ผลการวิจัย (Results)

1. ผลการออกแบบและพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์

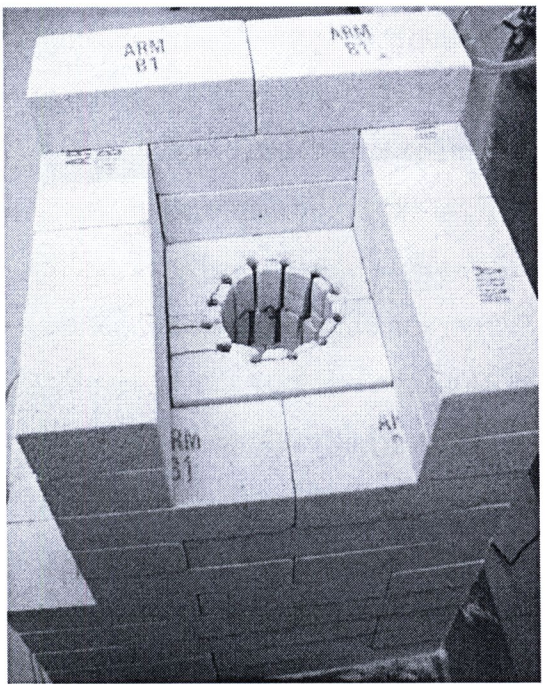
1.1. ผลการทดสอบคุณสมบัติระบบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์

การออกแบบเตาปลูกผลึกให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการปลูกผลึก CsI(Tl) ได้นั้น จำเป็นต้องศึกษาถึงกำลังไฟฟ้าของเตาปลูกผลึก ความเสถียรต่ออุณหภูมิของเตาปลูกผลึก แกรเดียนท์ของอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของระบบเตาปลูกผลึกมีผลต่อการปลูกผลึกค่อนข้างมาก สำหรับขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของเตาปลูกผลึกประกอบด้วยขั้นตอนหลักคือ การเริ่มให้ความร้อนกับระบบ (Start up) การปลูกผลึก(Crystal growth) ผ่านแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสมและการลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้อง (Cool down)

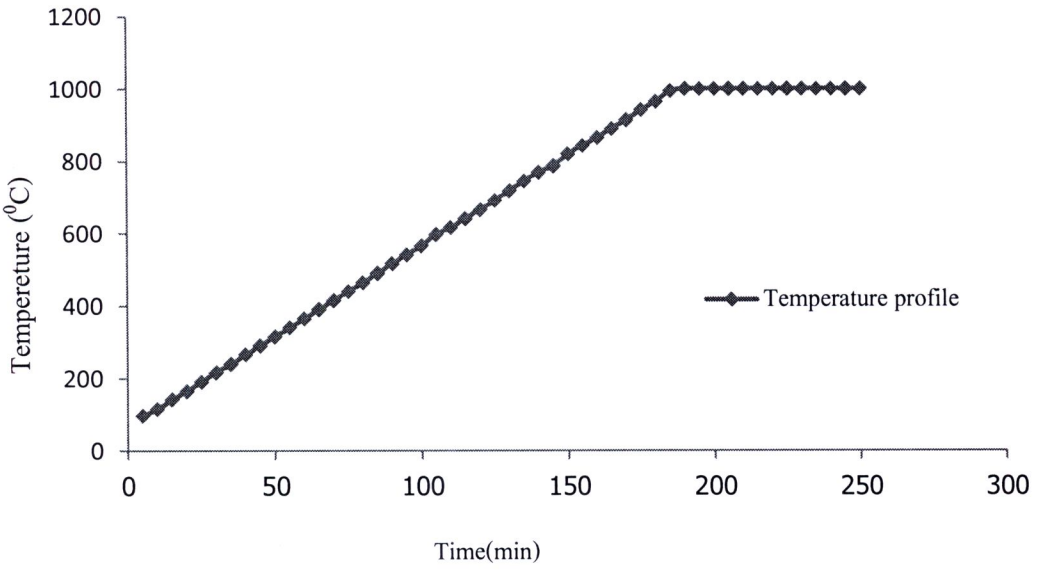
1.1.1 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเตาปลูกผลึก

การทดสอบเพื่อหากำลังที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องที่สามารถนำมาใช้ในการปลูกผลึกได้ นอกจากนี้การออกแบบระบบเตาปลูกผลึกที่ดียังควรคำนึงถึงการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากกระบวนการปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานโดยใช้ระยะเวลาที่มากกว่าร้อยชั่วโมงและต้องการพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง โดยสารประกอบ CsI ที่ใช้เป็นผลึกวัดรังสีมีจุดหลอมเหลว 621°C ดังนั้นระบบเตาปลูกผลึกที่สร้างขึ้นควรสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงมากถึง 1,000 $^{\circ}$C นอกจากนี้ยังควรมีการหุ้มเตาปลูกผลึกด้วยฉนวนเพื่อเป็นการช่วยป้องกันการสูญเสียความร้อนออกนอกเตาดังรูปที่ 11 จากการศึกษาการทดสอบกำลังของเตาสำหรับปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ด้วยการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างกำลังและอุณหภูมิของเตาปลูกโดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตราประมาณ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและตั้งอุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ 1,000°C จากการคำนวณพบว่าขดลวดความร้อนที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเตาปลูกผลึกควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เพื่อสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000 วัตต์ (15)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ขดลวดความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร เพื่อให้เตาปลูกผลึกมีกำลังไฟฟ้าประมาณ 2,000 วัตต์ โดยสามารถปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วได้ จากนั้นทำการทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของเตาปลูกผลึกต่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเตาที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเพิ่มของอุณหภูมิได้ถึง 1,000°C ดังแสดงในรูปที่ 12 ทำให้เตาปลูกผลึกที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นเตาสำหรับปลูกผลึก CsI(Tl) ได้



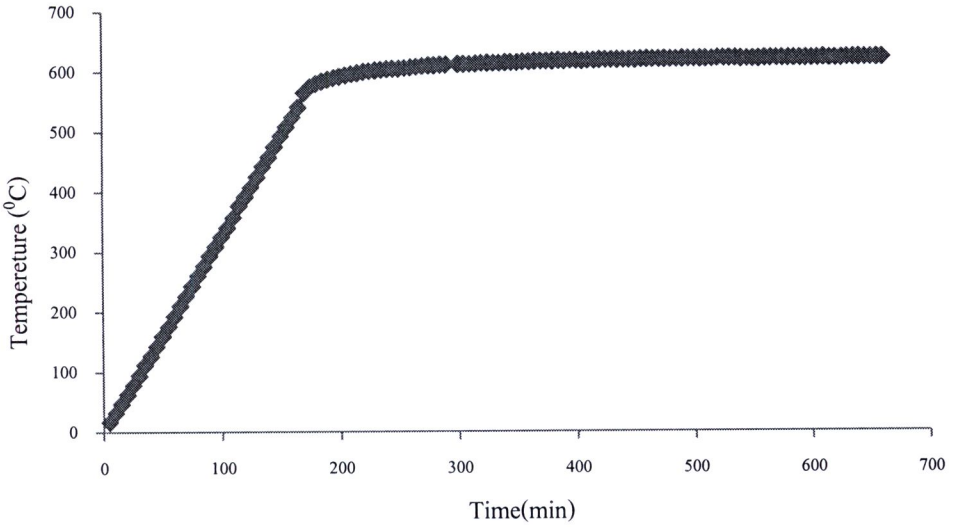
รูปที่ 11 แสดงเตาปลูกผลึกและฉนวนหุ้มเตาปลูกผลึกเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกนอกเตา



รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิสูงของเตาปลูกผลึก

1.1.2 ผลการทดสอบการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก

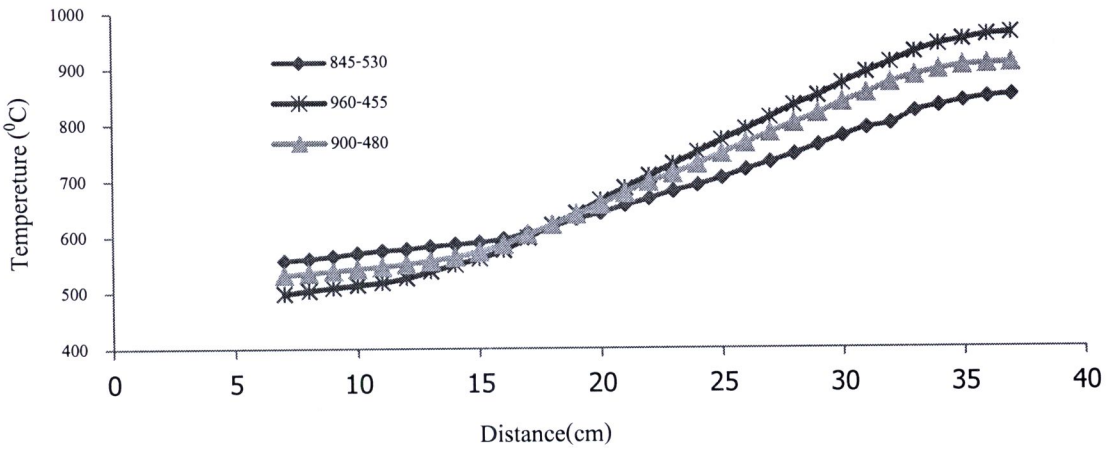
ขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิของทั้งเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำในระบบปลูกผลึกจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการเป็นขั้นตอนแรกในการปลูกผลึก ดังนั้นงานศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงทำการทดสอบเพื่อเพิ่มความร้อนของเตาอุณหภูมิสูงให้มีค่าความร้อนเท่ากับ 900 องศาเซลเซียส และเตาอุณหภูมิต่ำ 480 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มอุณหภูมิในขั้นตอนดังกล่าวเป็นการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เตาปลูกผลึกเกิดการเสียหายอันเนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิที่เร็วจนเกินไปซึ่งเป็นผลให้อิฐทนไฟเกิดการแตกเนื่องจากการที่ความร้อนภายในอิฐทนไฟมีความแตกต่างกันมากกว่าอุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำถึงค่าที่ตั้งไว้ในตอนแรกจะทำให้อุณหภูมิบริเวณเตาทั้งสองคงที่ สำหรับในส่วนของบริเวณโซนปลูกผลึกนั้นอิฐทนไฟจะถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ (Steady state) ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 นาทีและมีความคงที่มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ทั้งนี้หากอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกไม่คงที่จะทำให้ผลึกที่ก่อขึ้นไม่เกิดเป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นผลึกวัดรังสีได้ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิของโซนปลูกผลึกคงที่จะมีค่าประมาณ 8 ชั่วโมงจึงสามารถเริ่มขั้นตอนการปลูกผลึกได้



รูปที่ 13 การปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก

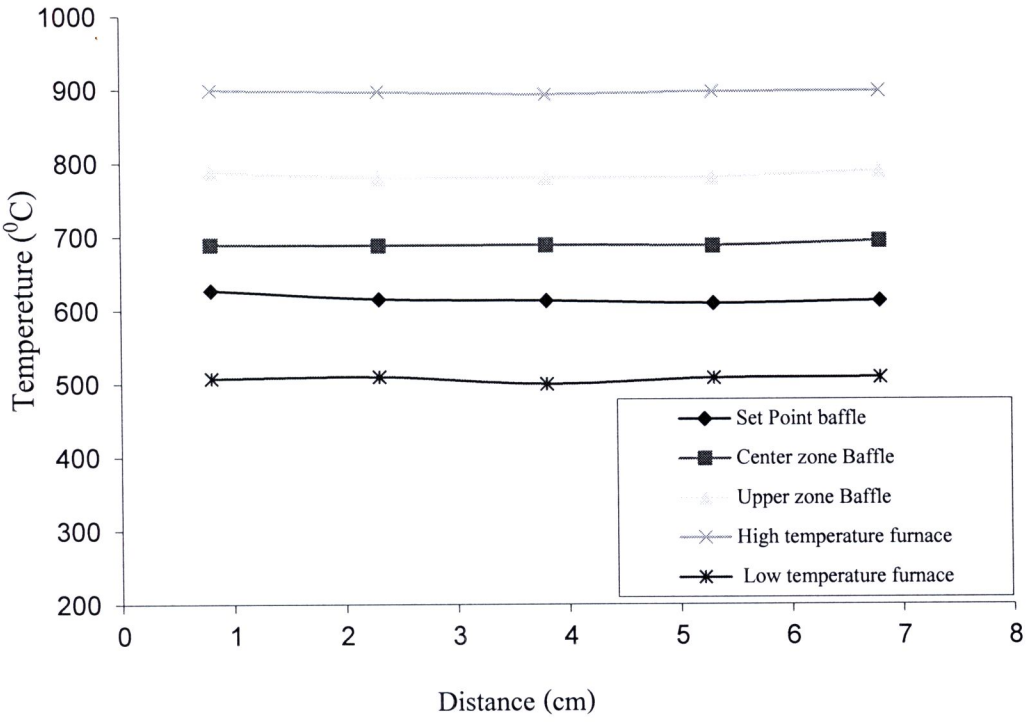
1.1.3 การทดสอบอุณหภูมิภายในเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์

เมื่ออุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกมีความคงที่จึงสามารถเข้าสู่ขั้นตอนการปลูกผลึก สำหรับวิธีปลูกผลึกแบบ Bridgman-Stockbarger แบบดั้งเดิมนั้นจะเป็นการเคลื่อนภาชนะปลูกผลึกผ่านแกรเดียนท์ของอุณหภูมิด้วยความเร็วต่างๆ โดยแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้ผลึกที่ได้สามารถนำใช้ในการวัดรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งค่าแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและความเร็วในการเคลื่อนที่ภาชนะปลูกผลึกจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของภาชนะปลูกผลึกจะมีค่าประมาณ 0.5–5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่แกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 10–50 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการเคลื่อนที่กับแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะเป็นอัตราการลดอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกซึ่งมีค่าระหว่าง 1–25 $^{\circ}$C/hr จากผลดังกล่าวการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงได้นำหลักการของอัตราการลดอุณหภูมิมาปรับปรุงระบบการปลูกผลึกโดยทำการลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมๆ กัน ดังนั้นเพื่อให้ได้แกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ใช้สำหรับปลูกผลึก โดยตั้งค่าอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำมีค่าตั้งแต่ 845-960 และ 455-530 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อให้ได้แกรเดียนท์ของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 10-30 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของเตาในแต่ละครั้งจะต้องรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะการคงที่ของอุณหภูมิก่อนจึงสามารถทำการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ของอุณหภูมิที่บริเวณโซนปลูกผลึกแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงไฟล์ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกที่แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ 10-30 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร

สำหรับการปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่นั้นบริเวณโซนปลูกผลึกจึงควรมีขนาดที่กว้างมากพอ ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการออกแบบให้บริเวณโซนปลูกผลึกมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว พร้อมทั้งทำการตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตามแนวตัดขวางของทั้งเตาอุณหภูมิสูง เตาอุณหภูมิต่ำและโซนปลูกผลึก โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตามแนวตัดขวางที่บริเวณกึ่งกลางของเตาหลอมทั้งสองเตาทั้งหมด 5 ตำแหน่ง โดยจุดกึ่งกลางของแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 1.5 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่บริเวณตำแหน่ง set point ของโซนปลูกผลึกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นการปลูกผลึกรวมทั้งทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางและบริเวณขอบบนของโซนปลูกผลึกเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดแนวตัดขวางของโซนปลูกผลึกดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงการทดสอบหาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตามแนวตัดขวางของเตาอุณหภูมิสูง เตาอุณหภูมิต่ำและโซนปลูกผลึก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2. ผลการปลูกผลึก CsI(Tl)

2.1. ผลการทดสอบการปลูกผลึกด้วยการใช้สาร CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% และเจือด้วยสาร TlI ความบริสุทธิ์ 99.99%

สารเคมีที่ใช้สำหรับการปลูกผลึกเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ประกอบด้วยสาร CsI ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 621°C ในขณะที่สาร TlI มีจุดหลอมเหลว 440°C ดังนั้นการออกแบบท่อปลูกผลึกจึงควรเป็นระบบปิด สำหรับกระบวนการปลูกผลึกครั้งนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์ (Bridgman-Stockbarger) ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนกับสารจนกระทั่งเกิดการหลอมเหลวภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบ CsI และ TlI เนื่องจากที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยได้ทำการปลูกผลึก CsI(Tl) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว 22 มิลลิเมตรได้สำเร็จ โดยทำการปรับปรุงกระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์ให้เป็นแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Moving-temperature gradient) (16, 17) ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงใช้กระบวนการปลูกผลึกดังกล่าว โดยพัฒนาให้สามารถปลูกผลึก CsI(Tl) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้วได้ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบระบบปลูกผลึกโดยการใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถหาได้ในประเทศไทยในขณะที่ยังคงมีสมรรถนะเพียงพอในการปลูกผลึกได้เป็นอย่างดี

กระบวนการปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถป้องกันการสั่นสะเทือนขณะทำการปลูกผลึกได้ เนื่องจากไม่ใช้วิธีการเคลื่อนภาชนะปลูกผลึกหรือมีการเคลื่อนเตาปลูกผลึกเหมือนกับระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์แบบดั้งเดิม (Conventional Bridgman-Stockbarger) โดยขณะปลูกผลึกของระบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะเป็นการใช้วิธีการควบคุมให้มีการลดอุณหภูมิของทั้งเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำไปพร้อมๆ กันและมีอัตราการลดอุณหภูมิเท่ากัน ทำให้เปรียบเสมือนเกิดการเคลื่อนที่แกรเดียนท์ของอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่และมีการลดลงอย่างช้าๆ วิธีดังกล่าวทำให้สามารถปรับแกรเดียนท์ของอุณหภูมิให้มีค่าได้ตั้งแต่ 5-30°C/hr สำหรับอัตราการโตของผลึก (Growth rate) จากกระบวนการปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิกับค่าแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ โดยอัตราการโตของผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

จากสมการดังกล่าวทำให้ทราบว่าอัตราการโตของผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและขนาดของแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ โดยที่อัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและแกรเดียนท์ของอุณหภูมิสามารถปรับเปลี่ยนได้จากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

กระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์สามารถแบ่งช่วงของการปลูกผลึกได้เป็น 3 ช่วงคือช่วงสารเกิดการหลอมเหลว (Charge melting) การก่อผลึก (Solidification) และการลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้อง (Crystal cool down) โดยในแต่ละช่วงจะใช้เวลาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของผลึกที่ทำการปลูก ในระบบปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิสามารถควบคุมช่วงดังกล่าวได้จากการควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากฟังก์ชันของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิซึ่งทำให้สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลา (Ramp rate) ได้อย่างแม่นยำ

2.1.1. ผลการทดสอบการปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว

ในการศึกษาวิจัยเพื่อการปลูกผลึกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ซึ่งเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบระบบปลูกผลึกด้วยการปลูกผลึกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว จากนั้นจึงทำการทดสอบระบบปลูกผลึกด้วยการปลูกผลึกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว โดยมีขั้นตอนการปลูกผลึกประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักประกอบด้วย

2.1.1.1. การเริ่มให้ความร้อนกับระบบ (Start up)

ขั้นตอนแรกของการปลูกผลึกเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการ โดยการเพิ่มอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมกันอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เตาปลูกผลึกเกิดการเสียหายเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราที่เร็วเกินไป โดยการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียสสำหรับเตาอุณหภูมิสูงจะใช้ระยะเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ในขณะที่เตาอุณหภูมิต่ำใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับเตาอุณภูมิสูงแต่เพิ่มอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากับ 540 องศาเซลเซียสซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 3 ชั่วโมง การปรับอุณหภูมิด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้บริเวณโซนปลูกผลึกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่เท่ากันด้วย โดยที่เมื่ออุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำถึงค่าที่ตั้งไว้ บริเวณเตาทั้งสองจะมีอุณหภูมิคงที่ในขณะที่บริเวณโซนปลูกผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเนื่องไปอีกระยะเนื่องจากอิฐทนไฟที่ใช้ทำเป็นเตาจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ (Steady state) เนื่องจากหากอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกไม่คงที่จะทำให้ผลึกที่ก่อขึ้นไม่เกิดเป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นผลึกวัดรังสีได้ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิของโซนปลูกผลึกคงที่จะมีค่าประมาณ 6-8 ชั่วโมง จึงสามารถเริ่มขั้นตอนการปลูกผลึกได้

2.1.1.2. การปลูกผลึกผ่านแกร์เดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสม

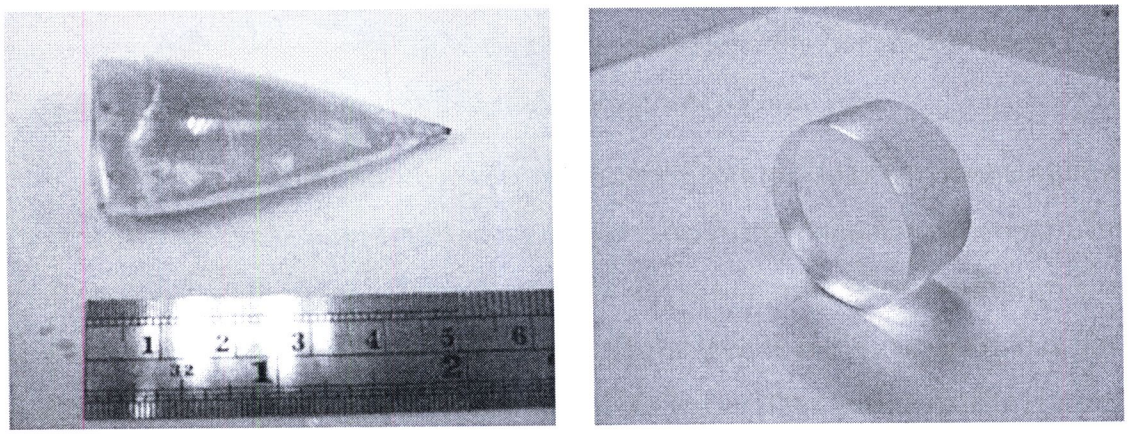
ขั้นตอนการปลูกผลึกจะเริ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกมีความคงที่ โดยวิธีการปลูกผลึกแบบ Bridgman-Stockbarger ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ดังนั้นค่าแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลึกที่สามารถใช้วัดรังสีได้ดี จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ดีจะมีค่าประมาณ 0.5–5 mm/hr และแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 10–50 $^{\circ}$C/cm จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ทราบว่าอัตราการลด

อุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกอยู่ระหว่าง 1–25 $^{\circ}$C/hr การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมๆ กันด้วยอัตราเร็วของการลดอุณหภูมิ 3 mm/hr โดยมีแกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ 12 $^{\circ}$C/cm

2.1.1.3. การลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้อง (Cool down)

การลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้องจะเป็นการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลึกที่ยังมีความร้อนสูง โดยขณะที่ทำการลดอุณหภูมิลงจะเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในผลึกทำให้มีการเรียงตัวเป็นระบบมากขึ้น หากทำการลดอุณหภูมิที่เร็วจนเกินไปอาจส่งผลให้ผลึกเกิดการแตกเสียหายได้ โดยทั่วไปแล้วการลดอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกที่มีอุณหภูมิสูงลงสู่อุณหภูมิห้องใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามยังขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยเช่นกัน การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 30 mm/hr และรอจนกระทั่งอิฐทนไฟภายในระบบปลูกผลึกเกิดการถ่ายเทความร้อนกับภายนอกจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ผลการปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วจากสารประกอบ CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% และ TlI ความบริสุทธิ์ 99.99% โดยใช้ปริมาณสาร Tl เท่ากับ 0.22%wt ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนทำให้ได้ผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วดังภาพที่ 16 พบว่าผลึกที่ได้มีความใสและสมบูรณ์ รวมทั้งไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึก จากนั้นจึงทำการปลูกผลึกซ้ำเพื่อทดสอบระบบปลูกผลึกอีกครั้งภายใต้สภาวะเช่นเดียวกันพบว่าผลึก CsI(Tl) ที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับผลึกที่ได้ทำการทดสอบครั้งแรก



รูปที่16 แสดงผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วที่ได้จากการทดสอบระบบปลูกผลึก

2.1.2. การทดสอบการปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว

จากการทดสอบระบบปลูกผลึกด้วยการปลูกผลึก CsI(Tl) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว พบว่าผลึกที่ได้ไม่เกิดการแตกหักหรือผิดรูป ดังนั้นจึงทำการทดสอบการปลูกผลึกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานสำหรับหัววัดรังสีในเครื่อง thyroid uptake ที่ใช้ทางการแพทย์โดยใช้ขั้นตอนการปลูกผลึกประกอบทั้ง 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกับที่ใช้สำหรับปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้วได้แก่

2.1.2.1. การเริ่มให้ความร้อนกับระบบ (Start up)

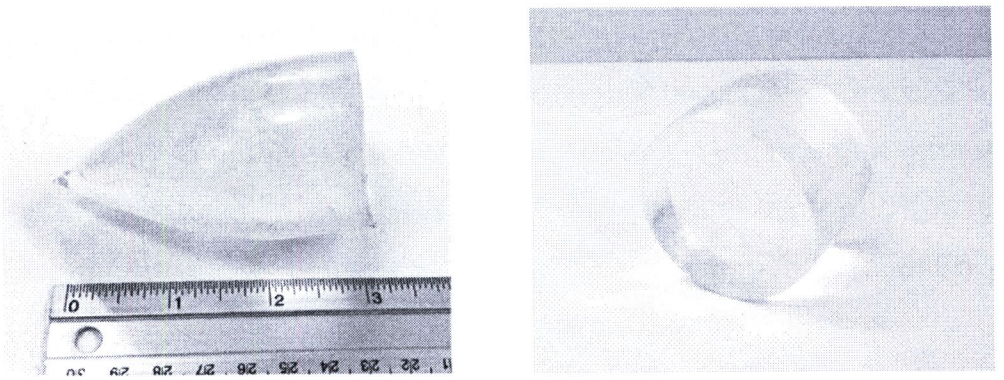
การเริ่มให้ความร้อนกับระบบเตาปลูกผลึกใช้วิธีการเพิ่มอุณหภูมิของระบบเตาปลูกผลึกโดยเพิ่มอุณหภูมิทั้งที่เตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมกันอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียสที่เตาอุณหภูมิสูงซึ่งใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงและถึงอุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียสที่เตาอุณหภูมิต่ำซึ่งใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง การปรับอุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้บริเวณโซนปลูกผลึกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำถึงค่าที่ตั้งไว้แล้วอุณหภูมิบริเวณเตาทั้งสองจะคงที่ในขณะที่บริเวณโซนปลูกผลึกนั้นอิฐทนไฟจะถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ ระยะเวลาที่ทำให้อุณหภูมิของโซนปลูกผลึกคงที่ใช้เวลาประมาณ 6-8 ชั่วโมง

2.1.2.2. การปลูกผลึก (Crystal growth) ผ่านแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสม

การปลูกผลึกด้วยวิธีการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมๆ กันด้วยอัตราเร็วของการลดอุณหภูมิ 3 mm/hr และแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ 12 $^{\circ}$C/cm เช่นเดียวกับการปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว

2.1.2.3 การลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้อง (Cool down)

ในขั้นตอนการลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้องใช้วิธีการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตรา 30 mm/hr และรอจนกระทั่งอิฐทนไฟภายในระบบปลูกผลึกเกิดการถ่ายเทความร้อนกับภายนอกจนเท่ากับอุณหภูมิห้องซึ่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ผลการปลูกผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วจากสาร CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% และ TlI ความบริสุทธิ์ 99.99% โดยใช้ปริมาณสาร Tl เท่ากับ 0.22 %wt ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนทำให้ได้ผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วแสดงดังรูปที่ 17 โดยผลึกที่ได้ทั้งหมดมีความใสและสมบูรณ์ ไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึกเช่นเดียวกันกับผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว



รูปที่ 17 แสดงผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วที่ได้จากการทดสอบระบบปลูกผลึก

2.2. การทดลองปลูกผลึก CsI(Tl) เพื่อหาปริมาณ Tl ที่เหมาะสม

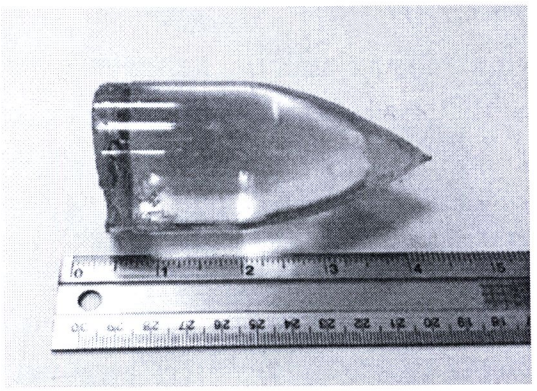
การปลูกผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว จากสารประกอบ CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% ผสมกับสารเจือ TlI ความบริสุทธิ์ 99.99% จำนวน 3 ผลึกโดยใช้ปริมาณ CsI น้ำหนักประมาณ 500 กรัมเท่ากันทุกผลึก จากนั้นทำการปลูกผลึกโดยใส่สารเจือลงภาชนะปลูกผลึกจากการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของ TlI ให้มีน้ำหนัก 1.112, 1.659 และ 2.248 กรัมเพื่อให้ได้สัดส่วนสารเจือ 0.22, 0.33 และ 0.45 wt% ตามลำดับ การเตรียมปริมาณสารตัวอย่างในการปลูกผลึกแสดงดังตารางที่ 1 เมื่อใส่สารเจือเรียบร้อยแล้วภายในภาชนะปลูกผลึกจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศโดยใช้ระบบดูดอากาศและเติมก๊าซอาร์กอนลงไปในภาชนะดังกล่าวเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาใดๆ เกิดขึ้นกับผลึกขณะทำการปลูกผลึก สำหรับวิธีการปลูกผลึกเป็นการปลูกผลึกด้วยระบบการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่มีอัตราการโตของผลึกเท่ากับ 3 mm/hr โดยมีแกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ 12°C/mm จากผลการปลูกผลึกที่ได้พบว่าผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วมีความใสและสมบูรณ์ ตลอดจนไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึก จากนั้นผลึกทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารเจือ TlI ที่เหมาะสมสำหรับการนับวัดที่ให้ค่าการแจกแจงพลังงานสูงสุด

