



ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงและค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซินทิลเลเตอร์

LuAG:Ce และ YAG:Ce สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา

Light Yield Non-proportionality and Energy Resolution of LuAG:Ce

and YAG:Ce Scintillators for Gamma Ray Detection

อัศพงษ์ พันธุ์พฤษย์^{1*} วรณัฐ ทองพล¹ และ ศราวุธ ใจเย็น¹

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

*E-mail: akapong_p@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงและค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซินทิลเลเตอร์ 2 ชนิด ได้แก่ผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce ผลึกที่ถูกศึกษานี้ผลิตจาก 2 บริษัทในประเทศสาธารณรัฐเช็กและประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนตามลำดับ ที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสี ^{137}Cs ผลึก LuAG:Ce แสดงค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนประมาณ 4,033 phel/MeV ซึ่งมากกว่า 3,065 phel/MeV สำหรับผลึก YAG:Ce แต่ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก LuAG:Ce กลับแยกว่า ในช่วงพลังงานรังสีแกมมาตั้งแต่ 31 keV ถึง 1,408 keV ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงต่อค่าพลังงานรังสีแกมมาของผลึกทั้งสองได้ถูกวัดและถูกอภิปราย ค่าโฟโตแฟรกชันโดยประมาณได้ถูกรายงานและเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของภาคตัดขวางที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom

คำสำคัญ: ค่าแยกชัดพลังงาน ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง LuAG:Ce YAG:Ce

Received: March 30, 2017

Revised: June 20, 2017

Accepted: June 20, 2017

Abstract

This research was aimed to study of light yield non-proportionality and energy resolution properties for two types of the scintillator namely LuAG:Ce and YAG:Ce crystals. The studied crystals were supplied by two companies in Czech Republic and P.R. China, respectively. At 662 keV gamma ray energy from ^{137}Cs source, the LuAG:Ce crystal shows photoelectron yield of about 4,033 phel/MeV which is more than 3,065 phel/MeV for the YAG:Ce crystal, but the energy resolution of the LuAG:Ce crystal is worse. Over the energy range of 31-1,408 keV, the light yield non-proportionality versus gamma ray energy of both crystals was measured and discussed. The estimated photofraction was reported and compared to the cross-sectional ratio computed using the WinXCom program.

Keywords: Energy Resolution, Light Yield Non-proportionality, LuAG:Ce, YAG:Ce

1. บทนำ

จากการพัฒนาที่รวดเร็วในยุคปัจจุบัน นำไปสู่การนำสารกัมมันตรังสีมาประยุกต์ใช้ทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม ด้านธรณีวิทยา และรวมไปถึงด้านการตรวจสอบโดยไม่ทำลายทางอุตสาหกรรม [1] ทำให้มนุษย์มีโอกาสดำรงชีวิตมากขึ้นและมีความเสี่ยงต่ออาการเจ็บป่วยเมื่อได้รับรังสีปริมาณมากเกินไป ที่สำคัญคือมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสีได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นการตรวจจบริ่งสีจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งทั้งทางด้านการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์ และยังช่วยทางด้านการควบคุมปริมาณรังสีเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานประเภทต่าง ๆ วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรังสีให้กลายเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ และเป็นที่น่าสนใจอยู่ในขณะนี้ก็คือ ผลึกซินทิลเลเตอร์ (Scintillators) ในปัจจุบันได้มีการปลูกหรือพัฒนาผลึกขึ้นมามากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ซึ่งมีงานวิจัยหลายงานที่ได้กล่าวถึงการพัฒนาผลึกซินทิลเลเตอร์สำหรับงานตรวจวัดรังสีโดยเฉพาะวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma Spectrometry) เช่น

งานวิจัยของ van Eijk [2] และ Moszynski [3] และเมื่อเร็วๆ นี้ก็คือ Lecoq และคณะ [4] ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในการตรวจวัดรังสีแกมมา โดยได้เลือกผลึกตระกูลกาเนต คือ ผลึกลูทีเชียมอะลูมิเนียมแกเนตที่เจือด้วยธาตุซีเรียม (Cerium Doped Lutetium Aluminum Garnet, $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ หรือ LuAG:Ce) [5, 6] เป็นผลึกชนิดใหม่ซึ่งเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบผลึกอื่นอยู่หลายประการ เช่น เปล่งแสงออกมามาก มีความหนาแน่นสูง เลขอะตอมยังผลมีค่ามาก ไม่ดูดความชื้น จึงเป็นผลึกที่เหมาะสมจะนำมาแทนผลึกอื่นเก่า โดยเฉพาะด้านการตรวจวัดรังสีพลังงานสูงและการสร้างภาพจากรังสีทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นหัววัดรังสีในเครื่องตรวจวินิจฉัยโรคด้วยเทคนิคโพซิตรอน (Positron Emission Tomography) และเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed Tomography) เป็นต้น และผลึกอิตเทรียมอะลูมิเนียมแกเนตที่เจือด้วยธาตุซีเรียม (Cerium Doped Yttrium Aluminum Garnet, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ หรือ YAG:Ce) [7, 8] มีคุณสมบัติที่ดี คือมีค่าแยกชัดพลังงานที่ดี

