



วิทยานิพนธ์

การตรวจสอบเครื่องปรุงรสนายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง

Identification of Irradiated Seasonings by Luminescence Techniques

นายอนอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง

Identification of Irradiated Seasonings by Luminescence Techniques

นามผู้วิจัย นายถนอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์สมจิตต์ ปาละกาศ, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์วรุณี วารัญญานนท์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ปราโมทย์ ศิริโรจน์, Dr.Agr.Sci.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจสอบเครื่องปรุงรสสายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง

Identification of Irradiated Seasonings by Luminescence Techniques

โดย

นายถนอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2551

ถนอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร 2551: การตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป
ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์สมจิตต์ ปาละกาศ, Ph.D.
75 หน้า

Thermoluminescence (TL) และ Photostimulated luminescence (PSL) เป็นวิธีทางกายภาพที่ใช้ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยอาศัยการตรวจวัดพลังงานที่กักเก็บไว้ในสารประกอบอินทรีย์ภายในตัวอย่าง ด้วยการให้พลังงานความร้อนหรือแสงในช่วงอินฟราเรดในระดับที่เหมาะสม เพื่อกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพลังงานที่กักเก็บไว้ออกมาในรูปของการเรืองแสง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีด้วยเทคนิค TL และ PSL เริ่มจากการสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิติลเกิดออกจากตัวอย่างโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น เพื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ตามวิธีของคณะกรรมการยุโรปว่าด้วยการมาตรฐาน (CEN) พบว่า เมื่อใช้น้ำหนักเริ่มต้น 30 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ได้ 0.2 ถึง 2.0 มิลลิกรัม จากนั้นได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL โดยใช้ตัวอย่างแร่เฟลด์สปาร์ พบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คือ 50 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที และเวลาสำหรับการวัดตัวอย่างเท่ากับ 70 วินาที ขั้นตอนต่อไป ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบ ได้แก่ ปริมาณรังสีดูดกลืนและเวลาเก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี โดยการแปรผลได้พิจารณาจากค่า TL ratio ($G1/G2$) ระหว่างสัญญาณ TL ก่อน ($G1$) และหลังฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ($G2$) ที่ใช้เป็นปริมาณรังสีดูดกลืนอ้างอิง ตามข้อกำหนดในวิธีมาตรฐาน EN-1788 ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะให้ค่า TL ratio มากกว่า 0.5 ขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีมีค่าน้อยกว่า 0.1 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ แล้วเก็บรักษาในที่มืดเป็นเวลา 1, 7, 30 และ 90 วัน พบว่า การตรวจสอบดังกล่าว สามารถใช้ยืนยันกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีได้อย่างถูกต้อง แม้เก็บตัวอย่างไว้นาน 90 วัน ในขั้นตอนสุดท้ายได้เปรียบเทียบผลการตรวจสอบจากเทคนิค TL กับเทคนิค PSL ซึ่งแปรผลจากค่านับโฟตอนต่อเวลา โดยค่านับโฟตอนที่ได้จากตัวอย่างฉายรังสีจะมีค่ามากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาที ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการฉายรังสีจะมีค่าต่ำกว่า 700 โฟตอนต่อนาที จากการทดลอง พบว่า ค่าสัญญาณที่ได้จากตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีมีค่ามากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่ควรได้จากตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี ในขณะที่เทคนิค TL สามารถนำมาตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีได้อย่างถูกต้องจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้ยืนยันผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค PSL ได้เป็นอย่างดี

ลายมือชื่อนิติติ

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

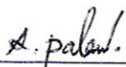
28 / พ.ค. / 2551

Thanomkiet Chanjirajit 2008: Identification of Irradiated Seasonings by Luminescence Techniques. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Mr. Somchit Palakas, Ph.D. 75 pages.

