



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

Quantitative Identification of Irradiated Garlic Powder by Thermoluminescence
Technique

นามผู้วิจัย

นางสาวอาทิตยา สุขเกษม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สดประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

Quantitative Identification of Irradiated Garlic Powder by Thermoluminescence Technique

โดย

นางสาวอาทิตย์ยา สุขเกษม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาทิตยา สุขเกษม 2553: การตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป
ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา
สุดประเสริฐ, Ph.D. 92 หน้า

เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้ตรวจพิสูจน์อาหารฉายรังสี ประเภท
เครื่องเทศ สมุนไพรและผลไม้แห้ง ตามมาตรฐาน โคเด็กซ์ อาศัยหลักการตรวจวัดสัญญาณ TL ของแร่ที่เป็น
องค์ประกอบ หรือปนเปื้อนอยู่ในอาหาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค TL
ในการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณเพื่อประเมินปริมาณรังสีดูดกลืน เริ่มจากการสกัดแยก
สารประกอบอนินทรีย์ ประเภทซิลิเกตออกจากตัวอย่างกระเทียมผง 3 ชนิดโดยอาศัยความแตกต่างของความ
หนาแน่นตามวิธีของคณะกรรมการยุโรปว่าด้วยการมาตรฐาน (CEN) เมื่อตรวจสอบชนิดของแร่ประกอบใน
ตัวอย่างกระเทียมผงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และวิเคราะห์ความเข้มของสัญญาณ TL จากแร่ที่
สกัดได้ด้วยเครื่องอ่านสัญญาณ TL รุ่น Harshaw 4500 ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดมี
ควอตซ์ (SiO_2) เป็นแร่ประกอบหลักในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง โดยความเข้มของ
สัญญาณ TL มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักควอตซ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาความถูกต้องของการตรวจสอบกระเทียมผงฉาย
รังสีเชิงคุณภาพโดยพิจารณาค่า TL ratio ($G1/G2$) ระหว่างสัญญาณ TL ก่อน ($G1$) และหลังฉายรังสี 1 กิโลเกรย์
($G2$) ที่ใช้เป็นปริมาณรังสีดูดกลืนอ้างอิง ตามข้อกำหนดในวิธีมาตรฐาน EN-1788 ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี
จะให้ค่า TL ratio มากกว่า 0.5 ขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีมีค่าน้อยกว่า 0.1 พบว่าการตรวจสอบ
สามารถใช้ยืนยันกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีในช่วง 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ได้อย่างถูกต้อง แม้เก็บตัวอย่างไว้นาน 3
เดือน การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL ในตัวอย่างกระเทียมผง พบว่ามี
ลักษณะเป็นแบบไตรโนเมียล โดยค่า TL ratio มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่สูงขึ้นในช่วง 0 ถึง 4 กิโลเกรย์
จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือลดลงในบางช่วงปริมาณรังสีจาก 4 ถึง 10 กิโลเกรย์ ในขณะที่ค่า $G1$ มี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ตั้งแต่ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า $G1$ ให้ค่า R^2 ที่สูงกว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า TL
ratio อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมผง พบว่าสามารถใช้ค่า TL ratio ในการ
วิเคราะห์เชิงปริมาณได้อย่างถูกต้องในช่วงปริมาณรังสีระหว่าง 0 ถึง 4 กิโลเกรย์

Atitaya Sookkasem 2010: Quantitative Identification of Irradiated Garlic Powder by Thermoluminescence Technique. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanwisa Sudprasert, Ph.D. 92 pages.

Thermoluminescence (TL) is one of the most popular techniques used for identification of irradiated foods such as spices, herbs and dried fruits in accordance with the Codex Standards. TL analysis is based on the determination of TL of adhering or contaminating minerals in foods. The purpose of this research is to investigate how TL technique can be used to identify irradiated garlics and estimate the actual absorbed dose. The mineral separation procedure recommended by the European Committee for Standardization (CEN) was followed to separate silicate minerals from samples by density separation. X-ray diffraction (XRD) spectroscopy was employed to investigate the type of minerals present in garlic powders. TL of separated minerals were analysed using a Harshaw 4500 TL reader. The results showed that the mineral composition of garlic powders was mainly quartz (SiO_2) of varying amounts depending on the type of garlics. The TL intensity linearly increased with the amount of quartz present in the samples. The accuracy of qualitative analysis based upon TL ratio ($G1/G2$) of two successive glow curve before ($G1$) and after ($G2$) irradiated with a reference absorbed dose of 1 kGy according to the standard method (EN 1788) was examined using garlic powders irradiated with gamma ray at the dose of ranging from 0 to 10 kGy. The result showed that TL ratio was indeed higher than 0.5 for all irradiated samples while that of non-irradiated was less than 0.1. TL technique could correctly identify irradiated samples even after 3 months of ambient storage. The dose-response curves between the absorbed doses and TL signals were determined. The TL signals were considered in terms of TL ratio and first glow intensity. TL ratio increased with the increasing absorbed doses ranging from 0 to 4 kGy, then slightly increases or decreases in TL ratio at 4 to 10 kGy were observed, whereas the $G1$ values increased with the increasing doses from 0 to 10 kGy. Those relationships were found as trinomial functions. Correlation coefficients (R^2) between absorbed doses and $G1$, using a quadratic fit, were higher than those of TL ratios. However, the determination of absorbed dose in blind garlic samples revealed the effectiveness of applying TL ratios for quantitative identification of garlic powder irradiated at the doses of 0 to 4 kGy

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วันวิสา สุขประเสริฐ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำปรึกษาในการเรียน การวางแผนงาน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ที่ให้คำแนะนำสำหรับทุก ๆ เรื่องอย่างเต็มที่

กราบขอบพระคุณ รศ.พรณี พักคง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้ในเรื่องที่ไม่เคยรู้มาก่อนอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ศูนย์บริการฉายรังสีแกมมาและวิจัยนิวเคลียร์เทคโนโลยี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงขอขอบคุณบริษัท ที เอ็ม พูลส์ จำกัด ที่คอยสนับสนุนในเรื่องของตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนการผลิตบัณฑิตวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับปริญญาโท จากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีร่วมกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวที่ได้อบรม ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

อาทิตยา สุขเกษม

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	33
ผล	33
วิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
สรุป	56
ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	59
ภาคผนวก	63
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	มาตรฐานการตรวจสอบอาหารฉายรังสีของ CEN	9
2	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี	10
3	ความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL	33
4	ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมผง	34
5	ปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดได้จากตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด เมื่อใช้ตัวอย่างเริ่มต้นประมาณ 60 กรัม	35
6	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S1	38
7	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S2	39
8	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S3	40
9	สัญญาณ TL แสดงค่า G1 ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ที่ ฉายรังสีปริมาณ 0-10 กิโลเกรย์	41
10	สัญญาณ TL แสดงค่า TL ratio ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ที่ฉายรังสีปริมาณ 0-10 กิโลเกรย์	42
11	สัญญาณ TL แสดงค่า G1 ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด ที่ฉายรังสี ปริมาณ 0-10 กิโลเกรย์	42
12	สัญญาณ TL แสดงค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด ที่ฉายรังสี ปริมาณ 0-10 กิโลเกรย์	43
13	ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง unknown S2	47
14	ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง unknown S3	48
15	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือนหลังการฉายรังสี	49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S2 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือนหลังการฉายรังสี	49
17	ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S3 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือนหลังการฉายรังสี	50
ตารางผนวกที่		
1	ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 0.5 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	70
2	ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 1 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	71
3	ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 3 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	72
4	ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	73
5	ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S2 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	74
6	ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S3 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ	75

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เครื่องหมายการฉายรังสี	6
2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	13
3 การเกิด X-ray และการเกิด Auger Electrons	14
4 รูปจำลองแสดงระดับพลังงานในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ ของการเรืองแสงความร้อน	16
5 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านสัญญาณ TL	18
6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับฉายรังสี (ก) ตัวอย่างกระเทียมผงบรรจุของซีปพลาสติก (ข) ตำแหน่งการวางตัวอย่างใน container (ค) เครื่องฉายรังสี Gammacell 220	25
7 ขั้นตอนการสกัดแยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่าง (ก) การแยกสารอินทรีย์ออกในขั้นต้น (ข) การแยกโดยอาศัย density gradient ด้วยสารละลายโซเดียม โพลีทังสเตท	27
8 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (ก) อุปกรณ์สำหรับใช้เตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ด้วย XRD (ข) ขั้นตอนการเกลี่ยให้ผิวหน้าของเพลทมีความสม่ำเสมอ	27
9 แสดงการนำตัวอย่างเข้าเครื่อง XRD	28
10 แสดง aluminium disc ที่บรรจุสารประกอบซิลิเกตที่สกัดแยกได้สำหรับวัดสัญญาณ TL	29
11 เครื่องอ่านสัญญาณ TL ยี่ห้อ Harshaw รุ่น 4500	30
12 เครื่องฉายรังสีแกมมา ยี่ห้อ JL Shepherd รุ่น Mark I (Cs-137)	30
13 แสดง XRD สเปกตรัมของตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์	36
14 แสดง XRD สเปกตรัมของตัวอย่างกระเทียมผง S1 S2 และ S3 ตัวอย่างควอตซ์ และตัวอย่างเฟลสปาร์	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า TL ratio ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 1 มิลลิกรัม	44
16	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 1 มิลลิกรัม	44
17	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด	45
18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า G1 ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด	46
ภาพผนวกที่		
1	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี	76
2	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 เดือน หลังการฉายรังสี	78
3	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 2 เดือน หลังการฉายรังสี	80
4	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 3 เดือน หลังการฉายรังสี	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
5 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์ บริสุทธิ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (ก1, ก2) 2 (ข1, ข2) 4 (ค1, ค2) 6 (ง1, ง2) 8 (จ1, จ2) และ 10 (ฉ1, ฉ2) กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 เดือน หลัง การฉายรังสี	84
6 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์ บริสุทธิ์น้ำหนัก 0.5 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (ก1, ก2) 2 (ข1, ข2) 4 (ค1, ค2) 6 (ง1, ง2) 8 (จ1, จ2) และ 10 (ฉ1, ฉ2) กิโลเกรย์	86
7 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์ บริสุทธิ์น้ำหนัก 1 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (ก1, ก2) 2 (ข1, ข2) 4 (ค1, ค2) 6 (ง1, ง2) 8 (จ1, จ2) และ 10 (ฉ1, ฉ2) กิโลเกรย์	88
8 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์ บริสุทธิ์น้ำหนัก 3 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (ก1, ก2) 2 (ข1, ข2) 4 (ค1, ค2) 6 (ง1, ง2) 8 (จ1, จ2) และ 10 (ฉ1, ฉ2) กิโลเกรย์	90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	แทนด้วย Coulomb
G 1	แทนด้วย first glow Glow 1
G 2	แทนด้วย Glow 2
Gy	แทนด้วย Gray
kGy	แทนด้วย Kilogray
Q	แทนด้วย ประจุไฟฟ้า
TL	แทนด้วย Thermoluminescence
TLD	แทนด้วย Thermoluminescence dosimeter
XRD	แทนด้วย X-ray diffraction
M	แทนด้วย Molar
ml	แทนด้วย mililitre
μ l	แทนด้วย microlitre

การตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

Quantitative Identification of Irradiated Garlic Powder by Thermoluminescence Technique

คำนำ

ปัจจุบันอาหารฉายรังสีได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการฉายรังสีอาหารสามารถช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาอาหารไว้ได้นานขึ้น ช่วยยับยั้งการงอกของพืชผักในระหว่างการเก็บรักษา ช่วยควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง และยังสามารถทำลายเชื้อโรคพยาธิที่อยู่ในอาหารได้โดยไม่ทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทั้งนี้ปริมาณรังสีที่ฉายขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารนั้น

อาหารฉายรังสีได้รับความนิยมในหลายประเทศทั่วโลก ทั้งในทวีปอเมริกา ยุโรป และเอเชีย เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ รัสเซีย จีน รวมทั้งไทย ครอบคลุมผลิตภัณฑ์อาหารประเภทต่าง ๆ เช่น ข้าวสาลี มันฝรั่ง ผัก ผลไม้ เครื่องเทศและสมุนไพร เนื้อหมู เนื้อวัว เนื้อปลา กุ้ง และเนื้อสัตว์ปีก เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันอาหารฉายรังสีจากประเทศไทยได้รับอนุญาตให้นำเข้าและจำหน่ายในตลาดสหภาพยุโรป โดยต้องมีการปฏิบัติตามเงื่อนไขภายใต้ Directive 1999/2/EC และ Directive 1999/3/EC ได้แก่ ต้องมีฉลากกำกับอาหารฉายรังสี มีเอกสารรับรองโดยระบุชื่อสถานที่ตั้ง และจัดเก็บบันทึกข้อมูลการใช้รังสีเป็นเวลา 5 ปี และสถานที่ฉายรังสีต้องได้รับการตรวจสอบรับรองและขึ้นบัญชีจากผู้เชี่ยวชาญของอียูเสียก่อน ด้วยเหตุนี้การส่งออกอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปไปยังต่างประเทศ จำเป็นต้องตรวจสอบเพื่อควบคุมให้อาหารหรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปที่ผ่านการฉายรังสี ต้องมีฉลากกำกับแสดงการฉายรังสีให้ถูกต้อง และโดยข้อกำหนดการฉายรังสีอาหารในประเทศไทย จะต้องดำเนินการในสถานที่และเครื่องมือที่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา และจะต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 103 (พ.ศ.2529) เรื่องกำหนดกรรมวิธีการผลิตอาหารซึ่งมีการใช้กรรมวิธีการฉายรังสี เช่น แหนมฉายรังสี ใช้ปริมาณรังสีเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน 4 กิโลเกรย์ เครื่องเทศฉายรังสีใช้ปริมาณรังสีเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ (กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2548)

ดังนั้นการตรวจสอบอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อการติดฉลากกำกับว่าเป็นอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายรังสี หรือแม้แต่มือถือประกอบที่ผ่านการฉายรังสี จึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง โดยเฉพาะในการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ ซึ่งในการตรวจสอบนอกจากจะต้องการทราบข้อมูลเชิงคุณภาพแล้วข้อมูลเชิงปริมาณก็มีความสำคัญ ทั้งนี้เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารนั้นได้ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่เหมาะสมและบรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีหรือไม่

วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีมีอยู่หลายวิธีทั้งวิธีทางกายภาพและชีวภาพ เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จัดเป็นวิธีทางกายภาพวิธีหนึ่งที่เหมาะสมกับการตรวจสอบอาหารที่สามารถสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิติเคตออกมาได้ โดยถนนอมเกียรติและคณะ (2551) ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค TL ตามวิธีมาตรฐาน EN 1788 พบว่าเทคนิค TL สามารถยืนยันการฉายรังสีของตัวอย่างเครื่องปรุงรสได้อย่างถูกต้อง แม้เก็บตัวอย่างไว้นาน 90 วัน ซึ่งงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค TL ในการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณรังสีที่ตัวอย่างกระเทียมผงได้รับได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของแร่ซิลิเกต ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระเทียมผงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Rays Diffraction, XRD)
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ TL กับปริมาณของแร่ซิลิเกต ในตัวอย่างกระเทียมผงทั้งที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณ TL กับปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมผง เพื่อประเมินศักยภาพของการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณด้วยเทคนิค TL
4. ศึกษาผลของระยะเวลาหลังการฉายรังสีที่มีต่อสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

การตรวจเอกสาร

อาหารฉายรังสี

เนื่องจากมาตรฐานอาหารสากลว่าด้วยเรื่อง “อาหารฉายรังสี” มีการปรับเปลี่ยนข้อกำหนด จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่อง อาหารฉายรังสี เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล กระทรวงสาธารณสุขโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา จึงได้ยกเลิกประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 103 (พ.ศ. 2549) เรื่อง กำหนดกรรมวิธีการผลิตอาหารซึ่งมีการใช้กรรมวิธีการฉายรังสี ลงวันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 และออกประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่อง อาหารฉายรังสี ซึ่งประกาศดังกล่าวมีการปรับแก้ไขสาระสำคัญบางประการ เช่น คำนิยาม การแสดงฉลาก ข้อกำหนดเกี่ยวกับปริมาณรังสีสูงสุดที่อนุญาต และข้อกำหนดเกี่ยวกับการฉายรังสีซ้ำโดยมีสาระสำคัญแสดงในภาคผนวกที่ 1

ด้วยเหตุนี้การส่งออกอาหารหรือผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปไปยังต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศสมาชิกอียู จำเป็นต้องตรวจสอบเพื่อควบคุมให้อาหารหรือส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปที่ผ่านการฉายรังสีต้องติดฉลากกำกับแสดงการฉายรังสีให้ถูกต้อง โดยหน่วยงานรับผิดชอบของไทยสามารถแจ้งความประสงค์และยื่นเอกสารข้อมูลให้ Directorate-General of Health and Consumer Protection (DG-SANCO) คณะกรรมาธิการยุโรปพิจารณา ก่อนส่งคณะเจ้าหน้าที่หน่วยงาน FVO มาตรวจสอบ รับรองและอนุญาต ทั้งนี้ ภาครัฐต้องส่งเสริมศักยภาพการผลิตอาหารฉายรังสีของผู้ประกอบการไทยไปพร้อมกับผลักดันให้หน่วยงานผู้เชี่ยวชาญของอียูให้การรับรองแหล่งผลิตหรือโรงงานฉายรังสีอาหาร ซึ่งหากสำนักงานอาหารและสัตวแพทย์ (Food and Veterinary Office หรือ FVO) ของอียูรับรองและอนุญาตก็จะช่วยขยายโอกาสการส่งออกสินค้าอาหารไทยไปอียูได้มากขึ้น และลดปัญหาการกักกันสินค้าอาหารไทยในอนาคต

ระเบียบหลักเกี่ยวกับอาหารฉายรังสีในอียูได้แก่

1. Directive 1999/2/EC เกี่ยวกับกฎหมายของประเทศสมาชิก อียู เรื่องอาหารและส่วนผสมอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งระบุขั้นตอนของกรรมวิธีฉายรังสี การติดฉลาก และเงื่อนไขในการอนุญาตให้ฉายรังสีอาหาร โดยกำหนดให้อนุญาตให้ฉายรังสีอาหารได้ เมื่อมีความจำเป็นทางเทคโนโลยี (reasonable technological need) ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค และจะต้องไม่ใช่ การฉายรังสีแทนขั้นตอนการรักษาสุขอนามัยในการผลิต (hygiene and health practices for good manufacturing) กำหนดให้ติดฉลากอาหารที่ผ่านการฉายรังสีว่า "irradiated" หรือ "treated with ionizing radiation" หากเป็นอาหารไม่ได้อยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่ต้องปิดป้ายหรือระบุบนเมนู (เช่น ในร้านอาหาร) ให้ผู้บริโภคทราบว่า เป็นอาหารฉายรังสี การเพิ่มผลิตภัณฑ์ลงในรายการอาหารที่อนุญาตให้ฉายรังสีได้ ต้องได้รับการอนุมัติจากคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ด้านอาหาร (SCF)

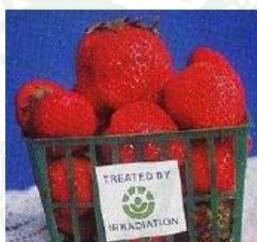
2. Directive 1999/3/EC ระบุรายการอาหารที่อนุญาตให้ฉายรังสีได้ ซึ่งปัจจุบันมีเพียงชนิดเดียว คือ เครื่องเทศ (dried aromatic herbs, spices and vegetable seasonings) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการจัดทำรายการอาหารดังกล่าวยังไม่เสร็จสิ้น ปัจจุบันอียูอนุญาตให้ประเทศสมาชิกออกกฎหมายภายในประเทศ (national authorisation) อนุญาตให้ฉายรังสีอาหารบางประเภทได้ (เช่น มันฝรั่ง กระเทียม แยม แป้งข้าวเจ้า เนื้อสัตว์ปีก กุ้ง ปลา ขากบแช่แข็ง ผักและผลไม้อบแห้ง) หรือกำหนดระเบียบห้ามอาหารฉายรังสีได้จนกว่าอียูจะจัดทำรายการอาหารเสร็จ (สถาบันอาหาร, 2551)

ความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี ผลการศึกษาวิจัยโดยหน่วยงานทั่วโลก ได้แก่ องค์การอนามัยโลก (World Health Organization หรือ WHO) องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (UN Food and Agriculture Organization หรือ FAO) ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency หรือ IAEA) คณะกรรมการด้านวิทยาศาสตร์แห่งสหภาพยุโรป (Scientific Committee for Food of EU) และองค์การอาหารและยาของสหรัฐฯ (Food and Drug Administration) ได้สรุปผลการทดสอบความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี ในปี พ.ศ. 2523 ว่า อาหารใด ๆ ก็ตามที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ ไม่ก่อให้เกิดโทษอันตราย ไม่ก่อให้เกิดปัญหาพิเศษทางโภชนาการและจุลชีววิทยา และไม่จำเป็นต้องทดสอบความปลอดภัยอีกต่อไป และจากข้อสรุปนี้ โครงการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศของเอฟเอโอ/ดับเบิลยูเอชโอ

หรือโคเด็กซ์ (The Joint FAO/WHO Food Standards Programme) ซึ่งมีสมาชิก 151 ประเทศ ก็ได้ประกาศรับรองมาตรฐานอาหารฉายรังสี และวิธีอันพึงปฏิบัติในการฉายรังสีอาหาร ในปี พ.ศ. 2526 เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติในการฉายรังสีอาหาร โดยพบว่า การฉายรังสีอาหารเป็นกรรมวิธีที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียและยีสต์อาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฉายรังสีทุกชนิด ต้องติดฉลากที่มีสัญลักษณ์นานาชาติ ที่เรียกว่า radura ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับดอกไม้ดังภาพที่ 1 (สถาบันอาหาร, 2551)



สัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์
ที่ผ่านการฉายรังสี
[radura]



ภาพที่ 1 เครื่องหมายการฉายรังสี

ที่มา: สถาบันอาหาร (2551)

การตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี

การตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี อาศัยหลักการที่รังสีทำให้โมเลกุลของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงในหลายลักษณะ เช่น การเกิดไอออไนเซชัน หรือการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโมเลกุลขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบ เพื่อยืนยันว่าอาหารได้ผ่านการฉายรังสีหรือไม่ วิธีการตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี สามารถตรวจสอบได้หลายวิธี ดังนี้ (เสาวพงศ์ และสุรศักดิ์, 2550)

1. วิธีทางกายภาพ เหมาะสมกับการตรวจสอบกระดูก ผลึกน้ำตาล เซลลูโลส สารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกต และสารชีวอนินทรีย์ต่าง ๆ สารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ไขมัน โปรตีน เปอร้ออกไซด์ โดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

1.1 Electron spin resonance (ESR) เป็นการตรวจสอบอิเล็กตรอนเดี่ยวที่เกิดจากการฉายรังสีอาหาร เช่น น้ำตาลหรือกระดูก โดยการตรวจจับสัญญาณที่ได้จากการดูดกลืนพลังงานในช่วงความถี่ไมโครเวฟของอิเล็กตรอนเดี่ยวในรูปของสเปกตรัม สามารถใช้กับอาหารประเภทเนื้อสัตว์ที่มีส่วนประกอบของกระดูก เครื่องเทศ ผักและผลไม้แห้ง

1.2 Thermoluminescence (TL) เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ปลดปล่อยจากสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตและสารชีวอนินทรีย์ในอาหาร โดยการกระตุ้นด้วยความร้อน ใช้กับตัวอย่างประเภทหอย กุ้ง ปู เครื่องเทศ สมุนไพรแห้ง และเมล็ดธัญพืช เป็นต้น

1.3 Photostimulated luminescence (PSL) เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ปลดปล่อยจากสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกต หรือแคลไซต์ในอาหาร หลังจากกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด สามารถตรวจสอบอาหารประเภทสมุนไพร สัตว์น้ำจืดจืดมีเปลือก เช่น หอย กุ้ง และปู

1.4 Viscosity เป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น รูปทรงและการไหลของอาหารจากการฉายรังสี โดยใช้เครื่อง Rheotest rotational viscometer สามารถใช้กับอาหารประเภทพริกไทย อบเชย และกุ้ง

1.5 การตรวจวัดสภาพการนำไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ สำหรับอาหารพวกของเหลว เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ และน้ำส้มสายชู

2. วิธีทางเคมี เป็นการตรวจสอบวิเคราะห์คุณสมบัติของสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ไขมัน โปรตีน เพอร์ออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน โทโรซีน และไทมินไกลคอล โดยอาศัยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS)

3. วิธีทางชีวภาพ ได้แก่ การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของ DNA สารประกอบโปรตีน การตรวจสอบความมีชีวิตของเมล็ด และการตรวจนับปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

3.1 DNA comet assay โดยตรวจวัด DNA ภายในอาหารฉายรังสี โดยใช้ Microgel electrophoresis ใช้กับตัวอย่างประเภท ไข่ หมู ปลา ผัก และผลไม้

3.2 การวัดปริมาณโอโทโรซินซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่เซลล์ใช้สังเคราะห์โปรตีนในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ไข่ ปลา และอาหารทะเล

3.3 Direct epifluorescent/aerobic plate count (DEFT/APC) เป็นการตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารหลังการฉายรังสี เหมาะกับอาหารประเภทเครื่องเทศ ไข่ และสมุนไพร

ทั้งนี้การตรวจสอบอาหารฉายรังสี 3 วิธีหลักข้างต้น ได้ถูกกำหนดเป็นวิธีมาตรฐานตามตารางที่ 1 ซึ่งการตรวจสอบพิสูจน์ด้วยวิธีการเหล่านี้ อาจมีความเหมาะสมกับอาหารประเภทใดประเภทหนึ่ง ขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและวัตถุประสงค์ที่ต้องการตรวจสอบ โดยแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสีย แตกต่างกันตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 มาตรฐานการตรวจสอบอาหารฉายรังสีของ CEN

รหัสมาตรฐาน	วิธีการ	ชนิดตัวอย่าง
EN 1784	การวิเคราะห์ hydrocarbons ด้วยเทคนิค Gas chromatography (GC)	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู วัว) อะโวคาโด มะม่วง มะละกอ และเนยแข็ง
EN 1785	การวิเคราะห์ 2-alkylcyclobutanones ด้วยเทคนิค GC/MS	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู ปลา) และไข่สด มะม่วง
EN 1786	การวิเคราะห์กระดูกด้วยเทคนิค ESR	ไก่ ปลา วัว และขาบแช่แข็ง
EN 1787	การวิเคราะห์ cellulose ด้วยเทคนิค ESR	ผงปาปริกา พิสตาชิโอ และเมล็ดจากสตรอเบอร์รี่
EN 1788	การตรวจวัดแสงที่ได้จากการกระตุ้นสารประกอบอินทรีย์ประกอบซิลิเกตในตัวอย่างด้วยเทคนิค Thermoluminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก กุ้ง ปลาแห้ง ผลไม้ ผัก และมะเขือเทศ
prEN 13708	การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำตาลด้วยเทคนิค ESR	ผลไม้อบแห้ง (มะละกอ มะม่วง มะเดื่อ และลูกเกด)
prEN 13751	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photostimulated luminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก และปลา
prEN 13783	การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Direct Epifluorescent Filter Technique/Aerobic Plate Count (DEFT/APC)	เครื่องเทศ สมุนไพร และพริก
prEN 13784	การวิเคราะห์ความเสียหายของ DNA ด้วยเทคนิค DNA comet assay	ไก่ หมู และเมล็ดพืช

