

การพัฒนาหัววัดรังสีซีเอ็มไอโอโค้ร่วมกับไดโอด p-i-n สำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

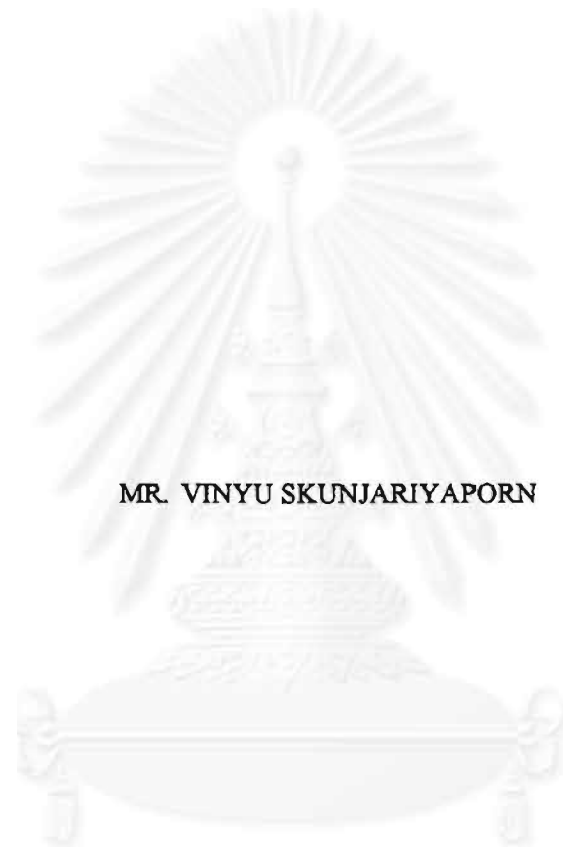
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-930-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A CESIUM IODINE WITH  $p-i-n$  DIODE DETECTOR FOR  
X-RAY DETECTION



MR. VINYU SKUNJARIYAPORN

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 1999

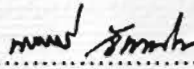
ISBN 974-334-930-8


|                      |  |
|----------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์    | การพัฒนาหัวข้อวิจัยสี่เหลี่ยมไอไอโค็ดร่วมกับไดโอด p-i-n<br>สำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์ |
| โดย                  | นาย วิญญู สกฤตจริยาพร  |
| ภาควิชา              | นิวเคลียร์เทคโนโลยี  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผศ. ดร. วิศิษฐ ทวีปริงมีพร   |

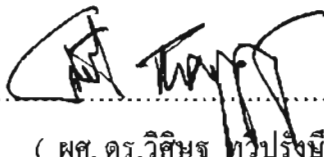
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

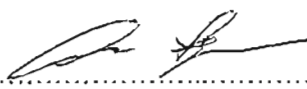
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
( ผศ. ดร. วิศิษฐ ทวีปริงมีพร )

  
..... กรรมการ  
( ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์ )

นาย วิญญู สกุลจริยาพร : การพัฒนาหัววัดรังสีซีเซียมไอโอไดด์ร่วมกับไดโอด p-i-n สำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์. (DEVELOPMENT OF A CESIUM IODINE WITH p-i-n DIODE DETECTOR FOR X-RAY DETECTION) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ  
อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งมีพร จำนวน 82 หน้า. ISBN 974-334-930-8

ได้พัฒนาผลึกวัดรังสีชนิดซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) [CsI (Na)] จากการปลูกผลึกด้วยระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger) ซึ่งออกแบบและสร้างขึ้นเอง ใช้สารเริ่มต้นเป็นผงซีเซียมไอโอไดด์ความบริสุทธิ์ 99.5 % เจือสารโซเดียมไอโอไดด์ความบริสุทธิ์ 99.5 % ความเข้มข้นระหว่าง 0.2% - 0.3% โดยน้ำหนัก บรรจุในท่อปลูกผลึกที่ทำด้วยควอทซ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 10 มิลลิเมตร แขนงในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมแบบปิดภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999 % ผลการปลูกผลึกพบว่าผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ที่ได้มีความใส ไม่ไวต่อความชื้นมาก ขัดผิวเรียบได้ง่าย เมื่อตัดผลึกในแนวตั้งและแนวขวางที่มีความหนา 2 - 3 มิลลิเมตรมาประกอบกับหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) เพื่อศึกษาการวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ ของ Am-241 พบว่าให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 59.6 keV อยู่ในช่วง 26%- 28% และเมื่อเทียบกับการวัดรังสีเมื่อประกอบกับไดโอด p-i-n จะให้ประสิทธิภาพการวัดต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากความยาวคลื่นของประกายแสงจากผลึกวัดรังสีไม่เหมาะสมกับการตอบสนองย่านความยาวคลื่นแสงของไดโอด p-i-n การเปลี่ยนความยาวคลื่นประกายแสงของผลึกจะต้องเจือสารแทลเลียมไอโอไดด์เพื่อให้ได้ CsI (Tl) จึงจะให้ความยาวคลื่นแสงเหมาะสมกับไดโอด p-i-n

ภาควิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 3971687521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : CESIUM IODINE CRYSTAL / CESIUM IODINE (SODIUM) CRYSTAL /  
SCINTILLATOR / X-RAY DETECTOR

VINYU SKUNJARIYAPORN: DEVELOPMENT OF CESIUM IODINE WITH p-i-n  
DIODE DETECTOR FOR X-RAY DETECTION. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.  
SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-ADVISOR: ASST.PROF. DR. VISIT  
THAVEEPRUNGSRIPOORN, 82 pp. ISBN 974-334-930-8.

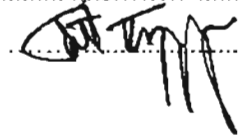
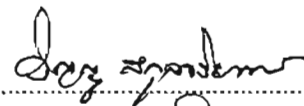
A CsI (Na) Crystal was grown using the developed low cost Bridgman-Stockbarger crystal growing system. The starting material was CsI powder with 99.5% purity doped with NaI 0.2wt%- 0.3wt%, 99.5% purity. The crystals were grown in a quartz tube with an inner diameter of 10 mm under 1 atmosphere of 99.999 % Argon gas in closed chamber made from stainless steel pipe. The grown CsI (Na) crystal rod was clear, slightly hygroscopic, and its surface can be easily polished. Pieces of CsI (Na) with 2-3 mm thickness, cut from horizontal and vertical plane of the crystal rod, coupled with photomultiplier tube were determined for its energy resolution using a 59.6 keV x-ray from Am-241 source. It was found that the energy resolution was in a range of 26 % - 28 % FWHM. The detection results when coupled with p-i-n diode was poor, because of the wavelength of scintillated light was mismatched with the spectrum response of p-i-n diode. It was clear that the activated material must be changed to Tl for fabrication of Cs (Tl) to be used for p-i-n diode.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....





## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรั้งนิพร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และอาจารย์เดโช ทองอร่าม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำแนวทางและความคิดเห็น ตลอดจนตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จินตนา เหล่าไพบุลย์ ที่ให้ความคิดเห็น คำปรึกษาที่ดี อันเป็นกำลังใจ ตลอดจนให้ความหวังในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ช่วยเหลืออุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรารักษ์ คุณวานากิจ และ คุณสุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย ที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

|                         | หน้า |
|-------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....    | ฉ    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ช    |
| กิตติกรรมประกาศ.....    | ซ    |
| สารบัญตาราง.....        | ญ    |
| สารบัญภาพ.....          | ฎ    |

### บทที่

#### 1. บทนำ

|  |   |
|--|---|
| 1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....                      | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....              | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                       | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการทำวิทยานิพนธ์.....     | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้..... | 3 |

#### 2. หัววัดซินทิลเลชัน

|   |    |
|---|----|
| 2.1 โครงสร้างของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน.....   | 4  |
| 2.2 คุณสมบัติที่ดีของสารที่ใช้ทำผลึกวัดรังสี.....                                     | 7  |
| 2.3 ปัจจัยในการลดทอนประสิทธิภาพของการส่งประกายแสง.....                                | 10 |
| 2.4 โครงสร้างของหัววัดรังสีซินทิลเลชันซีเซียม ไอโอไดด์ที่ใช้ไดโอดไวแสงชนิด p-i-n..... | 16 |
| 2.5 เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สตีลบาร์เกอร์.....                                | 20 |
| 2.6 วิธีการตัดและขัดเงาผลึก.....  | 26 |

## สารบัญ(ต่อ)

| บทที่ | หน้า   |
|-------|--|
| 3     | การพัฒนาผลึกวัดเรืองรังสีซีเซียม ไอโอไดค์  |
| 3.1   | การออกแบบและสร้างระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สตีออบาร์เกอร์..28   |
| 3.2   | ท่อปลูกผลึก.....30   |
| 3.3   | ชุดเตาหลอมและฉนวนกันความร้อน.....30  |
| 3.4   | ระบบควบคุมอุณหภูมิ.....35  |
| 3.5   | ระบบสุบสูญญากาศ.....36   |
| 3.6   | ระบบควบคุมความดันก๊าซในท่อปลูกผลึก.....37  |
| 3.7   | ระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก.....37   |
| 3.8   | อุปกรณ์รองรับภาชนะปลูกผลึก.....39  |
| 4.    | ผลการทดลองปลูกผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์  |
| 4.1   | การตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆภายในท่อปลูกผลึกตามแนวตั้ง.....41                                    |
| 4.2   | การปลูกผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์โดยระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น  |
| 4.2.1 | ขั้นตอนการปลูกผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์จากระบบปลูกผลึกแบบ<br>บริดจ์แมน – สตีออบาร์เกอร์ที่พัฒนาขึ้น.....44 |
| 4.2.2 | คุณภาพของผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์ที่ได้จากการปลูกผลึก.....45  |
| 4.3   | การเตรียมผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์.....46  |
| 4.4   | การทดสอบคุณสมบัติของผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์  |
| 4.4.1 | การทดสอบคุณสมบัติของผลึกเดี่ยว.....50  |
| 4.4.2 | การทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านแสงของผลึกโดยใช้เครื่อง<br>UV/Visible Spectrometer.....53                   |
| 4.5   | การทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียม ไอโอ ไดค์   |
| 4.5.1 | เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....54  |
| 4.5.2 | ขั้นตอนการทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึกซีเซียม<br>ไอโอ ไดค์.....56                                 |





## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | แสดงคุณสมบัติของฉันทิกละชั้นชนิดสารอนินทรีย์.....  | 8    |
| 2.2      | แสดงคุณสมบัติของซีซีเอ็ม ไอโอโคด์ (แทลเลียม) ซีซีเอ็ม ไอโอโคด์ (โซเดียม) และซีซีเอ็ม ไอโอโคด์..... | 9    |
| 2.3      | ผลึกเดี่ยวของสารประกอบต่าง ๆ ที่ปลูกด้วยวิธีการของบริดจ์แมน - สตีออบาร์เกอร์.....                  | 27   |
| 3.1      | ผลการทดสอบพิบัติการทำงานของระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก.....  | 38   |



## สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า  |
|-----------|---|
| 2.1       | แสดงส่วนประกอบของหัววัด ครึ่งสีซินทิลเลชัน.....4  |
| 2.2       | กลไกการกำเนิดประกายแสงของผลึกวัดครึ่งสี.....5   |
| 2.3       | กลไกการกำเนิดประกายแสงของผลึกวัดครึ่งสีเมื่อเจือสารลงไป.....5   |
| 2.4       | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของเทลเลียมและความสูงของพัลส์....7   |
| 2.5       | แสดงความยาวคลื่นสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาของซินทิลเลชันชนิดสารอินทรีย์<br>ต่าง ๆ และช่วงตอบสนองความยาวคลื่นของPMT.....9 |
| 2.6       | แผนภาพพลังงานศักย์ของการเกิดการเรืองแสงในผลึกวัดครึ่งสี.....11  |
| 2.7       | แสดงรูปความยาวคลื่นของซินทิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อใส่สารเจือชนิดต่าง ๆ.....12                                     |
| 2.8       | คุณสมบัติในการเปล่งประกายแสงของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....12   |
| 2.9       | แสดงประสิทธิภาพของวัสดุสะท้อนแสงชนิดต่าง ๆ กัน.....13   |
| 2.10      | ความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของผลึกวัดCsI ที่ความหนา<br>และพลังงานต่าง ๆ.....14                     |
| 2.11      | แผนภาพการทำงานของรอยต่อไดโอดไวแสง.....17  |
| 2.12      | โครงสร้างของไดโอดไวแสง p-i-n พื้นที่กว้าง.....17  |
| 2.13      | โครงสร้างและการทำงานของไดโอดไวแสงแบบอวาแลนซ์.....18   |
| 2.14      | แสดงโครงสร้างของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์.....19   |
| 2.15      | แสดงระบบการปลูกผลึกเดี่ยวของบริดจ์แมน.....21  |
| 2.16      | แสดงเทคนิคการเลื่อนลงของภาชนะปลูกผลึกในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน -<br>สต็อกบาร์เกอร์.....22                           |
| 2.17      | แสดงลักษณะภาชนะทรงกระบอกที่มีปลายรูปแบบต่างๆกันสำหรับการปลูก<br>ผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....24              |

## สารบัญภาพ(ต่อ)

| ภาพประกอบ |   | หน้า |
|-----------|---|------|
| 3.1       | แผนภาพระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์สำหรับการปลูกผลึกเดี่ยวซีเซียมไอโอไดด์ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของอาร์กอน.....                      | 29   |
| 3.2       | โครงสร้างของฉนวนบรรจุผลึกความร้อน.....  | 32   |
| 3.3       | แสดงแผนภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดความร้อนชุดที่ 1 โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดพีไอดี และหลอดความร้อนชุดที่ 2 โดยใช้สไลด์เรกกูเลเตอร์..... | 34   |
| 3.4       | แสดงวงจรไฟฟ้าสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดความร้อนชุดที่ 1 และหลอดความร้อนชุดที่ 2.....  | 34   |
| 3.5       | แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อเคลื่อนที่ท่อปลูกผลึก.....  | 37   |
| 3.6       | ภาพแสดงระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก.....   | 38   |
| 3.7       | แสดงรูปร่างของภาชนะปลูกผลึกควอทซ์และท่อแกรไฟต์.....   | 39   |
| 3.8       | แสดงรูปภาพระบบปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศก๊าซอาร์กอน.....   | 40   |
| 4.1       | แสดงระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิคงที่ของเตาหลอมทั้ง โชนบนและล่าง.....  | 42   |
| 4.2       | แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในท่อปลูกผลึกตามแนวที่จะปลูกผลึก.....  | 43   |
| 4.3       | แสดงรูปเนื้อสารที่ได้จากการปลูกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ในลักษณะต่าง ๆ กัน.....   | 46   |
| 4.4       | แสดงรูปลักษณะของผลึกที่ได้จากการปลูกโดยระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น.....  | 47   |
| 4.5       | รูปผลึกซีเซียมไอโอไดด์ก่อนและหลังจากการตัด.....   | 48   |
| 4.6       | รูปผิวของผลึกซีเซียมไอโอไดด์หลังจากการขัดด้วยกระดาษทราย.....  | 49   |
| 4.7       | รูปผิวของผลึกซีเซียมไอโอไดด์หลังจากการผ่านการขัดละเอียด.....  | 49   |
| 4.8       | แสดงผลวิเคราะห์ความไม่เป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP .....  | 51   |
| 4.9       | แสดงผลวิเคราะห์ความเป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP บนพื้นที่ตัดแนวตั้งของผลึก.....   | 52   |
| 4.10      | แสดงผลวิเคราะห์ความเป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP บนพื้นที่ตัดแนวขวางของผลึก.....   | 52   |

## สารบัญภาพ(ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า  |
|-----------|---|
| 4.11      | เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ระหว่างผลึก CsI (Na) และแก้ว Pyrex โดยใช้เครื่อง UV/Visible Spectrophotometer.....53   |
| 4.12      | การทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์.....55   |
| 4.13      | แสดงสเปกตรัมพลังงาน 60 keV ของ Am-241 จากการวัดด้วยผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ บริสุทธิ์ ขนาด 5mmX10mmX3mm เทียบกับผลึก โซเดียม ไอโอไดด์ (เทลเลียม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35mmX2mm ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์.....58  |
| 4.14      | เปรียบเทียบสเปกตรัมและความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่พัฒนาได้ที่ขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ขนาดความแรงรังสี 10 mCi ปรับอัตราขยายให้พีคพลังงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....59 |
| 4.15      | เปรียบเทียบสเปกตรัมและประสิทธิภาพในการวัดรังสีของผลึกที่พัฒนาได้ที่ขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี Am-241 ขนาดความแรงรังสี 10 mCi ปรับตั้งเวลานับพัลส์และอัตราขยายเท่ากัน.....60                    |
| 4.16      | เปรียบเทียบการแจกแจงพลังงานของผลึกที่ได้จากการปลูกและผลึกที่ผลิตขายในเชิงพาณิชย์ โดยใช้รังสีต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ความแรงรังสี 10 mCi..61  |
| 4.17      | แสดงสเปกตรัมพลังงาน 60 keV จากการวัดด้วยผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (โซเดียม) ประกอบกับ p-i-n ไดโอด.....62   |
| 4.18      | แสดงตำแหน่งผลึกที่ตัดแบ่งจากแท่งผลึก.....64   |
| 4.19      | แสดงสเปกตรัมของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (โซเดียม) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันตามแนวภาคตัดขวางของผลึกทั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6mm. และ 10mm.....64  |

บทที่ 1

บทนำ



## 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในรูปของรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทั้งทางตรงและทางอ้อมโดยเฉพาะงานด้านบำบัดรักษาคนไข้ทางการแพทย์ การค้นคว้าวิจัยด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์และการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น งานด้านต่างๆที่กล่าวถึงล้วนแล้วแต่ต้องการเครื่องมือวัดรังสีเฉพาะด้าน ซึ่งมีความซับซ้อนของระบบและราคาสูงมาก สำหรับงานด้านอุตสาหกรรมนั้นมีการนำเทคนิคนิวเคลียร์มาใช้งานในด้านต่างๆ ได้แก่ เกจวัดนิวเคลียร์ (Nuclear gauge) การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) โดยการถ่ายภาพด้วยรังสีและการถ่ายภาพโทโมกราฟี เป็นต้น เทคนิคเหล่านี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจวัดรังสีขึ้นเองภายในประเทศ แต่อุปสรรคในการพัฒนาอยู่ที่หัววัดรังสีซึ่งจำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศด้วยราคาสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาด้านหัววัดรังสีเอกซ์

จากการศึกษาพบว่าหัววัดรังสีชนิดซิลิคอนสำหรับใช้วัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำไม่เกิน 100 keV ซึ่งใช้ผลึกวัสดุชนิดซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) และตัวแปลงสัญญาณเป็นโฟโตไดโอดชนิด p-i-n นั้นมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบการสร้างภาพ<sup>(1)</sup> และงานวัดรังสีทั่วไป เนื่องจากตัวผลึกวัดไม่ไวต่อความชื้น<sup>(2)</sup> ไม่แตกหักง่าย หัววัดรังสีที่ประกอบด้วยโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แทนหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (PMT) จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และไม่ไวต่อสนามแม่เหล็กบริเวณ จึงเหมาะกับการใช้งานด้านระบบวัดรังสีสำหรับงานด้านอุตสาหกรรม การพัฒนาหัววัดรังสีซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) นี้จะทำให้ได้เทคนิคในการปลูกผลึกวัดรังสี และได้หัววัดชนิดซิลิคอนที่มีราคาที่ประหยัดกว่าสั่งซื้อจากต่างประเทศทั้งชุดและเป็นการเริ่มต้นในการพัฒนาหัววัดรังสีในกลุ่มที่ใช้ผลึกวัสดุชนิดซิลิคอน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน ซึ่งใช้ซีเซียม ไอโอไดด์เป็นผลึกวัดและไดโอดชนิด p-i-n เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณพัลส์สำหรับวัดรังสีเอกซ์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (CsI) ชนิดแผ่นบางสำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานไม่เกิน 100 keV
- 2) ทดสอบคุณสมบัติของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ที่เตรียมขึ้น
- 3) ออกแบบและสร้างหัววัดซินทิลเลชันซึ่งใช้ซีเซียม ไอโอไดด์เป็นผลึกวัดและไดโอดชนิด p-i-n เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณพัลส์
- 4) ทดสอบผลตอบสนองต่อการวัดรังสีเอกซ์ในแง่ energy resolution, peak stability และ light output เปรียบเทียบกับข้อมูลผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (CsI) ชนิดแผ่นบาง
- 3) ทดสอบคุณภาพของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (CsI) ที่พัฒนาขึ้นในแง่ของการดูดกลืนแสงในเนื้อผลึกและโครงสร้างผลึก
- 4) ปรับปรุงคุณภาพของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (CsI)
- 5) ออกแบบและสร้างหัววัดซินทิลเลชันที่ใช้ผลึกซีเซียม ไอโอไดด์ (CsI) เป็นผลึกวัดและไดโอดชนิด p-i-n เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณพัลส์
- 6) ทดสอบผลตอบสนองต่อการวัดรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับข้อมูลผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์
- 7) สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

- 1) ได้หัววัดรังสีซีเอ็มไอโอโคคัมแบบที่ใช้โคโคคชนิด p-i-n เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ทำให้ไม่ไวต่อผลกระทบของสนามแม่เหล็ก
- 2) เป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีในงานทางด้าน X-ray imaging

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) J.Emeisner and W.F Nicaise, IEER TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE, VOL 42, NO 4 AUGUST 1995

ได้นำ CsI (TI) ซินทิลเลเตอร์ดีเทคเตอร์แบบทรงกระบอกขนาด 15X61 มม<sup>2</sup> มาใช้ร่วมกับโฟโตโคโคค 2 ตัว โดยติดตั้งแบบยึดติดอยู่ด้านข้างของ CsI (TI) ซึ่งเป็นการพัฒนาเพื่อที่จะวัดสเปกตรัมของพลังงานของรังสีแกมมาในสารปนเปื้อนภายใต้ผิวดิน ณ U.S.Department of Energy's Handford Site โดยใช้วิธีการใส่ซินทิลเลเตอร์ดีเทคเตอร์ลงไปในห้องเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ลงไปได้ลึกถึง 20 เมตร โดยใช้ระบบ Cone Penetrometer ซึ่งดีเทคเตอร์แบบนี้มีความทนทาน มีประสิทธิภาพ และไม่ไวต่อสนามแม่เหล็ก ทำให้สามารถวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากสารปนเปื้อนโดยเฉพาะ <sup>137</sup>Cs และ <sup>60</sup>Co เมื่อใช้โฟโตโคโคคขนาด 3X30 มม<sup>2</sup> จำนวน 2 ตัว วางต่อกันในแนวตามยาวทางด้านข้างของดีเทคเตอร์ยังทำให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในการตรวจวัดแสงที่ได้จาก CsI (TI)

- 2) Holl, E.Lorenz, S.Nataniez, D.Render, C.Schmels B.Schwartz, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL 42, NO 4 AUGUST 1995

ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาอวาแลนซ์โฟโตโคโคค (Avalanche Photodiode) ที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่มาแทนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ในระบบหัววัดรังสีแบบซินทิลเลเตอร์ซึ่งมีการใช้งานทั้งในทางด้านฟิสิกส์อนุภาคพลังงานสูง นิวเคลียร์ฟิสิกส์ ฟิสิกส์ทางการแพทย์ และการตรวจวัดรังสีทางด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์มีข้อจำกัดทางด้านขนาดที่ใหญ่ ไวต่อสนามแม่เหล็ก และต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่มีค่าคงที่ ผลการวิจัยทำให้ APD อวาแลนซ์โฟโตโคโคค (Avalanche Photodiode) ใช้งานได้ดีมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานในอนาคต



## บทที่ 2

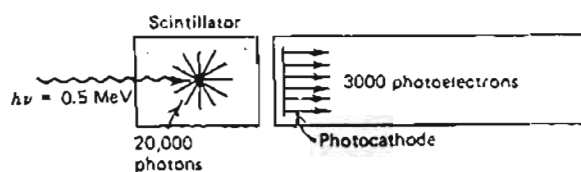
### หัววัดรังสีซินทิลเลชัน

#### 2.1 โครงสร้างของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน

กระบวนการตรวจวัดรังสีเป็นการแปลงพลังงานของรังสีเป็นประจุไฟฟ้าหลังการถ่ายโอนพลังงานในตัวกลางที่เหมาะสม และกำเนิดเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับพลังงานที่วัดได้ ซึ่งกระบวนการในการตรวจวัดรังสีสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี<sup>(1)</sup>

1. การถ่ายโอนพลังงานกับตัวกลางและสร้างสัญญาณพัลส์ในตัวกลางโดยตรง
2. การถ่ายโอนพลังงานกับตัวกลางและถ่ายโอนผลจากอันตรกิริยาในตัวกลางซึ่งอาจจะเป็นอนุภาคนิวเคลียร์หรือโฟตอนให้กับตัวกลางอีกครั้งหนึ่งในลักษณะทางอ้อม

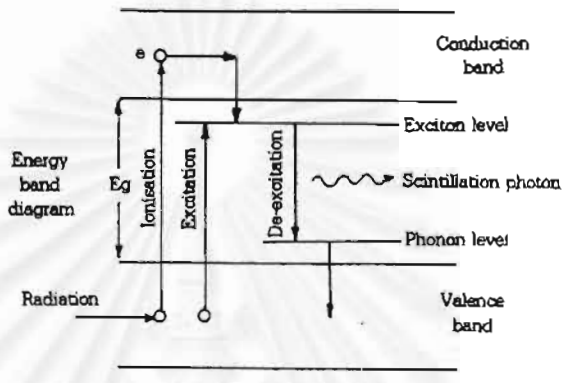
หัววัดซินทิลเลชันเป็นการวัดรังสีซึ่งมีกระบวนการตรวจวัดแบบทางอ้อม โดยมีโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นผลึกเรืองรังสี (Scintillator) เมื่อรับการถ่ายโอนพลังงานจะเกิดอันตรกิริยาสว่างประกายแสง (Scintillation light) ส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ไวแสงซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแสงเป็นสัญญาณพัลส์



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน

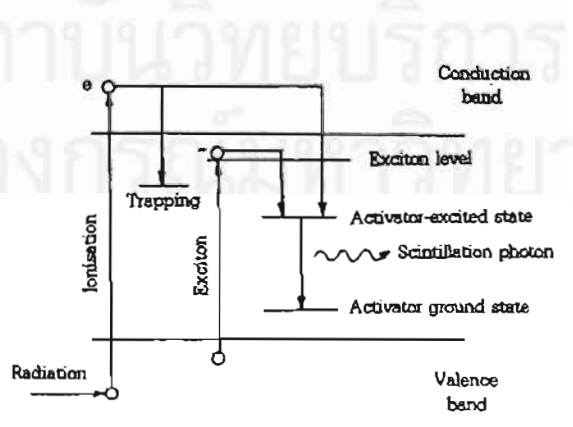
จากโครงสร้างในรูปที่ 2.1 เมื่อรังสีเอกซ์หรือแกมมาตกกระทบบนผลึกตัววัดรังสี จะทำอันตรกิริยาถ่ายโอนพลังงานด้วยกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) หรือ

เอกไซเตชัน (Excitation) กระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับวาเลนซ์ (Valence) ขึ้นไปอยู่ในบริเวณ โกลด์แถบนำกระแส (Conduction Band) เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลชั่วขณะเรียกว่า “เอกซิตอน (Exciton)” จากนั้นอิเล็กตรอนจะลงสู่ระดับกราวนด์ (ground) โดยปลดปล่อยแสง ออกมาเกิดการเรืองรังสี (Fluorescent) ถ้าพลังงานของรังสีสูงปริมาณอิเล็กตรอนที่ได้รับการ กระตุ้นจะมีปริมาณมากและจะปลดปล่อยความเข้มแสงมากเป็นสัดส่วนกับระดับพลังงาน ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดประกายแสงของผลึกวัควัรังสี

เนื่องจากช่องว่างระดับพลังงาน (Energy gap) ของผลึกวัควัรังสีมักจะมีระดับสูงทำให้ ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมาในรูปประกายแสงไม่อยู่ในย่านที่อุปกรณ์ไวแสงจะ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการเติมสารที่ทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ลงในผลึกวัควัรังสี เล็กน้อยเรียกว่า “Activator” โครงสร้างผลึกที่เจือสารจะมีการสร้างระดับพลังงานของสารที่เจือ ใหม่ที่ต่ำกว่าระดับพลังงานเดิม การลงสู่ระดับกราวนด์ของอิเล็กตรอนจึงให้ความยาวคลื่นใน ย่านที่อุปกรณ์ไวแสงสามารถมองเห็นตรวจวัดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดประกายแสงของผลึกวัควัรังสีเมื่อเจือสารลงไป

ประสิทธิภาพของการเกิดประกายแสงของผลึกสารอนินทรีย์ที่เจือสารสามารถคำนวณได้จากสมการ<sup>(1)</sup>

$$S_y = \frac{E_{py}(n_o) f_{xy} q_{oy}}{E_{wx}(n_e)} \quad (1)$$

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| เมื่อ $S_y$ | = | Absolute scintillation efficiency        |
| $E_{py}$    | = | Mean energy of fluorescence photon       |
| $E_{wx}$    | = | Energy loss required to produce e-h pair |
| $(n_o)$     | = | Number of excitons                       |
| $(n_e)$     | = | Number of e-h produced                   |
| $f_{xy}$    | = | Quantum efficiency of energy transfer    |
| $q_{oy}$    | = | Luminescence quantum efficiency          |

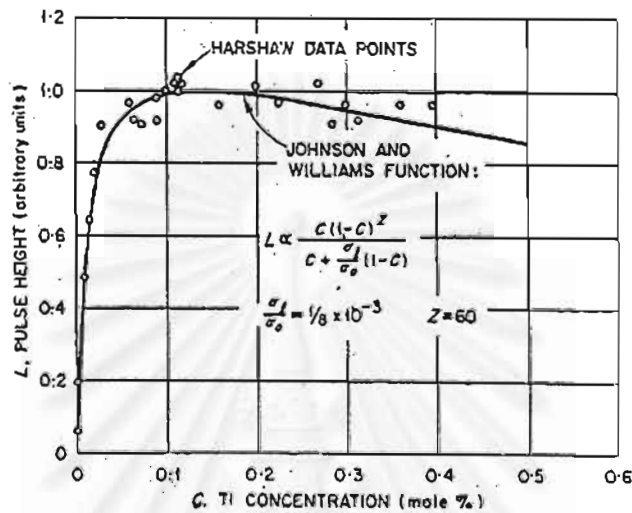
ผลึกวัคโซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) NaI (TI) เป็นผลึกวัคที่มีการค้นพบในระยะแรกและได้ใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบกับผลึกวัคชนิดอื่นเสมอ ในปี 1952 ได้มีการศึกษาหาความสัมพันธ์ของการเติมปริมาณสารเจือเทลเลียมในผลึกวัคโซเดียมไอโอไดด์โดย Harshaw และต่อมาในปี 1961 Murray และ Meyer ได้เปรียบเทียบผลการทดลองดังกล่าวกับสมการความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณพัลส์ที่ได้จากแสงสว่างของประกายแสงกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารเจือ ซึ่ง Johnson and Williams ได้ศึกษาไว้เมื่อปี ค.ศ.1950 ดังสมการ<sup>(2)</sup>

$$L \propto \frac{c(1-c)^2}{c + (\sigma_l / \sigma_a)(1-c)} \quad (2)$$

โดยที่

|            |   |  |
|------------|---|--|
| L          | = | Pulse height   |
| c          | = | Mole fraction of activator                                 |
| $\sigma_l$ | = | Cross-section for capture of the exciton by the activator  |
| $\sigma_a$ | = | Cross-section for capture of the exciton by a lattice site |
| Z          | = | Effective number of lattice sites                          |