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลการเตรียมสารสำหรับปลูกผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วเพื่อหาปริมาณ Tl ที่เหมาะสม

ตัวอย่าง	น้ำหนักของ CsI (g)	น้ำหนักของ TlI (g)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Tl (%)
M001	500.325	1.112	0.2224
M002	500.154	1.659	0.3318
M003	500.613	2.248	0.4490

2.3. การเตรียมผลึกวัดรังสีสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการนับวัดรังสี

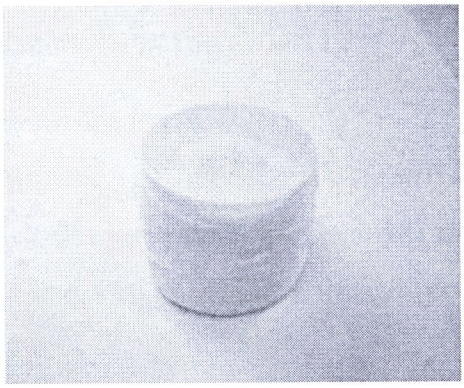
ผลึกวัดรังสีที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกปลายแหลมตามลักษณะของภาชนะปลูกผลึกดังแสดงในรูปที่ 18 โดยการศึกษาวิจัยครั้งนี้ต้องการปลูกผลึกให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้วซึ่งเกิดจากการตัดผลึกให้เป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดตามต้องการจากนั้นทำการขัดผิวให้เกลี้ยงทั้งด้านบนและด้านล่างของผลึกด้วยกระดาษทรายชนิดละเอียดเพื่อนำไปประกอบเป็นหัววัดรังสีต่อไป



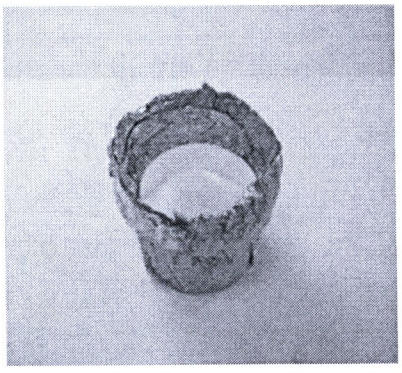
รูปที่ 18 แสดงผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วรูปทรงกระบอกปลายแหลมตามลักษณะภาชนะปลูกผลึก

2.4. การประกอบและจัดระบบทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์หัววัดรังสี

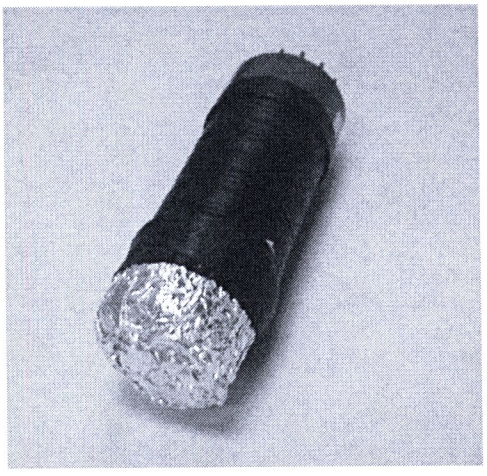
ผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วยาว 2 นิ้วจะถูกหุ้มด้วยเทฟลอน (Teflon) ดังแสดงในรูปที่ 19 เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงเข้ามายังหัววัดได้ดีขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการรวมแสงที่เรืองจากผลึกเข้าสู่อุปกรณ์ไวแสงและจากนั้นหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยด์อีกชั้นเพื่อกันแสงจากภายนอกเข้าสู่ผลึกและยังสามารถทำให้เกิดการสะท้อนแสงเข้ามายังหัววัดได้ดีดังแสดงในรูปที่ 20 หลังจากนั้นทำการประกอบอุปกรณ์หัววัดรังสีโดยการเชื่อมต่อผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณแสงด้วย fluid coupling จำพวกมิเนอร์รอลออยล์ (Mineral oil) และหุ้มหลอดทวีคูณแสงด้วยเทปกาวให้สนิทเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 19 แสดงตัวอย่างผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วหุ้มด้วยเทฟลอน



รูปที่ 20 แสดงการหุ้มผลึก CsI(Tl) ด้วยอลูมิเนียมฟอยด์



รูปที่ 21 แสดงการประกอบอุปกรณ์หัววัดรังสีโดยการเชื่อมต่อผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณแสง

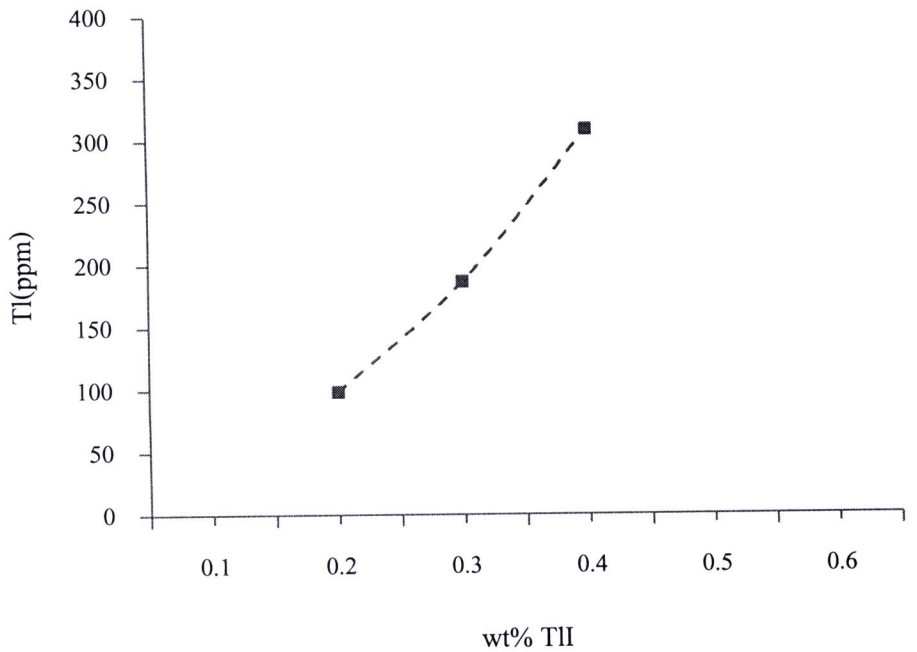
3. ผลการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพผลึกวัดรังสี

3.1. การวิเคราะห์คุณภาพของผลึกวัดรังสี

การวิเคราะห์คุณภาพของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นโดยการตัดผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกในแนวตัดขวางเพื่อนำไปตรวจสอบหาปริมาณสารเจือในผลึกด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) เพื่อหาปริมาณสารเจือในผลึก CsI(Tl) ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึกวัดรังสีแสดงในตารางที่ 2 และแสดงในรูปที่ 22

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการตรวจหาปริมาณสารเจือในผลึกด้วยเครื่อง XRF

ตัวอย่าง	ปริมาณสารเจือ TlI (wt%) ที่ใส่	ปริมาณสารเจือ Tl ในผลึก (ppm)
M001	0.2224	99
M002	0.3318	187
M003	0.4490	309



