

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลึกที่ใช้เป็นผลึกเดี่ยว $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ที่ปลูกด้วยวิธีบริดจ์แมน (Bridgman Method) และผลึกเดี่ยว $(\text{Lu,Y})_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ ที่ปลูกด้วยวิธีโซคราลสกี (Czochralski Method) โดย Shanghai Yibo Crystal Ltd. ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งจะรายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางแสงจากการศึกษาสเปกตรัมการกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ และสมบัติทางซินทิลเลชันจากการศึกษาการตอบสนองต่อรังสีแกมมา ของผลึกเดี่ยวตัวอย่างที่ตัดและขัดเงาทุกด้านขนาด $5\times 5\times 1$, $5\times 5\times 3$, $5\times 5\times 6$ และ $5\times 5\times 12 \text{ mm}^3$

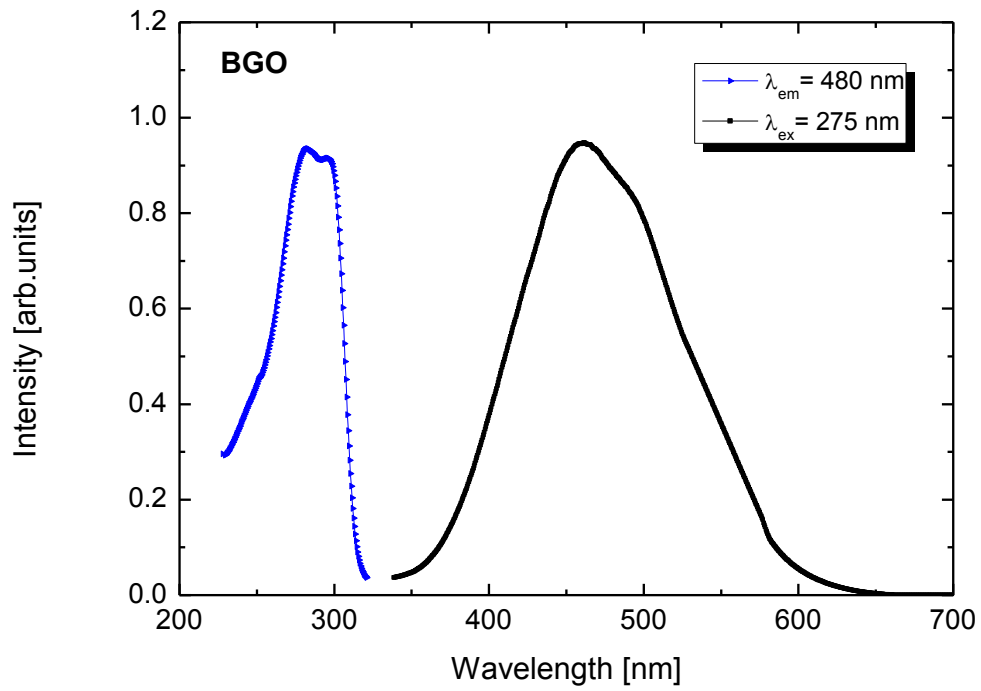
4.1 สมบัติทางแสง

4.1.1 สเปกตรัมการกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์

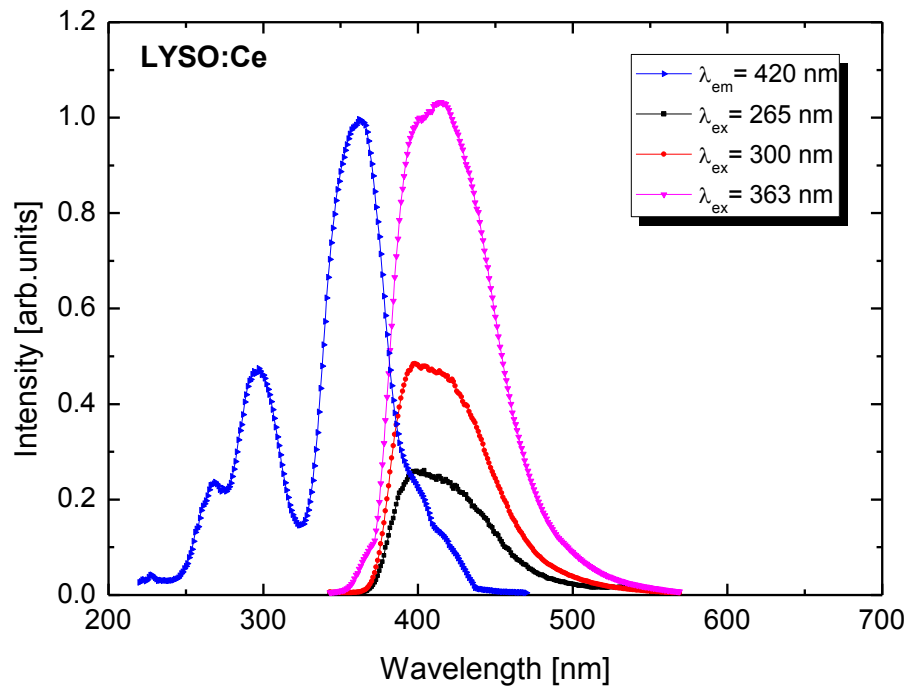
ศึกษาสเปกตรัมการกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ภายใต้อุณหภูมิห้อง ของผลึก BGO และ $\text{LYSO}:\text{Ce}$ โดยใช้เครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ ฮิตาชิ รุ่น F-2500 พบว่า

1. จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าผลึก BGO มีสเปกตรัมการกระตุ้นหรือการดูดกลืนแสงในแถบความยาวคลื่น 275 nm ซึ่งเกิดจากการทรานซิชันจากชั้นพลังงาน $2p \rightarrow 6p$ ของอ็อกซิเจน O^{2-} และ Bi^{3+} ตามลำดับ และให้สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ในแถบความยาวคลื่น 480 nm ซึ่งเกิดจากการทรานซิชันจากชั้นพลังงาน $6p \rightarrow 6s$ ของอ็อกซิเจน Bi^{3+} ซึ่งให้ผลตรงกับรายงานในเอกสารอ้างอิง [12-14]
2. จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าผลึก $\text{LYSO}:\text{Ce}$ มีสเปกตรัมการกระตุ้นในแถบความยาวคลื่น 265, 300 และ 363 nm ซึ่งเกิดจากการทรานซิชันจากชั้นพลังงาน $4f \rightarrow 5d^1$, $4f \rightarrow 5d^2$ และ $4f \rightarrow 5d^3$ ของอ็อกซิเจน Ce^{3+} และให้สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ในแถบความยาวคลื่น 420 nm ซึ่งเกิดจากการทรานซิชันจากชั้นพลังงาน $5d^1 \rightarrow {}^2F_{5/2}$, ${}^2F_{7/2}$ ของอ็อกซิเจน Ce^{3+} ซึ่งให้ผลตรงกับรายงานในเอกสารอ้างอิง [15-16]

ซึ่งสมบัติทางแสงของผลึก BGO และ $\text{LYSO}:\text{Ce}$ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ของผลึก BGO



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงลูมิเนสเซนส์ของผลึก LYSO:Ce

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางแสงของผลึก BGO และ LYSO:Ce ภายใต้อุณหภูมิห้อง

ผลึก	สเปกตรัมการกระตุ้นแสง	สเปกตรัมการปลดปล่อยแสง	สโตกชิฟ (Stokes Shift)
BGO	275 nm (4.51 eV) 300 nm (4.13 eV)	480 nm (2.58 eV)	1.93 eV
LYSO:Ce	363 nm (3.42 eV) 300 nm (4.13 eV) 265 nm (4.68 eV)	420 nm (2.95 eV)	0.47 eV

