



## ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซินทิลเลชัน GAGG:Ce สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา Energy Resolution of the GAGG:Ce Scintillation Crystal for Gamma-ray Detection

อัคคพงศ์ พันธุ์พฤษ<sup>1,2\*</sup> วรณัฐ ทองพูล<sup>1,2</sup> และ ศราวุธ ใจเย็น<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยฟิสิกส์วัสดุและเครื่องมือวัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

\*Corresponding Author, E-mail: akapong\_p@rmutt.ac.th

Received: 25 January 2018 | Revised: 31 October 2018 | Accepted: 22 January 2019

### บทคัดย่อ

ผลึกซินทิลเลชัน GAGG:Ce เป็นผลึกชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันเนื่องจากถูกพัฒนาให้เปล่งแสงเข้ม มีความหนาแน่นสูง ไม่ดูดความชื้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นหัววัดรังสีในเครื่องวินิจฉัยทางการแพทย์และงานวิจัยฟิสิกส์พลังงานสูง ในงานนี้เราได้ทดสอบคุณสมบัติค่าแยกชัดพลังงานของผลึกในงานตรวจวัดรังสีแกมมา โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลึก BGO ซึ่งเป็นผลึกชนิดเก่า ผลึกทั้งสองถูกทดสอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาตั้งแต่พลังงาน 31 keV จนถึง 1,408 keV พบว่าที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce มีค่า 7.11% ซึ่งดีกว่าของผลึก BGO คือ 9.28% และค่าyieldแสงของ GAGG:Ce มีค่าเท่ากับ 41,300 ph/MeV ซึ่งมากกว่าของผลึก BGO ประมาณ 5 เท่า จากการทดสอบยังพบว่าค่าแยกชัดพลังงานที่ได้ของผลึกทั้งสองสัมพันธ์กับแยกชัดในตัวของผลึกและความไม่เป็นสัดส่วนของyieldแสงอย่างเห็นได้ชัด จากความมีประสิทธิภาพในหลายๆ ด้าน ผลึก GAGG:Ce จึงมีโอกาสนำมาใช้แทนผลึกชนิดเก่าโดยเฉพาะในงานสร้างภาพทางการแพทย์และงานวิจัยฟิสิกส์พลังงานสูง

### ABSTRACT

The GAGG:Ce is a new scintillation crystal which is getting the attention of scientists now because this crystal was developed to be very high light yield, high density, and non-hygroscopic crystal, which is suitable for use in medical diagnostics and research in high energy physics. In this work, we tested the energy resolution property of the crystal for gamma-ray detection comparing with the classical one, the BGO crystal. Both crystals are tested with gamma ray sources ranging from 31 keV to 1,408 keV. At 662 keV energy from the Cs-137 radioactive source, the energy resolution of the GAGG:Ce crystal is 7.11%, which is better than 9.28% obtained from the BGO crystal. The light yield of the GAGG:Ce crystal is 41,300 ph/MeV which more than that of the BGO crystal about 5 times. From the experiment result, the energy resolution of both crystals strongly relates to their intrinsic resolution and light yield non-proportionality. Since the GAGG:Ce crystal possesses many good properties, it has a high potential to replace old crystals, especially in medical imaging and high energy physics research.

**คำสำคัญ:** ค่าแยกชัดพลังงาน ยิลด์แสง ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง GAGG:Ce BGO

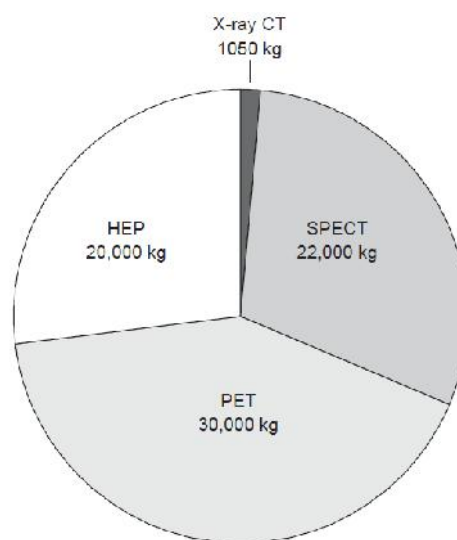
**Keywords:** Energy resolution, Light yield, Light yield non-proportionality, GAGG:Ce, BGO

## บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุตรวจวัดรังสีได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการทางด้านการแพทย์ โดยเฉพาะด้านการสร้างภาพจากรังสี เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการวินิจฉัยโรคที่สำคัญต่อชีวิตมนุษย์ การวินิจฉัยถ้าเกิดความผิดพลาดหรือล่าช้าเนื่องจากความไม่มีประสิทธิภาพหรือความไม่เพียงพอของเครื่องมือก็จะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสีย การวินิจฉัยโรคหากจะทำให้เกิดประสิทธิภาพ บุคลากรผู้ทำการวินิจฉัยต้องมีความชำนาญและจำเป็นต้องมีเครื่องมือวินิจฉัยที่มีประสิทธิภาพสูงสุด วัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวตรวจวัดรังสีในเครื่องมือวินิจฉัยทางการแพทย์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในปัจจุบันก็คือ ผลึกซินทิลเลชัน (Scintillation Crystals) ผลึกชนิดนี้สามารถเปลี่ยนรังสีพลังงานสูงที่มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นให้กลายเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ ได้มีการปลูกและพัฒนาผลึกขึ้นมามากมายหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย (Melcher, 2005) โดยเฉพาะด้านการสร้างภาพจากรังสีทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นหัววัดรังสีในเครื่อง PET (Positron Emission Tomography), X-ray CT (X-ray Computed Tomography) และ SPECT (Single-photon Emission Computed Tomography) ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 1 มีการใช้ในเครื่อง PET ถึงประมาณ 30 ตัน ใช้ในเครื่อง SPECT ประมาณ 22 ตัน และใช้ในเครื่อง X-ray CT ประมาณ 10 ตัน ปัจจุบันปริมาณการใช้งานในแต่ละด้านยิ่งสูงขึ้นหลายเท่าตัว มีงานวิจัยหลายงานที่ได้กล่าวถึงการพัฒนาผลึกซินทิลเลชันสำหรับงานตรวจวัดทางรังสี โดยเฉพาะวิธีแกมมา-มาสเปกโตรเมตรี (Gamma Spectrometry) เช่น งานวิจัยของ van Eijk (2001) Moszynski (2003) และเมื่อเร็ว ๆ นี้ก็คือ Lecoq et al. (2006)

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยสนใจที่จะทำการศึกษาคูณสมบัติของผลึกซินทิลเลชันชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีแกมมา โดยได้เลือกผลึกกาโดลิเนียมอลูมิเนียมกัลเลียมกาเนต (Gadolinium Aluminum Gallium Garnet,  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ ) ที่ถูกเจือด้วยธาตุซีเรียม GAGG:Ce เนื่องจากเป็นผลึกที่นักวิทยาศาสตร์กำลังให้ความสนใจกันมากที่สุด เพราะมีข้อได้เปรียบผลึกอื่นอยู่หลายประการ เช่น เปล่งแสงเข้มมาก มี

ความหนาแน่นสูง เลขอะตอมยังผลมีค่ามาก ไม่ดูดความชื้น จึงเป็นผลึกที่เหมาะสมที่จะนำมาแทนผลึกอื่นเก่า โดยจะนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับผลึกบิสมัทเจอร์แมนเนท (Bismuth Germanate,  $Bi_4Ge_3O_{12}$ , BGO) ซึ่งเป็นผลึกที่ปัจจุบันใช้เป็นหัววัดรังสีอยู่ในเครื่อง PET มีคุณสมบัติที่ดีคือ มีความหนาแน่นสูง เลขอะตอมยังผลมีค่ามาก ไม่ดูดความชื้น แต่ปริมาณแสงที่เปล่งออกมาค่อนข้างน้อย



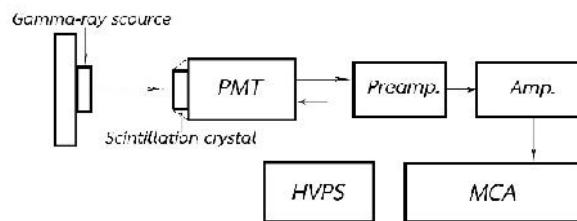
**รูปที่ 1** จำนวนของผลึกซินทิลเลชันที่ถูกใช้งานในปี ค.ศ. 2003 สำหรับเครื่อง PET SPECT และ X-ray CT (Melcher, 2005)

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติซินทิลเลชันที่สำคัญอันหนึ่ง นั่นคือ ค่าแยกชัดพลังงาน (Energy Resolution,  $\Delta E/E$ ) หรือความสามารถในการแยกแยะพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัดและระบบวัด จะทำการทดสอบกับรังสีแกมมาตั้งแต่พลังงานต่ำไปจนถึงพลังงานสูง

## วิธีการดำเนินการวิจัย

นำผลึกแต่ละชิ้นมาเชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube, PMT) กล่าวคือ ผลึก GAGG:Ce ขนาด  $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$  มีความเข้มข้นของสารเจือซีเรียม 1 mol% ปลูกด้วยวิธี Czochralski ที่ผลิตโดยบริษัท Furukawa ประเทศญี่ปุ่น และผลึก BGO ขนาด  $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$  ปลูกด้วยวิธี Bridgman ที่ผลิตโดยบริษัท Kinheng Crystal Material

