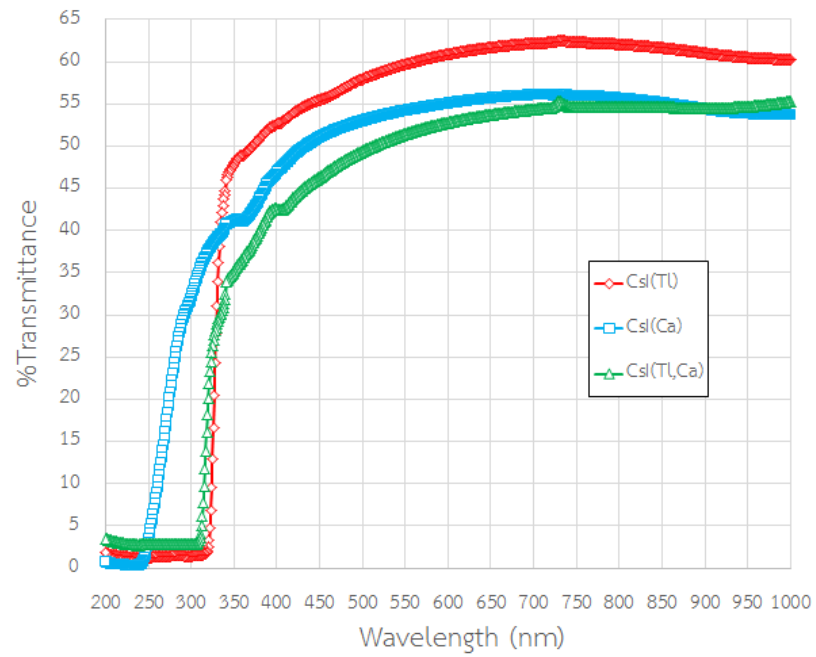
รูปที่ 4.24 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Ca)



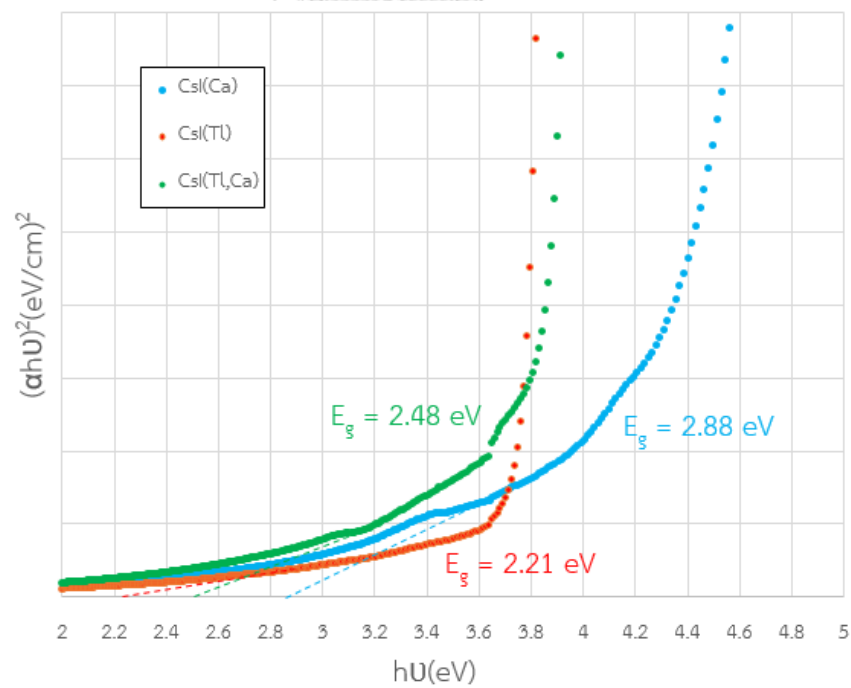
รูปที่ 4.25 การส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl,Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 310 นาโนเมตร



รูปที่ 4.26 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl,Ca)



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบการส่องผ่านแสงในผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นการโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร, 240 นาโนเมตร และ 310 นาโนเมตร ตามลำดับ



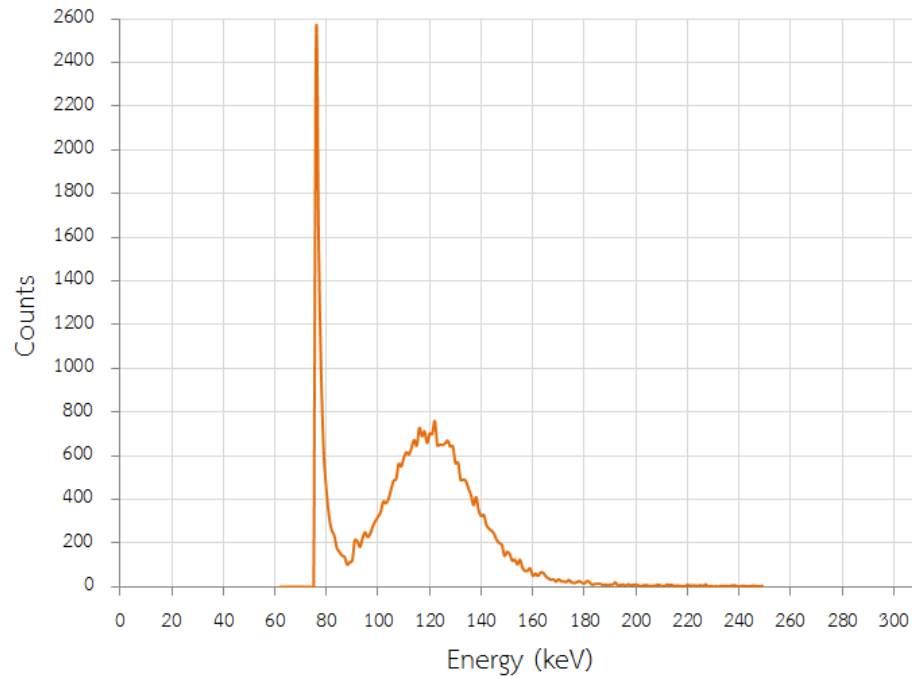
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก

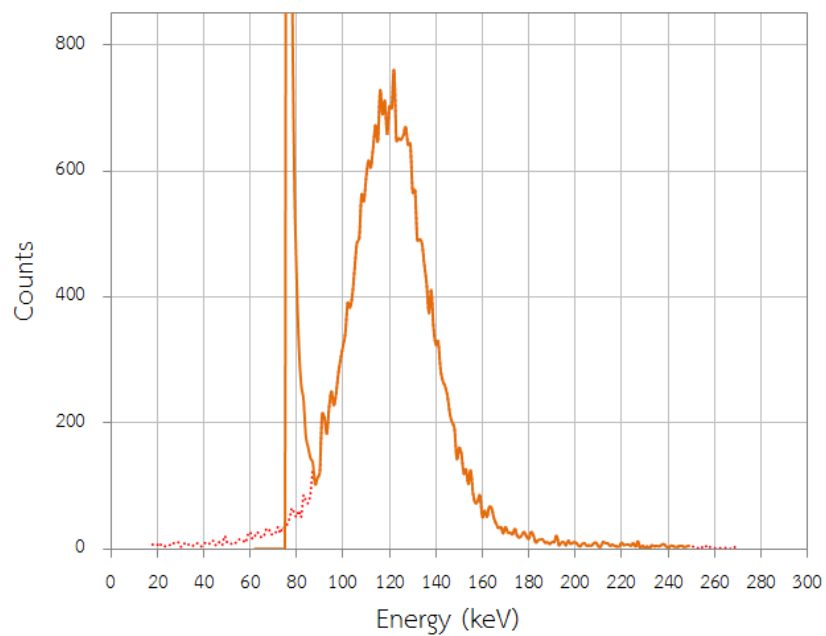
การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก โดยนำผลึกที่ปลูกได้นี้ทำการตัดผลึกเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร แล้วนำมาประกบกับหลอดทวิคูณแสง และต่อเข้ากับระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากแหล่งกำเนิดรังสี Co-57 โดยก่อนประกบเข้ากับอุปกรณ์ไวแสงจะต้องขัดผิวหน้าออกให้ถึงส่วนของผลึกที่ใส แล้วใช้สารเชื่อมประสานผิวหน้า (Fluid coupling) เพื่อให้หน้าสัมผัสผิวหน้าสนิทกับผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสง ลดการสูญเสียความเข้มประกายแสงที่หักเหจากทิศทาง และจำเป็นต้องปิดเทปกาวสีดำทึบแสงเพื่อป้องกันการแสงรบกวนจากภายนอกเข้าสู่ผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสง ผลทดสอบนี้ พบว่า ผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 81, 60 และ 89 ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังแยกพลังงานของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) คือร้อยละ 27.87, 60.38 และ 40.98 ตามลำดับ ซึ่งยังคงมีค่าความจำแนกระดับพลังงานที่ยังค่อนข้างสูง เนื่องจากยังมีการตัดและการขัดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวผลึก CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) นี้เองยังคงมีสถานะเงื่อนไขการปลูกผลึกที่ยังคงต้องปรับปรุงเพิ่มมากขึ้น โดยสเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่วัดด้วยหัววัดผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) ที่ปลูกได้นี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.29, 4.31 และ 4.33 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก

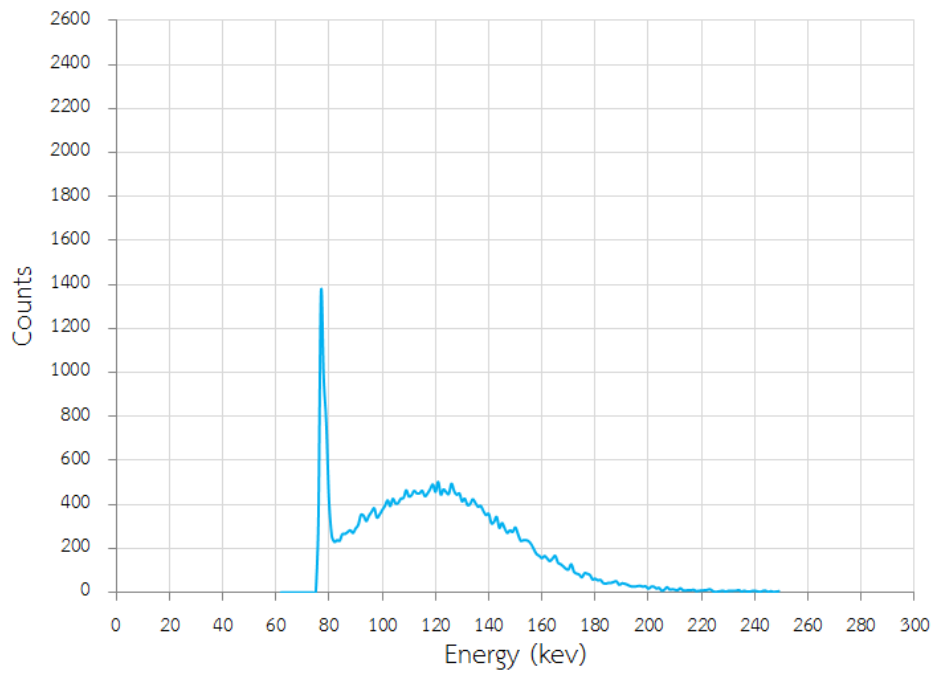
ผลึก	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของพลังงาน (E_{abs})	ประสิทธิภาพการวัดรังสี (E_{int})	กำลังแยกพลังงาน
CsI(Tl)	0.20%	81%	27.87%
CsI(Ca)	0.15%	60%	60.38%
CsI(Tl,Ca)	0.22%	89%	40.98%



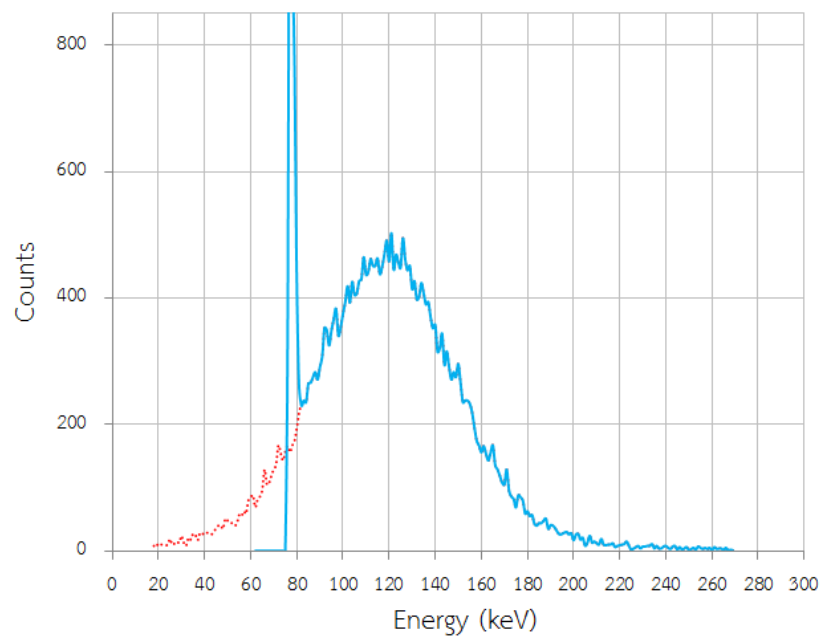
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl)