4.2 สมบัติทางซินทิลเลชัน

4.2.1 เอาท์พุทแสง

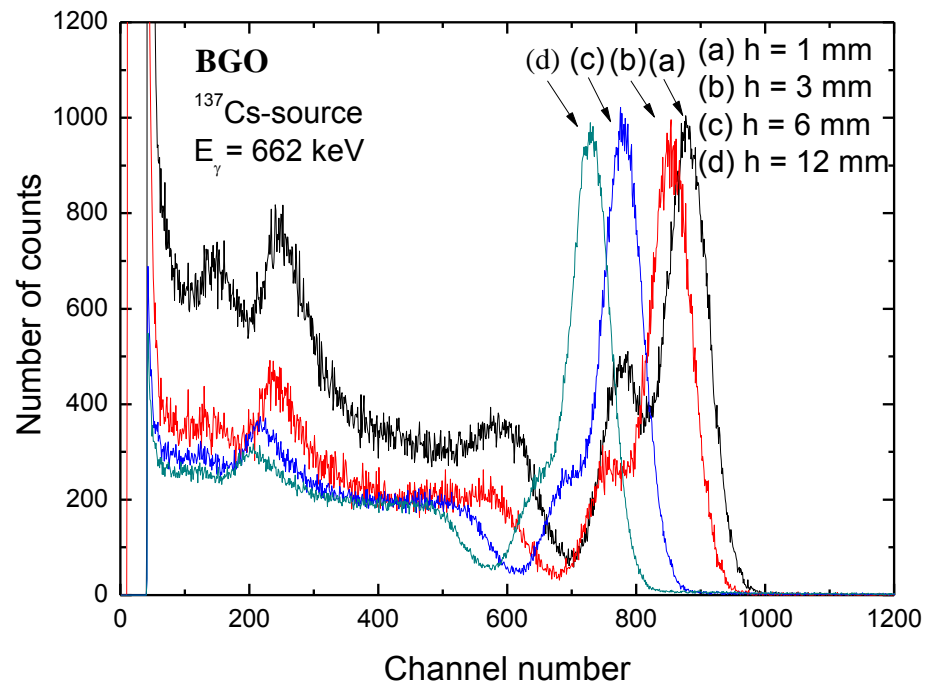
ได้ทำการวัดค่าyieldโฟโตอิเล็กตรอน yieldแสง และการแยกชุดพลังงานของผลึก BGO และ LYSO:Ce ที่ความสูงแตกต่างกัน โดยวิธีสเปกโทรสโกปีรังสีแกมมาดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.2 ด้วยหลอดทวิคูณแสงเบอร์ XP5200B ที่รังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ที่มี ^{137}Cs เป็นแหล่งกำเนิด และปรับปรุงสัญญาณโดยส่งไปยังวงจรรขยายส่วนหน้า และส่งไปยังวงจรรขยายทำการวัดผลที่เวลารวมสัญญาณของวงจรรขยาย 4 μs โดยค่าyieldโฟโตอิเล็กตรอนหาได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งของพีคโฟโต แล้วนำมาหาค่าyieldแสงได้ดังสมการที่ 3.1 โดยค่าประสิทธิภาพควอนตัมของหลอดทวิคูณแสงสำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce เท่ากับ 21 % และ 30 % ตามลำดับ ที่สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงเท่ากับ 480 nm และ 420 nm ตามลำดับ ค่าyieldโฟโตอิเล็กตรอน yieldแสง และการแยกชุดพลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า

- จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า yieldโฟโตอิเล็กตรอนและการแยกชุดพลังงานที่ดีที่สุดคือ $2,030 \pm 100 \text{ phe/MeV}$ และ 8.58 % ตามลำดับ สำหรับผลึก BGO ขนาด $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ ซึ่งมีค่าสูงกว่า $1,810 \pm 100 \text{ phe/MeV}$ และ 9.00 % สำหรับผลึก BGO ขนาด $7 \times 7 \times 1 \text{ mm}^3$ ที่รายงานในเอกสารอ้างอิง [17] yieldโฟโตอิเล็กตรอนของผลึก BGO ลดลงเมื่อความสูงของผลึกเพิ่มมากขึ้น ($2,030 \pm 100 \text{ phe/MeV}$ สำหรับผลึก BGO ความสูง 1 mm แล้วลดลงเหลือ $1,690 \pm 100$ สำหรับผลึก BGO ความสูง 12 mm) ซึ่งสนับสนุนข้อสรุปที่ว่าเอาท์พุทแสงส่วนใหญ่ขึ้นกับความสูงของ

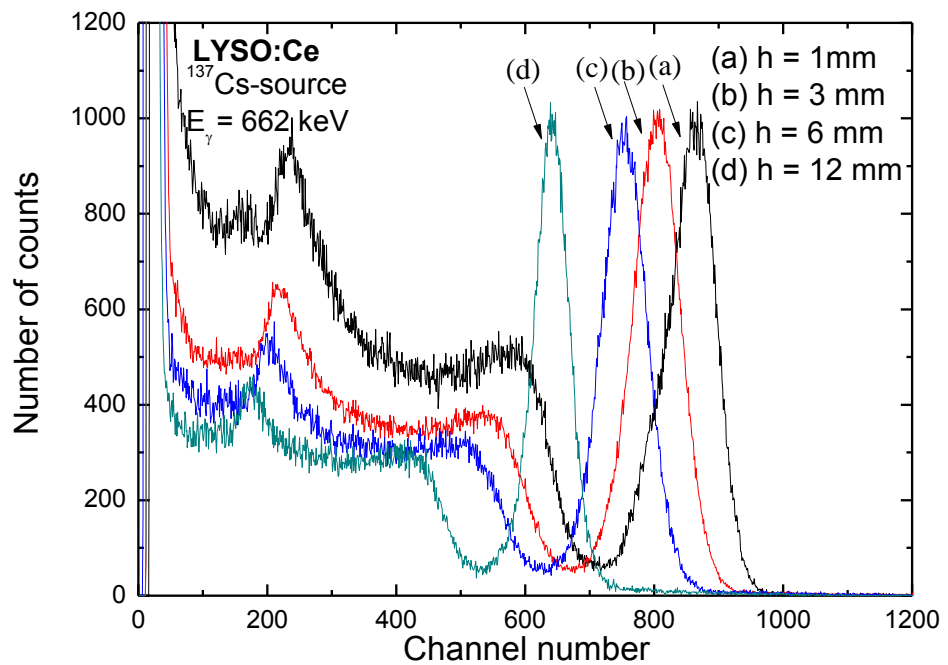
ผลึก (ผลึกที่มีความสูงมากขึ้นจะมีyieldแสงที่ลดลง) ไม่ขึ้นกับความกว้างหรือความยาวของผลึก [18] แต่ผลึก BGO ความสูง 12 mm ที่ทำการศึกษายังคงมีค่าyieldแสงและการแยกชัดพลังงาน ($8,050 \pm 800$ phe/MeV, 9.49 %) ดีกว่าผลึก BGO ความสูง 4 mm ($6,900 \pm 800$ phe/MeV, 10.00 %) ที่รายงานในเอกสารอ้างอิง [19]

2. จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า yield โฟโตอิเล็กตรอนและการแยกชัดพลังงานที่ดีที่สุดคือ $8,500 \pm 400$ phe/MeV และ 8.51 % ตามลำดับ สำหรับผลึก LYSO:Ce ขนาด $5 \times 5 \times 1$ mm³ ซึ่งมีค่าด้อยกว่า $10,100 \pm 500$ phe/MeV และ 7.70 % สำหรับผลึก LYSO:Ce ขนาด $7 \times 7 \times 1$ mm³ ที่รายงานในเอกสารอ้างอิง [20] อาจเป็นเพราะผลึกมีคุณภาพต่ำกว่า yield โฟโตอิเล็กตรอนของผลึก LYSO:Ce ลดลงเมื่อความสูงของผลึกเพิ่มมากขึ้น ($8,500 \pm 400$ phe/MeV สำหรับผลึก LYSO:Ce ความสูง 1 mm แล้วลดลงเหลือ $6,280 \pm 300$ phe/MeV สำหรับผลึก LYSO:Ce ความสูง 12 mm) ซึ่งสนับสนุนข้อสรุปที่ว่าเอาท์พุทแสงส่วนใหญ่ขึ้นกับความสูงของผลึก (ผลึกที่มีความสูงมากขึ้นจะมีyieldแสงที่ลดลง) ไม่ขึ้นกับความกว้างหรือความยาวของผลึก [18] แต่ผลึก LYSO:Ce ความสูง 5 mm ที่ทำการศึกษายังคงมีค่าyield โฟโตอิเล็กตรอน ($7,600 \pm 400$ phe/MeV สำหรับขนาด $5 \times 6 \times 5$ mm³ และ $7,400 \pm 400$ phe/MeV สำหรับขนาด $5 \times 12 \times 5$ mm³) ดีกว่าผลึก LYSO:Ce ความสูง 5 mm (7030 ± 400 phe/MeV) ที่รายงานในเอกสารอ้างอิง [21]

