

การศึกษาวิธีการเตรียม  $\text{CaSO}_4$  (Dy) เพื่อใช้เป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์โดสิมิเตอร์

นางจินตนา เหล่าไพบูลย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-892-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018600  
117175629



A STUDY ON PREPARATION METHODS OF  $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$  FOR USE AS

A THERMOLUMINESCENCE DOSIMETER

Mrs Jintana Laopaiboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-581-892-5



จินตนา เหล่าไพบูลย์ : การศึกษาวิธีการเตรียม  $\text{CaSO}_4$  (Dy) เพื่อใช้เป็น เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์โดสิมิเตอร์ (A STUDY ON PREPARATION METHODS OF  $\text{CaSO}_4$  (Dy) FOR USE AS A THERMOLUMINESCENCE DOSIMETER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ชยากริต ศิริอุบลัมภ์, นางนฤมล จงกิติวิทย์, 82 หน้า. ISBN 974-581-892-5

ได้ทดลองเตรียม thermoluminescence dosimeter (TLD) ชนิด  $\text{CaSO}_4$  (Dy) โดยวิธีการตกผลึกจากสารละลาย ของแคลเซียมซัลเฟต และดิสโพรเซียมออกไซด์ ในกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ร้อนพบว่า การเตรียมโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียม ร้อยละ 0.10 ถึง 0.65 โดยน้ำหนัก จะให้ความไวของ TLD ในการตอบสนองต่อรังสีสูง และพบว่าขนาดของผลึก  $\text{CaSO}_4$  (Dy) มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อรังสี จากการทดสอบคุณสมบัติการให้ thermoluminescence จากรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา พบว่าจะให้แสงออกมาโดยมี main glow peak ที่ 205 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จากการศึกษาคุณสมบัติทางรังสีต่าง ๆ ของ TLD ที่ได้ พบว่า มีค่า minimum detectable dose ประมาณ  $160 \mu\text{R}$  มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น (linearity) ระหว่างความเข้มแสง (TL) กับปริมาณรังสีที่ได้รับ (exposure dose) ในช่วง 50 ถึง  $1 \times 10^5$  mR ตีมาก มี sensitivity สูงสุดที่พลังงานของโฟตอน ประมาณ 45 keV และสูงเป็นประมาณ 9 เท่า เมื่อเทียบกับ sensitivity ที่พลังงานของโฟตอนจากโคบอลต์-60 ปริมาณรังสี 10 R มี sensitivity สูงกว่า TLD ชนิด LiF (ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ครั้ง) ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์จากต่างประเทศ ประมาณ 1.8 เท่า และมี fading ประมาณ 1.3 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน

ภาควิชา ..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา ..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา ..... 2535

ลายมือชื่อนิสิต ..... วิมล นวัตกรรม  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... อ.ชยากริต ศิริอุบลัมภ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... ผศ.ชยากริต ศิริอุบลัมภ์

## C317688 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : TLD/CaSO<sub>4</sub>(Dy)/X-RAY DOSIMETER/X-RAY DOSIMETER

JINTANA LAOPAIBOON : A STUDY ON PREPARATION METHODS OF CaSO<sub>4</sub> (Dy) FOR USE AS A THERMOLUMINESCENCE DOSIMETER. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHYAGRIT SIRIUPATHUM, M.Eng. THESIS CO-ADVISOR; NARUMOL CHONGKITIVITYA, B.Sc. 82 PP. ISBN 974-581-892-5

Experiments on preparation of CaSO<sub>4</sub> (Dy) as the thermoluminescence dosimeter (TLD) was conducted by recrystallization from solutions of CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O and Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixtures in boiled concentrated H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. It was found that concentration of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from 0.10 to 0.65 wt%Dy gave TLD of high sensitivity. The sensitivity found to depend on the grain size of CaSO<sub>4</sub> (Dy). The main glow peak was found to be at 205 °C with minimum detectable dose of about 160 µR. The TL intensity was linearly proportional to exposure dose in the range of 50 to 1 x 10<sup>5</sup> mR. The highest sensitivity at the photon energy of 45 keV was 9 times higher than that of from <sup>60</sup>Co photons. The sensitivity was 18 times higher than commercial available LiF (TLD) for exposure dose of 10 R from <sup>60</sup>Co photon. The CaSO<sub>4</sub> (Dy) was found to have fading of 1.3 % per month.

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....  
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....  
ปีการศึกษา.....2535.....