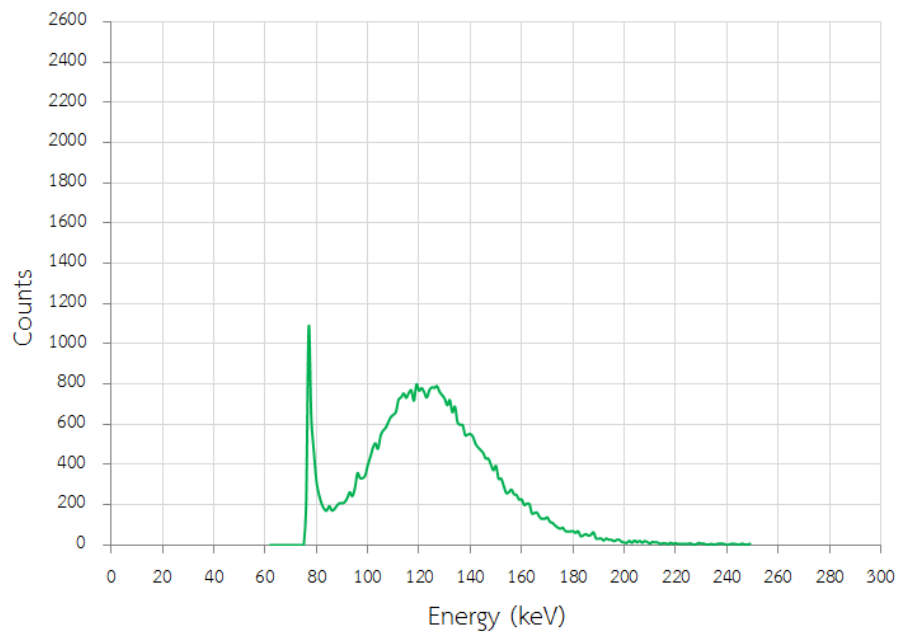
รูปที่ 4.30 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน



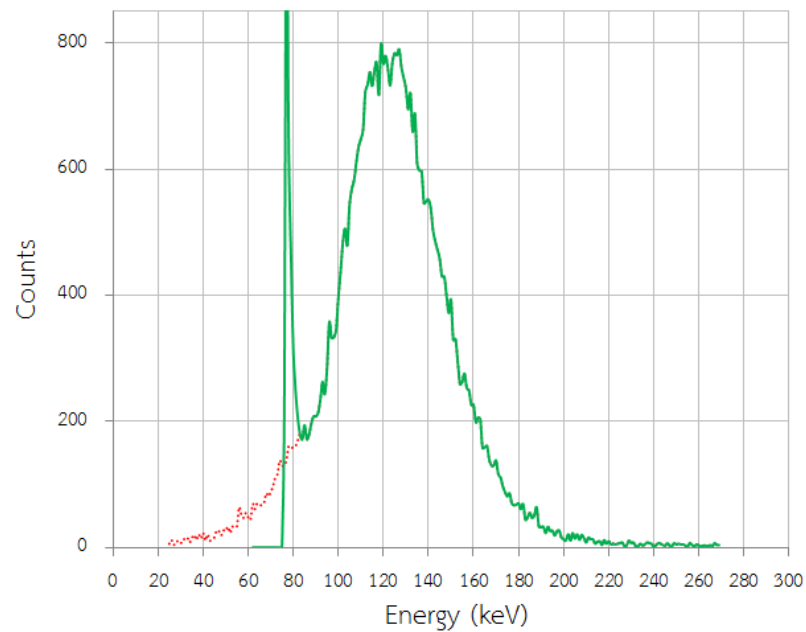
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสีCsI(Ca)



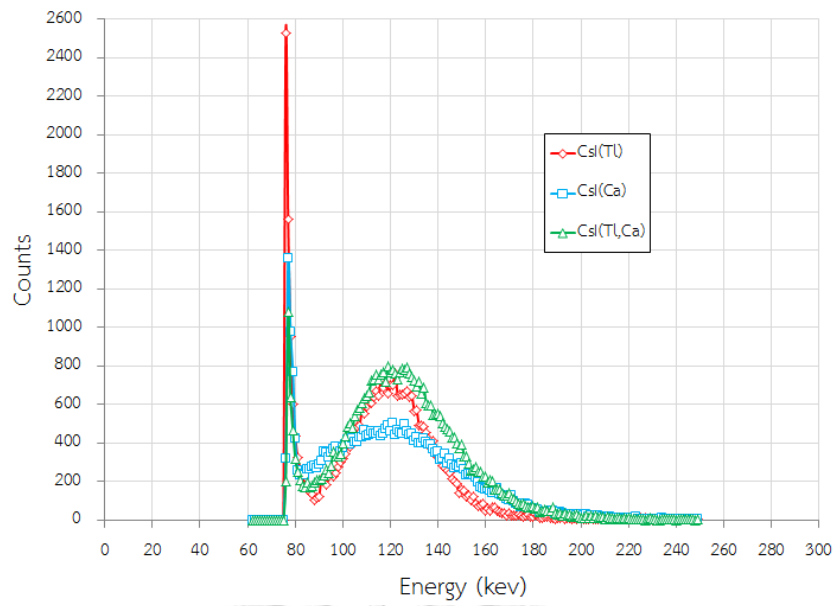
รูปที่ 4.32 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Ca) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl,Ca)



รูปที่ 4.34 แบบจำลองสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl,Ca) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.35 การเทียบสเปกตรัมของรังสีแกมมาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลึกวัสดุรังสี CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาผลึกซีเซียมไอโอไดต์โดยเทคนิคการเจือสารร่วมหลายชนิดด้วยกระบวนการปลูกผลึก อย่างง่าย ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ทดสอบคุณลักษณะของเตาที่พัฒนาระบบและกระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของผลึก และส่วนสุดท้ายศึกษาผลการตอบสนองการวัดรังสีแกมมา ซึ่งผลการวิจัยพอสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกพบว่าเตาปลูกผลึกมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ดี โดยเวลาเข้าสู่สภาวะเสถียรมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสาร ซึ่งผลึก CsI(Tl) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เข้าสู่สภาวะเสถียรเร็วที่สุดในเวลา 7 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง สำหรับผลึก CsI(Ca) กับ CsI(Tl,Ca) ซึ่งผลจากการวัดแอมพลิจูดของอุณหภูมิทำให้ทราบค่าอัตราการเกิดผลึก โดยมีอัตราการตกผลึกของ CsI(Tl) คือ 0.65 มิลลิเมตร/ชั่วโมง และ CsI(Ca), CsI(Tl,Ca) คือ 0.57 มิลลิเมตร/ชั่วโมง