Thermoluminescence (TL) and Photostimulated luminescence (PSL) are physical methods used for identification of irradiated foods. The methods are based on emission of light when the stored or trapped energy in the material is released upon heating or infrared stimulation. The mineral separation procedure recommended by the European Committee for Standardization (CEN) was followed to separate silicate minerals from samples by density separation. The TL technique was used for a qualitative identification of irradiated seasonings and optimal conditions for determination of mixed seasonings were developed. It was found that the optimal temperature was within the range of 50 – 300°C whereas heating rate and acquisition time were 6°C/s and 70 s. Furthermore, the study on effect of absorbed doses and storage time after irradiation on TL signal and accuracy of qualitative analysis based upon TL ratio (G1/G2) of two successive glow curves before (G1) and after (G2) irradiated with a reference absorbed dose of 1 kGy were examined using garlic powder irradiated with gamma ray at the dose of 1, 3, 5 and 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 identify irradiated samples for 90 days. Therefore, with respect to the standard method (EN-1788), it could be concluded that TL technique could be effectively used to distinguish irradiated garlic powder from that of non-irradiated. Moreover, the comparison of TL and PSL techniques for identification of irradiated garlic powder was studied. PSL signal from non-irradiated samples were more than 5,000 photon counts/min that led to incorrect identification. However TL technique could correctly confirm irradiation of garlic powder.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

28 / 05 2008

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ดร.สมจิตต์ ปาละกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา สุกประเสริฐ และ ดร.วารุณี วารัญญานนท์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการที่ปรึกษาวิชารอง และ รศ.พรณี พักคง สำหรับคำปรึกษาในการเรียน การวางแผนงาน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุดสาย ตริวานิช ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ศูนย์บริการฉายรังสีแกมมาและวิจัยนิวเคลียร์เทคโนโลยี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติและบริษัท ที เอ็ม ฟูลส์ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวที่ได้อบรม ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ณอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	20
ผลและวิจารณ์	27
ผล	27
วิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	52
สรุป	52
ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	55
ภาคผนวก	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางบัญชีปริมาณรังสีที่อนุญาต สำหรับการฉายรังสีตามวัตถุประสงค์ต่างๆ	6
2 มาตรฐานการตรวจสอบอาหารฉายรังสีของ CEN	11
3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี	12
4 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างเครื่องปรุงรสด้วยเครื่อง EDXRF	27
5 ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดจากตัวอย่างเครื่องปรุงรส 3 ชนิด เมื่อใช้ตัวอย่างเริ่มต้น 50 กรัม	28
6 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 1 ถึง 200	34
7 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69	34
8 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 89	35
9 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี	37
10 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีที่เก็บไว้ในที่มีด 7 วัน หลังการฉายรังสี	38
11 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีในช่วง channel 29 ถึง 69	41
12 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีในช่วง channel 29 ถึง 89	42
13 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ PSL และ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 รายการสินค้าขายรังสีที่ได้รับอนุญาตให้จำหน่ายได้ในประเทศสมาชิก EC (บางประเทศ)	61
2 ผลวิเคราะห์การขาดองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุจรสผสมรหัส 101A3D	63
3 ผลการวิเคราะห์การขาดองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุจรสผสมรหัส 070AI2	64
4 ผลการวิเคราะห์การขาดองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุจรสผสมรหัส BBE092007	65
5 ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตัวอย่างกระเทียมผงได้รับ เมื่อนำมาฉายรังสีปริมาณต่างๆ	66