ลายมือชื่อนิติต.....วิมล.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ และสนับสนุนจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ และ คุณณมล จงกิติวิทย์ ขอขอบพระคุณอย่างสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำ ปรึกษา และตรวจสอบรายงานการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสุธี จำนงชอบ ผู้อำนวยการกองป้องกันอันตรายจากรังสี คุณกิจจา จงกิติวิทย์ หัวหน้าฝ่ายตรวจสอบมาตรฐานเครื่องตรวจวัดรังสี และอาจารย์ประจำภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ทุกท่าน ที่ได้เป็นกำลังใจ และสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ Dr. Toshiyuki Nakajima , Director Division of Radioecology ที่กรุณาเอื้อเฟื้อ จัดส่งเอกสารเชิงวิชาการมาให้

ขอขอบคุณ อาจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติทางรังสี ทั้งยังช่วยเหลือในการออกแบบตัดแปลงเครื่องตูดอากาศ สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณวิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อ variac transformer สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณวิวิธ ธรรมวีระพงษ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือวาดรูปในรายงานการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อ บิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ความเมตตา กรุณา เป็นกำลังใจ ให้การศึกษาของผู้เขียนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา .....	1
1.2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.5 สถานที่ทำการวิจัย .....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย .....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5

บทที่ 2 เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดสิมิเตอร์ คุณสมบัติ และวิธีการเตรียม

2.1 เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดสิมิเตอร์ .....	6
2.2 คุณสมบัติของ TLD .....	7
2.3 วิธีการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ .....	22

บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผลึก TLD ชนิด $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ..	23
--	----

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ .....	24
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	34
บทที่ 4	ผลการวิจัย	
4.1	การศึกษา glow curve .....	44
4.2	การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ดิสโพรเซียมออกไซด์ ( $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ) ที่มีต่อความไว (sensitivity) ในการตอบสนองต่อรังสี .....	44
4.3	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึก ที่มีต่อความไวในการตอบสนอง ของรังสี .....	45
4.4	การศึกษา linearity .....	45
4.5	การหาค่าปริมาณรังสีต่ำสุด ที่ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ สามารถวัดได้ ( minimum detectable dose) .....	45
4.6	การศึกษา relative response ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมได้ ....	46
4.7	การศึกษา เปรียบเทียบความไวในการตอบสนองต่อรังสี ระหว่าง TLD ชนิด $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมได้ กับ $\text{LiF}$ (TLD 700) ที่ผลิตโดยบริษัท Harshaw .....	46
4.8	การศึกษาผลของการ anneal $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ หลังฉายรังสี ก่อนนำไป อ่านค่าสัญญาณแสง .....	46
4.9	การศึกษา fading .....	46
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	73
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	76



สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม .....	77
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของ TLD ชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตโดย Harshaw Chemical Company .....	81
ประวัติผู้เขียน .....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดง linearity range ของ TLD ชนิดต่าง ๆ .....	12
4.1 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) จัดระบบแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ .....	50
4.2 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมผลึกครั้งที่ 1) .....	52
4.3 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมผลึกครั้งที่ 2) .....	54
4.4 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมผลึกครั้งที่ 3) .....	56
4.5 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (จากการเตรียมผลึกทั้ง 3 ครั้ง)..	58
4.6 แสดง sensitivity ที่ขนาดของผลึกต่าง ๆ กัน เมื่อนำไปฉายรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 10 R .....	63
4.7 แสดง linearity ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่เตรียมจาก 0.44 wt%Dy นำไปฉายรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 50 - 1x10 <sup>5</sup> mR .....	65
4.8 แสดงค่าปริมาณแสง (nC) ที่ได้จากการนำ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่เตรียมได้โดย 0.44 wt%Dy ไปฉายรังสีจาก Co-60 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ กัน .....	67
4.9 แสดงผลของการศึกษา relative response เทียบกับพลังงานของโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 200 mR ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่เตรียมโดย 0.22 wt%Dy .....	69
4.10 แสดงการเปรียบเทียบ sensitivity ของ TLD ชนิด CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่เตรียมโดย 0.22 wt%Dy กับ LiF (TLD 700) (ผ่านการใช้งานมาแล้ว 1 ครั้ง) ที่ผลิตโดยบริษัท Harshaw ขนาดผลึก -80 + 200 mesh เท่ากัน และฉายรังสีแกมมา 10 R .....	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงค่าสัญญาณแสงที่ได้จากการนำ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ 0.22 wt%Dy ฉายรังสีแกมมา ด้วยปริมาณ 200 mR แล้วนำมาอ่านค่าที่เวลาต่าง ๆ กัน .....	71
ก.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ TLD ชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตโดยบริษัท Harshaw Chemical Company .....	81