ไม่ดูความชื้นและใช้เป็นผลึกเปรียบเทียบ โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติซินทิลเลชันของผลึกทั้งสอง โดยเน้นไปที่คุณสมบัติความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (Light Yield Non-proportionality) และ ค่าแยกชัดพลังงาน (Energy Resolution) ที่มีความสัมพันธ์กัน

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

นำผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ เท่ากัน ดังรูปที่ 1 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Crytur ประเทศสาธารณรัฐเช็ก และบริษัท Epic Crystal ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนตามลำดับ มาเชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube, PMT) รุ่น XP5200B นำผลึกแต่ละชิ้นมาพันด้วยเทปขาว 5 ด้าน เหลือด้านที่จะใช้เชื่อมต่อกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสงไว้ เพื่อให้แสงที่เปล่งออกมาจากผลึกสะท้อนเข้าสู่หลอดทวีคูณแสงมากที่สุด และใช้ซิลิโคนกรีสช่วยในการยึดติดผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสง จากนั้นคลุมหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสงและผลึกด้วยเทปดำ เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้าไปรบกวน เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2 จากนั้นนำแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา (^{133}Ba , ^{241}Am , ^{152}Eu , ^{22}Na และ ^{137}Cs) มาวางไว้หน้าผลึกทีละตัว โดยมีระยะห่างแตกต่างกันขึ้นกับความแรงของแหล่งกำเนิดรังสีขณะนั้น แหล่งกำเนิดรังสีแต่ละตัวจะปลดปล่อยค่าพลังงานออกมาตามตารางที่ 1 รังสีแกมมาที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะตกกระทบลงบนผลึกผลึกจะดูดกลืนรังสีแกมมาและเปลี่ยนรังสีให้กลายเป็นแสงที่ตามองเห็น แสงที่เปล่งออกมาสจะสะท้อนกับเทปขาวที่พันอยู่รอบผลึก และหักเหเข้าสู่หลอดทวีคูณแสงแล้วตกกระทบลงบนขั้วโฟโตแคโทด อิเล็กตรอนที่ขั้วโฟโตแคโทดจะหลุดออกมาเป็นไปตามปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

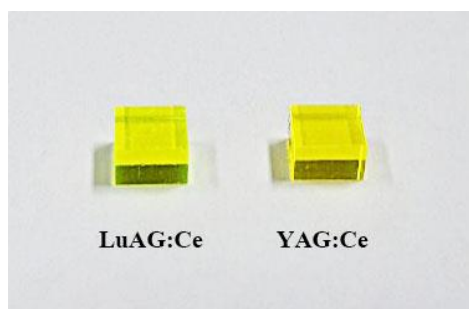
(Photoelectric Effect) อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) อิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงให้ไปชนขั้วไดโนด (Dynode) อีกหลายขั้วที่อยู่ถัดไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดเพิ่มเป็นการทวีคูณอิเล็กตรอนโดยหลอดทวีคูณแสงนี้จะถูกป้อนความต่างศักย์สูงประมาณ 750 V จากแหล่งจ่ายไฟความต่างศักย์สูง (High Voltage Power Supply, HVPS) และอิเล็กตรอนทั้งหมดจะไปรวมอยู่ที่ขั้วแอโนดของหลอดทวีคูณแสงกลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier) และวงจรขยาย (Amplifier) ก่อนจะเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) [9] เพื่อแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมา

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาและค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา

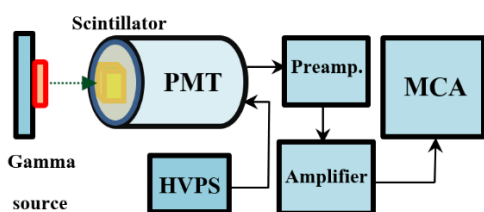
แหล่งกำเนิดรังสี	พลังงานรังสีแกมมา [keV]
^{133}Ba	31
^{241}Am	59.5
^{133}Ba	81
^{152}Eu	122
^{152}Eu	344
^{22}Na	511
^{137}Cs	662
^{22}Na	1,274.5
^{152}Eu	1,408

การวิเคราะห์ค่าแยกชัดพลังงานสามารถทำได้โดยสังเกตตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตพีค (Photopeak) ของรังสีแกมมาว่าอยู่ที่ช่อง (Channel) ไດบนหน้าจอ MCA จากนั้นใช้โปรแกรม Tukan 8K ในการเลือกช่วงพีคจากซ้ายถึงขวา โปรแกรมจะคำนวณค่าแยกชัดพลังงานออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