ในรูปที่ 2.4 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณพัลส์กับเปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสารเจือปนในผลึกวัดโซเดียมไอโอไดด์ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2) และค่าที่ได้จากการทดลองของ Harshaw



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแทลเลียมและความสูงของพัลส์

## 2.2 คุณสมบัติที่ดีของสารที่ใช้ทำผลึกวัดรังสี<sup>(3)</sup>

สารที่เลือกใช้สร้างผลึกวัดชนิดเรืองรังสีจะให้ประสิทธิภาพในการวัดสูงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติสำคัญดังนี้

1. มีประสิทธิภาพสูงในการแปลงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ เป็นประกายแสงที่สามารถวัดได้ (High scintillation efficiency)
2. ประกายแสงที่ได้ควรจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงาน (Linearity)
3. ตัวกลางที่ใช้จะต้องยอมให้ประกายแสงที่มีความยาวคลื่นของตัวเอง ผ่านออกมาได้ดีเพื่อที่จะสามารถวัดได้ (Transparent)
4. เวลาในการสลายประกายแสงสั้น เพื่อที่จะสามารถกำเนิดสัญญาณพัลส์ได้รวดเร็ว (Short decay time)
5. มีคุณสมบัติในการนำแสงที่ดี (Good optical quality)

## 6. ดัชนีหักเหของแสงควรมีค่าใกล้เคียงกับแก้ว = 1.5

(Good coupling with detector)

ผลึกวัดรังสีชนิดของแข็งโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ผลึกวัดประเภทสารอินทรีย์ (Organic scintillator) ได้แก่ แอนทราซีน สติลบิน โพลิเมอร์ ต่าง ๆ และผลึกวัดประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic scintillator) โดยเฉพาะสารประกอบในกลุ่มอัลคาไลด์ฮาไลด์ (Alkaline Halide) จะให้ประสิทธิภาพในการวัดโฟตอนค่อนข้างสูง

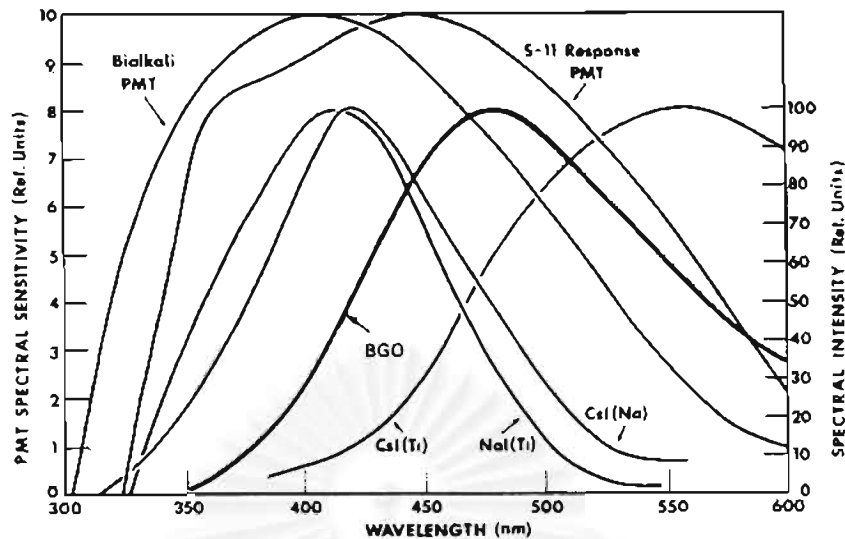
ในตารางที่ 2.1 แสดงค่าเปรียบเทียบของคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลึกวัดรังสีซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic scintillator) ชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในงานตรวจวัดรังสี และในรูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมของประกายแสงที่กำเนิดจากผลึกหลังรับอันตรกิริยาจากรังสี อันเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับเลือกอุปกรณ์ไวแสงที่จะทำหน้าที่แปลงแสงเป็นสัญญาณพัลส์

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของฉินทิลเลชันชนิดสารอนินทรีย์

| Properties of Common Inorganic Scintillators              |                  |  |   |                                      |                                    |                                  |  |
|---|------------------|--|---|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| Material  | Specific Gravity | Wavelength of Maximum Emission (nm)<br>$\lambda_{max}$ | Index of Refraction at<br>$\lambda_{max}$ | Principal Decay Constant ( $\mu s$ ) | Pulse 10-90% Rise Time ( $\mu s$ ) | Total Light Yield in Photons/MeV | Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons |
| NaI(Tl)   | 3.67             | 415  | 1.85                                      | 0.23                                 | 0.5                                | 38000                            | 11.3%  |
| CsI(Tl)   | 4.51             | 540  | 1.80                                      | 1.0                                  | 4                                  | 52000                            | 11.9   |
| CsI(Na)   | 4.51             | 420  | 1.84                                      | 0.63                                 | 4                                  | 39000                            | 11.4   |
| LiI(Eu)   | 4.08             | 470  | 1.96                                      | 1.4                                  | —                                  | 11000                            | 2.8  |
| BGO   | 7.13             | 505  | 2.15                                      | 0.30                                 | 0.8                                | 8200                             | 2.1  |
| BaF <sub>2</sub> slow component                           | 4.89             | 310  | 1.49                                      | 0.62                                 | 3                                  | 10000                            | 4.5  |
| BaF <sub>2</sub> fast component                           | 4.89             | 220  | —   | 0.0006                               | —                                  | —                                | —  |
| ZnS(Ag) (polycrystalline)                                 | 4.09             | 450  | 2.36                                      | 0.2                                  | —                                  | —                                | —  |
| CaF <sub>2</sub> (Eu)                                     | 3.19             | 435  | 1.44                                      | 0.9                                  | 4                                  | 24000                            | 6.7  |
| CsF   | 4.11             | 390  | 1.48                                      | 0.004                                | —                                  | —                                | —  |
| Li glass <sup>c</sup>                                     | 2.5              | 395  | 1.55                                      | 0.075                                | —                                  | —                                | 1.5  |
| For comparison, a typical organic (plastic) scintillator: |                  |  |   |                                      |                                    |                                  |  |
| NE 102A   | 1.03             | 423  | 1.58                                      | 0.002                                | —                                  | 10000                            | 3.0  |

<sup>a</sup>Using UV-sensitive PM tube.<sup>b</sup>For alpha particles.<sup>c</sup>Properties vary with exact formulation.

Source: Data derived primarily :

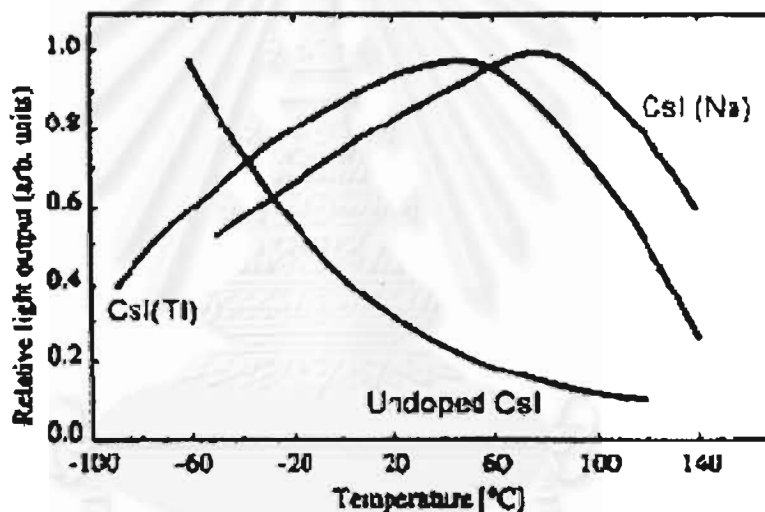


รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์  
ต่าง ๆ และช่วงตอบสนองความยาวคลื่นของ PMT

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของซีเซียมไอโอไดด์ (ทลเลียม) CsI (Tl)  
ซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) CsI (Na) และ ซีเซียมไอโอไดด์<sup>(4)</sup>

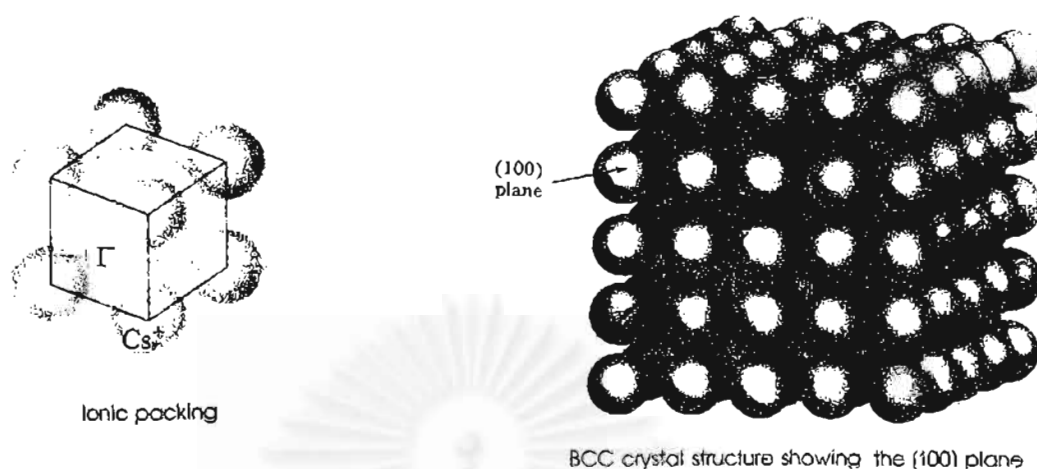
|   | CsI(Tl)                    | CsI(Na)                   | CsI<br>(undoped)      |
|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Density [g/cm <sup>3</sup> ]                        | 4.51                       | 4.51                      | 4.51                  |
| Melting point [K]                                   | 894                        | 894                       | 894                   |
| Thermal expansion coefficient<br>[K <sup>-1</sup> ] | 54 x 10 <sup>-6</sup>      | 49 x 10 <sup>-6</sup>     | 49 x 10 <sup>-6</sup> |
| Cleavage plane                                      | none                       | none                      | none                  |
| Hardness (Mho)                                      | 2                          | 2                         | 2                     |
| Hygroscopic   | slightly                   | yes                       | slightly              |
| Wavelength of emission<br>maximum [nm]              | 550                        | 420                       | 315                   |
| Lower wavelength cutoff [nm]                        | 320                        | 300                       | 260                   |
| Refractive index at emission<br>maximum             | 1.79                       | 1.84                      | 1.95                  |
| Primary decay time [ns]                             | 1                          | 0.63                      | 0.016                 |
| Afterglow (after 6ms) [%]                           | 0.5 - 5.0                  | 0.5 - 5.0                 | —                     |
| Light yield [photons/MeV ]                          | 52- 56<br>x10 <sup>3</sup> | 38-<br>44x10 <sup>3</sup> | 2x10 <sup>3</sup>     |
| Photoelectron yield [% of NaI<br>(Tl)]              | 45                         | 85                        | 4 - 6                 |

สารประกอบซีเซียมไอโอไดด์เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ผลิตผลึกวัดรังสีเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ไม่ไวต่อความชื้น มีความอ่อนตัวของผลึกไม่แตกหักง่าย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันและมีความหนาแน่นสูงกว่าโซเดียมไอโอไดด์ จากตารางที่ 2.2 ผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ที่ใช้กันอยู่มี 3 แบบคือผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์บริสุทธิ์ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการปลดปล่อยประกายแสงได้ดีที่อุณหภูมิ 77 K ที่ความยาวคลื่นช่วง 260–315nm อีกรูปแบบหนึ่งคือซีเซียมไอโอไดด์เจือสารโซเดียม CsI (Na) ทำงานที่อุณหภูมิห้องปลดปล่อยประกายแสงย่านความยาวคลื่น 300- 420 nm และซีเซียมไอโอไดด์เจือสารเทลลูเรียม CsI (Te) ทำงานที่อุณหภูมิห้องปลดปล่อยประกายแสงความยาวคลื่น 320 – 550 nm ในรูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติในการเปล่งประกายแสงของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติในการเปล่งประกายแสงของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โครงสร้างผลึกของซีเซียมไอโอไดด์จะมีโครงสร้างเป็น Body-centered cubic (BCC) โดยอะตอมของไอโอดีนอยู่กึ่งกลางและล้อมรอบมุม 4 มุมด้วยซีเซียม ดังรูปที่ 2.7 การเรียงตัวอย่างมีระเบียบของอะตอมและก่อตัวขึ้นเป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์จะทำให้ผลึกวัดรังสีมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีทั้งในแง่การเกิดประกายแสงและการส่งผ่านแสงอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของผลึกซีเซียม ไอโอไดด์

### 2.3 ปัจจัยในการลดทอนประสิทธิภาพของการส่งประกายแสง<sup>๑)</sup>

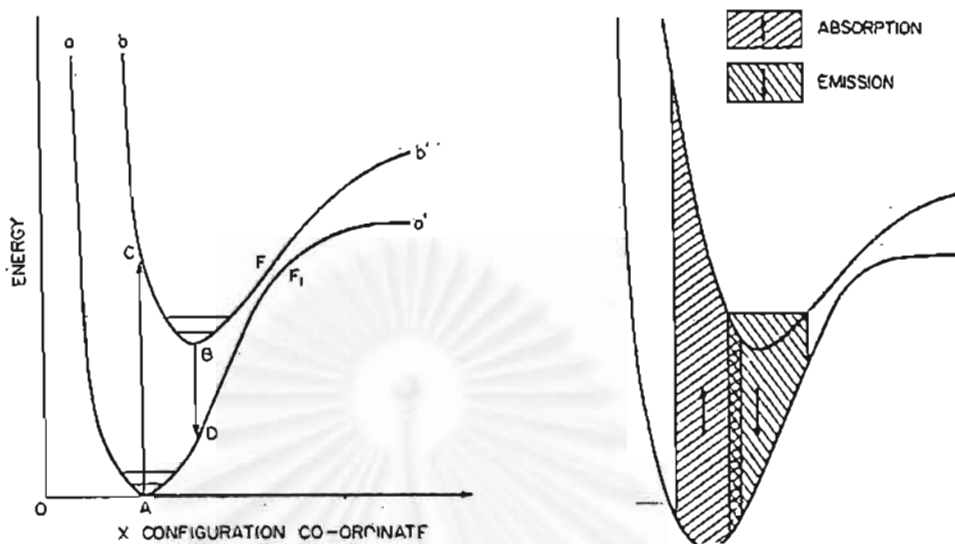
ประกายแสงที่เกิดจากอันตรกิริยาดำยไอพลังงานของรังสีเกิดขึ้นในเนื้อของผลึกวัดรังสีและเปล่งแสงออกรอบทิศทาง แต่อุปกรณ์ไวแสงจะรับแสงเฉพาะพื้นที่ไวแสงตัวหน้าเท่านั้น การที่ความเข้มประกายแสงจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณไวแสงของโฟโตคาโทดอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่าง ๆ ได้แก่

- 1) การดูดกลืนความเข้มแสงในเนื้อสารเอง (Self absorption )
- 2) การหักเหแสงระหว่างตัวกลาง (Refraction)
- 3) การใช้วัสดุช่วยสะท้อนแสง (Reflector)
- 4) การลดทอนปริมาณแสงเนื่องจากความหนาของผลึก (Light attenuation)

#### 1) การดูดกลืนความเข้มแสงภายในเนื้อสาร

การดูดกลืนแสงภายในเนื้อสาร เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเหลื่อมของสเปกตรัมของการดูดกลืนแสง และสเปกตรัมของการเปล่งประกายแสง ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.8



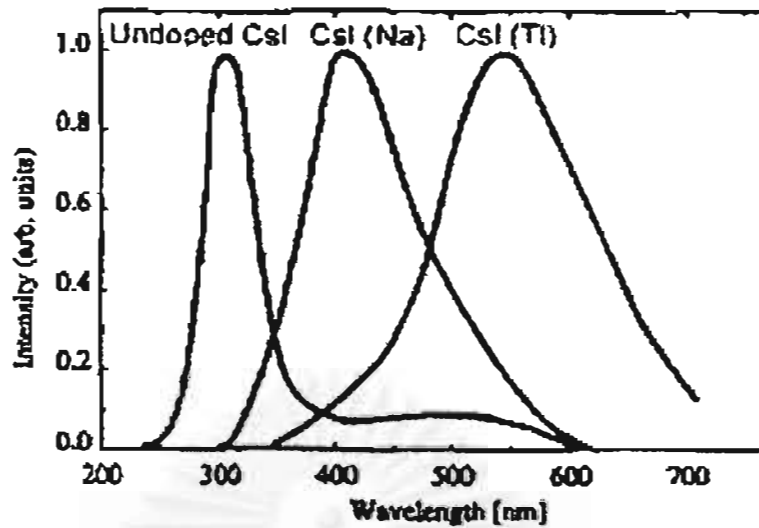


ก. แสดงภาวะการดูดกลืนพลังงานจาก A ไป C และภาวะการปลดปล่อยประกายแสงจาก B ไป D ซึ่งให้ความยาวคลื่นเดียวกัน

ข. แสดงการเหลื่อมกันระหว่างย่านสเปกตรัมการดูดกลืนและการปลดปล่อยแสง

รูปที่ 2.8 แผนภาพพลังงานศักย์ (Potential energy diagram) ของการเกิดการเรืองแสงในผลึกวัตรังสี

การเหลื่อมกันของสเปกตรัมแสงที่ปลดปล่อยออกมา กับบริเวณย่านสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารเป็นผลให้ความเข้มของประกายแสงถูกดูดกลืนภายในผลึกของซินทิลเลเตอร์ส่วนหนึ่ง การที่จะลดผลของการการดูดกลืนแสงภายในเองสามารถทำได้โดยการเลื่อนความยาวคลื่น (Wavelength) ของประกายแสงออกไป โดยการใส่สารเจือ (Impurity activated) ในผลึกซินทิลเลเตอร์ สำหรับซินทิลเลเตอร์ชนิด อัลคาไลน์ ฮาไลด์ นิยมใช้สารเจือ ประเภท โซเดียม และ แทลเลียมลงไป สารดังกล่าวจะไปสร้างกับดัก (Activated trap) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความยาวคลื่นจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเช่นความยาวคลื่นของ CsI บริสุทธิ์อยู่ที่ 310 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 420 นาโนเมตร เมื่อใส่สารเจือชนิด โซเดียม และเพิ่มเป็น 550 นาโนเมตรเมื่อใส่สารเจือชนิด แทลเลียม ตามลำดับ ดังแสดงสเปกตรัมแสงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงรูปความยาวคลื่นของซินทิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อใส่สารเจือชนิดต่าง ๆ

## 2) การหักเหของแสงของสาร

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนความเข้มแสงก็คือดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ของซินทิลเลเตอร์นั้นๆ อันเป็นผลให้แสงเกิดการเลี้ยวเบนเปลี่ยนทิศทาง (Refraction) ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีกล่าวคือเมื่อแสงเดินทางจากภายในผลึกซินทิลเลเตอร์มาถึงรอยต่อระหว่างผลึกซินทิลเลเตอร์และอากาศจะเกิดการหักเหแสงขึ้นเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน ทำให้แสงไม่สามารถส่งผ่านออกไปยังอุปกรณ์ไวแสงได้เต็มที่

มุมที่ตกกระทบของแสงจะเป็นส่วนสำคัญในการเกิดการสะท้อนภายในตัวเอง เมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและจะเพิ่มขึ้นเป็น 100% ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่ามุมวิกฤต (Critical angle,  $\theta$ ) ดังสมการ<sup>(3)</sup>

$$\theta = \text{Sin}^{-1}(1/\mu) \quad (3)$$

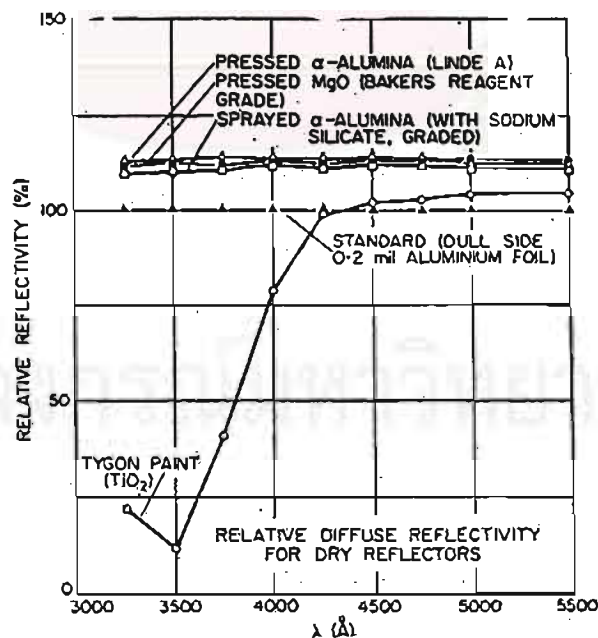
$$\mu = \text{ดัชนีหักเหแสงของสาร}$$

อีกกรณีหนึ่งคือการสะท้อนแสงภายในผลึกซินทิลเลชันจะไม่ช่วยเพิ่มปริมาณความเข้มแสงขึ้นถ้าหากว่าแสงที่ตกกระทบมีมุมที่ต่ำกว่ามุมวิกฤต ซึ่งที่ผิวด้านข้างของผลึกซินทิลเลเตอร์เราสามารถใส่วัสดุสะท้อนแสงประกายเป็นตัวช่วยเพิ่มการสะท้อนของแสงได้ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียปริมาณของแสงที่ได้จากการวัดรังสี แต่ในทางกลับกันในตำแหน่งด้านทางออกของแสงจากผลึกวัดควรจะมีการสะท้อนหรือหักเหของแสงน้อยที่สุด นั่นหมายความว่า ดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่แสงผ่าน ควรจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่ใกล้เคียงกัน ในทาง

ปฏิบัติเราสามารถใช้อุปกรณ์ประสานรอยต่อนำแสง (Optical coupling) แทนที่ช่องว่างอากาศซึ่งจะเป็นตัวช่วยลดปัญหาเหล่านี้ได้ โดยวัสดุประสานจะเป็นตัวประสานระหว่างผลึกซินทิลเลเตอร์และผิวหน้าอุปกรณ์ไวแสง เช่น หลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ โฟโตไดโอด p-i-n ไดโอด ตัวอย่างวัสดุประสานรอยต่อนำแสง ได้แก่ กลีเซอริน (Glycerine) มีเนอรอลออยล์ (Mineral Oil) ซิลิโคนออยล์ (Silicone Oil) DC200 เป็นต้น ซึ่งวัสดุประสานรอยต่อนำแสงจะเป็นของเหลวที่มีความหนืด (Viscosity) อยู่ที่ 1,000,000 เซนติสโตคส์ (Centistokes) ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อบนบถาวร และใช้ความหนืดที่ 30,000 เซนติสโตคส์ ในกรณีที่ใช้แบบชั่วคราว<sup>(5)</sup>

### 3) การใช้วัสดุช่วยสะท้อนแสง

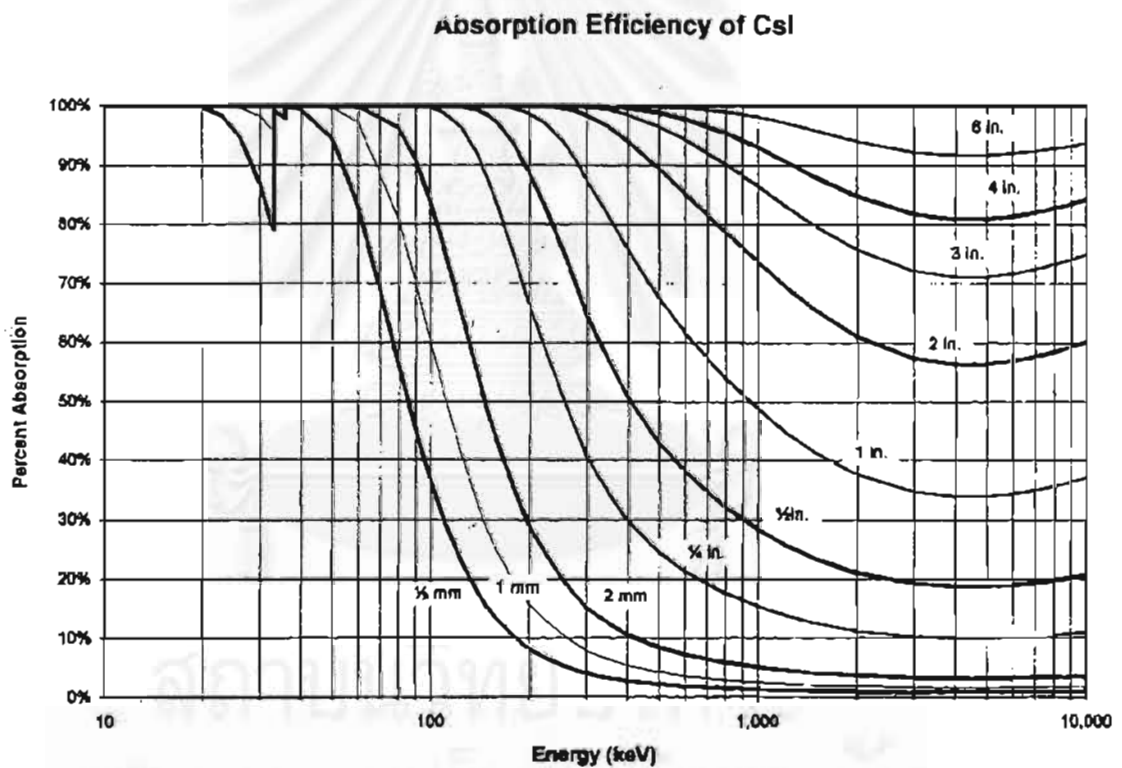
การสะท้อนความเข้มประกายแสงที่เกิดรอบจุดกำเนิดให้สะท้อนกลับมาด้านหน้าของผลึกวัดจะช่วยเสริมความเข้มแสงที่ตกกระทบผิวหน้าของโฟโตคาโทดโดยวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการสะท้อนประกายแสงย่านความยาวคลื่น 300 – 500 nm ได้แก่ ฟอยล์อะลูมิเนียม (Aluminium foil) ในรูปที่ 2.10 แสดงประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงของวัสดุอื่น ๆ ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่า



รูปที่ 2.10 แสดงประสิทธิภาพของวัสดุสะท้อนแสงชนิดต่าง ๆ กัน

## 4) การลดทอนความเข้มประกายแสงจากผลของความหนา

ในการกำหนดความหนาของผลึกวัดนั้นขึ้นอยู่กับช่วงพลังงานสูงสุดที่ต้องการวัดซึ่งผลึกจะต้องสามารถดูดกลืนพลังงานได้ 100 % ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.11 ถ้าความหนาของผลึกเกินความจำเป็นในช่วงพลังงานที่วัดเนื้อสารส่วนเกินจะดูดกลืนความเข้มประกายแสง ทำให้ประสิทธิภาพการส่งประกายแสงลดลง ประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนในการวัดรังสีของผลึกวัดซีเซียม ไอไอ โคคส์ขึ้นกับความหนาของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความหนาของผลึกเกินความต้องการของช่วงพลังงานที่วัดจะทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงดังกล่าวลดลงไป



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของผลึกวัด CsI ที่ความหนาและพลังงานต่าง ๆ<sup>(๑)</sup>

## 2.4 โครงสร้างของหัววัดรังสีซินทิลเลชันจีเจียมไอโอไดค์แบบที่ใช้ไดโอดไวแสงชนิด p-i-n

หัววัดรังสีซินทิลเลชัน แบบที่ใช้หลอดทวิคูณอิเล็กตรอนเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนแสงเป็นสัญญาณพัลส์ มีข้อจำกัดบางประการที่ไม่เหมาะสมกับงานวัดในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง การสิ้นสะท้อนสูง รวมทั้งงานที่ต้องการหัววัดขนาดเล็ก และยังมีอุปสรรคทางเทคนิคอื่น ๆ ดังนี้

1. ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงและกระแสค่อนข้างสูง
2. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นสูง
3. มีค่ากระแสมืด ( Dark Current ) สูง
4. มีผลกระทบเมื่อใช้ช้อกส์สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าสูงได้ เนื่องจากเกิดการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนใน PMT
5. มีขนาดใหญ่กว่าไดโอดไวแสง
6. เสถียรภาพไม่คงที่ขึ้นกับแหล่งจ่ายไฟ

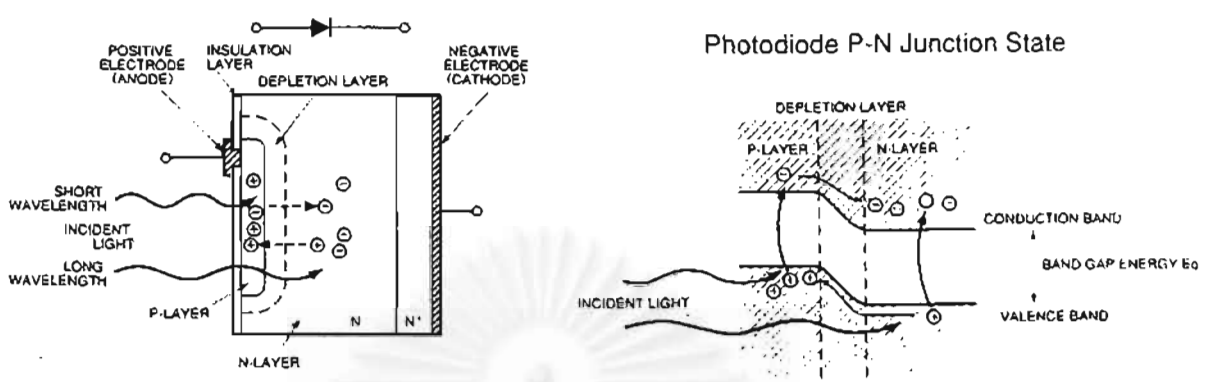
หลังจากเทคโนโลยีด้านโฟโตนิกส์ (Photonics) ก้าวหน้าขึ้น ได้มีการพัฒนาไดโอดไวแสงชนิดต่าง ๆ ขึ้น มีคุณสมบัติในการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงความยาวคลื่นช่วงต่าง ๆ ให้เลือกมาก จึงมีการนำผลึกวัดรังสีมาใช้งานร่วมกับไดโอดไวแสงเนื่องจากใช้ไบอัสแรงดันต่ำ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาประหยัดกว่า

โครงสร้างรอยต่อ PN ของไดโอดบริเวณรอยต่อ (Depletion region) ขณะให้ไบอัสกลับทางสามารถตอบสนองการวัดความเข้มของปริมาณโฟตอนได้ จากผลการถ่ายโอนพลังงานของโฟตอนบริเวณดังกล่าวจะกำเนิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก และ ข ปริมาณคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ถูกรวบรวมบนส่วนเชื่อมต่อของสาร P และ N ภายใต้อิทธิพลของไบอัสกลับทางจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้น โดยมีวงจรเทียบเท่าในรูปที่ 2.12 ค. และมีกระแสเอาต์พุตดังสมการ<sup>(4)</sup>

$$I_0 = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left( \exp \frac{eV_D}{kT} - 1 \right) - I' \quad (4)$$

where

- $I_s$  : photodiode reverse saturation current
- $e$  : electron charge
- $k$  : Boltzmann's constant
- $T$  : absolute temperature of the photodiode