ที่มา : Delinsee (2002)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

วิธีการ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Gas chromatographic (GC) analysis of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones	ความไวสูง	เครื่องมือมีราคาสูง ต้องสกัดแยกสารที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น alkane/alkene ออกมาจากตัวอย่างก่อน
ESR spectroscopy	รวดเร็ว มีความไวสูง	เครื่องมือมีราคาสูง ความไวขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างผลึก
Thermoluminescence of silicate minerals	ความไวสูงและเฉพาะมาก ตรวจสอบได้ถูกต้อง แม้เก็บไว้เป็น ระยะเวลานานเป็นปี	ต้องแยกสารประกอบอนินทรีย์ ออกมาจากตัวอย่างก่อน
Photostimulated luminescence	สะดวกรวดเร็ว สามารถตรวจสอบซ้ำได้	มีข้อจำกัดเรื่องความผิดพลาดที่ เกิดจากชนิดและปริมาณของ สารประกอบอนินทรีย์ที่ กระจายตัวบนผิวขณะ ตรวจสอบ
Microbiological screening (DEFT/APC)	สะดวกและรวดเร็ว	ใช้กับอาหารที่ผ่านความร้อน ไม่ได้
DNA comet assay screening	ราคาถูก รวดเร็ว	ใช้ได้กับอาหารสดที่ไม่ผ่าน กระบวนการเท่านั้น

ที่มา : Meier (1991)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีอาหาร

1. การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

เมื่อรังสีทะลุผ่านอาหารจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้โมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า (ปฏิกิริยาไอออนไนเซชัน) สำหรับในอาหารซึ่งมีน้ำประกอบอยู่ด้วยนั้นก็จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้มีอายุสั้นเพียง 1 ต่อ 1000 วินาทีเท่านั้น เมื่อเกิดแล้วก็สลายตัวไปอย่างรวดเร็ว โดยการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของอาหารได้โมเลกุลที่เล็กลงหลายโมเลกุลเรียกรวมกันว่า รีดอกซ์โพลีเมอร์ การใช้ความร้อนก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเช่นกัน ได้อนุมูลอิสระและสารต่าง ๆ แต่เรียกรวมกันว่าเทอร์โมโพลีเมอร์จากการเปรียบเทียบรีดอกซ์โพลีเมอร์กับเทอร์โมโพลีเมอร์ ก็พบว่าสารส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกัน และเป็นสารที่ตรวจพบได้ในอาหารที่ไม่ได้ฉายรังสี การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของรีดอกซ์โพลีเมอร์ ก็พบว่าปริมาณน้อยมาก (ส่วนในล้านส่วน) และไม่ก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้นรีดอกซ์โพลีเมอร์ จึงไม่ได้หมายความว่า เป็นสารใหม่ สารรังสีหรือสารมีพิษดังที่เข้าใจกัน (โกวิทย์, 2544)

2. การเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา

รังสีจะไปทำลายยีน (gene) และรบกวนการแบ่งเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเป็นผลให้จุลชีพเช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ยีสต์ พยาธิ และแมลง ตายหรือเป็นหมันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ใช้ ชนิดและจำนวนของจุลชีพ สำหรับในพืชนั้นรังสีจะทำให้อัตราการหายใจและกระบวนการทางชีวเคมีเปลี่ยนไป ทำให้ผลไม้มบางชนิดสุกช้าลง มันฝรั่งและหอมหัวใหญ่ไม่งอก และเห็ดไม่บาน เป็นต้น (โกวิทย์, 2544)

3. การเปลี่ยนแปลงทางคุณค่าของอาหาร

การฉายรังสีสามารถทำให้คุณค่าของอาหารเปลี่ยนไปได้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร ปริมาณรังสีที่ใช้ และปัจจัยบางชนิด เช่น การมีหรือไม่มีออกซิเจน และอุณหภูมิขณะทำการฉายรังสี องค์ประกอบหลักของอาหาร ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อฉายรังสีในปริมาณไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ การฉายรังสีในปริมาณ

ไม่เกิน 1 กิโลกรัม ไม่ทำให้วิตามินสูญเสียไปอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าฉายรังสีระหว่าง 1 ถึง 10 กิโลกรัม จะทำให้วิตามินบางชนิด เช่น วิตามิน บี 1, เอ, อี และ เค สูญเสียไปบ้าง ถ้าไม่มีการกำจัดอากาศออกในระหว่างการฉายรังสีและการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม การสูญเสียมีน้อยกว่าหรือเทียบได้กับกรรมวิธีอื่น เช่น การใช้ความร้อนในการ ต้ม อบ ทอด หรือตากแห้ง (โกวิทย์, 2544)

4. การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัส

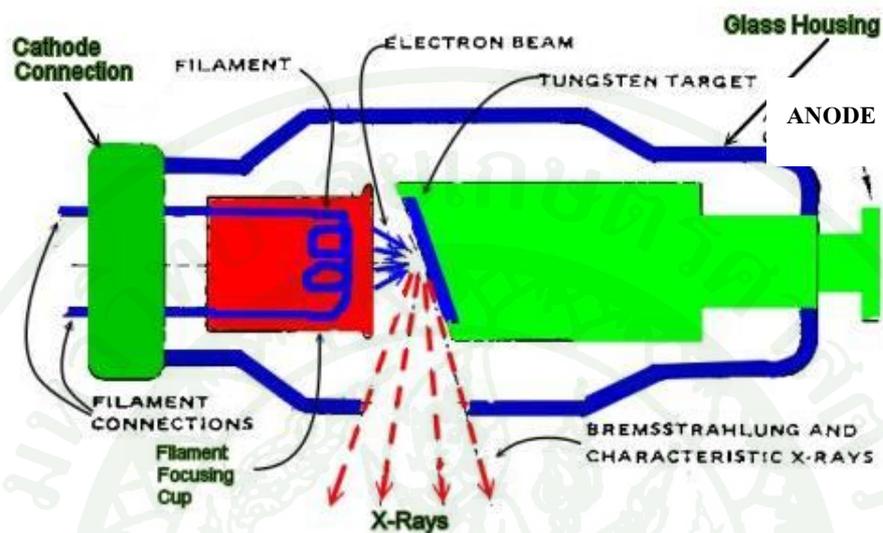
การฉายรังสีอาจทำให้กลิ่น สี และเนื้อสัมผัสของอาหารเปลี่ยนไปได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ปริมาณรังสีที่ใช้ และอุณหภูมิขณะทำการฉายรังสี ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิดจึงแตกต่างกัน การฉายรังสีอาหารตามปริมาณที่กำหนดจะไม่ทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับอาหารประเภทนม และผลิตภัณฑ์นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำมาฉายรังสี เพราะจะทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัสนั้น ในบางกรณีก็เป็นประโยชน์ เช่น การฉายรังสีผลไม้ และผักแห้ง เพื่อทำให้เนื้อสัมผัสอ่อนตัว ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาน้อยลงในการทำให้คืนรูปหรือการหุงต้ม (โกวิทย์, 2544)

ทฤษฎีทั่วไปของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Rays Diffraction)

หลักการเกิดรังสีเอกซ์

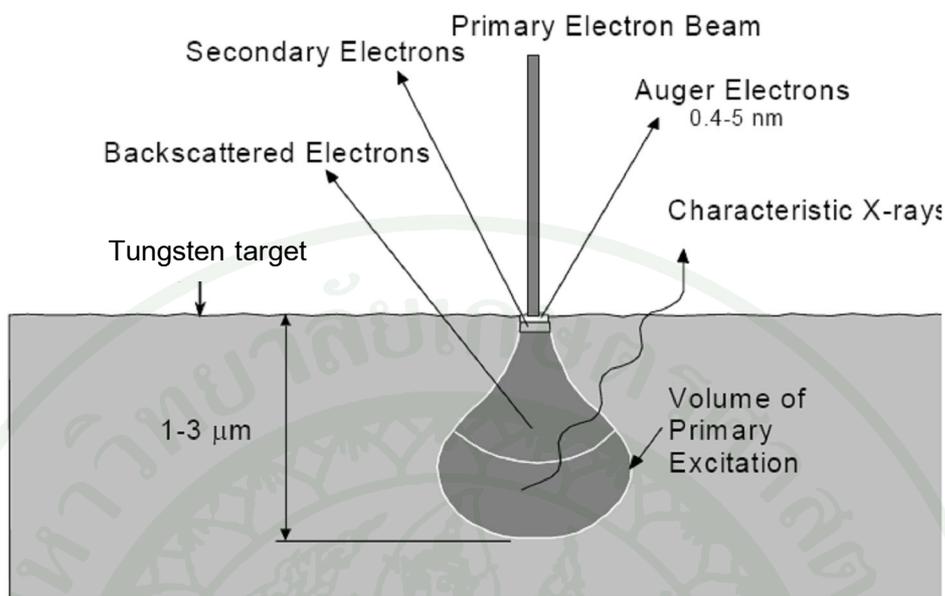
ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ภาพที่ 2) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่ออกจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดงหรือทังสเตน อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้หว้งในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอกซ์ออกมาดังแสดงในภาพที่ 3 รังสีเอกซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจาก

สารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ (detector) (สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551)



ภาพที่ 2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ที่มา: บริษัทเมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด (2551)



ภาพที่ 3 การเกิด X-ray และการเกิด Auger Electrons

ที่มา: Briggs and Seah (1990)

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และการประยุกต์ใช้งาน

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อมีรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นพอเหมาะตกลงบนระนาบของผลึกด้วยมุมที่เหมาะสม แล้วรังสีสะท้อนเกิดการรวมกันแบบเสริมสร้างเงื่อนไขของการเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) (อัจฉรา, 2550) ดังสมการที่ 1

$$2d \sin \Theta = n\lambda \quad (1)$$

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ทรงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกหรือการเรียงตัวของอะตอมในผลึก แต่ในระยะแรกนั้น ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองต้องอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวเท่านั้น

ในปี ค.ศ.1961 พี.เดอบาย (P.Debye) และพี.เชอร์เรอร์ (P.Scherrer) ได้พัฒนาเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ใช้ตัวอย่างเป็นผลึกผง (polycrystalline) ซึ่งมีวิธีการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างยุ่งยากน้อยกว่าการใช้ผลึกเดี่ยว เทคนิคนี้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง และนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง เช่น ศึกษาองค์ประกอบ (เคมีวิเคราะห์) ขนาดของจุลผลึก (crystalline size) และความเครียดตกค้างในโลหะ เป็นต้น

ปัจจุบันนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญทั้งในวงการวิจัยและภาคอุตสาหกรรม จุดเด่นของเทคนิคนี้ คือ สามารถจำแนกชนิดและอัญรูปของสารประกอบ (chemical compound) ที่ผสมกันอยู่ในสารตัวอย่างได้ (อัจฉรา, 2550)

การจำแนกชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ผลึกของสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปร่าง ขนาดและองค์ประกอบของอะตอมแตกต่างกัน แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือดิฟแฟรคโตแกรมซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับความเข้มของรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจึงมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้น จึงสามารถใช้คุณลักษณะนี้ในการจำแนกชนิดของสารประกอบที่อยู่ในรูปของของผสมได้

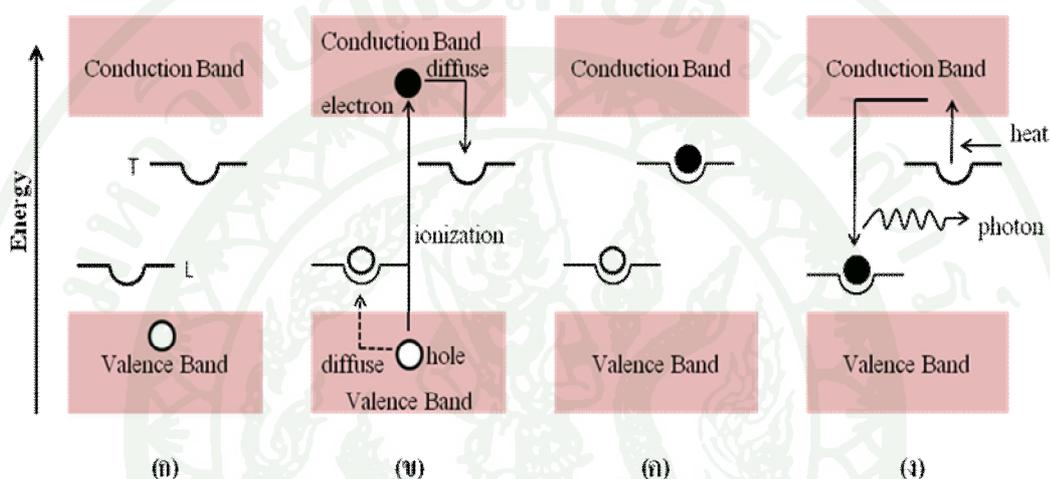
หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างคือ

1. จะต้องมีความรู้ข้อมูลซึ่งรวบรวมแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารมาตรฐานจำนวนมากพอสมควร
2. วัดแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ (จับคู่) กับแพทเทิร์นที่รวบรวมไว้ในฐานข้อมูล

ปัจจุบัน ICDD (International Center for Diffraction Data) ซึ่งเป็นเครื่องหมายการค้าของ JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Society) ได้รวบรวมข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารมาตรฐานอ้างอิงไว้ในฐานข้อมูลมากกว่า 200,000 แพทเทิร์น (อัจฉรา, 2550)

ทฤษฎีระดับพลังงานกับการเรืองแสงด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL)

สถานะของผลึกที่ไม่สมบูรณ์ (Defected lattice) จะประกอบไปด้วยหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน และศูนย์กลางการเรืองแสง (Luminescence centers, L) ซึ่งหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนนี้จะมีระดับพลังงานอยู่ในช่วงระหว่างชั้น Valence band และชั้น Conduction band ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 รูปจำลองแสดงระดับพลังงานในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ ของการเรืองแสงความร้อน

ที่มา : Aitken (1985)

- สถานะพื้น (Ground state) ซึ่งเป็นชั้นที่มีความเสถียรสูง และชั้น Conduction band หรือสถานะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร (ภาพ ก)

- ขั้นการรับรังสี (Irradiation) เกิดจากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากการแผ่กัมมันตภาพรังสีจากธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ หรือการฉายรังสีทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นขึ้นไปในสถานะไม่เสถียรที่ชั้น Conduction band เกิดการกักเก็บอิเล็กตรอน ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (ภาพ ข)

- ขั้นการกักเก็บ (Storage) โดยค่าช่วงชีวิต (Life-time) คือ ระดับความลึกของหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนนั้นต้องมีพลังงานมากกว่าหรือลึกเพียงพอ สำหรับการกักเก็บจำนวนของอิเล็กตรอน

การเล็ดลอดของอิเล็กตรอนออกจากหลุมกักเก็บในช่วงระยะเวลาการกักเก็บนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก (ภาพ ก)

- ขั้นการให้ความร้อน (Heating) เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง เพื่อขับไล่อิเล็กตรอนออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งหลังจากอิเล็กตรอนถูกขับไล่ออกมาจะเกิดกระบวนการรวมตัวกันอีกครั้ง (Recombination) ที่บริเวณศูนย์กลางการเรืองแสง และมีการเรืองแสง (Luminescence) เกิดขึ้น (ภาพ ง)

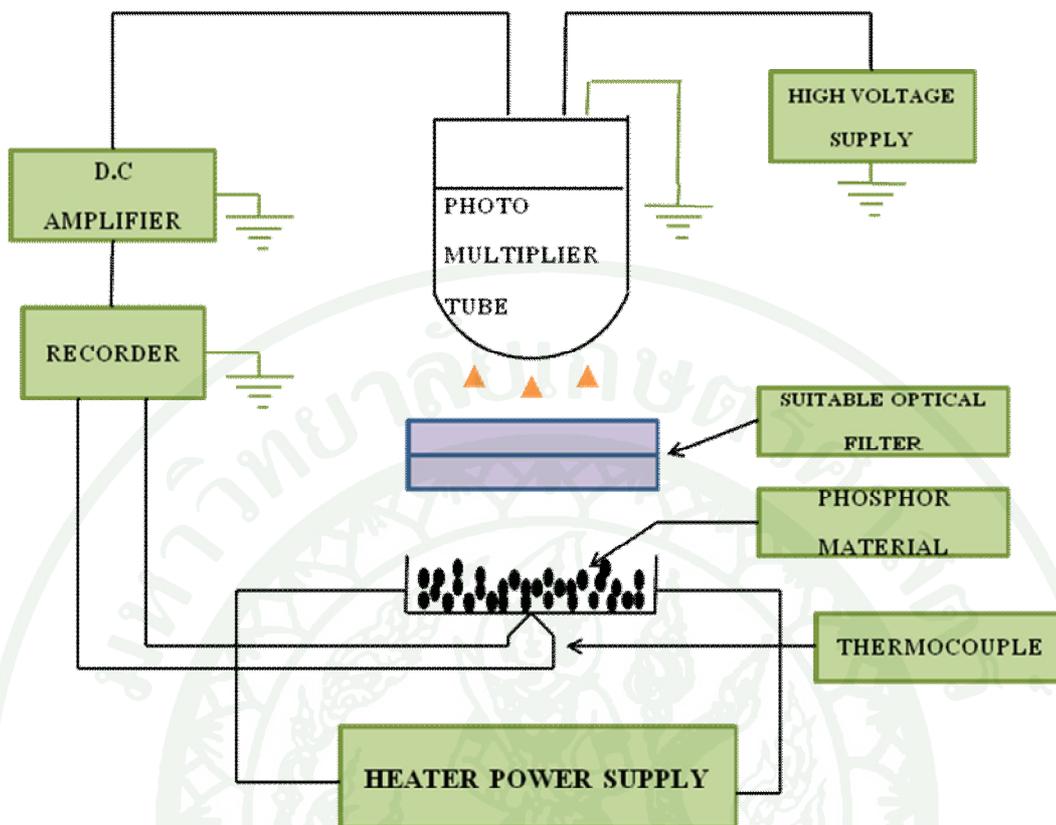
- เมื่อหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube: PMT) จับแสงเหล่านี้แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าพบว่า ปริมาณสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับ ขบวนการที่ผลึกได้รับความร้อนแล้วปล่อยแสงออกมานี้เรียกว่า “เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์”

เครื่องอ่านสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณของแสงสว่างที่ผลึกสารประกอบปล่อยออกมาเมื่อได้รับความร้อน โดยทำการแปลงสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) (TL signal หรือ TL intensity) ให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าหน่วยเป็นคูลอมบ์ หรือในเครื่องอ่านบางรุ่นใช้หน่วยเป็น a.u. หรือค่า count โดยจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL signal กับอุณหภูมิหรือเวลาให้ความร้อนที่เรียกว่า glow curve

ส่วนประกอบของเครื่องอ่านสัญญาณ TL (ภาพที่ 5)

1. ระบบการให้ความร้อน (heating system) ของเครื่องอ่าน
2. หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube: PMT) จับแสงที่ผลึกปล่อยออกมาหลังจากได้รับความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า
3. signal measuring system ทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้า ให้อยู่ในรูปของ glow curve หรือ TL signal



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านสัญญาณ TL

ที่มา: (อรรถโกวิท, 2545)

Glow curve

เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแสง (TL signal) ที่ปล่อยออกมาจากผลึกของสารประกอบ (อยู่ในแกน Y) กับอุณหภูมิหรือเวลาที่ให้ความร้อน (อยู่ในแกน X) พื้นที่ใต้กราฟจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ผลึกสารประกอบได้รับ สำหรับรูปร่างของ glow curve จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ กำหนดจากเครื่องอ่าน TL เช่น อัตราการให้ความร้อนและเวลาในการให้ความร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอ่าน เป็นต้น glow curve ของผลึกแต่ละชนิดจะแสดงปริมาณแสงที่ปล่อยออกมามากที่สุดที่อุณหภูมิต่างๆ เรียกว่าพีค (Peak) ซึ่งอาจมีพีคเดียวหรือหลายพีคขึ้นกับชนิดของผลึก ความไม่สมบูรณ์ในการฟอร์มตัวของผลึกธรรมชาติ จะทำให้เกิดกับดักที่ระดับพลังงานมากน้อยแตกต่างกัน ทำให้ glow curve แต่ละชนิดแตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะตัวของผลึก เมื่อควบคุมอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการอ่านให้คงที่แล้ว glow curve จะมีรูปร่างคงเดิมเสมอ (อรรถ โกวิท, 2545)

การจางหายไปของสัญญาณ (Fading)

เนื่องจากกับดัก (Trap) มีระดับพลังงานที่แตกต่างกันเปรียบเสมือนหลุมที่มีความตื้นและลึกแตกต่างกัน ดังนั้น glow curve ของผลึกสารประกอบจึงแสดงพีคของสัญญาณได้หลายพีคและเกิดที่อุณหภูมิต่างกัน พีคที่อุณหภูมิต่ำเป็นพีคที่ไม่เสถียรเกิดจากกับดักที่พลังงานต่ำ อิเล็กตรอนที่ถูกกักสามารถหลุดออกมาได้เองที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สัญญาณที่อ่านได้ลดลง เรียกว่า การจางหายไปของสัญญาณ (Fading) (อรรถ โกวิท, 2545)

การจำแนกตัวอย่างอาหารฉายรังสีโดยใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

การตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค TL จะอาศัยการปลดปล่อยพลังงานแสงจากการเปลี่ยนระดับพลังงานซึ่งเกิดในสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิติเคตหรือสารชีวอินทรีย์ที่ปนอยู่ในอาหาร โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนจากเครื่องอ่านสัญญาณ TL ความเข้มของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะต่อเนื่องเรียกว่า “glow curve” (Elahi *et al.*, 2008) ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมากับอุณหภูมิหรือเวลาที่ให้ความร้อน

จากรายงานของ EN 1788 แสดงผลการวิจัยในการจำแนกตัวอย่างอาหารฉายรังสีด้วยวิธีการจำแนกจากค่าอัตราส่วนค่าสัญญาณ TL ของ glow 1 (G1) และ glow 2 (G2) ดังได้แสดงต่อไปนี้

1. การหาค่า glow 1 คือการวัดสัญญาณ TL ครั้งที่ 1 จากตัวอย่างที่นำมาตรวจพิสูจน์โดยการสกัดสารประกอบซิติเคตบริสุทธิ์แล้ว

2. การหาค่า glow 2 คือการวัดสัญญาณ TL ครั้งที่ 2 จากตัวอย่างที่ผ่านการวัด glow 1 แล้วนำไปฉายรังสีที่ทราบค่าจากคานำเน็ดรังสีชนิดต่างๆ เช่น ฉายรังสีแกมมาที่ 1 กิโลเกรย์ วัดดูประสงค์เพื่อนำไป normalize สัญญาณ TL ระหว่าง glow 1 และ glow 2

3. การหาค่าอัตราส่วนหรือการ normalize สัญญาณ TL ระหว่าง glow 1 และ glow 2 เพื่อหาอัตราส่วนสัญญาณ TL ของ glow 1 ต่อ glow 2 หากตัวอย่างใดมีค่าอัตราส่วนสัญญาณ TL มากกว่า 0.5 แสดงว่าตัวอย่างนั้นได้ผ่านการฉายรังสี ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะมีค่าอัตราส่วนต่ำกว่า 0.1 เสมอ สำหรับตัวอย่างที่ตรวจพบว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณ TL อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 จะต้องมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลให้แน่ใจว่าตัวอย่างนั้นได้ผ่านการฉายรังสีมาหรือไม่ นอกจากการจำแนกตัวอย่างอาหารฉายรังสีด้วยวิธีการจำแนกจากค่าอัตราส่วนค่าสัญญาณ TL แล้ว ยังสามารถพิจารณาได้จากตำแหน่งของพีคและรูปร่างของ glow curve ด้วย (EN 1788, 1996)

โดยทั่วไป G1 ของอาหารฉายรังสีจะมีค่ามากที่สุดในช่วง 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ส่วนอาหารที่ไม่ได้ฉายรังสีจะให้สัญญาณ G1 ในช่วง 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการได้รับรังสีพลังงานต่ำหรือรังสีในธรรมชาติและเก็บสะสมอยู่ใน deep traps (Elahi et al., 2008; ถนอมเกียรติ, 2551)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิค XRD ร่วมกับเทคนิค TL ในการตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี

Soika and Delincee (2000) ได้ทำการวิจัยเรื่องการจำแนกอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค TL โดยเปรียบเทียบสัญญาณ TL จากสารประกอบซัลไฟด์ที่สกัดออกมาได้จากตัวอย่างกับสัญญาณ TL ที่วัดได้ในครั้งที่ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาองค์ประกอบของสารประกอบซัลไฟด์ พบว่าส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเฟลสปาร์ และควอตซ์ และศึกษาคุณสมบัติการเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ จาก glow curve ของสารประกอบเมื่อได้รับรังสีชนิดต่าง ๆ ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเบตา รังสียูวี และอิเล็กตรอน รวมทั้งศึกษาหาชนิดของรังสีที่เหมาะสมในการฉายเพื่อ normalize ผลการวิจัยพบว่า ลักษณะรูปร่างของ glow curve ที่วัดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะขึ้นกับชนิดของสารประกอบที่สกัดได้จากตัวอย่าง ส่วนชนิดของรังสีที่เหมาะสมสำหรับฉายเพื่อ normalize คือรังสีแกมมา รังสีเบตา และอิเล็กตรอน

Chung *et al.* (2002) ได้ศึกษาความแตกต่างของเทคนิคในการวิเคราะห์ระหว่างเทคนิค PSL TL และ ESR โดยใช้ตัวอย่างอาหารฉายรังสีจำพวกปลาแอนโชวีแห้ง และกุ้ง ซึ่งได้รับการฉายลำอิเล็กตรอนปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ พบว่าเทคนิค PSL สามารถตรวจสอบผลได้อย่างถูกต้อง แต่ไม่พบสัญญาณที่มีลักษณะเฉพาะจากตัวอย่างฉายรังสีทั้งสองประเภทเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค ESR ส่วนเทคนิค TL พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสี แสดง glow curves ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และมีความเข้มของสัญญาณต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ได้รับรังสี แสดง glow curves ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีความเข้มของสัญญาณสูงเพียงพอสำหรับการแยกความแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสี

Khan *et al.* (2002) ได้ใช้เทคนิค TL ในการศึกษาตัวอย่างผลไม้แห้ง เช่น เมล็ดพิสตาชิโอ ผลแอปเปิ้ลคอก เมล็ดอัลมอนด์และลูกเกด ที่ฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1-3 กิโลเกรย์หรือลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณ 0.75 ถึง 3.9 กิโลเกรย์ โดยศึกษา glow curve ที่อุณหภูมิช่วง 50 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเทคนิค TL สามารถแยกความแตกต่างของผลไม้แห้งที่ฉายและไม่ฉายรังสีได้ดี

Kitis *et al.* (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่สกัดได้จากพริก Chile Guajillo Mexicano พบว่าสารประกอบอนินทรีย์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย quartz (SiO_2) 60% albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 30% และ ortose (KAlSi_3O_8) 10% เมื่อฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 1 ถึง 10 กิโลเกรย์ พบว่าสัญญาณ TL ที่ได้ มีความไวสูงและรูปแบบสัญญาณคงที่ แม้ว่าจะทำการอ่านเกิน 10 ครั้งและไม่พบการจางหาย (fading) ของสัญญาณ เมื่อวิเคราะห์ glow peak พบว่า glow peak อยู่ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