เมื่อได้ตำแหน่งกึ่งกลางพิกมา จะสามารถคำนวณหาจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทดได้โดยใช้วิธีของ Bertolaccini และคณะ [10]



รูปที่ 1 ผลึกซินทิลเลเตอร์ LuAG:Ce และ YAG:Ce ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2 แผนภาพระบบตรวจวัดรังสีแกมมาเพื่อใช้ในการทดสอบผลึกซินทิลเลเตอร์

วิธีนี้ใช้การเปรียบเทียบตำแหน่งของฟลักโฟโตอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single Photoelectron Peak) ที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ MCA ที่ทำการวัดในขณะที่ไม่มีแสงจากผลึกมาตกกระทบบนขั้วโฟโตแคโทดและทำการเร่งอิเล็กตรอนหนึ่งตัวนี้ให้หลุดจากขั้วโฟโตแคโทดโดยใช้ความต่างศักย์สูงที่ป้อนให้หลอดทวีคูณแสงคือประมาณ 1000 V และใช้อัตราการขยายสูงสำหรับวงจรขยายสัญญาณ จากนั้นนำแหล่งกำเนิดรังสีวางไว้ด้านหน้าของผลึกและทำการวัดแสงที่ออกมาจากผลึกจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลายตัวหลุดออกจากขั้วโฟโตแคโทดและถูกขยายด้วยความต่างศักย์ที่ป้อนให้หลอด

ทวีคูณแสงคือประมาณ 750 V และอัตราการขยายสำหรับวงจรขยายสัญญาณ กลายเป็นโฟโตฟลักบนหน้าจอ MCA ตำแหน่งของฟลักโฟโตอิเล็กตรอนเดี่ยวและตำแหน่งของโฟโตฟลักบนหน้าจอ MCA จะเป็นสัดส่วนกัน สามารถเทียบสัญญาณได้ตรงๆก็ย้อนกลับเพื่อคำนวณหาจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่แท้จริงที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทดได้ หลังจากนั้นจึงนำจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ได้หารด้วยค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่มาตกกระทบบนผลึกจะได้ค่าอิเล็กตรอนโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron Yield) มีหน่วยเป็น โฟโตอิเล็กตรอนต่อเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (phel/MeV)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ยิลด์โฟโตอิเล็กตรอน

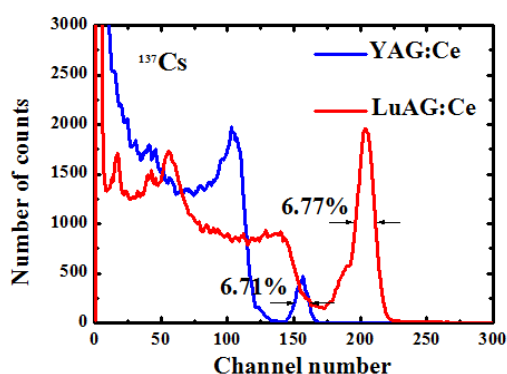
รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs ที่วัดโดยผลึกซินทิลเลเตอร์ LuAG:Ce และ YAG:Ce จากรูปพบว่าตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตฟลักที่วัดด้วยผลึก LuAG:Ce จะปรากฏขึ้นที่ช่องที่มากกว่า (204) ในขณะที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตฟลักที่วัดด้วยผลึก YAG:Ce จะปรากฏขึ้นที่ช่องที่น้อยกว่า (155) แสดงให้เห็นว่าผลึก LuAG:Ce แปลงแสงออกมาเข้มกว่าผลึก YAG:Ce แต่กลับพบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก (6.77% และ 6.71% ตามลำดับ) ค่าแยกชัดพลังงาน 6.71% ที่วัดได้ของผลึก YAG:Ce มีค่าที่ดีกว่า 7.0% ที่เคยวัดได้ด้วยผลึก YAG:Ce ขนาด $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ จากบริษัท Crytur ในเอกสารอ้างอิง [5] รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 511 keV ที่เกิดจากอันตรกิริยาแอนนิฮิเลชัน (Annihilation) และพลังงาน 1,274.5 keV จากแหล่งกำเนิด ^{22}Na ที่วัดโดยผลึกซินทิลเลเตอร์ LuAG:Ce และ YAG:Ce จากรูปพบว่าตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตฟลักของผลึก

LuAG:Ce จะปรากฏขึ้นที่ช่องที่มากกว่า (155 และ 394) ในขณะที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตพีคของผลึก YAG:Ce จะปรากฏขึ้นที่ช่องที่น้อยกว่า (118 และ 304) ที่พลังงาน 511 keV และ 1,274.5 keV ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลึก LuAG:Ce เปลี่ยนแสง