โดยภาพรวมแล้วผลึก LYSO:Ce ให้yieldแสงประมาณ 2.7 เท่าของyieldแสงที่ได้จากผลึก BGO เมื่อกระตุ้นด้วยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ที่มี ¹³⁷Cs เป็นแหล่งกำเนิด อีกทั้งยังสามารถสรุปได้ว่าเอาท์พุทแสงส่วนใหญ่ขึ้นกับความสูงของผลึก ไม่ขึ้นกับความกว้างหรือความยาวของผลึก โดยค่าyieldแสงจะมากขึ้นเมื่อผลึกมีความสูงที่ลดลง



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาจาก ^{137}Cs พลังงาน 662 keV ที่วัดด้วยผลึก BGO ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาจาก ^{137}Cs พลังงาน 662 keV ที่วัดด้วยผลึก LYSO:Ce ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm

ตารางที่ 4.2 ยิลต์โฟโตอิเล็กตรอน ยิลต์แสง และการแยกชัดพลังงาน (ที่พลังงาน 662 keV) ของผลึก BGO และ LYSO:Ce ที่ความสูงแตกต่างกัน

ผลึก	ขนาด (mm ³)	ยิลต์โฟโตอิเล็กตรอน (phe/MeV)	ยิลต์แสง* (ph/MeV)	การแยกชัดพลังงาน (%)
BGO	5×5×1	2,030 ± 100	9,670 ± 1000	8.58 ± 0.2
	5×5×3	1,970 ± 100	9,380 ± 900	8.82 ± 0.2
	5×6×5	1,880 ± 100	8,950 ± 900	9.05 ± 0.2
	5×12×5	1,930 ± 100	9,190 ± 900	8.92 ± 0.2
	5×5×6	1,800 ± 100	8,570 ± 900	9.29 ± 0.2
	5×5×12	1,690 ± 100	8,050 ± 800	9.49 ± 0.2
LYSO:Ce	5×5×1	8,500 ± 400	28,330 ± 2800	8.51 ± 0.2
	5×5×3	7,880 ± 400	26,270 ± 2600	10.25 ± 0.2
	5×6×5	7,600 ± 400	25,330 ± 2500	10.32 ± 0.2
	5×12×5	7,400 ± 400	24,670 ± 2500	10.52 ± 0.2
	5×5×6	7,390 ± 400	24,630 ± 2500	11.06 ± 0.2
	5×5×12	6,280 ± 300	20,930 ± 2100	11.76 ± 0.2

* ประสิทธิภาพควอนตัมของหลอดทวีคูณแสง

สำหรับผลึก BGO เท่ากับ 21 % ที่สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงเท่ากับ 480 nm

สำหรับผลึก LYSO:Ce เท่ากับ 30 % ที่สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงเท่ากับ 420 nm

4.2.2 การแยกชัดพลังงาน

สามารถหาการแยกชัดพลังงานได้จากวิธีที่ฟิตฟังก์ชันเกาส์เขียนบริเวณพีคพลังงานเต็มได้ ซึ่งการแยกชัดพลังงานรวม ($\Delta E/E$) ของพีคพลังงานเต็มวัดได้โดยนำซิลทิลเลเตอร์ไปประกบติดกับหลอดทวีคูณแสง เขียนเป็นสมการได้ [22-23]

$$(\Delta E/E)^2 = (\delta_{sc})^2 + (\delta_p)^2 + (\delta_{st})^2 \quad (4.1)$$

เมื่อ δ_{sc} คือการแยกชัดภายในตัวของผลึก δ_p คือการแยกชัดการถ่ายโอน และ δ_{st} คือการแยกชัดของหลอดทวีคูณแสงที่เกิดจากความไม่แน่นอนทางสถิติหาได้จากการคำนวณต่อไปนี้

$$\delta_{st} = 2.36 \sqrt{\frac{1+v(M)}{N}} \quad (4.2)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน และ $v(M)$ เป็นค่าความแปรปรวนของกำลังขยายของหลอดทวีคูณแสงซึ่งเท่ากับ 0.1 สำหรับหลอดทวีคูณแสง Photonis เบอร์ XP5200B

การแยกซ์พลังงานรวมและการแยกซ์ของหลอดทวีคูณแสงสามารถหาได้จากการทดลอง โดยให้การแยกซ์การถ่ายโอนมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ส่วนการแยกซ์ภายในตัวของผลึกสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$(\delta_{sc})^2 = (\Delta E/E)^2 - (\delta_{st})^2 \quad (4.3)$$

รูปที่ 4.5 และ 4.11 แสดงการแยกซ์พลังงานรวมเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงาน 32-1274.5 keV ของผลึก BGO และ LYSO:Ce ที่ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm พบว่าทั้งผลึก BGO และผลึก LYSO:Ce ที่ขนาดความสูง 1 mm มีการแยกซ์พลังงานรวมดีที่สุดคือ 8.58 % และ 8.51 % ตามลำดับ และที่ขนาดความสูง 12 mm มีค่าแยกซ์พลังงานรวมแย้ที่สุดคือ 9.49 % และ 11.76 % ตามลำดับ เนื่องมาจากยิลด์แสงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า ฉะนั้นยิลด์แสงและการแยกซ์พลังงานรวมจะแย้ลงเมื่อผลึกมีความสูงมากขึ้น

รูปที่ 4.6 และ 4.12 ได้เปรียบเทียบการแยกซ์ภายในตัวของผลึก BGO และ LYSO:Ce ทุกขนาด ซึ่งค่านั้นไม่ขึ้นกับขนาดของผลึก หรือขึ้นกับขนาดของความสูงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการแยกซ์ภายในผลึกขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงและความบกพร่องของผลึก

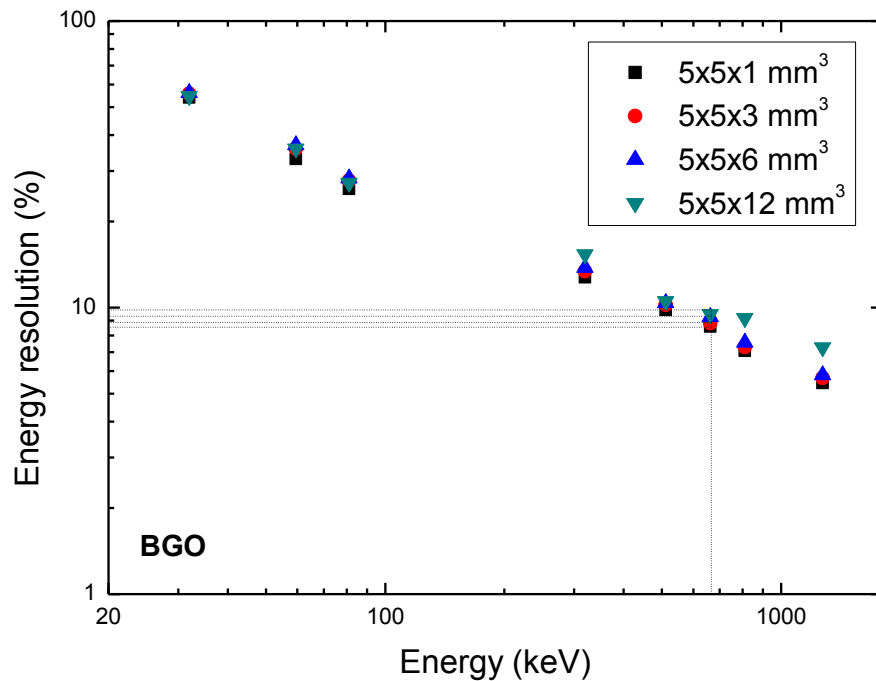
รูปที่ 4.7-4.10 แสดงการแยกซ์พลังงานรวม การแยกซ์ของหลอดทวีคูณแสง และการแยกซ์ภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm ตามลำดับ โดยค่าแยกซ์พลังงานรวมที่พลังงานมากกว่า 80 keV มีผลส่วนใหญ่มาจาก δ_{st} ดังนั้นแสงที่ออกมาจากผลึกและประสิทธิภาพควอนตัมของหลอดทวีคูณแสงยังคงสำคัญ อีกทั้งข้อสนับสนุนหลักของการแยกซ์พลังงานสำหรับผลึก BGO มาจากการแยกซ์ของหลอดทวีคูณแสง