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เครื่องหมายการฉายรังสี	8
2 แบบจำลองแถบพลังงานของผลึกบริสุทธิ์ (ก) และผลึกทั่วไป (ข)	13
3 แบบจำลองอย่างง่ายของแถบพลังงานของ TL ที่แสดงให้เห็น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (●) และการเกิดที่ว่างหรือโฮล (○)	14
4 ระบบการทำงานของเครื่องอ่านสัญญาณ TL ที่ใช้ heater plate	16
5 ตัวอย่าง TL glow curve ของ red pepper paste powder (A), soy sauce powder (B), soybean paste powder (C), <i>Ramen</i> soup mixes (D)	22
6 ภาพแสดงตัวอย่างกระเทียมผงบรรจุของพลาสติกสำหรับการฉายรังสี	23
7 ขนาดของตัวอย่าง ตำแหน่งการวางตัวอย่างและการติด dosimeter	24
8 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 42 s)	29
9 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)	30
10 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)	31
11 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ผ่านการฉายรังสี 2.5 กิโลเกรย์ และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
12	glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรต 101A3D 33
13	glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรต 070AI2 33
14	glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรต BBE092007 34
15	ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของ feldspar (a) และตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (b) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s) 36
16	ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของ feldspar (a) และตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี (b) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s) 36
17	ค่า TL ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ channel 29 ถึง 89 38
18	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี 39
19	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี 39
20	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี 39
21	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 5 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี 40
22	ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี 40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (0 กิโลเกรย์) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี	43
24 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี	43
25 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี	44
26 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 5 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี	44
27 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี	45
28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า photon counts ของเทคนิค PSL กับค่า TL ratio ของเทคนิค TL ที่ได้จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี 0 ถึง 3 กิโลเกรย์ (เส้นทึบ) และ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ (เส้นประ)	47
ภาพผนวกที่	
1 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
2 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 7 วัน หลังการฉายรังสี	68
3 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 30 วัน หลังการฉายรังสี	69
4 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 90 วัน หลังการฉายรังสี	70
5 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี	71
6 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 7 วัน หลังการฉายรังสี	72
7 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 30 วัน หลังการฉายรังสี	73
8 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็น เวลา 90 วัน หลังการฉายรังสี	74

การตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง

Identification of Irradiated Seasonings by Luminescence Techniques

คำนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกกำลังให้ความสนใจในเรื่องการบริโภคอาหารปลอดภัย เพื่อสุขอนามัยที่ดี และลดความเสี่ยงต่อโรคมะเร็งใช้เจ็บต่างๆ การฉายรังสีอาหารเป็นทางเลือกหนึ่งของการถนอมอาหาร เพื่อเพิ่มความปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์และพยาธิที่ก่อให้เกิดโรค การฉายรังสีผลิตภัณฑ์อาหารจะมีวัตถุประสงค์แตกต่างกันไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์ เช่น การยับยั้งการงอกในผลผลิตทางการเกษตร ประเภทหัว ชะลอการสุกและยืดอายุผลไม้และผัก ลดจำนวนจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ประเภท เครื่องเทศ เครื่องปรุงรสและสมุนไพรต่างๆ สำหรับความปลอดภัยในการบริโภคอาหารฉายรังสี องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้ให้การรับรองว่าอาหารที่ผ่านการฉายรังสีด้วยปริมาณรังสีไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค ไม่ก่อปัญหาพิเศษทางโภชนาการและจุลชีววิทยา ไม่จำเป็นต้องทดสอบเรื่องความปลอดภัยอีกต่อไป (WHO, 1994) ผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสีจึงได้รับการยอมรับมากขึ้นในหลายประเทศ ปัจจุบันมีประเทศที่ยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสีแล้วมากกว่า 40 ประเทศ (IAEA, 2002) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสีมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่ยังมีอีกหลายประเทศ เช่น ประเทศสมาชิกสหภาพยุโรปส่วนใหญ่ยังคงห้ามการนำเข้าผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี โดยมี 5 ประเทศ ได้แก่ เบลเยียม ฝรั่งเศส อิตาลี เนเธอร์แลนด์ และสหราชอาณาจักร ที่ยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี บางประเทศ เช่น เยอรมัน ออสเตรเลีย และประเทศแถบสแกนดิเนเวีย ยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี เฉพาะกลุ่มของสมุนไพรและเครื่องเทศเท่านั้น โดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสีต้องมีฉลากกำกับ สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกา อาหารที่ผ่านการฉายรังสีหรือมีส่วนประกอบของอาหารที่ผ่านการฉายรังสี จะต้องติดฉลากแสดงสัญลักษณ์ว่าได้ผ่านการฉายรังสีแล้ว

การตรวจสอบเพื่อยืนยันผลิตภัณฑ์อาหารที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสีมีบทบาทสำคัญ ในการเพิ่มความเชื่อมั่นในตัวผลิตภัณฑ์ โดยในปี ค.ศ. 1988 หน่วยงานความร่วมมือระหว่างประเทศ ได้แก่ องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ทบวงพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) องค์การอนามัยโลก (WHO) ที่ประชุมสหประชาชาติว่าด้วยการค้าและการพัฒนา (UNCTAD) และข้อตกลงทั่วไปว่าด้วยภาษีศุลกากรและการค้า (GATT) ได้จัดการประชุมนานาชาติ