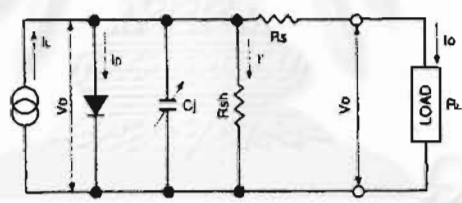


KPD C10004A

ก. ภาพตัดขวางของรอยต่อ PN  
ขณะรับโฟตอนแสง

ข. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน  
และโฮลบริเวณรอยต่อ

Photodiode Equivalent Circuit



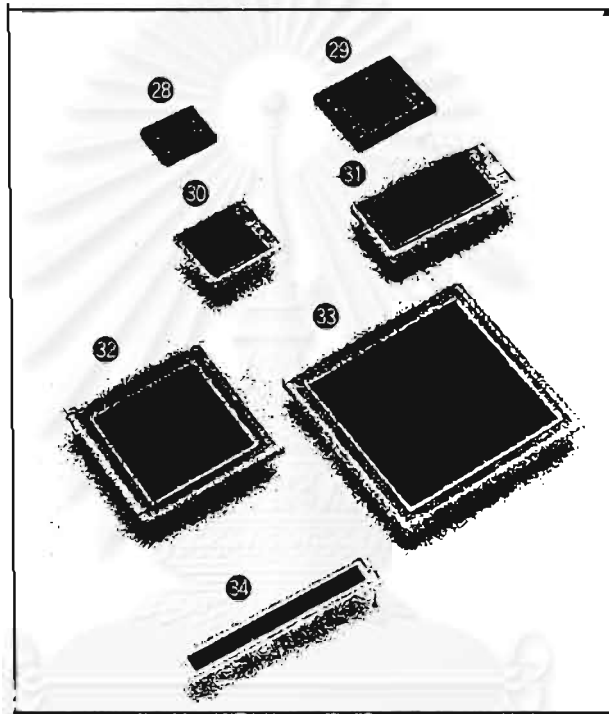
KPD C0004EA

- $I_L$  : Current generated by the incident light (proportional to the amount of light)
- $I_D$  : Diode current
- $C_j$  : Junction capacitance
- $R_{sh}$  : Shunt resistance
- $R_s$  : Series resistance
- $I'$  : Shunt resistance current
- $V_b$  : Voltage across the diode
- $I_o$  : Output current
- $V_o$  : Output voltage

ค. วงจรเทียบเท่าของไดโอดไวแสง

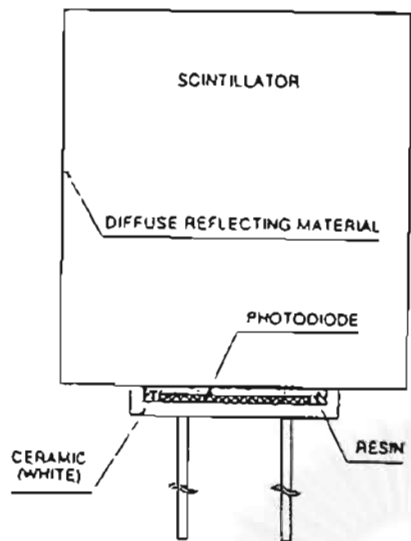
รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของรอยต่อไดโอดไวแสง

การเพิ่มประสิทธิภาพความไวแสงของไดโอดทำได้โดยการขยายบริเวณไวแสงให้กว้างขึ้น โดยสร้างโครงสร้างรอยต่อเป็น p-i-n ชั้น ชั้นผลึกอินทรีนซิก (intrinsic) ระหว่างรอยต่อ PN จะช่วยเพิ่มความไวแสงและมีประสิทธิภาพในการรวบรวมประจุพาหะ (charge collection efficiency) ได้สูงขึ้นทำให้ไดโอดตอบสนองการวัดแสงได้ดี โดยเฉพาะการออกแบบไดโอด p-i-n ให้มีพื้นที่กว้างดังในรูปที่ 2.13

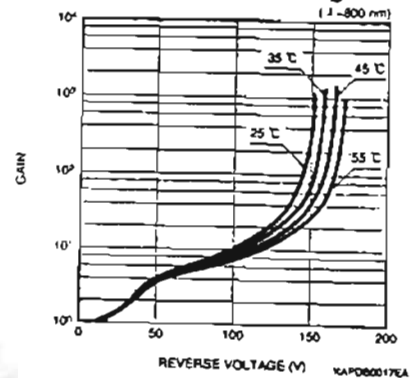


รูปที่ 2.13 โครงสร้างของไดโอดไวแสง p-i-n พื้นที่กว้าง<sup>(10)</sup>

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโครงสร้างของไดโอดไวแสงให้ทำงานที่ไบอัสกลับทางระหว่างแอนโอดและคาโทดสูงมากบริเวณแรงดันทลายแบบอวาแลนซ์ (Avalanche breakdown) เรียกว่า ไดโอดไวแสงชนิดอวาแลนซ์ ซึ่งหลังจากเกิดการถ่ายโอนพลังงานโฟตอนบริเวณรอยต่อ PN แล้วจะเกิดการ ไอออไนซ์ทุติยภูมิในบริเวณปลอดพาหะของไดโอด ทำให้ทวีปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลมากขึ้น ซึ่งเท่ากับมีการขยายสัญญาณในกิ่งตัวนำไวแสงแต่มีราคาสูงมากในรูปที่ 2.14 ก และ ข. แสดงโครงสร้างของหัววัดซินทิลเลชันที่ประกอบด้วยไดโอดอวาแลนซ์และคุณลักษณะของกราฟ V-I ของไดโอด

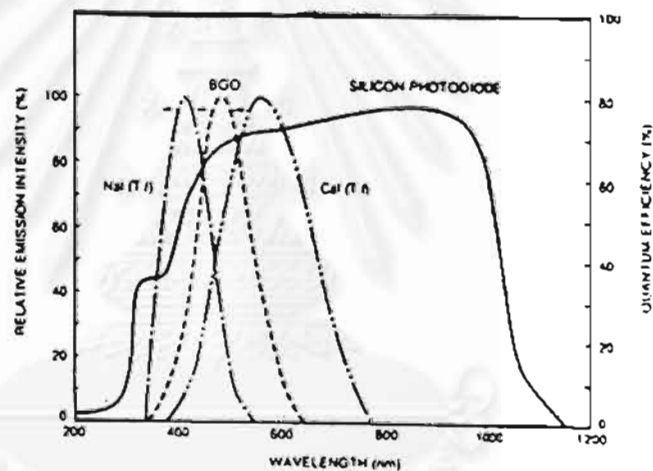


● Gain vs. Reverse Voltage



ก. โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดเลเซอร์ที่ใช้ Avalanche photodiode (APD)

ข. คุณลักษณะการขยายสัญญาณของ APD



ค. สเปกตรัมความยาวคลื่นของประกายแสงผลึกวัดเทียบกับสเปกตรัมตอบสนองแสงของโฟโตไดโอด

รูปที่ 2.14 โครงสร้างและการทำงานของไดโอดไวแสงแบบอวาลานซ์

ในรูปที่ 2.14 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นของประกายแสงของผลึกวัดรังสีเทียบกับสเปกตรัมการตอบสนองความยาวคลื่นของไดโอดไวแสง จะเห็นว่า การตอบสนองความยาวคลื่นแสงกว้างครอบคลุมผลึกวัด BGO (bismuth gemanate) และผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) CsI (TI)



## 2.5 เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์<sup>(6)</sup>

ในการปลูกผลึกเดี่ยว (Single crystal) สามารถที่จะปลูกได้หลายวิธีซึ่งมีวิธีการที่แตกต่างกันแล้วแต่ความเหมาะสมของชนิดของผลึกได้แก่

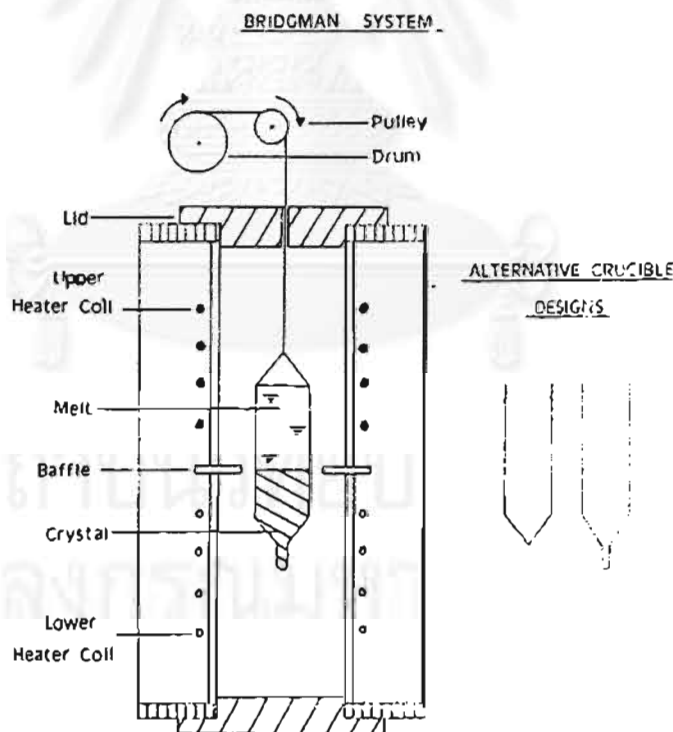
1. Czochralski System
2. Zone Refining System
3. Bridgman System
4. Kyropoulos Growth System
5. Vermul Growth System

เทคนิคการปลูกผลึกที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการปลูกผลึกด้วยวิธีของบริดจ์แมน (Bridgman Method) การปลูกผลึกวิธีนี้ Bridgman ได้ริเริ่มการปลูกผลึกเดี่ยว โดยการเข็นตัวลงของสารหลอมเหลวอย่างช้าๆภายในภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวเมื่อปี ค.ศ. 1925 และต่อมาในปี ค.ศ. 1936 Stockbarger ได้ทำการปรับปรุงเทคนิคของ Bridgman โดยการเคลื่อนภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวผ่านเตาในแนวตั้ง การก่อดัวให้เกิดผลึกจะเริ่มต้นที่จุดต่ำสุดของภาชนะและต่อเนื่องขึ้นมาจนทั่วทั้งภาชนะ จุดเริ่มต้นของการก่อดัวให้เกิดผลึกมักเกิดขึ้นที่ปลายของภาชนะบรรจุสารหลอมเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงรูปร่างของปลายภาชนะในบางครั้งอาจจำเป็นต้องใส่เมล็ดผลึกเดี่ยวเริ่มต้นลงไปที่ปลายภาชนะ เพื่อให้การเกิดผลึกเป็นไปได้ง่ายขึ้น

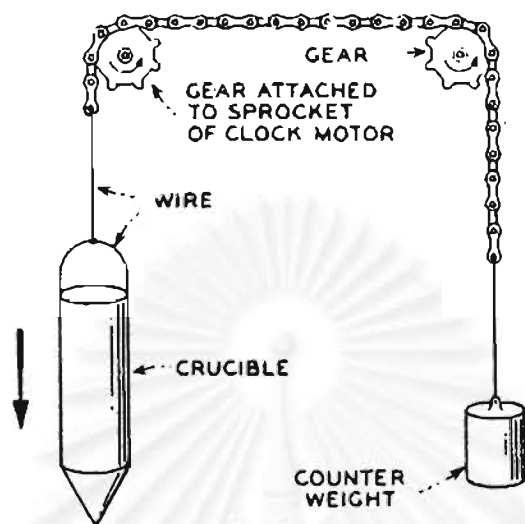
กระบวนการปลูกผลึกวิธีนี้เริ่มจากการทำให้เกิดก่อดัวเริ่มต้นของผลึก (Nucleation) บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-liquid Interface) ภายใต้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) สารที่จะปลูกผลึกมักจะบรรจุอยู่ภายในภาชนะทรงกระบอก (Cylindrical crucible) และควบคุมให้ภาชนะเคลื่อนที่ลงผ่านเกรเดียนต์อุณหภูมิของขดลวดความร้อน (wire heater) ที่เพิ่มขึ้นตามแนวยาวของภาชนะที่บรรจุสารที่ต้องการปลูกผลึก บางกรณีภาชนะที่บรรจุสารจะถูกยึดอยู่กับที่ในเตาที่ได้ออกแบบไว้พิเศษสามารถที่จะสร้างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวท่อที่ปลูกผลึก (Temperature profile) ซึ่งประมาณไว้ว่าเป็นเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (Linear gradient) จากนั้นทำให้เตาเย็นลงความเป็นจริงแล้วอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีเพียงบางส่วนภายในเตาเท่านั้นที่มีลักษณะเกรเดียนต์เป็นเชิงเส้นเพียงพอสำหรับการปลูกผลึกโดยการเข็นตัว

อย่างไรก็ตามสิ่งที่ยากในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีคบาร์เกอร์ ก็คือลักษณะเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ถ้าหากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงความชัน (Slope) มากเกินไปจะทำให้สารที่ต้องการปลูกผลึกเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว การก่อผลึกจะไม่เป็นระเบียบ (Polycrystal) และถ้าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนแปลงความชันน้อยเกินไปการก่อตัวเป็นผลึกเดี่ยวก็อาจจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวจะพร้อมกันตลอดแนวเคลื่อนที่ ดังนั้นการก่อผลึกจะเป็นระเบียบสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงความชันเกรเดียนต์มีความพอดีและการก่อตัวผลึกจะค่อยเริ่มที่ปลายของภาชนะปลูกผลึกและค่อยเย็นตัวลงอย่างต่อเนื่อง

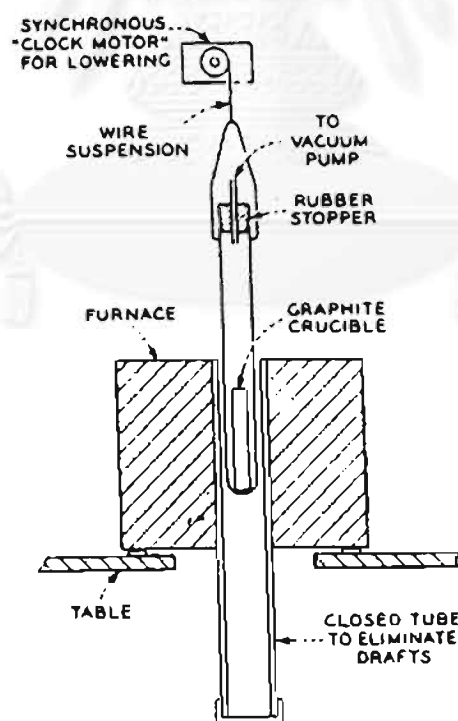
โครงสร้างของระบบปลูกผลึกของบริดจ์แมนแสดงในรูปที่ 2.15 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ เคาหลอม 2 โชน ท่อปลูกผลึก ระบบเคลื่อนที่ท่อปลูกผลึกแนวตั้ง และแผ่นกั้นการรบกวนของอุณหภูมิจากโชน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิบริเวณก่อผลึกเริ่มต้น ในรูปที่ 2.16 แสดงเทคนิคควบคุมการเคลื่อนที่ของภาชนะปลูกผลึกภายในท่อปลูกผลึก โดยภาชนะปลูกผลึกมีอิสระในการรักษาขนาดของสารที่บรรจุอยู่



รูปที่ 2.15 แสดงระบบปลูกผลึกเดี่ยวของบริดจ์แมน



ก. ระบบขับเคลื่อนแบบภาชนะปลุกผลึกเปิด



ข. ระบบขับเคลื่อนแบบภาชนะปลุกผลึกปิด ภายในท่อปลุกผลึกภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

รูปที่ 2.16 แสดงเทคนิคการเคลื่อนที่ของภาชนะปลุกผลึก ในการปลุกผลึกแบบบริคแมน- สตีลบาร์เกอร์

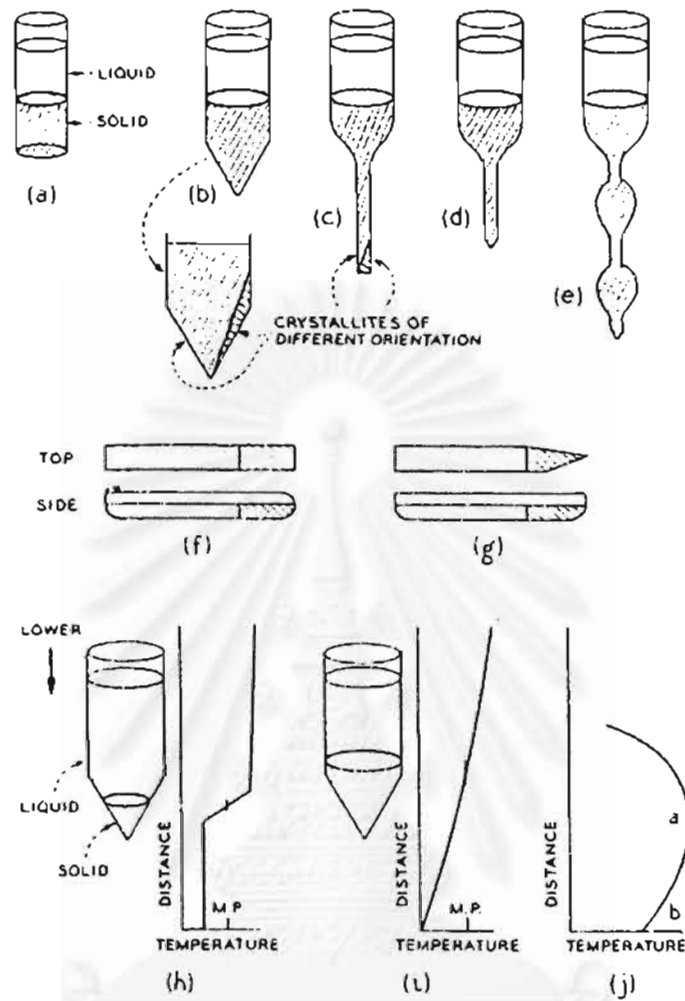
สิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องคำนึงถึงในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีคบาร์เกอร์ คือ

- 1) ภาชนะที่บรรจุสารต้องมีรูปทรงที่เหมาะสมกับการก่อผลึกของสารที่ต้องการจะปลูกผลึก
- 2) จุดหลอมเหลวของภาชนะจะต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่ต้องการจะปลูก
- 3) สารที่จะปลูกผลึกต้องไม่ทำปฏิกิริยากับภาชนะที่บรรจุหรือกับบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกตลอดช่วงอุณหภูมิการปลูกผลึก
- 4) สารจะต้องหลอมละลายกลายเป็นสารหลอมเหลวเนื้อเดียวกันทั้งหมดภายในภาชนะโดยปราศจากสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ไม่เช่นนั้นผลึกที่ได้จากการปลูกจากสารหลอมเหลวที่ไม่บริสุทธิ์ อาจจะมีความสมบูรณ์บางส่วนเท่านั้น
- 5) อุณหภูมิของเตาที่เหมาะสมและสามารถสร้างเกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้ได้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของภาชนะปลูกผลึกตามที่ออกแบบไว้
- 6) อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมและวัดอุณหภูมิต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง
- 7) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของภาชนะเพื่อผ่านเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในเตา ต้องมีความละเอียดที่เพียงพอโดยไม่ทำให้การปลูกผลึกเกิดความเสียหายได้เช่น ความเร็วที่ใช้ในการควบคุม แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เป็นต้น
- 8) บรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกควรเป็นระบบปิดและมีก๊าซเฉื่อยอยู่ เพื่อมิให้เกิดออกซิไดซ์หรือเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศ รวมถึงการระเหยของสารประกอบบางชนิด

ลักษณะของภาชนะที่ใช้ในการปลูกผลึกเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีคบาร์เกอร์ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17a. ภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวรูปทรงกระบอก ด้านปลายมีพื้นที่กว้างเท่าปากกระบอก ไม่สามารถสร้างสภาวะเริ่มต้นการก่อตัวเป็นผลึกระนาบเดียวกันทั้งพื้นที่ได้ จึงมีการปรับปรุงให้ปลายของภาชนะบรรจุสารมีพื้นที่ขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.17b. ถึง e.

รูปที่ 2.17b. ภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวมีปลายเป็นรูปทรงกรวย เพื่อที่จะสร้างสภาวะการเริ่มต้นของสารหลอมเหลวในปริมาณที่น้อยๆ ในการทำให้เริ่มเย็นตัวลงเพื่อการก่อตัวของนิวเคลียสสารให้เกิดผลึกขึ้นอย่างเป็นระเบียบและเป็นจุดเริ่มต้นในการทำให้เกิดการเติบโตของผลึกที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะภาวะทรงกระบอกที่มีปลายรูปแบบต่าง ๆ กัน สำหรับการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน - สตีอ์บาร์เกอร์ <sup>(7)</sup>

รูปที่ 2.17c. ภาวะที่บรรจุสารหลอมเหลวมีปลายเป็นรูปทรงคาปิลลารี (Capillary) ซึ่งจะมีเพียงสารหลอมเหลวปริมาณน้อยบริเวณส่วนปลายเท่านั้นที่เกิดการเย็นตัวลงในช่วงเริ่มต้น จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการจัดเรียงระนาบอย่างมีระเบียบ บริเวณช่วงรอยต่อของการปลูกผลึกผ่านหลอดคาปิลลารีไปสู่ภาวะปลูกผลึกหลัก

รูปที่ 2.17d. ภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวมีปลายเป็นรูปทรงกรวยและส่วนของรูปทรงกรวยถูกเชื่อมต่อกับภาชนะปลูกผลึกหลัก โดยผ่านส่วนที่เป็นคาปิลลารีซึ่งให้ผลดีมากกว่ารูปทรงของภาชนะในรูปที่ 2.17b. และ 2.17c.

รูปที่ 2.17e. ภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวมีปลายเป็นรูปทรงกรวยเชื่อมผ่านส่วนของกระเปาะที่บานออกในปริมาตรที่เหมาะสม ผ่านคาปิลลารีไปยังส่วนของกระเปาะอีกชั้นหนึ่งก่อนต่อผ่านคาปิลลารีไปยังส่วนของปริมาตรหลักของภาชนะ ในรูปแบบนี้เป็นการทำให้เกิดการก่อตัวให้เริ่มเกิดผลึกขึ้นภายในปริมาตรทรงกรวยเล็ก ๆ ผ่านในกระเปาะเพื่อที่จะเพิ่มโอกาสของการเกิดผลึกเดี่ยวขึ้นภายในกระเปาะเล็ก ๆ ให้แน่นนอนเหมือนกับการใช้เมล็ดผลึกเดี่ยวสำหรับเริ่มทำให้เกิดการเติบโตของผลึกในคาปิลลารีขึ้นก่อนที่จะส่งผลไปยังปริมาตรหลักของภาชนะ

เนื่องจากเทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีออบาร์เกอร์ ต้องการอาศัยคุณสมบัติของภาชนะที่บรรจุสารเป็นส่วนสำคัญในการปลูกผลึก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวซึ่งจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารหลอมเหลว ณ อุณหภูมิของการปลูกผลึก นอกจากนี้ยังต้องช่วยเอื้อประโยชน์ต่อการปลูกผลึกเป็นอย่างดี โดยผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกแล้วต้องไม่ยึดติดกับผนังภาชนะที่บรรจุ เพราะจะเป็นการลดความเครียดและความเค้น (Strain and Stress) ของผลึกและสามารถนำผลึกที่ได้จากการปลูกออกจากภาชนะที่บรรจุได้ง่ายโดยไม่ต้องทำลายภาชนะที่บรรจุ ในการเลือกใช้ภาชนะปลูกผลึกจึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน (thermal efficient of expansion) ของทั้งภาชนะที่บรรจุและของผลึกที่ได้จากการปลูกด้วย ดังแสดงในตารางภาชนะบรรจุสารใน ภาคผนวก ง

เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน - สตีออบาร์เกอร์นี้ได้เคยถูกใช้เป็นวิธีในการปลูกผลึกซิลเวอร์ฮาไลด์ (Silver halide crystals) ในกลุ่ม  $AgCl$  และ  $AgBr$  ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1947 โดยผู้เชี่ยวชาญหลายท่านและประมาณปี ค.ศ. 1958 บริษัท Harshaw และ Semi-Element ได้ปลูกผลึกเป็นแท่ง (ingots) ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึง 5 นิ้วและยาว 7 นิ้วโดยการใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตีออบาร์เกอร์ ซึ่งใช้เตาหลอมแบบแนวตั้งประกอบด้วยขดลวดความร้อน 2 ชุด ที่จัดการควบคุมอุณหภูมิให้อิสระจากกันพร้อมทั้งมีแผ่นกันเพื่อลดการรบกวนทางความร้อนระหว่างโซนขดลวดทั้ง 2 ชุดเตาหลอมที่ออกแบบโดย Brown ในปี ค.ศ. 1958<sup>(6)</sup> นั้นเตาส่วนบนจะคงอุณหภูมิไว้ที่  $10-15^{\circ}C$  เหนือจุดหลอมเหลวของซิลเวอร์ฮาไลด์ ( $AgBr = 434^{\circ}C$ ,  $AgCl=455^{\circ}C$ ) และเตาส่วนล่างจะคงไว้ที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}C$  และ

เกรเดียนท์ของอุณหภูมิโดยปกติจะคงไว้ที่  $10^{\circ}\text{C}/\text{ชม}$ . สารที่จะปลูกผลึกจะถูกบรรจุในภาชนะปลูกผลึกได้แก่ Pyrex, Glass, Quartz หรือโลหะ platinum ซึ่งได้ทำการทดลองโดย Nail ในปีค.ศ. 1957 โดยทั่วไปภาชนะบรรจุสารปลูกผลึกจะนิยมใช้เป็นควอทซ์ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 2 เซนติเมตร และมีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 20 เซนติเมตร ในปีค.ศ. 1949 Hofstader ได้มีรายงานไว้ว่าเคยพยายามที่จะปลูกผลึก  $\text{AgCl}$  ในหลอดภาชนะบรรจุสารปลูกผลึกรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยมพบว่าผลึกที่ได้ไม่เป็นผลึกเดี่ยว แต่กลับเป็นหลายผลึก (polycrystal) เล็กๆเกิดขึ้นที่ขอบมุมผนังทั้งสี่ด้าน

อัตราการเติบโต (Growth rate) ของผลึกที่ใช้ในการปลูกผลึก  $\text{AgCl}$  จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และเคยมีผู้ประสบผลสำเร็จในการปลูกผลึกในการเพิ่มอัตราการเติบโตของผลึกมากกว่านี้มาแล้วแต่มีโอกาสน้อยที่จะเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยว่าสารที่ต้องการจะปลูกควรจะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม ไนโตรเจน หรือในก๊าซฮาโลเจน ซึ่งการปลูกผลึกในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยต่างชนิดจะมีผลแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่ว่าในรูปลักษณะของผลึกหรือคุณสมบัติของผลึก แต่สำหรับการปลูกผลึกในอากาศหรือก๊าซออกซิเจน จะมีความผิดปกติอย่างมากต่อคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของสาร Brown, 1958 Siiptiz, 1957 Mitchell, 1957a ในตารางที่ 2.3 แสดงผลึกเดี่ยวหลายชนิดที่ได้ใช้วิธีการปลูกแบบบริดจ์แมน- สตีคบาร์เกอร์

## 2.6 วิธีการตัดและขัดเงาผลึก <sup>(๓)</sup>

ในการนำผลึกที่ปลูกได้ ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ จำเป็นที่จะต้องมีการตัดชิ้นแท่งผลึกให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแล้วจึงนำมาขัดผิว จากรายงานวิจัยพบว่าผลึกเดี่ยวของซิลเวอร์ฮาไลด์ จะมีลักษณะอ่อนนุ่มและมีปฏิกิริยากับโลหะส่วนใหญ่ เทคนิคการตัดสามารถตัดด้วยเครื่องจักรที่ใช้ตัดโลหะอ่อนนุ่มเช่นเดียวกับงานทางด้านการเตรียมตัวอย่างดังนี้

ในปีค.ศ. 1951 Moeller Etal ได้พบว่าผลึกของ  $\text{AgCl}$  มีคุณสมบัติเชิงกลคล้ายกับอัญมณีเมื่อครั้งที่ใช้ใบมีดตัดที่ปลายทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบสูง ๆ โดยใช้ Kerosene เป็นตัวช่วยหล่อลื่นขณะทำการตัด ซึ่งบางครั้งอาจไม่จำเป็นต้องใช้ Kerosene พบว่าผิวที่ได้จากการตัดใหม่ ๆ ไม่ค่อยเรียบจากการตรวจสอบด้วยการใช้เครื่อง X-ray diffraction จะให้มุมกระเจิงกว้าง แบบกราวนด์ของสเปกตรัมสูง จำเป็นต้องใช้น้ำยาทางเคมี ขัดผิวออกไปประมาณ 0.05 mm (Brown, 1958)

ในปีค.ศ. 1957 Heidheiser ได้เคยรายงานไว้ว่าการขัดผิวตัวอย่างโดยใช้กระดาษทราย แล้วขัดต่อด้วยการขัดเงา โดยใช้ผ้า cotton คู่กับผงอลูมินาแล้วตามด้วย tin oxide ในขั้นสุดท้าย จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการขัดเงาไปจุ่มใน dilute photographic fixer เพื่อที่จะขจัดความเครียดออกจากผิวชิ้นตัวอย่างจะให้ผิวผลึกที่เรียบ

ในปีค.ศ. 1957 Nail et.al ได้เคยเตรียมผิวของ AgCl โดยการใช้กระดาษทรายที่มีความละเอียด #1000 แบบ alumina oxide ขัดผิวของผลึก AgCl บนแผ่นกระจกแก้วผิวเรียบ โดยมีน้ำไหลผ่านเล็กน้อยแล้วตามด้วยการขัดเงาผิวในเวลาอันสั้น โดยใช้ผ้าเปียกกับสารละลาย 30% Sodium thiosulfate หลังจากนั้นก็ล้างออกด้วยน้ำ alkaline chlorine แล้วจุ่มลงในกรด hydrochloric ไม่เกินนาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปแห้งหรือจับด้วยกระดาษกรองก็จะได้ผิวเรียบเป็นเงา

การลดความเครียดที่อาจเกิดขึ้นได้หลังการปลูก การตัด และการขัด อาจถูกขจัดได้ด้วยการอบที่ความร้อน  $400^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาหลายชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอัตราไม่เกิน  $20^{\circ}\text{C/hr}$  ซึ่งจะทำให้ผลึกมีความเสถียรในการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงกว้าง