(Shanghai) ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน หลอดทวิคูณแสงที่ใช้เป็นรุ่น XP5200B PMT โดยใช้ซิลิคอนไนท์ช่วยในการเชื่อมต่อ ซิลิคอนจะช่วยประสานดัชนีหักเหของผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวิคูณแสงที่เป็นแก้ว เพื่อให้แสงที่เปล่งจากผลึกเข้าสู่หลอดทวิคูณแสงได้มากที่สุด ผลึกต้องถูกพันด้วยเทปขาว (White Teflon Tape) ทั้งหมด 5 ด้าน เหลือด้านล่างไว้เชื่อมต่อกับหน้าต่างของหลอดทวิคูณแสง เทปขาวจะช่วยสะท้อนแสงที่เปล่งออกมาจากผลึกให้เข้าสู่หลอดทวิคูณแสงได้มากยิ่งขึ้น และต้องคลุมส่วนบนทั้งหมดด้วยเทปดำอีกหลายชั้นเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้าไปรบกวนในหลอดทวิคูณแสง เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2 นำแหล่งกำเนิดรังสีแต่ละชนิดมาวางไว้หน้าผลึกซึ่งได้แก่ Am-241 Ba-133 Eu-152 Na-22 Cs-137 และ Co-60 มีพลังงานตั้งแต่ 31 keV จนถึง 1,408 keV เมื่อโฟตอนรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดตกกระทบผลึก ผลึกจะเปลี่ยนโฟตอนรังสีแกมมาให้กลายเป็นโฟตอนแสง โฟตอนแสงเหล่านี้จะเข้าสู่หลอดทวิคูณแสง และตกกระทบขั้วโฟโตแคโทด (Photocathode) ในหลอดทวิคูณแสง อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากขั้ว ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) โฟโตอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่หลอดคือประมาณ 750 V จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High Voltage Power Supplier, HVPS) ให้ไปชนขั้วไดโนดที่อยู่ถัดไป (Dynode) ทำให้อิเล็กตรอนที่ขั้วไดโนดหลุดเพิ่ม อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้ไปชนขั้วไดโนดที่อยู่ถัดไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดจำนวนอิเล็กตรอนภายในหลอดทวิคูณแสงขึ้นมากมาย อิเล็กตรอนทั้งหมดจะไปสะสมอยู่ที่ขั้วแอโนด (Anode) กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ผ่านวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier, Preamp.) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน และวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier, Amp.) เพื่อปรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) เพื่อวิเคราะห์และแสดงสเปกตรัมบนจอแสดงผล สัญญาณที่ได้จะถูกบันทึกและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tukan 8K (Guzik et al., 2006)



รูปที่ 2 การจัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

การวิเคราะห์ค่าแยกชัดพลังงานสามารถทำได้โดยการสังเกตตำแหน่งกึ่งกลางของพีคพลังงานเต็มหรือโฟโตพีค (Full Energy Peak, Photo-peak) ของรังสีแกมมาว่าอยู่ที่ช่องหมายเลข (Channel Number) ไบนบนหน้าจอแสดงผลของ MCA จากนั้นใช้โปรแกรม Tukan 8K ในการเลือกช่วงพีคจากซ้ายถึงขวา โปรแกรมจะคำนวณค่าแยกชัดพลังงานออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อได้ตำแหน่งกึ่งกลางพีคมา จะสามารถคำนวณหาจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทดได้โดยใช้วิธีของ Bertolaccini et al. (1968) วิธีการนี้ใช้การเปรียบเทียบตำแหน่งของพีคโฟโตอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single Photoelectron Peak) ที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ MCA ทำได้โดยทำการวัดในขณะที่ไม่มีผลึกติดอยู่ที่หน้าต่างของหลอดทวิคูณแสง ปิดหน้าต่างด้วยเทปดำหนาทึบ และทำการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนที่ขั้วโฟโตแคโทดโดยใช้ความต่างศักย์สูงประมาณ 1000 V เพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้ไปชนที่ขั้วไดโนดต่างๆ เพื่อทวิคูณจำนวนอิเล็กตรอนให้ไปสะสมอยู่ที่ขั้วแอโนด และใช้อัตราการขยายสัญญาณไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณ ทำการบันทึกสเปกตรัมที่ได้บนหน้าจอ MCA นำตำแหน่งของพีคโฟโตอิเล็กตรอนเดี่ยว และตำแหน่งของพีคพลังงานเต็ม (วัดโดยมีผลึก) มาเทียบบัญญัติไตรยางค์ย้อนกลับเพื่อคำนวณหาจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่แท้จริงที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทด หลังจากนั้นจึงนำจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ได้หารด้วยค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่มาจากตกกระทบผลึกจะได้ค่าอิเล็กตรอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (Photoelectron Yield) มีหน่วยเป็น โฟโตอิเล็กตรอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (phe/MeV) และนำค่าประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency) ของขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวิคูณแสง มาคำนวณหาค่าอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (Photon Yield) คือ ปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจากผลึก มีหน่วยเป็น โฟตอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (ph/MeV)