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอม TLD เมื่อได้รับรังสี .....	7
2.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลง heating rate ที่มีผลต่อรูปร่างของ glow curve ..	9
2.3 แสดงผลของปริมาณรังสี ที่มีต่อ glow curve .....	10
2.4 glow curve ของ LiF(TLD-100) ซึ่งนำไปอาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน และรังสีแกมมา .....	10
2.5 แสดงตัวอย่าง linearity ของ TL ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ .....	12
2.6 แสดง energy response ของ CaSO <sub>4</sub> และ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	13
2.7 แสดง thermoluminescence glow curve ของ CaSO <sub>4</sub> ที่กระตุ้นด้วย rare earth ion ต่าง ๆ กัน 14 ชนิด .....	15
2.8 ภาพถ่ายการกระจาย ขนาดของรูปผลึก CaSO <sub>4</sub> (Dy) จากกล้องจุลทรรศน์ ( x 10 เท่า ) .....	16
2.9 ลักษณะ glow curve ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่ได้จากการฉาย รังสีแกมมา จาก <sup>137</sup> Cs .....	17
2.10 แสดง glow curve ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) และ CaSO <sub>4</sub> (Tm) ที่ปริมาณรังสีต่างๆ ..	18
2.11 แสดง linearity ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) เปรียบเทียบกับ CaSO <sub>4</sub> (Tm) .....	19
2.12 แสดง Glow curve ของ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ที่เก็บไว้ในที่มืด อุณหภูมิห้อง ทั้งไว้ที่ เวลาต่าง ๆ กัน หลังฉายรังสี .....	20
2.13 แสดง energy response of CaSO <sub>4</sub> (Tm) dosimeter .....	21
3.1 แสดงการบรรจุ CaSO <sub>4</sub> (Dy) ลงในแคปซูลด้วย dispenser สำหรับการบรรจุ ..	24
3.2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในของ dispenser ที่ใช้ในการอ่าน TLD .....	25
3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุ TLD .....	25
3.4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบ ของเครื่องอ่านค่า TL .....	26
3.5 แสดงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ที่ให้กับ planchet ของเครื่องอ่าน TLD model 2000 A ของบริษัท Harshaw .....	27

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แผนภาพแสดงระบบวัดแสง ( The light detection system ) ของเครื่องอ่าน TLD .....	28
3.7 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติ TLD .....	30
3.8 แสดงหัววัดรังสี NPL ionization และแหล่งกำเนิดรังสี โคบอลต์-60 .....	32
3.9 แสดงหัววัดรังสี NP-2100 ionization และแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ .....	32
3.10 แสดง Ionex Dosemaster ที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 เพื่อกำหนดปริมาณรังสีที่ให้กับ TLD .....	33
3.11 แสดง NP-2100 electrometer ที่ใช้ในการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ เพื่อกำหนดปริมาณรังสี ที่ให้กับ TLD .....	33
3.12ก แผนภาพแสดงการจัดระบบการเตรียมผลึกแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ .....	36
3.12ข แสดงการจัดระบบการเตรียมผลึกแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ .....	36
3.13 แผนภาพแสดงการจัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ .....	37
4.1 แสดง glow curve ที่ได้จากการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ 0.22 wt%Dy จัดระบบแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ ฉายรังสีจากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 200 mR ..	47
4.2 แสดง glow curve ที่ได้จากการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ 0.22 wt%Dy จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ ฉายรังสีจาก โคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 200 mR ...	48
4.3 แสดง glow curve ที่ได้จากการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ 0.22 wt%Dy จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ ฉายรังสีเอกซ์ พลังงาน 39 keV ด้วยปริมาณรังสี 200 mR .....	49
4.4 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมโดย 0.22 wt%Dy จัดระบบแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ ...	51
4.5 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ เตรียมโดยจัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมครั้งที่ 1).....	53

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ เตรียมโดยจัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมครั้งที่ 2) ....	55
4.7 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ เตรียมโดยจัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ (เตรียมครั้งที่ 3) ....	57
4.8 แสดงการตอบสนองต่อรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 10 R ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ เตรียมโดยจัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ จากการเตรียมผลึกทั้ง 3 ครั้ง .....	59
4.9 ภาพถ่ายของผลึก $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมได้จากการทดลอง โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียม 0.22 wt%Dy ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า .....	60
4.10 แสดง glow curve ที่ได้จากการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณดิสโพรเซียม(Dy) จัดระบบแบบไม่ใช้เครื่องดูดอากาศ ฉายรังสีจากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 10 R .....	61
4.11 แสดง glow curve ที่ได้จากการเตรียม $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณดิสโพรเซียม(Dy) จัดระบบแบบใช้เครื่องดูดอากาศ ฉายรังสีจากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 10 R .....	62
4.12 แสดง sensitivity ที่ขนาดของผลึกต่าง ๆ กัน เมื่อนำไปฉายรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี 10 R .....	64
4.13 แสดง linearity ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมจาก 0.44 wt%Dy นำไปฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ด้วยปริมาณรังสี $50 - 1 \times 10^5$ mR .....	66
4.14 แสดง calibration curve เพื่อหาค่า minimum detectable dose ...	68
4.15 กราฟแสดงการศึกษา relative response เทียบกับพลังงานของรังสีแกมมา จากโคบอลต์-60 ที่ปริมาณรังสี 200 mR ของ $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ที่เตรียมโดย 0.22 wt%Dy .....	70

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.16 แสดง glow curve เปรียบเทียบผลจากการ anneal หลังฉายรังสี ก่อนนำไป  
 อ่านค่าปริมาณแสง กับผลของการไม่ anneal ของ  $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ..... 72