รูปที่ 22 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการตรวจหาปริมาณสารเจือในผลึกด้วยเครื่อง XRF

3.2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสี

การทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีการตรวจสอบแบบ Acceptance test ของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ตามคำแนะนำของสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) (9-11) ซึ่งประกอบด้วย

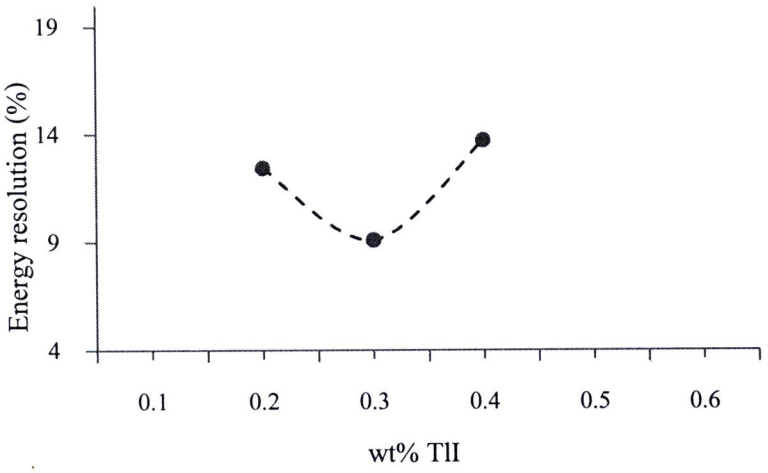
3.3.1 Test of Energy Resolution (% FWHM)

การทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของต้นกำเนิดรังสีตามมาตรฐานของการทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึกเรืองรังสีจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปริมาณสารเจือ TlI ในผลึกเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการวัดรังสีที่เหมาะสมโดยใช้ปริมาณสารเจือระหว่าง 0.2224 ถึง 0.4490 wt% ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV และทำการทดสอบเปรียบเทียบความสูงพัลส์ที่ปริมาณสารเจือขนาดต่างๆ จากนั้นทำการสร้างสเปกตรัมพลังงานรังสีเพื่อหาความสามารถในการแจงแจงพลังงานโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีชนิด I-131, Cs-137 และ Co-60 ที่มีพลังงาน 364, 662 และ 1,332 keV ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นกับผลึก NaI(Tl) ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีขนาดเท่ากันกับผลึก CsI(Tl) ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV

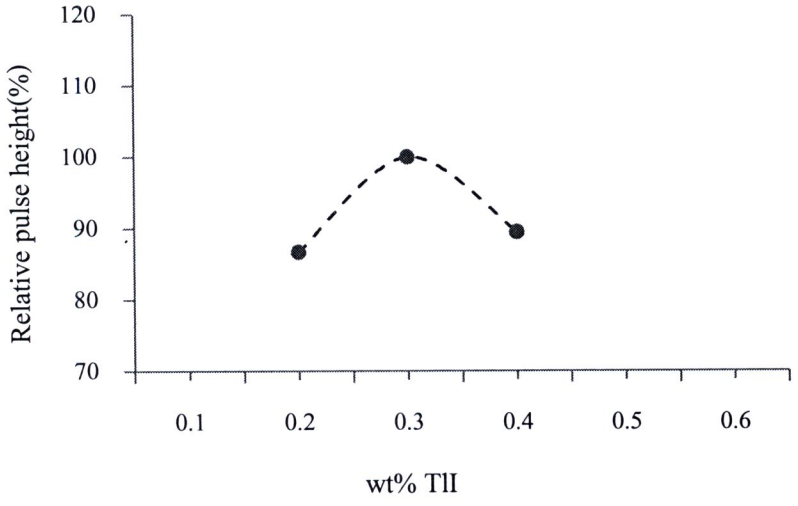
ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการแจกแจงพลังงานและความสูงพัลส์จากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พลังงาน 662 keV

ตัวอย่าง	ปริมาณสารเจือ TlI (wt%)	ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (%)	การเปรียบเทียบความสูงพัลส์ (%)
M001	0.2224	12.45	86.67
M002	0.3318	9.11	100
M003	0.4490	13.74	89.45

ผลการศึกษาเพื่อหาปริมาณสารเจือ TlI ในผลึกที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความสามารถในการแจกแจงพลังงานและความสูงของพัลส์ของแต่ละผลึกซึ่งใช้ปริมาณสารเจือในผลึกระหว่าง 0.2224 ถึง 0.4490 wt% แสดงดังรูปที่ 23 และ 24 ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าผลึกที่ได้จากการใช้ปริมาณสารเจือปริมาณต่างๆ ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานและความสูงของพัลส์ดีที่สุดเมื่อทำการเจือด้วยสาร TlI ในปริมาณ 0.3318wt% เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์การแจกแจงพลังงานต่ำสุด ในขณะที่มีความสูงของพัลส์สูงที่สุด

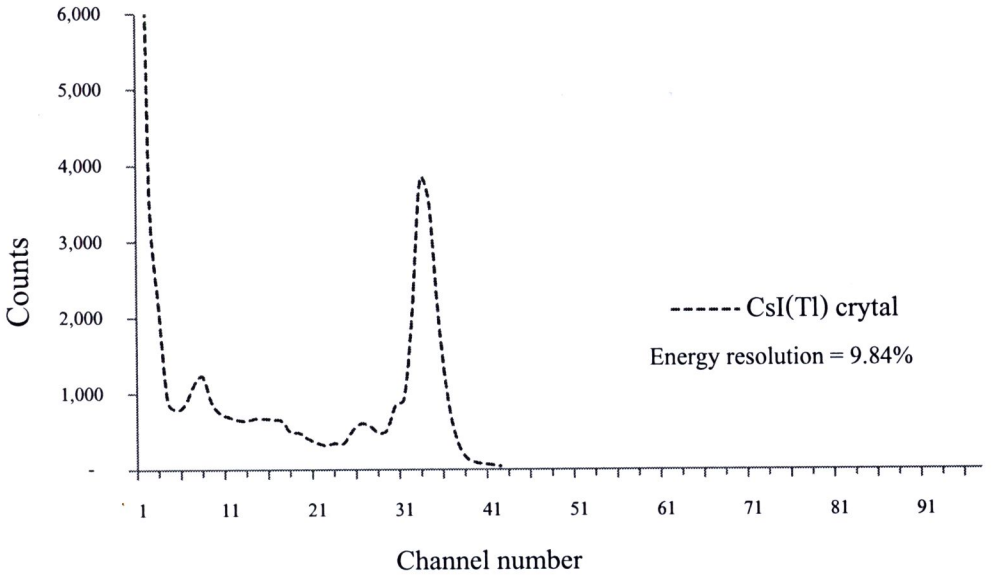


รูปที่ 23 แสดงความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พลังงาน 662 keV