ออกมาเข้มกว่าผลึก YAG:Ce ประมาณ 1.3 เท่า จากรูปจะพบว่าพีค 1274.5 keV ของผลึกทั้งสองจะมีความสูงของพีคต่ำกว่าพีค 511 keV เนื่องจากพลังงานรังสียังมีค่ามากก็จะยิ่งทะลุผ่านวัสดุได้ง่าย ทำให้ตรวจจับยาก

ตารางที่ 2 จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน ยิลด์โฟโตอิเล็กตรอน และค่าแยกชัดพลังงานที่วัดโดยผลึกทั้งสองที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs

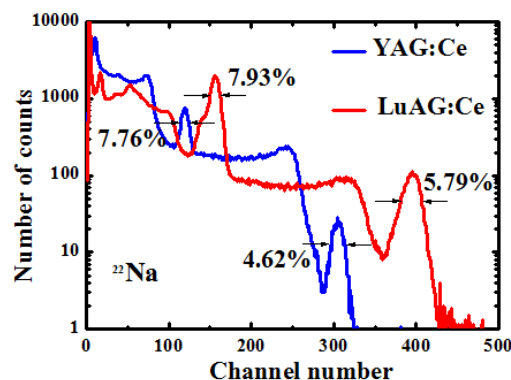
ผลึกซินทิลเลเตอร์	จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน [photoelectrons]	ยิลด์โฟโตอิเล็กตรอน [phel/MeV]	ค่าแยกชัดพลังงาน [%]
LuAG:Ce	$2,670 \pm 130$	$4,033 \pm 200$	6.77 ± 0.34
YAG:Ce	$2,029 \pm 100$	$3,065 \pm 150$	6.71 ± 0.34



รูปที่ 3 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs ที่วัดโดยผลึกทั้งสอง

จากรูปที่ 3 เมื่อนำตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของโฟโตพีคมาคำนวณโดยใช้วิธีของ Bertolaccini จะได้จำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนและยิลด์โฟโตอิเล็กตรอนของผลึกทั้งสองดังแสดงในตารางที่ 2 จากตารางที่ 2 โดยพบว่าสำหรับการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสี ^{137}Cs จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนและยิลด์โฟโตอิเล็กตรอนของผลึก LuAG:Ce จะมีค่ามากกว่าของผลึก

YAG:Ce แสดงว่าปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจากผลึก LuAG:Ce จะมากกว่าจากผลึก YAG:Ce



รูปที่ 4 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 511 keV และ 1,274.5 keV จากแหล่งกำเนิด ^{22}Na ที่วัดโดยผลึกทั้งสอง

ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอน 4,033 phel/MeV ที่ได้จากผลึก LuAG:Ce เป็นค่าที่มากกว่า 3,500 phel/MeV ที่ได้จากผลึก LuAG:Ce ขนาด $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ ในเอกสารอ้างอิง [6] ซึ่งเป็นไปตามที่นักวิทยาศาสตร์ต้องการคือการปรับปรุงปริมาณ

ของแสงที่เปล่งออกมาของผลึกรุ่นใหม่ให้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ตามมากลับน่าผิดหวัง คือ ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก LuAG:Ce กลับไม่ดีกว่าของผลึก YAG:Ce (ค่าแยกชัดพลังงานมีค่าน้อยยิ่งดี [11]) ทำให้ต้องมาวิเคราะห์ว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น โดยการวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีของค่าแยกชัดพลังงาน

3.2 ค่าแยกชัดพลังงาน

ค่าแยกชัดพลังงาน ($\Delta E/E$) ของพีคพลังงานเต็ม (Full Energy Peak) ของรังสีแกมมาที่วัดโดยใช้ผลึกซินทิลเลเตอร์พร้อมกับหลอดทวิคูณแสงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [11]

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

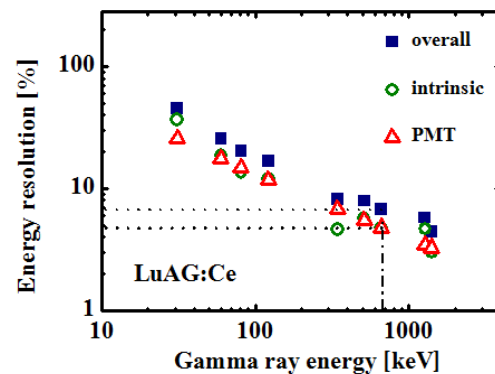
โดยที่ δ_{st} คือ ค่าแยกชัดทางสถิติของหลอดทวิคูณแสง (PMT Resolution) δ_p คือ ค่าแยกชัดการเชื่อมต่อ (Transfer Resolution) ระหว่างผลึกซินทิลเลเตอร์กับหลอดทวิคูณแสง และ δ_{sc} คือ ค่าแยกชัดในตัวของผลึก (Intrinsic Resolution) ซึ่งค่านี้จะมีความสัมพันธ์กันกับค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (Light Yield Non-proportionality) ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความบกพร่องในผลึก และความสม่ำเสมอในการปกคลุมผลึกด้วยเทปขาว [11, 12] โดยที่ค่าแยกชัดทางสถิติของหลอดทวิคูณแสง สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