5.1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของผลึกจากการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดต์โดยเทคนิคการเจือสาร Tl และ Ca ในสัดส่วนสารเจือไม่เกินร้อยละ 1 พบว่า ผลึกทั้งสามที่ปลูกนี้มีโครงสร้างผลึกแบบพหุสัณฐาน และโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่เด่นชัด คือ โครงสร้างผลึกระนาบ (110) สำหรับประสิทธิภาพการเรืองแสงของผลึก พบว่า ผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร , 425 นาโนเมตร และ 425 นาโนเมตร ตามลำดับ และสมบัติการส่องผ่านแสง พบว่า ผลึก CsI(Tl) มีการตอบสนองทางแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นประมาณ 560 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.21$ อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับผลึก CsI(Ca) มาทำการวิเคราะห์ พบว่า มีการตอบสนองทางแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร สัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.95$ อิเล็กตรอนโวลต์ และผลึก CsI(Tl,Ca) มีการตอบสนองทางแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์ถึงค่า $E_g = 2.48$ อิเล็กตรอนโวลต์

5.1.3 ผลการใช้ผลึกเป็นผลึกวัดรังสีประกอบด้วยหลอดไวแสงชนิดทิวคูณอิเล็กตรอนของบริษัท RCA รุ่น 5819 วัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาาระดับพลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 133 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่า ผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca) มีประสิทธิภาพการวัดรังสีร้อยละ 81, 60 และ 89 โดยมีค่ากำลังแยกพลังงานของผลึก CsI(Tl), CsI(Ca) และ CsI(Tl,Ca)

คือร้อยละ 27.87, 60.38 และ 40.98 ตามลำดับ ถึงแม้ยังคงมีค่าความจำแนกระดับพลังงานที่ยังค่อนข้างสูง แต่มีแนวโน้มในการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพได้ รวมถึงการศึกษาถึงวิธีการหรือการประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดรังสีตามย่านความยาวคลื่นที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

ในส่วนของผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าการขัดส่วนหน้าของผลึกให้เรียบ และการตัดผลึกให้ได้ขนาดของผลึกที่เท่ากันมีความจำเป็นมากในการนำมาวิเคราะห์ เพราะส่งผลให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ ซึ่งเห็นได้ชัดมากจากกราฟการเปรียบเทียบการส่องผ่านแสงในผลึกดังแสดงในรูปที่ 4.27 ค่าของร้อยละของแสงที่ส่องผ่านผลึกมีค่าไม่เท่ากัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากผลึก CsI(Ca) ที่ปลูกได้นี้มีการเปล่งแสงอยู่ในย่านความยาวคลื่นที่ยังไม่ค่อยเหมาะสมในการที่จะประกอบกับหลอดทวิคูณแสง หรือ หลอด PMT ที่มีอยู่เพื่อใช้ในการวัดรังสี ปัญหานี้จึงจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขโดยเปลี่ยนเป็นทดสอบกับหลอด PMT ที่มีความไวต่อความยาวคลื่นที่ผลึกปล่อยออกมา

5.3.2 จุดหลอมเหลวของสารที่นำมาเจือ คือ CaI กับ Tl มีค่าจุดหลอมเหลวที่ต่างกันมาก จึงทำให้เกิดการระเหยออกจากผิวหน้าของ CsI ซึ่งมีผลต่อปริมาณสารเจือในเนื้อผลึกแม้ว่าระบบจะเป็นระบบปิดแล้วก็ตาม ปัญหานี้จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบภาชนะปลูกผลึกให้ปริมาตรที่เพียงพอต่อการปลูก โดยคำนึงถึงความดันของภายในภาชนะปลูกในขณะที่ทำการปลูก ให้เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ภาชนะเกิดการแตกระหว่างทำการปลูกผลึก

5.3.4 ควรมีการศึกษาสารเจือที่หลากหลายขึ้น โดยเลือกสารที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกัน ราคาถูก และไม่เป็นสารพิษ

รายการอ้างอิง

1. Phannee Saengkaew. 2016. **Impact of precursor purity on optical properties and radiation detection of CsI:Tl scintillators.** Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
2. A. Lindsey, W. McAlexander, L. Stand, Y. Wu, M. Zhuravleva, C.L. Melcher. 2015. **Crystal growth and spectroscopic performance of large crystalline boules of CsCaI₃:Eu scintillator.** Materials Science and Engineering Department, The University of Tennessee, Knoxville, TN, USA.
3. Mariya Zhuravleva, Bonnie Blalock, Kan Yang, Merry Koschan, Charles L. 2012. **New single crystal scintillators : CsCaI₃:Eu and CsCaCl₃:Eu.** Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA.
4. วิญญู สกุลจรรยาพร. 2542. **การพัฒนาหัววัดรังสีซีเอ็มไอโอไดต์ร่วมกับไดโอด p-i-n สำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. มานิตย์ จิตรภักดี. 2546. **การพัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผลึกซีเอ็มไอโอไดต์ (ทลเลียม).** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. มานิตย์ จิตรภักดี. 2552. **การพัฒนาผลึกวัดรังสีชนิดสารอินทรีย์ที่มีสมรรถนะสูงในการวิเคราะห์พลังงานรังสีแกมมา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. ดวงชีวัน จันครอง. 2552. **การวัดคุณภาพและปริมาณรังสีแกมมาในดิน โดยใช้หัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง(HPGe).** Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST). 25(17): 123-130
8. นันทวัฒน์ อุ่ดี, สุชาติ แยมเม่น. 2556. **การสร้างหัววัดรังสีแกมมาสำหรับเครื่องโทรอยด์อัปเดต.** วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ : 21. 25(พิเศษ): 24-29



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของซีเซียมไอโอไดด์

Csl	
Caesium Iodide	
<u>Description</u>	
<p>The material with the deepest known IR transmission, Csl is sometimes used for components in the widest range spectrophotometers. An extremely soft material it is extremely difficult to polish and so performance is compromised for range. Doped with thallium, Csl(Tl) is a useful scintillator which emits at a wavelength which is a good match for silicon photodiodes. Arrays of this material are used in security imaging systems.</p>	
<u>Properties</u>	
Apparent Elastic Limit (MPa)	5.6 (810psi)
Bulk Modulus (K) (GPa)	12.67
Cleavage Planes	None
Decay Constant (μ s)	0.03 & 0.1
Density (g/cm-3)	4.51
Dielectric Constant	5.65 at 1MHz
Elastic Coefficient C11	24.6
Elastic Coefficient C12	6.7
Elastic Coefficient C44	6.24
Emission Spectral Range (nm)	250 to 500
Hardness (knoop) (100) direction	20.0
Melting Point ($^{\circ}$ C)	621
Molecular Weight	259.83
Peak Scintillation Wavelength (nm)	310
Photons/MeV	16,800