รูปที่ 4.13-4.16 แสดงการแยกซ์พลังงานรวม การแยกซ์ของหลอดทวีคูณแสง และการแยกซ์ภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm ตามลำดับ พบว่าข้อสนับสนุนหลักของการแยกซ์พลังงานสำหรับผลึก LYSO:Ce มาจากการแยกซ์ภายในตัวของผลึก

ซึ่งการแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึกที่พลังงาน 662 keV สำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

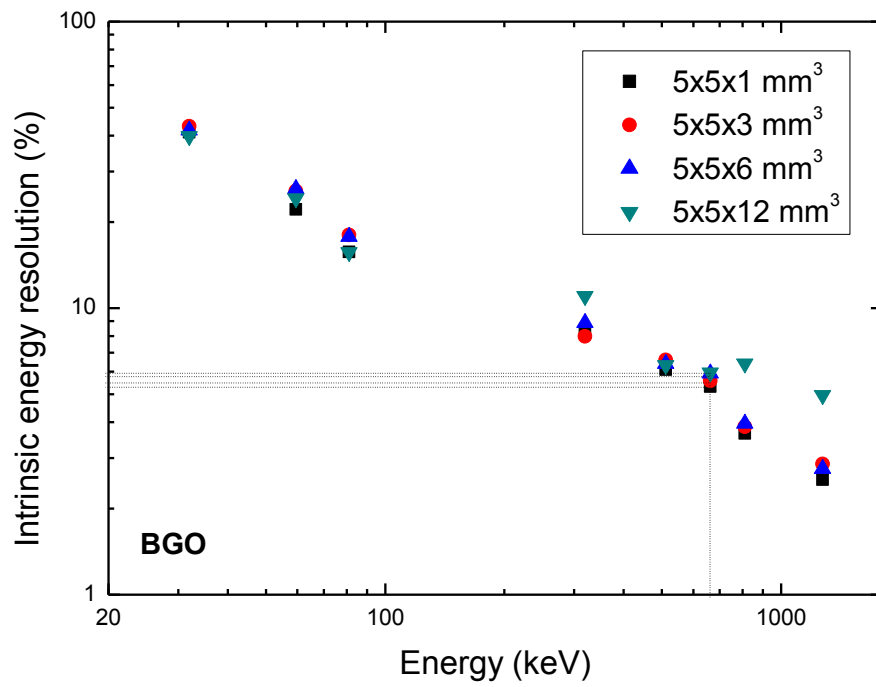
ตารางที่ 4.3 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก (ที่พลังงาน 662 keV) สำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce

ผลึก	ขนาด (mm ³)	$\Delta E/E$ (%)	δ_{st} (%)	δ_{sc} (%)
BGO	5×5×1	8.58	6.73	5.32
	5×5×3	8.82	6.84	5.57
	5×5×6	9.29	7.16	5.92
	5×5×12	9.49	7.16	5.92
LYSO:Ce	5×5×1	8.51	3.29	7.85
	5×5×3	10.25	3.42	9.66
	5×5×6	11.06	3.53	10.48
	5×5×12	11.76	3.83	11.12

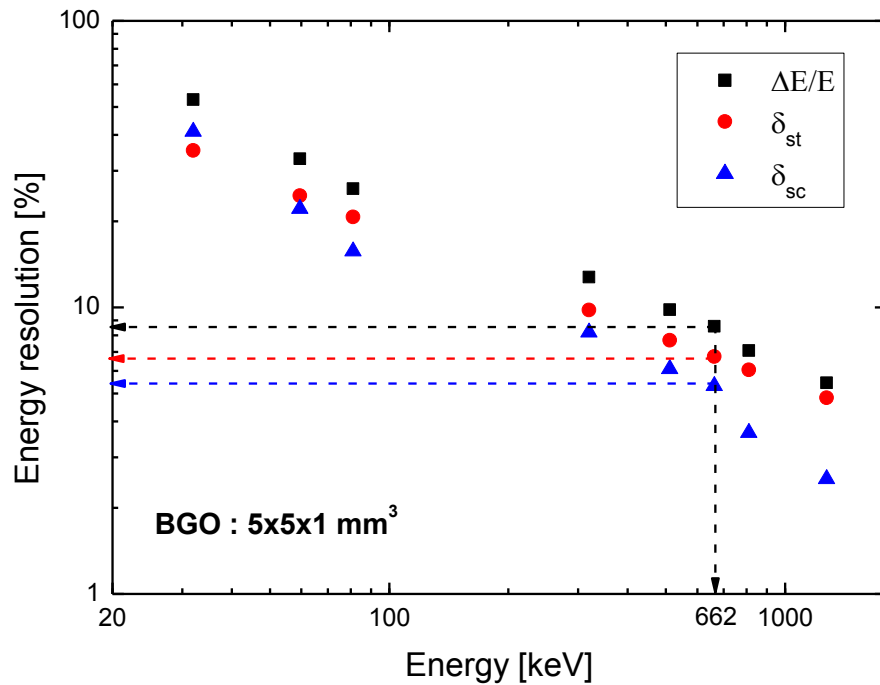


รูปที่ 4.5 การแยกชัดพลังงานรวมเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ความสูง