Engin (2007) ได้ศึกษาคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่สกัดได้จากพริกไทยดำ พบว่าเทคนิค TL สามารถแยกความแตกต่างของพริกไทยดำฉายรังสีและไม่ฉายรังสีได้ดีในช่วงปริมาณรังสี 1 ถึง 10 กิโลเกรย์ เมื่อวิเคราะห์ glow peak พบว่า glow peak อยู่ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ซึ่งเนื่องมาจากการรวมสัญญาณของเฟลสปาร์ และควอตซ์

Bhatti *et al.* (2007) ได้ใช้เทคนิค TL และเทคนิค XRD ในการศึกษาตัวนำที่มีเปลือกแข็ง เช่น กุ้ง ปู และหอย ที่ฉายรังสีแกมมา 3 และ 6 กิโลเกรย์ โดยศึกษา glow curve ของตัวอย่างที่ฉายและไม่ฉายรังสีที่อุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 400 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อวินาที พบว่าเทคนิค TL สามารถแยกความแตกต่างของตัวอย่างที่ฉายและไม่ฉายรังสีได้ดี และเทคนิค XRD สามารถบอกองค์ประกอบภายในตัวอย่างได้ว่าประกอบด้วย calcite aragonite และ quartz

Bhatti *et al.* (2008) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีของผลิตภัณฑ์ประเภทไข่ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ โดยตรวจสอบส่วนเปลือกไข่ด้วยเทคนิค PSL และเทคนิค TL พบว่า ตัวอย่างฉายรังสีบางตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่เก็บไว้นาน 6 เดือน ค่านับโพตอนมีค่าอยู่ในช่วง intermediate ซึ่งไม่สามารถยืนยันผลได้ สำหรับเทคนิค TL ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.53 ถึง 4.27 ส่วนตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสีจะมีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.06 ถึง 0.38 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสำหรับอาหารที่ไม่ฉายรังสี คือ 0.1

ถนอมเกียรติและคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาขั้นตอนและวิธีการในการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์จากตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมและนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL พบว่า เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างตามวิธีมาตรฐานของ EN 1788 โดยปรับให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างประเภทเครื่องปรุงรส พบว่า ตัวอย่างเครื่องปรุงรสหนัก 30 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 0.2 ถึง 2 มิลลิกรัม ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์สัญญาณ TL รวมทั้งปริมาณรังสีที่ตัวอย่างเครื่องปรุงรสได้รับมีผลต่อปริมาณกระแสรวม ค่า TL ratio รวมทั้งการแปรผลการตรวจสอบ นอกจากนี้องค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่างก็มีผลต่อปริมาณกระแสรวมและค่า TL ratio ด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการตรวจสอบ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. สารเคมี

- 1.1 Sodium polystungstate ($\text{Na}_6\text{W}_{12}\text{O}_{39} \cdot \text{H}_2\text{O}$) บริษัท Fluka (Germany)
- 1.2 Hydrochloric acid (1M HCl) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)
- 1.3 Ammonium hydroxide (1M NH_4OH) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)
- 1.4 Acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)
- 1.5 carboxymethyl cellulose (ร้อยละ 0.2 ในน้ำ) บริษัท Fluka (Finland)
- 1.6 Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)
- 1.7 nitrogen gas สำหรับเครื่องอ่านสัญญาณ TL บริษัท ไทยอินดัสเตรียล แก๊ส จำกัด
- 1.8 ตัวอย่างกระเทียมผงจำนวน 3 ตัวอย่าง จากบริษัท ทีเอ็ม ฟูดส์ จำกัด
- 1.9 X-ray Mix Powder Binding (สารยึดเหนี่ยว)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 2.1 autopipette ขนาด 500, 1000 μl
- 2.2 Pasteur pipette
- 2.3 centrifuge tube 15 และ 50 ml
- 2.4 ultrasonic bath บริษัท NDI รุ่น 136H
- 2.5 centrifuge with swing-out rotor (SANYO รุ่น MSB 080 CR)
- 2.6 aluminium disc พร้อม panchet
- 2.7 ตู้อบแห้ง (CONTHERM รุ่น Series Five)
- 2.8 เครื่องอ่านสัญญาณ TL (Harshaw รุ่น 4500)
- 2.9 เครื่อง X-rays diffraction (XRD) (รุ่น A8 Advanced)
- 2.10 เครื่องฉายรังสีแกมมาต้นกำเนิดรังสี Co-60 (MDS Nordion รุ่น Gammacell 220

Excell)

- 2.11 เครื่องฉายรังสีแกมมาต้นกำเนิดรังสี Cs-137 (JL Shepherd รุ่น Mark I)
- 2.12 เครื่องบดตัวอย่าง (Gy-Ro Mill รุ่น Z-TDA 71 MR)
- 2.13 TLD card

วิธีการ

1. การศึกษาความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL

นำผลึก TLD ที่ผ่านการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานทุติยภูมิ (SSDL) ไปฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี ^{137}Cs อัตรารังสี 1.43 เกรย์ต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาทีจากนั้นนำมาอ่านค่าสัญญาณ TL โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (%CV)

2. การฉายรังสีตัวอย่างกระเทียมผง

บรรจุกระเทียมผงจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ S1 S2 และ S3 ในซองซีพพลาสติกโดยให้มีน้ำหนักประมาณ 60 กรัม (ภาพที่ 6 ก) นำไปติด dosimeter (radiochromic film) แล้ววางใน container (ภาพที่ 6 ข) จากนั้นนำไปฉายรังสีที่ปริมาณ 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 (ภาพที่ 6 ค) โดยเวลาในการฉายรังสีได้มาจากการทดลองฉายรังสีตัวอย่างจำลองก่อนการฉายตัวอย่างจริง จากการทดลองของถนอมเกียรติและคณะ (2551)



(ก)



(ข)



(ค)

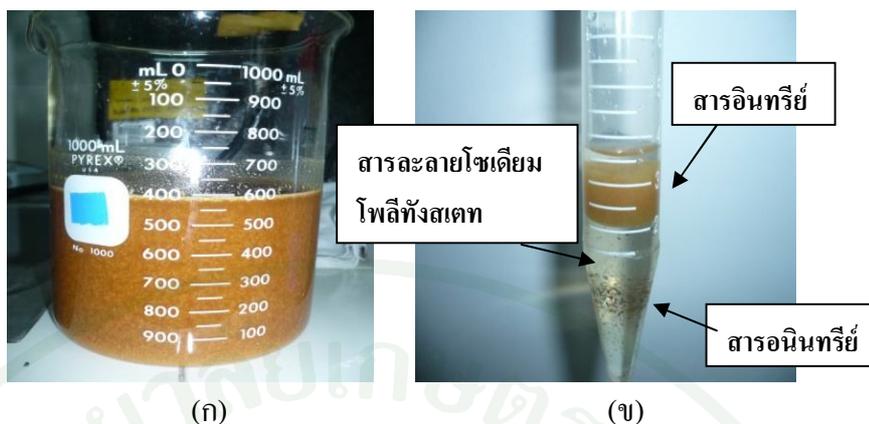
ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับฉายรังสี (ก) ตัวอย่างกระเทียมผงบรรจุซองซีพพลาสติก (ข) ตำแหน่งการวางตัวอย่างใน container (ค) เครื่องฉายรังสี Gammacell 220

3. การสกัดแยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

สกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ประเภทซัลไฟด์ออกจากตัวอย่าง โดยใช้วิธีมาตรฐาน EN-1788 (European Standard EN 1788, 2001) ซึ่งปรับให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างกระเทียมผง มีขั้นตอนดังนี้

3.1 แยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่าง โดยนำตัวอย่าง 60 กรัม มาผสมกับน้ำ 700 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ใน ultrasonic bath 15 นาที คูดสารแขวนลอยออกให้เหลือประมาณ 10 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge นาน 1 นาที (1,000 g) ปล่อยให้ไว้ 5 นาทีแล้วคูดส่วนที่เป็นของเหลวออก

3.2 แยกสารประกอบอินทรีย์ออกจากตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมโพลีทังสเตท ความหนาแน่น 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใส่สารละลายโซเดียมโพลีทังสเตท 10 มิลลิลิตร ในหลอด centrifuge ที่มีตะกอนนอนก้นที่ได้จากขั้นตอน 2.1 แล้วนำไปแช่ด้วย ultrasonic bath นาน 3 นาที นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 2 นาที (1,000 g) เติมน้ำกลั่นจนเต็มหลอดเพื่อให้ง่ายต่อการแยกสารอินทรีย์ออก ค่อย ๆ คูดสารชั้นบนและสารละลายโซเดียมโพลีทังสเตทออก โดยให้ตะกอนที่ต้องการยังอยู่ที่ก้นหลอด เติม 1M HCl 1 ถึง 2 มิลลิลิตร แช่แล้วเก็บไว้ในที่มืด 10 นาที ทำให้เป็นกลางด้วย 1M NH₄OH แล้วเติมน้ำกลั่นให้เต็มหลอด นำไปเหวี่ยงด้วย centrifuge แล้วทำความสะอาดตะกอนด้วยน้ำ 2 ครั้ง และขจัดน้ำออกโดยใส่ acetone แล้วแช่ใน ultrasonic bath ล้างด้วย acetone จนกว่าจะขจัดน้ำออกได้หมด นำสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เก็บสารประกอบอินทรีย์ไว้ในที่แห้งและมีด สำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL และ XRD ต่อไป



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการสกัดแยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่าง (ก) การแยกสารอินทรีย์ออกในขั้นต้น
(ข) การแยกโดยอาศัย density gradient ด้วยสารละลายโซเดียมโพลีทังสเตท

4. การตรวจสอบชนิดของแร่ซิลิเกตในตัวอย่างกระเทียมผงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

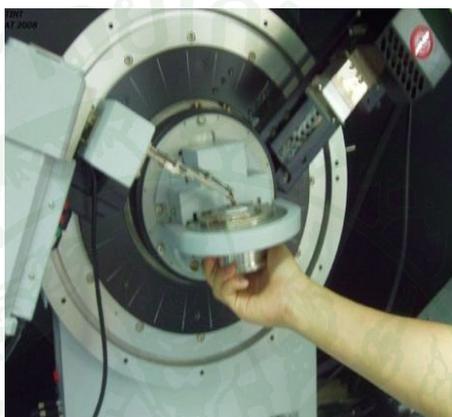
4.1 เตรียมตัวอย่าง (ภาพที่ 8) โดยนำสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตที่สกัดได้ในขั้นตอน 3.2 มาบดด้วย agate mortar ให้ละเอียดแล้วบรรจุลงบนเพลท โดยจะต้องเกลี่ยให้ได้ผิวหน้าที่มีสม่ำเสมอเพื่อที่จะให้ค่าของรังสีเอกซ์ตกกระทบเท่ากันทุกระนาบ



ภาพที่ 8 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (ก) อุปกรณ์สำหรับใช้เตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ด้วย XRD (ข) ขั้นตอนการเกลี่ยให้ผิวหน้าของเพลทมีความสม่ำเสมอ

4.2 นำเข้าเครื่อง XRD (ภาพที่ 9) ในขั้นตอนนี้จะทำการวัดที่มุม 5 ถึง 70 องศา โดยกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนในช่วงมุมต่าง ๆ หรือสเปคตรัมที่เกิดขึ้น

4.3 นำตัวอย่างเฟลสปาร์มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เช่นเดียวกับข้อ 3.1 และ 3.2



ภาพที่ 9 แสดงการนำตัวอย่างเข้าเครื่อง XRD

4.4 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA โดยเปรียบเทียบสเปคตรัมที่ได้กับสเปคตรัมมาตรฐานที่อยู่ในฐานข้อมูลของเครื่องเพื่อจำแนกชนิดของสารประกอบที่สกัดได้

5. วัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เพื่อประเมินความถูกต้องของการตรวจสอบระหว่างตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีและไม่ได้ผ่านการฉายรังสี

5.1 นำตัวอย่างสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากขั้นตอนที่ 3 มาตรึงลงบน aluminium disc เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 10) ด้วย carboxymethyl cellulose (ร้อยละ 0.2 ในน้ำ)



ภาพที่ 10 แสดง aluminium disc ที่บรรจุสารประกอบซิลิเกตที่สกัดแยกได้สำหรับวัดสัญญาณ TL

5.2 ทำการวัดสัญญาณ TL ด้วยเครื่องอ่านสัญญาณ TL (Harshaw รุ่น 4500) ดังแสดงในภาพที่ 11

5.2.1 เข้า Winrems Program ตั้งค่า TTP (Time Temperature Profile Setup) (อินอมเกียรติและคณะ, 2551) ดังนี้

- อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส
- อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที
- อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส
- เวลาในการวัด 42 วินาที

5.2.2 เปิด nitrogen gas ที่ 100 psi จากนั้นเริ่มทำการวัดโดยการนำ aluminium disc มาวางบน panchet และวัดสัญญาณ TL ในรูปของ glow curve ได้ G1 ซึ่งค่า G1 ที่ได้จะพิจารณาจากค่า ROI (พื้นที่ที่ใช้ในการอ่านค่าความเข้มของสัญญาณ) ทั้งพีค คือ ช่วง 29 ถึง 200 นา disc เดิมไปฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ (ปริมาณรังสีอ้างอิง) ด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมา ยี่ห้อ JL Shepherd รุ่น Mark I (Cs-137) ดังแสดงในภาพที่ 12 ก่อนนำมาวัดสัญญาณ TL หลังการฉายรังสี ได้ค่า G2 จะพิจารณาค่า ROI เช่นเดียวกันกับค่า G1 คือที่ช่วง 29 ถึง 200 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง G1/G2 เพื่อหา TL ratio ต่อไป



ภาพที่ 11 เครื่องอ่านสัญญาณ TL ยี่ห้อ Harshaw รุ่น 4500

5.3 ประเมินความถูกต้องของการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสี โดยพิจารณาจากค่า TL ratio ว่าเป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (EN-1788) หรือไม่



ภาพที่ 12 เครื่องฉายรังสีแกมมา ยี่ห้อ JL Shepherd รุ่น Mark I (Cs-137)

6. การศึกษาผลของปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ต่อสัญญาณ TL

นำตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์หนักประมาณ 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ แล้วนำมาวิเคราะห์สัญญาณ TL โดยมีการตั้งค่า TTP ตามข้อ 5.2.1 แล้วพิจารณาค่า G1 และ TL ratio (G1/G2) เพื่อเปรียบเทียบผล จากนั้นนำตัวอย่างกระเทียมผงที่ทราบปริมาณแร่ซีลีเกิด มาวิเคราะห์สัญญาณ TL ตามวิธีการในข้อ 5 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ซีลีเกิดกับสัญญาณ TL โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควอตซ์

7. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL

7.1 นำตัวอย่างกระเทียมผงฉายที่รังสีแกมมาปริมาณรังสี 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ มาสกัดแยกแร่ซัลไฟเกิดตามวิธีการในข้อ 3 จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL ในรูปแบบของ glow 1 (G1) และ TL ratio (G1/G2) นำข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้มาประเมินศักยภาพของการใช้เทคนิค TL ในการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงปริมาณ

7.2 ทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้ตัวอย่างควอตซ์หนัก 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ไปฉายรังสี 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ แล้วนำมาวัดสัญญาณ TL เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL ของตัวอย่างควอตซ์เช่นเดียวกับการทดลอง 6

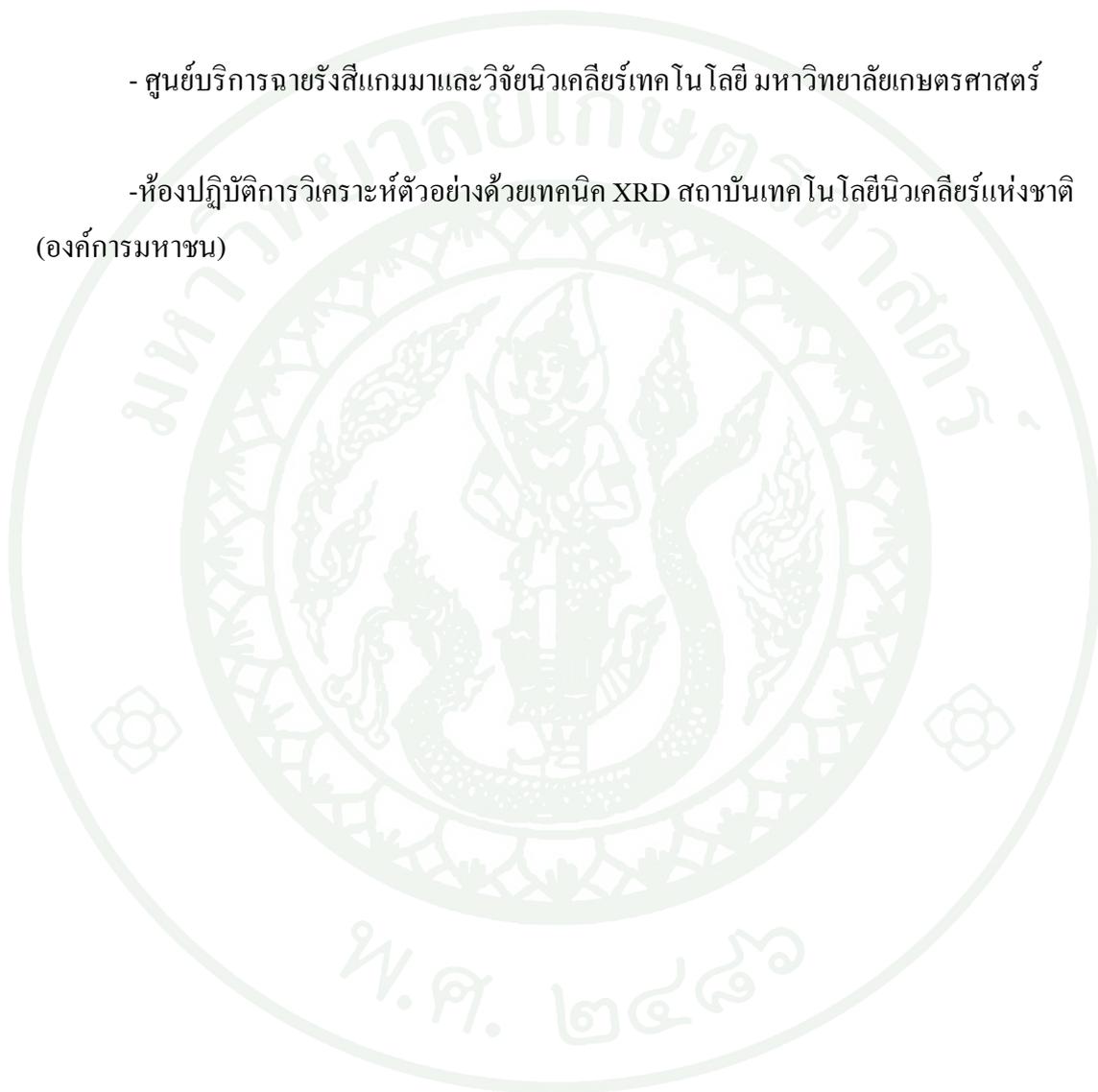
7.3 ทำการตรวจสอบตัวอย่าง unknown ซึ่งเป็นตัวอย่างกระเทียมผง S2 และ S3 ที่ฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ โดยนำตัวอย่างรหัส A ถึง L มาสกัดแยกแร่ซัลไฟเกิดตามขั้นตอนที่ 3 และวิเคราะห์ค่าสัญญาณ TL ก่อนนำมาประเมินปริมาณรังสีสำหรับตัวอย่าง unknown

8. ศึกษาผลของระยะเวลาหลังการฉายรังสีที่มีต่อสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

นำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 2 และ 3 เดือน มาทำการสกัดแยกแร่ซัลไฟเกิดตามวิธีการในข้อ 2 แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL ตามวิธีการในข้อ 5 เพื่อประเมินผลของระยะเวลาหลังการฉายรังสีที่มีต่อสัญญาณ TL

9. สถานที่ทำการทดลอง

- ห้องปฏิบัติการภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
- ศูนย์บริการฉายรังสีแกมมาและวิจัยนิวเคลียร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)



ผลและวิจารณ์

ผล

1. การศึกษาความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL

จากการศึกษาความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (%CV) ของค่าสัญญาณ TL ของค่าสัญญาณ TL ที่เครื่องอ่านได้ พบว่า ผลึก TLD ทั้ง 4 ชุด มีค่า %CV ที่มีค่าในช่วง 0.3 ถึง 1.1 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL

ฉายรังสีครั้งที่	Q (μC)			
	TLD 1	TLD 2	TLD 3	TLD 4
1	1069	1078	1056	1069
2	1071	1077	1065	1071
3	1076	1095	1067	1076
4	1078	1079	1060	1078
5	1074	1082	1067	1074
Mean	1073	1082	1063	1073
SD	3.7	7.4	4.8	3.7
%CV	0.3	0.7	1.1	0.3

2. การฉายรังสีตัวอย่างกระเทียมผง

เมื่อนำตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด คือ S1 S2 และ S3 ไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 โดยวัดปริมาณรังสีด้วย radiochromic film dosimeter พบว่าค่าปริมาณรังสีดูดกลืนเฉลี่ยที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าปริมาณรังสีที่ต้องการไม่เกินร้อยละ 4 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมผง

ปริมาณรังสีที่ต้องการ (กิโลเกรย์)	ผลการตรวจวัดปริมาณรังสีด้วย dosimeter (กิโลเกรย์)	ปริมาณรังสีเฉลี่ย (กิโลเกรย์)	% ค่าความคลาด เคลื่อน
2	2.10	2.05	2.50
	2.20		
	1.85		
4	4.06	4.16	4.00
	4.59		
	3.82		
6	6.34	6.20	3.33
	6.83		
	5.43		
8	8.21	8.30	3.75
	9.36		
	7.32		
10	10.18	10.40	4.00
	11.61		
	9.42		

3. การสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ออกจากตัวอย่างกระเทียมผง

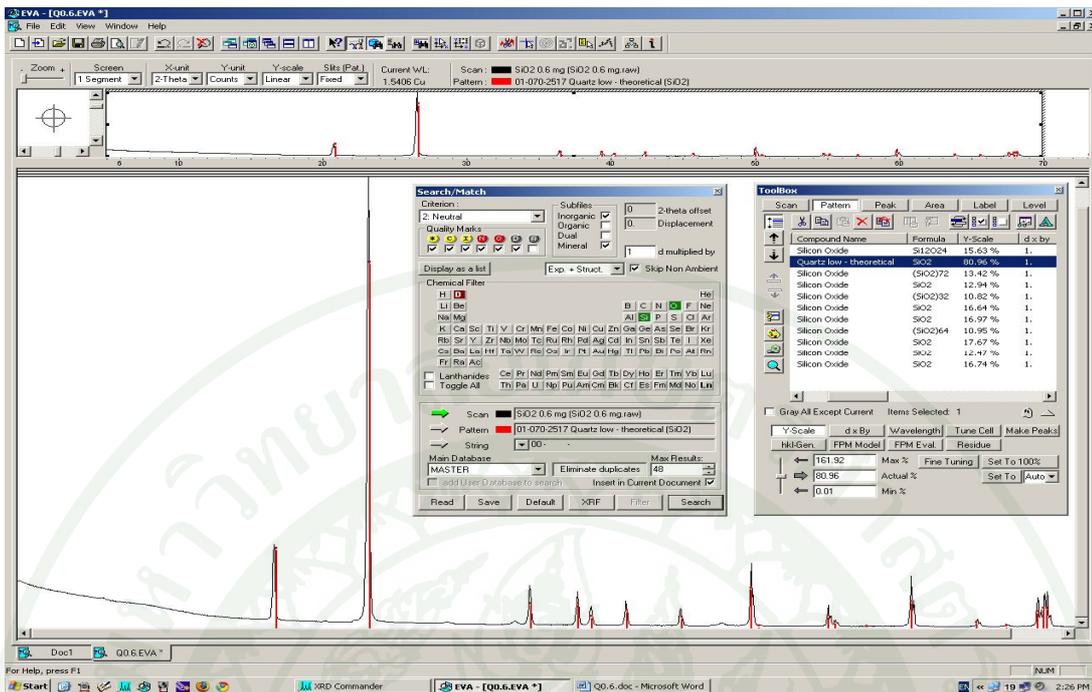
การสกัดสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิติเกตออกจากตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ S1 S2 และ S3 โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นในการสกัดแยก พบว่าเมื่อใช้น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น 60 กรัม จะสามารถสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ได้ประมาณ 5.4 มิลลิกรัม จนถึง 11.03 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และเทคนิค TL (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดได้จากตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดเมื่อใช้ตัวอย่างเริ่มต้นประมาณ 60 กรัม

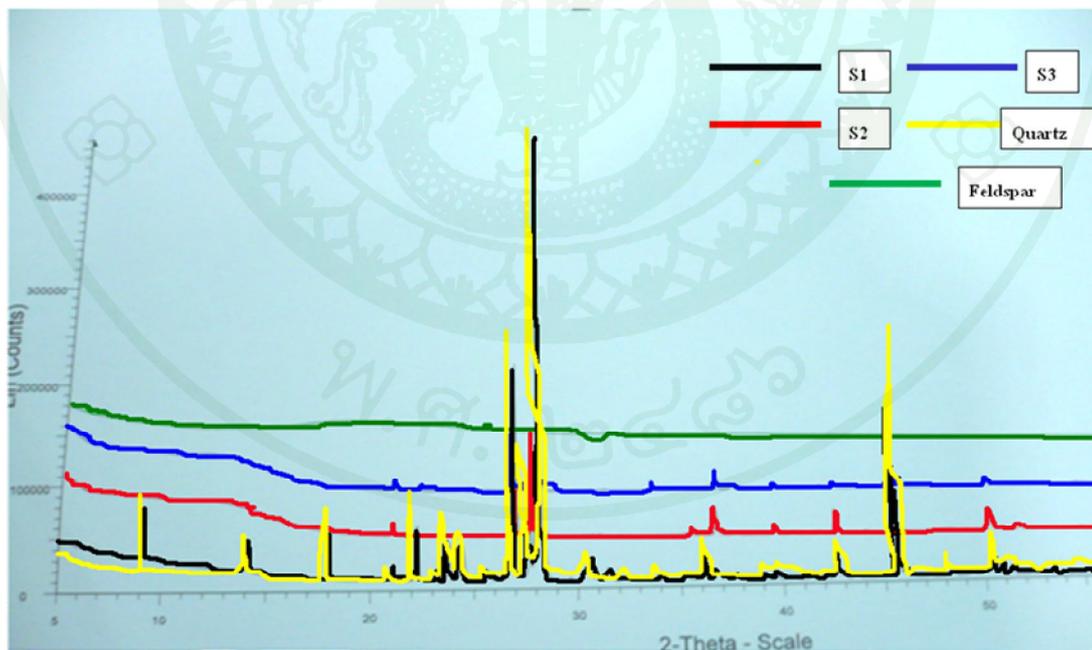
ตัวอย่าง	น้ำหนักสารประกอบที่แยกได้ (มิลลิกรัม) (mean \pm SD, n=6)	น้ำหนักสารประกอบต่อน้ำหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม) (mean \pm SD, n=6)
S1	11.03 \pm 0.81	0.18 \pm 0.01
S2	8.05 \pm 0.77	0.13 \pm 0.01
S3	5.40 \pm 0.61	0.09 \pm 0.01

4. การตรวจสอบชนิดและปริมาณของแร่ซิติเกตในตัวอย่างกระเทียมผงด้วยเทคนิค XRD

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของแร่ซิติเกตที่สกัดได้จากตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD พบว่าตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์แสดงสเปกตรัมที่มุม 26.6 องศา ซึ่งดูจากฐานข้อมูลในเครื่องดังภาพที่ 13 ส่วนตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดแสดงสเปกตรัมในภาพที่ 14 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของควอตซ์ในภาพที่ 13 พบว่าสเปกตรัมที่ได้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดมีควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลัก



ภาพที่ 13 แสดง XRD สเปกตรัมของควอตซ์บริสุทธิ์



ภาพที่ 14 แสดง XRD สเปกตรัมของตัวอย่างกระเทียมผง S1 S2 และ S3 ตัวอย่างควอตซ์ และ ตัวอย่างเฟลสปาร์

5. การประเมินความถูกต้องของการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ระหว่างตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีและไม่ผ่านการฉายรังสี

ตาม European Standard การ normalize TL signal ระหว่าง glow 1 และ glow 2 เพื่อหาอัตราส่วนของสัญญาณ TL (TL ratio) glow 1 และ glow 2 หากตัวอย่างใดมีค่า TL ratio มากกว่า 0.5 แสดงว่าตัวอย่างนั้นได้ผ่านการฉายรังสี ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะมีค่า TL ratio ต่ำกว่า 0.1 เสมอ และสำหรับตัวอย่างที่ตรวจพบว่า TL ratio อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.5 จะต้องทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง จากการหาค่า TL ratio ในตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 6 7 และ 8 ตามลำดับ พบว่าค่า TL ratio ของทั้ง 3 ตัวอย่างที่ปริมาณรังสี 0 กิโลเกรย์ (ไม่ผ่านการฉายรังสี) มีค่าอยู่ในช่วง 0.46×10^{-9} ถึง 4.35×10^{-9} ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และที่ปริมาณรังสี 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์มีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 5.35 ซึ่งสามารถระบุได้อย่างถูกต้องในทุกตัวอย่างว่าเป็นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี

ตารางที่ 6 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S1

ตัวอย่าง S1*					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	ค่าความเข้มสัญญาณ			ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2	TL ratio	
0	S11-0	233.7 nC	71.97 C	3.25×10^{-9}	ไม่ฉายรังสี
	S12-0	99.68 nC	51.25 C	1.94×10^{-9}	
	S13-0	300 nC	69.01 C	4.35×10^{-9}	
2	S11-2	12.51 C	18.39 C	0.68	ฉายรังสี
	S12-2	10.81 C	20.21 C	0.5	
	S13-2	11.12 C	20.19 C	0.55	
4	S11-4	258.2 C	442.3 C	0.58	ฉายรังสี
	S12-4	150.6 C	219.0 C	0.69	
	S13-4	149.1 C	257.5 C	0.58	
6	S11-6	395.6 C	597.4 C	0.66	ฉายรังสี
	S12-6	299.7 C	349.8 C	0.86	
	S13-6	278.4 C	291.5 C	0.96	
8	S11-8	537.4 C	489.2 C	1.09	ฉายรังสี
	S12-8	492.1 C	708.2 C	0.69	
	S13-8	423.6 C	490.1 C	0.86	
10	S11-10	527.1 C	501.7 C	1.05	ฉายรังสี
	S12-10	423.7 C	495.1 C	0.86	
	S13-10	569.4 C	486.1 C	1.17	

*การทดลองนี้ใช้ตัวอย่าง S1 ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 เดือนหลังการฉายรังสี

ตารางที่ 7 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S2

ตัวอย่าง S2*					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อ ตัวอย่าง	ค่าความเข้มสัญญาณ		TL ratio	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2		
0	S21-0	616.4 nC	243.6 C	2.53×10^{-9}	ไม่ฉายรังสี
	S22-0	99.45 nC	49.62 C	2×10^{-9}	
	S23-0	252.3 nC	63.95 C	3.94×10^{-9}	
2	S21-2	37.74 C	50.69 C	0.75	ฉายรังสี
	S22-2	61.02 C	52.34 C	1.17	
	S23-2	28.70 C	34.56 C	0.83	
4	S21-4	65.60 C	73.91 C	0.89	ฉายรังสี
	S22-4	42.54 C	51.42 C	0.82	
	S23-4	58.99 C	93.53 C	0.63	
6	S21-6	106.8 C	113.58 C	0.94	ฉายรังสี
	S22-6	42.54 C	75.58 C	0.56	
	S23-6	38.61 C	49.92 C	0.77	
8	S21-8	43.76 C	75.01 C	0.58	ฉายรังสี
	S22-8	48.82 C	72.25 C	0.68	
	S23-8	90.09 C	72.64 C	1.24	
10	S21-10	89.97 C	132.5 C	0.68	ฉายรังสี
	S22-10	55.39 C	87.23 C	0.63	
	S23-10	122.0 C	97.55 C	1.25	

*การทดลองนี้ใช้ตัวอย่าง S2 ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 เดือนหลังการฉายรังสี

ตารางที่ 8 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี S3

ตัวอย่าง S3*					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อ ตัวอย่าง	ค่าความเข้มสัญญาณ		TL ratio	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2		
0	S31-0	40.64 nC	88.56 C	0.46×10^{-9}	ไม่ฉายรังสี
	S32-0	105.2 nC	30.71 C	3.42×10^{-9}	
	S33-0	57.02 nC	44.10 C	1.29×10^{-9}	
2	S31-2	7.45 C	10.22 C	0.73	ฉายรังสี
	S32-2	15.16 C	24.73 C	0.61	
	S33-2	8.27 C	14.26 C	0.58	
4	S31-4	10.45 C	14.73 C	0.71	ฉายรังสี
	S32-4	17.34 C	16.87 C	1.02	
	S33-4	11.44 C	21.52 C	0.53	
6	S31-6	22.01 C	39.76 C	0.55	ฉายรังสี
	S32-6	25.74 C	50.56 C	0.51	
	S33-6	23.33 C	18.54 C	1.26	
8	S31-8	46.86 C	28.83 C	1.97	ฉายรังสี
	S32-8	37.85 C	70.75 C	0.54	
	S33-8	19.16 C	5.97 C	3.21	
10	S31-10	41.44 C	45.21 C	0.92	ฉายรังสี
	S32-10	40.99 C	41.81 C	0.98	
	S33-10	44.09 C	47.85 C	0.92	

*การทดลองนี้ใช้ตัวอย่าง S3 ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 เดือนหลังการฉายรังสี

6. ผลของปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ต่อสัญญาณ TL

เมื่อนำตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ได้แก่ 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ตามลำดับ พบว่าที่ปริมาณรังสีเดียวกัน สัญญาณ TL ในรูปแบบของ G1 มีค่ามากขึ้นตามน้ำหนักควอตซ์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณรังสี (ตารางที่ 9) ในขณะที่สัญญาณ TL ในรูปแบบของ TL ratio มีค่าไม่แน่นอน และไม่แปรตามน้ำหนักควอตซ์ (ตารางที่ 10) (ตารางแยกตามปริมาณน้ำหนักแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 2 และ 3 และลักษณะของ glow curve 1 และ glow curve 2 แสดงในภาพผนวกที่ 5 6 และ 7) เช่นเดียวกับตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี (ตารางแยกตามปริมาณน้ำหนักแสดงในตารางภาคผนวกที่ 4 5 และ 6) และเนื่องจากตัวอย่างกระเทียมผง S1 มีปริมาณแร่ซิลิเกตที่ได้จากการสกัดมากที่สุดจึงทำให้ได้ค่าสัญญาณ TL ในรูปแบบของ G1 มากที่สุด รองลงมาจะเป็นตัวอย่างกระเทียมผง S2 และตัวอย่างกระเทียมผง S3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 11 ส่วนสัญญาณ TL ในรูปแบบของ TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมให้ผลทำนองเดียวกับตัวอย่างควอตซ์ ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 9 สัญญาณ TL แสดงค่า G1 ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ที่ฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

สัญญาณ TL ของควอตซ์ (mean + SD; n = 3)			
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	G1 (C)		
	0.5 มิลลิกรัม	1 มิลลิกรัม	3 มิลลิกรัม
0	1.60 ± 1.52	3.67 ± 0.28	7.31 ± 1.56
2	131.80 ± 51.85	252.77 ± 60.31	729.20 ± 167.32
4	226.60 ± 13.58	315.30 ± 26.29	903.33 ± 29.79
6	240.67 ± 85.34	414.60 ± 84.62	899.30 ± 57.08
8	479.87 ± 81.85	687.13 ± 33.25	1067.00 ± 39.04
10	290.10 ± 111.52	640.70 ± 75.69	1198.00 ± 22.52

ตารางที่ 10 สัญญาณ TL แสดงค่า TL ratio ของตัวอย่างควอตซ์หนัก 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม ที่ฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

สัญญาณ TL ของควอตซ์ (mean \pm SD; n = 3)			
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	TL ratio (G1/G2)		
	0.5 มิลลิกรัม	1 มิลลิกรัม	3 มิลลิกรัม
0	0.02 \pm 0.01	0.02 \pm 0.01	0.02 \pm 0.01
2	2.19 \pm 0.29	2.07 \pm 0.59	2.33 \pm 0.29
4	2.77 \pm 0.21	2.69 \pm 0.14	2.53 \pm 0.28
6	2.56 \pm 0.75	2.12 \pm 0.90	2.82 \pm 0.28
8	1.76 \pm 0.46	2.27 \pm 0.56	1.61 \pm 0.15
10	2.73 \pm 0.45	2.86 \pm 0.52	1.29 \pm 0.29

ตารางที่ 11 สัญญาณ TL แสดงค่า G1 ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด ที่ฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

สัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง (mean \pm SD; n = 6)			
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	G1 (C)		
	S1	S2	S3
0	3.21x10 ⁻⁷ \pm 1.96x10 ⁻⁸	3.27x10 ⁻⁷ \pm 2.12x10 ⁻⁷	1.06x10 ⁻⁷ \pm 5.41x10 ⁻⁸
2	25.63 \pm 13.90	11.66 \pm 0.89	6.64 \pm 1.85
4	217.74 \pm 62.23	43.11 \pm 1.93	17.18 \pm 3.80
6	352.88 \pm 66.31	47.59 \pm 12.31	19.69 \pm 5.78
8	471.94 \pm 44.42	66.89 \pm 22.16	36.77 \pm 7.45
10	529.34 \pm 66.19	84.29 \pm 29.18	42.45 \pm 34.34

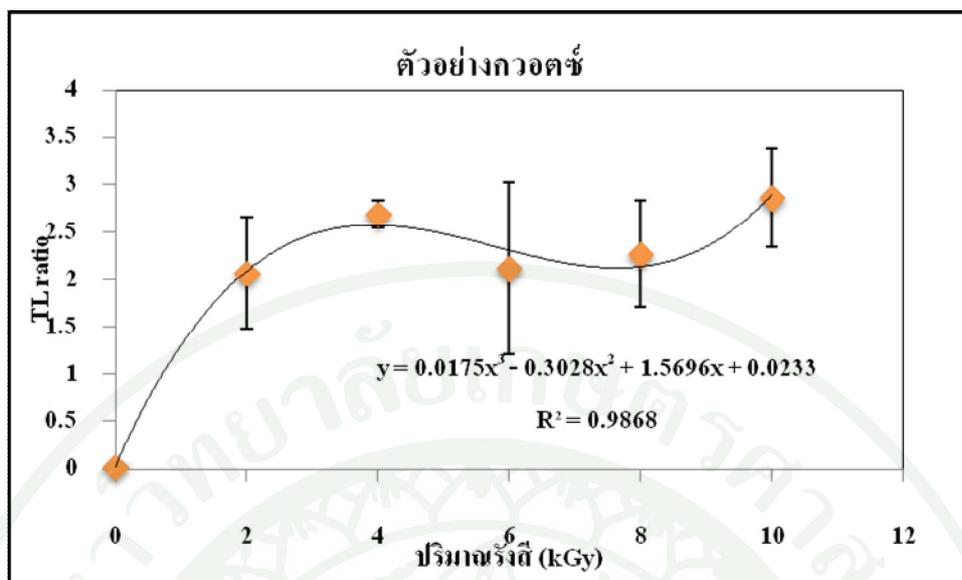
ตารางที่ 12 สัญญาณ TL แสดงค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด ที่ฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

สัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง (mean \pm SD; n = 6)			
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	TL ratio (G1/G2)		
	S1	S2	S3
0	$2.90 \times 10^{-9} \pm 1.13 \times 10^{-9}$	$2.68 \times 10^{-9} \pm 9.14 \times 10^{-10}$	$1.90 \times 10^{-9} \pm 1.17 \times 10^{-9}$
2	0.55 ± 0.08	0.43 ± 0.14	0.59 ± 0.02
4	0.75 ± 0.27	0.77 ± 0.11	0.93 ± 0.19
6	0.78 ± 0.15	0.97 ± 0.03	0.68 ± 0.14
8	1.00 ± 0.12	0.64 ± 0.11	0.95 ± 0.31
10	0.99 ± 0.12	0.65 ± 0.03	0.83 ± 0.15

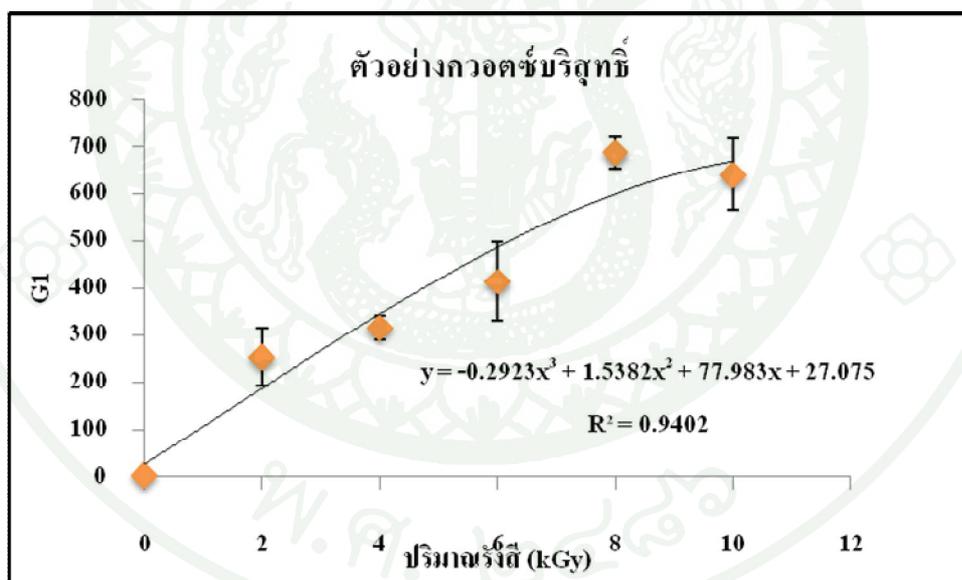
7. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับสัญญาณ TL ทั้งในรูปแบบ G1 และ TL ratio ของตัวอย่างควอตซ์ เป็นไปตามสมการไครโนเมียลมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9402 และ 0.9868 ดังแสดงในภาพที่ 15 และ 16 ตามลำดับ โดยพบว่าในช่วงปริมาณรังสี 0 ถึง 4 กิโลเกรย์ สัญญาณ TL จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ช่วงปริมาณรังสี 4 ถึง 10 กิโลเกรย์ สัญญาณ TL จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรือลดลงในบางช่วงปริมาณรังสี

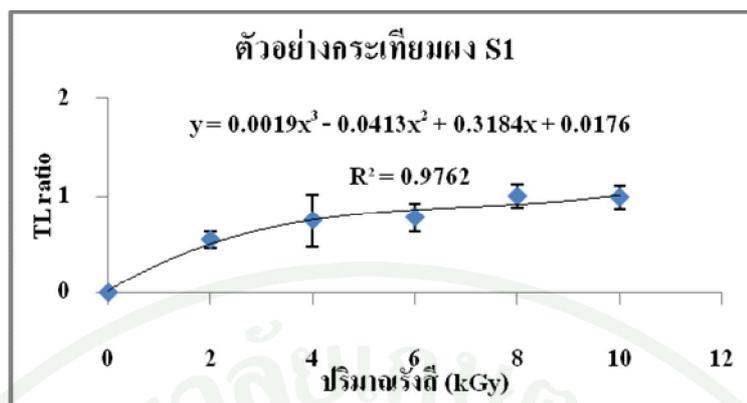
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ TL ratio ของตัวอย่าง S1 S2 และ S3 มีลักษณะกราฟความสัมพันธ์แบบไครโนเมียล มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9762 0.9485 และ 0.9373 ตามลำดับ เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 ของตัวอย่าง S1 S2 และ S3 ซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์แบบไครโนเมียล มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9935 0.9777 และ 0.9749 ดังภาพที่ 17 และ 18 ตามลำดับ โดยลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความแตกต่างกับกรณีของตัวอย่างควอตซ์ โดยพบว่า G1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์



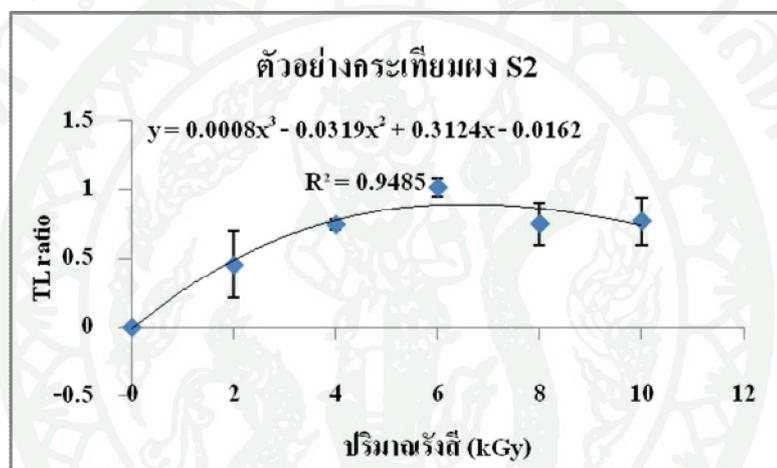
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า TL ratio ของตัวอย่างกวอดซ์หนัก 1 มิลลิกรัม



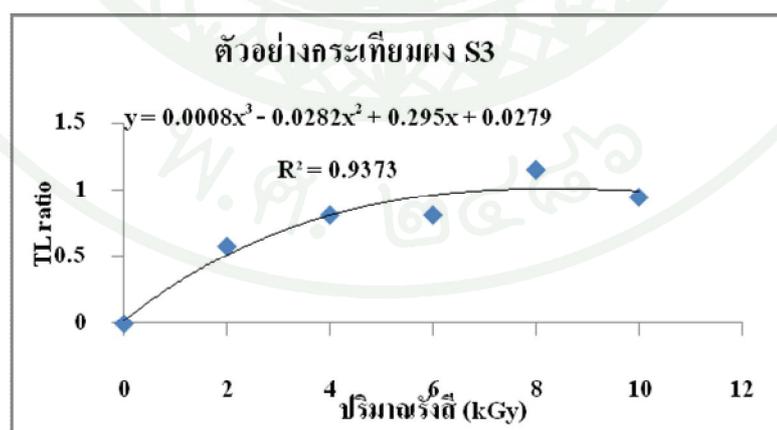
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 ของตัวอย่างกวอดซ์หนัก 1 มิลลิกรัม



(ก)

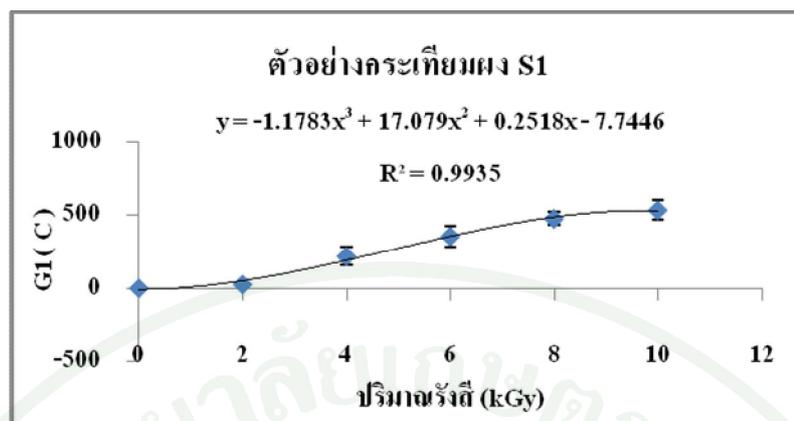


(ข)

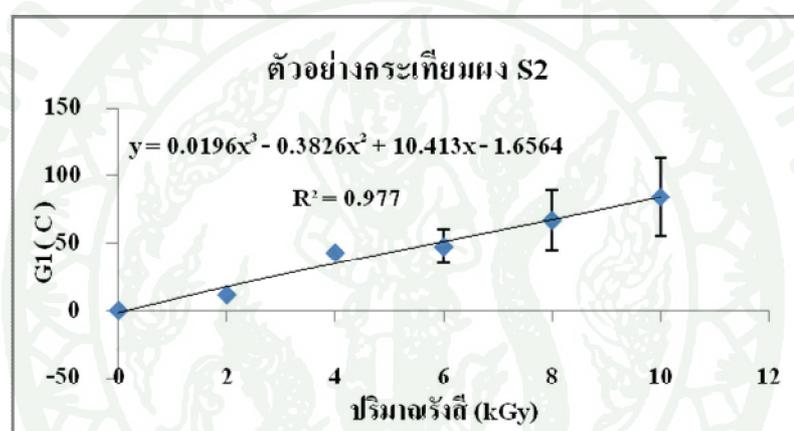


(ค)

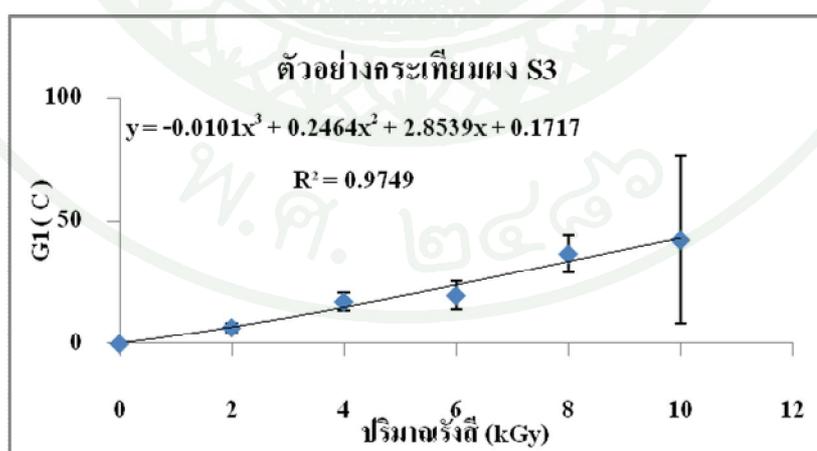
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่า G1 ของตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิด

เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างกระเทียมผง S2 และ S3 ที่เป็น unknown รหัส A ถึง L โดยพิจารณาจากค่าสัญญาณ TL ทั้ง G1 และ TL ratio โดยแทนค่าสัญญาณ TL ที่ได้ลงในสมการไดรโนเมียลของตัวอย่างกระเทียมผงแต่ละชนิด พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมผงดังตารางที่ 13 และ 14 จะเห็นว่าปริมาณรังสีที่คำนวณได้จากการใช้ค่า G1 มีความแตกต่างจากปริมาณรังสีที่ฉายจริงมาก ในขณะที่ปริมาณรังสีที่คำนวณได้จากค่า TL ratio มีความใกล้เคียงกับค่าจริงถึง 4 ตัวอย่าง ทั้งตัวอย่าง unknown S2 และ S3

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง unknown S2

ชื่อตัวอย่าง	สัญญาณ TL		ปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณ (กิโลเกรย์)		ปริมาณรังสี ที่ฉายจริง (กิโลเกรย์)
	G1 (C)	TL ratio	G1 (C)	TL ratio	
L	421.09×10^{-9}	7.31×10^{-9}	0.16	0.05	0
A	54.37	0.48	6.39	1.96	2
E	129.09	0.72	14.54	3.49	4
J	46.33	1.06	5.38	27.43	6
G	50.51	0.86	5.9	7.78	8
F	116.84	0.89	13.45	26.94	10

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง unknown S3

ชื่อตัวอย่าง	สัญญาณ TL		ปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณ (กิโลเกรย์)		ปริมาณรังสี ที่ฉายจริง (กิโลเกรย์)
	G1(C)	TL ratio	G1 (C)	TL ratio	
B	141.31×10^{-9}	4.29×10^{-9}	0.06	0.09	0
D	15.33	0.57	4.1	2.32	2
H	23.44	0.7	5.88	3.13	4
C	37.94	0.95	8.89	5.88	6
I	5.29	1.36	1.59	21.87	8
K	20.38	1.07	5.23	20.17	10

8. ศึกษาผลของระยะเวลาหลังการฉายรังสีที่มีต่อสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ ในที่มีดเป็นเวลา 1 วัน 1 2 และ 3 เดือน แล้ววิเคราะห์สัญญาณ TL พร้อมคำนวณหาค่า TL ratio เพื่อดูการจางหายของสัญญาณที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างหลังการฉายรังสีได้ผลการทดลองดังตารางที่ 15 16 และ 17 (แสดงภาพค่าสัญญาณ TL ในภาพผนวกที่ 1 2 3 และ 4) พบว่าค่า TL ratio ที่ได้เป็นไปตามที่มาตรฐาน EN-1788 ระบุไว้ โดยตัวอย่างกระเทียมผงที่เก็บไว้ที่ 1 ถึง 2 เดือนสามารถให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ตามมาตรฐานที่กำหนด สำหรับตัวอย่างที่เก็บไว้นาน 3 เดือนจะมีตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีบางตัวอย่างที่ให้ค่า TL ratio ในช่วง 0.3 ถึง 0.4

ตารางที่ 15 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือน หลังการฉายรังสี

TL ratio เฉลี่ยของตัวอย่าง S1				
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	1 วัน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
0	1.73×10^{-09}	2.90×10^{-09}	8.30×10^{-09}	1.06×10^{-09}
2	0.6	0.58	0.59	0.42
4	0.92	1.18	0.72	0.41
6	1	0.81	0.81	0.49
8	1.21	0.88	0.87	0.5
10	1.27	0.99	1.93	0.66

ตารางที่ 16 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S2 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือน หลังการฉายรังสี

TL ratio เฉลี่ยของตัวอย่าง S2				
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	1 วัน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
0	1.73×10^{-09}	2.68×10^{-09}	8.30×10^{-09}	2.39×10^{-09}
2	0.6	0.59	0.59	0.33
4	0.92	0.97	0.72	0.43
6	1	0.82	0.81	0.44
8	1.21	0.65	0.87	0.59
10	1.27	0.98	1.93	0.58

ตารางที่ 17 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผง S3 ที่ระยะเวลา 1 วัน 1 เดือน 2 เดือน และ 3 เดือน หลังการฉายรังสี

TL ratio เฉลี่ยของตัวอย่าง S3				
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	1 วัน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
0	1.73×10^{-09}	1.90×10^{-09}	6.75×10^{-09}	2.19×10^{-09}
2	0.6	0.58	0.67	0.41
4	0.92	1.32	1.92	0.49
6	1	0.72	0.64	0.56
8	1.21	4.28	1.82	0.66
10	1.27	0.71	1.2	0.7

วิจารณ์

1. การศึกษาความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL

ในการศึกษาความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (%CV) ของค่าสัญญาณ TL ในช่วง 0.3 ถึง 1.1% แสดงให้เห็นว่าเครื่องอ่านสัญญาณ TL ที่ใช้ใน งานวิจัยครั้งนี้มีความคงที่สูง ทั้งนี้ความคงที่ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เป็นอย่างมาก เพื่อป้องกันผลของความคลาดเคลื่อนของค่าสัญญาณ TL ที่อ่านได้ โดยสาเหตุของ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องอ่านสัญญาณ TL อาจเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น ความไม่คงที่ของ กระแสไฟฟ้า และการมีสิ่งปนเปื้อนอยู่บริเวณที่วัดตัวอย่าง เป็นต้น

2. การสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ออกจากตัวอย่างกระเทียมผง

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ ประเภทซิลิเกตออกจากตัวอย่างกระเทียมผงด้วยสารละลายโซเดียม โพลีทังสเตท โดยอาศัยความ แตกต่างของความหนาแน่นในการสกัดแยก พบว่าเมื่อใช้ตัวอย่างหนักประมาณ 60 กรัมสามารถแยก สารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 5.4 ถึง 11.03 มิลลิกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของถนอมเกียรติ และคณะ (2551) ที่พบว่าเมื่อใช้น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น 50 กรัม จะสามารถสกัดแยก สารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 2 ถึง 8 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่มากเกินไปสำหรับการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL และเป็นไปตามข้อกำหนด ตามวิธีมาตรฐาน EN-1788 ที่กำหนดว่า น้ำหนัก สารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่างควรอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 5 มิลลิกรัม สำหรับ น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวอย่าง เช่น การทดลองของ D'Oca *et al.* (2006) ซึ่งใช้ตัวอย่างผง oregano เริ่มต้นเพียง 15 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบ อนินทรีย์ได้น้ำหนักอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 มิลลิกรัม ส่วน Engin (2005) ต้องใช้ตัวอย่างพริกไทยดำสูงถึง 400 กรัมในการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณ TL

3. การตรวจสอบชนิดของแร่ซิลิเกตในตัวอย่างกระเทียมผงด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการทดลองพบว่าองค์ประกอบของผลึกส่วนใหญ่ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีทั้ง 3 ชนิด คือ S1 S2 และ S3 ประกอบไปด้วยควอตซ์ (SiO_2) เป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยชนิดของแร่ที่มีอยู่ในตัวอย่างกระเทียมผงมีผลต่อการดูดกลืนปริมาณรังสีและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนในตัวอย่าง โดยหากเป็นควอตซ์บริสุทธิ์การดูดกลืนปริมาณรังสีและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนก็จะยิ่งมากขึ้นด้วย จากการทดลองของ *Christiane et al.* (2000) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบในตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ ผงควอตซ์ และตัวอย่างควอตซ์ที่อยู่ในรูปของทราย พบว่าตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์นั้นสามารถดูดกลืนปริมาณรังสีได้มากที่สุดจึงให้ค่าสัญญาณ TL สูงสุด

4. การประเมินความถูกต้องของการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ระหว่างตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีและไม่ผ่านการฉายรังสี

เมื่อทำการวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างกระเทียมผง พบว่า ค่า TL ratio ที่ได้มีค่าต่ำกว่า 0.1 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และที่มีค่ามากกว่า 0.5 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีในทุกตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN-1788 และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นต้นว่างานวิจัยของ *Chung et al.* (2004) ที่ได้ศึกษาสัญญาณ TL ของสารประกอบอินทรีย์ที่แยกได้จาก chestnut (*Castanea bungena*) งานวิจัยของ *ถนอมเกียรติและคณะ* (2551) ที่ได้ศึกษาในตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี และงานวิจัยของ *M.C.D'Oca et al.* (2007) ที่ศึกษาในตัวอย่าง oregano พบว่าค่า TL ratio ที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน EN-1788 เช่นเดียวกัน จึงทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเทคนิค TL สามารถตรวจสอบและแยกแยะระหว่างอาหารฉายรังสีและไม่ฉายรังสีได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

5. ผลของปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ต่อสัญญาณ TL

จากผลการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์จากตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากตารางที่ 5 พบว่าตัวอย่างกระเทียมผง S1 มีปริมาณสารประกอบอนินทรีย์มากที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่าง S2 และ S3 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ในตัวอย่างกระเทียมมีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากแหล่งที่ปลูกกระเทียมเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kitis *et al.* (2005) และปัจจัยอื่นร่วมด้วย จากผลดังกล่าวทำให้ตัวอย่าง S1 มีค่าสัญญาณ TL สูงที่สุด และเมื่อพิจารณาจากสัญญาณ TL ที่ได้จากตัวอย่างควอตซ์ที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ได้แก่ 0.5 1 และ 3 มิลลิกรัม พบว่าค่าสัญญาณ TL มีค่ามากขึ้นตามน้ำหนักควอตซ์ที่มากขึ้น จากการเปรียบเทียบสัญญาณ TL ที่ได้จากตัวอย่างควอตซ์กับตัวอย่างกระเทียมผงที่ฉายรังสีปริมาณเท่ากัน พบว่าสัญญาณ TL ที่ได้จากตัวอย่างควอตซ์จะมีค่ามากกว่าสัญญาณ TL ที่ได้จากตัวอย่างกระเทียม เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักควอตซ์และน้ำหนักแร่ซิลิเกตที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแร่ซิลิเกตที่สกัดได้จากตัวอย่างกระเทียมมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ จึงมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของรังสีได้น้อยกว่า

6. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับสัญญาณ TL

จากการศึกษาผลของปริมาณรังสีดูดกลืนต่อสัญญาณ TL พบว่าเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นจาก 0 ถึง 4 หรือ 6 กิโลเกรย์ ค่า TL ratio จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นจาก 6 ถึง 10 กิโลเกรย์ ค่า TL ratio จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรือลดลงในบางช่วงปริมาณรังสี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของถนอมเกียรติ และคณะ (2551) ที่พบว่าตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 5 กิโลเกรย์ ค่า TL intensity ของ G1 และค่า TL ratio มีค่าต่ำกว่าที่ปริมาณรังสี 3 กิโลเกรย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอาจเป็นผลมาจากปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อสัญญาณ TL เช่น ความไม่แน่นอนเดียวกันของตัวอย่าง ที่มีผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดได้หรือลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง (Pinnioja *et al.*, 1999) เนื่องจากลักษณะของ glow curve ที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่า จำนวนของ trap ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นกับปัจจัยด้านองค์ประกอบภายในของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดได้จากตัวอย่าง โดย Pinnioja *et al.* (1999) ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบของ feldspar ต่อความเข้มของสัญญาณ TL จากสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากอาหาร พบว่า TL intensity มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายใน เช่น ปริมาณ FeO หรือ CaO/Na₂O ratio เป็นต้น สำหรับกรณีตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณสูงกว่า 4 หรือ 6 กิโล

เกรย์ ค่า TL ratio มีค่าลดลงในบางตัวอย่าง ซึ่งเป็นอาจผลมาจากความสามารถในการดูดกลืนรังสีของผลึกควอตซ์อันเนื่องมาจากปริมาณรังสีที่สูงเกิน ส่งผลให้ผลึกเกิดการอึมตัว นอกจากนี้อาจเกิดจากเครื่องอ่านสัญญาณ TL ไม่สามารถอ่านสัญญาณที่มีความเข้มสูงมาก ๆ ได้ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ M.C.D'Oca *et al.* (2007) ที่ศึกษาตัวอย่าง oregano ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยเทคนิค TL พบว่าสามารถแยกแยะได้ว่าการฉายรังสีหรือไม่ผ่านการฉายรังสีแม้จะเก็บไว้นาน 7 เดือน แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าฉายรังสีมาในปริมาณเท่าใด

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับสัญญาณ TL โดยพิจารณาค่าสัญญาณ TL ใน 2 รูปแบบ ได้แก่ ค่า G1 และค่า TL ratio ทั้งของควอตซ์ และกระเทียม โดยพิจารณาจากค่า R^2 (จากภาพที่ 17 18 และ 19) โดยค่า R^2 ที่ได้สามารถแยกออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีของตัวอย่างควอตซ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 นั้นได้ R^2 เท่ากับ 0.9402 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ TL ratio ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9868 ส่วนในกรณีของตัวอย่างกระเทียมพวงทั้ง 3 ชนิด พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 ได้ R^2 อยู่ในช่วง 0.97 ถึง 0.99 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ TL ratio มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.94 ถึง 0.98 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณ TL ทั้ง 2 รูปแบบให้ผลไม่สอดคล้องกัน คือความสัมพันธ์ในรูปแบบของ TL ratio นั้นเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นในช่วง 0 ถึง 4 กิโลเกรย์ค่าสัญญาณ TL จะเพิ่มมากขึ้น และที่ปริมาณรังสีในช่วง 4 ถึง 10 กิโลเกรย์ ค่าสัญญาณ TL มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับ G1 พบว่าค่าสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างกระเทียมพวง S2 และ S3 ที่เป็น unknown รหัส A ถึง L พบว่าตัวอย่าง S2 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 และ 8 กิโลเกรย์ ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง เมื่อพิจารณาจากค่า TL ratio ทำนองเดียวกับตัวอย่าง S3 ซึ่งสามารถใช้ค่า TL ratio ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 และ 6 กิโลเกรย์ ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงเช่นกัน จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 13 และ 14 พบว่าตัวอย่าง unknown ทุกตัวอย่างไม่สามารถใช้ค่า G1 ในการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า G1 ขึ้นกับปริมาณแเรซิดูเกดที่สกัดได้ จึงอาจทำให้ผลการวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนสูง

7. ศึกษาผลของระยะเวลาหลังการฉายรังสีที่มีต่อสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

จากการตรวจวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีภายหลังจากการเก็บรักษาในที่มืดเป็นเวลา 1 วัน 1 2 และ 3 เดือน สามารถตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีได้ถูกต้องแม้เก็บไว้นาน 3 เดือน แม้จะมีบางตัวอย่างที่ค่า TL ratio ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่สามารถยืนยันการฉายรังสีได้จากการพิจารณาค่าแห่งของ glow peak 1 ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะพบพีคที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะพบพีคที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่สามารถใช้เทคนิค TL ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีที่เก็บไว้เป็นเวลานานได้อย่างถูกต้อง เช่น D'Oca *et al.* (2007) พบว่าเทคนิค TL สามารถตรวจสอบ oregano ฉายรังสีที่เก็บไว้นาน 7 เดือน Villavicencio *et al.* (1998) พบว่าเทคนิค TL สามารถตรวจสอบผลของการฉายรังสีของตัวอย่างถั่วบราซิลหลังเก็บไว้นาน 6 เดือนได้อย่างถูกต้อง และ Malec-Czechowska *et al.* (2003) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีของตัวอย่างเห็ดอบแห้ง พบว่าเทคนิค TL ให้ผลการตรวจสอบที่มีความถูกต้องแม่นยำแม้เก็บตัวอย่างไว้นาน 8 เดือน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดตามมาตรฐานของ EN 1788 โดยปรับให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างกระเทียมผง พบว่า ตัวอย่างกระเทียมผงหนัก 60 กรัมจะสามารถสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 5.4 ถึง 11.03 มิลลิกรัม ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์สัญญาณ TL
2. จากการวิเคราะห์ชนิดสารประกอบอนินทรีย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ตัวอย่างกระเทียมผงทั้ง 3 ชนิดมีแร่ควอตซ์เป็นสารประกอบอนินทรีย์หลัก โดยจากการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ด้วยสารละลายโซเดียมโพลีทังสเตท พบว่าตัวอย่างกระเทียมผง 1 (S1) มีแร่ควอตซ์ปริมาณสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างกระเทียมผง 2 (S2) และตัวอย่างกระเทียมผง 3 (S3) ตามลำดับ ทั้งนี้แร่ควอตซ์ที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างกระเทียมผง มีผลต่อความเข้มของสัญญาณ TL โดยสัญญาณ TL มีค่าเพิ่มขึ้นตามแร่ควอตซ์ที่เพิ่มขึ้น
3. การตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค TL ตามมาตรฐาน EN-1788 สามารถตรวจสอบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในขณะที่การตรวจสอบเชิงปริมาณด้วยเครื่องอ่านสัญญาณ TL รุ่น Harshaw 4500 ซึ่งตั้งค่า TTP (Time Temperature Profile Setup) ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส และเวลาในการวัด 42 วินาที โดยเลือกค่าการวิเคราะห์ข้อมูล ROI ในช่วง 29 ถึง 200 พบว่าสามารถใช้ค่า TL ratio ในการตรวจสอบเชิงปริมาณสำหรับช่วงปริมาณรังสีระหว่าง 0 ถึง 4 กิโลเกรย์ได้อย่างถูกต้อง ส่วนในช่วงปริมาณรังสีระหว่าง 4 ถึง 10 กิโลเกรย์ ไม่สามารถตรวจสอบได้ภายใต้เงื่อนไขและสภาวะที่ทำการทดลองดังกล่าว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปัจจัยที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ การอิมตัวของแร่ซิลิเกตที่ปริมาณรังสีสูงกว่า 4 ถึง 6 กิโลเกรย์ ส่งผลให้การตอบสนองต่อรังสีของแร่ซิลิเกตในตัวอย่างกระเทียมมีความไม่แน่นอนสูง นอกจากนี้แร่ซิลิเกตที่มีอยู่ในตัวอย่างกระเทียมในปริมาณที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้สัญญาณ TL มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งทำให้ dose – response curve ของกระเทียมผงโดยเฉพาะในช่วงปริมาณรังสีระหว่าง 6 ถึง 10 กิโลเกรย์ขึ้นกับชนิดของกระเทียม

4. เทคนิค TL สามารถใช้ตรวจสอบการฉายรังสีของตัวอย่างกระเทียมผงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ถึงแม้ว่าจะเก็บตัวอย่างไว้นาน 3 เดือน หลังการฉายรังสีโดยมีการจางหายของสัญญาณเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจาก ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแสง อุณหภูมิ หรือแรงที่มากระทำอื่น ๆ ทำให้เกิดการจางหายได้



ข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบอาหารฉายรังสีสามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่วิธีการที่ได้รับความนิยมอีกวิธีหนึ่งก็คือ เทคนิค TL ที่ให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งได้มีการศึกษาและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยการนำเทคนิค TL มาใช้ยังเป็นเรื่องที่ใหม่และจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับตัวอย่างอาหารแต่ละประเภท ซึ่งสามารถพัฒนาและศึกษาเพิ่มเติมได้อีกหลายเรื่อง เช่น

1. ในการตรวจสอบเชิงปริมาณควรมีการศึกษาเพิ่มเติมมากยิ่งขึ้นเป็นต้นว่า ศึกษาขีดจำกัดของเครื่องอ่านสัญญาณ TL เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของปริมาณแร่ซีลิคเกตให้สอดคล้องกับขีดจำกัดนั้น นอกจากนี้ควรศึกษาปริมาณของแร่องค์ประกอบที่มีในตัวอย่างทั้งหมด ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด โดยการบดตัวอย่างให้ละเอียด

2. การศึกษาผลของเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสีในนานขึ้น

นอกจากนี้ในการทดลองยังจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความคิดพลาดจากการปนเปื้อนของฝุ่น (contaminating dust) โดยการตรวจสอบการปนเปื้อนของฝุ่นสามารถทำได้โดยการทำ full process blank เพื่อพัฒนาให้ได้ค่าความถูกต้องที่มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2548. **มาตรการอาหารฉายรังสีของสหภาพ ยุโรป**. สารระนำรู้สำหรับผู้ประกอบการ. แหล่งที่มา : <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/food/saranaroo/XrayFood.pdf>, 13 เมษายน 2551.

ถนอมเกียรติ จันทร์จิระจิตร, สมจิตต์ ปาละกาศ, วันวิสา สุกประเสริฐ, พรรณี พักคง และ วารุณี วารัญญานนท์. 2551. การตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บริษัทเมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด. **X-ray:Dispelling The Myths, Unleashing The Potential**. แหล่งที่มา : www.th.mt.com, 21 มกราคม 2552.

ปยุตต์มา ศิริพันธ์โนน. **X-ray Diffractometer (XRD)**. ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สกุลธรรม เสนาะพิมพ์. 2551. **วิธีหาความบกพร่องในความสมบูรณ์ของผลึก : เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูง**. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. แหล่งที่มา : www.thps.org/article/2501/3/article250103.html, 21 มกราคม 2552.

เสาวพงศ์ เจริญ และ สุรศักดิ์ สัจจบุต. 2550. **รู้ได้อย่างไรว่าอาหารนี้ผ่านการฉายรังสีแล้วหรือยัง**. แหล่งเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. แหล่งที่มา : <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5002/nkc5002y.html>, 25 พฤษภาคม 2551.

อรอนงค์ มหัทธพงษ์. 2548. **ส่งออกอาหารฉายรังสีต้องระวัง**. ฝ่ายบริการข้อมูลและสารสนเทศ, สถาบันอาหาร. แหล่งที่มา : www.nfi.or.th/ <http://foodsafety.nfi.or.th>, 13 เมษายน 2551.

อรรถโกวิท สงวนสัตย์. 2545. การพัฒนาชุดทดสอบคุณภาพเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉรา แสงอริยวนิช. 2006. เครื่องอิเล็กทรอนิกส์แฟลคโตมิเตอร์ D8 ADVANCE, สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

Bayram, G. and H. Delincée. 2004. Identification of irradiated Turkish foodstuffs combining various physical detection methods. **Food control**. 15: 81-91.

Bhatti, I.A., B.K.Kim, M.Y.Kim, J.Lee, H.K.kim and J.H.Kwon. 2008. The screening and/or identification of different types of irradiated eggs by analyzing photo-stimulated luminescence and thermoluminescence. **Food Control**. 19: 587-591.

Briggs, D. and M.P. Seah. “**Practical Surface Analysis. Volume 1 – Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy**”, Second Edition, John Wiley and Sons, Chichester, 1990

Christiane, S. and H. D. 2000. Thermoluminescence Analysis for Detection of Irradiated Food – Effect of Dose Rate on the Glow Curves of Quartz. **Lebensm.-Wiss.u. – Technol**. 33: 440-443.

Chung, H.W., H Delincee, S.B. Han, J.H. Hong, H.Y. Kim, M.C. Kim, M.W. Byun and J.H. Kwon. 2004. Trials to identify irradiated chestnuts (*Castanea bungena*) with different analytical techniques. **Radiat. Phys. Chem**. 71: 179-182.

Directive 1999/EC of The European Parliament and of The Council of 22 Feb 1999 on The Approximation of The Law of Member State Concerning Foods and Food Ingredients Treated with Ionising radiation.

Directive 1999/EC of The European Parliament and of The Council of 22 Feb 1999 on The Establishment of A Community List of Foods and Food Ingredients Treated with Ionising radiation.

Engin, B. 2007. Thermoluminescence parameters and kinetics of irradiated inorganic dust collected from **black pepers**. **Food Control**. 18:243-250

European Standard EN 1788. 2001. **Foodstuffs — Thermoluminescence Detection of Irradiated Food from Which Silicate Minerals can be Isolated**. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Ijaz A. Bhatti, Byeong-Keun Kim, Mi-Yeung Kim, Jeongeun Lee, Hyun-Ku Kim and Joong-Ho Kwon. 2007. **The screening and/or identification of different of irradiated eggs by analyzing photo-stimulated luminescence and thermoluminescence**. **Food Control**.

Khan, H.M., I.A. Bhatti and H. Delincee. 2002. Thermoluminescence of contaminating minerals for the detection of radiation treatment of dried fruits. **Radiat. Phys. Chem.** 63: 403-406.

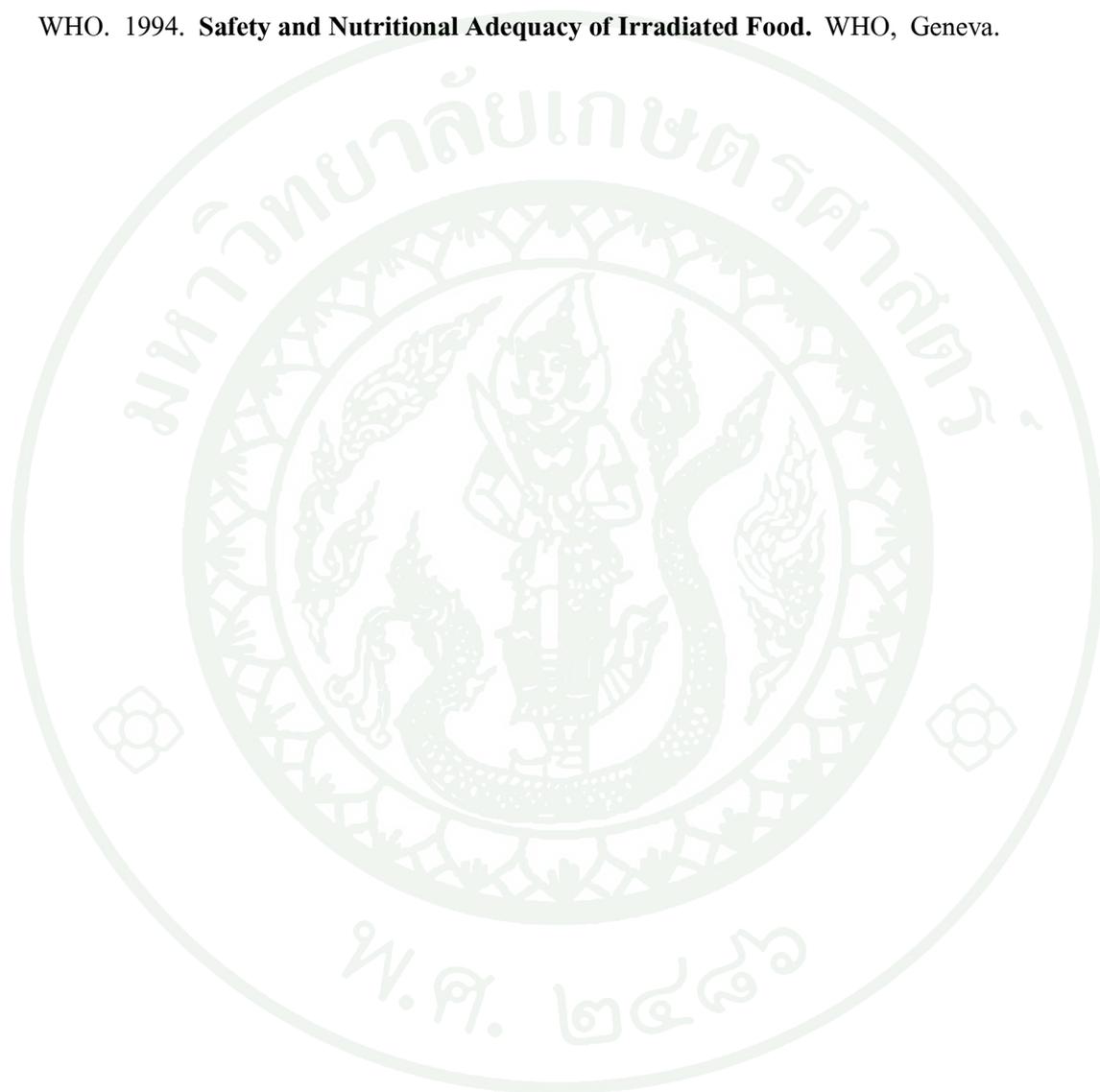
Kitis, G., E.C. Zaragoza and C. Furetta. 2005. Thermoluminescence properties of Chile Guajillo (paprika). **Appl. Radiat. Isotopes**. 63: 247-254.

D Oca, M.C., A. Bartolotta, M.C. Cammilleri, M. Brai, M. Marrale, A. Triolo and A. Parlato. 2007. Qualitative and qualitative thermoluminescence analysis on irradiated oregano. **Food Control**. 18:996-1001.

Cutrubinis, M., H. Delincee, G. Bayram, A.Lucia and C.H.Villavicencio. 2004. **Germination test for identification of irradiated garlic**. **Eur Food Res Technol**. 219:178-183.

Soika, C. and H. Delincee. 2000. Thermoluminescence analysis for detection of irradiated food-
Luminescence characteristics of minerals for different types of radiation and radiation
doses. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.** 33:431-439.

WHO. 1994. **Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food.** WHO, Geneva.