ภายใต้หัวข้อ “The Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food” ขึ้นที่กรุงเจนีวา ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยมีผู้แทนจาก 57 ประเทศ เข้าร่วมประชุม ซึ่งได้มีการสนับสนุนวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี และร่วมมือกันดำเนินการจัดตั้งห้องปฏิบัติการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยมีการเปรียบเทียบผลการตรวจสอบระหว่างห้องปฏิบัติการของหลายประเทศแถบยุโรป เพื่อควบคุมคุณภาพของอาหารฉายรังสีให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ปัจจุบันประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปยอมรับวิธีมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบอาหารฉายรังสีอย่างน้อย 5 วิธี ได้แก่ วิธีมาตรฐาน EN 1784 (Gas chromatographic analysis of hydrocarbons) วิธีมาตรฐาน EN 1785 (Gas chromatographic/Mass spectrometric analysis of 2-Alkylcyclobutanones) วิธีมาตรฐาน EN 1786 (ESR spectroscopy-Bone) วิธีมาตรฐาน EN 1787 (ESR spectroscopy-cellulose) และวิธีมาตรฐาน EN 1788 (Thermoluminescence) (Delincée, 2002)

ในขณะที่การตรวจสอบเพื่อรับรองผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายรังสีมีความสำคัญในการเพิ่มความเชื่อมั่นและควบคุมคุณภาพให้สอดคล้องกับความต้องการของประเทศนำเข้า สำหรับประเทศไทยซึ่งมีอุตสาหกรรมอาหารส่งออกหลายชนิด จึงจำเป็นต้องมีห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ตรวจสอบและรับรองอาหารว่าผ่านการฉายรังสีหรือไม่ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ต้องใช้วัตถุดิบในการผลิตหลายชนิดและบางชนิดต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จำเป็นต้องมีการควบคุมและตรวจสอบวัตถุดิบทั้งหมดก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูป หากพบว่าวัตถุดิบนั้นได้ผ่านการฉายรังสี เมื่อนำมาแปรรูปจะต้องคิดฉลาก เพื่อแสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี หรือ คัดแยกผลิตภัณฑ์ฉายรังสีออกไป ดังนั้น การศึกษาเทคนิคการตรวจสอบผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี จึงมีความสำคัญและจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในด้านการควบคุมคุณภาพและการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหารส่งออกของประเทศ รวมทั้งการลดความเสียหายจากการปฏิเสธการนำเข้าสินค้าที่ปลายทาง เนื่องจากการตรวจพบว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฉายรังสีแต่ไม่ได้มีการติดฉลาก

กระบวนการตรวจสอบอาหารฉายรังสีสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคทางเคมี ได้แก่ Lipid method เทคนิคทางชีวภาพ ได้แก่ DNA comet assay และเทคนิคทางกายภาพ ได้แก่ electron spin resonance (ESR), thermoluminescence (TL) และ photostimulated luminescence (PSL) เป็นต้น (Bayram and Delincée, 2004) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่นำมาตรวจสอบ โดยเทคนิค TL และ PSL อาศัยหลักการที่สสารเก็บสะสมพลังงานที่ได้รับจากการฉายรังสีไว้ แล้วจะปล่อยพลังงานออกมาภายหลังจากการกระตุ้นด้วยพลังงานที่เหมาะสม โดยเทคนิค TL เป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานความร้อนกระตุ้นให้เกิดการเรืองแสง ส่วนเทคนิค PSL จะใช้พลังงานแสงในช่วงอินฟราเรดกระตุ้น

ให้เกิดการเรืองแสง ทั้งสองเทคนิคมีความเหมาะสมในการตรวจสอบอาหารที่มีแร่ซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ เช่น พริก เครื่องเทศ สมุนไพร ปลาหมึกเกลือ ผักและผลไม้แห้ง เครื่องปรุงรสและผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง

แม้ว่าวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยวิธี TL และ PSL จะเป็นวิธีมาตรฐานที่ได้รับการรับรองโดยคณะกรรมการโครงการมาตรฐานอาหาร FAO/WHO หรือ Codex Alimentarius Commission - CAC (Delincée, 2002) แต่การนำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารของประเทศไทย จำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคให้เหมาะสมกับประเภทของอาหาร เพื่อให้ได้วิธีการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน ให้ผลถูกต้องและแม่นยำ โดยงานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีประเภทเครื่องปรุงรสชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค TL และ PSL เนื่องจากเทคนิค PSL เป็นเทคนิคที่ตรวจสอบตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วและไม่ยุ่งยาก สามารถนำมาใช้ตรวจสอบเบื้องต้นได้ดี อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะไม่สามารถให้ผลการตรวจสอบได้ชัดเจนว่าตัวอย่างได้รับรังสีหรือไม่ จึงจำเป็นต้องยืนยันผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ซึ่งให้ความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการศึกษาเทคนิคการตรวจสอบผลิตภัณฑ์เครื่องปรุงรสฉายรังสีทั้งสองเทคนิคนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ เพื่อพัฒนาไปสู่วิธีตรวจสอบอาหารฉายรังสีที่มีมาตรฐาน สามารถตรวจสอบและรับรองผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับอุตสาหกรรมอาหารส่งออกของประเทศต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการในการสกัดแยกสารอนินทรีย์จากตัวอย่างเครื่องปรุงรส ผสม ก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านสัญญาณ TL และศึกษาลักษณะของ glow curve เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีด้วยเทคนิค TL ได้แก่ ปริมาณรังสีดูดกลืนและเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสีก่อนนำมาตรวจสอบ
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้จากการเรืองแสงของเทคนิค PSL กับเทคนิค TL ที่ปริมาณรังสีดูดกลืนต่างๆ

การตรวจเอกสาร

อาหารฉายรังสี

จากประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 297 เรื่อง อาหารฉายรังสี ลงวันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2549 ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2550 (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2549) ได้กำหนดนิยามสำคัญ ดังนี้

“อาหารฉายรังสี” หมายความว่า อาหารที่ผ่านกรรมวิธีการฉายรังสีเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี

“วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหาร” หมายความว่า การฉายรังสีอาหาร เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค ยืดอายุการเก็บรักษา ชะลอการสุก ลดปริมาณปรสิต ยับยั้งการงอก ระหว่างการเก็บรักษา ทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง หรืออื่นๆ ทั้งนี้การฉายรังสีอาหาร ต้องใช้ปริมาณรังสีดูดกลืนต่ำสุดที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี และมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร โดยไม่ทำลายโครงสร้าง คุณสมบัติเชิงหน้าที่ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร

ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ที่อนุญาตให้ใช้สำหรับการฉายรังสีตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

กระบวนการฉายรังสีอาหารเป็นการนำอาหารไปปรับรังสีในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีนั้น อาหารที่ผ่านการฉายรังสีได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยในปี พ. ศ. 2523 คณะกรรมาธิการร่วมด้านอาหารฉายรังสีขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ ทบวงพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ และองค์การอนามัยโลก ได้ประกาศว่า “อาหารใดที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ จะไม่ก่อให้เกิดโทษอันตราย ไม่ก่อเกิดปัญหาพิเศษทางโภชนาการและจุลชีววิทยา ไม่จำเป็นต้องทดสอบเรื่องความปลอดภัยอีกต่อไป” ต่อมาในปี พ.ศ. 2529 องค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (USFDA) ประกาศอนุญาตให้ “อาหารสดฉายรังสีได้ไม่เกิน 1 กิโลเกรย์ และอาหารแห้งฉายรังสีได้ไม่เกิน 30 กิโลเกรย์ จำหน่ายแก่ประชาชน” (ยุทธพงศ์, 2550)

ตารางที่ 1 ตารางบัญชีปริมาณรังสีที่อนุญาต สำหรับการฉายรังสีตามวัตถุประสงค์ต่างๆ

ลำดับที่	วัตถุประสงค์ของการฉายรังสี	ปริมาณรังสีสูงสุด (กิโลเกรย์)
1	ยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา	1
2	ชะลอการสุก	2
3	ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง	2
4	ลดปริมาณปรสิต	4
5	ยืดอายุการเก็บรักษา	7
6	ลดปริมาณจุลินทรีย์และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	10