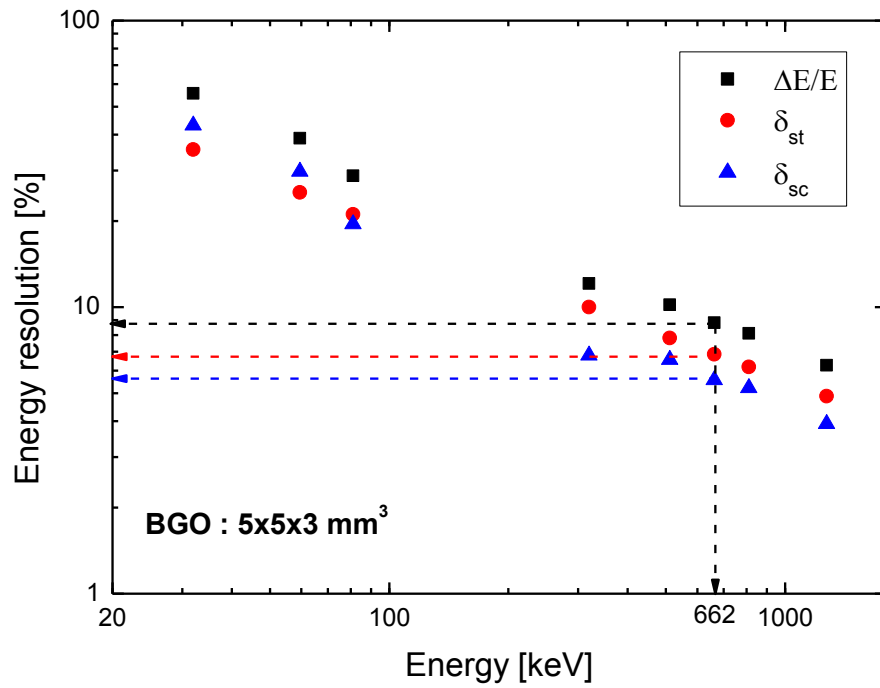
1, 3, 6 และ 12 mm



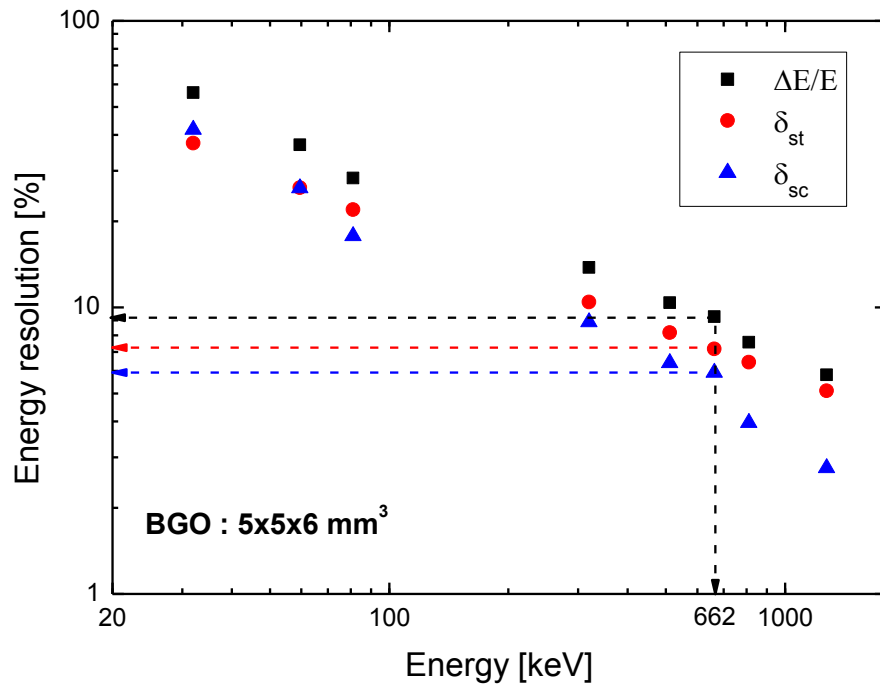
รูปที่ 4.6 การแยกชั้ดภายในตัวของผลึกเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO
ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm



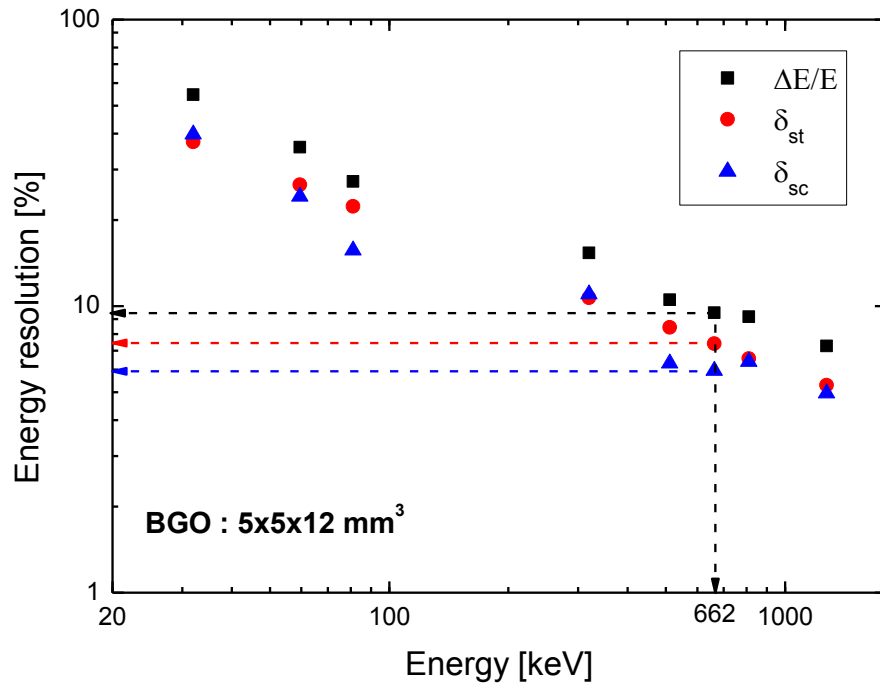
รูปที่ 4.7 การแยกชั้ดพลังงานรวม การแยกชั้ดของหลอดทวี่คูณแสง และการแยกชั้ดภายในตัวของผลึก
เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ขนาด 5x5x1 mm³



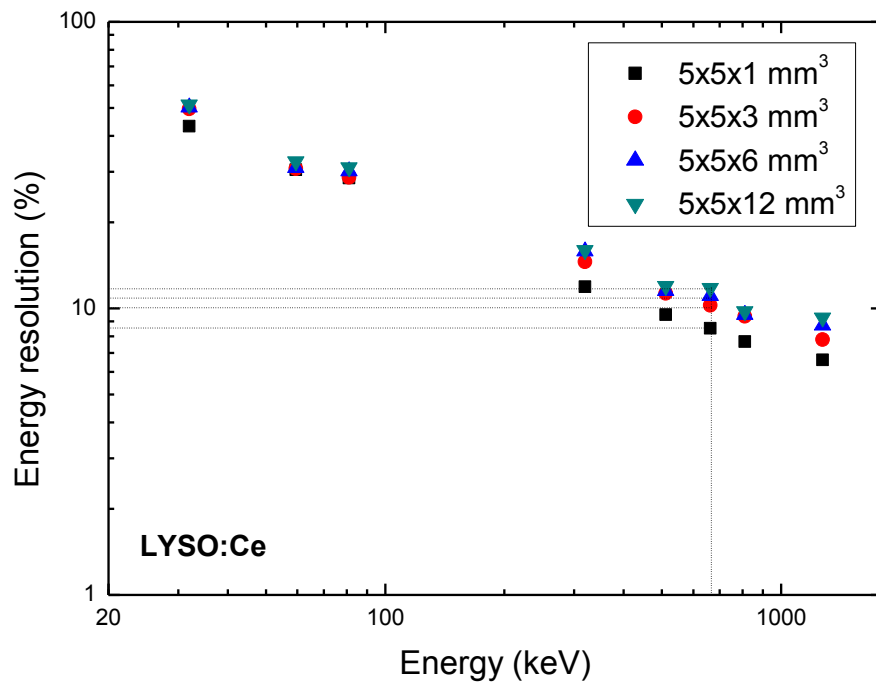
รูปที่ 4.8 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ขนาด 5×5×3 mm³



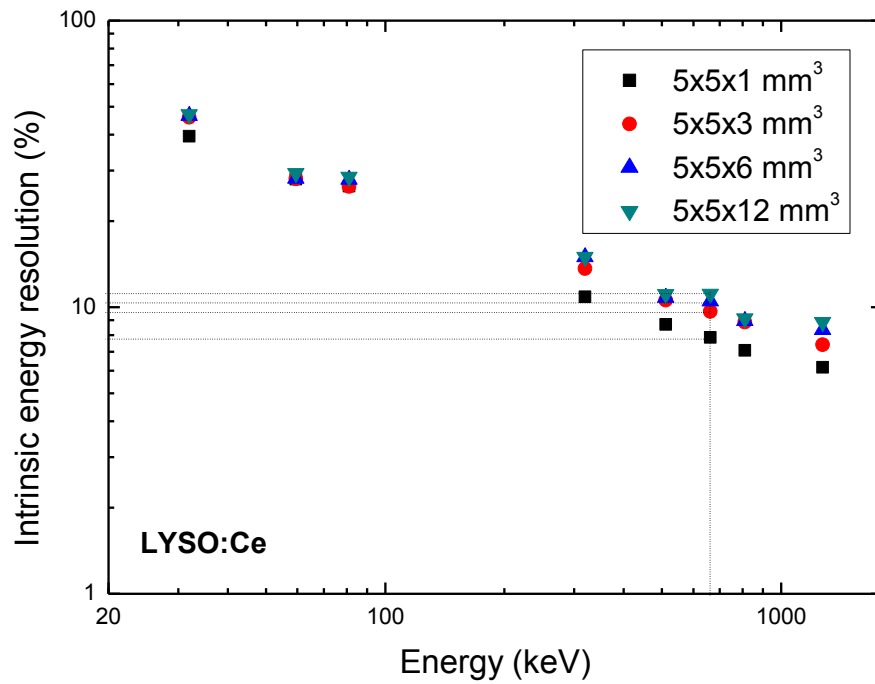
รูปที่ 4.9 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ขนาด 5×5×6 mm³