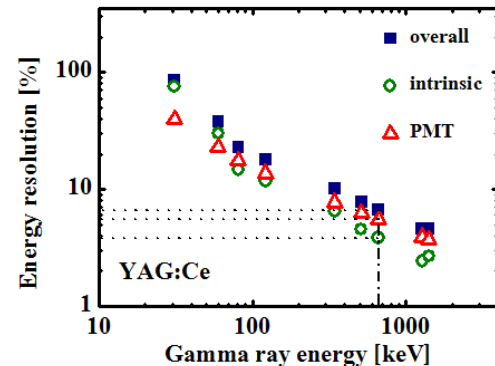
เมื่อ N คือ จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวิคูณแสง และ ε คือ ค่าความแปรปรวนของอัตราในการขยายอิเล็กตรอน ซึ่งสำหรับหลอดทวิคูณแสงยุคใหม่ ดังเช่นที่ใช้ในการทดลองคือรุ่น XP5200B จะมีค่า ε ประมาณ 0.1 โดยปกติค่าแยกชัดจากการเชื่อมต่อจะถูกตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอีก 2

ส่วน จากผลการทดลองเมื่อทราบค่าแยกชัดพลังงาน และค่าแยกชัดทางสถิติก็จะสามารถคำนวณหาค่าแยกชัดในตัวของผลึกได้โดยใช้สมการ

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



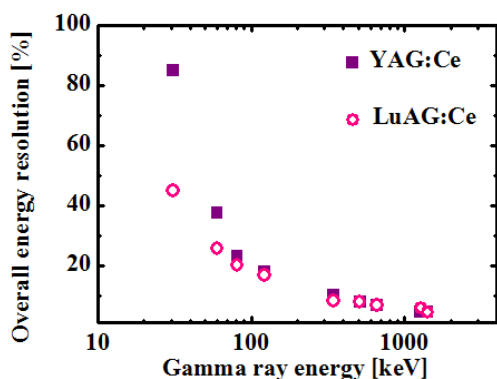
รูปที่ 5 แยกค่าชัดพลังงาน ค่าแยกชัด PMT และค่าแยกชัดในตัวของผลึก LuAG:Ce



รูปที่ 6 แยกค่าชัดพลังงาน ค่าแยกชัด PMT และค่าแยกชัดในตัวของผลึก YAG:Ce

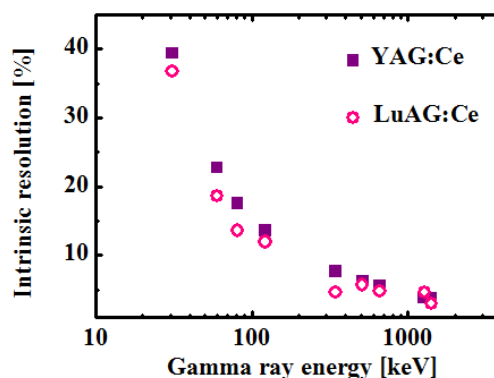
จากผลการทดลองเมื่อใช้แหล่งกำเนิดรังสีที่แตกต่างกันจะได้ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัด PMT และค่าแยกชัดในตัวที่พลังงานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ซึ่งเป็นของผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce ตามลำดับ จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 จะพบว่าค่าแยกชัดทั้งหมดมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือเมื่อพลังงานรังสีแกมมามากขึ้น ค่าแยกชัดต่างๆ

จะมีค่าลดลง เมื่อนำค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองมาเปรียบเทียบกับกันจะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แยกค่าชัดพลังงานของผลึก LuAG:Ce และ YAG:Ce

จากรูปที่ 7 พบว่าในช่วงพลังงานต่ำ คือ ตั้งแต่ 31 keV ถึง 344 keV ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก LuAG:Ce จะมีค่าดีกว่าของผลึก YAG:Ce แต่ในช่วงพลังงานสูง คือ ตั้งแต่ 511 keV ถึง 1,408 keV ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 8 แยกค่าชัดในตัวของผลึก LuAG:Ce และ YAG:Ce

ถ้าพิจารณาเฉพาะค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองโดยนำมาเปรียบเทียบกับกันดังรูปที่ 8 จะพบว่ากราฟค่าแยกชัดในตัวของผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟค่าแยกชัดพลังงาน เมื่อนำค่าแยกชัดพลังงานทั้งหมดที่พลังงาน 662 keV มาเปรียบเทียบกับกันจะได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัด PMT และค่าแยกชัดในตัวที่วัดโดยผลึกทั้งสองที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs

ผลึกซินทิลเลเตอร์	จำนวน โฟโตอิเล็กตรอน [photoelectrons]	ค่าแยกชัดพลังงาน [%]	ค่าแยกชัด PMT [%]	ค่าแยกชัดในตัว [%]
LuAG:Ce	$2,670 \pm 130$	6.77 ± 0.34	4.78 ± 0.24	4.80 ± 0.24
YAG:Ce	$2,029 \pm 100$	6.71 ± 0.34	5.48 ± 0.27	3.87 ± 0.19

เมื่อพิจารณาจากแสงที่เปล่งออกมาจากผลึก โดยดูจากจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในหลอดทวีคูณแสงพบว่าผลึก LuAG:Ce เปล่งแสงเข้มกว่าผลึก YAG:Ce ซึ่งโดยทั่วไปผลึกที่เปล่งแสงยิ่งเข้มจะส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานยิ่งดี เนื่องจากจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนยิ่งมาก (ค่า N ในสมการ (2)) จะส่งผลให้ค่าแยกชัด PMT ยิ่งน้อย (ยิ่งน้อยยิ่ง

ดี) ซึ่งจากตารางที่ 3 จะพบว่าค่าแยกชัด PMT ของผลึก LuAG:Ce มีค่าดีกว่าของผลึก YAG:Ce (4.78% และ 5.48% ตามลำดับ) แต่ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก LuAG:Ce กลับมีค่าแย่กว่าของผลึก YAG:Ce เล็กน้อย (6.77% และ 6.71% ตามลำดับ) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่งนั่นก็คือค่าแยกชัดในตัวของผลึก จะพบว่าค่า

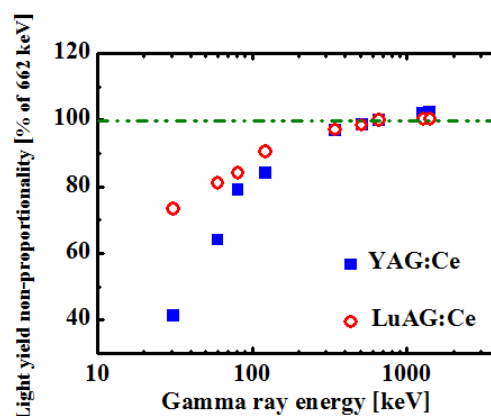
แยกชัดในตัวของผลึก LuAG:Ce มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าของผลึก YAG:Ce อย่างชัดเจน (4.80% และ 3.87% ตามลำดับ) จึงส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานไม่เป็นดังที่หวัง ซึ่งภายในค่าแยกชัดในตัวนี้จะขึ้นกับหลายส่วน เช่น ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความบกพร่องของผลึก ความสม่ำเสมอในการปลูกผลึกด้วยเทปขาว และที่สำคัญที่สุดก็คือ ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง [11, 12] ซึ่งจะกล่าวถึงในผลการทดลองหัวข้อต่อไปพลังงาน

3.3 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง

ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของหัววัดซินทิลเลเตอร์มีค่าต่ำลง [12] ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนที่พลังงานรังสีแกมมานั้นๆหารด้วยค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV ผลึกซินทิลเลเตอร์ที่ดีในอุดมคติควรมีค่าเท่ากับ 1 (100%) ทุก ๆ พลังงาน จากผลการทดลองในครั้งนี้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงกับพลังงานรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 9 จากกราฟจะพบว่าผลึก LuAG:Ce มีความเป็นสัดส่วนของยิลด์แสงดีกว่าผลึก YAG:Ce เนื่องจากเส้นกราฟที่ได้ของผลึก LuAG:Ce มีแนวโน้มลดลงจากค่า 100% น้อยกว่าคือลดลงมาอยู่ที่ 73% ที่พลังงาน 31 keV ในขณะที่ผลึก YAG:Ce ลดลงมาอยู่ที่ 41% ที่พลังงานเดียวกันเพื่อให้เกิดความชัดเจนมากยิ่งขึ้น Dorenbos [13] ได้นำเสนอค่าระดับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (Degree of Non-proportionality, σ_{np}) แสดงเป็นตัวเลขเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึกซินทิลเลเตอร์ได้ง่ายยิ่งขึ้น ค่าดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากสมการ

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

เมื่อ N คือ จำนวนพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ $Y(E_i)$ คือ ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนที่พลังงานนั้น ๆ และ $Y(662)$ คือ ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนที่พลังงาน 662 keV



รูปที่ 9 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานของรังสีแกมมาของผลึกทั้งสอง