### ตารางที่ 2.3 ผลึกเดี่ยวของสารประกอบต่าง ๆ ที่ปลูกด้วยวิธีการของบริจด์แมน-สตีคบาร์เกอร์

| Compound                     | Formula               | Melting Point ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Crucible Material                      | Gradient                         | Cooling or Lowering Rate             | Atmosphere                              | Comments   |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Silver bromide               | AgBr                  | 434                                  | Pyrex, quartz, Pt                      | $10^{\circ}/\text{cm}$ or higher | 1-5 mm/hr                            | $\text{Cl}_2$ (HCl or HBr pre-evacuate) | Size doping, etc. given; quartz probably best  |
| Argon                        | Ar                    | -189.4                               | Glass                                  | $5^{\circ}/\text{mm}$            | 1 mm/min                             | Ar                                      | Polycrystals<br>4 mm diameter  |
| Gold                         | Au                    | 960.5                                | Graphite                               | $\sim 5^{\circ}/\text{cm}$       | "Slow"                               | $\text{N}_2$                            | Single crystals up to 8 in. long   |
| Copper                       | Cu                    | 1083.2                               | Graphite                               | $\sim 12^{\circ}/\text{cm}$      | 5-20 cm/hr                           | Vacuum                                  | Kikuchi lines prove high perfection  |
| Nickel                       | Ni                    | 1455                                 | Recrystallized $\text{Al}_2\text{O}_3$ |                                  | 0.1-0.2 mm/hr                        | Vacuum                                  | No seeding (see Schadler, 1963 for other variations; see Goss, 1963 for other low melters) |
| Lithium                      | Li                    | 179                                  | Steel, stainless steel                 |                                  | $2^{\circ}$ - $30^{\circ}/\text{hr}$ | Ar                                      |  |
| Fluorite                     | $\text{CaF}_2$        | 1392                                 | Ta, Fe, or Ni                          | Not given                        | 10 mm/hr                             | Vacuum                                  | Special techniques to remove $\text{CaCl}_2$   |
| Fluorite<br>Lithium fluoride | $\text{CaF}_2$<br>LiF | 1392<br>870                          | C<br>Pt                                | "Large"<br>Not given             | $\sim 1$ mm/hr<br>Not given          | Vacuum<br>Air or vacuum better          |  |



### บทที่ 3

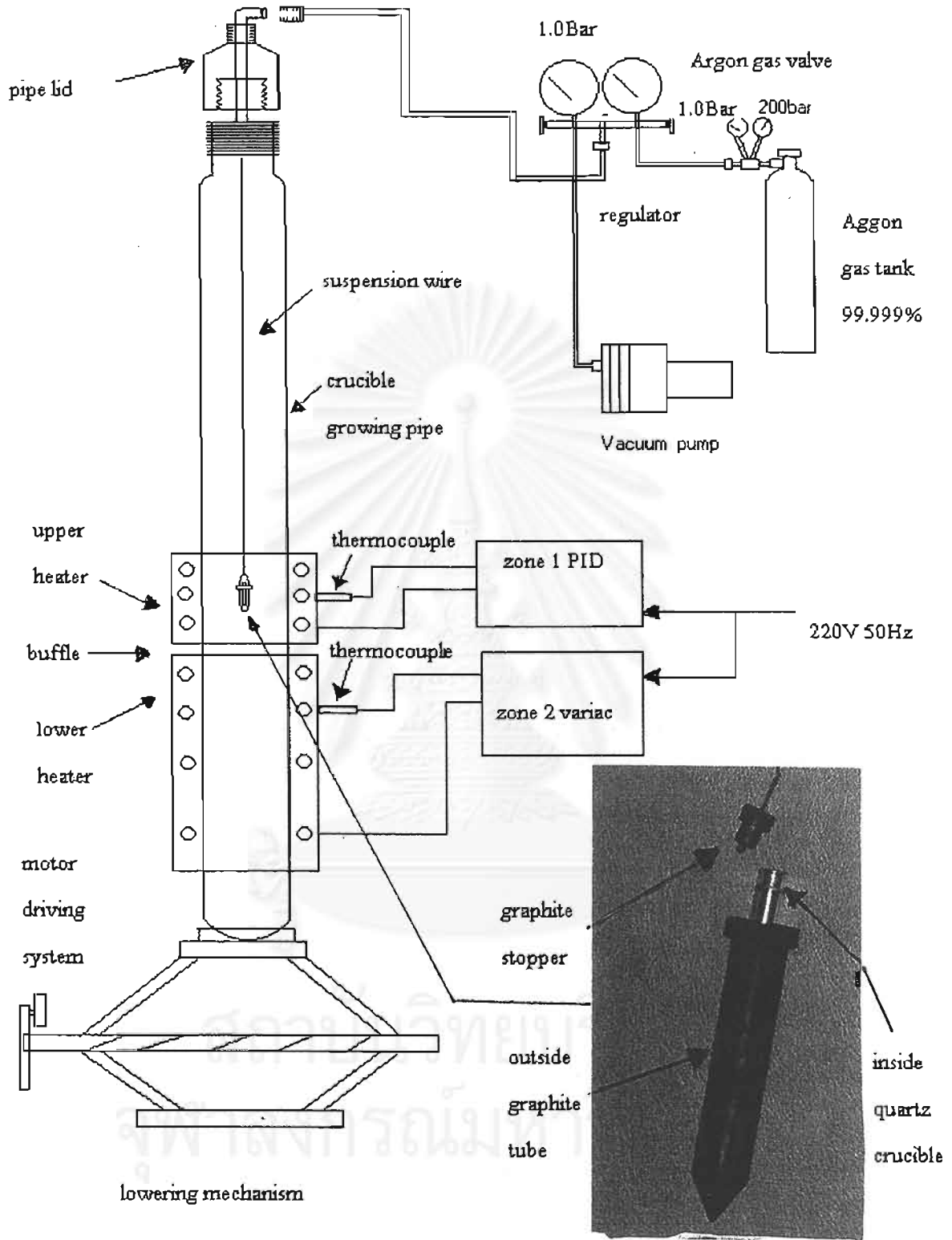
#### การพัฒนาผลึกวัดเรื่องรังสีซีเซียมไอโอไดด์

การพัฒนาผลึกวัดเรื่องรังสีชนิดซีเซียมไอโอไดด์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การออกแบบระบบปลูกผลึก และการหาเงื่อนไขในการปลูกผลึก รวมทั้งการเติมสารเจือ (Activator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัดรังสี จากการศึกษากระบวนการปลูกผลึกแบบต่างๆพบว่าระบบปลูกผลึกที่ใช้ในการปลูกผลึกสารในกลุ่ม อัลคาไลด์ ฮาไลด์ที่ใช้กันมากเป็นแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ดังนั้นจึงเลือกออกแบบระบบปลูกผลึกชนิดนี้โดยอาศัยแนวทางของการปลูกผลึกในกลุ่มซิลเวอร์ฮาไลด์เพื่อการออกแบบและตัดผลึกที่พัฒนาได้

#### 3.1 การออกแบบและสร้างระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สต็อกบาร์เกอร์<sup>(6)</sup>

ระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สต็อกบาร์เกอร์ ที่ออกแบบนั้นอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของซีเซียมไอโอไดด์ ซึ่งมีจุดหลอมละลายเท่ากับ  $621^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาคผนวก ก. โครงสร้างของระบบเป็นแบบท่อปลูกผลึกระบบปิดภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน<sup>(7)</sup> (มีความบริสุทธิ์ 99.999%) เคลื่อนที่ในแนวตั้ง มีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.1

- ก. ท่อปลูกผลึก (Cylindrical pipe for crystal growth) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มม. ยาว 1500 มม.
- ข. ชุดเตาหลอมและ ฉนวนกันความร้อนเพื่อรักษาความเสถียรของอุณหภูมิพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ แบบ 2 โชน สามารถปรับอุณหภูมิได้จาก  $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1000^{\circ}\text{C}$
- ค. ระบบสุญญากาศทำความดันสุญญากาศได้ถึงระดับ  $10^{-3}$  Torr



รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบปลูกผลึกแบบ บริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ สำหรับการปลูกผลึกซีเซียม  
ไอโอไดด์ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน

- ง. ระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนในท่อปลุกผลึกแปรเปลี่ยนความดันได้จาก 0 – 10 psi
- จ. ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึกสามารถปรับอัตราการเคลื่อนที่ได้จาก 1 มม./ชม. ถึง 40 มม./ชม.
- ฉ. อุปกรณ์แขวนภาชนะปลุกผลึกภายในท่อปลุกผลึก

### 3.2 ท่อปลุกผลึก

ท่อปลุกผลึกที่สร้างขึ้นทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทรงกระบอกกลมกลวงผนังบางเพื่อให้สามารถส่งผ่านอุณหภูมิจนไปยังภาชนะปลุกผลึกได้ดี โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร มีความสูง 160 เซนติเมตร ผนังหนา 2 มิลลิเมตร ด้านล่างของท่อรูปทรงกระบอกทำการเชื่อมปิดสนิท ส่วนทางด้านบนได้เชื่อมต่อเข้ากับท่อรูปทรงกระบอกอีกท่อนหนึ่งซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร และมีความสูง 5 เซนติเมตร โดยที่ท่อรูปทรงกระบอกท่อนบนนี้มีความหนา 3.5 มิลลิเมตร ซึ่งช่วยให้สามารถทำเกลียวภายนอกได้สะดวก ทั้งนี้เพื่อสร้างปากท่อสวมเข้ากับฝาครอบสเตนเลสด้านล่างบนสุด ฝาครอบนี้ออกแบบไว้เป็นส่วนแยกของท่อปลุกผลึกเพื่อที่จะนำภาชนะที่ปลุกผลึกเข้าและออกจากห้องปลุกผลึกในท่อรูปทรงกระบอกได้ ทั้งยังมีจุดเชื่อมต่อกับข้อต่อทองเหลืองในการนำไปต่อร่วมกับระบบสุญญากาศและระบบอัดก๊าซเพื่อก่อนทำการปลุกผลึก ฝาครอบนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร ทำเกลียวภายในและมีความสูงของฝาครอบ 27 มิลลิเมตร ทางด้านบนเชื่อมเข้ากับท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สูง 24 มิลลิเมตร ทำเกลียวภายในไว้ต่อกับข้อต่อทองเหลืองเพื่อต่อเข้ากับท่อขนาด 6 มิลลิเมตร ไปยังชุดสุญญากาศและชุดควบคุมแรงดันก๊าซอาร์กอน

### 3.3 ชุดเตาหลอมและฉนวนกันความร้อน

ชุดเตาหลอมสำหรับให้ความร้อนกับห้องปลุกผลึกและภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวเพื่อปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน – สโตกบาร์เกอร์ สามารถแบ่งส่วนประกอบเป็น 3 ส่วนคือ

- ก. ชุดฐานเหล็กโครงสร้างรองรับเตาหลอม
- ข. ชุดฉนวนกันความร้อน
- ค. ชุดขดลวดความร้อน

ก. ชุดฐานเหล็กโครงสร้างรองรับเตาหลอม

ส่วนบนเป็นชุดโครงสร้างเหล็กฉากขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ความสูง 60 เซนติเมตร ออกแบบสำหรับบรรจุฉนวนกันความร้อนและชุดขดลวดความร้อนไว้ภายใน

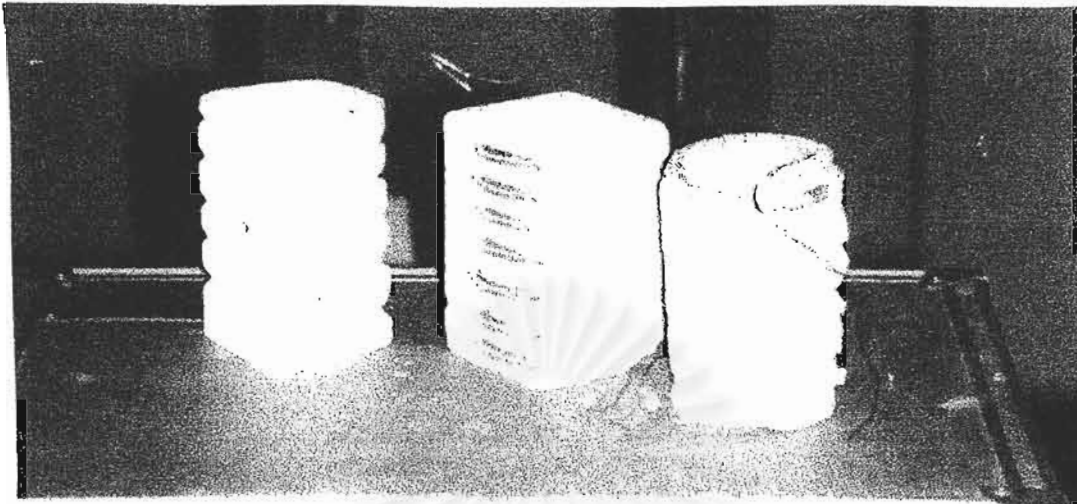
ส่วนล่างเป็นชุดฐานโครงสร้างเหล็กแท่งกลมขนาด 32x32 ตารางเซนติเมตร ความสูง 67 เซนติเมตร ไว้รองรับโครงสร้างเหล็กส่วนบนและติดตั้งชุดควบคุมการเคลื่อนที่ลงของท่อปลุกผลึกที่ฐานด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 3.1

ข. ชุดฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนที่ใช้เป็นอิฐเบาทนไฟเนื้ออ่อนซึ่งสามารถตัดเจาะให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงง่ายต่อการเจาะร่องเพื่อบรรจุชุดขดลวดความร้อน พร้อมทั้งช่องกลวงให้ท่อปลุกผลึกเคลื่อนที่ผ่านลงไปได้ โครงสร้างในส่วนนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

ข.1 ฉนวนส่วนที่ทำหน้าที่บรรจุชุดขดลวดความร้อน

ชุดขดลวดความร้อนของเตาหลอมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนบนเป็นอิฐเบาทนไฟขนาดพื้นที่หน้าตัด 7.5x7.5 ตารางเซนติเมตร และมีความสูง 11.5 เซนติเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรด้านข้างด้านละ 6 รู จากนั้นทำการเจาะร่องด้านข้างด้านหนึ่งเป็นแนวทะแยงจากมุมบนด้านซ้ายลงมามุมล่างของรูถัดไปจนถึงสิ้นสุดที่ขอบด้านล่าง ส่วนอีกด้านหนึ่งเจาะร่องเป็นแนวขนานกันจากรูด้านซ้ายตรงไปยังรูด้านขวาทำจนหมด โคจรระยะห่างระหว่างรูเท่า ๆ กันประมาณ 0.5 เซนติเมตร เพื่อฝังเส้นลวดความร้อน ส่วนล่างของเตาหลอมเป็นอิฐเบาทนไฟขนาดพื้นที่ 7.5x11.5 ตารางเซนติเมตร และมีความสูง 23 เซนติเมตรแล้วทำการเจาะรูและเจาะร่องเช่นเดียวกับส่วนบน ต่างกันตรงที่ระยะห่างระหว่างรูเพิ่มขึ้นจนถึงด้านล่างสุดดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของฉนวนบรรจุขดลวดความร้อน

#### ข.2 ฉนวนส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นกันความร้อน

ฉนวนเป็นส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนโดยรอบชุดขดลวด ความร้อนทั้งส่วนบนและส่วนล่างโดยวางซ้อนกัน ความหนาของอิฐเป็นส่วนที่ช่วยรักษา ความร้อนภายในเตาให้คงที่อยู่เสมอ โดยที่อิฐเบาทนไฟแต่ละก้อนจะมีขนาดเท่ากับ 7.5x11.5x23 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขณะเดียวกันระหว่างโซนขดลวดความร้อนบนและล่างจะ สอดแผ่นเหล็กความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการรบกวนของอุณหภูมิระหว่างโซน

#### ค. ชุดขดลวดความร้อน

ในการออกแบบเตาหลอมที่มีอุณหภูมิตามต้องการในบริเวณก่อก้อน เพื่อให้เหมาะกับ รูปร่างของภาชนะบรรจุสาร ชนิดของสารหลอมเหลว จุดหลอมเหลวของสารชนิดนั้น ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดของเตา เนื่องจากปริมาณของสารซีซีเอ็มไอโอโคคในการทำวิจัยใช้ ปริมาณที่น้อยในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง รวมทั้งลักษณะกระเดียนซ์ของอุณหภูมิต่อระยะทาง

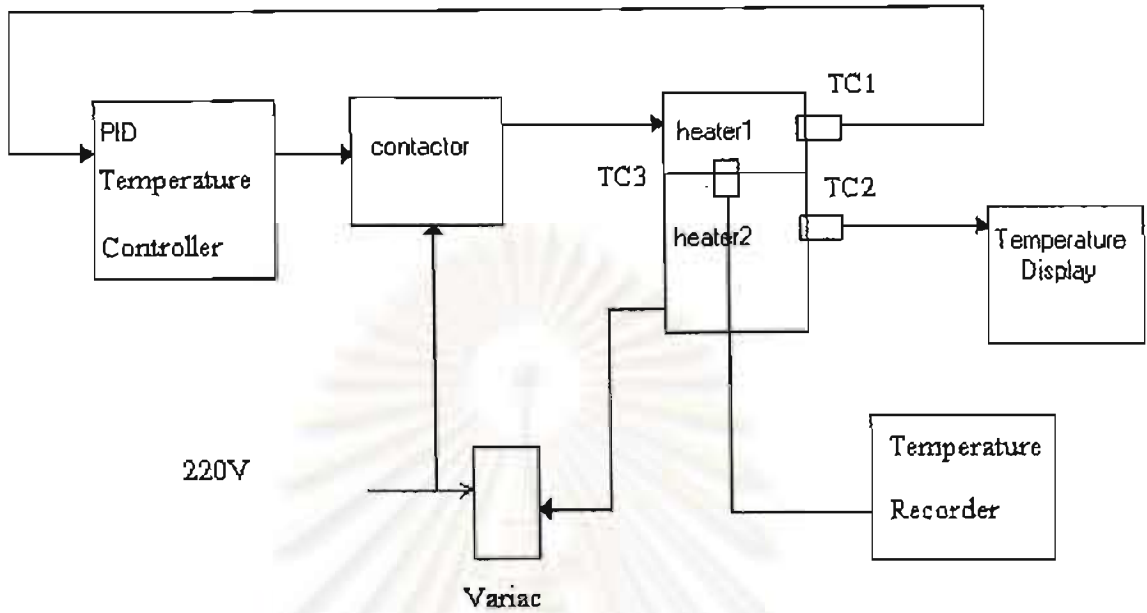
ตามแนวยาวของภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวก็เป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นในการออกแบบเตาหลอม จึงต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- 1) อุณหภูมิภายในเตาต้องสูงถึงจุดหลอมเหลวของสารที่ต้องการปลูกผลึก
- 2) อุณหภูมิภายในเตาต้องคงที่สม่ำเสมอตลอดช่วงการปลูกผลึก
- 3) การลดลงของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิต้องลดลงเป็นเส้นตรงที่มีความชันพอเหมาะ
- 4) ขนาดของเตาต้องเหมาะสมกับขนาดของภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลว ซึ่งจะมีผลต่อเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

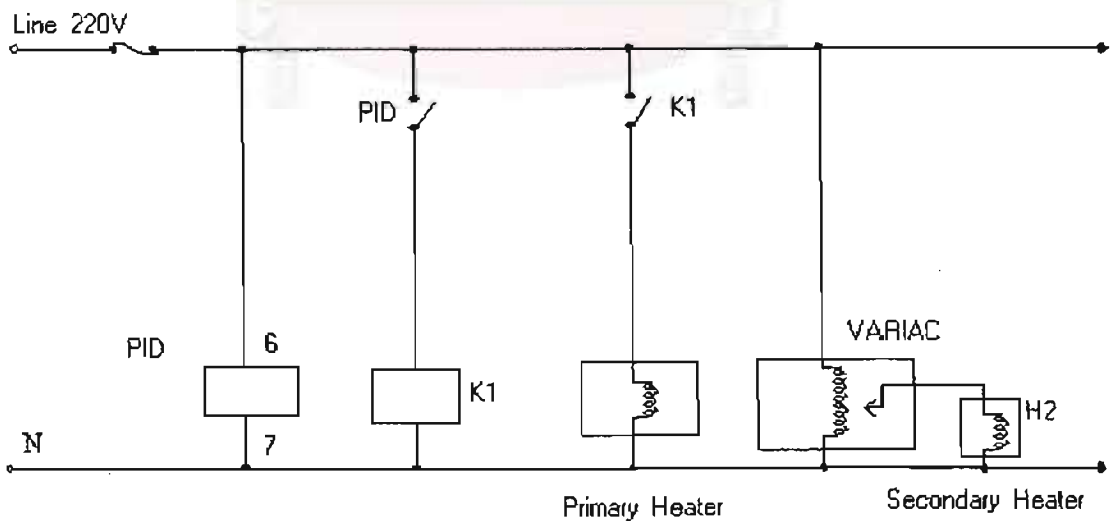
จากการประเมินกำลังไฟฟ้าของเตาหลอมต้องใช้ประมาณ 1.2 kW และเลือกใช้ขดลวดความร้อนชนิดความต้านทานของ Kanthal-AF ขนาด 1.3 mm จำนวนขนาดขดลวดและความยาวเพื่อบรรจุในร่องฉนวนความร้อนจากรายละเอียดในภาคผนวก ข ได้ความต้านทานของขดลวดเท่ากับ 23 โอห์ม ขดลวดความร้อนทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400 °C ซึ่งเพียงพอต่อการควบคุมอุณหภูมิหลอมละลายและอุณหภูมิก่อตัวผลึกของสารซีเซียม ไอโอไดด์ทั้ง 2 ชุด

ขดลวดความร้อนชุดบน (primary heater) จะพันเป็นคอยล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและบรรจุในร่องฉนวนรอบท่อปลูกผลึกแต่ละรอบห่างกัน 10 มิลลิเมตร ได้ระยะของโซลประมาณ 11 เซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 40 °C ถึง 1000 °C โดยปกติขดลวดความร้อนชุดบนจะตั้งอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายไว้ที่ 20 °C

ขดลวดความร้อนชุดล่าง (secondary heater) จะบรรจุในร่องฉนวนที่เซาะไว้รอบท่อปลูกผลึกที่ห่างกันมากกว่าที่ 10 – 25 มิลลิเมตร ได้ระยะโซลให้ความร้อนประมาณ 23 เซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 40 °C ถึง 700 °C โดยปกติจะต้องแปรเปลี่ยนเพื่อให้ได้ความชันของเกรเดียนท์อุณหภูมิบริเวณรอยต่อโซลให้เหมาะสม การจัดวงจรไฟฟ้าของขดลวดความร้อนของเตาหลอมทั้ง 2 ชุด เพื่อเชื่อมโยงกับระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ขดลวดความร้อนชุดที่ 1 โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิชนิดพีไอดี และขดลวดความร้อนชุดที่ 2 โดยใช้สไลด์เรกกูเลเตอร์



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรไฟฟ้าสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ขดลวดความร้อนชุดที่ 1 และชุดที่ 2

### 3.4 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมเป็นส่วนที่สำคัญมากในการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สตีคบาร์เกอร์ เนื่องจากการปลูกผลึกแบบนี้เนื้อสารจะต้องอยู่ในอุณหภูมิจุดหลอมเหลวภายในท่อปลูกผลึกก่อนแล้วเคลื่อนส่วนปลายของภาาชนะปลูกผลึกให้ลงมาอยู่ในช่วงของการเย็นตัวของสารหลอมเหลวอย่างต่อเนื่อง จึงต้องควบคุมอุณหภูมิขดลวดความร้อนส่วนบนให้รักษาอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิจุดหลอมเหลวคงที่และอุณหภูมิในขดลวดความร้อนส่วนล่างจะต้องปรับลดลงให้ได้เกรเดียนท์ที่เป็นเชิงเส้น ระบบควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย

- ก. ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors)
- ข. ระบบควบคุมอุณหภูมิชนิดพีไอดี (PID temperature controller)
- ค. สไลด์เรกกูเลเตอร์ (Slide regulator)

#### ก. ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เนื่องจากอุณหภูมิที่ต้องการใช้วัดจะอยู่ในช่วงของ  $600^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เหมาะที่จะใช้งานอยู่ในช่วงของอุณหภูมินี้ โดยที่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของขดลวดความร้อนตัวแรก (ด้านบน) จะส่งสัญญาณเอาท์พุทออกไปยังตัวควบคุมพีไอดี เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ขดลวดผลิตความร้อนได้อุณหภูมิของเตาตามที่ได้ตั้งไว้ในตอนเริ่มต้น ส่วนเทอร์โมคัปเปิลอีกหนึ่งตัว (ด้านล่าง) จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณส่วนล่างของเตา ซึ่งเป็นชุดความร้อนช่วย (Secondary heater) เพื่อปรับให้รอยต่อระหว่างเตาชุดบนและชุดล่างมีอุณหภูมิที่ต่อเนื่อง ตัววัดอุณหภูมิจะสามารถเปลี่ยนตำแหน่งวัดได้ทั้งเหนือและใต้รอยต่อ เพื่อจะได้ปรับสไลด์เรกกูเลเตอร์ให้อุณหภูมิมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นเชิงเส้น

#### ข. ตัวควบคุมอุณหภูมิชนิดพีไอดี

ระบบควบคุมอุณหภูมิพีไอดีที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเป็นของบริษัท RKC รุ่น REX C100 ซึ่งมีสมรรถนะการทำงานใน ภาคผนวก ค. ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนของเตาชุดบนให้อุณหภูมิตามที่ปรับไว้



ค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้คือ

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Set pet           | = 640 °C   |
| Proportional band | = 640 °C   |
| Integral time     | = 1200 sec |
| Derivative time   | = 40 sec   |

ค. สไลด์เรกกูเลเตอร์

ใช้สำหรับในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาของขวดความวร้อนชุดล่าง สามารถปรับแรงดัน ไฟฟ้าได้จาก 0 – 250 V ขนาด 2 kW

### 3.5 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศออกแบบให้ทำหน้าที่สูบน้ำที่สูบอากาศออกจากท่อปลุกผลึกซึ่งแขวนภายในท่อปลุกผลึกบรรจุน้ำสารซีเซียมไอโอไดด์ออกก่อนที่จะทำการอัดก๊าซอาร์กอนภายในท่อปลุกผลึก ระบบสุญญากาศนี้ประกอบด้วยวาล์วเปิด-ปิดอากาศ ซึ่งใช้ควบคุมทิศทางไหลของอากาศผ่านข้อต่อที่ติดตั้งบนฝาครอบ และเครื่องสุญญากาศแบบโรตารี (Rotary pump) ที่มีอัตราการสูบอากาศ 100 ลิตร/นาที สามารถทำสุญญากาศลงได้ 0.001 Torr การทำงานของระบบสุญญากาศแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.1 เมื่อสูบอากาศภายในท่อปลุกผลึกหมดและปิดลิ้นวาล์วแล้วจะหยุดการทำงานของเครื่องสุญญากาศ

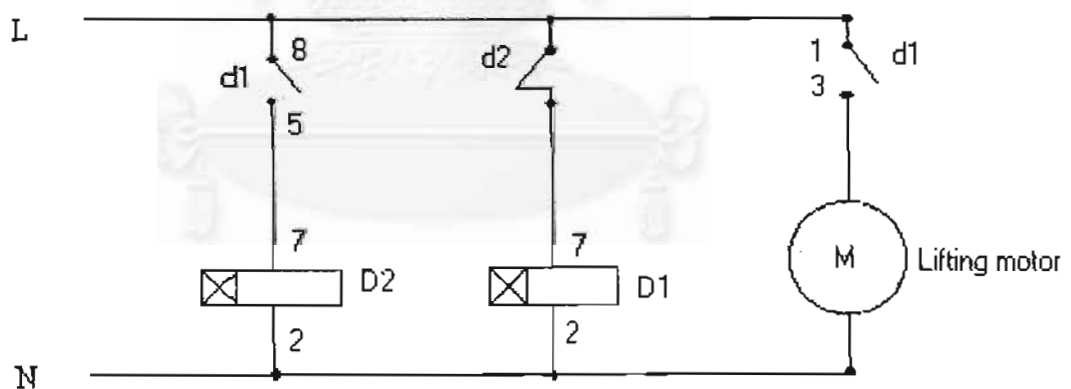
### 3.6 ระบบควบคุมความดันก๊าซในท่อปลุกผลึก

ระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนในท่อปลุกผลึก ประกอบด้วยวาล์วปรับทิศทางการไหลของก๊าซ 2 ทาง ใช้ร่วมกับท่อสุญญากาศ อุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ (Pressure regulator) และเกจอ่านความดันก๊าซ การทำงานของระบบควบคุมความดันก๊าซเริ่มหลังจากสูบอากาศออกจากท่อปลุกผลึกจนได้สถานะสุญญากาศ (0.001 Torr) แล้ว เมื่อปรับทิศทางของวาล์ว 2 ทางมารับก๊าซอาร์กอนและเปิดวาล์วปรับความดันก๊าซให้ก๊าซอาร์กอนเข้าบรรจุในท่อ

ปลุกผลึก จากนั้นปรับความดันจนได้ 1 บรรยากาศ โดยอ่านจากเกจวัดความดัน ถ้าเขารัก่อนที่บรรจูลงไปแทนที่อากาศในท่อปลุกผลึกจะช่วยป้องกันไม่ให้สารประกอบซีซีเอ็มไอโอไดด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซอื่นในอากาศและควบคุมความบริสุทธิ์ของผลึกที่ปลุกให้มีเฉพาะสารประกอบและสารที่เจือลงไปเท่านั้น

### 3.7 ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึก

ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึกในแนวตั้ง ออกแบบให้สามารถปรับอัตราการขับเคลื่อนที่ท่อปลุกผลึกให้ลดระดับลงจากด้านบนด้วยความเร็ว 1 มม./ชม. ถึง 40 มม./ชม. ประกอบด้วยมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous motor) พร้อมชุดเกียร์ทดรอบหมุนด้วยความเร็ว 6 รอบ/นาที ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz ทำงานร่วมกับชุดเฟืองทดซึ่งปรับอัตรารอบได้จาก 1/2 1/10 1/30 1/40 1/60 และ 1/80 และวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.5 ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 3.6 จำนวนรอบและระยะเคลื่อนที่ของระบบขับเคลื่อนสามารถควบคุมได้ดังข้อมูลทดสอบพิักการทำงานในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อเคลื่อนที่ท่อปลุกผลึก



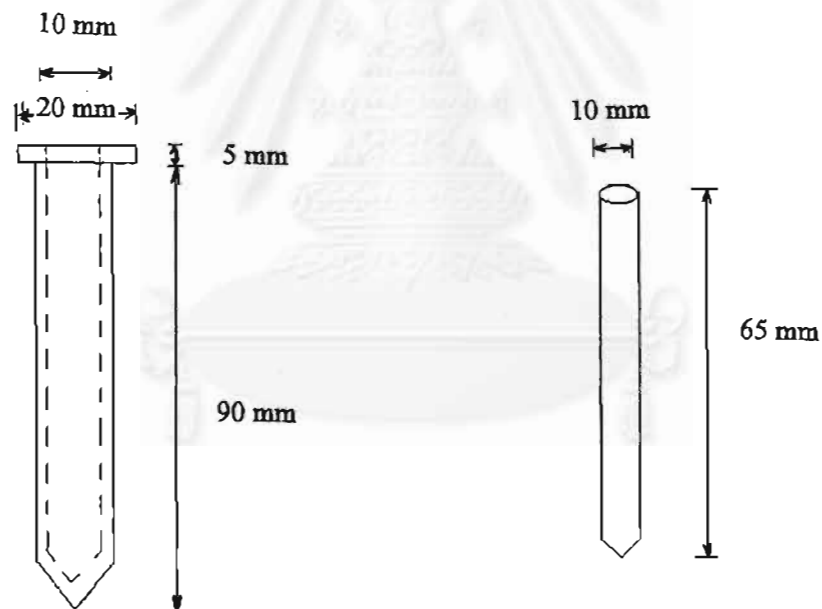
รูปที่ 3.6 ภาพแสดงระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก

ตารางที่ 3.1 ผลทดสอบพิกัดการทำงานระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก

| รอบ<br>ที่ | ตำแหน่ง<br>ที่ | ระยะ<br>ห่าง | m m /<br>รอบ | 1/2   | 1/10 | 1/20 | 1/30 | 1/40 | 1/60 | 1/80 |
|------------|----------------|--------------|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|
|            |                |              |              | mm/hr |      |      |      |      |      |      |
| 55-50      | 32-31          | 10           | 1.4          | 42    | 8    | 4.2  | 2.8  | 2.1  | 1.4  | 1.05 |
| 50-40      | 31-29          | 20           | 2.0          | 60    | 12   | 6.0  | 4.0  | 3.0  | 2.0  | 1.5  |
| 40-30      | 29-26          | 30           | 3.0          | 90    | 18   | 9.0  | 6.0  | 4.5  | 3.0  | 2.25 |
| 30-20      | 26-23          | 30           | 3.0          | 90    | 18   | 9.0  | 6.0  | 4.5  | 3.0  | 2.25 |
| 20-10      | 23-18          | 50           | 5.0          | 150   | 30   | 15.0 | 10.0 | 7.5  | 5.0  | 3.75 |

### 3.8 อุปกรณ์รองรับภาชนะปลูกผลึก

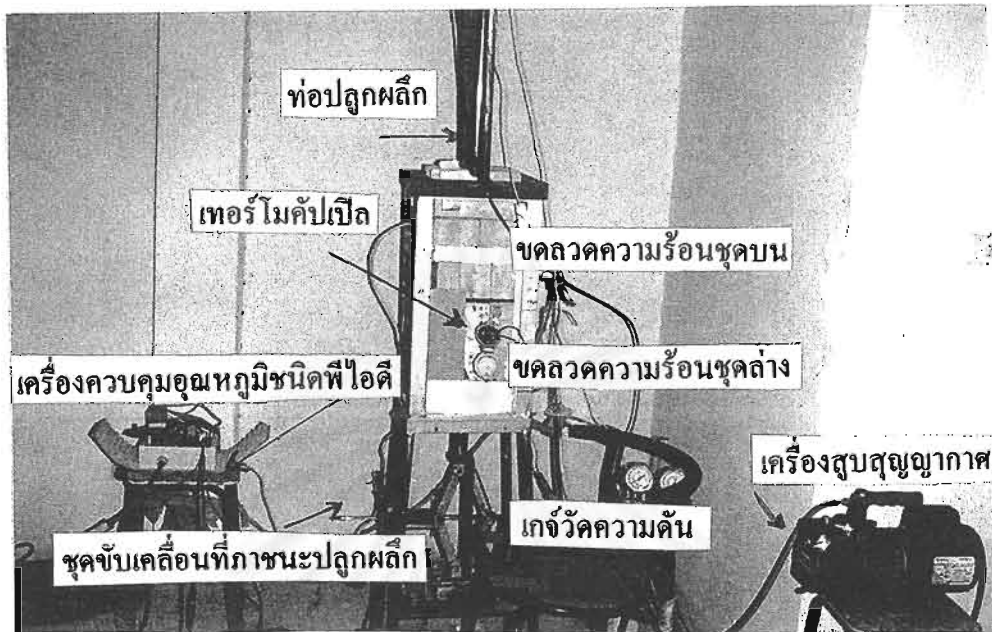
ดังได้กล่าวมาแล้วว่าในการปลูกผลึกสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือภาชนะที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งต้องสามารถทนความร้อน ได้สูงกว่าสารที่นำมาหลอมละลายและไม่เกิดการเกาะติดของสาร หลังจากการปลูกผลึก นอกจากนี้จะต้องสามารถนำผลึกออกมาได้ง่ายและไม่ทำลายผิวของผลึก แก้วควอทซ์เป็นภาชนะที่ดีสามารถทนความร้อนได้สูง แต่มีปัญหาเรื่องเปราะแตกง่าย ดังนั้นจึงได้หาภาชนะเสริมเพื่อรองรับแก้วควอทซ์อีกชั้นหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ใช้ท่อแกรไฟต์ทำหน้าที่รองรับหลอดแก้วควอทซ์ นอกจากนี้ท่อแกรไฟต์ยังสามารถกักเชื้อเพื่อยึดขอคัดองสาย โข้แขวนภาชนะปลูกผลึกได้ง่าย อย่างไรก็ตามภาชนะอื่น ๆ ที่สามารถใช้ในการปลูกผลึกได้ แสดงในภาคผนวก ง. รูปร่างของภาชนะปลูกผลึกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 6.5 มม. ยาว 90 มม. และตั้งปลายให้แหลมดังรูปที่ 3.7.