รูปที่ 4.10 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก BGO ขนาด 5x5x12 mm³

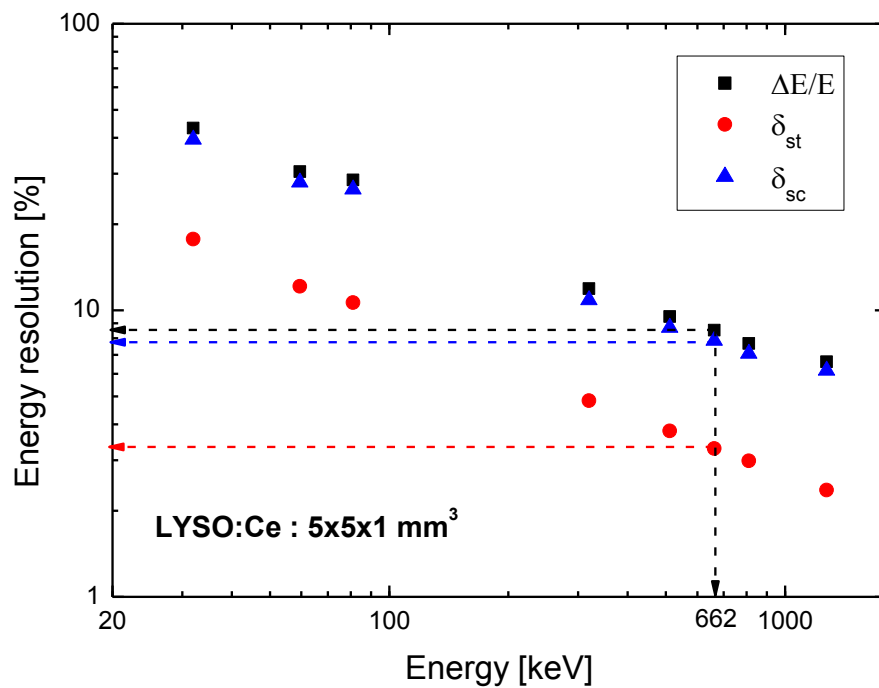


รูปที่ 4.11 การแยกชัดพลังงานรวมเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm



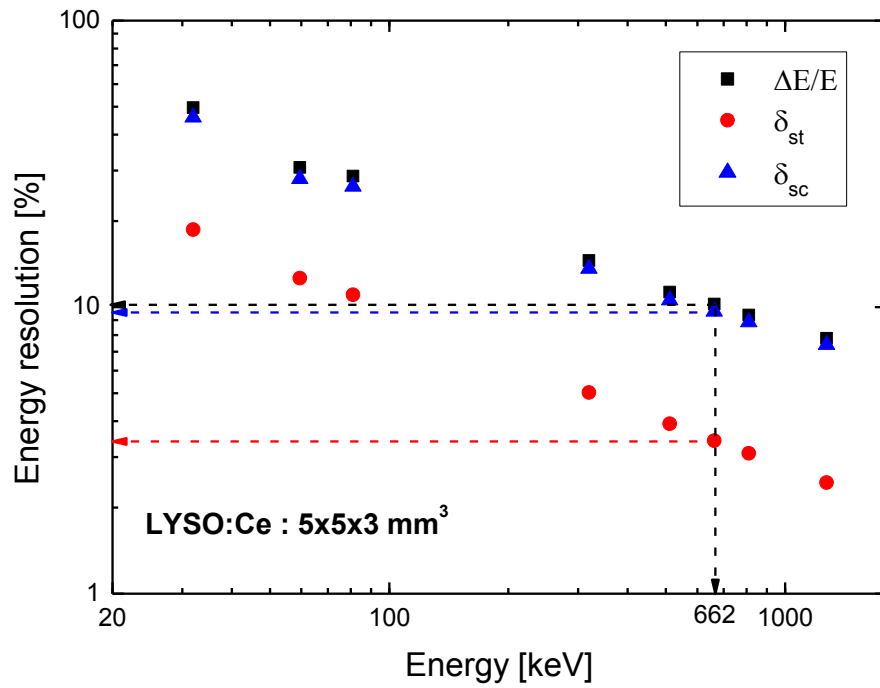
รูปที่ 4.12 การแยกขีดภายในตัวของผลึกเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce

ความสูง 1, 3, 6 และ 12 mm

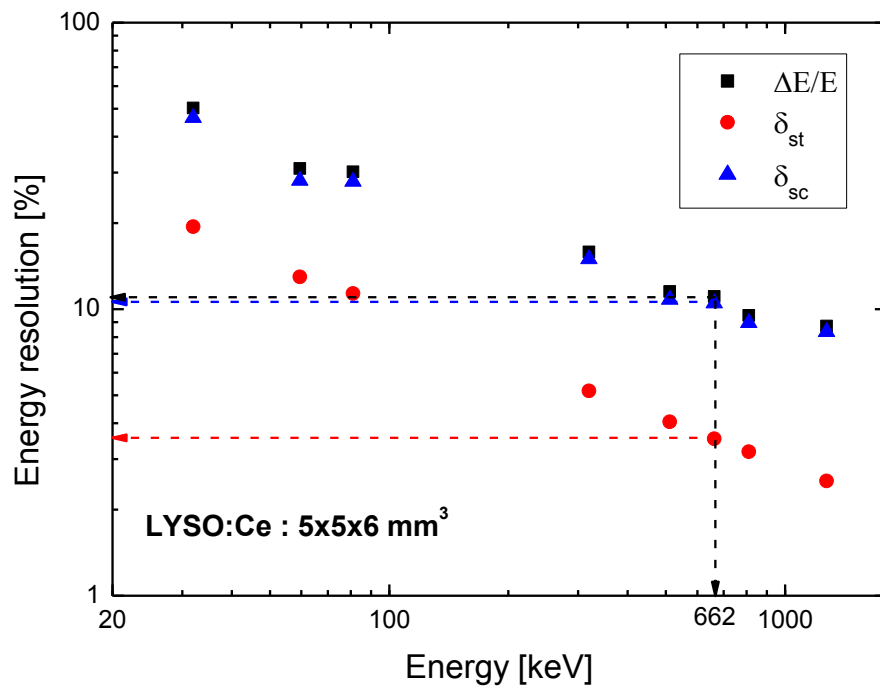


รูปที่ 4.13 การแยกขีดพลังงานรวม การแยกขีดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกขีดภายในตัวของ

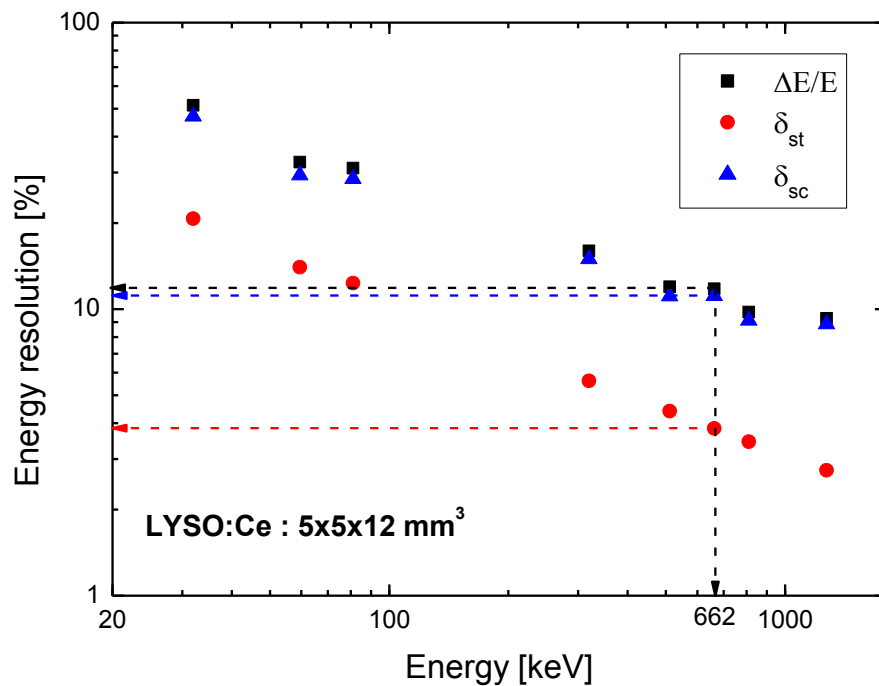
ผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ขนาด 5×5×1 mm³