ภาคผนวกที่ 1 สารสำคัญของประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ.2549 เรื่องอาหารฉายรังสี

1. กำหนดให้อาหารฉายรังสี เป็นอาหารที่กำหนดกรรมวิธีการผลิตและเป็นอาหารที่ต้องมีฉลาก ดังนั้น การผลิตและการแสดงฉลากของอาหารฉายรังสี ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดเฉพาะของประกาศฉบับนี้ และยังคงปฏิบัติตามประกาศว่าด้วยเรื่องอาหารนั้นๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งประกาศว่าด้วยเรื่องฉลาก ด้วย

2. กำหนดนิยามของอาหารฉายรังสี ขอบข่ายของการฉายรังสี และวัตถุประสงค์การฉายรังสีไว้ดังนี้

- อาหารฉายรังสี หมายความว่า อาหารที่ผ่านกรรมวิธีการฉายรังสีเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี

- การฉายรังสีอาหาร หมายความว่า กระบวนการผลิตอาหาร โดยกรรมวิธีการฉายรังสี

- ผู้ฉายรังสีอาหาร หมายความว่า ผู้ที่ได้รับอนุญาตให้ทำการฉายรังสีอาหาร

- การวัดปริมาณรังสี (Dosimetry) หมายความว่า การวัดปริมาณรังสีดูดกลืนที่อาหารได้รับหลังจากผ่านการฉายรังสีแล้ว

- ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed Dose) หมายความว่า ปริมาณพลังงานที่อาหารดูดกลืนไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อาหารเมื่อได้รับรังสี มีหน่วยเป็นเกรย์

- วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหาร หมายความว่า การฉายรังสีอาหารเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อชะลอการสุก เพื่อลดปริมาณปรสิต เพื่อยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา เพื่อทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง หรืออื่นๆ ทั้งนี้การฉายรังสีอาหารต้องมีปริมาณรังสีดูดกลืนต่ำสุดที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี และมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร โดยไม่ทำลายโครงสร้าง คุณสมบัติเชิงหน้าที่ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร

3. กำหนดให้กรรมวิธีการฉายรังสีอาหารต้องปฏิบัติตาม Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food (CAC/RCP 19-1979, Rev.2-2003) และหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขที่กำหนดไว้ตามประกาศฉบับนี้ ได้แก่

3.1 ชนิดของรังสีที่ใช้ต้องได้จากแหล่งของรังสีที่เป็นต้นกำเนิด คือ

- รังสีแกมมา จากเครื่องกำเนิดรังสีที่มีโคบอลต์-60 (^{60}Co) หรือ ซีเซียม-137 (^{137}Cs)
- รังสีเอกซ์ จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 5 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ
- รังสีอิเล็กตรอน จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์

3.2 ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ต้องเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีตามแต่กรณี ทั้งนี้ปริมาณรังสีดูดกลืนต้องไม่เกินที่กำหนดไว้ในเอกสารหมายเลข 1 ของบัญชีแนบท้ายประกาศซึ่งได้กำหนดปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดที่อนุญาตสำหรับการฉายรังสีตามวัตถุประสงค์ต่างๆไว้ในกรณีที่มีการใช้ปริมาณรังสีดูดกลืนเกินกว่าปริมาณที่กำหนด หรือมีวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีต่างจากที่กำหนดไว้ในบัญชีแนบท้ายประกาศ ต้องแสดงเหตุผลทางวิชาการหรือความจำเป็นทางเทคนิคที่สมควร โดยได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา หรือตามที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาประกาศกำหนด โดยความเห็นชอบของคณะกรรมการอาหาร

3.3 ต้องมีการควบคุมกรรมวิธีการผลิตอาหารฉายรังสี ดังนี้

- การฉายรังสีอาหาร ต้องดำเนินการในสถานที่และใช้เครื่องมือที่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยสถานที่ฉายรังสีนั้นต้องมีการออกแบบเพื่อความปลอดภัย มีประสิทธิภาพ และถูกสุขลักษณะในการผลิตอาหารฉายรังสี

- ต้องมีพนักงานที่มีความรู้ความสามารถในการใช้เครื่องฉายรังสี ได้รับการฝึกอบรมเฉพาะด้านการฉายรังสีอาหาร และมีจำนวนพนักงานเพียงพอในการปฏิบัติงาน

- การควบคุมกรรมวิธีการผลิตภายในสถานที่ฉายรังสี ให้ความสำคัญถึงการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการดำเนินการฉายรังสีอาหาร และข้อมูลปริมาณรังสีดูดกลืนของอาหารที่มีการฉายรังสี โดยข้อมูลต้องมีความชัดเจน ต้องเก็บรักษาไว้อย่างน้อย 3 ปี ในสภาพที่พร้อมจะให้ตรวจสอบได้ และสถานที่เก็บควรมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่ป้องกันการเสียหายหรือเสื่อมสภาพ

4. กำหนดให้อาหารที่จะนำมาฉายรังสีต้องผ่านการเตรียม ผ่านกรรมวิธีการผลิต และขนส่งตามหลักเกณฑ์ว่าด้วยสุขลักษณะที่ดี เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัยของอาหาร สำหรับวัตถุดิบเริ่มต้นจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย ต้องปฏิบัติตามหลักสุขลักษณะ มาตรฐานอาหาร และหลักเกณฑ์การขนส่ง

5. กำหนดให้การฉายรังสีอาหาร ไม่ว่าจะเป็นโยบายในการคุ้มครองสุขภาพผู้บริโภคหรือไม่ก็ตาม ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดทางวิชาการ (technological requirements) คือ อาหารต้องได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนต่ำสุดที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี และได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และต้องไม่นำการฉายรังสีอาหารมาใช้ทดแทนหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร (Good Manufacturing Practices) หรือหลักเกณฑ์การปฏิบัติที่ดีทางการเกษตร (Good Agricultural Practices) ทั้งนี้ข้อกำหนดดังกล่าวในข้อ 4 และ 5 ของประกาศมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้มีการนำผลิตภัณฑ์อาหารหรือวัตถุดิบทางการเกษตรที่ไม่ได้คุณภาพมาตรฐานมาผ่านกระบวนการฉายรังสี เพื่อปิดบังข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาจึงกำหนดห้ามนำกรรมวิธีการฉายรังสีอาหารมาใช้ทดแทนหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร หรือหลักเกณฑ์การปฏิบัติที่ดีทางการเกษตร โดยเน้นว่าอาหารที่จะนำมาผ่านการฉายรังสี จะต้องผ่านขั้นตอนในการเตรียมและการปฏิบัติ ซึ่งเป็นไปตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่ดีในการผลิตอาหารตั้งแต่เบื้องต้นก่อน หรือวัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาฉายรังสีจะต้องมีการผลิตเป็นไปตามหลักเกณฑ์การปฏิบัติที่ดีทางการเกษตร

6. กำหนดแนวปฏิบัติข้อห้ามการฉายรังสีซ้ำไว้ ดังนี้ อาหารที่ผ่านการฉายรังสีมาแล้วจะนำมาฉายรังสีซ้ำอีกไม่ได้ ยกเว้นอาหารที่มีความชื้นต่ำเช่น ผลไม้แห้งประเภทธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้ง อาหารแห้ง และอาหารอื่นในทำนองเดียวกันนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดแมลงที่เข้าไปภายใน หลังจากที่ได้มีการฉายรังสีแล้ว ทั้งนี้ปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดโดยรวมไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ เว้นแต่มีเหตุผลทางวิชาการหรือความจำเป็นทางเทคนิคที่สมควร และต้องไม่เป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค หรือทำลายคุณภาพของอาหาร ทั้งนี้หากมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดโดยรวมเกิน 10 กิโลเกรย์ ต้องได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

7. กำหนดกรณีการฉายรังสีอาหารที่ไม่ถือว่าเป็นการฉายรังสีซ้ำไว้ ดังนี้

- อาหารที่เตรียมจากวัตถุดิบซึ่งได้รับการฉายรังสีในระดับต่ำมาแล้ว เช่น การควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง การป้องกันการงอกของรากและหัวพืช แล้วถูกนำมาฉายรังสีเพื่อวัตถุประสงค์อื่น หรือ

- อาหารที่มีส่วนประกอบที่ผ่านการฉายรังสีแล้วน้อยกว่าร้อยละ 5 ถูกนำมาฉายรังสี หรือ

- อาหารที่ไม่สามารถได้รับปริมาณรังสีตามกำหนดในครั้งเดียว เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ อาหารดังกล่าวข้างต้นต้องมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดโดยรวมไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ เว้นแต่มีหลักฐานทางวิชาการหรือความจำเป็นทางเทคนิคที่สมควรมาแสดงว่าไม่เป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค หรือทำลายคุณภาพของอาหาร กรณีที่มีการใช้ปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดโดยรวมเกิน 10 กิโลเกรย์ ต้องได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เสียก่อนจึงจะดำเนินการได้

8. การแสดงฉลากอาหารฉายรังสี ต้องปฏิบัติตามข้อ 10 ข้อ 11 และข้อ 12 ของประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่อง อาหารฉายรังสี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8.1 ต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่อง ฉลาก: (ฉบับที่ 194) พ.ศ. 2543 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติมโดยประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 252) พ.ศ. 2545 เรื่อง ฉลาก (ฉบับที่ 2)

8.2 ต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่องอาหารนั้นๆ

8.3 ต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่องอาหารฉายรังสี ดังนี้

8.3.1 แสดงชื่อและที่ตั้งของสำนักงานใหญ่ของผู้ผลิตและผู้ฉายรังสี

8.3.2 แสดงข้อความว่า “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกัน

8.3.3 ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีด้วยข้อความดังนี้ “เพื่อ.....” (ความที่เว้นไว้ให้ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี)

8.3.4 การแสดงเครื่องหมายการฉายรังสีอาจจะแสดงหรือไม่ก็ได้ แต่หากจะแสดงต้องใช้ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในเอกสารหมายเลข 2 ท้ายประกาศนี้ ใกล้เคียงชื่อของอาหาร

8.3.5 วันเดือนและปีที่ทำการฉายรังสี

8.4 กรณีอาหารฉายรังสีหากถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารอื่น ต้องแสดงข้อความ “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกัน กำกับชื่อส่วนประกอบของอาหารนั้น

8.5 กรณีที่ส่วนประกอบของอาหารมีเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้มาจากวัตถุดิบที่ผ่านการฉายรังสีต้องแสดงข้อความ “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกัน กำกับชื่อส่วนประกอบของอาหารนั้นด้วย ทั้งนี้กรณีอาหารตามข้อ 8.4 และ 8.5 ที่มีได้จำหน่ายโดยตรงต่อผู้บริโภคตามข้อ 5 ของประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 194) พ.ศ. 2543 เรื่อง ฉลาก ลงวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2543 อาหารที่ผลิตเพื่อการส่งออก หรืออาหารอื่นที่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับการแสดงฉลากเฉพาะ ให้แสดงชื่ออาหารหรือชื่อส่วนประกอบที่ผ่านการฉายรังสี โดยใช้ข้อความว่า “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมาย ในทำนองเดียวกันกำกับชื่อ

ส่วนประกอบที่ผ่านการฉายรังสีนั้นด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องปรุงรส ที่มีกระเทียมผ่านการฉายรังสีเป็นส่วนประกอบ ให้ใช้ข้อความว่า “มีกระเทียมผ่านการฉายรังสีแล้วเป็นส่วนประกอบ” หรือ “ใช้กระเทียมฉายรังสีเป็นส่วนประกอบ” หรือข้อความอื่นที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกันนี้ประกอบชื่ออาหารหรือวัตถุดิบที่ผ่านการฉายรังสีดังกล่าวด้วย

9. กำหนดการแสดงเครื่องหมายการฉายรังสีตามประกาศฉบับนี้ ให้สามารถแสดงเครื่องหมายการฉายรังสีหรือไม่ก็ได้ แต่หากจะแสดงต้องใช้ตามรูปแบบที่ได้มีการปรับเปลี่ยนตามรูปแบบสากล ดังนี้ รูปวงกลมขอบหนาที่บิสเซียว ขอบของครึ่งวงกลมช่วงบนไม่ติดกัน แต่แบ่งเป็นสี่ส่วนเท่าๆกัน มีช่องว่างระหว่างขอบนอกแต่ละส่วน 5 ระยะเท่าๆกัน ภายในเนื้อที่ครึ่งวงกลมช่วงบนมีวงกลมที่บิสเซียวขนาดเล็ก ส่วนภายในเนื้อที่ครึ่งวงกลมช่วงล่างจะมีเครื่องหมายรูปวงรีที่บิสเซียว 2 วงแยกกัน ปลายด้านหนึ่งของแต่ละวงเชื่อมต่อกัน

10. กำหนดให้การใช้ภาชนะที่บรรจุอาหารฉายรังสี ต้องใช้ภาชนะที่บรรจุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการฉายรังสี อยู่ในสภาพที่ถูกต้องหลักสุลักษณะ ตรงตามวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี และเป็นไปตามหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตอาหาร (Good Manufacturing Practices) ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสี

11. วันที่บังคับใช้/บทเฉพาะกาล ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่อง อาหารฉายรังสี ได้ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 123 ตอนพิเศษ 93 ง ลงวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2549 และประกาศจะมีผลบังคับใช้เมื่อพ้นกำหนด 180 วัน นับแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป คือ ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2550 ดังนั้น ผู้ที่ได้รับอนุญาตหลังวันที่ประกาศใช้บังคับต้องปฏิบัติตามทันที (คณะกรรมการอาหารและยา, 2549)

ตารางผนวกที่ 1 ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 0.5 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 0.5 มิลลิกรัม					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักแร่ (มิลลิกรัม)	G1 (C)	G2 (C)	TL ratio (G1/G2)
0	0.5Q1-0	0.5	6.88E-07	33.28	2.07E-08
	0.5Q2-0	0.5	3.03	112.90	0.03
	0.5Q3-0	0.6	1.76	68.06	0.03
2	0.5Q1-2	0.3	88.11	46.19	1.91
	0.5Q2-2	0.7	189.10	75.94	2.49
	0.5Q3-2	0.2	118.20	54.37	2.17
4	0.5Q1-4	0.7	237.20	78.74	3.01
	0.5Q2-4	0.6	211.30	80.19	2.63
	0.5Q3-4	0.4	231.30	86.26	2.68
6	0.5Q1-6	0.7	310.10	182.00	1.70
	0.5Q2-6	0.5	145.40	49.81	2.92
	0.5Q3-6	0.5	266.50	86.56	3.08
8	0.5Q1-8	0.6	503.50	402.40	1.25
	0.5Q2-8	0.9	388.80	181.40	2.14
	0.5Q3-8	0.6	547.30	291.50	1.88
10	0.5Q1-10	0.8	181.70	58.25	3.12
	0.5Q2-10	0.8	284.10	100.50	2.83
	0.5Q3-10	0.5	404.50	180.40	2.24

ตารางผนวกที่ 2 ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 1 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 1 มิลลิกรัม					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักแร่			TL ratio (G1/G2)
		(มิลลิกรัม)	G1 (C)	G2 (C)	
0	1Q1-0	1.3	3.87	184.5	0.02
	1Q2-0	1.1	3.35	146.30	0.02
	1Q3-0	1.2	3.8	139.20	0.03
2	1Q1-2	1	299.2	118.90	2.52
	1Q2-2	0.8	184.6	132.20	1.40
	1Q3-2	1	274.5	119.70	2.29
4	1Q1-4	1.1	333.1	131.00	2.54
	1Q2-4	1	327.7	121.00	2.71
	1Q3-4	1	285.1	101.50	2.81
6	1Q1-6	0.7	391.4	124.40	3.15
	1Q2-6	1.1	508.4	322.80	1.58
	1Q3-6	1	344	212.40	1.62
8	1Q1-8	1.4	712.9	289.30	2.46
	1Q2-8	1.4	698.9	425.40	1.64
	1Q3-8	1.5	649.6	239.60	2.71
10	1Q1-10	1.1	554.1	245.40	2.26
	1Q2-10	1.2	673.8	218.00	3.09
	1Q3-10	1.1	694.2	215.50	3.22

ตารางผนวกที่ 3 ค่าสัญญาณ TL ของควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 3 มิลลิกรัมที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์น้ำหนัก 3 มิลลิกรัม					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักแร่		TL ratio	
		(มิลลิกรัม)	G1 (C)	G2 (C)	(G1/G2)
0	3Q1-0	3	6.01	215.3	0.03
	3Q2-0	3.3	6.89	309.40	0.02
	3Q3-0	3.9	9.04	608.70	0.02
2	3Q1-2	2.2	536	206.00	2.60
	3Q2-2	3.3	824.2	348.40	2.37
	3Q3-2	3.1	827.4	410.30	2.02
4	3Q1-4	2.9	881.2	375.20	2.35
	3Q2-4	3.2	937.2	394.10	2.38
	3Q3-4	2.8	891.6	313.40	2.85
6	3Q1-6	3.2	957.4	312.30	3.07
	3Q2-6	3.2	897.2	355.50	2.52
	3Q3-6	3.4	843.3	293.20	2.88
8	3Q1-8	4.1	1069	642.50	1.66
	3Q2-8	3.1	1105	644.40	1.72
	3Q3-8	4.2	1027	712.00	1.44
10	3Q1-10	4.1	1220	754.50	1.62
	3Q2-10	3.4	1199	1097.00	1.09
	3Q3-10	3.9	1175	1021.00	1.15

ตารางผนวกที่ 4 ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ตัวอย่าง S1					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักแร่ (มิลลิกรัม)	ค่าความเข้มสัญญาณ		TL ratio
			G1	G2	
0	S11-0	10.9	326.6 nC	1.028 mC	3.20x10 ⁻⁴
	S12-0	7.3	1,450 C	271.6 C	5.34x10 ⁻³
	S13-0	7.6	425.5 nC	205.4 C	2.07x10 ⁻⁹
2	S11-2	1.1	12.74 C	26.33 C	0.48
	S12-2	1.0	3.43 C	12.23 C	0.28
	S13-2	0.3	11.12 C	21.12 C	0.53
4	S11-4	7.3	272.6 C	174.5 C	1.56
	S12-4	6.4	258.2 C	189.7 C	1.41
	S13-4	3.1	502.1 C	442.3 C	1.14
6	S11-6	9.9	397.4 C	660.4 C	0.6
	S12-6	13.0	437.9 C	623.7 C	0.7
	S13-6	7.4	351.0 C	598.0 C	0.92
8	S11-8	6.8	539.4 C	489.2 C	1.1
	S12-8	12.7	444.1 C	706.6 C	0.63
	S13-8	10.4	462.5 C	489.1 C	0.95
10	S11-10	7.1	528.2 C	501.6 C	1.05
	S12-10	13.2	411.1 C	434.4 C	0.95
	S13-10	11.9	598.3 C	684.3 C	0.87

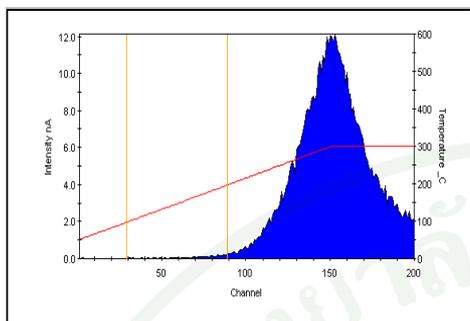
ตารางผนวกที่ 5 ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S2 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	ตัวอย่าง S2			
		น้ำหนักแร่ (มิลลิกรัม)	ค่าความเข้มสัญญาณ		TL ratio
			G1	G2	
0	S21-0	7.1	194.1 nC	114.9 C	1.69x10 ⁻⁹
	S22-0	7.9	1.478 nC	258.8 C	5.71x10 ⁻³
	S23-0	6	470.7 nC	146.3 C	3.22x10 ⁻⁹
2	S21-2	8.9	66.09 C	177.6 C	0.37
	S22-2	3.5	92.99 C	277.2 C	0.34
	S23-2	0.9	10.46 C	17.79 C	0.59
4	S21-4	1.5	45.91 C	41.76 C	1.1
	S22-4	4.3	42.48 C	35.19 C	1.21
	S23-4	5.4	41.51 C	56.58 C	0.73
6	S21-6	3.4	32.56 C	32.61 C	0.99
	S22-6	1.3	96.91 C	103.3 C	0.94
	S23-6	4.9	61.62 C	61.42 C	1
8	S21-8	3.5	55.75 C	73.71 C	0.76
	S22-8	8.6	48.02 C	203.8 C	0.24
	S23-8	2.6	91.78 C	176 C	0.52
10	S21-10	4.4	54.57 C	63.71 C	0.86
	S22-10	9.8	99.53 C	154.8 C	0.64
	S23-10	9.3	300.2 C	170.7 C	1.76

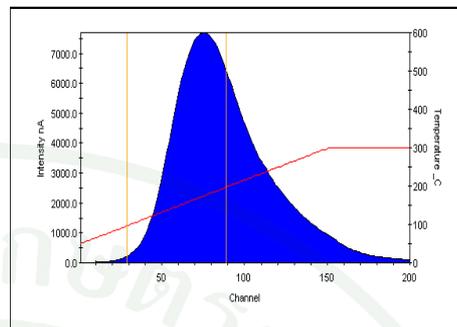
ตารางผนวกที่ 6 ค่าสัญญาณ TL ของตัวอย่างกระเทียมผง S3 ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

ตัวอย่าง S3					
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักแร่ (มิลลิกรัม)	ค่าความเข้มสัญญาณ		TL ratio
			G1	G2	
0	S31-0	2.2	52.11 nC	16.34 C	3.19x10 ⁻⁹
	S32-0	2.9	51.12 nC	39.38 C	1.3x10 ⁻⁹
	S33-0	0.6	175.1 nC	99.68 C	1.76x10 ⁻⁹
2	S31-2	0.8	380.6 nC	340.0 nC	1.12
	S32-2	2.5	17.5 C	29.95 C	0.58
	S33-2	1.4	7.29 C	17.86 C	0.41
4	S31-4	2.7	21.33 C	18.15 C	1.17
	S32-4	0.2	13.87 C	13.07 C	1.06
	S33-4	1.4	5.08 C	3.13 C	1.62
6	S31-6	3.7	18.42 C	22.5 C	0.82
	S32-6	4.9	50.87 C	71.6 C	0.71
	S33-6	2.9	14.75 C	18.12 C	0.81
8	S31-8	7.6	46.54 C	66.11 C	0.7
	S32-8	5.7	36.66 C	43.09 C	0.85
	S33-8	2.8	14.92 C	11.51 C	1.3
10	S31-10	6.2	93.29 C	153.3 C	0.61
	S32-10	3.3	17.78 C	25.17 C	0.69
	S33-10	4.5	28.28 C	34 C	0.83

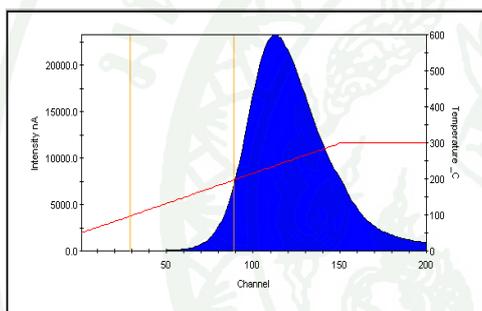
G1



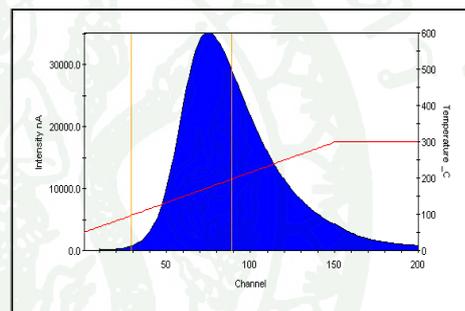
G2



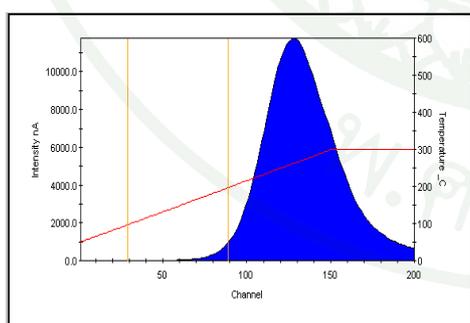
S1-0 kGy



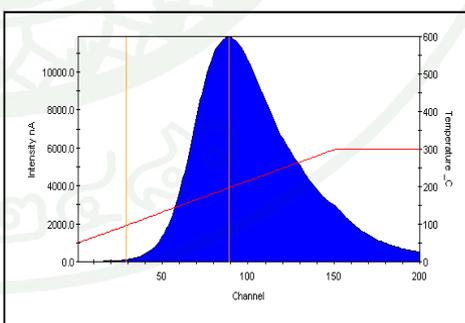
S1-0 kGy



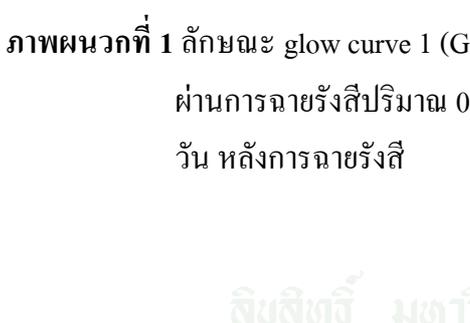
S1-2 kGy



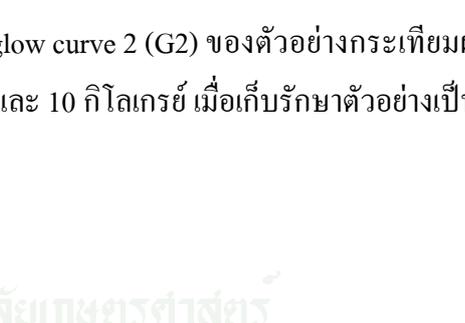
S1-2 kGy



S1-4 kGy

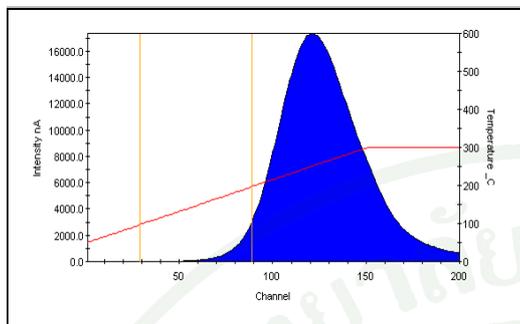


S1-4 kGy

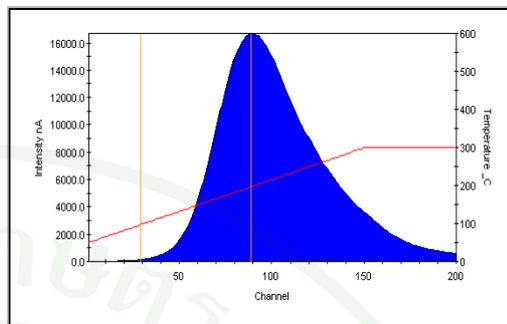


ภาพผนวกที่ 1 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี

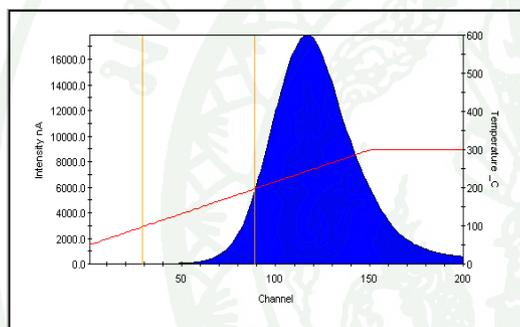
G1



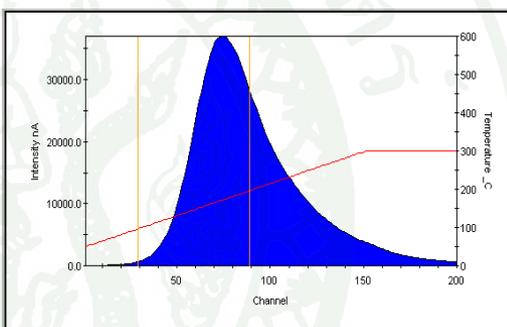
G2



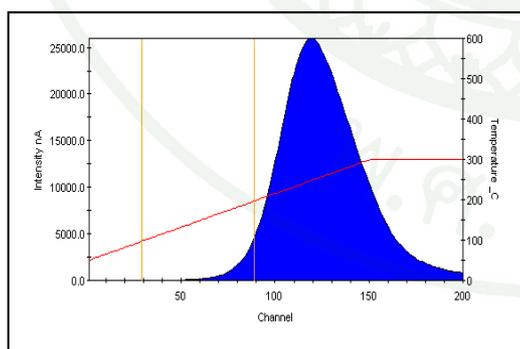
S1-6 kGy



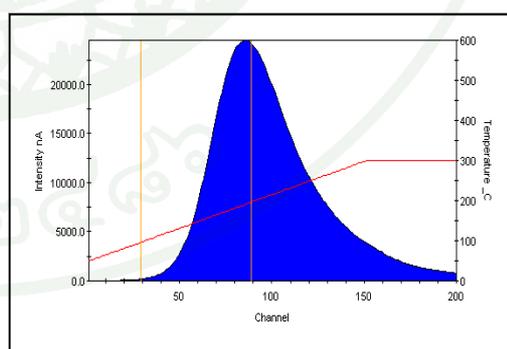
S1-6 kGy



S1-8 kGy



S1-8 kGy

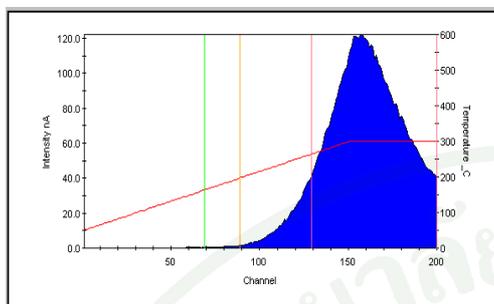


S1-10 kGy

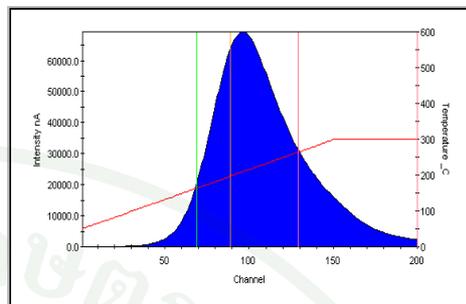
ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)