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

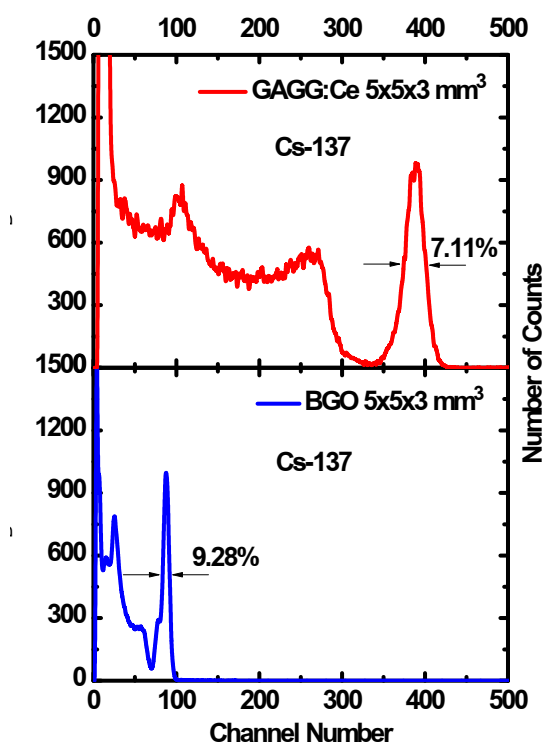
### ยิลต์แสง

รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่วัดโดยผลึก GAGG:Ce และผลึก BGO ที่มีขนาดเท่ากันคือ 5 mm x 5 mm x 3 mm โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 750 V ในการป้อนให้กับหลอดทวีคูณแสงเพื่อให้หลอดสามารถทำงานได้ และตั้งค่าในการขยายสัญญาณไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณ คือ coarse gain เท่ากับ 10 fine gain เท่ากับ 0.3 และ shaping time เท่ากับ 4  $\mu$ s พบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ซึ่งมีค่า 7.11% ดีกว่าของผลึก BGO ซึ่งมีค่า 9.28% (ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี)

จากสเปกตรัมนี้จะสังเกตพบว่าเมื่อใช้อัตราการขยายสัญญาณไฟฟ้าที่เท่ากัน ผลึก GAGG:Ce ให้ปริมาณแสงที่เปล่งออกมามากกว่าผลึก BGO เนื่องจากตำแหน่งของโฟโตพีคที่

ปรากฏบนหน้าจอ MCA ของผลึก GAGG:Ce อยู่ทางขวามากกว่า (อยู่ที่ Channel Number ที่มากกว่า)

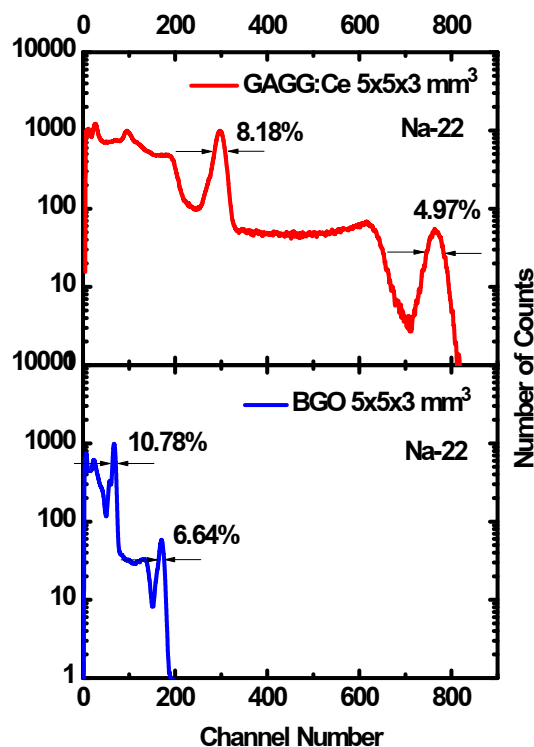
เมื่อนำตำแหน่งดังกล่าวของผลึกทั้งสองมาคำนวณหาค่ายิลต์โฟโตอิเล็กตรอนโดยใช้วิธีของ Bertolaccini et al. (1968) จะได้ค่าเท่ากับ 7,630 pheV/MeV และ 1,720 pheV/MeV สำหรับผลึก GAGG:Ce และผลึก BGO ตามลำดับ และเมื่อใช้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมของขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงรุ่น XP5200B PMT ที่ความยาวคลื่น 520 nm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.5% สำหรับผลึก GAGG:Ce จะคำนวณค่ายิลต์แสงได้เท่ากับ 41,300 ph/MeV ในขณะที่ของผลึก BGO ปลดปล่อยแสงความยาวคลื่นสูงสุด 420 nm มีค่าประสิทธิภาพควอนตัม 21.0% จะคำนวณค่ายิลต์แสงได้เท่ากับ 8,200 ph/MeV ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 3 สเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ที่วัดโดยผลึกทั้งสอง

**ตารางที่ 1** จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน ยิลด์โฟโตอิเล็กตรอน ยิลด์แสง และค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137

| Scintillation Crystals | Photoelectron (phel) | Photoelectron Yield (phel/MeV) | Light Yield (ph/MeV) | Energy Resolution (%) |
|------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|
| GAGG:Ce                | 5,051                | 7,630 ± 380                    | 41,300 ± 4,100       | 7.11 ± 0.36           |
| BGO                    | 1,139                | 1,720 ± 90                     | 8,200 ± 800          | 9.28 ± 0.46           |



**รูปที่ 4** สเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 511 keV และ 1,274.5 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Na-22 ที่วัดโดยผลึกทั้งสอง

รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 511 keV และ 1,274.5 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Na-22 พบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ก็ยังคงดีกว่าของผลึก BGO ทั้ง 2 พลังงาน และปริมาณแสงที่เปล่งออกมาของผลึก GAGG:Ce ก็มากกว่าของผลึก BGO เช่นกัน ในสเปกตรัมนี้ แขนงตั้งใช้สเกลลอการิทึม เพื่อให้เห็นโฟโตพีคทั้ง 2 พลังงานของแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Na-22 ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะสังเกตเห็นว่าเมื่อพลังงานรังสียิ่งมาก ความสูงของโฟโตพีคจะลดลงเนื่องจากเมื่อรังสีพลังงานสูงขึ้น โอกาสในตรรกะวัดได้จะน้อยลง เพราะรังสีพลังงานสูงส่วนใหญ่จะทะลุผ่านวัสดุ

จากตารางที่ 1 จะพบว่าจำนวนอนุภาคแสงที่เปล่งออกมาของผลึก GAGG:Ce มีค่ามากกว่าของผลึก BGO ถึง 5 เท่า แต่ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce กลับดีกว่าของผลึก BGO ไม่มากนัก จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าแยกชัดพลังงาน

โดยแยกตามองค์ประกอบต่างๆ ตามหลักการของ Moszynski et al. (2002)

#### ค่าแยกชัดพลังงาน

ค่าแยกชัดพลังงาน ( $\Delta E/E$ ) ของโฟโตพีคที่วัดโดยผลึกซินทิลเลชันที่เชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสงจะสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ (Moszynski et al., 2002) ได้ดังนี้

$$(\Delta E/E)^2 = \delta_{st}^2 + \delta_p^2 + \delta_{st}^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $\delta_{st}$  คือค่าแยกชัดทางสถิติของหลอดทวีคูณแสง (Statistical Resolution, PMT Resolution) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\delta_{st} = [2.355 \times (1+\epsilon)^{1/2}] / [N]^{1/2} \quad (2)$$

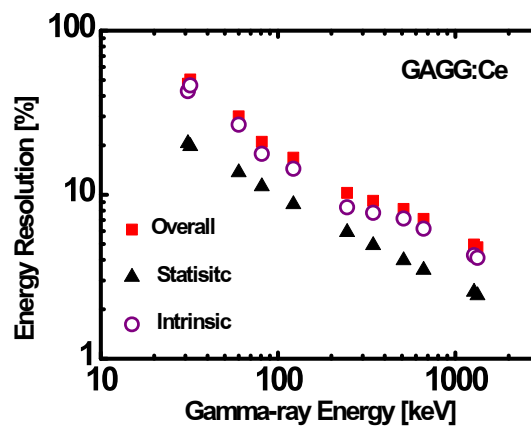
เมื่อ N คือจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากหัวโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงเมื่อมีอนุภาคแสงจากผลึกมาตกกระทบ และ  $\epsilon$  คือค่าความแปรปรวนของอัตราการขยาย

จำนวนอิเล็กตรอนในหลอดทวีคูณแสง สำหรับหลอดทวีคูณแสง รุ่น XP5200B PMT ที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 0.1 ส่วน  $\delta_p$  คือค่าแยกชัดของการเชื่อมต่อ (Transfer Resolution) ของผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสง ขึ้นกับความสามารถในการทำให้แสงเข้าสู่หลอดทวีคูณแสง ความเป็นเนื้อเดียวกันของขั้วโฟโตแคโทด และประสิทธิภาพในการสะสมโฟโตอิเล็กตรอนที่ไดโนดตัวแรก โดยปกติแล้วค่านี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆ สามารถละทิ้งได้ ส่วน  $\delta_{sc}$  คือค่าแยกชัดในตัวของผลึกซินทิลเลชัน (Intrinsic Resolution) ซึ่งค่านี้จะมีความสัมพันธ์กับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (Light Yield Non-proportionality) อย่างมาก และสัมพันธ์กับค่าอื่นๆ เช่น ความเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความบกพร่องภายในผลึก ความ

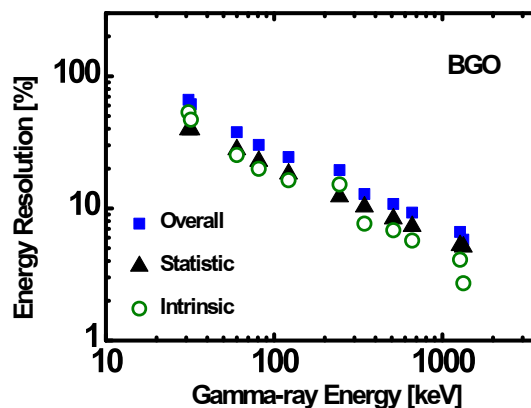
สม่ำเสมอของสารเจือในผลึก ความสม่ำเสมอในการปกคลุมผลึกด้วยเทปขาว (Moszynski et al., 2002) จากสมการที่ 1 เมื่อตัดค่า  $\delta_p$  ออก และหาค่า  $(\Delta E/E)$  ได้จากการวัด จะทราบค่า  $\delta_{st}$  ได้จากการคำนวณ จะสามารถคำนวณหาค่า  $\delta_{sc}$  ได้จากสมการนี้