รูปที่ 4.14 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ขนาด $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$



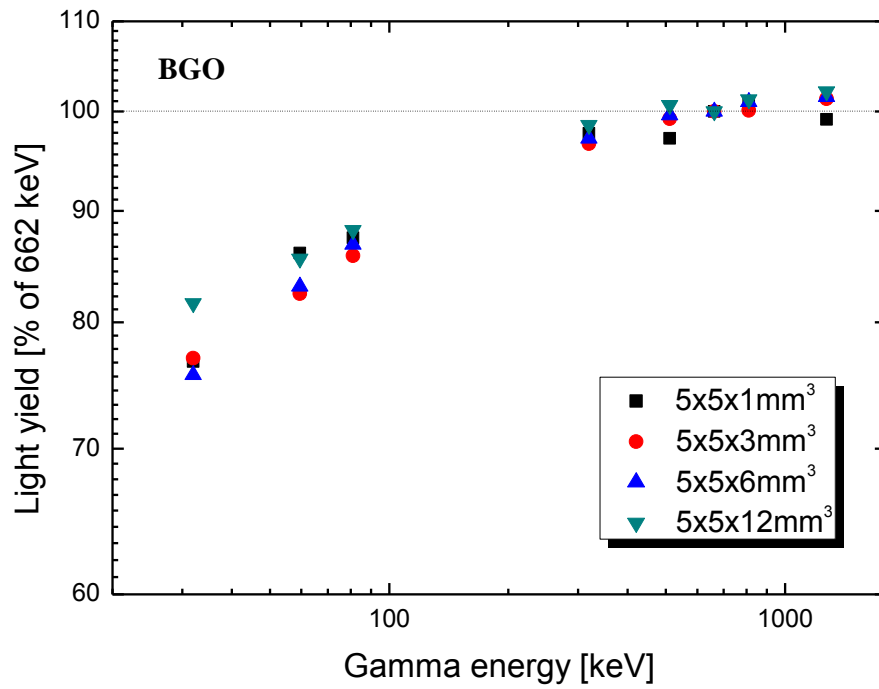
รูปที่ 4.15 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ขนาด $5 \times 5 \times 6 \text{ mm}^3$



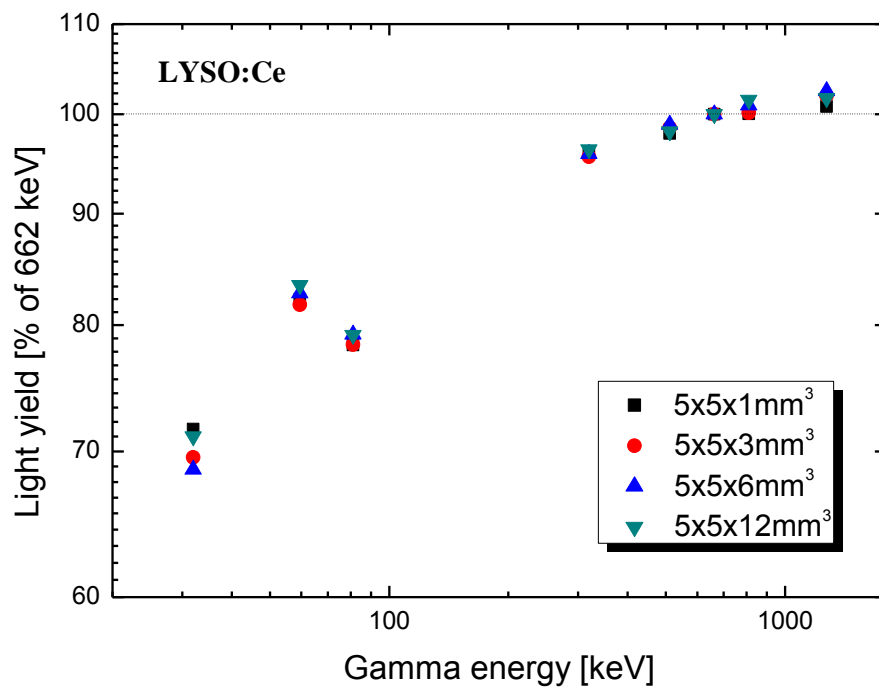
รูปที่ 4.16 การแยกชัดพลังงานรวม การแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง และการแยกชัดภายในตัวของผลึก เมื่อเทียบกับรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ ของผลึก LYSO:Ce ขนาด 5×5×12 mm³

4.2.3 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง

การที่ผลึก BGO และ LYSO มีการแยกชัดพลังงานที่แตกต่างกัน จึงนำมาสู่การศึกษาความเป็นสัดส่วนของยิลด์แสงกับพลังงานของรังสีแกมมา โดยความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงหาได้จากสัดส่วนของยิลด์แสงที่พลังงานนั้นๆ ต่อยิลด์แสงของพีคพลังงาน 662 keV ทำการหาค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงในช่วงพลังงาน 32-1274.5 keV แสดงข้อมูลดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า ผลึก BGO และ LYSO:Ce มีความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่พลังงาน 32 keV ลดลงประมาณ 24 % และ 30 % ตามลำดับ ซึ่งค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงนั้นไม่ขึ้นกับขนาดของผลึก อีกทั้งการแยกชัดพลังงานโดยรวมของผลึก LYSO:Ce มีค่าต่ำกว่าผลึก BGO เนื่องจากมีค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่สูงกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.17 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (เทียบกับพลังงาน 662 keV) ของผลึก BGO ที่ความสูงแตกต่างกัน



รูปที่ 4.18 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (เทียบกับพลังงาน 662 keV) ของผลึก LYSO:Ce ที่ความสูงแตกต่างกัน

4.2.4 สัมประสิทธิ์การสูญเสียแสง

ยิลด์ซินทิลเลชัน $Y(h)$ ของผลึกกับฟังก์ชันของความสูงของผลึกตัวอย่าง สามารถเขียนได้ดังสมการ

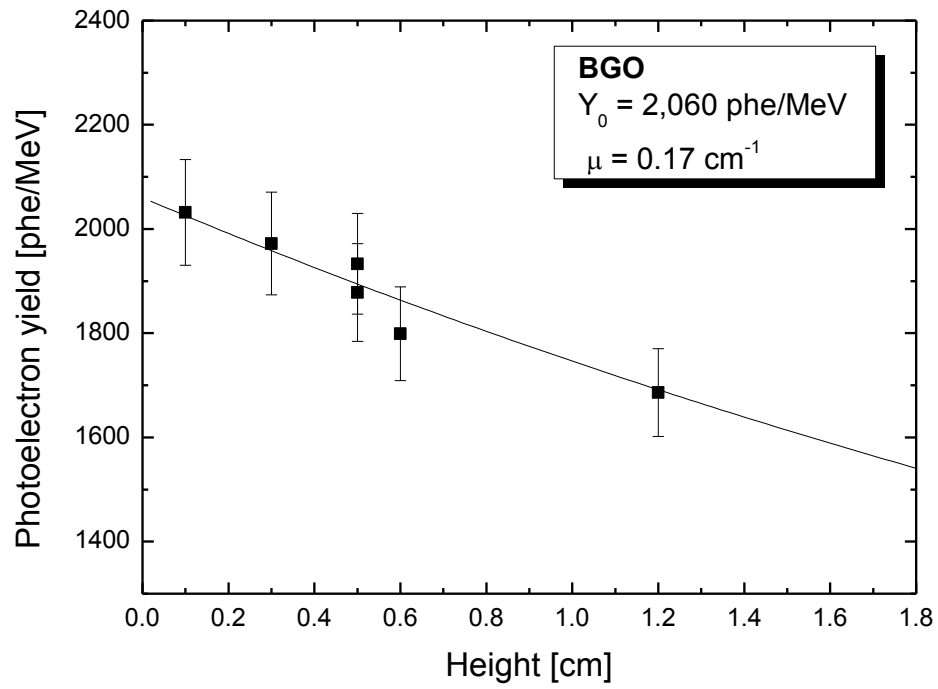
$$Y(h) = \frac{Y_0(1-e^{-2\mu h})}{2\mu h} \quad (4.4)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียแสง, Y_0 คือ ยิลด์แสงภายในที่ไม่มีการสูญเสียแสงใดๆ ภายในวัสดุ ข้อมูลแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ได้แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างยิลด์โฟโตอิเล็กตรอนและฟังก์ชันความสูงของผลึก BGO และ LYSO:Ce ตามลำดับ เป็นกราฟเส้นโค้งที่พืดได้จากสมการที่ 4.4