Poisson Ratio	0.214
Radiation Length (cm)	1.86
Reflection Loss (%)	13.6 at 11 μ (2 surfaces)
Refractive Index	1.78 at 10°C
Shear Modulus (G) (GPa)	6.24
Solubility (g/100g H ₂ O)	44.0 at 273K
Specific Heat Capacity (J.kg.m ⁻¹ .K ⁻¹)	201
Stability	Deliquescent
Structure	Cubic
Temperature Coefficient of Light Output (%.K ⁻¹)	-0.53
Thermal Conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1.1 at 298K
Thermal Expansion (K ⁻¹)	48.3 X 10 ⁻⁶ at 293K
Transmission Range (μ)	0.25 to 55.0
Youngs Modulus (E) (GPa)	5.3

CsI(Tl)	
Thallium doped Caesium Iodide	
<u>Properties</u>	
After Glow	Approx 2.0% after 2ms
After Glow	Approx 2.8% after 1ms
Cleavage Planes	None
Decay Constant (μ s)	1.0
Density (g.cm ⁻³)	4.51
Dielectric Constant	5.65 at 1MHz (298K)
Emission Spectral Range (nm)	375 to 725
Gamma and X-ray absorption coefficients (cm ⁻¹)	0.48 at 660keV
Gamma and X-ray absorption	10.00 at 100keV

coefficients (cm-1)	
Elastic Coefficient C44	6.24

Light Escape Cone to Air (°)	34.1
Light Escape Cone to Glass (°)	57.2
Light Escape from one face to Air (%)	8.6%
Light Escape from one face to Glass (%)	22.9%
Melting Point (°C)	621
Optical Transmission Range Peak	240nm to 70°C
Scintillation Wavelength (nm)	565
Photons/MeV	52,000
Radiation Length (cm)	1.86
Refractive Index at peak emission	1.78
Soluble in Alcohol	Yes
Specific Heat (J.kg-1.K-1)	0.048
Stability	Slightly Hygroscopic
Structure	BCC
Temperature Coefficient of Light Output (%.°C ⁻¹)	+0.32
Thermal Conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1.13 at 298K
Water Solubility (g/100ml H ₂ O)	44 at 273K
Youngs Modulus (GPa)	5.3

ภาคผนวก ข.

แสดงคุณสมบัติของขดลวดความร้อน

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 Al Fe	5.8		22 Balance	5.3	
Density, g/cm ³ lb/in ³	7.10...0.256		7.15...0.258		
Electrical resistivity at 20 °C, Ω mm ² m ⁻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			- 11-10 ⁻⁶ 12-10 ⁻⁶ 14-10 ⁻⁶ 15-10 ⁻⁶		
Thermal conductivity at 50 °C, W m ⁻¹ K ⁻¹ 122 °F, Btu in ft ⁻² h ⁻¹ °F ⁻¹			11...76		
Specific heat capacity, kJ kg ⁻¹ K ⁻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 ⁻² min ⁻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				

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

**4.0 mm 0.16 in. Finer gauges have higher strength and hardness values while the corresponding values are lower for heavier gauges.

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

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

$$in^2/\Omega = \frac{FC_i}{\rho}$$

I = Current
 C_i = Temperature factor
 ρ = Surface load W/in²

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

°F	68	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372
C _i	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	inch	Resistance at 68°F Ω/ft	in ² /Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in ² /ft	Cross sectional area in ² 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 $\Omega/\text{sq. mil ft}$ 657
Density, lb/cu.in 0.258

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

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	in^2/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in^2/ft	Cross sectional area $\text{in}^2 \times 1000$
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	in^2/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in^2/ft	Cross sectional area $\text{in}^2 \times 1000$	
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.

แสดงคุณสมบัติของอิฐทนไฟ

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

ภาคผนวก ง.

แสดงข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี



เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ PID

PID TEMPERATURE CONTROLLER

คุณสมบัติ

ความแม่นยำ	เทอร์โมคัปเปิล: (±0.3% ของค่าที่วัดได้ หรือ ± 2 °C ขึ้นอยู่กับค่าที่มีค่ามากกว่า) ± 1 digit (ที่ 25 ± 0.5 °C) RTD: (± 0.2% ของค่าที่วัดได้ หรือ ± 0.5 °C, ขึ้นอยู่กับค่าที่มีค่ามากกว่า) ± 1 digit	
อินพุต (ไม่รวมได)	เทอร์โมคัปเปิล: K, J, T, R, U/I6/DIN6 RTD: Pt100Ω (JIS/DIN), 4-20 mA, 0-10 V	
เอาต์พุต	รีเลย์: 5 A/250 VAC, 5 A/30 VDC, COS φ = 1 SPDT พัดลมที่มีขีดสเปคที่รีเลย์ 12 VDC กระแส 4-20 mA โหลดไม่เกิน 400 Ω	
รูปแบบการควบคุม (ไม่รวมได)	PID AUTO-TUNING, PID, PI, PD, P, ON/OFF Proportional Band (PB) = 0.1 ถึง 2600 °C ของช่วงอุณหภูมิ Integral Time (I) = 0-3999 วินาที Derivative Time (D) = 0-3999 วินาที Proportional Time (PT) = 0.5-64 วินาที Anti-reset Windup (ARW) = 0-100% PB ON/OFF Differential (DIF) = 0.0-99.9 °C/°F	
ช่วงวัดอุณหภูมิ (ไม่รวมได)	ขึ้นอยู่กับอินพุต	
ไฟเลี้ยง	85-264 VAC, 50/60 Hz	
สภาวะแวดล้อม	อุณหภูมิ: -10 °C ถึง 55 °C ความชื้น: ไม่เกิน 85% RH	
น้ำหนัก	ไม่เกิน 350 กรัม	
กินไฟ	ไม่เกิน 5 VA	

ขนาดของตัวเครื่อง และช่องเจาะ (มม.)