S1-10 kGy

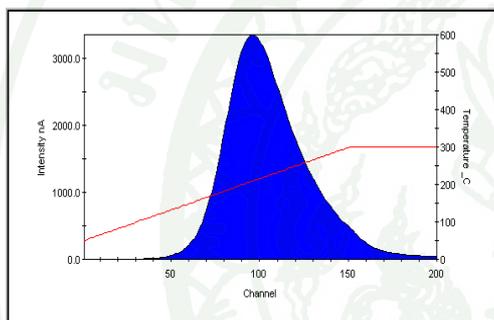
G1



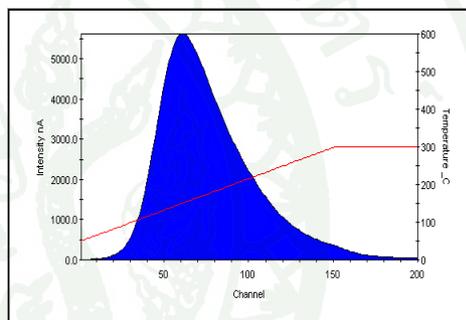
G2



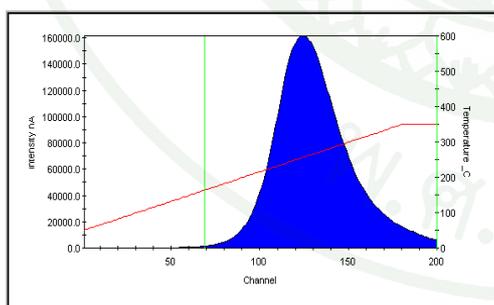
S1-0 kGy



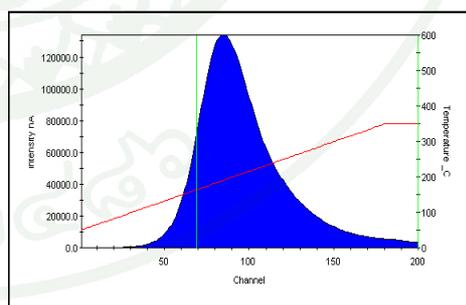
S1-0 kGy



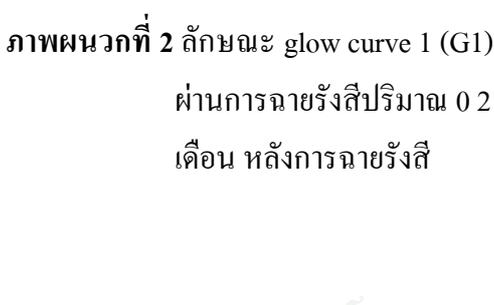
S1-2 kGy



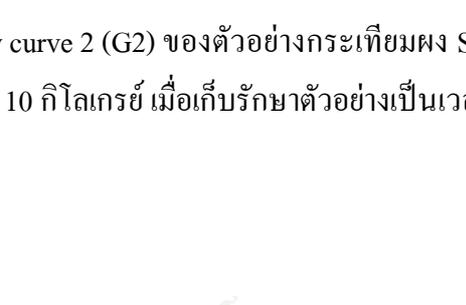
S1-2 kGy



S1-4 kGy

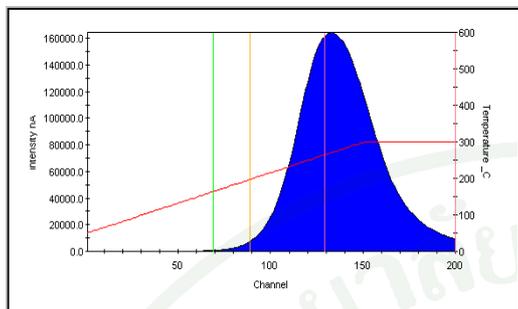


S1-4 kGy

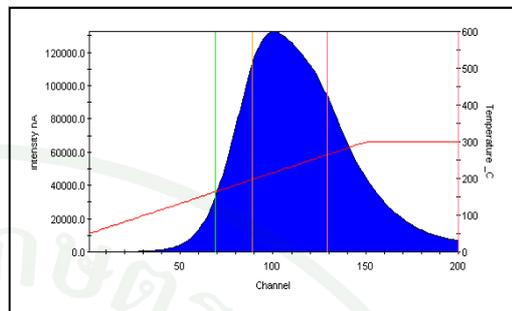


ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 เดือน หลังการฉายรังสี

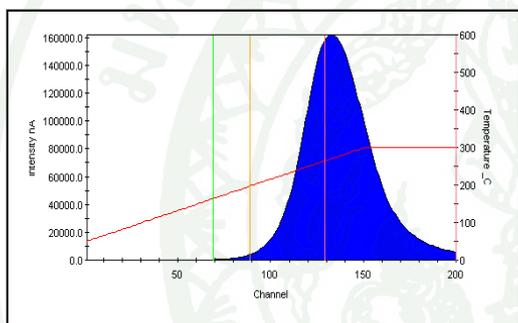
G1



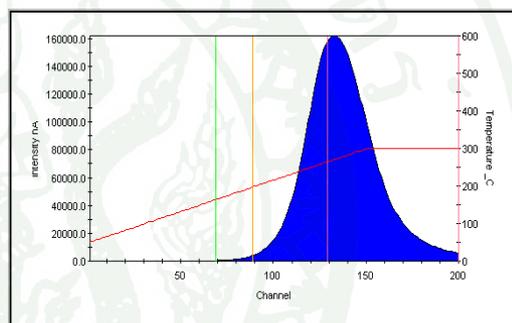
G2



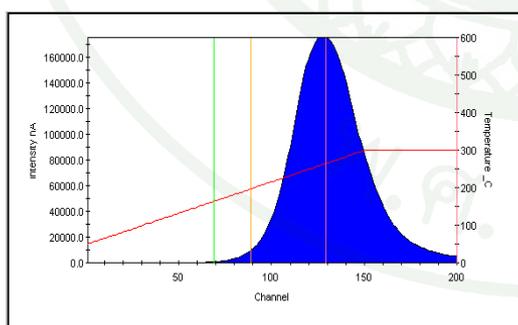
S1-6 kGy



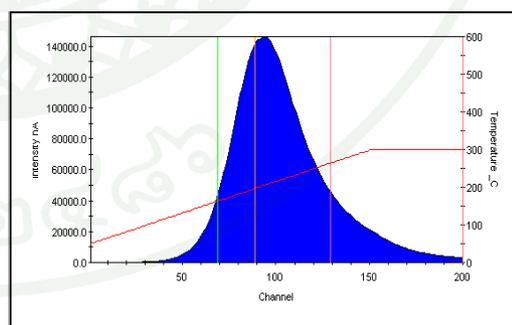
S1-6 kGy



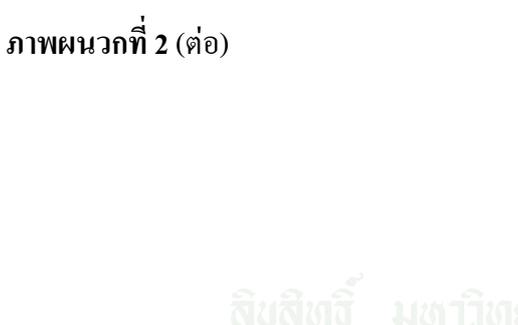
S1-8 kGy



S1-8 kGy



S1-10 kGy

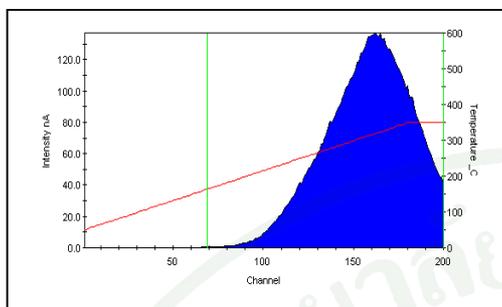


S1-10 kGy

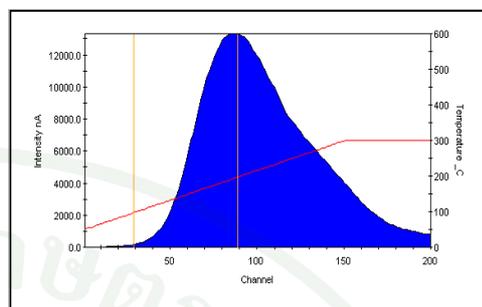


ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

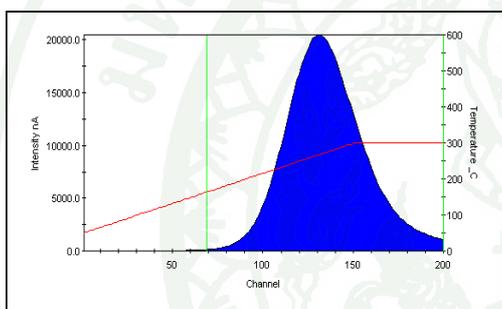
G1



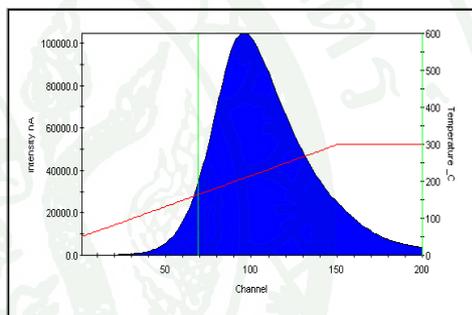
G2



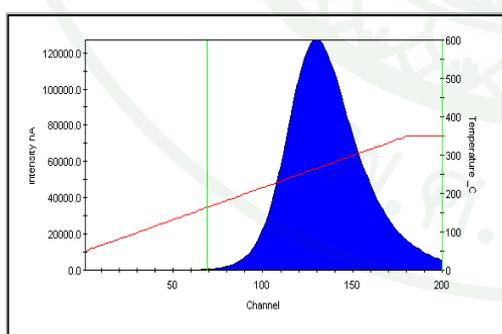
S1-0 kGy



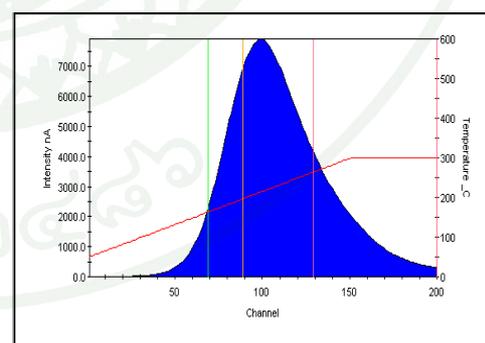
S1-0 kGy



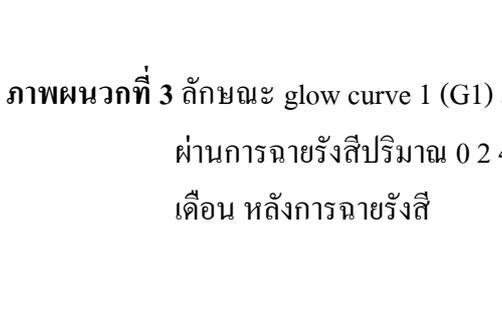
S1-2 kGy



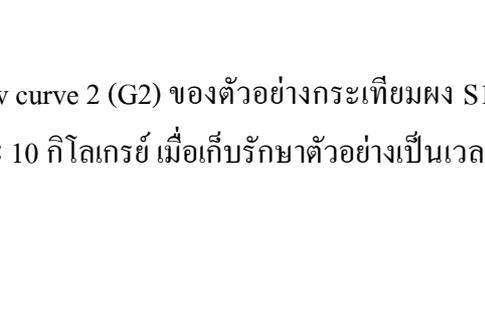
S1-2 kGy



S1-4 kGy

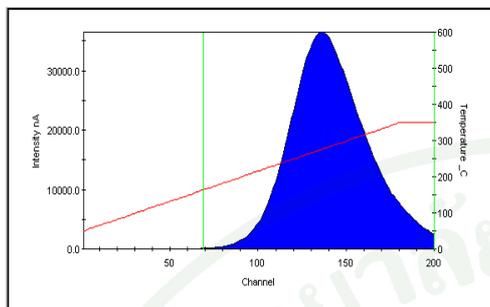


S1-4 kGy

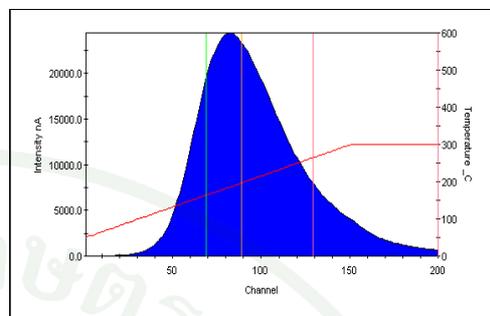


ภาพผนวกที่ 3 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 2 เดือน หลังการฉายรังสี

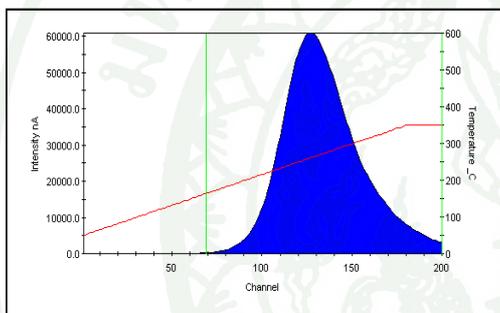
G1



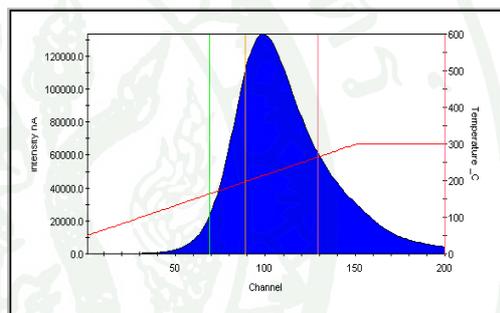
G2



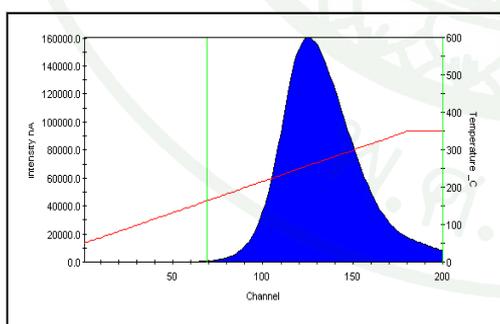
S1-6 kGy



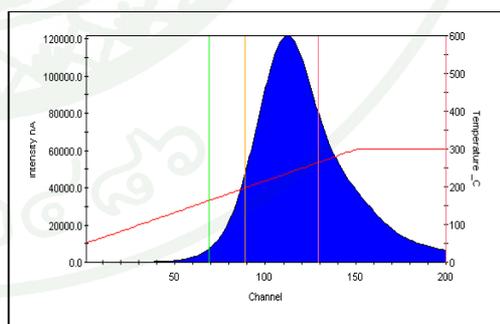
S1-6 kGy



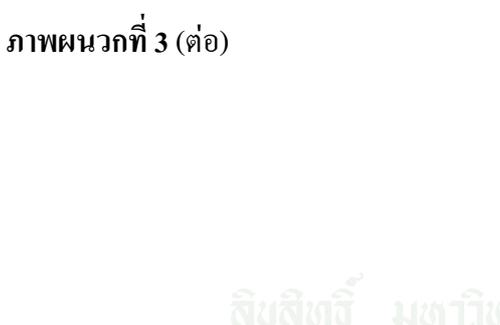
S1-8 kGy



S1-8 kGy



S1-10 kGy

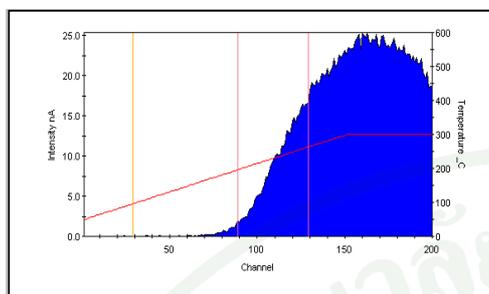


S1-10 kGy

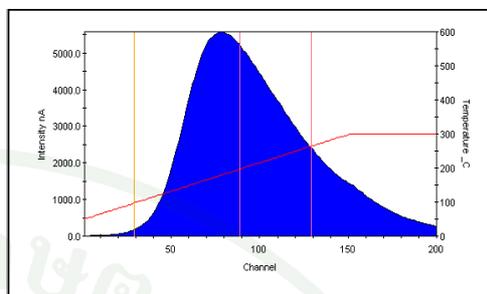


ภาพผนวกที่ 3 (ต่อ)

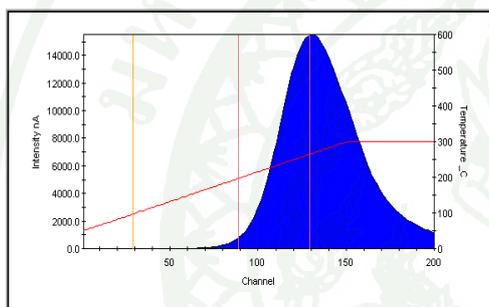
G1



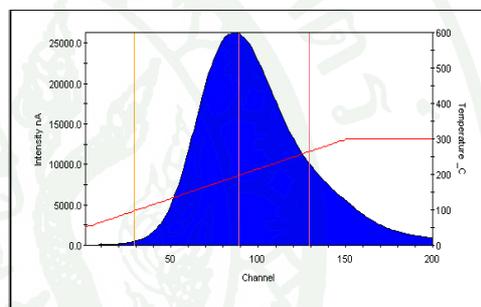
G2



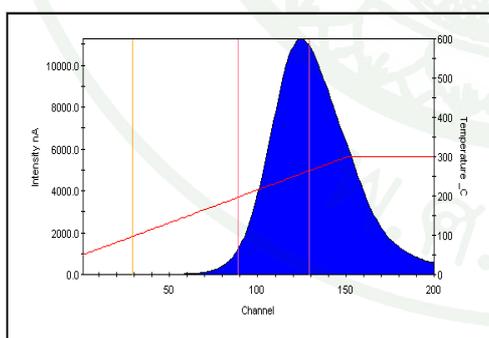
S1-0 kGy



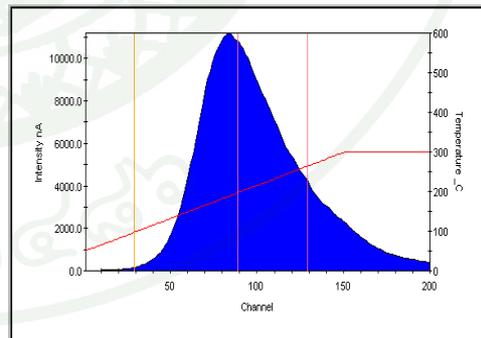
S1-0 kGy



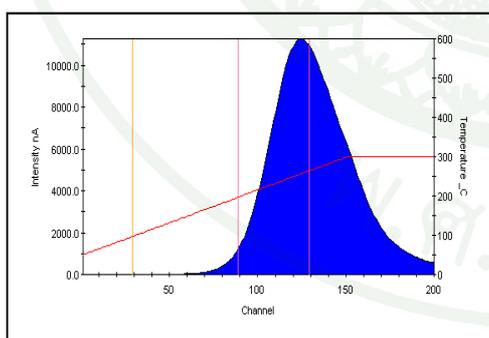
S1-2 kGy



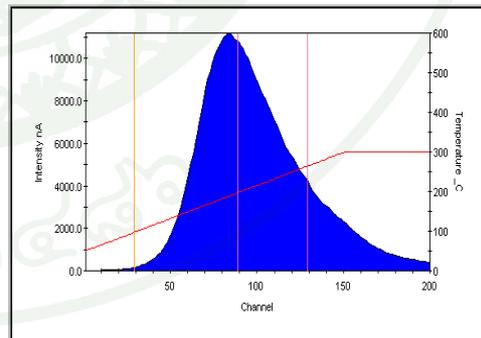
S1-2 kGy



S1-4 kGy

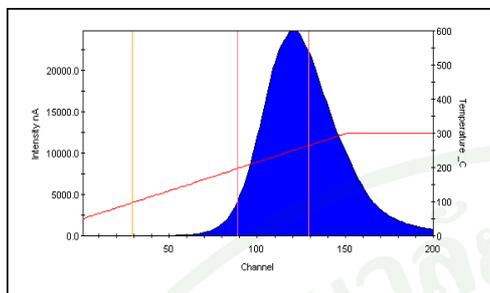


S1-4 kGy

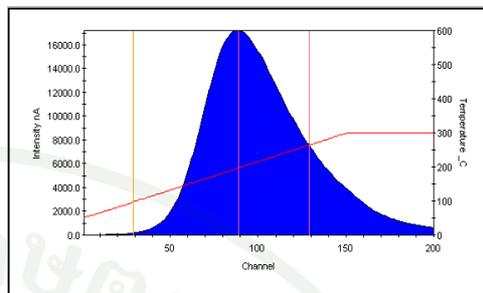


ภาพผนวกที่ 4 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผง S1 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 3 เดือน หลังการฉายรังสี

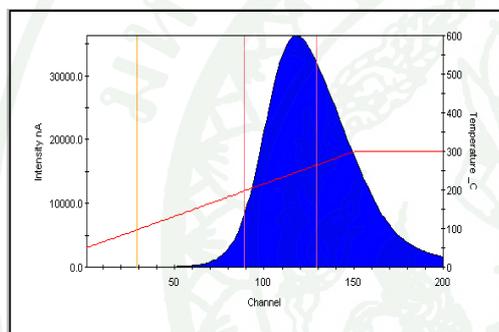
G1



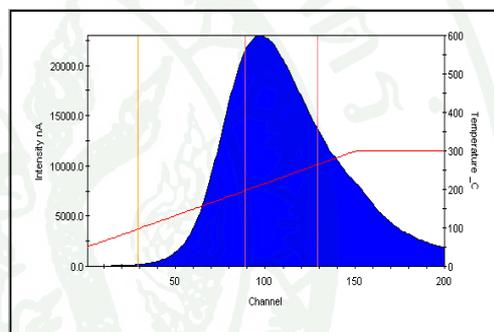
G2



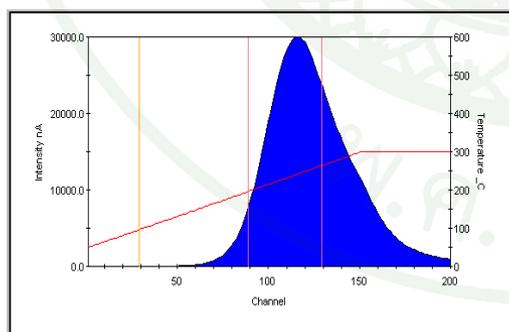
S1-6 kGy



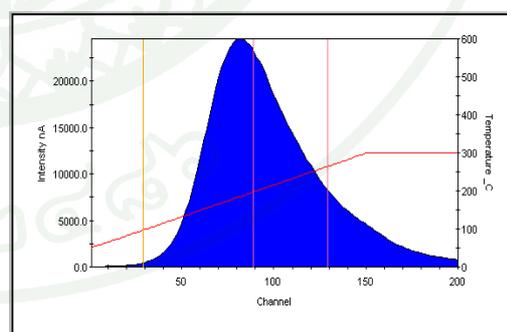
S1-6 kGy



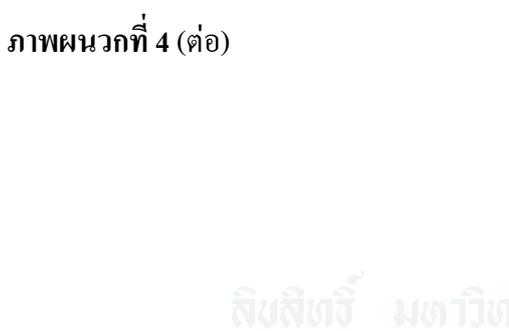
S1-8 kGy



S1-8 kGy



S1-10 kGy

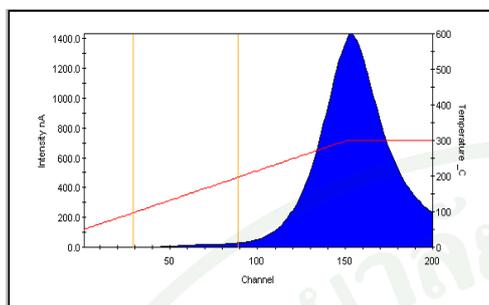


S1-10 kGy

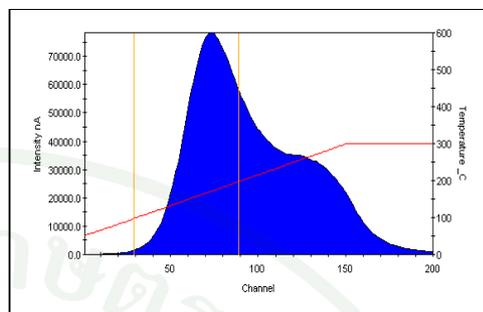


ภาพผนวกที่ 4 (ต่อ)

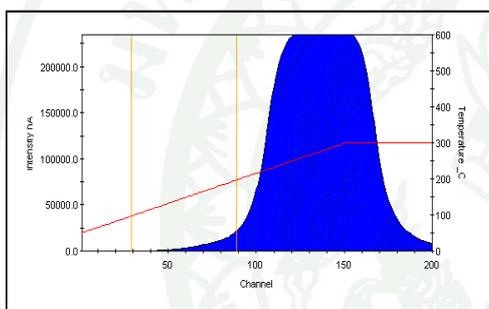
G1



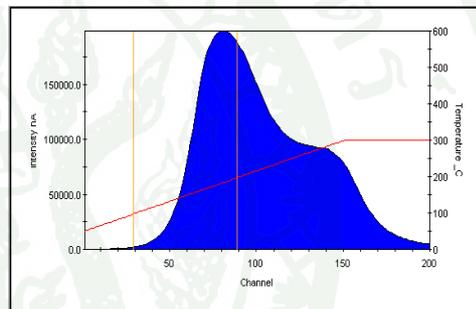
G2



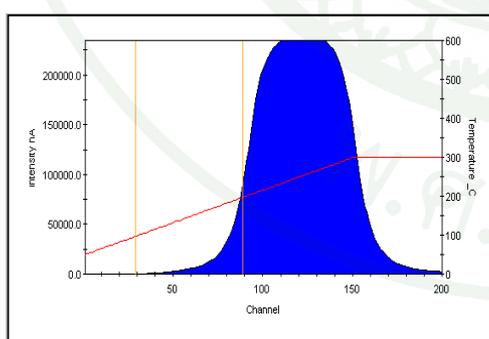
Q-0 kGy



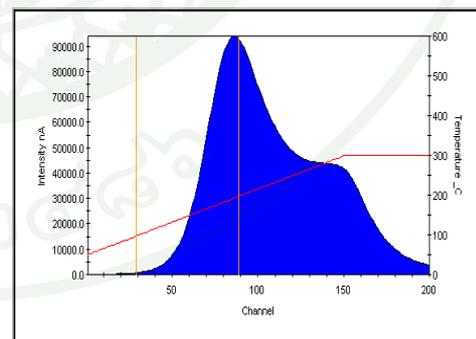
Q-0 kGy



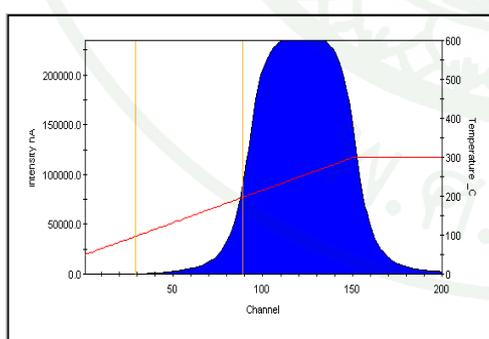
Q-2 kGy



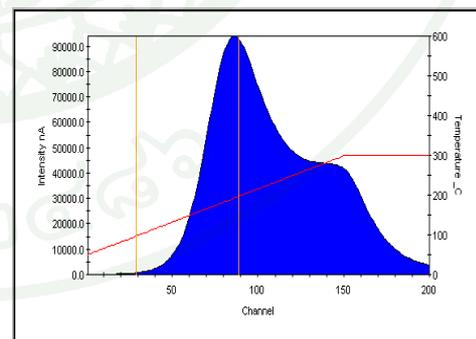
Q-2 kGy



Q-4 kGy

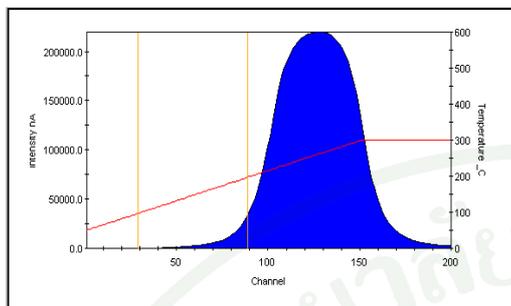


Q-4 kGy

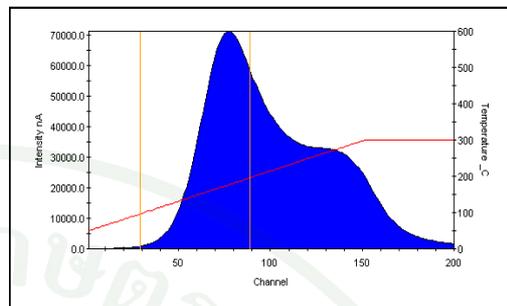


ภาพผนวกที่ 5 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 เดือน หลังการฉายรังสี