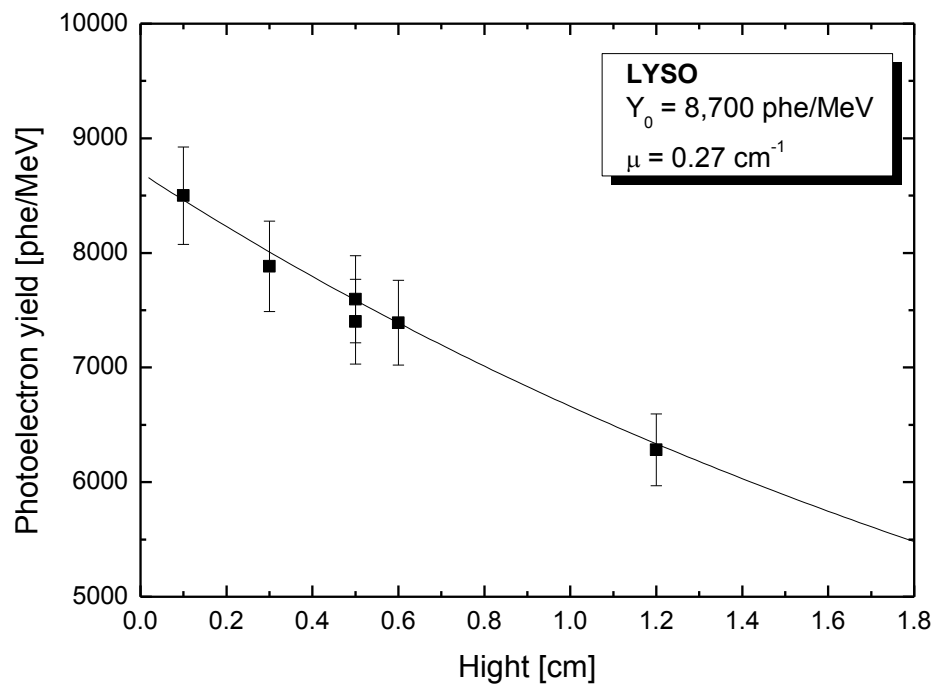
จากรูปที่ 4.19 ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนภายในที่ไม่มีการสูญเสียแสงใดๆ ภายในวัสดุ (Y_0) เท่ากับ 2,060 phe/MeV และสัมประสิทธิ์การสูญเสียแสง (μ) เท่ากับ 0.17 cm^{-1} สำหรับผลึก BGO ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าดีกว่าค่าในรายงานเอกสารอ้างอิง [24] ($Y_0 = 900-1,010 \text{ phe/MeV}$ และ $\mu = 0.74-0.89 \text{ cm}^{-1}$) สำหรับผลึก BGO จาก Photonic Materials ประเทศสกอตแลนด์

จากรูปที่ 4.20 ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนภายในที่ไม่มีการสูญเสียแสงใดๆ ภายในวัสดุ (Y_0) เท่ากับ 8,700 phe/MeV และสัมประสิทธิ์การสูญเสียแสง (μ) เท่ากับ 0.27 cm^{-1} สำหรับผลึก LYSO:Ce ตัวอย่าง

จะเห็นได้ว่าผลึก BGO มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียแสงที่ดีกว่าผลึก LYSO:Ce ($\mu = 0.17$ และ 0.27 cm^{-1} ตามลำดับ) ถึงแม้ว่าผลึก BGO ตัวอย่างในทุกความสูงจะมีค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนที่น้อยกว่าผลึก LYSO:Ce อย่างมาก แต่ในการนำผลึกไปในงานจริง เช่น ใช้กับเครื่อง PET จะใช้ผลึกที่มีความสูงประมาณ 2 cm ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียแสงจึงมีความสำคัญต่อค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างยิลด์โฟโตอิเล็กตรอนและฟังก์ชันความสูงของผลึก BGO



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างยิลด์โฟโตอิเล็กตรอนและฟังก์ชันความสูงของผลึก LYSO:Ce

4.2.5 โฟโตแฟรกชัน

โฟโตแฟรกชันหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่สเปกตรัมพลังงานเต็มกับสเปกตรัมที่วัดได้ทั้งหมดของการวัดที่พลังงานเจาะจงนั้นๆ โฟโตแฟรกชันที่พลังงานแกมมา 662 keV สำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce แสดงดังตารางที่ 4.4 และเปรียบเทียบกับอัตราส่วนภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกต่อการเกิดปรากฏการณ์ทั้งหมด (σ -ratio) ซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรม XCOM ซึ่งจะพบว่าโฟโตแฟรกชันมีค่ามากขึ้นเมื่อผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.4 โฟโตแฟรกชันที่พลังงานแกมมา 662 keV สำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce

ผลึก	ขนาด (mm ³)	โฟโตแฟรกชัน (%)	σ -ratio (%)
BGO	5×5×1	26.5	30.8
	5×5×3	34.7	
	5×6×5	39.4	
	5×5×6	40.4	
	5×12×5	41.8	
	5×5×12	42.4	
LYSO:Ce	5×5×1	20.3	22.7
	5×5×3	27.1	
	5×6×5	30.6	
	5×5×6	31.3	
	5×12×5	33.3	
	5×5×12	33.5	

4.2.6 สัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวม

สัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวม สามารถหาได้จากกราฟวัดรังสีคู่ขนานของรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงานเดียวที่ลดทอนในตัวดูดกลืน (ซึ่งในที่นี้คือผลึก BGO และ LYSO:Ce) ซึ่งเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต-เบียร์ (Lambert-Beer) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \quad (4.5)$$

เมื่อ I คือความเข้มของรังสีแกมมาเริ่มต้น I_0 คือความเข้มของรังสีแกมมาส่งผ่าน μ_m คือสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวม ρ คือความหนาแน่นของตัวดูดกลืน (สำหรับผลึก BGO และ LYSO:Ce มีค่า 7.09 และ 7.11 g/cm³ ตามลำดับ) x คือความหนาของตัวดูดกลืน และ $\mu_m \rho$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนรวมเชิงเส้น

ค่าทฤษฎีของสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวมของสารประกอบคำนวณ โดยใช้โปรแกรม XCOM จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวมจากการทดลอง ($(\mu_m)_{ex}$) และจากทฤษฎี ($(\mu_m)_{th}$) ของผลึก BGO และ LYSO:Ce ที่พลังงานแกมมา 59.5 และ 662 keV

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลรวมจากการทดลอง ($(\mu_m)_{ex}$) และจากทฤษฎี ($(\mu_m)_{th}$) ของผลึก BGO และ LYSO:Ce ที่พลังงานแกมมา 59.5 และ 662 keV

ผลึก	พลังงาน (keV)	$(\mu_m)_{ex}$ (cm ² /g)	$(\mu_m)_{th}$ (cm ² /g)	RD* (%)
BGO	59.5	3.74	3.61	3.60
	662	10.76×10^{-2}	9.98×10^{-2}	7.85
LYSO:Ce	59.5	2.26	2.31	2.39
	662	8.83×10^{-2}	8.99×10^{-2}	1.74

* RD คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าทฤษฎีและค่าที่ได้จากการทดลอง