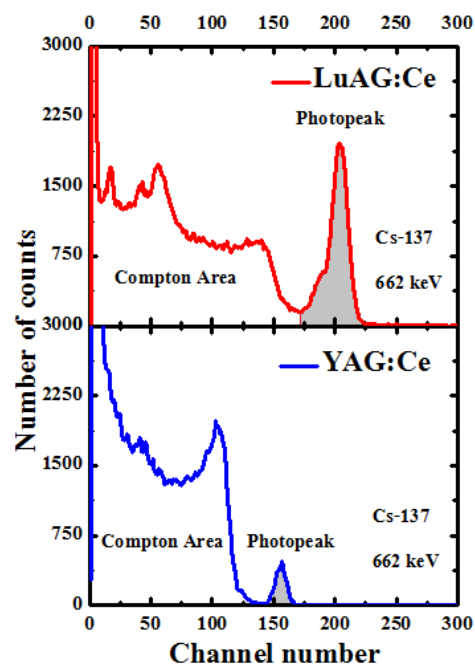
จากการคำนวณพบว่าผลึก LuAG:Ce มีค่า σ_{np} เท่ากับ 0.13 ในขณะที่ผลึก YAG:Ce มีค่า σ_{np} เท่ากับ 0.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึก LuAG:Ce มีค่า σ_{np} ที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าผลึก LuAG:Ce จะมีค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่ต่ำกว่า แต่ค่านี้ก็ยังไม่สามารถทำให้ค่าแยกชัดในตัวของผลึกมีค่าดีตามไปด้วย (ดูตารางที่ 3) ทำให้สันนิษฐานได้ว่า ค่าแยกชัดในตัวที่แยกของผลึก LuAG:Ce เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของผลึกหรือค่าความบกพร่องในผลึกเป็นหลัก

3.4 โฟโตแฟรกชัน

โฟโตแฟรกชัน (Photofraction) คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนของพื้นที่ได้โฟโตฟิคเทียบกับพื้นที่ได้สเปกตรัมของรังสีแกมมาทั้งหมด พื้นที่ได้โฟโตฟิคเป็นตัวแทนของปริมาณรังสีที่เข้ามาแล้วเกิดอันตรกิริยาภายในผลึกแล้วสูญเสียพลังงานทั้งหมด

ให้กับผลึกแล้วเปล่งแสงออกมา ส่วนพื้นที่คอมป์ตัน (Compton Area) เป็นตัวแทนของปริมาณที่เมื่อรังสีที่เข้ามาในผลึกแล้วสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับผลึกแล้วเปล่งแสงออกมา ซึ่งผลึกซินทิลเลเตอร์ที่ดีควรมีค่าโฟโตแฟรกชันมากๆ นั่นคือผลึกสามารถดักจับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่เข้ามาได้ เนื่องจากในปัจจุบันผลึกหลายชนิดได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านดักจับรังสีพลังงานสูง เช่น การสร้างภาพทางการแพทย์และงานด้านฟิสิกส์พลังงานสูง (High Energy Physics) ซึ่งคุณสมบัตินี้จะขึ้นกับความหนาแน่นของผลึก และเลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number, Z_{eff}) คือ ถ้าค่าทั้งสองนี้มาก โฟตอนรังสีแกมมาที่เข้ามาก็มีโอกาสชนกับอิเล็กตรอนในผลึกแล้วถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอน ทำให้โฟตอนมีโอกาสสูงที่จะสูญเสียพลังงานทั้งหมดในผลึก การหาค่าโฟโตแฟรกชันของผลึกทั้งสองทำได้โดยการหาพื้นที่ใต้สเปกตรัมและคำนวณ จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผลึก LuAG:Ce มีพื้นที่ใต้โฟโตพีคต่อพื้นที่ทั้งหมดมากกว่าผลึก YAG:Ce อย่างชัดเจน ในตารางที่ 4 ได้แสดงค่าโฟโตแฟรกชันที่คำนวณได้ และเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของภาคตัดขวาง

ของการดูดกลืน (σ -ratio) จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเทียบกับการดูดกลืนจากปรากฏการณ์ทั้งหมด (Photoelectric + Compton) ที่คำนวณได้โดยใช้โปรแกรม WinXCom [14]



รูปที่ 10 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV ที่วัดโดยผลึกทั้งสองที่แสดงส่วนโฟโตพีคและส่วนพื้นที่คอมป์ตัน

ตารางที่ 4 ค่าโฟโตแฟรกชันของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV ที่วัดโดยผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce

ผลึกซินทิลเลเตอร์	เลขอะตอม ยังผล	ความหนาแน่น [g/cm ³]	ค่าโฟโตแฟรกชัน [%]	อัตราส่วนของ ภาคตัดขวาง [%]
LuAG:Ce	58.9	6.67	17.24	19.15
YAG:Ce	35	4.56	2.45	2.18

พบว่าผลึก LuAG:Ce มีค่าโฟโตแฟรกชันมากกว่าผลึก YAG:Ce ผลนี้เกิดขึ้นเนื่องจากค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่น (Density) ของผลึก LuAG:Ce ที่มากกว่า และค่าที่ได้นี้ก็มีความโน้ม