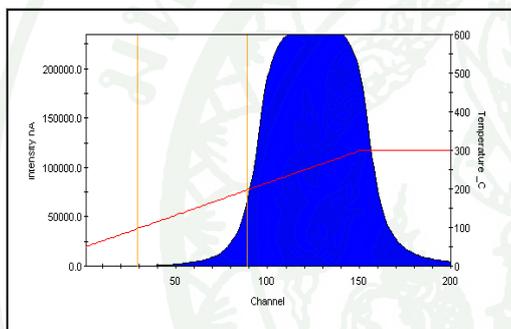
G1



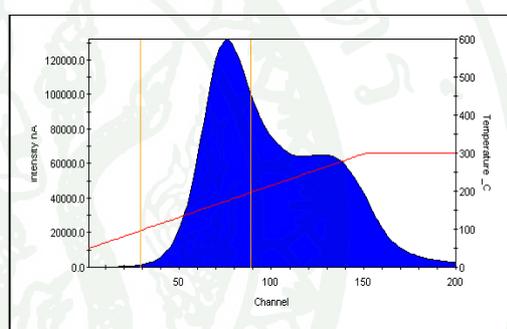
G2



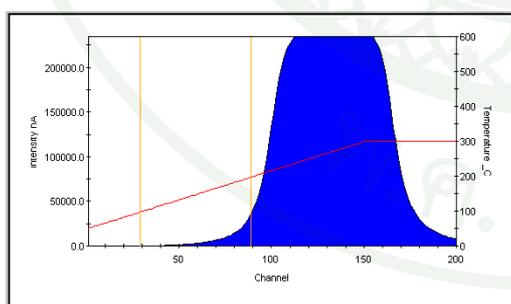
Q-6 kGy



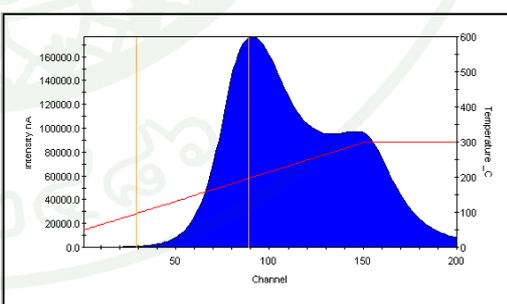
Q-6 kGy



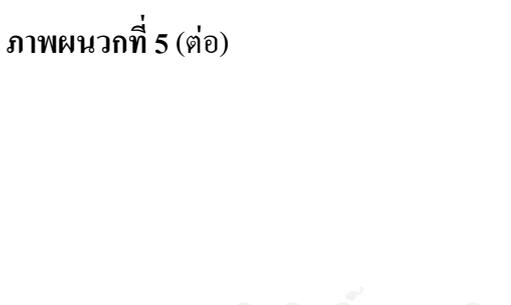
Q-8 kGy



Q-8 kGy



Q-10 kGy

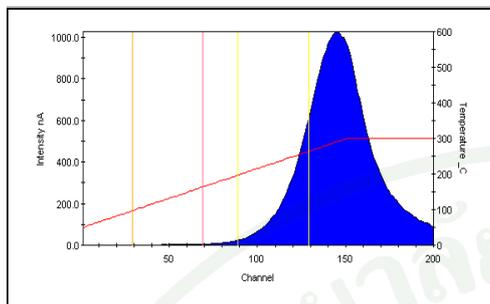


Q-10 kGy



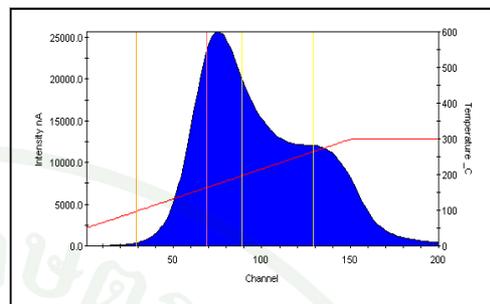
ภาพผนวกที่ 5 (ต่อ)

G1

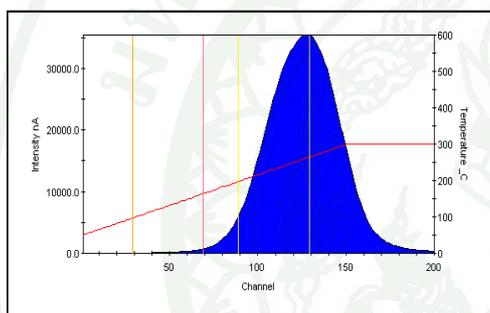


0.5Q-0 kGy

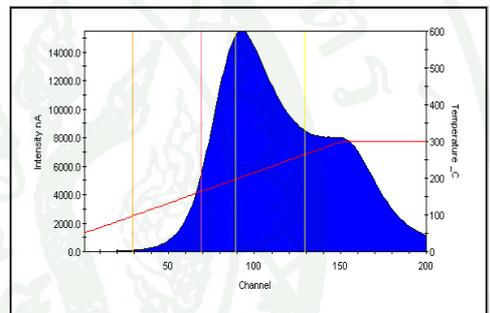
G2



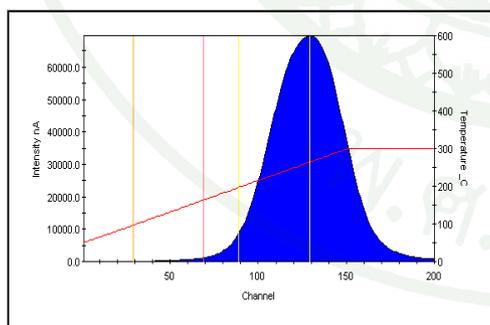
0.5Q-0 kGy



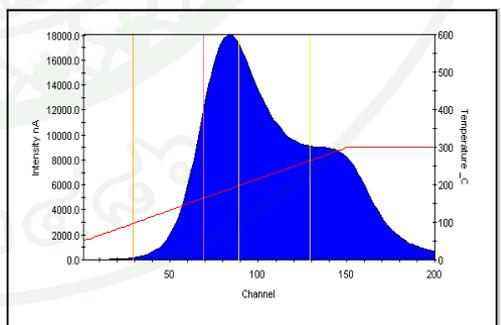
0.5Q-2 kGy



0.5Q-2 kGy



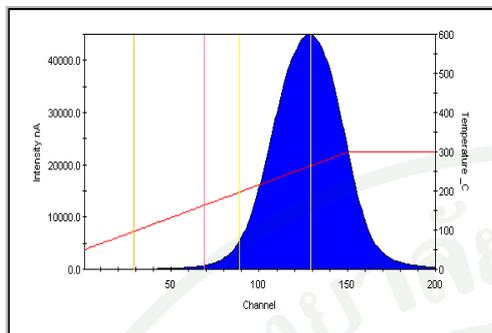
0.5Q-4 kGy



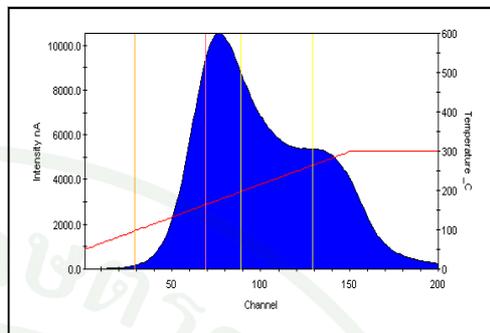
0.5Q-4 kGy

ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ น้ำหนัก 0.5 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์

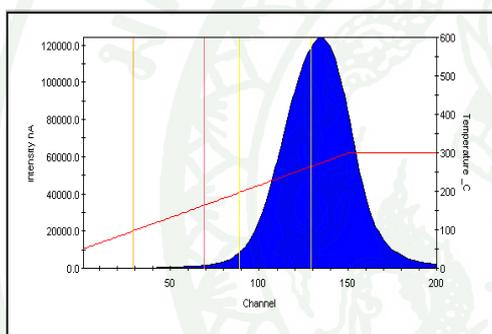
G1



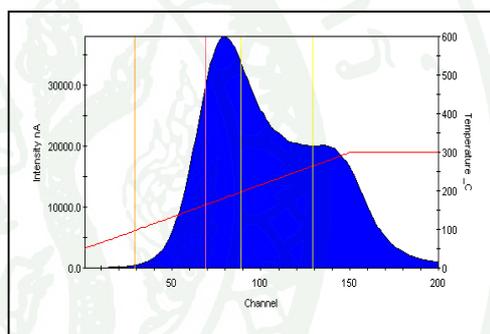
G2



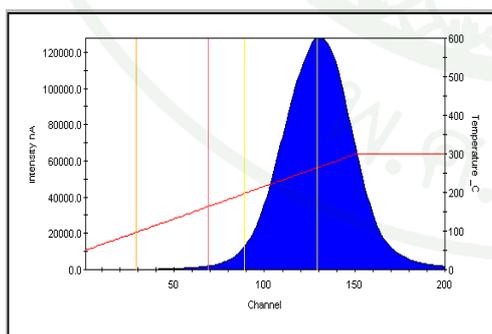
0.5Q-6 kGy



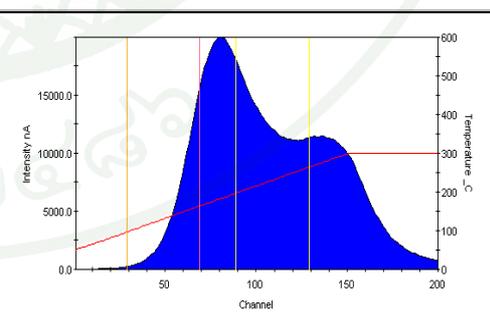
0.5Q-6 kGy



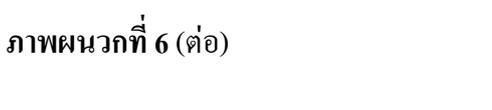
0.5Q-8 kGy



0.5Q-8 kGy



0.5Q-10 kGy

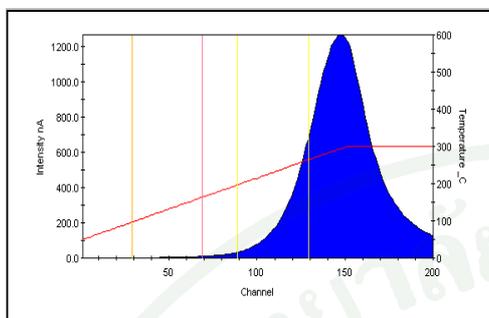


0.5Q-10 kGy

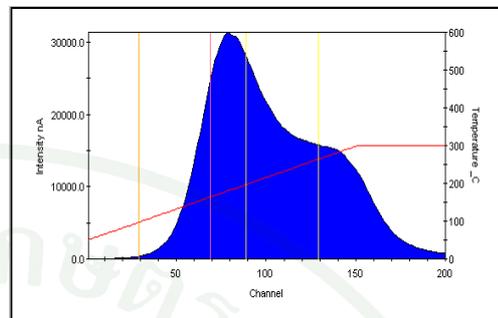


ภาพผนวกที่ 6 (ต่อ)

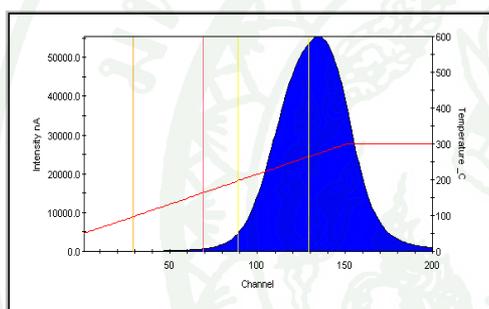
G1



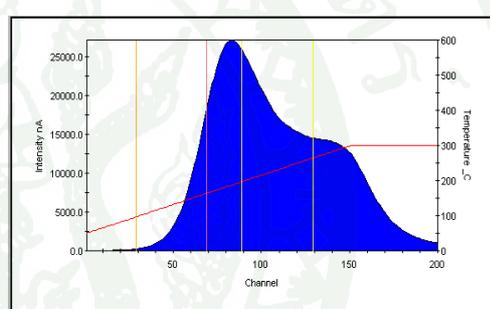
G2



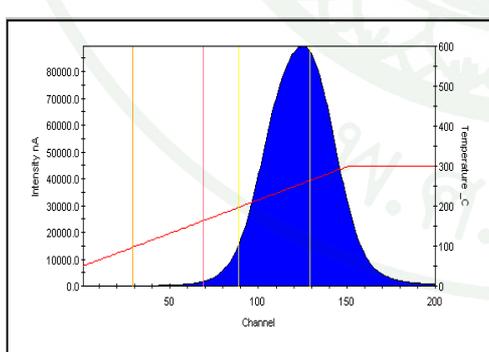
1Q-0 kGy



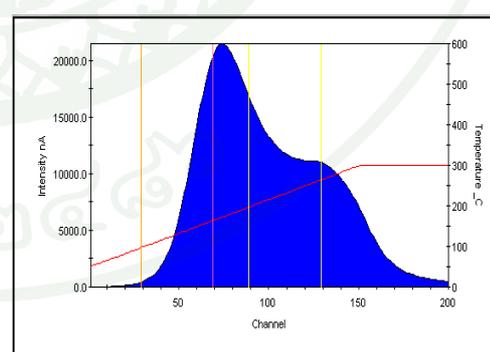
1Q-0 kGy



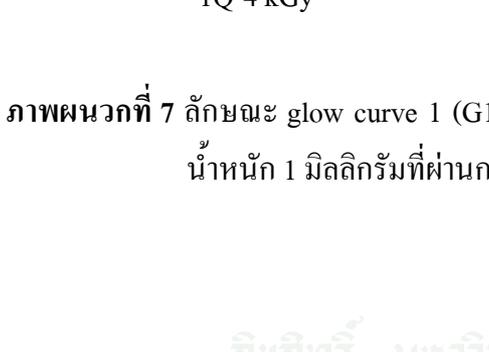
1Q-2 kGy



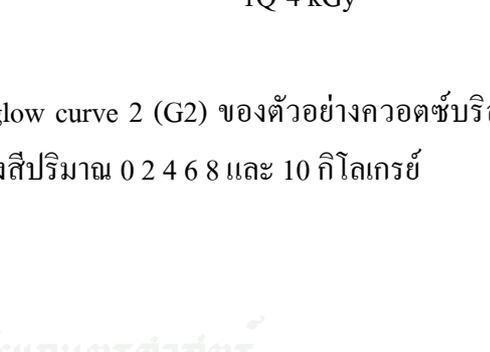
1Q-2 kGy



1Q-4 kGy

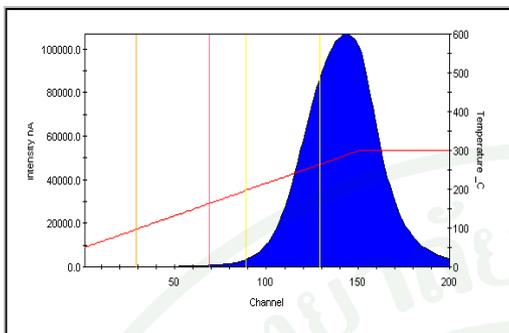


1Q-4 kGy

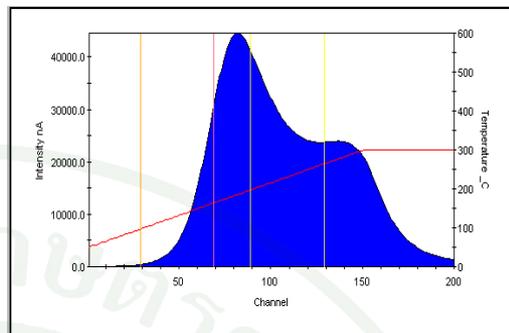


ภาพผนวกที่ 7 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ น้ำหนัก 1 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์

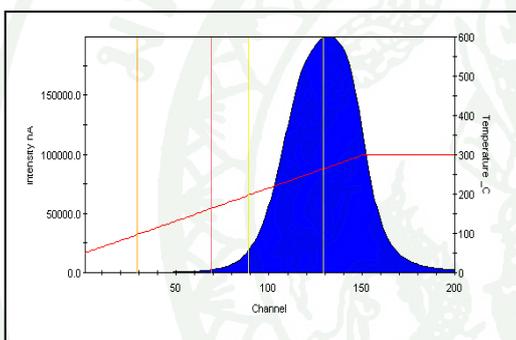
G1



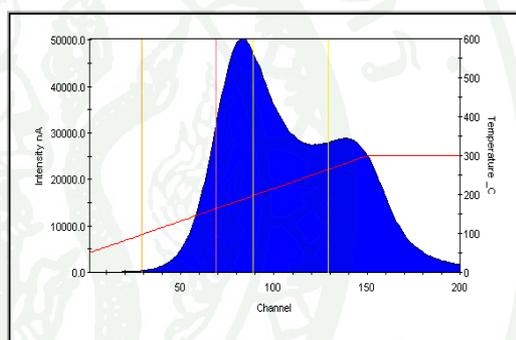
G2



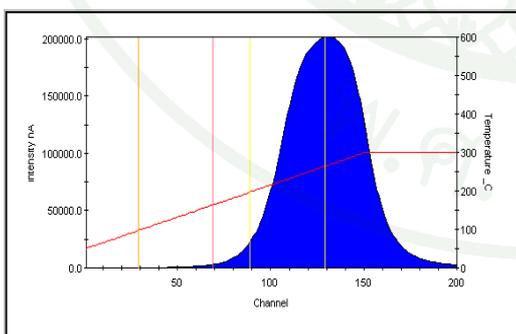
1Q-6 kGy



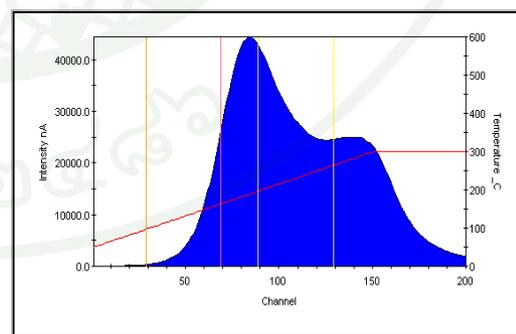
1Q-6 kGy



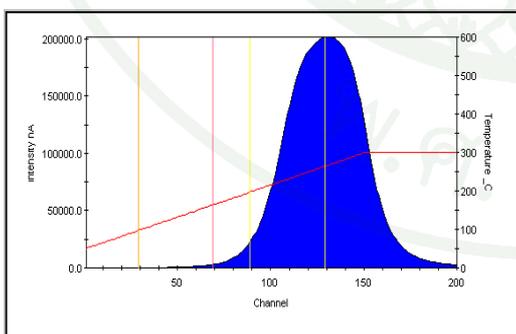
1Q-8 kGy



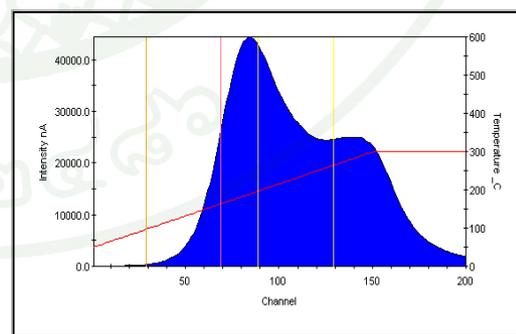
1Q-8 kGy



1Q-10 kGy

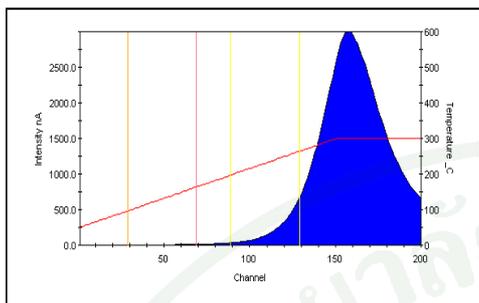


1Q-10 kGy

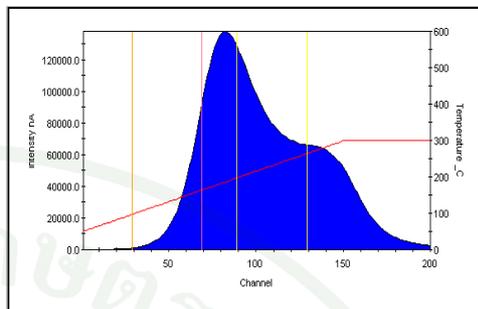


ภาพผนวกที่ (ต่อ)

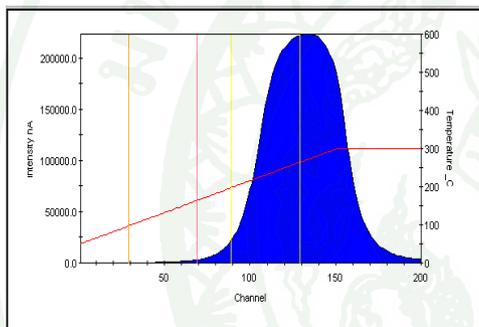
G1



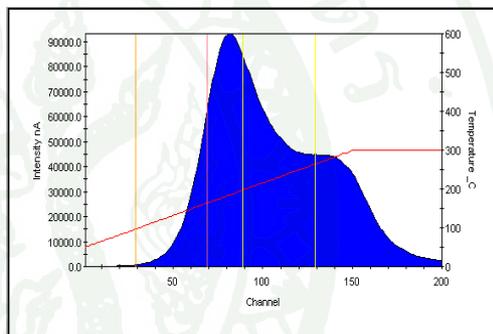
G2



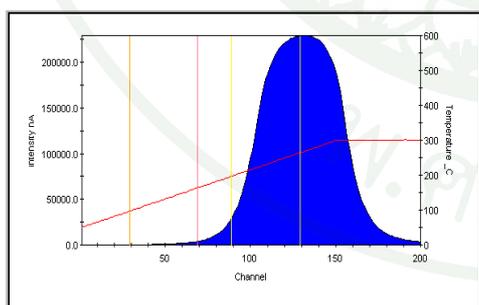
3Q-0 kGy



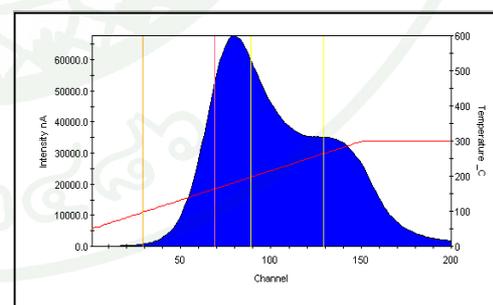
3Q-0 kGy



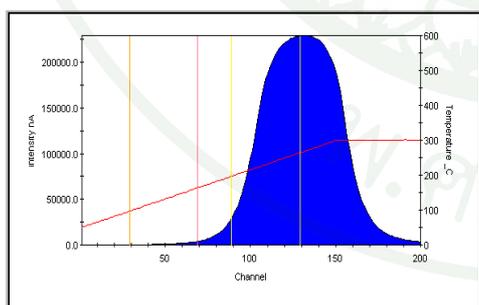
3Q-2 kGy



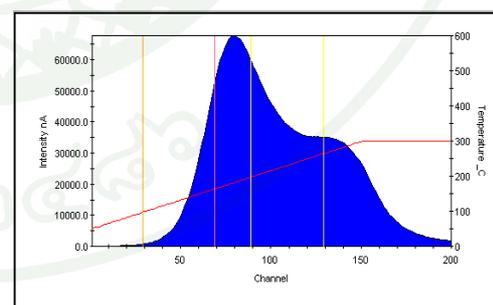
3Q-2 kGy



3Q-4 kGy

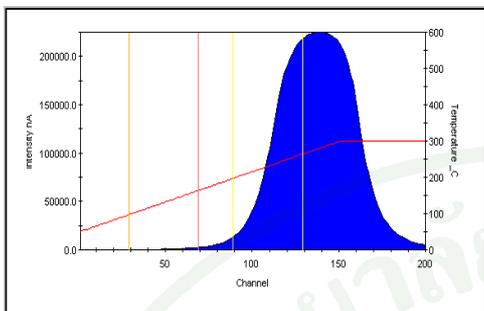


3Q-4 kGy

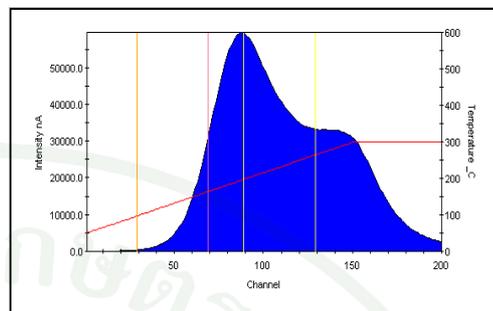


ภาพผนวกที่ 8 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างควอตซ์บริสุทธิ์ น้ำหนัก 3 มิลลิกรัมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 กิโลเกรย์

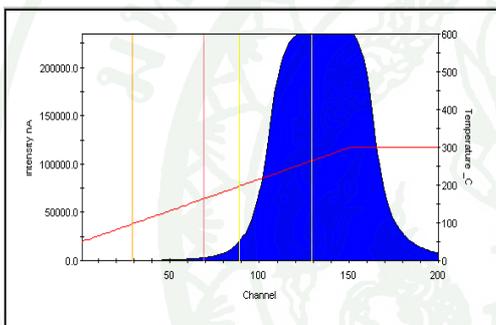
G1



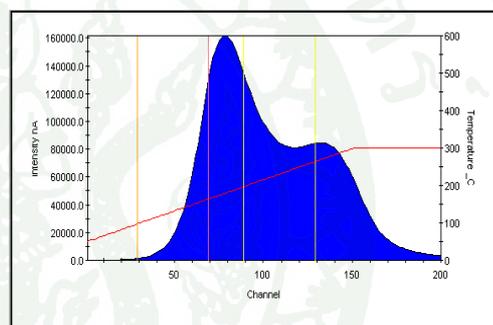
G2



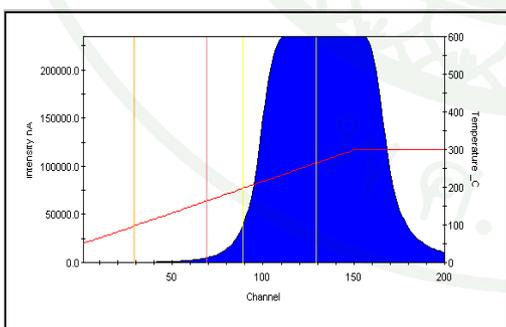
3Q-6 kGy



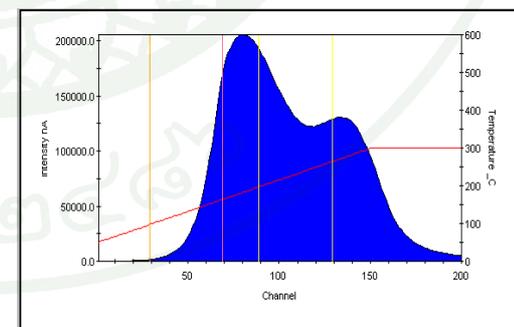
3Q-6 kGy



3Q-8 kGy



3Q-8 kGy



3Q-10 kGy

ภาพผนวกที่ 8 (ต่อ)

3Q-10 kGy

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวอาทิตย์ยา สุขเกษม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	23 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเบตง จังหวัดยะลา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตบัณฑิตวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับปริญญาโท จากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีร่วมกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