$$\delta_{sc}^2 = (\Delta E/E)^2 - \delta_{st}^2 \quad (3)$$

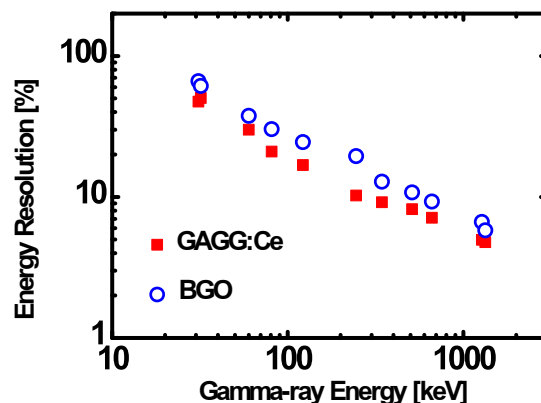
รูปที่ 5 และ 6 แสดงค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดทางสถิติและค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce และผลึก BGO ตามลำดับ จะพบว่าค่าแยกชัดต่างๆ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันคือเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามากขึ้นค่าแยกชัดต่างๆ ก็จะมีค่าลดลง และเมื่อนำเฉพาะค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce และ BGO มีเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปที่ 7



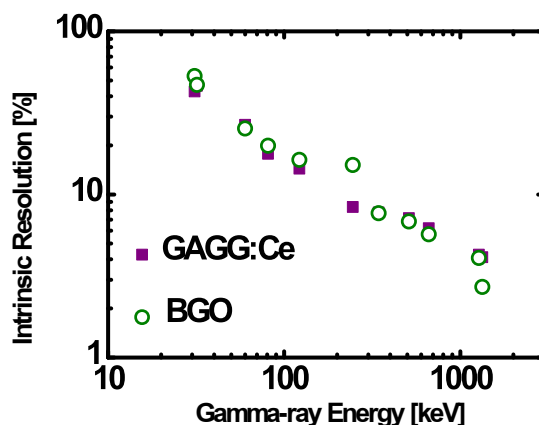
รูปที่ 5 ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดทางสถิติ และค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce



รูปที่ 6 ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดทางสถิติ และค่าแยกชัดในตัวของผลึก BGO



รูปที่ 7 ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce และ BGO ที่พลังงานรังสีต่างๆ



รูปที่ 8 ค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce และ BGO ที่พลังงานรังสีต่างๆ

จากรูปที่ 7 จะพบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ดีกว่าของผลึก BGO ทุกๆ พลังงาน เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองจะได้ดังรูปที่ 8 ในรูปแสดงให้เห็นว่าค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก โดยส่วนใหญ่ในช่วงพลังงานต่ำคือตั้งแต่ 31 keV ถึง 245 keV ผลึก GAGG:Ce จะมีค่าแยกชัดในตัวที่ดีกว่าเล็กน้อย และส่วนในช่วงพลังงานสูงคือตั้งแต่ 344 keV ถึง 1,333 keV ผลึก BGO จะมีค่าแยกชัดในตัวที่ดีกว่าเล็กน้อย

เมื่อนำค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดทางสถิติและค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสอง ที่พลังงาน 662 keV มาเปรียบเทียบกับกันจะได้ผลดังตารางที่ 2 จากตารางที่ 2 จะพบว่าผลึก GAGG:Ce เปล่งแสงได้เข้มกว่าผลึก BGO สังเกตจากจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน (N) ที่ผลิตได้ที่ขั้วโฟโตแคโทดในคอลัมน์ที่ 2 ซึ่งมากกว่าของผลึก BGO เกือบ 5 เท่า แต่เมื่อสังเกตค่าแยก

ชัดพลังงานของผลึกทั้งสองกลับพบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ดีกว่าผลึก BGO ไม่มากนัก เมื่อสังเกตองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วนของค่าแยกชัดพลังงาน คือ ค่าแยกชัดทางสถิติ และค่าแยกชัดในตัว พบว่าค่าแยกชัดทางสถิติของผลึก GAGG:Ce ดีกว่าของผลึก BGO ค่อนข้างมาก เนื่องจากแสงที่เปล่งออกมาของผลึก GAGG:Ce มีมากกว่านั่นเอง ( $\delta_{st} \propto N^{-1/2}$  จากสมการที่ 2) แต่เมื่อสังเกตที่ค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองกลับพบว่าค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce กลับแย่กว่าของผลึก BGO จึงส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ไม่ได้ดังที่หวัง จึงต้องตรวจสอบที่ค่าแยกชัดในตัวของผลึกต่อไป โดยดูที่ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึกในหัวข้อต่อไป ซึ่งค่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าแยกชัดในตัวของผลึกเป็นอย่างมาก (Moszynski et al., 2002)

**ตารางที่ 2** จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดทางสถิติ และค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137

| Scintillation Crystals | Photoelectron<br>[N] (phel) | Energy Resolution<br>[DE/E] (%) | Statistic Resolution<br>[d <sub>st</sub> ] (%) | Intrinsic Resolution<br>[d <sub>sc</sub> ](%) |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| GAGG:Ce                | 5,051                       | 7.11 ± 0.36                     | 3.47 ± 0.17                                    | 6.20 ± 0.31                                   |
| BGO                    | 1,139                       | 9.28 ± 0.46                     | 7.32 ± 0.37                                    | 5.70 ± 0.29                                   |

