อภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

1. ผลการออกแบบและพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สตอกบาร์เจอร์

ระบบเตาปลูกผลึกที่มีความเหมาะสมสำหรับการปลูกผลึก CsI(Tl) ที่ดีนั้นจะต้องผ่านการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเตาปลูกผลึก การทดสอบความเสถียรต่ออุณหภูมิของเตาปลูกผลึก การทดสอบแกรเดียนท์ของอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของเตาปลูกผลึกมีผลต่อคุณภาพของการปลูกผลึก จากการทดสอบหากำลังของระบบเตาปลูกผลึกเพื่อให้สามารถทำการปลูกผลึกให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 และ 2 นิ้ว โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าการใช้ขดลวดความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรสามารถให้กำลังไฟฟ้าได้ถึง 2,000 วัตต์ โดยเตาปลูกผลึกที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเพิ่มของอุณหภูมิได้ถึง 1,000^{o}C ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเตาสำหรับปลูกผลึก CsI(Tl) ได้เนื่องจากสามารถทำอุณหภูมิได้สูงว่าจุดหลอมเหลวของสาร CsI

ผลการทดสอบการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของทั้งเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำในระบบปลูกผลึกจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการพร้อมกัน โดยทดสอบการให้ความร้อนของเตาอุณหภูมิสูงเท่ากับ 900 องศาเซลเซียสและเตาอุณหภูมิต่ำ 480 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเตาทั้งสองถึงค่าที่กำหนดไว้แล้วอุณหภูมิบริเวณเตาทั้งสองจะคงที่ในขณะที่บริเวณโซนปลูกผลึกนั้นอุณหภูมิจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลจากอิฐทนไฟเริ่มเกิดการถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อให้การปลูกผลึกมีประสิทธิภาพสูงสุดควรทิ้งระยะเวลาก่อนการปลูกผลึกให้อุณหภูมิคงที่ก่อน เนื่องจากหากอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึกไม่คงที่จะทำให้ผลึกที่ก่อขึ้นไม่เกิดเป็นผลึกเดี่ยวทำให้ไม่สามารถใช้เป็นผลึกวัดรังสีได้ โดยพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับเริ่มขั้นตอนการปลูกผลึกได้มีค่าประมาณ 8 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบขั้นตอนการปลูกผลึกแบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นวิธีที่ไม่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะทำการปลูกผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เจอร์แบบดั้งเดิม โดยขณะปลูกผลึกด้วยระบบเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะเป็นการใช้วิธีการควบคุมการลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำไปพร้อมๆ กันและมีอัตราการลดอุณหภูมิเท่ากัน ทำให้เปรียบเสมือนเกิดการเคลื่อนที่ของแกรเดียนท์ของอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่และมีการลดลงอย่างช้าๆ สำหรับการทดสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตามแนวตัดขวางของทั้งเตาอุณหภูมิสูง เตาอุณหภูมิต่ำและโซนปลูกผลึกพบว่ามีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีตลอดทั้งแนวตัดขวางของเตาปลูกผลึก

2. ผลการปลูกผลึก CsI(Tl)

2.1.1. การทดสอบการปลูกผลึกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 และ 2 นิ้ว

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการปลูกผลึกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว เพื่อทดสอบการปลูกผลึกด้วยเตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงทำการทดสอบด้วยการปลูกผลึกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว โดยมีขั้นตอนการปลูกผลึกประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักประกอบด้วย การเริ่มให้ความร้อนกับระบบซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการโดยการเพิ่มอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำ พร้อมกันอย่างช้าๆ โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่กำหนดคือ 960 องศาเซลเซียสสำหรับเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำได้ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับเตาอุณภูมิสูงแต่เพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 540 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำถึงจุดที่ตั้งไว้แล้วอุณหภูมิบริเวณเตาทั้งสองจะคงที่ในขณะที่บริเวณโซนปลูกผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเนื่องไปอีก โดยระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิของโซนปลูกผลึกคงที่จะมีค่าประมาณ 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการปลูกผลึกโดยลดอุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูงและเตาอุณหภูมิต่ำพร้อมๆ กันด้วยอัตราเร็วของการลดอุณหภูมิ 3 mm/hr โดยมีแกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ 12 ^{o}C/cm หลังจากทำการปลูกผลึกเสร็จจึงทำการลดอุณหภูมิของผลึกสู่อุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลึกที่ยังมีความร้อนสูง ซึ่งใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 30 mm/hr และรอจนกระทั่งอิฐทนไฟภายในระบบปลูกผลึกเกิดการถ่ายเทความร้อนกับภายนอกจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ผลการปลูกผลึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วพบว่าผลึกที่ได้มีความใสและสมบูรณ์รวมทั้งไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึก จากนั้นจึงได้ทำการปลูกผลึกซ้ำเพื่อทดสอบระบบปลูกผลึกภายใต้สภาวะเดิม พบว่าผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้วที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลึกที่ได้ทำการทดสอบครั้งแรก จากนั้นทำการทดสอบการปลูกผลึกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว จำนวน 2 ผลึกพบว่าผลึกที่ได้มีความใสและสมบูรณ์ ไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งผลึกเช่นเดียวกันกับผลึกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว

2.2. การทดลองปลูกผลึก CsI(Tl) เพื่อหาปริมาณ Tl ที่เหมาะสม

การปลูกผลึก CsI(Tl) ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว จากสารประกอบ CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% ผสมกับสารเจือ TlI ความบริสุทธิ์ 99.99% จำนวน 3 ผลึกโดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนสารเจือตั้งแต่ 0.22, 0.33 และ 0.45 wt% ตามลำดับ โดยใช้วิธีการเคลื่อนแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่มีอัตราการโตของผลึก 3 mm/hr กำหนดให้เตาอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียสและเตาอุณหภูมิต่ำมี 540 องศาเซลเซียส ทำให้ได้แกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ 12^{o}C/mm จากผลการปลูกผลึกที่ได้พบว่าทุกผลึกมีความใสและสมบูรณ์ ไม่เกิดการผิดรูปหรือบิดเบี้ยวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอด

ทั้งผลึก จากนั้นนำผลึกมาตัดให้เป็นรูปทรงกระบอกและขัดผลึกที่ได้ด้วยกระดาษทรายและหุ้มด้วยเทฟลอนเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงเข้ามายังหัววัดได้ดีขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการรวมแสงที่เรืองจากผลึกเข้าสู่อุปกรณ์ไวแสง จากนั้นทำการประกอบอุปกรณ์หัววัดรังสีโดยการเชื่อมต่อผลึก CsI(Tl) กับหลอดทวีคูณแสงด้วย fluid coupling ด้วยมิเนอร์รอลออยล์ (Mineral oil) และหุ้มหลอดทวีคูณแสงด้วยเทปกาวให้สนิทเพื่อป้องกันแสงจากภายนอก

3. ผลการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพผลึกหัววัดรังสี

การทดสอบประสิทธิภาพของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้การตรวจสอบมาตรฐานของเครื่องมือทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ด้วยวิธีการ Acceptance test ตามคำแนะนำของสำนักงานทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) (9-11) ผลการทดสอบความสามารถในการแยกแยะพลังงานของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาปริมาณสารเจือ TlI ในผลึกที่เหมาะสมโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พบว่าผลึกที่ได้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานและความสูงของพัลส์ดีที่สุดเมื่อทำการเจือด้วยสาร TlI ในปริมาณ 0.3318wt% ผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของมานิตย์ จิตรภักดีและคณะ (16) ซึ่งได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของผลึกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร โดยให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานและความสูงของพัลส์ดีที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสารเจือ TlI ปริมาณ 0.3570% เมื่อนำผลึกดังกล่าวมาทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานจากต้นกำเนิดรังสี I-131, Cs-137 และ Co-60 พบว่าความสามารถในการแจงแจงพลังงานเท่ากับ 9.84%, 9.11% และ 9.88% ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นกับผลึก NaI(Tl) ที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน Cs-137 พบว่าผลึก CsI(Tl)ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานเท่ากับ 9.11% ในขณะที่ผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ดีกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 8.29% สำหรับการตรวจสอบ sensitivity ของผลึกวัดรังสีโดยการประเมินความสามารถในการนับวัดค่าปริมาณรังสีเป็นช่วงระยะเวลาประมาณ 3 เดือนโดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 พบว่าผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมีค่าการนับวัดทั้งหมดอยู่ในช่วง ±3SD ซึ่งแสดงถึงผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นมี sensitivity ที่ดี อย่างไรก็ตามการทดสอบผลึกที่ได้ควรมีระยะเวลาที่นานขึ้นเพื่อที่จะสามารถทำการประเมิน sensitivity ของผลึกในระยะยาวได้ สำหรับผลการตรวจสอบหาความแม่นยำของการนับวัดค่าปริมาณรังสีของผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นโดยการทดสอบการนับวัดค่าปริมาณรังสีจากสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน Cs-137 พบว่ามีค่า χ^2 เท่ากับ 4.82 โดยค่าดังกล่าวอยู่ภายใน 95% ของขอบเขตการยอมรับ

ผลการทดสอบความสามารถของผลึกวัดรังสีในการตอบสนองเชิงเส้นต่อพลังงานจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรังสีและตำแหน่งกึ่งกลางหน้าต่างในการนับวัดค่าปริมาณรังสีโดยใช้สารกัมมันตรังสี Co-57, Ba-133, I-131, Na-22, Cs-137 และ Co-60 ที่มีพลังงานเท่ากับ 122, 356, 364,

511, 662 และ 1,332 keV ตามลำดับ พบว่าผลการตอบสนองต่อพลังงานของผลึกวัดรังสีที่ได้มีความเชิงเส้นดี สำหรับในกรณีการทดสอบเพื่อหาการตอบสนองของผลึกวัดรังสีต่อความแรงรังสีในเชิงเส้นของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการ Graded sources method โดยการใช้สารกัมมันตรังสี I-131 เพื่อหาการตอบสนองของการนับวัดปริมาณรังสีต่อความแรงรังสี ผลการทดสอบพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านับวัดรังสีและค่าความแรงรังสีที่ระดับต่างๆ มีความเป็นเชิงเส้นดี สำหรับการเปรียบเทียบคุณสมบัติของผลึกเรืองรังสีและผลการทดสอบหัววัดรังสีชนิดผลึก CsI(Tl) จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ กับหัววัดรังสีมาตรฐานชนิดผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์สรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดผลึก CsI(Tl) กับหัววัดรังสีมาตรฐานชนิดผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

การทดสอบหัววัดรังสี	ผลึก CsI(Tl)	ผลึก NaI(Tl)
ขนาด (mm^3)	∅ 50x50	∅ 51x51
ปริมาณสารเจือ (wt%)	0.3318	N.A.
Energy resolution (%)	9.11	8.29
Sensitivity	±3SD	±3SD
Counting precision (χ^2 test)	<95% confidence limits	<95% confidence limits
Linearity of energy response	ตอบสนองเชิงเส้นดี	ตอบสนองเชิงเส้นดี
Linearity of activity response	ตอบสนองเชิงเส้นดี	ตอบสนองเชิงเส้นดี
ราคา	ต่ำ	สูง
กระบวนการปลูกผลึก	ง่าย	ซับซ้อน
ความชื้น	ไม่ส่งผลต่อผลึก	ไวต่อความชื้น