AR44L

AR33L

AR42L

AR24L

การต่อสาย

**AR44L
AR42L
AR24L**

AR33L

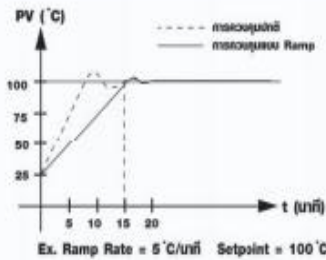
เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ FUZZY+PID

FUZZY+PID TEMPERATURE CONTROLLER



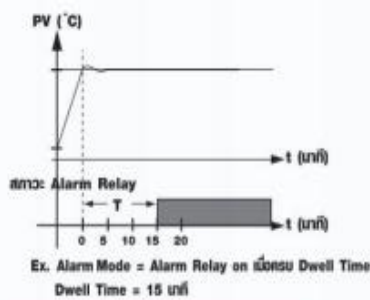
ฟังก์ชันพิเศษ

Ramp Function



สามารถตั้งการควบคุมความชัน (Ramp) ได้เป็นองศา/นาที เพื่อป้องกันการเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิที่รวดเร็วเกินไป ซึ่งอาจเกิดผลเสียต่อชิ้นงานบางประเภท (Soft Start)

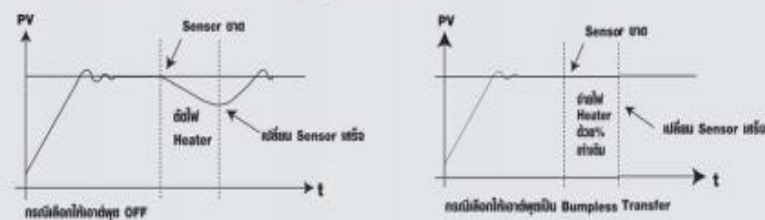
Dwell Timer



สามารถเลือกการทำงานของ Alarm ได้เป็น Timer ได้ (Dwell timer) และตั้งค่า Dwell Time ในหน่วยนาที Timer จะเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงค่า setpoint และ Alarm Relay จะเปลี่ยนสถานะเป็น ON หรือ OFF ตามที่กำหนดไว้เมื่อครบเวลา Dwell Timer ฟังก์ชันนี้ประยุกต์ใช้ได้ในงานต่างๆ เช่น ให้ Alarm Relay ทำงานครบวงจรต่อไปหลังจากควบคุมอุณหภูมิถึงเวลาที่กำหนด หรือคอยให้รอดังเพื่อนำชิ้นงานออก เมื่ออบจนได้ที่ รวมทั้งสามารถใช้ร่วมกับฟังก์ชัน Ramp ได้ด้วย

Bumpless Transfer

กรณีมีปัญหาใดๆเกิดขึ้นในระบบ ไม่ว่าจะเป็นหัววัดขาด หรือเป็นลักษณะ Loop Break Alarm ก็ตาม เครื่องควบคุมควรตัดสินใจเช่นไร ? สำหรับ SFN Series ผู้ใช้สามารถเลือกให้เอาต์พุตทำงานเป็น Bumpless transfer ได้อีกด้วย คือเครื่องควบคุมจะจ่ายสัญญาณควบคุมเดิมเหมือนก่อนที่ระบบจะมีปัญหา ทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิไว้ต่อไปแม้หัววัดจะขาด



การปรับแก้เมนู User Menu

ผู้ใช้สามารถเลือกให้ Parameter บางตัวมาอยู่ในระดับ User ได้ (ดูคู่มือแก้ไขค่าได้โดยกดปุ่มเดียว) เพื่อความสะดวกแก่ผู้ใช้ ไม่จำเป็นต้องเข้าไปปรับจูนทุกครั้งที่

ฟังก์ชัน Sensor Break Alarm

กรณีสัญญาณอินพุตหายไป ผู้ใช้สามารถเลือกให้ Alarm ทำงานได้ เช่น อินพุตเป็นเทอร์มิสตัปชนิด Alarm จะทำงานทันทีเมื่อตรวจพบสัญญาณจากเทอร์มิสตัปหายไป ซึ่งอาจเกิดจากหัววัดขาด, สายหลุด หรือต่อสายไม่แน่น เป็นต้น

ฟังก์ชัน Filter Damping Time Constant

สำหรับปรับความไวสำหรับแสดงค่าอุณหภูมิ (PV) กรณีค่า PV ที่แสดงบนหน้าจอเปลี่ยนแปลงเร็ว (ไม่มีจุด จนไม่สามารถอ่านได้ โดยตั้ง Time Constant ให้มากขึ้น ค่าที่แสดงก็จะไม่ขึ้น



เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ FUZZY+PID

FUZZY+PID TEMPERATURE CONTROLLER

คุณสมบัติทางเทคนิค

โพลีซีล

90 - 264 VAC, 47 - 63 Hz, 12 VA, 5W

สัญญาณอินพุต

ความละเอียด : 18 bits A to D converter
อัตราการสุ่มสัญญาณ : 5 ครั้ง/วินาที
ค่าสูงสุดที่รับได้ : -2 VDC (min), 12 VDC (max)
ผลของอุณหภูมิ : $\pm 1.5 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (ทุกอินพุตยกเว้น mA)
 : $\pm 3 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (สำหรับอินพุต mA)

ผลของความต้านทานในลวดตัวนำ

เทอร์มิสต์ชนิด RTC : 0.2 $\mu\text{V}/\text{Ohm}$
RTD 3 สาย : 2.6 $^{\circ}\text{C}/\text{Ohm}$ (ของความแตกต่างระหว่าง
ความต้านทานในสาย 2 เส้น)

Type	Range	Accuracy @ 25 $^{\circ}\text{C}$	Input Impedance
J	-120 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1000 $^{\circ}\text{C}$ (-184 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 1832 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
K	-200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1370 $^{\circ}\text{C}$ (-328 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 2498 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
T	-200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 300 $^{\circ}\text{C}$ (-418 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 752 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
E	-100 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 900 $^{\circ}\text{C}$ (-148 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 1652 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
B	0 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1800 $^{\circ}\text{C}$ (32 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 3272 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ (200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1800 $^{\circ}\text{C}$)	2.2 M Ω
R	0 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1767.8 $^{\circ}\text{C}$ (32 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 3214 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
S	0 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1767.8 $^{\circ}\text{C}$ (32 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 3214 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
N	-250 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1300 $^{\circ}\text{C}$ (-418 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 2372 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
L	-200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 900 $^{\circ}\text{C}$ (-328 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 1652 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	2.2 M Ω
PT100 (DIN)	-210 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 700 $^{\circ}\text{C}$ (-346 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 1292 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 0.4^{\circ}\text{C}$	1.3 k Ω
PT100 (JIS)	-200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 600 $^{\circ}\text{C}$ (-328 $^{\circ}\text{F}$ ถึง 1112 $^{\circ}\text{F}$)	$\pm 0.4^{\circ}\text{C}$	1.3 k Ω
mV	-8 mV ถึง 70 mV	$\pm 0.05 \%$	2.2 M Ω
mA	-3 mA ถึง 27 mA	$\pm 0.05 \%$	70.5 Ω
V	-1.3 V ถึง 11.5 V	$\pm 0.05 \%$	680 k Ω