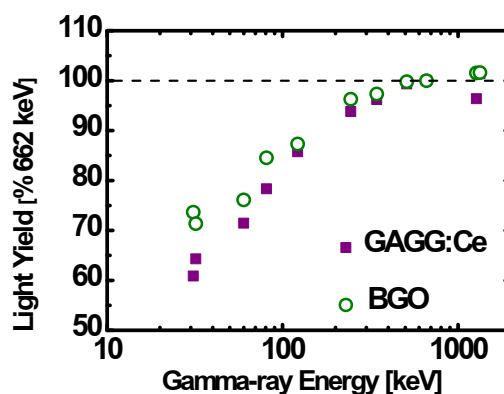
### ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง

ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีแกมมาเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซินทิลเลชันแย่ง (Dorenbos et al., 1995) ซึ่งสามารถหาได้โดยการใช้ค่ายิลด์แสงที่พลังงานรังสีแกมมานั้นๆ หารด้วยค่ายิลด์แสงที่พลังงาน 662 keV ผลึกซินทิลเลชันในอุดมคติจะมีค่านี้เท่ากับ 1 (100%) ในทุกๆพลังงาน หรือหมายความว่าโฟตอน 1 ตัวของรังสีแกมมาพลังงาน 1 MeV ไม่ว่าจะมาจากแหล่งกำเนิดรังสีชนิดใด เมื่อตกกระทบผลึกตัวเดิมแล้วควรทำให้ผลึกปลดปล่อยโฟตอนแสงออกมาจำนวนเท่าเดิม (ควรขึ้นกับค่าพลังงานเท่านั้น ไม่ควรขึ้นกับชนิดของแหล่งกำเนิด เนื่องจากการผลิตจำนวนโฟตอนแสงเกี่ยวข้องกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบเท่านั้น) จากผลการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ายิลด์แสงสัมพัทธ์และพลังงานจากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ดังรูปที่ 9 จากรูปที่ 9 พบว่าเส้นกราฟของผลึก GAGG:Ce มีแนวโน้มลดลงจากเส้น 100% มากกว่าเส้นกราฟของผลึก BGO นั้นหมายความว่าผลึก GAGG:Ce มีความเป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่ต่ำกว่า เพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นของเรื่องความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง Dorenbos et al. (2002) ได้เสนอวิธีเปรียบเทียบความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่ง่ายขึ้น โดยเขาได้เสนอ ค่าระดับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (Degree of Non-

proportionality,  $\sigma_{np}$ ) ซึ่งเป็นตัวเลขที่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจนว่าค่าใดดีกว่ากัน โดยสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma_{np} = [(1/n) \sum_{i=1}^N (Y(E_i)/Y(662)) - 1]^2]^{1/2} \quad (4)$$

เมื่อ n คือจำนวนค่าพลังงานที่ใช้ในการทดสอบผลึก  $Y(E_i)$  คือยิลด์แสงที่พลังงานนั้นๆ  $Y(662)$  คือยิลด์แสงที่พลังงาน 662 keV จากการคำนวณพบว่าค่า  $\sigma_{np}$  ของผลึก GAGG:Ce มีค่าเท่ากับ 0.20 และผลึก BGO มีค่าเท่ากับ 0.14 แสดงว่าผลึก GAGG:Ce มีค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่ต่ำกว่าผลึก BGO จริงซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 9 อย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงกับค่าแยกชัดพลังงานในตารางที่ 2 จะพบว่า ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce คือ 7.11% ที่มีค่าดีกว่าผลึก BGO คือ 9.28% นั้นส่วนใหญ่เป็นอิทธิพลมาจากความสามารถในการเปล่งแสงที่เข้มมากของผลึก GAGG:Ce ซึ่งมากกว่าผลึก BGO ประมาณ 5 เท่า (ค่ายิลด์แสงในตารางที่ 1) จึงทำให้ค่าแยกชัดทางสถิติของผลึก GAGG:Ce ดีกว่าผลึก BGO ค่อนข้างมาก (3.47% และ 7.32% ตามลำดับ ตัวเลขยิ่งน้อยค่ายิ่งดี) แต่เมื่อสังเกตดูที่ค่าแยกชัดในตัว พบว่า ค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce กลับมีค่าที่ต่ำกว่า (6.20% ของผลึก GAGG:Ce ต่ำกว่า 5.70% ของผลึก BGO) จึงทำให้ผลรวมของค่าแยกชัดพลังงานจากสมการที่ 1 ไม่ได้เท่าที่ควร