ก. อุปกรณ์รองรับภาชนะปลูกผลึก  
ทำด้วยแกรไฟต์

ข. ภาชนะปลูกผลึกทำด้วยควอทซ์

รูปที่ 3.7 แสดงรูปร่างของภาชนะปลูกผลึกควอทซ์และท่อแกรไฟต์



รูปที่ 3.8 แสดงรูปภาพระบบปลุกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ  
ก๊าซอาร์กอน

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ออกแบบขึ้นได้นำมาประกอบกันเป็นระบบปลุกผลึกเค็ชวแบบ  
บริดจ์แมน - สตีลบาร์เกอร์ ดังภาพถ่ายในรูปที่ 3.8 และใช้ในการทดลองปลุกผลึกซีเซียม  
ไอโอไดด์ในงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

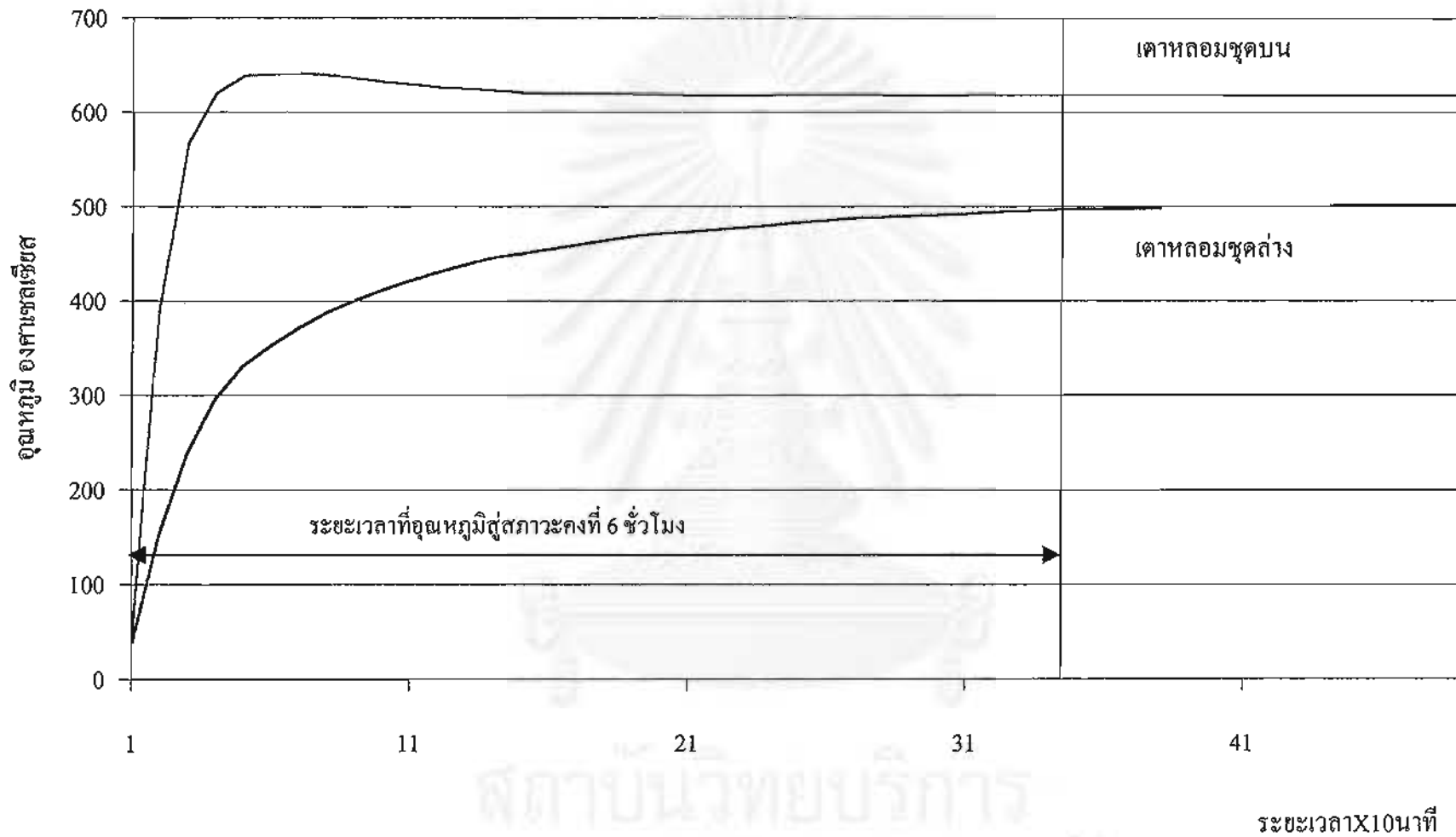
### ผลการทดลองการปลูกผลึกซีเอ็มไอโอโคด์

ได้ทดลองปลูกผลึกสารประกอบซีเอ็มไอโอโคด์ด้วยระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สต็อกบาร์เกอร์ ที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้เป็นผลึกวัตรังสีเอกซ์ ก่อนการทดลองปลูกผลึกได้ทำการทดสอบการทำงานของระบบดังนี้ ตรวจสอบวัดอุณหภูมิภายในระบบปลูกผลึกที่ตำแหน่งตามแนวการปลูกผลึก ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิเตาหลอมทั้งส่วนบนและส่วนล่าง เพื่อให้ได้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่สมบูรณ์เหมาะกับการนำมาใช้งานให้ได้เต็มประสิทธิภาพพร้อมทั้งศึกษาและทดสอบคุณสมบัติในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่พัฒนาขึ้นได้ โดยการทดสอบจะดำเนินตามขั้นตอนดังนี้

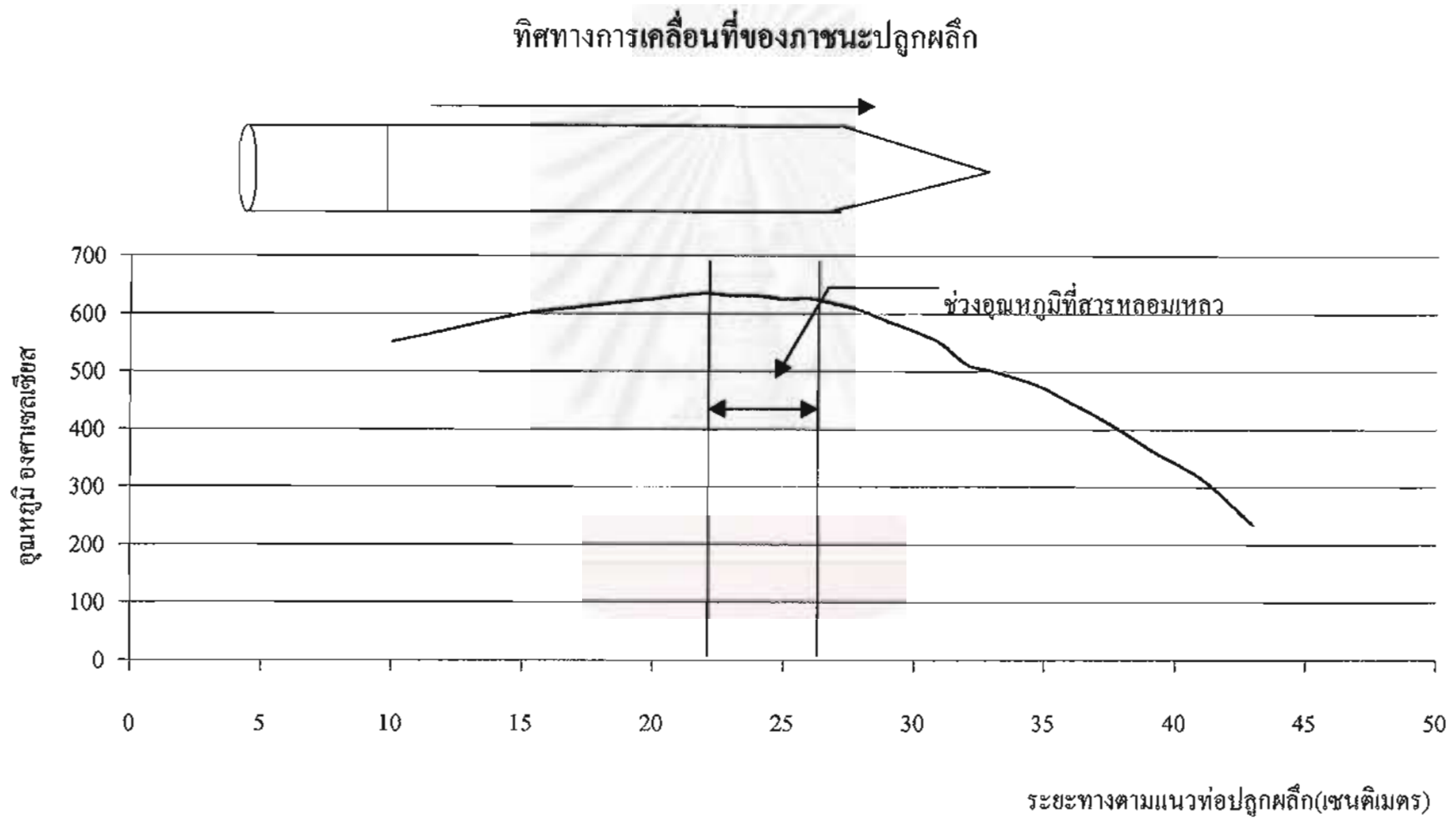
#### 4.1 การตรวจวัดอุณหภูมิของตำแหน่ง (Temperature profile) ภายในท่อปลูกผลึกตามแนวตั้ง

ในการปลูกผลึกจำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆภายในท่อปลูกผลึกตามแนวที่จะการปลูกผลึก เพื่อที่จะได้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนและอุณหภูมิจริงภายในภาชนะปลูกผลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำแหน่งที่ต้องการให้ก่อตัวเกิดผลึกขึ้นซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นและระยะในการเริ่มต้นของผลึกหลังจากนั้น ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นส่วนช่วยในการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ท่อปลูกผลึกให้ได้ผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์ทั้งแท่ง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่ระยะต่างๆภายในท่อปลูกผลึกทำโดยใส่เทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ปลายภาชนะปลูกผลึกและจะเริ่มทำการตรวจวัดได้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิคงที่ทั้ง 2 ส่วน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวทั้ง 2 ส่วน ในรูปที่ 4.1 เป็นเส้นกราฟระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวของชุดขดลวดความร้อนเตาหลอมชุดที่ 1 (ส่วนบน) เปรียบเทียบกับเส้นกราฟแสดงระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงที่ของชุดขดลวดความร้อนเตาหลอมชุดที่ 2 (ส่วนล่าง) จากข้อมูลดังกล่าวจะทราบระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิคงที่ซึ่งใช้เวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเริ่มบันทึกอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในท่อปลูกผลึกได้ผลดังเส้นกราฟในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงความชันของเกรเดียนต์อุณหภูมิในแนวตั้งของระบบปลูกผลึก



รูปที่ 4.1 แสดงระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิคงที่ของเดาหอมที่ชั้นบนและล่าง



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเข้มข้นของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในท่อปลูกผลึกตาม  $\phi$  ที่จะปลูกผลึก



## 4.2 การปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ด้วยระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น

### 4.2.1 ขั้นตอนการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์จากระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน - สตีออบาร์กอร์ที่พัฒนาขึ้น

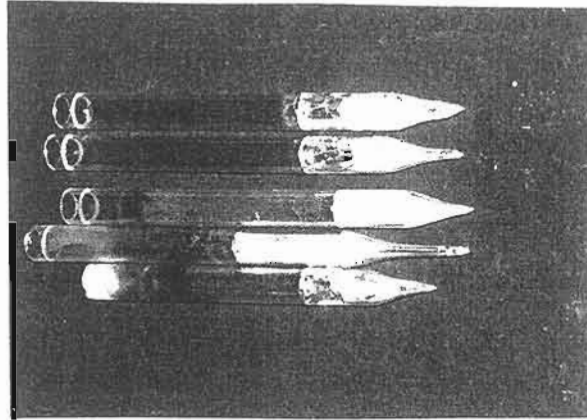
1. นำสารซีเซียมไอโอไดด์บรรจุใส่ภาชนะปลูกผลึกที่ทำด้วยหลอดแก้วควอทซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรที่เตรียมไว้สำหรับปลูกผลึกให้มีระดับความสูง ประมาณ 6 – 7 เซนติเมตร
2. ปิดภาชนะปลูกผลึกด้วยจุกปิดแท่งแกรไฟต์ เพื่อป้องกันมิให้สารซีเซียมไอโอไดด์ ที่หลอมเหลวอยู่นั้นฟุ้งกระจายออกนอกภาชนะปลูกผลึกจะทำให้สูญเสียเนื้อสาร
3. นำภาชนะปลูกผลึกที่บรรจุสารเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ไปใส่ไว้ในท่อแกรไฟต์ซึ่ง ผูกยึดอยู่กับควบคุมความร้อนและโซ่ตามลำดับเพื่อช่วยเป็นอุปกรณ์รองรับ ภาชนะปลูกผลึกให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการภายในท่อ
4. หย่อนภาชนะปลูกผลึกซึ่งรองรับด้วยท่อแกรไฟต์ลงไปในท่อปลูกผลึกแล้วปิดฝา จากนั้นต่อท่อพลาสติกที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบสุญญากาศเพื่อทำการสูบอากาศ ภายในท่อปลูกผลึกออกให้หมดจนอ่านค่าได้  $-760 \text{ mmHg}$  ใช้เวลาประมาณ 50 - 60 นาที
5. จากนั้นปิดระบบสุญญากาศแล้วเปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนเข้าไปในท่อปลูกผลึก จนกระทั่งมีความดันภายในท่อเท่ากับความดัน 1 บรรยากาศก๊าซอาร์กอน
6. เปิดระบบไฟฟ้าและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบควบคุมอุณหภูมิเพื่อจ่าย ไฟฟ้าให้กับชุดควบคุมความร้อนของเตาหลอมชุดที่ 1 (ส่วนบน) ที่ควบคุมด้วย ระบบควบคุมอุณหภูมิชนิดพีไอดีและชุดควบคุมความร้อนของเตาหลอมชุดที่ 2 (ส่วนล่าง) ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากสไลด์เรกกูเลเตอร์
7. ปรับอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกและรองจนกระทั่งระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะ อุณหภูมิคงที่ประมาณ 6 ชั่วโมง จึงเริ่มเดินระบบจับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อน ท่อปลูกผลึกลงด้านล่างผ่านบริเวณที่กำหนดเป็นตำแหน่งปลูกผลึก
8. เมื่อท่อปลูกผลึกเคลื่อนที่ถึงตำแหน่ง 10 เซนติเมตรจึงหยุดการทำงานของระบบ และปล่อยให้สารที่ทำการปลูกผลึกเย็นตัวแล้วจึงเปิดฝานำภาชนะปลูกผลึกออก จากท่อปลูกผลึก เพื่อคัดเลือกสารที่เย็นตัวไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ

#### 4.2.2 คุณภาพของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่ได้จากการปลูกผลึก

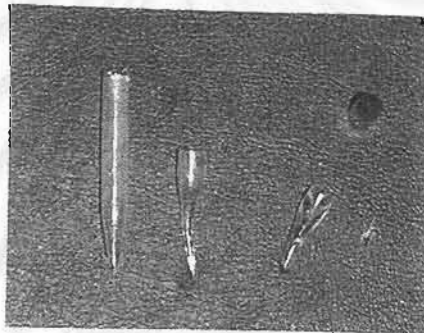
ก. ปัญหาที่พบในการปลูกผลึกครั้งแรกคือความไม่สมบูรณ์ของเนื้อสารที่ขึ้นตัว เนื่องจากยังไม่ทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมของระบบปลูกและปริมาณสารที่ใช้ เช่นการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกเร็วเกินไป การปล่อยให้เย็นตัวเร็วเกินไป การเปิดผลึกจากระบบเร็วเกินไป การเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกที่ไม่สม่ำเสมอเหล่านี้ ก่อให้เกิดความบกพร่องของผลึกที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

- ในรูปที่ 4.3 ก. ผลึกชุกตัวด้านบนเป็นหลุมลึกเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บางผลึกแตกเป็นหลายงาเนื่องจากระยะการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกเร็วเกินไป บางส่วนก่อตัวผลึกที่ด้านปลายไม่เต็มเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป
- ในรูปที่ 4.3 ข. เมื่อปรับการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกให้ช้าลงและปรับเกรเดียนต์อุณหภูมิให้กว้างขึ้นรูปผลึกที่ได้เริ่มเป็นเนื้อเดียวกันขึ้นแต่ยังมีความขุ่นบางส่วน แสดงถึงการก่อตัวไม่สมบูรณ์
- รูปที่ 4.3 ค. ผลึกที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดบางส่วนใสเนื่องจากอุณหภูมิในตำแหน่งหลอมตัวต่ำเกินไป

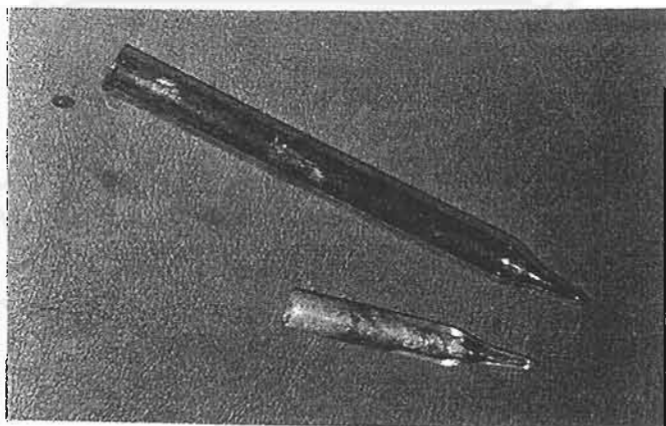
ข. การปลูกผลึกในระยะหลัง เมื่อทำการแปรเปลี่ยนเงื่อนไขของเกรเดียนต์อุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก การปล่อยให้เย็นตัวให้ช้า พบว่าผลที่ได้ดีขึ้น เนื้อผลึกมีความใสทั้งแท่งแต่ยังมีส่วนปลายล่างที่ยังไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากรูปร่างของภาชนะปลูกผลึก การทดสอบหลายครั้งได้ผลึกที่มีความใสและได้ขยายขนาดของภาชนะปลูกผลึกให้โตขึ้นเป็น 10 มิลลิเมตร ผลึกที่ปลูกได้ในระยะหลังแสดงในรูปที่ 4.4 และได้ใช้เงื่อนไขที่ได้นี้ในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ CsI ซีเซียมไอโอไดด์(โซเดียม) CsI(Na) โดยเจือสารโซเดียมที่เดิมมีความเข้มข้น 0.2% - 0.3% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.3 ก แสดงรูปเนื้อสารไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีลักษณะแตกต่างและขูดตัวด้านผิวหน้า

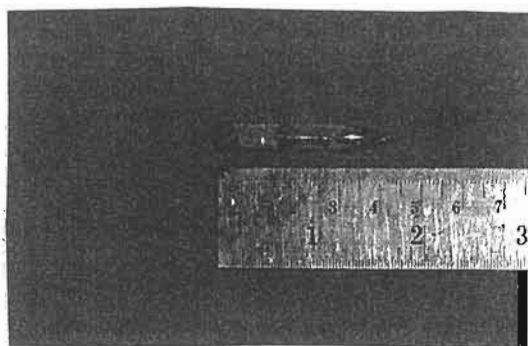


รูปที่ 4.3 ข แสดงรูปเนื้อสารที่เป็นเนื้อเดียวกันแต่มีลักษณะที่ขุ่นไม่ใส

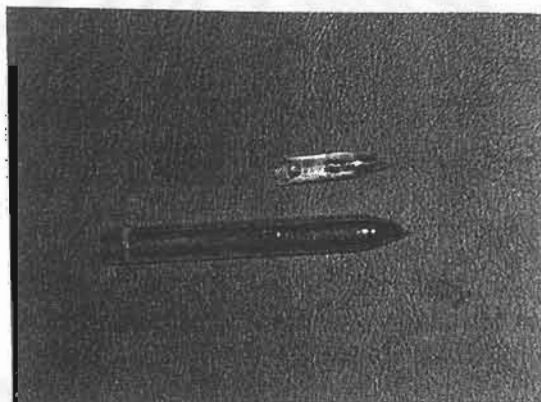


รูปที่ 4.3 ค แสดงรูปเนื้อสารที่ใสเฉพาะบริเวณภายนอกแต่เป็นเม็ดเกลือคอยู่ภายใน

รูปที่ 4.3 แสดงรูปเนื้อสารที่ได้จากการปลูกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ในลักษณะต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.4 ก. แสดงรูปผลึกและขนาดที่ได้จากการปลูก



รูปที่ 4.4 ข. แสดงรูปผลึกที่ได้และหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการปลูก

รูปที่ 4.4 แสดงรูปลักษณะของผลึกที่ได้จากการปลูก โดยระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น

### 4.3 การเตรียมผลึกซีเซียมไอโอไดด์

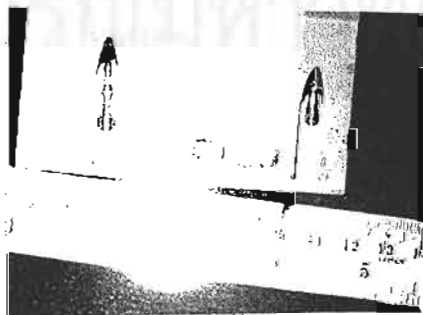
เนื่องจากการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์นั้นจะได้ผลึกตามรูปร่างของภาชนะที่ใช้ในการปลูกผลึก ดังนั้นในการนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการตัดผลึกส่วนปลายและตัดผลึกตามความหนาที่เหมาะสมในการใช้งาน ความหนาของผลึกที่ใช้ในงานทางด้านรังสีเอกซ์เรย์ที่มีพลังงานไม่เกิน 100 keV จะมีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ ไม่น้อยกว่า 1 มม. – 3 มม. ดังเส้นกราฟแสดงประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานของผลึกซีเซียม ไอ โอ ไดด์ในรูปที่ 2.9

ในการเตรียมผิวของซีเซียม ไอ โอ ไดด์สามารถแบ่งขั้นตอนออกได้เป็น 3 ขั้นตอนได้แก่

1. การตัดผลึกซีเซียมไอโอไดด์
2. การขัดผิวผลึกซีเซียมไอโอไดด์ อย่างหยาบ
3. การขัดผิวผลึกซีเซียมไอโอไดด์อย่างละเอียด

#### 1. การตัดผลึกซีเซียมไอโอไดด์

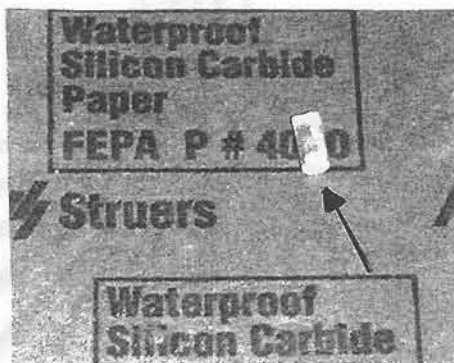
การตัดผลึกซีเซียมไอโอไดด์ต้องอาศัยความระมัดระวังเนื่องจากเป็นผลึกที่ค่อนข้างอ่อนเปราะ (Soft and brittle) เนื้อผลึกค่อนข้างอ่อนนุ่มแต่ไม่มีระนาบของแนวระนาบ (Cleavage plane) จำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการตัดที่มีความเร็วรอบที่สูง แต่เนื่องจากความหนาที่ต้องการใช้งานมีความหนาไม่มากนักในช่วง 1 – 8 มม. เท่านั้นจึงค่อนข้างลำบากในการจับชิ้นผลึก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้ใบเลื่อยฉลุที่มีขนาดเล็กพอเหมาะกับขนาดของผลึกซีเซียม ไอ โอ ไดด์ที่ต้องการความหนาไม่มากนัก แต่ต้องอาศัยความระมัดระวังเช่นเดียวกันเพราะว่าผลึกซีเซียม ไอ โอ ไดด์มีลักษณะอ่อนเปราะ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปผลึกซีเซียมไอโอไดด์ ก่อนและหลังจากการตัด

## 2. การขัดผิวผลึกซีเอ็มไอโอไคด์อย่างหยาบ

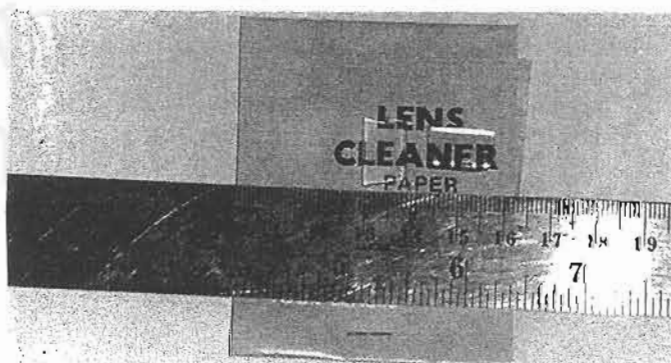
หลังจากตัดผลึกซีเอ็มไอโอไคด์ออกเป็นชิ้นตามความต้องการใช้งานแล้ว จำเป็นต้องมีการขัดผิวชิ้นผลึกให้ได้ระนาบโดยได้ใช้กระดาษทรายขัดเบอร์ 1000 ร่วมกับแอลกอฮอล์ เพื่อให้ผิวของผลึกมีความเรียบเพียงพอกับการประกบกับผิวหน้าอุปกรณ์ไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปผิวของผลึกซีเอ็มไอโอไคด์หลังจากการขัดด้วยกระดาษทราย

## 3. การขัดผิวผลึกซีเอ็มไอโอไคด์อย่างละเอียด

ผิวของผลึกหลังจากผ่านการขัดอย่างหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 แล้วนั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากผิวของผลึกยังขุ่นมัวไม่สามารถให้แสงส่งผ่านออกมาได้ จึงต้องมีการขัดอย่างละเอียดโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 4000 ร่วมกับแอลกอฮอล์และตามด้วยการขัดกับผ้ากำมะหยี่ที่มีผงอลูมินาร่วมกับแอลกอฮอล์ในขั้นตอนสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปผิวของผลึกซีเอ็มไอโอไคด์หลังจากผ่านการขัดละเอียดจะใสมองผ่านเห็นตัวหนังสือได้ชัดเจน

#### 4.4 การทดสอบคุณสมบัติของผลึกซีเซียมไอโอไดด์

##### 4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของผลึกเดี่ยว

ผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่ได้ในระยะหลังแม้ว่าจะมีความใส แต่มิได้บ่งบอกถึงการเรียงตัวเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นจึงได้มีการนำผลึกที่ขัดผิวแล้ว 2 เซ็นไซมาวิเคราะห์ความเป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron channeling pattern, ECP) ดังนี้

##### ก. ผลการวิเคราะห์ผลึกชุดที่ 1

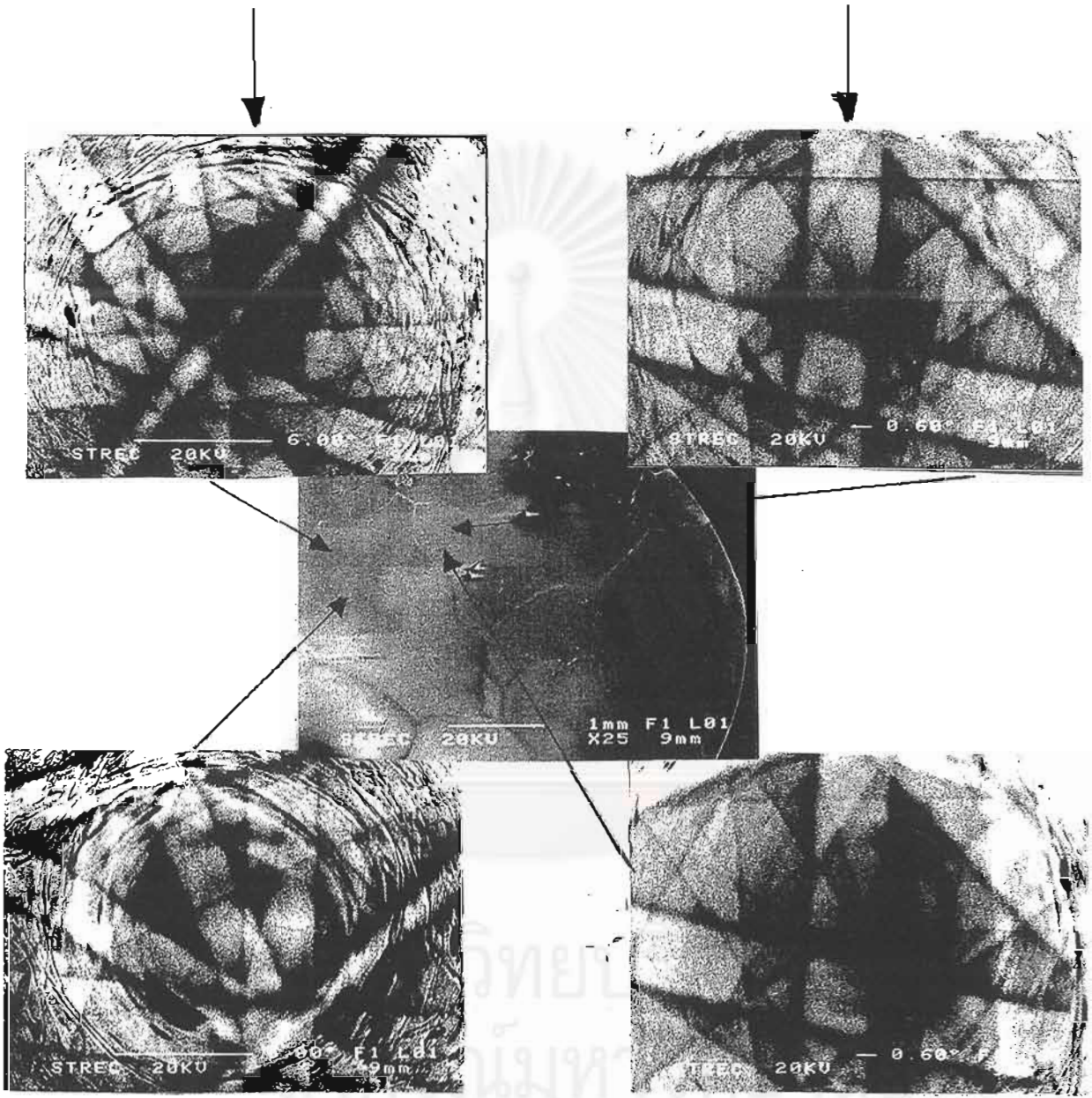
ผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ที่ใช้เจือไนเจอร์เคียนท์อุณหภูมิตามเส้นกราฟรูปที่ 4.2 และใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ท่อปลูกผลึก 6 มม./ชม. จากลักษณะภายนอกผลึกมีความใสแต่จากการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึกด้วย ECP พบว่าการเรียงตัวของผลึกบนผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงของแพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนลำอิเล็กตรอนไปรอบผิวหน้าที่ได้จากการปลูกผลึกโดยเจือไนเจอร์เป็น (Polycrystal) และจากภาพไมโครกราฟพบว่าบนผิวหน้าของผลึกแสดงเกรนขนาดใหญ่เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 – 2 มม. กระจายอยู่ดังแสดงในรูปที่ 4.8 แสดงว่าผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์นี้ไม่เป็นผลึกเดี่ยว

##### ข. ผลการวิเคราะห์ผลึกชุดที่ 2

ผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ชุดนี้ใช้เจือไนเจอร์เคียนท์อุณหภูมิเช่นเดียวกับชุดที่ 1 แต่ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ท่อปลูกผลึกต่ำประมาณ 1 มม./ชม. ลักษณะผลึกมีความใสเช่นเดียวกัน และผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นผลึกเดี่ยวด้วย ECP พบว่ามีการเรียงตัวของผลึกบนผิวหน้าที่สมบูรณ์ ไม่ปรากฏขอบเกรนบนผิวหน้าและแพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนตามแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปรอบในบริเวณต่าง ๆ ไม่มีการเปลี่ยนระนาบของผลึกดังแสดงผลวิเคราะห์ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งวิเคราะห์ตามแนวตัดแนวตั้งและแนวขวางตามลำดับ

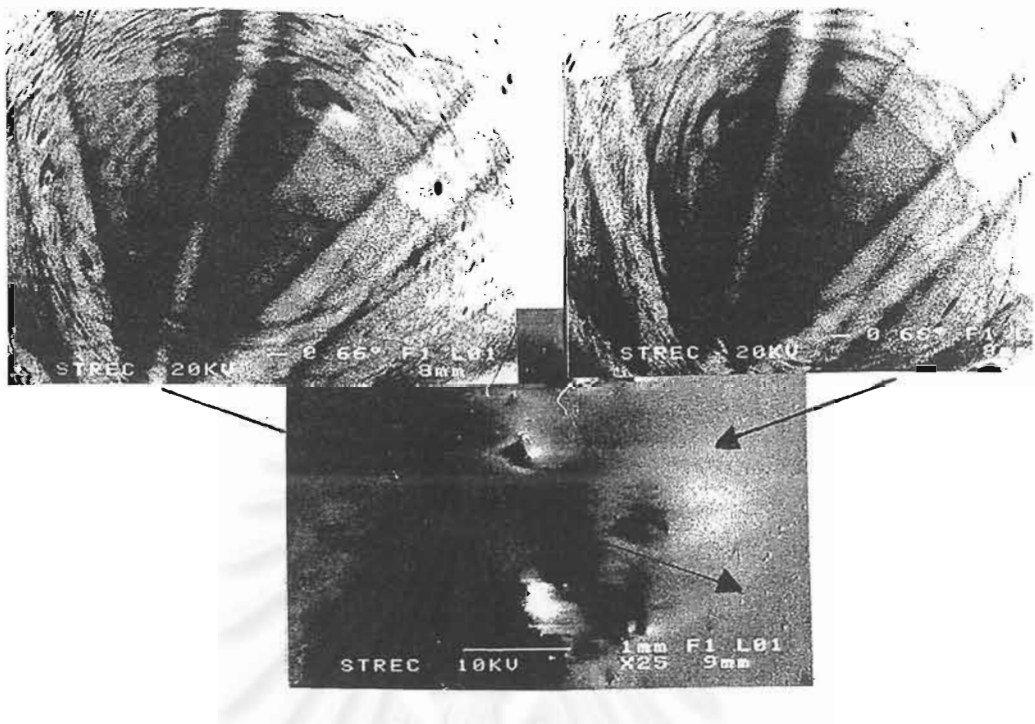
ECP ของระนาบผลึกบริเวณ  
พื้นที่เกรน 2

ECP ของระนาบผลึกบริเวณ  
พื้นที่เกรน 1

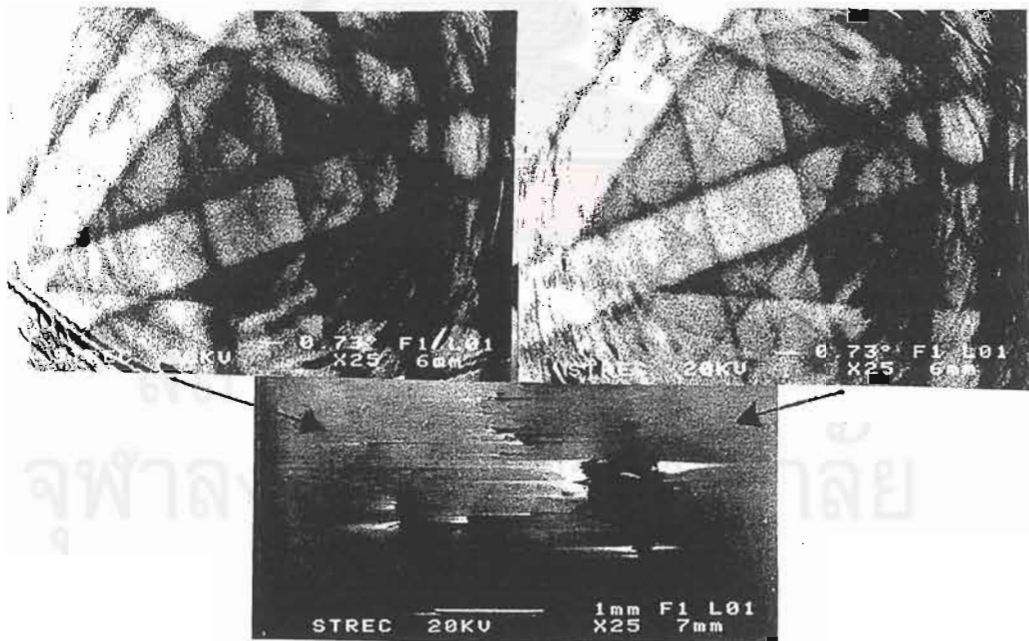


รูปที่ 4.8 แสดงผลวิเคราะห์ความไม่เป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP





รูปที่ 4.9 แสดงผลวิเคราะห์ทัศนภาพเป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP บนพื้นที่ตัดแนวตั้งของผลึก

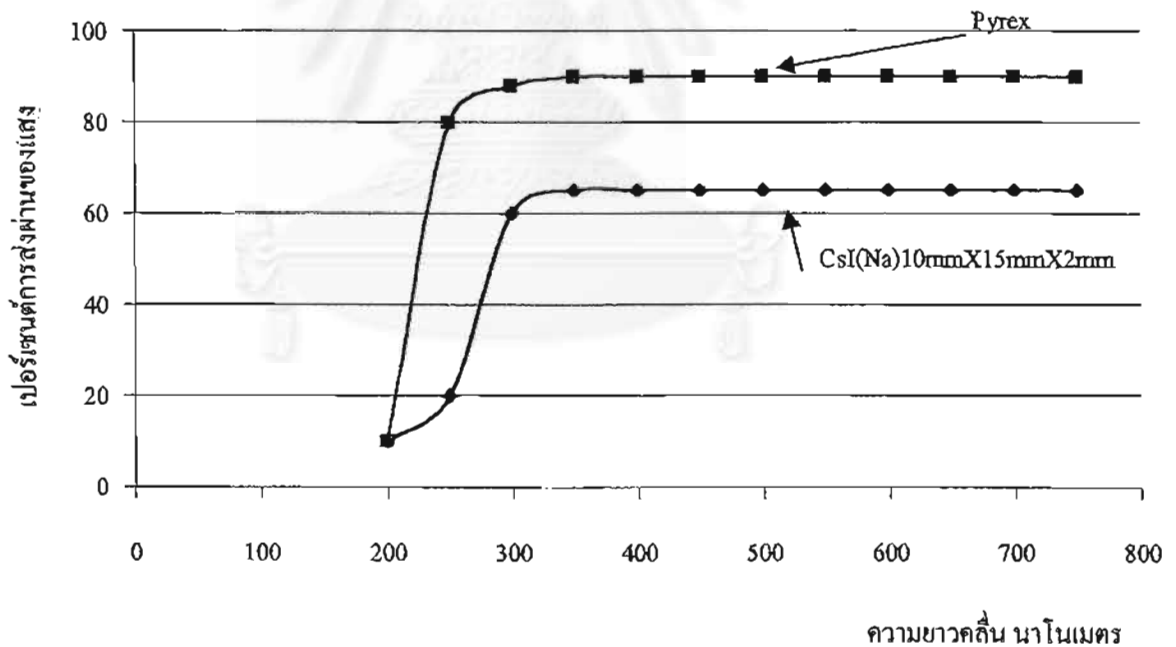


รูปที่ 4.10 แสดงผลวิเคราะห์ทัศนภาพเป็นผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิค ECP บนพื้นที่ตามแนวขวางของผลึก

#### 4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านแสงของผลึกโดยใช้เครื่อง (UV/Visible spectrophotometer)

ความใสและการดูดกลืนแสงเป็นปัจจัยสำคัญของประสิทธิภาพการส่งผ่านแสง ดังนั้นเพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาผลของการเติมส่วนผสมของโซเดียมไอโอไดด์ลงไปผลึกซีเซียมไอโอไดด์นั้น เนื้อผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกจะยอมให้แสงในย่านความยาวคลื่นของประกายแสงของผลึกผ่านไปได้มากน้อยเพียงใด โดยเทียบกับแก้วไพเร็กซ์ (Pyrex) ผลการวัดผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ขนาด 10 มม. X 15 มม. X 2 มม. แสดงในรูปที่ 4.11

ผลจากการวัดแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ในการส่งผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นช่วงตามองเห็นได้นั้นสามารถส่งผ่านได้เพียง 65 % เท่านั้น และในช่วงความยาวคลื่นช่วง 200 – 300 nm (Ultraviolet) แสงไม่สามารถส่งผ่านได้



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ระหว่างผลึก CsI(Na) และแก้ว Pyrex โดยใช้เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer

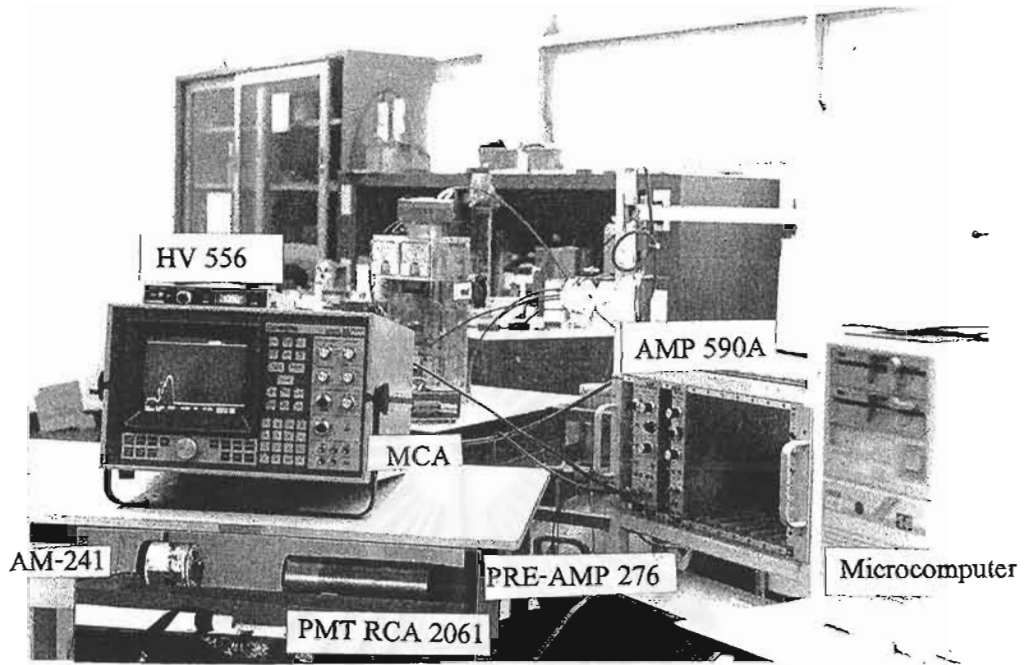
นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบส่วนผสมของเนื้อผลึกหลังจากที่เติมสารเจือโซเดียมไอโอไดด์ เมื่อผ่านสภาวะการหลอมละลายสารโซเดียมไอโอไดด์สามารถจะเข้าไปรวมตัวกับผลึกซีเซียมไอโอไดด์ได้โดยไม่ระเหยหายไปก่อน ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ชนิดแจกแจงความยาวคลื่น (Wavelength dispersive X-ray fluorescence, WDXRF) พบว่ามีส่วนผสมของโซเดียมอยู่ภายในเนื้อสาร ดังแสดงสเปกตรัมผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก จ.

#### 4.5 การทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดด์

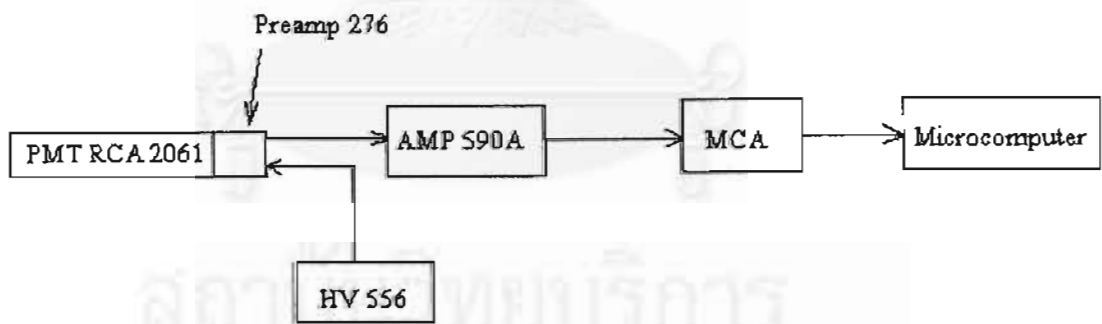
การทดสอบการตอบสนองต่อพลังงานรังสีเอกซ์นั้น เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการตอบสนองต่อพลังงานรังสีเอกซ์ของผลึกเดี่ยวที่ได้จากการปลูกได้แก่ผลึก CsI, CsI (Na) ที่พัฒนาได้ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA)

##### 4.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1 PMT (Photomultiplier Tube) ของ RAC รุ่น 2061
- 2 Preamplifier tube base ORTEC model 276
- 3 High voltage power supply ORTEC Model 556
- 4 Amplifier ORTEC Model 590A
- 5 Multichannel Analyzer MCA CANBERRA Series35 Plus
- 6 NIM Bin and Power Supply ORTEC Model 4001C / 4002A
- 7 microcomputer
- 8 ดันกำเนิครังสีมาตรฐาน Am -241 ขนาดความแรงแรังสี 10 mCi
- 9 Preamplifier model 2006 Canberra
- 10 Diode p-i-n ของบริษัท Hamamatsu model 3590



รูปที่ 4.12 ก. รูปแสดงการจัดระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสี



รูปที่ 4.12 ข. แผนภาพการจัดระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสี

รูปที่ 4.12 การทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึกซีเซียมไอโอไดด์

#### 4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึกซีเซียมไอโอไดด์

1. จัดระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีตั้งแผนภาพในรูปที่ 4.12
2. นำผลึกซีเซียมไอโอไดด์ที่พัฒนาได้มาประกอบกับหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์
3. ใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 พลังงาน 60 keV ขนาดความแรง 10 mCi วางไว้  
ด้านหน้าของผลึกระยะห่างประมาณ 10 เซนติเมตร
4. ปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในระบบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของ  
รังสีดังนี้

|                           |   |  |
|---------------------------|---|--|
| High voltage power supply | = | 950 Volts  |
| Amplifier                 | = | Mode "Unipolar"<br>Input "POS."<br>Shaping time = 1.5 $\mu$ s<br>Coarse Gain = 50<br>Fine Gain = 5.0   |
| MCA                       | = | ADC IN<br>Memory Control = $\frac{1}{4}$<br>ADC Gain = 4096<br>Preset Time = 140 sec<br>LLD = 0.8<br>ULD = 10.0<br>Preset count = 10000 counts |

#### 4.5.3. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน (60 keV) ของต้นกำเนิดรังสี Am-241 ดังนี้

ก. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปที่ 4.13 ได้วิเคราะห์พลังงาน 60 keV ด้วยการผลึกวัตต์ CsI ขนาด 5 มม. X 10 มม. X 2 มม. เทียบกับผลึกวัตต์ NaI (TI) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มม. หนา 2 มม. โดยปรับอัตราขยายให้พีคพลังงานอยู่ที่ตำแหน่งช่องวิเคราะห์เดียวกันและตั้งค่านับที่พีคพลังงานให้เท่ากัน

ข. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปที่ 4.14ก. ได้จากการวิเคราะห์พลังงาน 60 keV ด้วยผลึกวัตต์ CsI(Na) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. หนา 3 มม. ซึ่งไม่เป็นผลึกเดี่ยวเปรียบเทียบกับผลึกวัตต์ที่เป็นผลึกเดี่ยว จากการวิเคราะห์ผลในข้อ 4.4 โดยปรับอัตราขยายให้เท่ากัน

ค. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปที่ 4.14ข. ได้จากการวิเคราะห์พลังงาน 60 keV ด้วยผลึกวัตต์ CsI(Na) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 มม. หนา 3 มม. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. หนา 5 มม. และขนาด 10 มม. X 15 มม. X 2 มม. เปรียบเทียบกันโดยปรับอัตราขยายให้พีคพลังงานอยู่ตำแหน่งเดียวกันและตั้งค่านับที่พีคพลังงานให้เท่ากัน

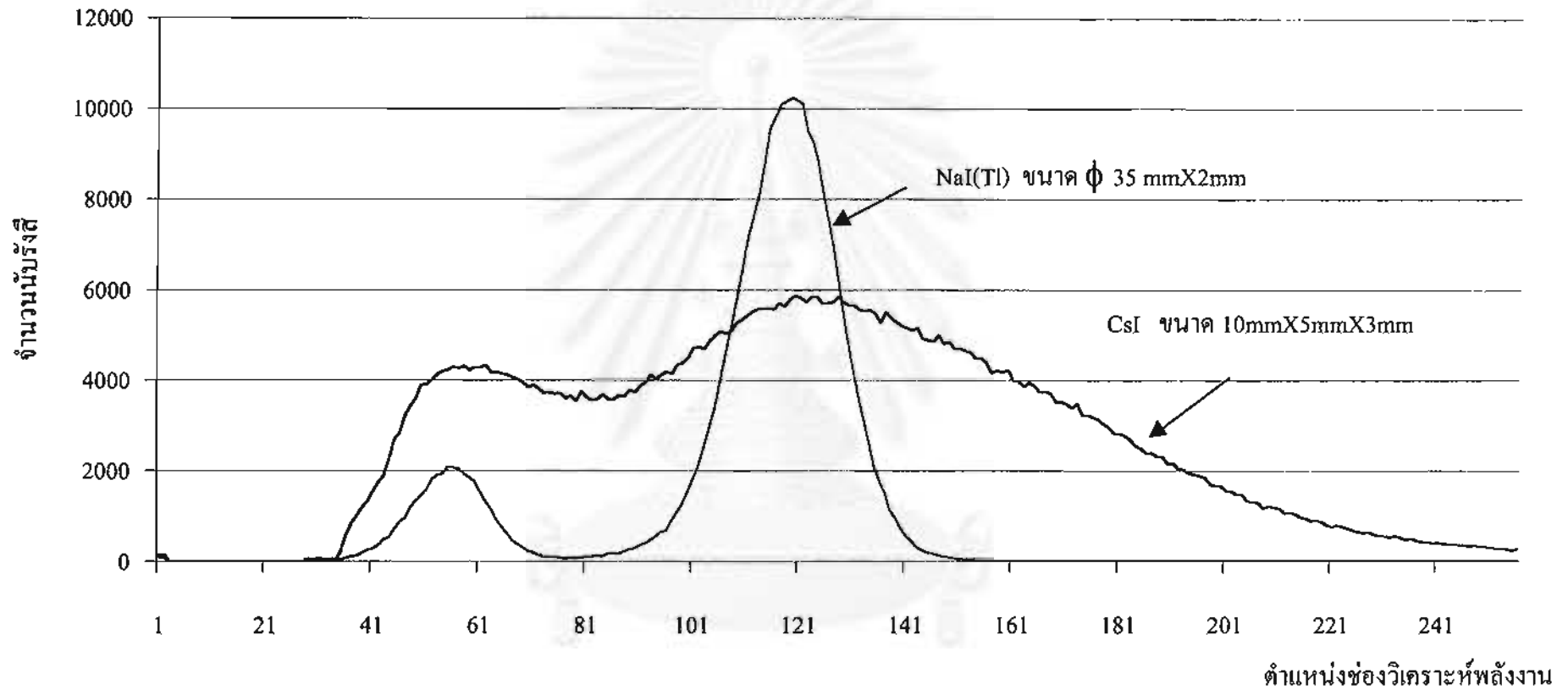
ง. ผลวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานในรูปที่ 4.15 ได้จากการวิเคราะห์พลังงาน 60 keV ด้วยผลึกวัตต์ CsI (Na) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 มม. หนา 3 มม. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. หนา 5 มม. และขนาด 10 มม. X 15 มม. X 2 มม. เปรียบเทียบกันโดยให้อัตราขยายคงที่และตั้งเวลานับรังสีเท่ากันที่ 30 วินาที

จ. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมในรูปที่ 4.16 ได้จากการวิเคราะห์พลังงาน 60 keV ด้วยผลึกวัตต์ CsI (Na) ที่มีคุณภาพดีจากการปลูกผลึกขนาด 10 มม. X 15 มม. X 2 มม. เทียบกับผลึกวัตต์ NaI (TI) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มม. หนา 2 มม. เปรียบเทียบกันโดยปรับอัตราขยายให้พีคพลังงานอยู่ตำแหน่งเดียวกันและตั้งค่านับที่พีคพลังงานให้เท่ากัน

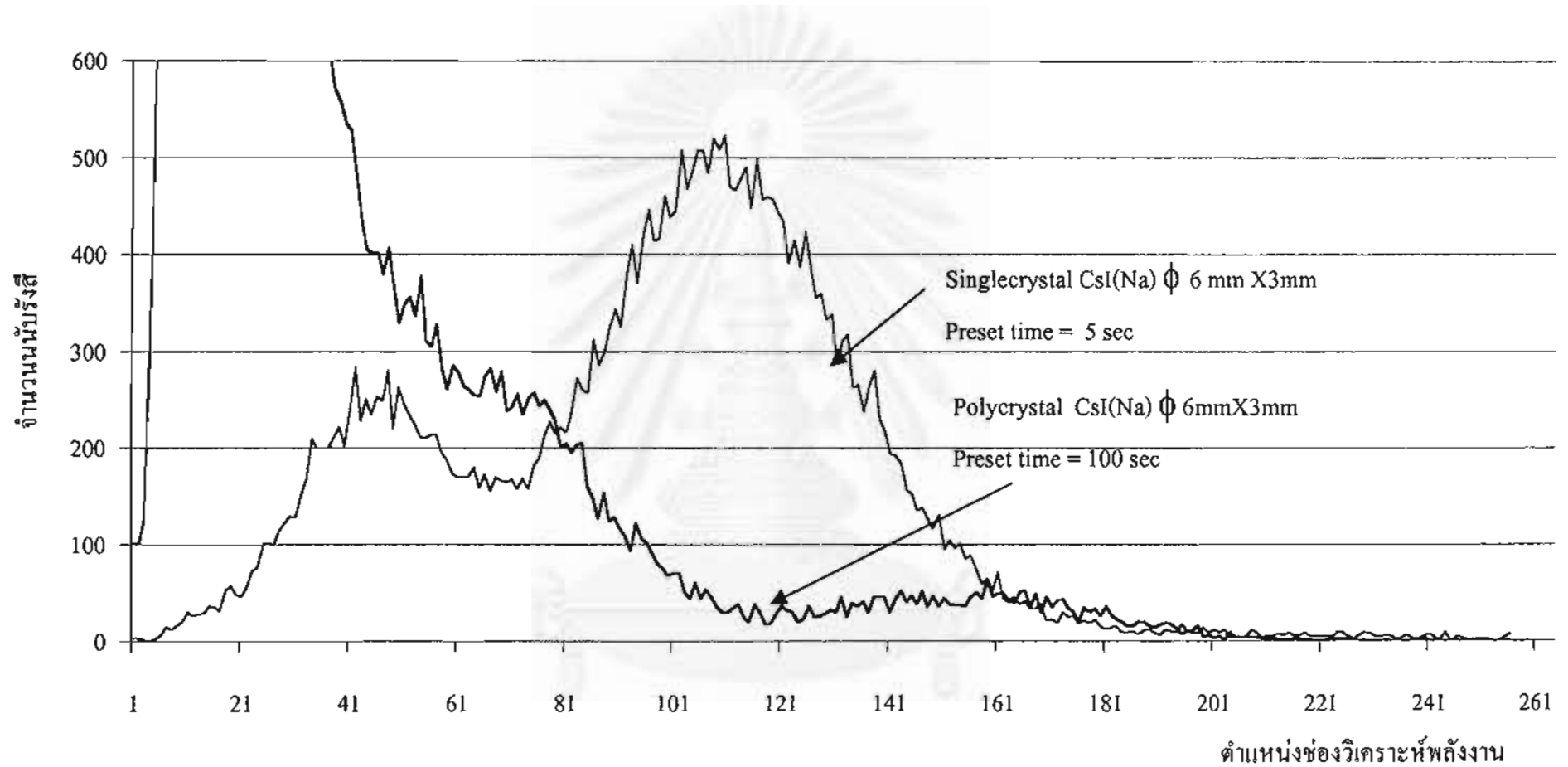
ฉ. เปลี่ยนภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าของระบบวิเคราะห์เป็นภาคขยายไวต่อประจุรุ่น 2006 ปรึบ High voltage ที่ -24 โวลต์ Shaping time ที่ 2  $\mu$ s

ช. นำผลึกซีเซียม ไอ ไอ โคค (โซเดียม) ที่พัฒนาได้มาประกอบกับ p-i-n โคโอด ของ Hamamatsu รุ่น 3590 และใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ความแรง 10 mCi วางไว้ด้านหน้าหัววัดรังสี

ซ. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานแสดงคังรูปที่ 4.17

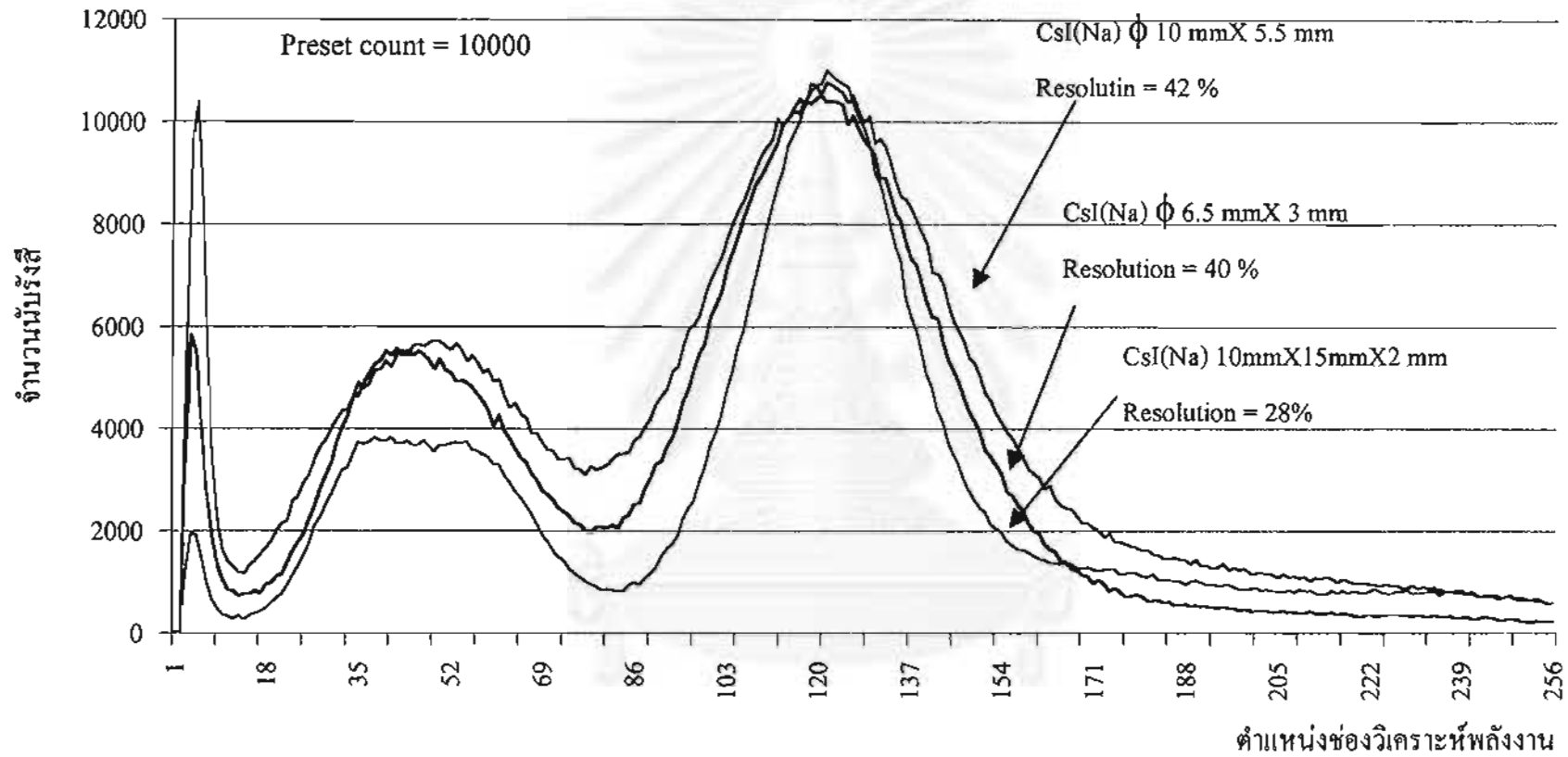


รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมพลังงาน 60 keV ของ Am-241 จากการวัดด้วยผลึกซีเซียมไอโอไดด์บริสุทธิ์ ขนาด 5mmX10mmX3mm เทียบกับผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง35mmX2mm ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

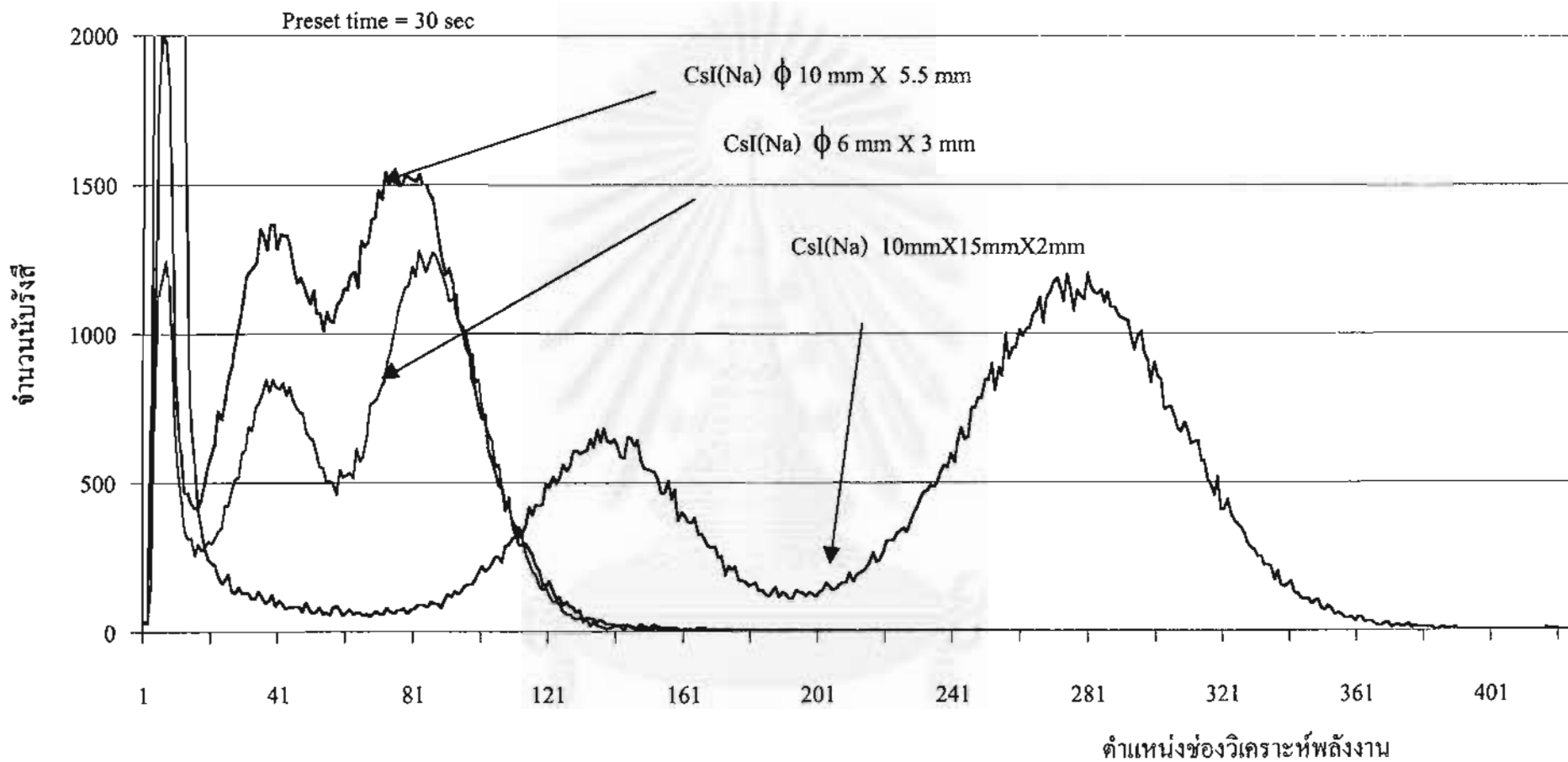


รูปที่ 4.14 ก. เปรียบเทียบสเปกตรัมของผลึกที่มีลักษณะเป็นหลายผลึก (Polycrystal) และผลึกเดี่ยว (Single crystal) โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ขนาดความแรงรังสี 10 mCi ปรับอัตราขยายเท่ากัน

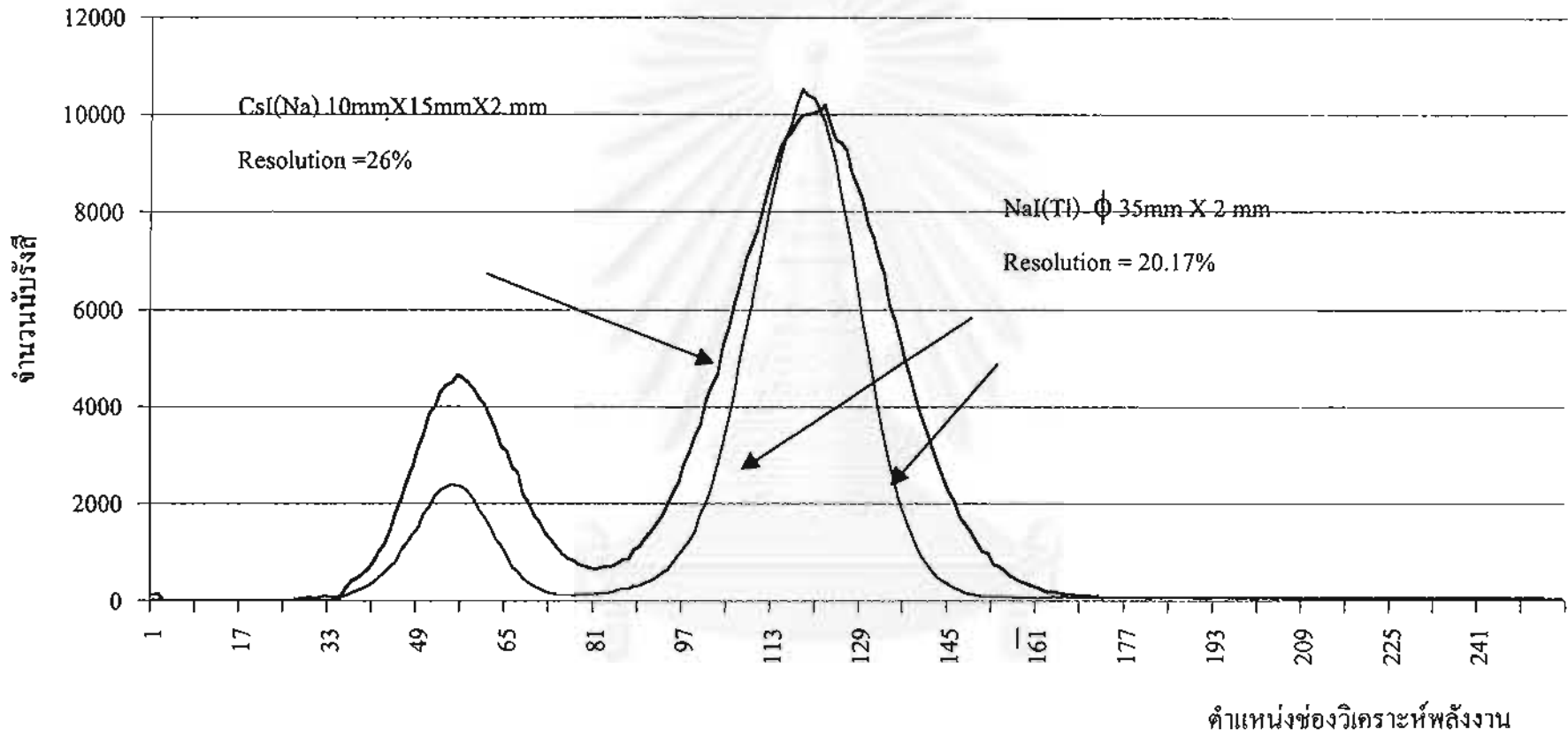




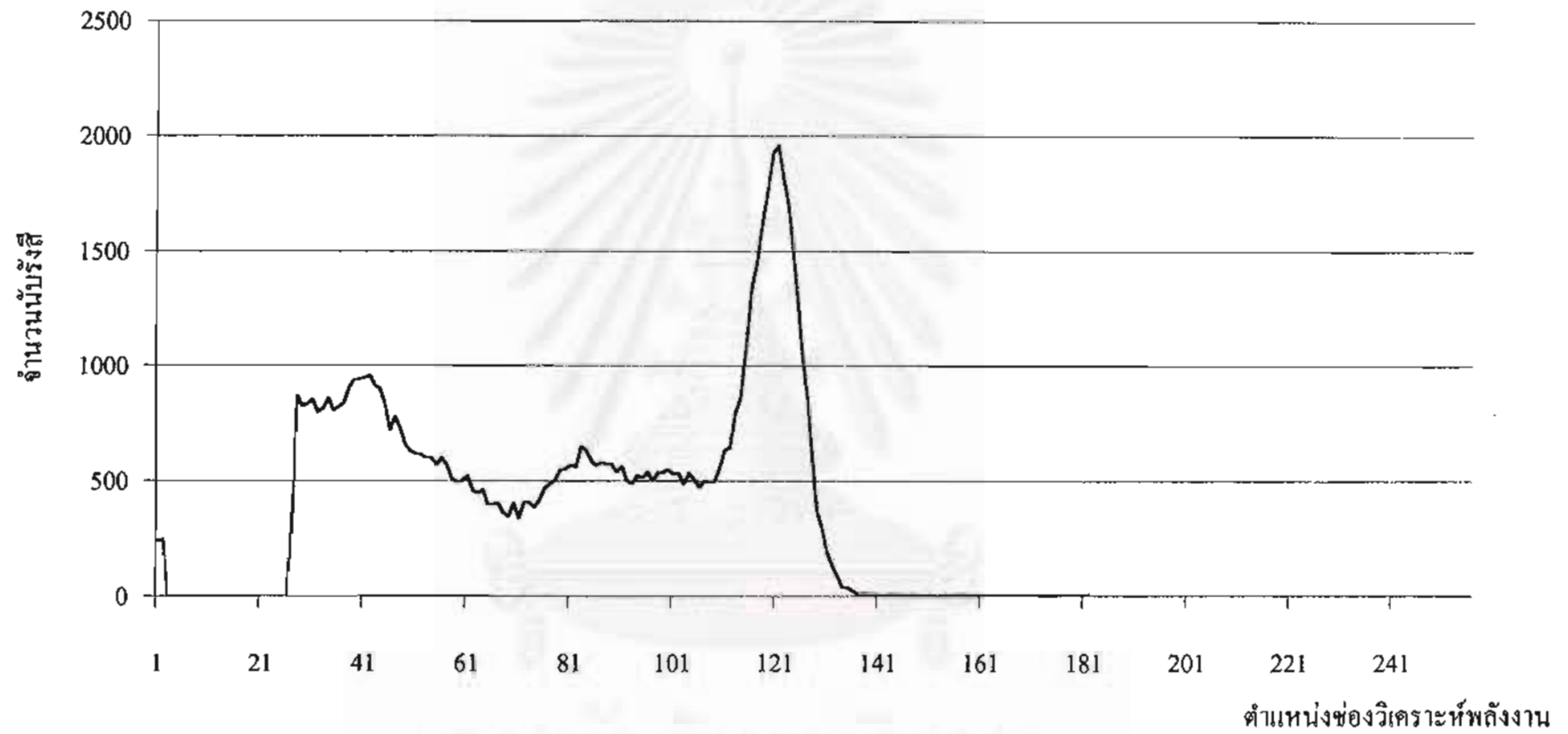
รูปที่ 4.14ข. เปรียบเทียบสเปกตรัมและความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่พัฒนาได้ที่ขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ขนาดความแรงรังสี 10 mCi ปรับอัตราขยายให้พีคพลังงานอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบสเปกตรัมและประสิทธิภาพในการวัดรังสีของผลึกที่พัฒนาได้ที่ขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ความแรงรังสี 10 mCi ปรับตั้งเวลานับพัลส์และอัตราขยายเท่ากัน



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการแจกแจงพลังงานของผลึก ที่ได้จาก การปลูกและผลึกที่ผลิตขายในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ขนาดความแรงรังสี 10 mCi



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมพลังงาน 60keV จากการวัดด้วยผลึกซีเซียมไอโอไดค์ (โซเดียม) ประกอบกับ p-i-n ไดโอด

#### 4.5.4 วิจัยผลกระทบทดสอบการแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดด์

##### ก. ผลการทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่พัฒนาได้

จากสเปกตรัมรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ารูปที่คพลังงานของซีเซียมไอโอไดด์บริสุทธิ์ค่อนข้างกว้างมาก ความสามารถในการแจกแจงพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ทั้งยังมีขนาดของพีคของพลังงานที่ต่ำมาก ดังนั้นจึงได้มีการทดลองใส่สารเจือโซเดียมไอโอไดด์ลงไปเพื่อศึกษาความสามารถในการแจกแจงพลังงานว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไรดังแสดงในรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 โดยการใช้ระบบปลูกผลึกชุดเดิมและขั้นตอนการปลูกยังคงเดิม แต่ได้เพิ่มส่วนผสมของโซเดียมไอโอไดด์ลงไปประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อการใช้ซีเซียมไอโอไดด์ปริมาณ 10 กรัม ดังนั้นปริมาณสารที่ใช้มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 10.03 กรัม ซึ่งสามารถเทียบเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักได้ดังนี้

|  |   |      |   |
|--|---|------|---|
| เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารซีเซียมไอโอไดด์ | = | 99.7 | % |
| เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารโซเดียมไอโอไดด์ | = | 0.3  | % |

จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.14ก. เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบ polycrystal และผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบ single crystal จะเห็นได้ว่าผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบ polycrystal จะมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานและสัญญาณพัลส์ต่ำมากเมื่อเทียบกับผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบ single crystal

จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.14ข. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ดีกว่า การแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดด์บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ที่พัฒนาได้ในระยะแรกยังมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานต่ำถึง 40% ต่อมาเมื่อปรับเงื่อนไขของความเร็วในการปลูกผลึกให้สมบูรณ์ขึ้นสามารถพัฒนาให้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานได้สูงขึ้นระหว่าง 26 – 28% ซึ่งเมื่อเทียบกับความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกวัดโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม) ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์จะอยู่ที่ประมาณ 20% ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในรูปที่ 4.14ข. และรูปที่ 4.15 เป็นการทดสอบ

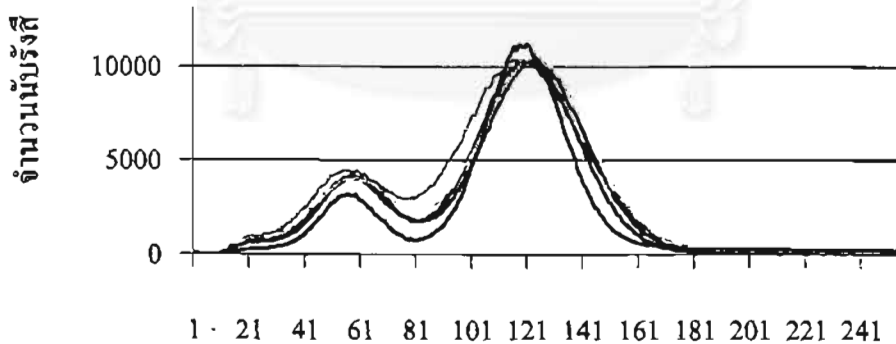
จากสเปกตรัมในรูปที่ 4.17 ซึ่งใช้ผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ประกอบกับ p-i-n ไดโอด พบว่าไดโอดไวแสงไม่สามารถตอบสนองประกายแสงที่เกิดจากผลึกวัดได้<sup>(2)</sup> สเปกตรัมที่เกิดขึ้นคาดว่าเกิดจากการวัดโฟโตอิเล็กตรอนจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมา (60 keV) กับฝาครอบผลึกซึ่งทำด้วยอลูมิเนียม โดยสังเกตจากหัววัดรังสีของ Hamamatsu มักจะแนะนำให้ใช้ฝาครอบอลูมิเนียมกับผลึกทุกครั้ง<sup>(10)</sup>

ข. ผลของการวัดความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ในผลึกแท่งเดียวกันที่ตำแหน่งภาคตัดขวางตามแนวตั้งและตามแนวยาวของผลึก

เพื่อศึกษาความสม่ำเสมอของเนื้อผลึกวัดรังสีที่พัฒนาได้ จึงได้ทำการทดลองตัดแบ่งผลึกวัดในส่วนบน ล่าง และตามแนวขวางของผลึก เพื่อทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งให้ผลการวัดสเปกตรัมดังในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งผลึกที่ตัดแบ่งจากแท่งผลึก



ตำแหน่งช่องวิเคราะห์พลังงาน

รูปที่ 4.19 แสดงสเปกตรัมของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันตามภาคตัดขวางของผลึกทั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. และ 10 มม.

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลองปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์และทดสอบการแจกแจงพลังงาน

5.1.1 จากการทดลองในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ โดยใช้ระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สตีออบาร์เกอร์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์นั้นจำเป็นต้องอยู่ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศกาซาร์กอนเนื่องจากในช่วงที่สารปลูกผลึกอยู่ในอุณหภูมิหลอมเหลว จะมีอัตราการระเหยที่สูงมากและทั้งยังเป็นการป้องกันสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ มิให้เข้ามาปะปนกับสารหลอมเหลวที่กำลังปลูกผลึกอยู่ ทำให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์สามารถนำมาใช้งานได้

5.1.2 สิ่งสำคัญของการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน – สตีออบาร์เกอร์คือการจัดการความชันเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในเตาหลอมบริเวณที่เริ่มก่อผลึกให้เหมาะสมและจัดอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกให้สอดคล้องกัน ช่วงที่สำคัญของอุณหภูมิคือช่วงของการหลอมเหลว ช่วงของการเริ่มเกิดผลึก และช่วงของการเย็นตัวลงของผลึกลงสู่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลึกเป็นระนาบเดียวกันและเป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์ การปรับอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกเร็วเกินไปจะทำให้ผลึกวัดรังสีไม่มีคุณสมบัติเป็นผลึกเดี่ยวทั้งแท่งและประสิทธิภาพในการตรวจวัดต่ำ

5.1.3 ผลของการเตรียมผิวผลึกมีส่วนสำคัญเช่นกันในการส่งผ่านแสงที่ได้จากการเกิดอันตรกิริยาจากรังสีเอกซ์สู่อุปกรณ์วัดแสงเช่นหลอดทวิคูณแสงหรือ p-i-n ไดโอด โดยที่ผิวที่ไม่เรียบและไม่มีความใสที่เพียงพอให้แสงเคลื่อนที่ผ่านออกมาได้จะทำให้ลดทอนความเข้มแสงทำให้ขนาดของสัญญาณพัลส์ต่ำ

5.1.4 ผลของการทดสอบการแจกแจงพลังงานของผลึกที่ได้จากการปลูกโดยใช้ระบบปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศก๊าซอาร์กอนด้วยต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Am-241 ความแรง 10 mCi พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 26% – 28 % ขึ้นกับขนาดของผลึกและเนื้อผลึกที่ได้

5.1.5 ผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) จะให้ความยาวคลื่นของประกายแสงสูงสุดในช่วงประมาณ 400nm – 420nm ขณะที่ p-i-n ไดโอดตอบสนองของความยาวคลื่นในช่วงนี้เพียง 15% ดังนั้น p-i-n จึงไม่เหมาะกับการใช้เป็นอุปกรณ์ไวแสงของผลึกวัดซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม)

## 5.1 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) เพื่อให้ได้ขนาดที่ใหญ่ขึ้น จำเป็นต้องออกแบบระบบปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์และขนาดของภาชนะปลูกผลึกให้ใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ทั้งยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิตามแนวท่อปลูกผลึกและอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่มีความละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย

5.2.2 ในการใส่สารเจือประเภทโซเดียมลงไปผลึกซีเซียมไอโอไดด์เพื่อช่วยเลื่อนความยาวคลื่นออกไปและช่วยให้เกิดสเปกตรัมของพลังงานอยู่ในช่วงของอุณหภูมิห้องได้ แต่ไม่ได้ศึกษาผลของปริมาณสารเจือที่ใส่ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ได้จึงน่าจะมีการศึกษา

5.2.3 ควรมีการศึกษาการปลูกผลึกโดยการใส่สารเจือประเภทเทลเลียมเนื่องจากจะให้ประกายแสงย่าน 550nm – 580nm ซึ่งเหมาะกับการตอบสนองของ p-i-n ไดโอด แต่สารเทลเลียมเป็นสารที่ไม่มีการใช้งานภายในประเทศต้องสั่งซื้อเฉพาะงานเท่านั้นและต้องระมัดระวังในการใช้งานเนื่องจากเป็นสารที่มีพิษ

5.2.4 ควรมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของผลึกโดยการคลายความเครียดและความเค้นของผลึก (Anneal) โดยการใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวประมาณ 30–40 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน ๆ เพื่อให้เกิดการจัดเรียงผลึกใหม่ (Recrystallizations) ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ทนต่อการใช้งานที่มีสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว



## รายการอ้างอิง

1. William J.Price. Nuclear Radiation Detection. Executive Director Air Force Office of Scientific Research Office of Aerospace Research: USAF, 1962
2. J.B BIRKS. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Reader in Physics. The University of Manchester. New York: Pergamon Press, 1964
3. Glenn F.Knoll. Radiation Detection and Measurement. Professor of Nuclear Engineering the University of Michigan: Ann Arbor. Michigan, 1989
4. Nicholas Tsoufanidis. Measurement and Detection of Radiation. University of Missouri-Rolla. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983
5. Geoffrey G. Eichholz. John W.Poston. Principles of Nuclear Radiation Detection. School of Nuclear Engineering. Georgia Institute of Technology Atlanta. Georgia: Ann Arbor science publishers inc., 1978
6. DR Vij. Thermoluminescent Materials. Department of Physics. Kurukshetra University. India: PTR Prentice Hall, 1993
7. R.A. Laudise. The Growth of Single Crystals. Bell Telephone Laboratories. Murray Hill: New Jersey, 1970
8. J.J Gilman. The Art and Science of Growing Crystals. Division of Engineering Brown University, 1963
9. BRIAN R. PAMPLIN, Crystal Growth. School of Physics. University of Bath. New York: Pergamon press, 1969
10. Harmamatsu. Photodiodes. Harmamatsu Photonics K.K., Solid state division. Japan, 1996



ภาคผนวก

คุณสมบัติเฉพาะของสารซีเซียมไอโอไดด์

**Cesium Iodide**

CsI; mol wt. 259.82 Cs 51.15%, I 48.85% Prepn: Gmelin's, Cesium (8<sup>th</sup>

ed.)

25, pp 188-204 (1938)

Deliquescent crystals or crystal powder. D 4.5. mp 621° bp about 1280°.

Very sol in water; sol in ethanol; slightly sol in methanol; practically insol in acetone. Keep well closed. LD<sub>50</sub> i.p. in rats: 1.4g/kg;

Cochran et al., Arch Ind. Hyg. 1, 637 (1950).

Use: Prisms for infrared spectroscopy; in x-ray fluorescent screens, scintillation counters.

- CAS-No. (7789-17-3) ■ CsI
- M = 259.81 g/mol
- Densität: 28 ■ EINECS No.: 2321452
- LÖS: 10-13 ■ HS No.: 2627 60 00
- Sax CDE000 ■ Merck Index 11, 2006



**Certificate of Guarantee:**

Assay (by argentometry) ..... min 99.5 %  
 Sulfate (SO<sub>4</sub>) ..... max. 5 ppm  
 Al (aluminium) ..... max. 0.01 ppm

B (boron) ..... max. 0.05 ppm  
 Ba (barium) ..... max. 1 ppm  
 Ca (calcium) ..... max. 0.05 ppm  
 Cd (cadmium) ..... max. 0.005 ppm  
 Co (cobalt) ..... max. 0.005 ppm  
 Cu (copper) ..... max. 0.01 ppm  
 Fe (iron) ..... max. 0.01 ppm  
 K (potassium) ..... max. 2 ppm  
 Li (lithium) ..... max. 0.2 ppm  
 Mg (magnesium) ..... max. 0.05 ppm  
 Mn (manganese) ..... max. 0.01 ppm

Na (sodium) ..... max. 5 ppm  
 Ni (nickel) ..... max. 0.01 ppm  
 Pb (lead) ..... max. 0.005 ppm  
 Rb (rubidium) ..... max. 5 ppm  
 Sr (strontium) ..... max. 0.05 ppm  
 Tl (thallium) ..... max. 0.01 ppm  
 Zn (zinc) ..... max. 0.005 ppm

| Ord. No. (IA) | Package |
|---------------|---------|
| 1 0286 1 0100 | Plastic |
| 1 0286 1 0250 | Plastic |
| 1 0286 1 1000 | Plastic |

Cesium iodide, thallium-doped  
 monocovalent scintillators → Monocovalents

Cesium iodide monocristals windows in  
 standard and special sizes → Monocovalents

## CESIUM IODIDE, CsI

Cesium Iodide is used for prisms and cell windows in the infrared up to 50  $\mu\text{m}$ . Cesium Iodide is highly soluble in water and must be protected from moisture. The material is relatively soft, does not cleave and can withstand shock and rapid temperature changes. Maximum available size: 200 mm Dia x 100 mm Thk.

### Main Properties

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Chemical Formula   | CsI                   |
| Crystal Class  | Cubic                 |
| Lattice Constant, $\text{\AA}$                           | 4.57                  |
| Density, $\text{g/cm}^3$ at 291 K                        | 4.51                  |
| Dielectric Constant for $10^6$ Hz at 298 K               | 5.65                  |
| Melting Temperature, K                                   | 894                   |
| Thermal Conductivity, $\text{W/(m K)}$ at 298 K          | 1.1                   |
| Thermal Expansion, $1/\text{K}$ at 293 K                 | $39.1 \times 10^{-6}$ |
| Specific Heat, $\text{cal/(g K)}$ at 293 K               | 0.048                 |
| Debye Temperature, K                                     | 93.6                  |
| Bandgap, eV  | 6.2                   |
| Solubility, $\text{g/100 g H}_2\text{O}$ at 273 K        | 44                    |
| Young's Modulus, GPa                                     | 5.30                  |
| Reflection Loss for two surfaces at 10 $\mu\text{m}$ , % | 13.6                  |

### Refractive Index

|                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Wavelength, $\mu\text{m}$ | 0.29 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.46 | 0.52 | 0.64 | 0.92 | 9.0  | 24.4 | 33.0 | 39.5 |
| Refractive Index          | 1.98 | 1.94 | 1.90 | 1.86 | 1.82 | 1.80 | 1.78 | 1.76 | 1.74 | 1.72 | 1.70 | 1.68 |

## OPTICAL

|                        |                                      |
|------------------------|--------------------------------------|
| Transmission Range     | 0.25 to 55 microns                   |
| Refractive Index       | 1.73835 at 11 microns                |
| Reflection Loss        | 13.6% at 11 microns (2 surfaces)     |
| Absorption Coefficient |                                      |
| Reststrahlen Peak      | 145.8 microns                        |
| dN/dT                  | +99.3 X 10 <sup>-6</sup> °C at 600nm |
| dN/dλ = 0              | 6 microns                            |

## PHYSICAL

|                        |   |
|------------------------|---|
| Density                | 4.51 gm/cc                                  |
| Melting Point          | 621 °C                                      |
| Thermal Conductivity   | 1.1Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> at 298K |
| Thermal Expansion      | 48.3 X 10 <sup>-6</sup> °C at 293K          |
| Hardness               | Knoop 20 with 200g indenter                 |
| Specific Heat Capacity | 201 J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>      |
| Dielectric Constant    | 5.65 at 1MHz                                |
| Youngs Modulus (E)     | 5.3 GPa                                     |
| Shear Modulus (G)      | 6.24 GPa                                    |
| Bulk Modulus (K)       | 12.67 GPa                                   |
| Elastic Coefficient    | C11 = 24.6 C12 = 6.7 C44 = 6.24             |
| Apparent Elastic Limit | 5.6 MPa (810psi)                            |
| Poisson Ratio          | 0.214                                       |

## CHEMICAL

|                  |                               |
|------------------|-------------------------------|
| Solubility       | 44gm/100gm water at 0° C      |
| Molecular Weight | 259.83                        |
| Class/Structure  | Cubic CsCl, Pm3m, no cleavage |

NOTES: CsI is grown by sealed ampoule Stockbarger techniques with ingots of approximately 70mm diameter. CsI is very soft and pliable.

## ภาคผนวก ข.

## คุณสมบัติเฉพาะของขดลวดความร้อน

## Physical and Mechanical Properties

## List of Properties

KANTHAL, NIKROTHAL and ALKROTHAL alloys are generally available in wire or strip form. Physical and mechanical properties of the alloys are listed in Table I and II.

(Section "Data for KANTHAL, NIKROTHAL and ALKROTHAL", page 73, provides tables of resistance and weight data for KANTHAL, NIKROTHAL and ALKROTHAL alloys in wire and strip form, respectively.)

| Table I. KANTHAL and ALKROTHAL Alloys  | KANTHAL A-1    | KANTHAL AF                                  | KANTHAL D      | ALKROTHAL      |
|--|----------------|---|----------------|----------------|
| Form   | Wire Strip     | Wire Strip                                  | Wire Strip     | Wire Strip     |
| Max. continuous operating temperature (element temperature in air), °C °F  | 1400 ... 2550  | 1400* ... 2550                              | 1300 ... 2370  | 1100 ... 2010  |
| Nominal composition, % Cr  | 22             | 22  | 22             | 15             |
| Al   | 5.8            | 5.3   | 4.8            | 4.3            |
| Fe   | Rest           | Rest  | Rest           | Rest           |
| Density, g/cm <sup>3</sup> lb/in <sup>3</sup>  | 7.10 ... 0.256 | 7.15 ... 0.259                              | 7.25 ... 0.262 | 7.28 ... 0.263 |
| Electrical resistivity at 20°C, Ω mm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup> at 68°F, Ω cmft  | 1.45 ... 872   | 1.39 ... 836                                | 1.35 ... 812   | 1.25 ... 755   |
| Temperature factor of the resistivity, C,  |                |   |                |                |
| 300°C 1470°F   | 1.03           | 1.05  | 1.06           | 1.10           |
| 1000°C 1830°F  | 1.04           | 1.06  | 1.07           | 1.11           |
| 1200°C 2190°F  | 1.04           | 1.06  | 1.08           | —              |
| Coefficient of thermal expansion, K <sup>-1</sup>  |                |   |                |                |
| 20–250°C 68–480°F  |                | 11 · 10 <sup>-6</sup>                       |                |                |
| 20–500°C 68–930°F  |                | 12 · 10 <sup>-6</sup>                       |                |                |
| 20–750°C 68–1380°F   |                | 14 · 10 <sup>-6</sup>                       |                |                |
| 20–1000°C 68–1830°F  |                | 15 · 10 <sup>-6</sup>                       |                |                |
| Thermal conductivity at 20°C, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> 68°F, Btu in ft <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> |                | 16 ... 177                                  |                |                |
| Specific heat capacity, kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , 20°C 3tu lb <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> , 68°F                |                | 0.46 ... 0.170                              |                | 0.48 ... 0.175 |
| Melting point (approx.), °C °F   |                | 1500 ... 2730                               |                |                |
| Mechanical properties** (approx.)  |                |   |                |                |
| Tensile strength, N mm <sup>-2</sup> psi   |                | 750 ... 109,000                             |                |                |
| Yield point, N mm <sup>-2</sup> psi  |                | 550 ... 80,000                              |                |                |
| Hardness (approx.), Hv   |                | 230   |                |                |
| Elongation at rupture (approx.), %   |                | 16  |                |                |
| Tensile strength at 900°C, N mm <sup>-2</sup> at 1650°F, psi   | 34 ... 5000    | 37 ... 5400                                 | 34 ... 5000    | 30 ... 4300    |
| Creep strength   |                |   |                |                |
| at 800°C, N mm <sup>-2</sup> at 1470°F, psi  | 6 ... 870      | 8 ... 1160                                  | 6 ... 870      | 4 ... 580      |
| at 1000°C, N mm <sup>-2</sup> at 1830°F, psi   | 1 ... 145      | 1.5 ... 215                                 | 1 ... 145      | 1 ... 145      |
| Magnetic properties  |                | Magnetic (Curie point approx. 600°C 1100°F) |                |                |
| Emissivity, ε, fully oxidized condition  |                | 0.70  |                |                |

\* For maximum element life above 1300°C 2370°F we recommend Kanthal A-1 due to superior oxide properties.

\*\* The values given apply for sizes of approx. 1.0 mm diameter 0.04 in. Thinner gauges have higher strength and hardness values while the corresponding values are lower for thicker gauges.

| Table II. NIKROTHAL Alloys  | NIKROTHAL<br>80 Plus  | NIKROTHAL<br>60 Plus  | NIKROTHAL<br>40 Plus  | NIKROTHAL<br>20 Plus |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Form  | Wire<br>Strip         | Wire<br>Strip         | Wire<br>Strip         | Wire                 |
| Max. continuous operating temperature<br>(element temperature in air), °C °F  | 1200 ... 2190 ...     | 1150 ... 2100 ...     | 1100 ... 2010 ...     | 1050 ... 1920 ...    |
| Nominal composition, % Cr   | 20                    | 15                    | 20                    | 25                   |
| Fe  | —                     | 25                    | 45                    | 55                   |
| Ni  | 80                    | 60                    | 35                    | 20                   |
| Density, g/cm <sup>3</sup> lb/in <sup>3</sup>   | 8.3 ... 0.300         | 8.2 ... 0.296         | 7.9 ... 0.285         | 7.8 ... 0.282        |
| Electrical resistivity at 20°C, Ω mm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup><br>at 68°F, Ω /cmf  | 1.09 ... 655 ...      | 1.11 ... 668 ...      | 1.04 ... 626 ...      | 0.95 ... 571 ...     |
| Temperature factor of the resistivity, C,<br>800°C 1470°F   | 1.04                  | 1.10                  | 1.21                  | 1.28                 |
| 1000°C 1830°F   | 1.05                  | 1.11                  | 1.23                  | 1.32                 |
| 1200°C 2190°F   | 1.07                  | 1.13                  | —                     | —                    |
| Coefficient of thermal expansion, K <sup>-1</sup>   |                       |                       |                       |                      |
| 20–250°C 68–480°F   | 15 · 10 <sup>-6</sup> | 14 · 10 <sup>-6</sup> | 16 · 10 <sup>-6</sup> | —                    |
| 20–500°C 68–930°F   | 16 · 10 <sup>-6</sup> | 15 · 10 <sup>-6</sup> | 17 · 10 <sup>-6</sup> | —                    |
| 20–750°C 68–1380°F  | 17 · 10 <sup>-6</sup> | 16 · 10 <sup>-6</sup> | 18 · 10 <sup>-6</sup> | —                    |
| 20–1000°C 68–1830°F   | 18 · 10 <sup>-6</sup> | 17 · 10 <sup>-6</sup> | 19 · 10 <sup>-6</sup> | —                    |
| Thermal conductivity at 20°C, W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup><br>68°F, Btu in ft <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> | 15 ... 104 ...        | 13 ... 90 ...         | 13 ... 90 ...         | 13 ... 90 ...        |
| Specific heat capacity, kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> , 20°C<br>Btu lb <sup>-1</sup> °F <sup>-1</sup> , 68°F                | 0.46 ... 0.110 ...    | 0.46 ... 0.110 ...    | 0.50 ... 0.119 ...    | 0.50 ... 0.119 ...   |
| Melting point (approx.), °C °F  | 1400 ... 2550 ...     | 1390 ... 2535 ...     | 1390 ... 2535 ...     | 1380 ... 2520 ...    |
| <b>Mechanical properties* (approx.)</b>   |                       |                       |                       |                      |
| Tensile strength, N mm <sup>-2</sup> psi  | —                     | 750 ... 109,000       | —                     | —                    |
| Yield point, N mm <sup>-2</sup> psi   | —                     | 450 ... 65,000        | —                     | —                    |
| Hardness (approx.), H <sub>v</sub>  | —                     | 180                   | —                     | —                    |
| Elongation at rupture (approx.), %  | —                     | 30                    | —                     | —                    |
| Tensile strength at 900°C, N mm <sup>-2</sup> at 1650°F, psi  | —                     | 100 ... 14,500        | —                     | 120 ... 17,400       |
| Creep strength  | —                     |                       | —                     |                      |
| at 800°C, N mm <sup>-2</sup> at 1470°F, psi   | —                     | 15 ... 2160           | —                     | 20 ... 2900          |
| at 1000°C, N mm <sup>-2</sup> at 1830°F, psi  | —                     | 4 ... 580             | —                     | 4 ... 580            |
| Magnetic properties   | Non-magnetic          | Slightly<br>magnetic  | Non-magnetic          | —                    |
| Emissivity, ε, fully oxidized condition   | —                     | 0.88                  | —                     | —                    |

\* The values given apply for sizes of approx. 1.0 mm diameter 0.04 in. Thinner gauges have higher strength and hardness values while the corresponding values are lower for thicker gauges.

**KANTHAL AF****Wire mm**

12.0—0.05 mm Ø  
 Resistivity,  $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$  1.39  
 Density,  $\text{g cm}^{-3}$  7.15

$$\text{cm}^2/\Omega = \frac{PC}{I}$$

I = Current  
 C<sub>t</sub> = Temperature factor  
 P = Surface load  $\text{W/cm}^2$

To obtain resistivity at working temperature multiply by the factor C<sub>t</sub> in the following table:

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| °C             | 20   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 |
| C <sub>t</sub> | 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 | 1.07 |

| Diameter<br>mm | Resistance<br>$\Omega/\text{m}$<br>20°C | $\text{cm}^2/\Omega$<br>20°C | Weight<br>g/m | Surface<br>area<br>$\text{cm}^2/\text{m}$ | Cross<br>sectional<br>area $\text{mm}^2$ | Diameter<br>mm |
|----------------|---|------------------------------|---------------|---|--|----------------|
| 12.0           | 0.0123                                  | 30700                        | 809           | 377                                       | 113                                      | 12.0           |
| 10.0           | 0.0177                                  | 17800                        | 562           | 314                                       | 78.5                                     | 10.0           |
| 9.5            | 0.0196                                  | 15200                        | 507           | 298                                       | 70.9                                     | 9.5            |
| 8.0            | 0.0277                                  | 9090                         | 359           | 251                                       | 50.3                                     | 8.0            |
| 7.5            | 0.0315                                  | 7490                         | 316           | 236                                       | 44.2                                     | 7.5            |
| 7.0            | 0.0361                                  | 6090                         | 275           | 220                                       | 38.5                                     | 7.0            |
| 6.5            | 0.0419                                  | 4870                         | 237           | 204                                       | 33.2                                     | 6.5            |
| 6.0            | 0.0492                                  | 3830                         | 202           | 188                                       | 28.3                                     | 6.0            |
| 5.5            | 0.0585                                  | 2950                         | 170           | 173                                       | 23.8                                     | 5.5            |
| 5.0            | 0.0708                                  | 2220                         | 140           | 157                                       | 19.6                                     | 5.0            |
| 4.75           | 0.0784                                  | 1900                         | 127           | 149                                       | 17.7                                     | 4.75           |
| 4.5            | 0.0874                                  | 1620                         | 114           | 141                                       | 15.9                                     | 4.5            |
| 4.25           | 0.0980                                  | 1360                         | 101           | 134                                       | 14.2                                     | 4.25           |
| 4.0            | 0.111                                   | 1140                         | 89.8          | 126                                       | 12.6                                     | 4.0            |
| 3.75           | 0.126                                   | 936                          | 79.0          | 118                                       | 11.0                                     | 3.75           |
| 3.5            | 0.144                                   | 761                          | 68.8          | 110                                       | 9.62                                     | 3.5            |
| 3.25           | 0.168                                   | 609                          | 59.3          | 102                                       | 8.30                                     | 3.25           |
| 3.0            | 0.197                                   | 479                          | 50.5          | 94.2                                      | 7.07                                     | 3.0            |
| 2.8            | 0.226                                   | 390                          | 44.0          | 88.0                                      | 6.16                                     | 2.8            |
| 2.5            | 0.283                                   | 277                          | 35.1          | 78.5                                      | 4.91                                     | 2.5            |
| 2.25           | 0.350                                   | 202                          | 28.4          | 70.7                                      | 3.98                                     | 2.25           |
| 2.0            | 0.442                                   | 142                          | 22.5          | 62.8                                      | 3.14                                     | 2.0            |
| 1.9            | 0.490                                   | 122                          | 20.3          | 59.7                                      | 2.84                                     | 1.9            |
| 1.8            | 0.546                                   | 104                          | 18.2          | 56.5                                      | 2.54                                     | 1.8            |
| 1.7            | 0.612                                   | 87.2                         | 16.2          | 53.4                                      | 2.27                                     | 1.7            |
| 1.6            | 0.691                                   | 72.7                         | 14.4          | 50.3                                      | 2.01                                     | 1.6            |
| 1.5            | 0.787                                   | 59.5                         | 12.6          | 47.1                                      | 1.77                                     | 1.5            |
| 1.4            | 0.903                                   | 48.7                         | 11.0          | 44.0                                      | 1.54                                     | 1.4            |
| 1.3            | 1.05                                    | 39.0                         | 9.49          | 40.8                                      | 1.33                                     | 1.3            |
| 1.2            | 1.23                                    | 30.7                         | 8.09          | 37.7                                      | 1.13                                     | 1.2            |
| 1.1            | 1.46                                    | 23.6                         | 6.79          | 34.6                                      | 0.950                                    | 1.1            |
| 1.0            | 1.77                                    | 17.8                         | 5.62          | 31.4                                      | 0.785                                    | 1.0            |

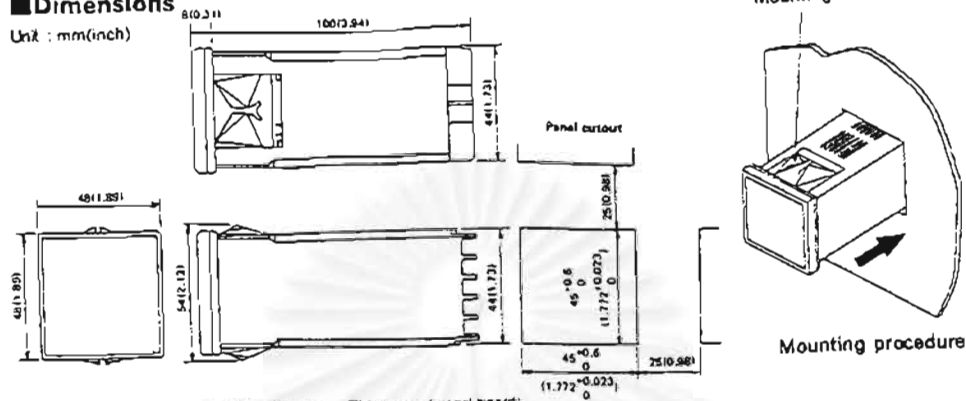


ภาคผนวก ก.

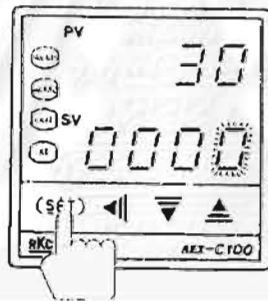
แสดงข้อมูลของอุปกรณ์ควบคุมความร้อนแบบพีไอดี รุ่น REX-C100

■ Dimensions

Unit : mm (inch)

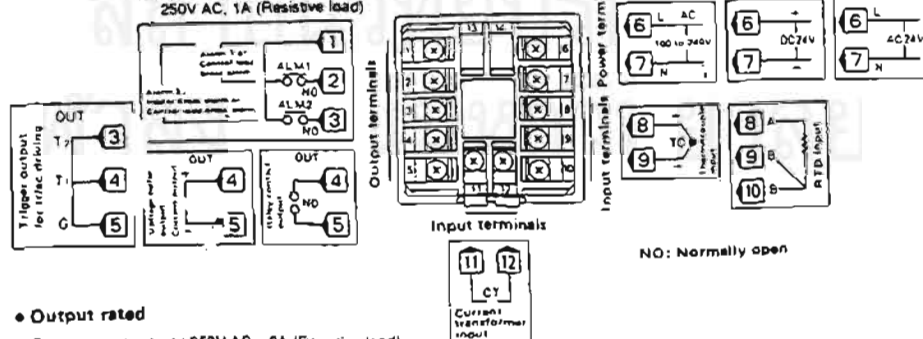


\*Dimensions in inches are shown for reference. Thickness of panel board: 1 to 5 mm or 5 to 9 mm (0.04 to 0.20 inch or 0.20 to 0.35 inch)



■ Terminal configuration

● Output rated  
Relay contact output :  
250V AC, 1A (Resistive load)



● Output rated

- Relay contact output : 250V AC, 3A (Resistive load)
- Voltage pulse output : 0 / 12V DC (Load resistance 600 Ω or more)
- Current output : 4 to 20mA DC (Load resistance 600 Ω or less)
- Trigger output (for triac driving) : Zero-cross method for medium capacity triac driving (100A or less)
- Load voltage : 100V AC system, 200V AC system
- Load : Resistive load

## ภาคผนวก ง

แสดงค่าของอุณหภูมิสูงสุดของภาชนะแต่ละชนิดที่ใช้ในการปลูกผลึก

| ชนิดของภาชนะ        | อุณหภูมิสูงสุด ( เซลเซียส ) |
|---------------------|-----------------------------|
| virtreous           | 3000                        |
| Tungsten            | 3000                        |
| Thoria              | 2800                        |
| Tantalum            | 2700                        |
| Graphite            | 2600                        |
| Magnesia            | 2600                        |
| Molybdenum          | 2400                        |
| Zirconia            | 2300                        |
| Beryllia            | 2300                        |
| Alumina             | 1900                        |
| Rhodium             | 1800                        |
| Platinum 10%Iridium | 1700                        |
| Boron Nitride       | 1700                        |
| Platinum            | 1600                        |
| Silicon Nitride     | 1500                        |
| Nickel              | 1300                        |
| Silica              | 1250                        |
| Pyrex               | 500                         |

## ภาคผนวก ข.

## การทดสอบคุณสมบัติของผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, WDX)

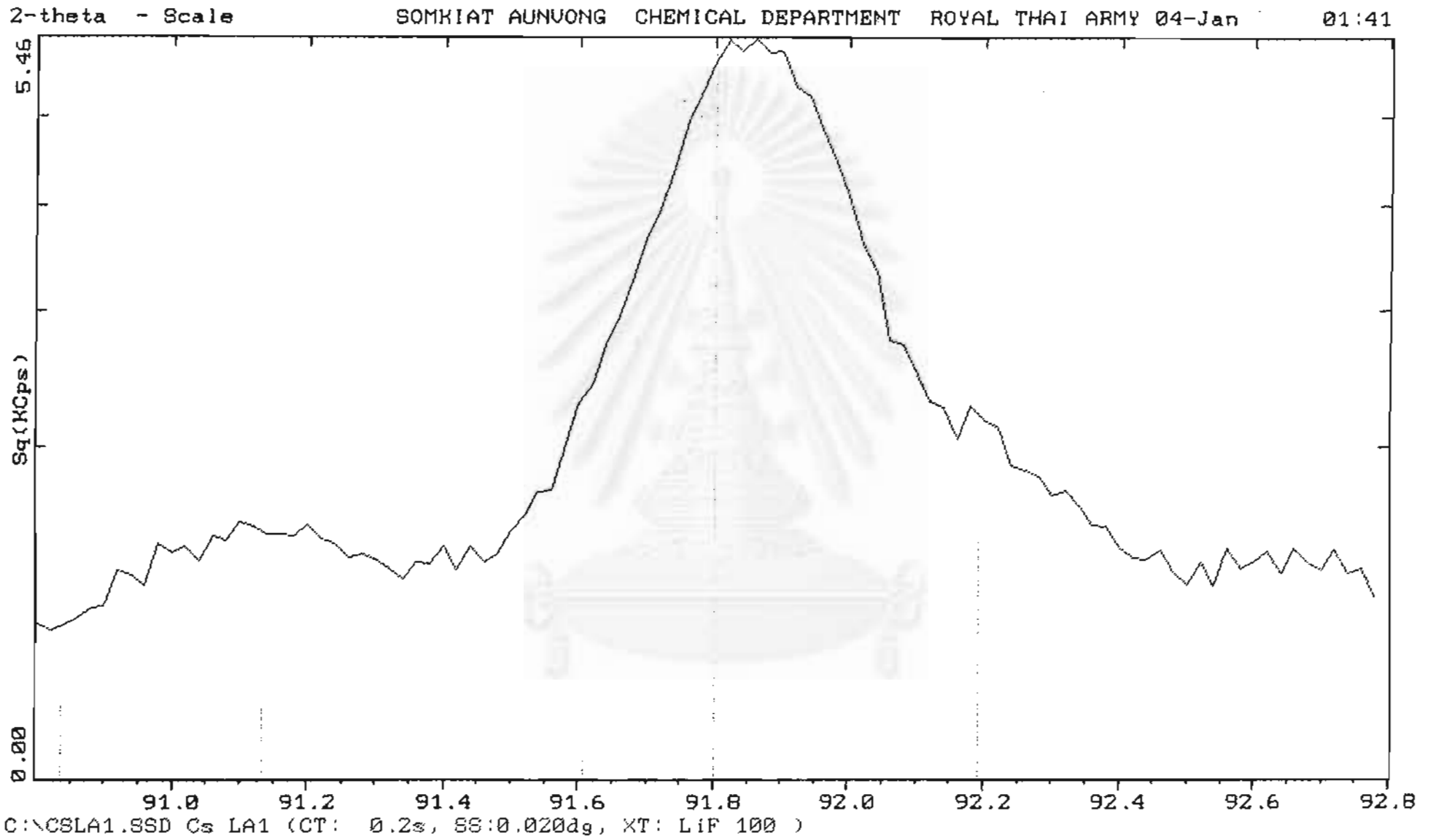
เพื่อเป็นการศึกษาว่าผลึกที่ได้จากปลูกโดยมีการเติมส่วนผสมของโซเดียมไอโอไดด์ลงไป ในผลึกซีเซียมไอโอไดด์นั้น จะยังคงมีสารโซเดียมอยู่ภายในผลึก ผลที่ได้จากการวัดธาตุซีเซียม ไอโอไดด์และโซเดียม ดังแสดงในรูปที่ 4.19 รูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 โดยทำการวัดผลึก ซีเซียมไอโอไดด์(โซเดียม) ขนาด 10มม\*15มม\*2มม

ผลที่ได้จากการวัดแสดงให้เห็นว่าในการเติมสารโซเดียมไอโอไดด์ลงไปในสารซีเซียม ไอโอไดด์นั้น เมื่อผ่านการหลอมละลายแล้วสารโซเดียมสามารถเข้าไปรวมตัวกับซีเซียมไอโอไดด์ ก่อให้เกิดผลึกได้โดยไม่ระเหยหายไป

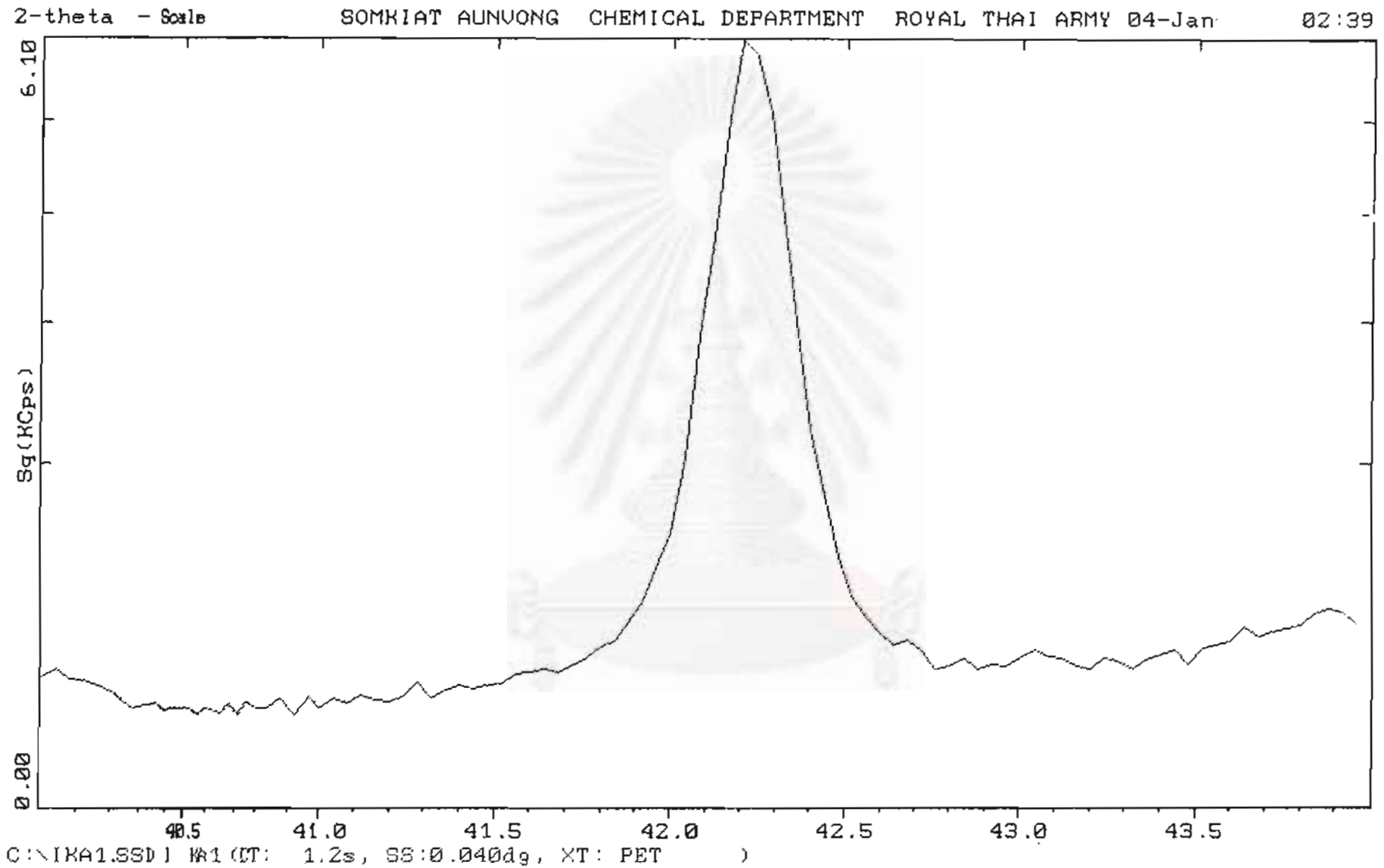
ชื่อเครื่อง : X-ray Fluorescence Spectrometer (Wavelength Dispersive)  
 รุ่น: SRS 3000  
 ยี่ห้อ: Siemens

ข้อมูลในส่วนของการควบคุมการทำงานมีดังนี้:

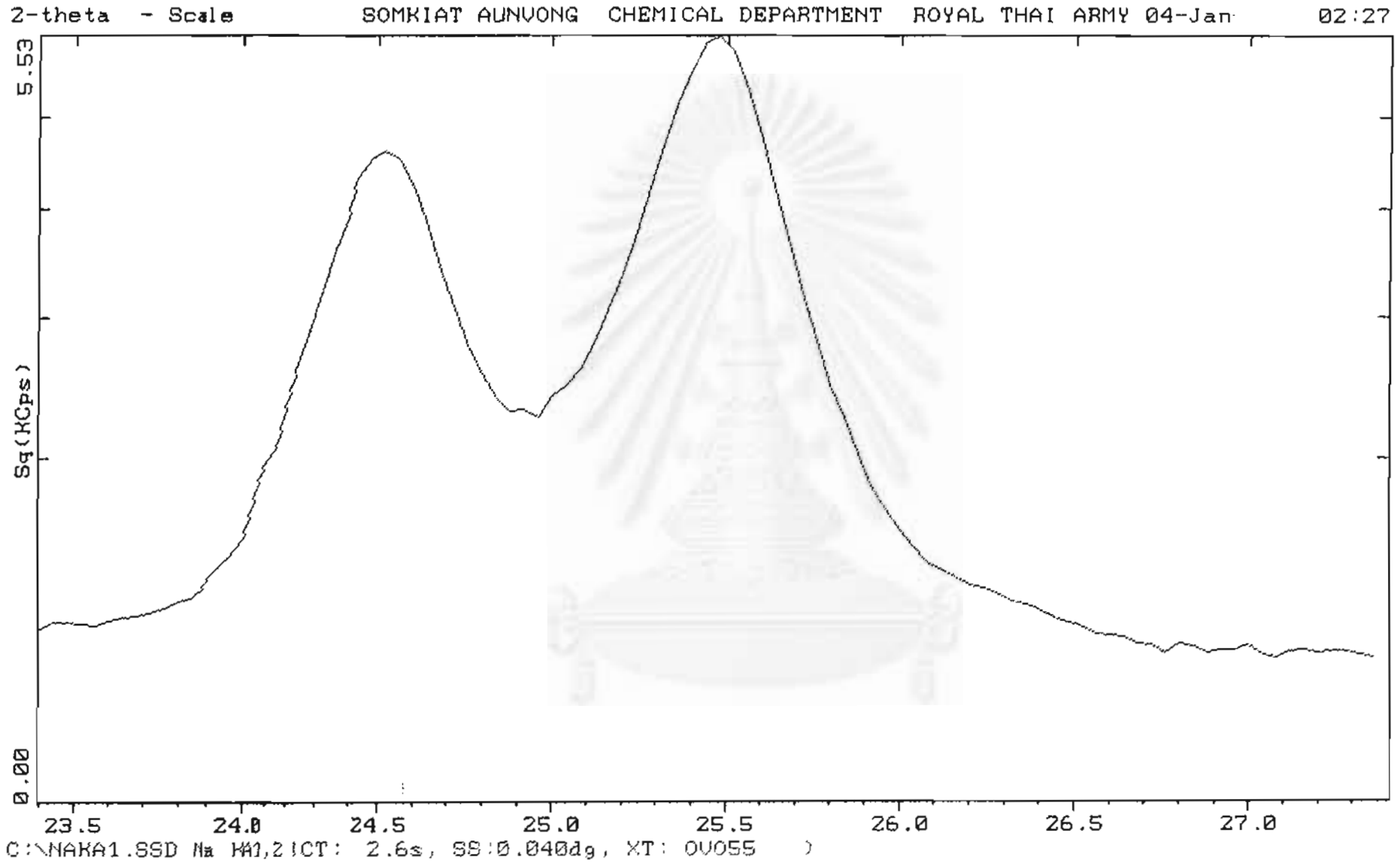
1. หลอดรังสีเอกซ์ อาโนด แบบ Rh
2. MODE Vacuum Mode
3. Crystal : PET LiF100 OVO55
4. Mask 23 mm
5. Filter None
6. Collimator 0.15 Degree
7. Tube Voltage 40 kV
8. Tube Current 70 mA
9. Detector FlowCounter
10. Gas Ar-CH4
11. Windows Level 0.4-1.5



รูปที่ 4.19 แสดงการวิเคราะห์แบบคุณภาพของธาตุซีเซียมด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ชนิดแจกแจงมุมยาวคลื่น



รูปที่ 4.20 แสดงการวิเคราะห์แบบคุณภาพของธาตุไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคการเลี้ยวรังสีเอกซ์ชนิดแยกแยะความยาวคลื่น



รูปที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์แบบคุณภาพของธาตุโซเดียมด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ <sup>18</sup> แจกแจงความยาวคลื่น

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วิชญ์ สุกงุรียาพร เกิดวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2507 ที่ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี ในปีการศึกษา 2531 และเข้าการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2539