ลักษณะการควบคุม

รูปแบบ : ON-OFF, P, PI, PD, Fuzzy+PID

Proportional Band : 0.1-500.0 $^{\circ}\text{C}$
Integral Time : 0-1000 วินาที
Derivative Time : 0-360.0 วินาที
Cycle Time : 0.1-90.0 วินาที
Hysteresis (ON-OFF) : 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 50 $^{\circ}\text{C}$
เอาต์พุต 1 : Reverse (Heating) หรือ
Direct (Cooling)
เอาต์พุต 2 : Cooling หรือ Alarm

เอาต์พุต 1/เอาต์พุต 2

รีเลย์ : 2 A / 240 VAC
พัลส์สำหรับ SSR : 5VDC
กระแสมาตรฐาน : 0-20 mA, 4-20 mA
แรงดันมาตรฐาน : 0-5 V, 1-5 V, 0-10 V (DC)

เอาต์พุต Alarm

รีเลย์ : 2A/220 VAC

มาตรฐานสื่อสาร

การต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์ : RS-232 (1 อุปกรณ์)
RS-485 (ได้ถึง 247 อุปกรณ์)
Protocol : Modbus Protocol RTU mode
Baud Rate : 2.4-38.4 kbits/s
Address : 1-247
Data Bit : 7 หรือ 8 bit
Parity Bit : None, Even หรือ Odd
Stop Bit : 1 หรือ 2 bits

สภาพแวดล้อมการใช้งาน

อุณหภูมิ : -10 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 50 $^{\circ}\text{C}$
ความชื้น : 0 ถึง 90% RH
Vibration Resistance : 10-55 Hz, 10 m/s^2 ใน 2 ชั่วโมง
Shock Resistance : 200 m/s^2

ได้รับมาตรฐาน

Safety : UL61010C-1
CEA C22.2 No.24-93
EN 61010-1 (IEC 1010-1)

มาตรฐานการป้องกัน

หน้าเครื่อง : IP 65
EMC : EN 61326

ภาคผนวก จ.

ข้อมูลการกำหนดเฉพาะของ PMT

Metal Package PMT

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 semiconductor photodetectors, and deliver high gain, wide dynamic range and high-speed response while maintaining small dimensions identical to those of photodiodes. 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

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/W
			Typ. 50	50	75	125	250	
	P Type	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
			Typ. 0.2	0.2	0.4	2	2	
		Dark Current *2 *3	Max. 2	2	4	20	20	
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	
		H5773 Series	H5783 Series	H6779 Series	H6780 Series			
Ripple Noise *2 *4 (peak to peak) Max.		1.2	0.6		0.6		mV	
Settling Time *5		2	0.2		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	

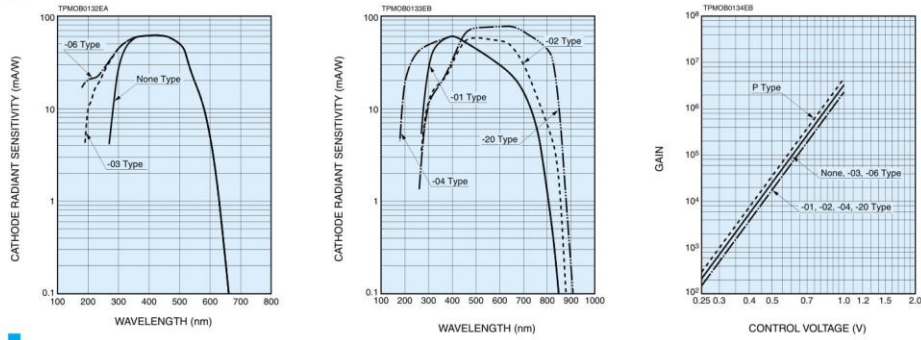
*1: Measured at the peak sensitivity wavelength *2: Control voltage = +0.8 V *3: After 30 minute storage in darkness

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

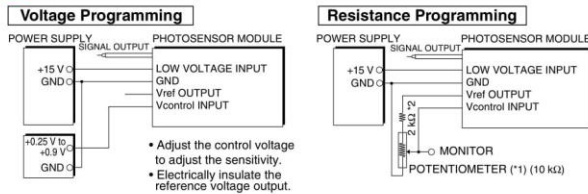
*5: The time required for the output to reach a stable level following a change in the control voltage from +1.0 V to +0.5 V.

Current Output Type Photosensor Modules

Characteristics (Cathode radiant sensitivity, Gain)

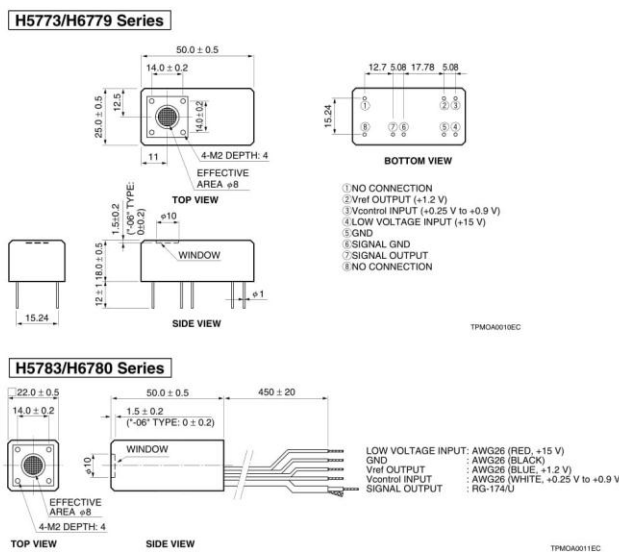


Sensitivity Adjustment Method

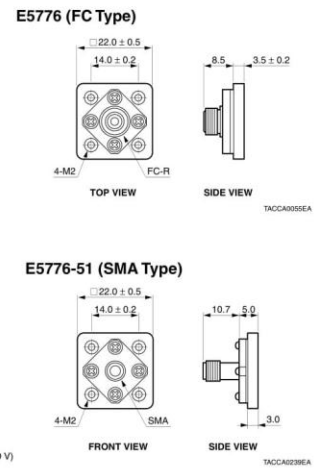


*1: When using a potentiometer to adjust sensitivity, monitor the control voltage so it does not exceed +1.0 V.
 *2: H6779/H6780 series has this 2 kΩ resistor. No external resistor is needed.

Dimensional Outlines (Unit: mm)



Option (Optical Fiber Adapter) (Unit: mm)



ภาคผนวก ฉ.