**รูปที่ 9** ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึก GAGG:Ce และผลึก BGO

เมื่อวิเคราะห์ที่ค่าแยกชัดในตัวซึ่งสัมพันธ์กับความเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความสม่ำเสมอของสารเจือในผลึก ความบกพร่องในผลึก ความสม่ำเสมอในการปกคลุมผลึกด้วยเทปขาว และความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง จะทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ที่ว่า ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าแยกชัดในตัวของผลึก GAGG:Ce แยก จึงส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ไม่ดีเท่าที่ควร แต่ถ้าต้องการทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ดีขึ้น สามารถทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพของผลึกให้มีความบกพร่องภายในผลึกน้อยที่สุด ผลึกมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และสารที่เจือต้องกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ค่าแยกชัดในตัวของผลึกดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการปรับสัดส่วนของ Ga ในสูตร  $Gd_3(Al_{5-x}Ga_x)O_{12}:Ce$  ให้มีค่าเหมาะสม Chewpraditkul et al. (2018) ก็จะส่งผลให้ความกว้างของช่องว่างพลังงาน (Energy Band Gap) ลดลง ขอบล่างของแถบการนำ (Conduction Band) ลดลงมาทำลายกับดักตื้น (Shallow Traps) ทำให้โอเล็คตรอนเคลื่อนที่ไปสู่ศูนย์กลางการเปล่งแสง (Luminescent Center) ได้รวดเร็วขึ้น ผลก็คือผลึก GAGG:Ce ก็จะมีค่าแยกชัดพลังงานที่ดีขึ้นตามที่นักวิทยาศาสตร์คาดหวัง

### สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าผลึก GAGG:Ce ซึ่งเป็นผลึกรุ่นใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ มีความสามารถในการเปล่งแสงที่สูงมาก เนื่องจากถูกพัฒนามาให้มีช่องว่างพลังงานที่แคบลง ผลของค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ที่ได้จากการทดลองยังดีกว่าของผลึก BGO ไม่มากนัก เนื่องจากค่าแยกชัดในตัวของผลึกที่แย่งซึ่งกันมีความสัมพันธ์กับค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่แย่งอย่างเห็นได้ชัด แต่ผลึกดังกล่าวยังสามารถพัฒนาให้มีค่าแยกชัดพลังงานที่ดีขึ้นได้ โดยการปรับปรุงในส่วนของการเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความสม่ำเสมอของสารเจือในผลึก และความบกพร่องของผลึกในขั้นตอนของการปลูกผลึก ผลึกนี้ก็จะมีความแยกชัดพลังงานที่ดีขึ้นไปได้อีก สามารถนำมาใช้ทดแทนผลึกเก่าในเครื่องวินิจฉัยด้วยรังสีทางการแพทย์ เช่น เครื่อง PET scan หรือ เครื่อง CT scan และงานวิจัยฟิสิกส์พลังงานสูงได้ ในขณะที่ผลึก BGO ก็ยังมีข้อดีคือ ความหนาแน่นสูง ไม่ดูดความชื้น ราคาต่ำ ทำให้ยังน่าสนใจสำหรับงานตรวจจบบรรยากาศพลังงานสูงที่ต้องใช้ในปริมาณมากๆ

### กิตติกรรมประกาศ

งบประมาณทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2560 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับการใช้เครื่องมือขั้นสูงและสถานที่สำหรับการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วีระพงศ์ จิวประดิษฐ์กุล อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สมัยศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ได้สั่งสอนให้ความรู้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ด้านงานวิจัย สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวของคณะผู้วิจัยทุกท่านที่กำลังใจและอยู่เคียงข้างกันเสมอมา

### เอกสารอ้างอิง

- Bertolaccini, M., Cova, S. and Bussolati, C. (1968). A technique for absolute measurement of the effective photoelectron per keV yield in scintillation counters. In International Symposium on Nuclear Electronics. 10-13 September 1968. Versailles, France.
- Chewpraditkul, W., Pattanaboonmee, N., Sakthong, O., Chewpraditkul, W., Szczesniak, T., Moszynski, M., Kamada, K., Kurosawa, S., Yoshikawa, A. and Nikl, M. (2018). Optical Materials 81: 23-29.
- Dorenbos, P., de Haas, J.T.M. and van Eijk, C.W.E. (1995). Non-proportionality in the scintillation response and energy resolution obtainable with scintillation crystals. IEEE Transactions on Nuclear Science 42(6): 2,190-2,202.
- Dorenbos, P. (2002). Light output and energy resolution of  $Ce^{3+}$ -doped scintillators. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 486: 208-213.
- Guzik, Z., Borsuk, S., Traczyk, K. and Plominski, M. (2006). TUKAN-an 8k pulse height analyzer and multi-channel scaler with a PCI or a USB interface. IEEE Transactions on Nuclear Science 51(3): 231-235.
- Lecoq, P., Annenkov, A., Gektin, A., Korzhik, M. and Pedrini, C. (2006). Inorganic Scintillators for Detector Systems. Netherlands: Springer. pp. 1-117.

- Melcher, C.L. (2005). Perspectives on the future development of new scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 537: 6-14.
- Moszynski, M., Zalipska, J., Balcerzyk, M., Kapusta, M., Mengesha, W. and Valentine, J.D. (2002). Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)<sup>1</sup>. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 484(1-3): 259-269.
- Moszynski, M. (2003). Inorganic scintillation detectors in  $\gamma$ -ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 505: 101-110.
- van Eijk, C.W.E. (2001). Inorganic-scintillator development. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 460: 1-14.