เฉยกันกับค่า σ -ratio ที่คำนวณได้จากโปรแกรม WinXCom ด้วย ซึ่งหมายความว่าผลึก LuAG:Ce จะมีประสิทธิภาพในการหยุดยั้งรังสีแกมมาที่พลังงานสูงได้ดีกว่า

4. สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจสอบคุณสมบัติความไม่เป็นสัดส่วนของยิลต์แสงและค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสอง พบว่าผลึก LuAG:Ce ซึ่งเป็นผลึกใหม่กว่าถูกพัฒนาให้สามารถเปล่งแสงได้เข้มกว่าแต่ค่าแยกชัดพลังงานของมันกลับไม่ดีกว่าผลึก YAG:Ce เหตุผลหลักก็คือ ค่าแยกชัดในตัวของผลึก LuAG:Ce มีค่าแยกกว่าผลึก YAG:Ce อย่างชัดเจน เมื่อตรวจสอบเข้าไปในค่าแยกชัดในตัว พบว่าค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลต์แสงไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้ค่าแยกชัดในตัวแย่ จึงสรุปได้ว่าค่าแยกชัดในตัวที่แย่นี้ต้องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของผลึกหรือค่าความบกพร่องในผลึก ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงได้ในขั้นตอนการปลูกผลึก ซึ่งจะทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกนี้มีโอกาสดีขึ้นและเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดรังสีพลังงานสูง เนื่องจากผลึกนี้มีความสามารถในการหยุดยั้งรังสีพลังงานสูงได้อย่างชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำวิจัยงบประมาณทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วีระพงศ์ จิวประดิษฐ์กุล อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สมัยศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ได้สั่งสอนให้ความรู้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงต่างๆ และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวที่ทำให้กำลังใจและอยู่เคียงข้างกันเสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] เฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี นเรศร์ จันทน์ขาว และ สมยศ ศรีสถิตย์. การปรับปรุงความเร็วการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์มสำหรับการตรวจสอบชิ้นงานทางอุตสาหกรรมโดยไม่ทำลาย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.ธัญบุรี*. 2558. 5(2) : 59-73.
- [2] van Eijk C.W.E. Inorganic-scintillator development. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2001. 460 : 1-14.
- [3] Moszynski M. Inorganic scintillation detectors in γ -ray spectrometry. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2003. 505 : 101-110.
- [4] Lecoq P., Annenkov A., Gektin A., Korzhik M. and Pedrini C. *Inorganic Scintillators for Detector Systems*. Springer, Netherlands. 2006.
- [5] Chewpraditkul W., Swiderski L., Moszynski M., Szczesniak T., Syntfeld-Kazuch A., Wanarak C. and Limsuwan P. Scintillation properties of LuAG:Ce, YAG:Ce and LYSO:Ce crystals for gamma ray detection. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2009. 56 : 3800-3805.
- [6] Swiderski L., Moszynski M., Nassalski A., Syntfeld-Kazuch A., Szczesniak T.,

- Kamada K., Tsutsumi K., Usuki Y., Yanagida T., Yoshikawa A. Chewpraditkul W. and Pomorski M. Scintillation properties of praseodymium doped LuAG scintillator compared to cerium doped LuAG, LSO and LaBr₃. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2009. 56 : 2499-2505.
- [7] Bhattacharjee T., Kumar Basu S., Charan Dey C. and Baran Chatterjee M. Comparative studies of YAG(Ce) and CsI(Tl) scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A.* 2002. 484 : 364-368.
- [8] Mares A., Nikl M., D'Ambrosio C., de Notaristefani, Blazek K. Scintillation photoelectron Np_hels(E) and light LY(E) yields of YAP:Ce and YAG:Ce crystals. *Opt. Mater.* 2003. 24 : 281-284.
- [9] Guzik Z., Borsuk S., Traczyk K. and Plominski M. TUKAN-an 8k pulse height analyzer and multi-channel scaler with a PCI or a USB interface. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2006. 53(1) : 231-235.
- [10] Bertolaccini M., Cova S. and Bussolati C. A technique for absolute measurement of the effective photoelectron per keV yield in scintillation counters. *Proceeding of International Symposium on Nuclear Electronics.* Versailles, France. 10-13 September 1968.
- [11] Moszynski M., Zalipska J., Balcerzyk M., Kapusta M., Mengesha W. and Valentine J.D. Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)¹. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A.* 2002. 484(1-3) : 259-269.
- [12] Dorenbos P., de Haas J.T.M. and van Eijk, C.W.E. Non-proportionality in the scintillation response and energy resolution obtainable with scintillation crystals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1995. 42(6) : 2190-2202.
- [13] Dorenbos P. Light output and energy resolution of Ce³⁺-doped scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A.* 2002. 486 : 208-213.
- [14] Gerward L., Guilbert N., Jensen K.B. and Levring H. WinXCom - a program for calculating x-ray attenuation coefficients. *Radiat Phys and Chem.* 2004. 71(3-4) : 653-654.