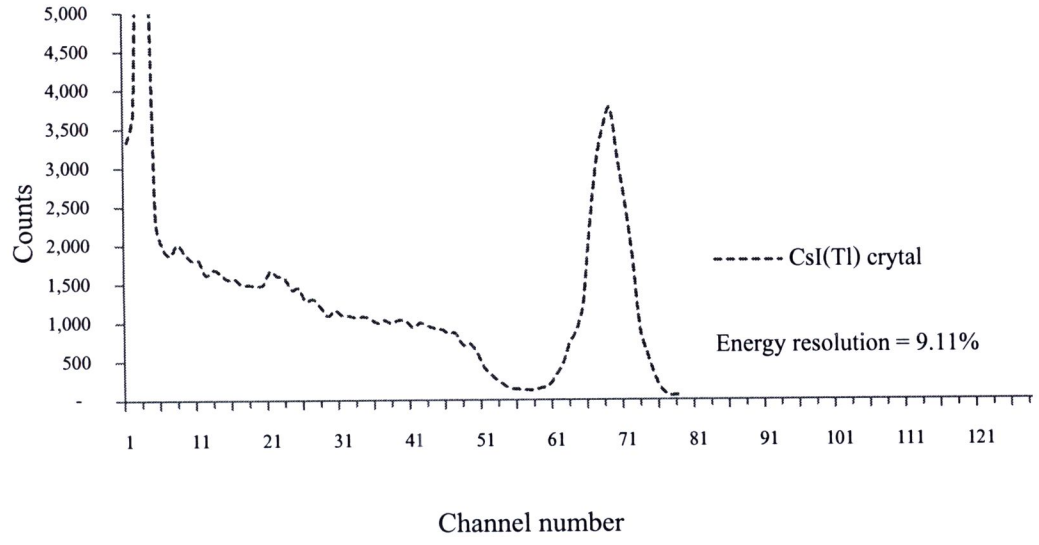


รูปที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบความสูงพัลส์ของผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พลังงาน 662 keV

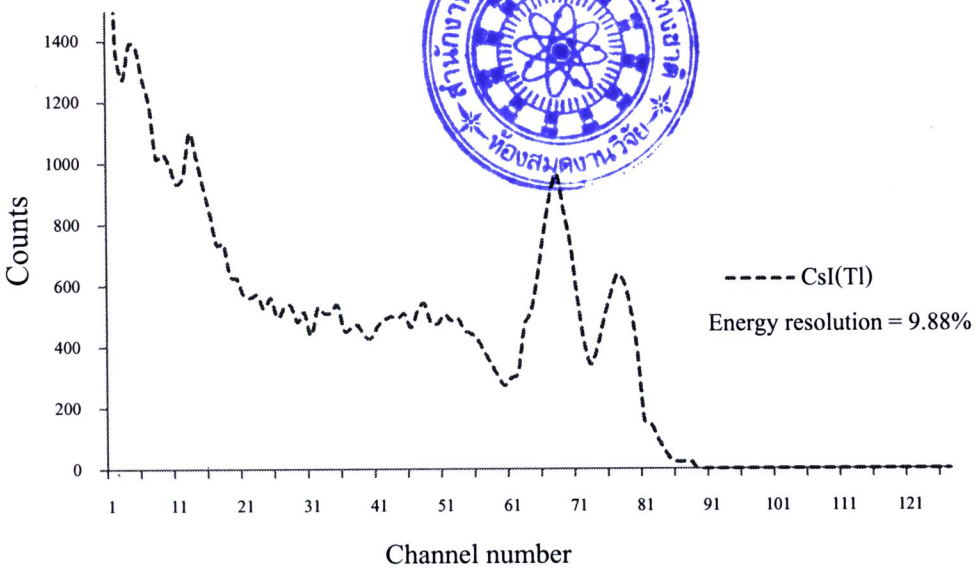
สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นโดยการสร้างสเปกตรัมพลังงานรังสีเพื่อหาความสามารถในการแจงแจงพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีชนิด I-131, Cs-137 และ Co-60 โดยใช้ผลึกวัดรังสีที่เจือด้วยสารเจือ TlI ในปริมาณ 0.3318 wt% มีค่าเท่ากับ 9.84%, 9.11% และ 9.88% ดังแสดงดังรูปที่ 25, 26 และ 27 ตามลำดับ



รูปที่ 25 แสดงความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วจากต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 364 keV

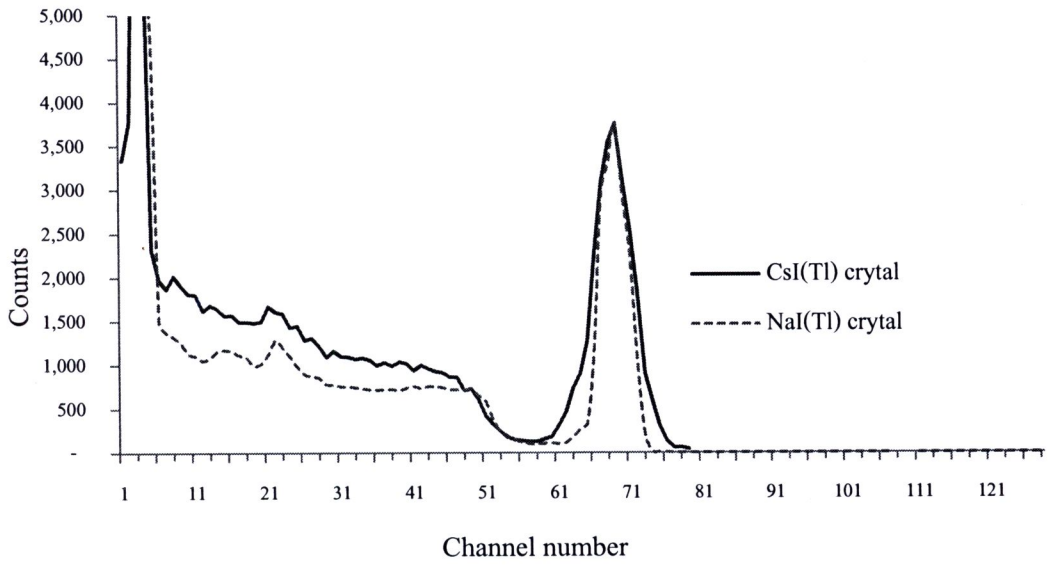


รูปที่ 26 แสดงความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พลังงาน 662 keV



รูปที่ 27 แสดงความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Co-60 พลังงาน 1.17 และ 1.332 MeV

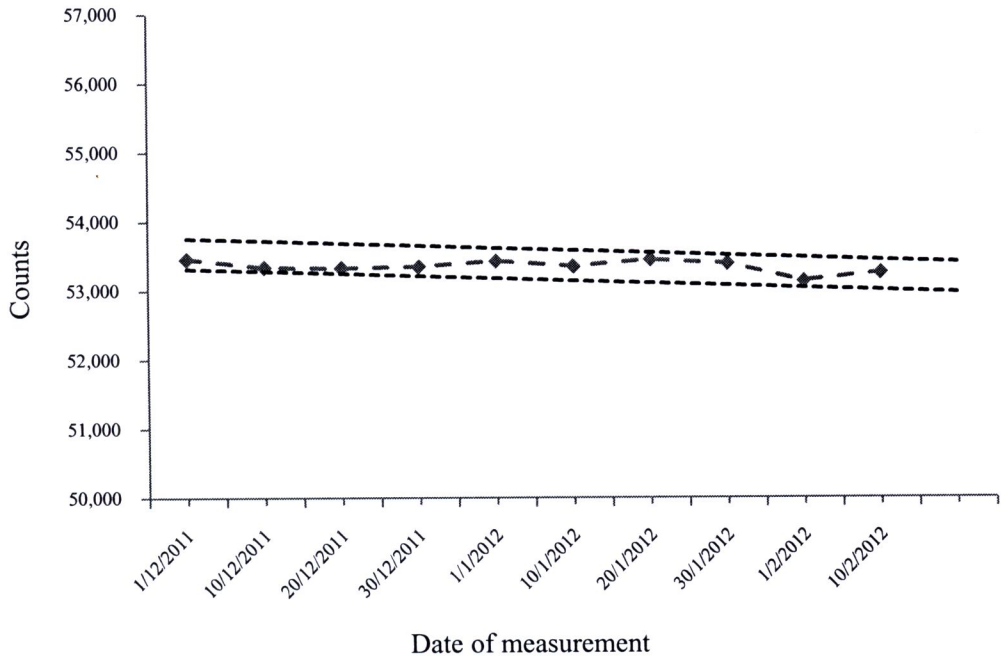
สำหรับการเปรียบเทียบความสามารถการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นกับผลึก NaI(Tl) ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดเท่ากัน โดยได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 ที่มีพลังงาน 662 keV แสดงดังรูปที่ 28 พบว่าให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 9.11% และ 8.29% สำหรับผลึก CsI(Tl) และผลึก NaI(Tl) ตามลำดับ



รูปที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดรังสีของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นกับผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

3.3.2. Test of Sensitivity

การตรวจสอบ sensitivity ของผลึกวัดรังสีโดยการประเมินความสามารถในการนับวัดค่าปริมาณรังสีที่ช่วงระยะเวลาต่างๆ เป็นระยะเวลาประมาณ 3 เดือนโดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 30 ปี พบว่าผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมีค่าการนับวัดทั้งหมดอยู่ในช่วง ±3SD ตลอดระยะเวลา 3 เดือนซึ่งแสดงถึงผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมี sensitivity ที่ดีดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 แสดงการผลการตรวจสอบ sensitivity ของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นโดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137

3.3.3. Test of Counting Precision (χ^2 test)

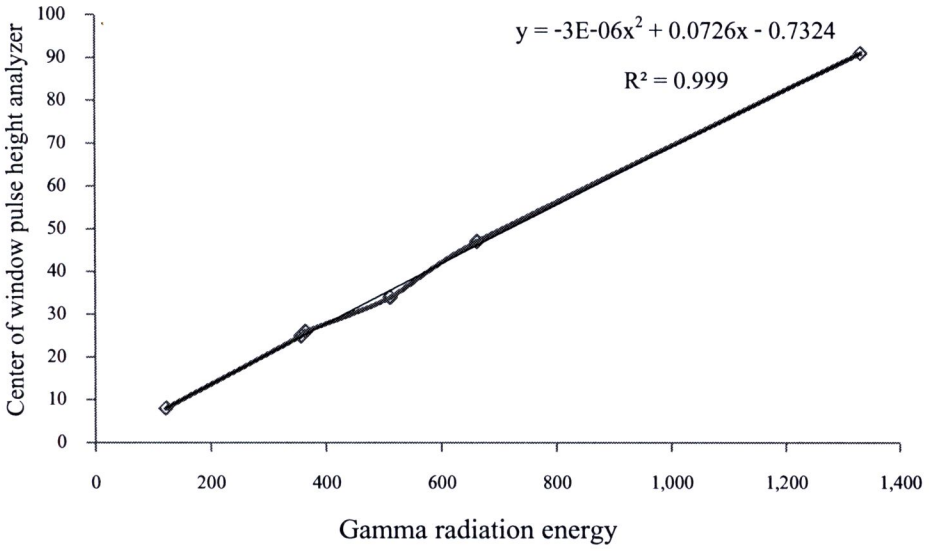
ผลการตรวจสอบหาความแม่นยำของการนับวัดค่าปริมาณรังสี (counting precision) ของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยการทดสอบการนับวัดค่าปริมาณรังสีจากสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 จำนวน 10 ครั้ง พบว่ามีค่านับวัดเฉลี่ยเท่ากับ 12,260 count และมีค่า χ^2 เท่ากับ 4.82 ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยค่า χ^2 ของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมีค่าอยู่ภายใน 95% ของขอบเขตการยอมรับซึ่งมีค่า 16.92

ตารางที่ 4 แสดงค่าการนับวัดโดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 เพื่อทำการประเมินหาค่า χ^2

Number (i)	Count (C_i)	(C_i - C_{avg})	(C_i- C_{avg})^2
1	12,282	22	471
2	12,260	0	0
3	12,313	53	2,777
4	12,277	17	279
5	12,109	-151	22,892
6	12,360	100	9,940
7	12,299	39	1,498
8	12,124	-136	18,578
9	12,267	7	0
10	12,312	52	2,673
ΣC_i	122,603	χ^2	**4.82**
C_{avg}	12,260		

3.3.4. Test of Linearity of Energy Response

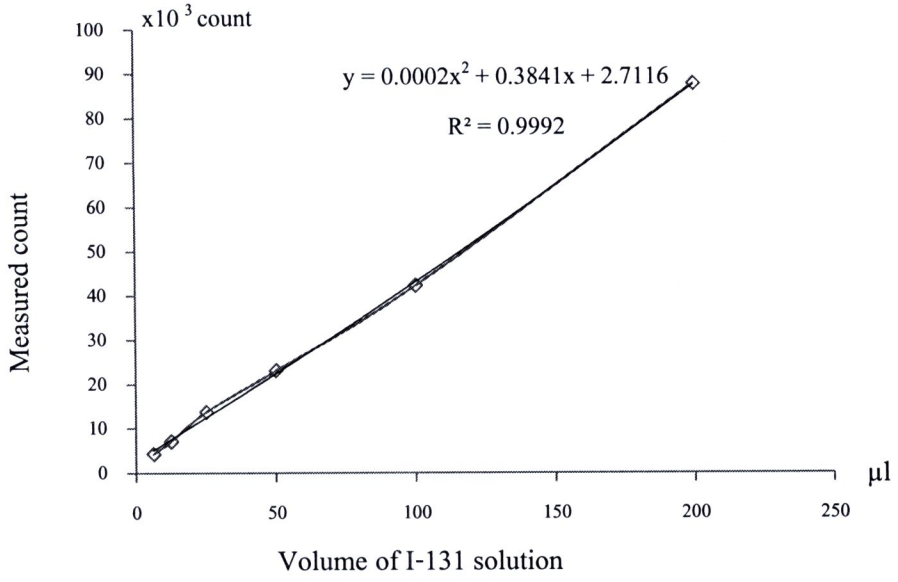
ผลการทดสอบความสามารถของผลึกวัดรังสีในการตอบสนองเชิงเส้นต่อพลังงาน จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรังสีและตำแหน่งกึ่งกลางหน้าต่างในการนับวัดค่าปริมาณรังสี (center-of-window-pulse-height analyzer) ที่ได้จากการนับวัดโดยใช้สารกัมมันตรังสีที่ประกอบด้วย Co-57, Ba-133, I-131, Na-22, Cs-137 และ Co-60 ที่มีพลังงานเท่ากับ 122, 356, 364, 511, 662 และ 1,332 keV ตามลำดับ ผลการตอบสนองต่อพลังงานของผลึกวัดรังสีที่ได้มีความเชิงเส้นที่ดีดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 แสดงการผลการตอบสนองเชิงเส้นต่อพลังงานรังสีของหัววัดรังสี CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้น

3.3.5. Test of Linearity of Activity Response

การทดสอบเพื่อหาการตอบสนองของผลึกวัดรังสีต่อความแรงรังสีเชิงเส้นของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการ Graded sources method โดยการใช้สารกัมมันตรังสี I-131 เพื่อหาการตอบสนองของการนับวัดปริมาณรังสีต่อความแรงรังสี โดยได้ทำการทดสอบด้วยการนำ I-131 ในรูปของสารละลายมาทำการปิเปตจำนวน 6 หลอดเพื่อให้มีปริมาตร 0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.0125 และ 0.00625 ml ตามลำดับ จากนั้นผสมสารละลายให้มีปริมาตร 15 ml เท่ากันทุกหลอด เมื่อทำการวัดค่าปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสี I-131 ปริมาตรต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีและค่าความแรงรังสีที่ระดับต่างๆ มีความเป็นเชิงเส้นดีดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 แสดงการผลการตอบสนองเชิงเส้นของค่าการวัดปริมาณรังสีต่อความแรงรังสีหัววัดรังสี CsI(Tl) ที่ได้พัฒนาขึ้น