ฐานข้อมูลของ XRD ของ CaI

00-046-1212

Jul 12, 2018 1:09 PM (xrdxf lab)

Status Primary Quality Mark: Star Environment: Ambient Temp: 298.0 K (Assigned by ICDD editor) Phase: o
 Chemical Formula: Al₂O₃ Empirical Formula: Al₂O₃ Weight %: Al52.93 O47.07 Atomic %: Al40.00 O60.00
 Compound Name: Aluminum Oxide Mineral Name: Corundum, syn Alternate Name: α-Al₂O₃
 Entry Date: 09/01/1996 Last Modification Date: 09/01/2008 Last Modifications: I/Ic

Radiation: CuKα1 (1.5406 Å) d-Spacing: Diffractometer Cutoff: 4.40 Å Intensity: Diffractometer - Peak I/Ic: 1

Crystal System: Rhombohedral SPGR: R-3c (167)

Author's Cell [a: 4.7587(1) Å c: 12.9929(3) Å Volume: 254.81 Å³ Z: 6.00 MolVol: 42.47 c/a: 2.730]
 Calculated Density: 3.987 g/cm³ SS/FOM: F(25) = 378.7(0.0026, 25)

Space Group: R-3c (167) Molecular Weight: 101.96 g/mol
 Crystal Data [XtiCell a: 4.759 Å XtiCell b: 4.759 Å XtiCell c: 12.993 Å XtiCell α: 90.00° XtiCell β: 90.00°
 XtiCell γ: 120.00° XtiCell Vol: 254.81 Å³ XtiCell Z: 6.00 c/a: 2.730 a/b: 1.000 c/b: 2.730]
 Reduced Cell [RedCell a: 4.759 Å RedCell b: 4.759 Å RedCell c: 5.129 Å RedCell α: 62.36°
 RedCell β: 62.36° RedCell γ: 60.00° RedCell Vol: 84.94 Å³]

α: =1.7604 πωβ: =1.7686 Sign: =-

Atomic parameters are cross-referenced from PDF entry 04-007-4873

Space Group Symmetry Operators:

Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator	Seq	Operator
1	x,y,z	4	y,x+y,-z	7	-y,-x,z+1/2	10	-x,-x+y,-z+1/2
2	-x,-y,-z	5	-x+y,-x,-z	8	y,x,-z+1/2	11	-x+y,y,z+1/2
3	-y,-x-y,z	6	x-y,x,-z	9	x,x-y,z+1/2	12	x-y,-y,-z+1/2

ADP Type: B

Atomic Coordinates:

Atom	Num	Wyckoff	Symmetry	x	y	z	SOF	Biso	AET
Al	1	12c	3	0.0	0.0	0.35228	1.0	0.45	6-a
O	2	18e	2	0.3062	0.0	0.25	1.0	0.45	4-a

Crystal (Symmetry Allowed): Centrosymmetric

Subfiles: Cement and Hydration Product, Common Phase, Forensic, Inorganic, Metal & Alloy, Mineral Related (Mineral, Synthetic), Pharmaceutical (Excipient), Superconducting Material

Mineral Classification: Corundum (Supergroup), corundum (Group) Pearson Symbol: hR10.00

Prototype Structure [Formula Order]: Al₂O₃ Prototype Structure [Alpha Order]: Al₂O₃

Cross-Ref PDF #s: 04-002-3621 (Alternate), 04-002-5941 (Alternate), 04-002-8135 (Alternate), 04-003-2497 (Alternate), 04-003-5819 (Alternate), 04-004-2852 (Primary), 04-004-5100 (Alternate), 04-004-5285 (Alternate), 04-004-5434 (Alternate), 04-004-8977 (Alternate), 04-005-4213 (Alternate), 04-005-4311 (Alternate), 04-005-4497 (Alternate), 04-005-4503 (Alternate), 04-005-4505 (Alternate), 04-006-2060 (Alternate), 04-006-3495 (Alternate), 04-006-9359 (Alternate), 04-006-9730 (Alternate), 04-007-1400 (Alternate), 04-007-4873 (Alternate), 04-007-5143 (Alternate), 04-007-9625 (Alternate), 04-007-9768 (Alternate), 04-007-9769 (Alternate), 04-007-9906 (Alternate), 04-010-6476 (Alternate), 04-010-6477 (Alternate)

References:

Type	DOI	Reference
Primary Reference		Huang, T., Parrish, W., Masciocchi, N., Wang, P. Adv. X-Ray Anal. 33, 295 (1990).
Crystal Structure		Crystal Structure Source: LFP.
Structure		Acta Crystallogr., Sec. B: Struct. Sci. 49, 973 (1993).

Database Comments: General Comments: Unit cell computed from dobs. Sample Source or Locality: The sample is an alumina plate as received from ICDD.

d-Spacings (25) - Al₂O₃ - 00-046-1212 (Stick, Fixed Slit Intensity) - Cu Kα1 1.54056 Å

2θ (°)	d (Å)	I	h	k	l	*	2θ (°)	d (Å)	I	h	k	l	*
25.57794	3.479750	45	0	1	2		61.11669	1.515060	2	1	2	2	
35.15192	2.508850	100	1	0	4		61.29812	1.511010	14	0	1	8	
37.77599	2.379470	21	1	1	0		66.51865	1.404520	23	2	1	4	
41.67497	2.165420	2	0	0	6		68.21199	1.373720	27	3	0	0	
43.35504	2.085320	66	1	1	3		70.41808	1.336990	1	1	2	5	
46.17491	1.964320	1	2	0	2		74.29668	1.275550	2	2	0	8	
52.54896	1.740070	34	0	2	4		76.86901	1.239150	29	1	0	10	
57.49573	1.601560	89	1	1	6		77.22381	1.234340	12	1	1	9	
59.73881	1.546670	1	2	1	1		80.41913	1.193150	1	2	1	7	

© 2018 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

Page 1 / 2

00-046-1212 Jul 12, 2018 1:09 PM (xrdxrf lab)

<u>2θ (°)</u>	<u>d (Å)</u>	<u>I</u>	<u>h</u>	<u>k</u>	<u>l</u>	<u>*</u>	<u>2θ (°)</u>	<u>d (Å)</u>	<u>I</u>	<u>h</u>	<u>k</u>	<u>l</u>	<u>*</u>
80.69788	1.189730	2	2	2	0		86.35989	1.125660	2	3	1	2	
83.21484	1.160020	1	3	0	6		86.50058	1.124190	3	1	2	8	
84.35624	1.147210	3	2	2	3		88.99411	1.099030	9	0	2	10	
85.14012	1.138640	<1	1	3	1								

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอิมรอน วาเต็ง เกิดวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2557





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY