การแจงแจกพลังงาน 7.19% ของสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV และสามารถปลูกผลึกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร หนา 22 มิลลิเมตร ที่มีความสามารถในการแจกแจงพลังงาน 7.53% โดยใช้สารกัมมันตรังสีชนิดเดียวกัน ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบผลึก CsI(Tl) ที่ปลูกได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร หนา 22 มิลลิเมตร กับผลึก NaI(Tl) ของบริษัท Bicron รุ่น 1M1/2P ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร พบว่าผลึก CsI(Tl) ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน ประสิทธิภาพการวัดพีคของพลังงาน (Intrinsic peak efficiency) และ พีคต่อคอมป์ตัน (Peak to Compton ratio) ที่ 7.53% 10.35 และ 4.58:1 ตามลำดับ ในขณะที่ NaI(Tl) ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน ประสิทธิภาพการวัดพีคของพลังงาน และพีคต่อคอมป์ตัน ที่ 10.76% 8.43 และ 2.72:1 ตามลำดับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ที่มีขนาด 2 x 2 นิ้ว ที่สร้างขึ้นเมื่อนำมาใช้งานร่วมกับหลอดทวีคูณแสงจะมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานได้ใกล้เคียงกับ NaI(Tl) แต่มีราคาที่ถูกกว่าทำให้สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการเรียนการสอนและใช้ในการวิจัยในสาขาวิชาทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์และสาขาวิชาฟิสิกส์ให้กับสถาบันการศึกษาต่างๆ ได้ โดยปัจจุบันหัววัดซินทิลเลชันที่ขายในเชิงพาณิชย์มีราคาที่แพงมากเนื่องจากเป็นการนำเข้าหัววัดรังสีจากต่างประเทศ โดยกลุ่มเป้าหมายที่สามารถนำไปใช้ได้คือหน่วยงานด้านสาธารณสุข สถาบันการศึกษาที่มีการเรียนการสอนและการวิจัยในสาขาวิชารังสีเทคนิคหรือสาขาวิชาฟิสิกส์ โดยสามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ เนื่องจากผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ที่ผลิตขึ้นเมื่อใช้งานร่วมกับหลอดทวีคูณแสง สามารถนำไปใช้งานเป็นหัววัดสำหรับหาค่าความแรงรังสีของ I-131 ด้วยเครื่อง thyroid uptake ในผู้ป่วยที่ได้รับการตรวจรักษาทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ได้ ซึ่งเป็นการต่อยอดงานวิจัยให้สามารถผลิตหัววัดขนาดมาตรฐานที่มีราคาถูกขึ้นใช้เองเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีกลุ่มเป้าหมายคือโรงพยาบาลและศูนย์มะเร็งในประเทศที่ยังไม่มีหัววัดชนิดผลึกเรืองรังสีหรือโรงพยาบาลที่ต้องการซื้อทดแทนของเดิม ซึ่งปัจจุบันหัววัดดังกล่าวมีจำนวนที่น้อยเนื่องจากหัววัดรังสีชนิดนี้มีราคาที่ค่อนข้างแพง

วิธีดำเนินการวิจัย (Material and Method)

การดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาหัววัดรังสีซินทิลเลชันโดยใช้ผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 2 นิ้ว ที่สามารถใช้งานร่วมกับหลอดทวีคูณแสงเพื่อเป็นหัววัดรังสีที่ใช้งานในทางการแพทย์ทำได้โดยเริ่มจากการออกแบบและสร้างระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง มีความเสถียรของอุณหภูมิและมีระบบควบคุมเตาหลอมให้สามารถทำการปลูกผลึก

ให้มีขนาดต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ โดยในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยและสร้างผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) เพื่อเป็นหัววัดรังสีซินทิลเลชันขนาดเล็กได้เป็นผลสำเร็จ (15-17) แต่สำหรับในการศึกษาวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาผลึกเรืองรังสีให้มีขนาดใหญ่เทียบเท่ากับผลึกวัดรังสีที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่เหมาะสม

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการปลูกผลึกด้วยเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมนสามารถแบ่งช่วงของการปลูกผลึกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงสารเกิดการหลอมเหลว (Charge melting) ช่วงการก่อผลึก (Solidification) และช่วงการลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้อง (Crystal cool down) ซึ่งเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วงจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลึกที่ทำการปลูก สำหรับระบบปลูกผลึกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถควบคุมช่วงของการปลูกผลึกด้วยการควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากฟังก์ชันในอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลา (Ramp rate) ได้ โดยระบบปลูกผลึกดังกล่าวจะเป็นการลดการสั่นสะเทือนขณะทำการปลูกผลึกเนื่องจากไม่มีระบบกลไกการเคลื่อนที่ขณะเกิดการก่อผลึก

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีแผนงานวิจัยที่จะดำเนินการตามขั้นตอนที่ประกอบด้วยการออกแบบระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์ (Bridgman-Stockbarger) การปลูกผลึก CsI(Tl) และการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพผลึกวัดรังสี

1. การออกแบบและพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์ (Bridgman-Stockbarger)

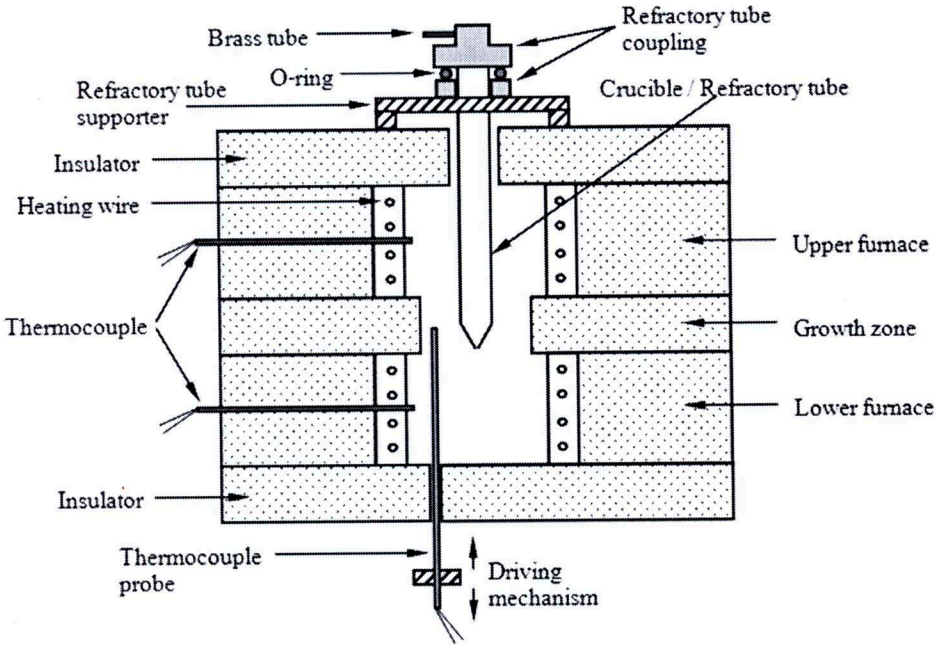
1.1. การออกแบบระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์ให้มีประสิทธิภาพในการปลูกผลึกที่สูงขึ้น โดยสามารถปลูกผลึกหัววัดรังสีให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้วได้ผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ที่ประกอบด้วยสาร CsI ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ 621°C และสาร TlI ที่มีจุดหลอมเหลว 440°C ในท่อปลูกผลึกระบบปิด สำหรับเทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์เป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนกับสาร CsI และ TlI จนกระทั่งเกิดการหลอมเหลวภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารทั้งสอง ทั้งนี้ที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยสามารถทำการปลูกผลึกเรืองรังสี CsI(Tl) ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว 22 มิลลิเมตรด้วยการปรับปรุงกระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์โดยการเปลี่ยนการเคลื่อนภาชนะปลูกผลึกให้เป็นแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Moving-temperature gradient) (15)

สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีการปลูกผลึกด้วยวิธีดังกล่าวมาใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบระบบปลูกผลึกให้สามารถปลูกผลึก CsI(Tl) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้วได้ โดยระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นออกแบบให้สามารถใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่หาซื้อได้ภายในประเทศแต่มี

สมรรถนะเพียงพอสำหรับการปลูกผลึก (15, 17) ด้วยเหตุที่กระบวนการปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะลดการสั่นสะเทือนของสารขณะทำการปลูกผลึกเนื่องจากไม่มีการเคลื่อนภาชนะปลูกผลึกหรือเคลื่อนเตาปลูกผลึกเหมือนกับระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์แบบดั้งเดิม (Conventional Bridgman-Stockbarger) (5) แต่เป็นการใช้วิธีควบคุมการลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำแทน โดยทำการลดอุณหภูมิทั้งเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำไปพร้อมๆ กันและมีอัตราการลดอุณหภูมิที่เท่ากันทั้งสองเตา วิธีการดังกล่าวเปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ของแกรเดียนท์ของอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ซึ่งเรียกว่าอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient drift rate) วิธีการนี้ทำให้สามารถปรับแกรเดียนท์ของอุณหภูมิได้ในช่วง 5-30°C/hr โดยที่อัตราการโตของผลึก (Growth rate) ที่ทำการปลูกด้วยกระบวนการปลูกผลึกด้วยวิธีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิกับค่าแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ซึ่งอัตราการโตของผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{อัตราการโตของผลึก (cm/hr)} = \frac{\text{อัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (°C/hr)}}{\text{แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (°C/cm)}}$$

จากสมการข้างต้นพบว่าอัตราการโตของผลึกสามารถปรับเปลี่ยนจากคู่ของแกรเดียนท์ของอุณหภูมิกับอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ดังนั้นหากทำการปลูกผลึกด้วยอัตราการโตของผลึก 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สามารถควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและแกรเดียนท์ของอุณหภูมิได้ทั้ง 1°C/hr และ 10°C/cm หรือ 2°C/hr และ 20°C/cm หรือ 3°C/hr และ 30°C/cm เป็นต้น ซึ่งแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยโครงสร้างของระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 1



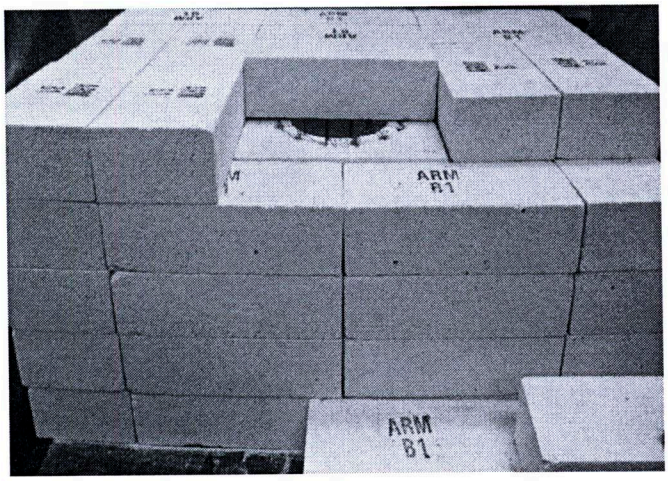
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ [1]

1.2. การสร้างระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์เป็นการสร้างระบบปลูกผลึกขึ้นและทำการทดสอบระบบที่สร้างขึ้นเพื่อหาอัตราการเคลื่อนที่ของภาชนะปลูกผลึกและเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการปลูกผลึก ระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ได้พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.2.1. ชุดเตาหลอมแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์

เตาหลอมแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยเตาอุณหภูมิสูง (High temperature furnace) เตาอุณหภูมิต่ำ (Low temperature furnace) และบริเวณโซนปลูกผลึก (Growth zone) ซึ่งอยู่ระหว่างเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำ เตาทั้งสองชุดทำจากอิฐทนไฟที่สามารถทนความร้อนได้สูงมากกว่า 1,300^{o}C โดยที่ออกแบบโครงสร้างของเตาหลอมบริเวณโซนความร้อนให้เป็นรูปทรงกระบอกเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง ภายในมีขดลวดความร้อนชนิด Kanthal-AF ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร พันเป็นรูปคอยล์ (Helix) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตรโดยสามารถทนความร้อนได้มากกว่า 1,300^{o}C วางลวดความร้อนรูปคอยล์ (Helix) ลงในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอกดังแสดงดังรูปที่ 2 เตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำออกแบบให้มีขนาดกว้าง 45 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร ด้วยโซนความร้อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว บริเวณโซนปลูกผลึกมีความยาวเท่ากับเตาให้ความร้อนแต่ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 นิ้ว สำหรับรองรับให้สามารถทำการปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2

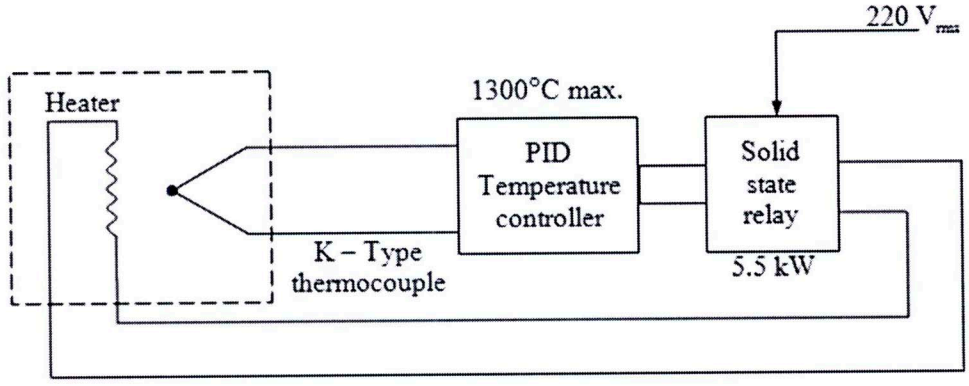
นิ้ว โดยที่โซนปลูกผลึกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาความร้อนเพื่อให้เกิดความเสถียรของอุณหภูมิโดยลดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2 แสดงเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์

1.2.2. ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาปลูกผลึก

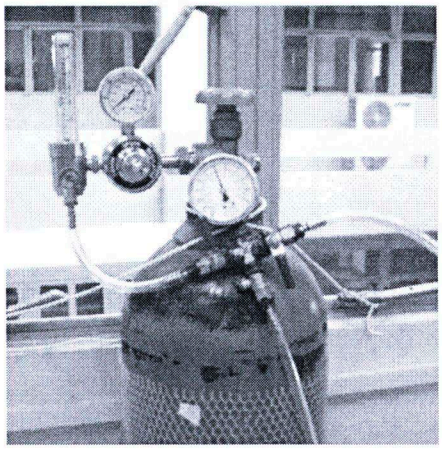
ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณภูมิต่ำมีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) แบบเทอร์โมคับเปิล K – Type อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID temperature controller) และโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay) ขนาด 25A ทำหน้าที่ในการตัดต่อกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงแผนภาพระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาแต่ละโซนที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีจากบริษัท SIGMA รุ่น SFN48 ซึ่งมีฟังก์ชันในการควบคุมอัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในอัตราส่วนขององศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ($^{\circ}$C/hr) โดยที่เตาทั้งสองโซนสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นอิสระจากกัน



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม

1.2.3. ระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซในท่อปลูกผลึก

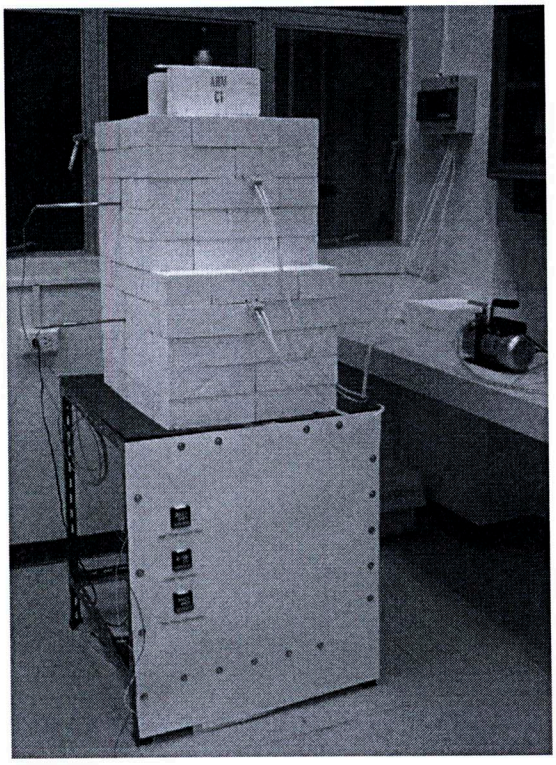
ก่อนทำการปลูกผลึกวัดรังสีจะมีกระบวนการสำหรับกำจัดสารอื่นๆ ที่อาจจะเกิดปฏิกิริยาใดๆ กับผลึกได้ โดยใช้ระบบสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจากภาชนะปลูกผลึก (Crucible) จากนั้นเติมก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย (Inert gas) เข้าสู่ภาชนะปลูกผลึก โดยมีระบบวาวล์ทำหน้าที่เปิด-ปิดสลับสับเปลี่ยนการใช้งานระหว่างระบบสุญญากาศกับระบบควบคุมความดันก๊าซในภาชนะปลูกผลึก สำหรับระบบสูบสุญญากาศในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องสูบแบบโรตารี (Rotary pump) เพื่อสูบอากาศภายในท่อปลูกผลึกออกจนถึงระดับต่ำสุดแล้วจึงเปลี่ยนระบบวาล์วให้เป็นระบบควบคุมความดันก๊าซ โดยใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.99% ที่มีการควบคุมความดันผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ (Pressure regulator) จากนั้นปรับความดันก๊าซอาร์กอนให้มากกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 1 psig เพื่อป้องกันอากาศเข้าสู่ภาชนะปลูกผลึกดังแสดงในรูปที่ 4



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 4 แสดงระบบวาวล์ทำหน้าที่เปิด-ปิดระหว่างระบบดูดสุญญากาศกับระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนภายในท่อ

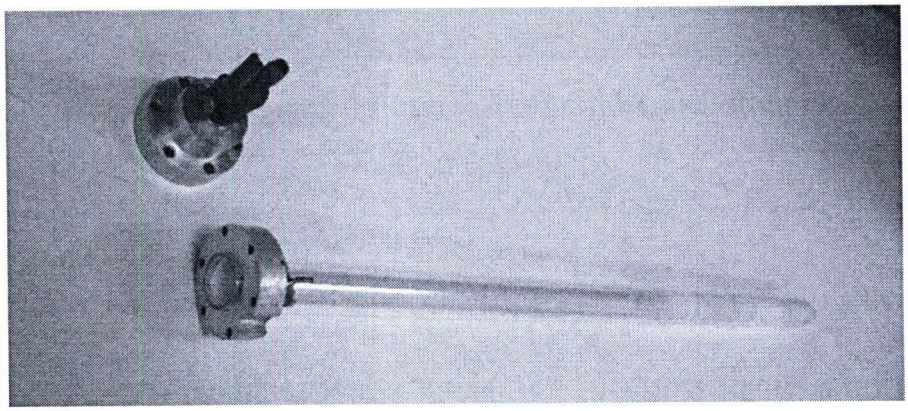
สำหรับโครงสร้างรองรับเตาปลูกผลึกได้ติดตั้งเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์ทั้งหมดบนฐานเหล็กที่มีขนาดพื้นที่ 70 x 70 ตารางเซนติเมตร ที่มีความสูงจากพื้นเพื่อป้องกันความร้อนลงไปยังพื้นดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ได้พัฒนาขึ้น

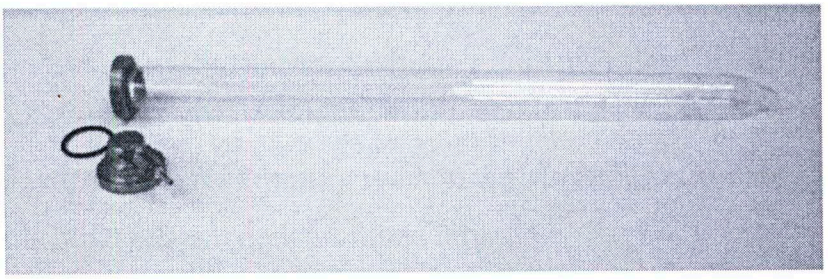
1.3. การออกแบบและสร้างภาชนะปลูกผลึก (crucible)

ภาชนะสำหรับปลูกผลึก CsI(Tl) มีลักษณะรูปทรงกระบอกปลายแหลมที่สามารถทนความร้อนได้สูงและไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับสารที่ทำการปลูกผลึก โดยขั้นตอนการปลูกผลึกจะมีการควบคุมความดันบรรยากาศของการปลูกผลึกอยู่ตลอดเวลา งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างภาชนะสำหรับปลูกผลึกขึ้นให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีปลายแหลม โดยให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 40 นิ้วดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อใช้ในการทดสอบการปลูกผลึก

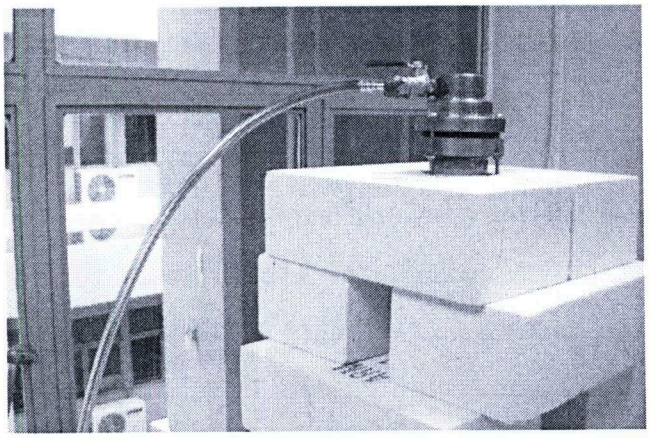


รูปที่ 6 แสดงภาชนะสำหรับปลูกผลึกที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกปลายแหลมโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 40 นิ้ว

นอกจากนี้ยังได้ออกแบบและสร้างภาชนะปลูกผลึกให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 40 นิ้วดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อทำการทดสอบระบบปลูกผลึกที่สร้างขึ้นและทำการทดสอบการปลูกผลึกจริง สำหรับภาชนะสำหรับปลูกผลึกที่ออกแบบขึ้นจะสร้างให้มีความยาว 40 นิ้วเพื่อให้ปลายภาชนะสำหรับปลูกผลึกมีความยาวกว่าด้านบนของเตาปลูกผลึกทำให้อุณหภูมิที่บริเวณปลายภาชนะไม่สูงมากเกินไปเนื่องจากต้องการเชื่อมต่อภาชนะปลูกผลึกกับระบบสูญญากาศผ่านทางข้อต่อทองเหลืองโดยมียางกันรั่ว (O-ring) กั้นเป็นการป้องกันการรั่วไหลของอากาศระหว่างภายในและภายนอกภาชนะปลูกผลึกดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 แสดงภาชนะสำหรับปลูกผลึกที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกปลายแหลมโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 40 นิ้ว



รูปที่ 8 แสดงการเชื่อมต่อภาชนะปลูกผลึกกับระบบสูญญากาศผ่านทางข้อต่อทองเหลืองโดยมียางสำหรับกันรั่ว (O-ring) กั้น

2. การปลูกผลึก CsI(Tl)

2.1. การทดสอบปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว

การทดสอบปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วเป็นการปลูกผลึกเพื่อทำการทดสอบระบบเตาปลูกผลึกที่สร้างขึ้น โดยนำสารตัวอย่างที่ต้องการปลูกผลึกใส่ในภาชนะปลูกผลึกที่ทำจากควอทซ์รูปทรงกระบอกปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว จากนั้นนำใส่ภาชนะปลูกผลึกในเตาปลูกผลึกแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารเพื่อให้สารเกิดการหลอมเหลวผ่านการ

เคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่อัตราการโตของผลึกเท่ากับ 3 mm/hr โดยปรับอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำให้มีแกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ 12°C/mm จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้สารเริ่มก่อตัวเป็นผลึก โดยเมื่ออุณหภูมิที่ทำการปลูกผลึกต่ำกว่าจุดหลอมเหลวสารจึงเริ่มก่อตัวเป็นผลึก โดยเมื่อสารก่อตัวเป็นผลึกทั้งหมดแล้วจึงทำการลดอุณหภูมิและนำผลึกออกจากระบบปลูกผลึก จากนั้นทำการปลูกผลึกซ้ำอีกครั้งเพื่อทดสอบระบบเตาปลูกผลึกโดยใช้เงื่อนไขการปลูกผลึกเช่นเดิม

2.2. การปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบเตาปลูกผลึกสำหรับทำการปลูกผลึกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วเป็นการนำสารตัวอย่างที่ต้องการปลูกผลึกใส่ในภาชนะปลูกผลึกที่ทำจากควอทซ์เป็นทรงกระบอกปลายแหลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว จากนั้นนำไปใส่ไว้ในระบบเตาปลูกผลึกแล้วทำการปลูกผลึกวิธีการเดียวกับการปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว โดยจัดตำแหน่งให้สารอยู่ภายในเตาปลูกผลึกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารเพื่อให้สารเกิดการหลอมเหลว จากนั้นทำการเปลี่ยนอุณหภูมิเพื่อให้สารที่ต้องการปลูกผลึกเริ่มก่อตัวเป็นผลึก

2.3. การปลูกผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว เพื่อหาปริมาณ Tl ที่เหมาะสม

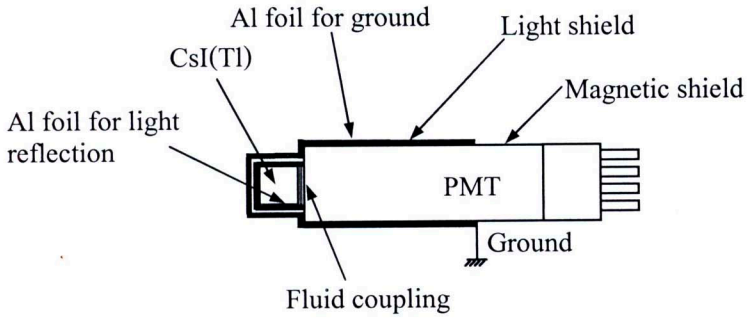
จากการทดสอบระบบเตาปลูกผลึกด้วยการปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว พบว่าระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถปลูกผลึกได้สมบูรณ์ดีไม่เกิดการแตกหักของผลึก ดังนั้นจึงสามารถดำเนินการปลูกผลึกเพื่อหาปริมาณ Tl ที่เหมาะสมสำหรับผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ M. Jitpukdee และคณะ (17) ได้ทำการปลูกผลึก CsI(Tl) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรและ 1 นิ้ว พบว่าหากทำการเจือด้วยปริมาณสาร TlI ที่ 0.3570 wt% และ 0.3602 wt% ตามลำดับ ผลึกจะมีประสิทธิภาพการนับวัดรังสีได้ดีที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยของ G. Ren (18) และงานวิจัยของ L. N. Trefilova (19) พบว่าผลึก CsI(Tl) ที่ได้จะมีประสิทธิภาพการวัดรังสีที่ดีที่สุดเมื่อเจือสาร TlI ด้วยอัตราส่วน 0.2250 wt% และ 0.3822 wt% ตามลำดับ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการปลูกผลึก CsI(Tl) ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยใช้สารประกอบ CsI ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ผสมกับสารเจือ TlI ความบริสุทธิ์ 99.99% โดยใช้สัดส่วนในการเจือตั้งแต่ 0.22 ถึง 0.45 wt%

2.4. การเตรียมผลึกวัดรังสีสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการนับวัดรังสี

ผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกจะอยู่ในรูปทรงกระบอกปลายแหลมตามลักษณะภาชนะปลูกผลึกและมีความยาวประมาณ 5 นิ้ว โดยส่วนกลางของผลึกเป็นส่วนที่นำมาใช้เป็นหัววัดรังสีซึ่งได้จากการตัดบริเวณส่วนบนและส่วนล่างออกทำให้ผลึกที่ได้เป็นรูปทรงกระบอก จากนั้นขัดพื้นผิวให้เกลี้ยงด้วยกระดาษทรายละเอียด

2.5. การประกอบและจัดระบบทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์หัววัดรังสี

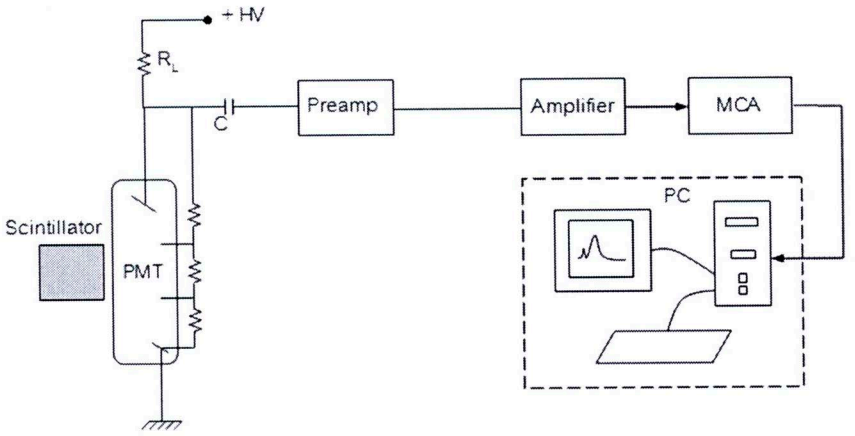
ก่อนนำผลึก CsI(Tl) ไปใช้วัดรังสีจะทำการหุ้มผลึกด้วยเทฟลอน (Teflon) เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงเข้ามายังหัววัดได้ดีขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการรวมแสงที่เรืองจากผลึกเข้าสู่อุปกรณ์ไวแสง การประกอบอุปกรณ์หัววัดรังสีทำได้โดยการเชื่อมต่อผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณแสงด้วย fluid coupling และหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยด์เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงเข้าสู่ผลึกดังแสดงในรูปที่ 9



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 9 แสดงการประกอบอุปกรณ์หัววัดรังสี CsI(Tl)

การจัดระบบประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดรังสีในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบโดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับวัดรังสีระหว่างผลึกวัดรังสีชนิด CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นและผลึกวัดรังสีชนิด NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยนำผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นเชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสงของบริษัท Hamamatsu model 52154-02 และของบริษัท canberra model 802-2X2 ตามลำดับสำหรับระบบนับวัดรังสีประกอบด้วย preamplifier, Amplifer และ Pulse-height analyzer ชนิด multichannel analyzer (MCA) ของบริษัท canberra ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงการจัดระบบทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์วัดรังสีโดยใช้ผลึชนิด CsI(Tl) และผลึกชนิดNaI(Tl)

3. การวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพผลึกวัดรังสี

3.1. การวิเคราะห์คุณภาพของผลึกวัดรังสี

การวิเคราะห์คุณภาพของผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่สร้างขึ้นใช้วิธีการตรวจสอบหาปริมาณสารเจือในผลึก CsI(Tl) ที่เหมาะสมด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF)

3.2. การทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสี

โดยปกติแล้วเครื่องมือทางการแพทย์จะถูกทำการทดสอบเพื่อประกันคุณภาพ (quality assurance) ก่อนนำไปใช้ประโยชน์จริงทางคลินิค โดยเฉพาะการทดสอบแบบ Acceptance test ซึ่งเป็นการตรวจสอบเพื่อประเมินคุณภาพของเครื่องมือก่อนนำไปใช้งานตามมาตรฐานสากลที่กำหนดโดยสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) หรือ National Electrical Manufacturers Association (NEMA) (9-11) ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการตรวจสอบแบบ Acceptance test ของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ตามคำแนะนำของสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) (9) ซึ่งประกอบด้วย

3.3.1 Test of Energy Resolution (% FWHM)

การตรวจสอบความสามารถในการแยกแยะพลังงานงานของผลึกวัดรังสีสำหรับวัดรังสีแกมมานิยมวัดในเทอมของค่าเปอร์เซ็นต์ความกว้างที่ระดับความสูงครึ่งหนึ่งของค่านับวัดสูงสุด (FWHM) ของสเปกตรัมพลังงานรังสี โดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 พลังงาน 662 keV โดยสามารถคำนวณหาค่าความสามารถในการแยกแยะพลังงานรังสีได้ดังสมการ

$$\%\text{FWHM} = \frac{\text{FWHM}}{\text{E}} \text{x} 100$$

เมื่อ E คือค่าพลังงานหรือตำแหน่งกึ่งกลางหน้าต่างในการนับวัดค่าปริมาณรังสี (center-of-window-pulse-height analyzer) โดยค่า %FWHM ที่มีค่าน้อยบ่งบอกถึงผลึกวัดรังสีมีความสามารถในการแยกแยะพลังงานรังสีได้สูง ซึ่งโดยปกติแล้วผลึกวัดรังสีชนิด CsI(Tl) จะมีค่า %FWHM ประมาณ 7-10% อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของผลึก (9) การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสีชนิด CsI(Tl) ที่สร้างขึ้นโดยการหาค่า %FWHM เปรียบเทียบกับผลึกวัดรังสี NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดเท่ากันของบริษัท canberra model 802-2X2 โดยใช้สารกัมมันตรังสีที่มีพลังงานแตกต่างกันประกอบด้วย Cs-137, Co-60 และ I-131 สำหรับทำการทดสอบ

3.3.2 Test of Sensitivity

การตรวจสอบเพื่อหาค่า sensitivity ของผลึกวัดรังสีทำได้โดยการประเมินความสามารถในการนับวัดค่าปริมาณรังสีของผลึกวัดรังสีเมื่อเวลาผ่านไปตามช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ โดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนานถึง 30 ปีทำให้สามารถทำการทดสอบได้โดยสามารถลดผลที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเนื่องจากมีค่าการสลายตัว (decay) เพียงประมาณ 2.3% ต่อปี สำหรับขอบเขตจำกัด (limits of acceptability) ของค่าการนับวัดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ ±3SD โดยค่านับวัดที่ได้จะต้องอยู่ในช่วง 95% ของการนับวัดทั้งหมด ผลึกวัดรังสีจึงจะมี sensitivity ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานได้จริง

3.3.3 Test of Counting Precision (χ^2 test)

การตรวจสอบหาความแม่นยำ (precision) ของผลึกวัดรังสีสามารถหาได้จากการทดสอบโดยทำการนับวัดค่าปริมาณรังสีโดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 ทั้งหมดเป็นจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นทำการประเมินหาค่า χ^2 โดยใช้สมการ

$$\chi^2 = \frac{\sum_i^N (C_i - C_{avg})}{C_{avg}}$$

เมื่อ C_i คือค่านับวัดปริมาณรังสีแต่ละครั้งและ C_{avg} คือค่านับวัดปริมาณรังสีเฉลี่ยจากทั้งหมด 10 ครั้ง ค่า χ^2 ของผลึกวัดรังสีที่ดีควรอยู่ภายใน 95% ของขอบเขตการยอมรับโดยไม่ควรมีค่ามากกว่า 16.92

3.3.4 Test of Linearity of Energy Response

การทดสอบความสามารถในการตอบสนองต่อพลังงานเชิงเส้นของผลึกวัดรังสีทำได้โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีและตำแหน่งกึ่งกลางหน้าต่างในการนับวัดค่าปริมาณรังสี (center-of-window-pulse-height analyzer) โดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐานที่มีช่วงพลังงานแตกต่างกันซึ่งประกอบด้วยสารกัมมันตรังสีชนิด Co-57, Ba-133, I-131, Na-22, Cs-137 และ Co-60 โดยมีพลังงานตั้งแต่ 122, 356, 364, 511, 662 และ 1,332 keV ตามลำดับ เพื่อดูการตอบสนองของผลึกวัดรังสีต่อพลังงานรังสีระดับต่างๆ โดยการตอบสนองต่อพลังงานของผลึกวัดรังสีที่ดีควรมีความเชิงเส้นสูงเพื่อให้สามารถทำการนับวัดปริมาณรังสีที่ระดับพลังงานต่างๆ ที่ใช้กันโดยทั่วไปในทางการแพทย์ได้เป็นอย่างดี

3.3.5 Test of Linearity of Activity Response

การทดสอบเพื่อหาการตอบสนองของผลึกวัดรังสีต่อความแรงรังสีในเชิงเส้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการ Graded sources method ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาค่านับวัดที่ความแรงรังสีระดับต่างๆ โดยการใช้สารกัมมันตรังสีที่เป็นสารละลาย I-131 ที่มีค่าครึ่งชีวิตระดับปานกลางเพื่อหาการ

ตอบสนองของการนับวัดปริมาณรังสีต่อความแรงรังสี โดยการทดสอบทำได้โดยการนำสารละลาย I-131 ที่มีมาทำการปิเปตในหลอดทดลองจำนวน 6 หลอดเพื่อให้ได้ปริมาตร 0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125 และ 0.00625 ml ตามลำดับ จากนั้นผสมให้สารละลายในแต่ละหลอดให้มีปริมาตร 15 ml วิธีการดังกล่าวจะทำให้สารละลาย I-131 มีความแรงรังสีระดับต่างๆ จากนั้นทำการนับวัดค่าปริมาณรังสีและบันทึกค่าเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีและค่าความแรงรังสีที่ระดับต่างๆ จากกราฟที่สร้างขึ้น