ที่มา: กระทรวงสาธารณสุข (2549)

การฉายรังสีอาหารโดยทั่วไป ปริมาณของรังสีดูดกลืนที่ใช้จะอยู่ในช่วง 50 ถึง 10,000 เกรย์ ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการใช้รังสี 10,000 เกรย์ หรือ 10 กิโลเกรย์ จะเทียบเท่ากับพลังงานที่ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น 2.4 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้รังสีก่ออออนเพื่อการถนอมอาหาร สามารถแบ่งตามปริมาณของรังสีที่ใช้ (Satin, 1993) ได้ดังนี้

1. ระดับต่ำ (low dose) ใช้ปริมาณรังสีสูงถึง 1 กิโลเกรย์ สำหรับยับยั้งการงอกของพืชหัว ชะลอการสุกและทำลายแมลง
2. ระดับปานกลาง (medium dose) ใช้ปริมาณรังสี 1 ถึง 10 กิโลเกรย์ สำหรับลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ลดปริมาณของเชื้อโรคที่ไม่สร้างสปอร์และชะลอการสุก
3. ระดับสูง (high dose) ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 10 ถึง 50 กิโลเกรย์ สำหรับการทำให้ปลอดเชื้อ (sterilization)

การฉายรังสีอาหารในเชิงพาณิชย์เริ่มต้นที่ประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1957 และได้มีการขยายตัวไปยังหลายประเทศในทวีปยุโรป สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น สาธารณรัฐประชาชนจีน และประเทศอื่นๆ รวม 30 ประเทศ ปัจจุบันองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกาได้อนุญาตให้มีการจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสีจำนวน 13 รายการ ได้แก่ แป้งสาลี มันฝรั่งขาว เนื้อหมู สมุนไพรแห้ง และเครื่องเทศ เนื้อไก่และไข่สด ผักและผลไม้ ผลไม้เมืองร้อนจากหมู่เกาะฮาวาย น้ำผลไม้ เนื้อวัว เนื้อหมู เนื้อแกะ เมล็ดพันธุ์ถั่วงอก และน้ำผัก นอกจากนี้ยังได้พิจารณารายการสินค้าอาหารที่ต้องฉายรังสีเพิ่มเติม ได้แก่ อาหารพร้อมรับประทาน (ready-to-eat) อาหารเด็ก (baby food) เนื้อสัตว์ประเภท deli meats ผักสลัดที่ได้มีการตัดไว้พร้อมแล้ว อาหารทะเล เนื้อวัวสด เนื้อหมูสด และเนื้อแกะสดที่ไม่ได้แช่ตู้เย็นและไม่ได้ทำสุก สำหรับการแสดงเครื่องหมายการฉายรังสี ปัจจุบันองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกาได้เสนอ “ฟอน์ผัน” ให้กับสินค้าที่ผ่านการฉายรังสีแล้ว ไม่ทำให้คุณสมบัติของอาหารเปลี่ยนแปลงไป สามารถเลือกที่จะปิดฉลาก Treated by Irradiation หรือไม่ปิดฉลากก็ได้ (บริษัท iWISDOM จำกัด, 2550)

สำหรับประเทศไทย ได้เริ่มต้นฉายรังสีกุ้งแช่แข็ง เพื่อทดลองวางตลาดเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2527 โดยใช้เครื่องฉายรังสีแกมมาบีเอ็ม-650 ซึ่งเป็นเครื่องฉายรังสีสำหรับการศึกษาวิจัย ต่อมาในปี พ.ศ. 2528 และ พ.ศ. 2529 ได้ทดลองวางตลาดเนื้อไก่แช่แข็งฉายรังสีและแฮมฉายรังสี สำหรับการฉายรังสีอาหารในเชิงพาณิชย์ได้เริ่มขึ้นหลังการเปิดดำเนินการของศูนย์ฉายรังสีอาหารและผลิตผลการเกษตรในปี พ.ศ. 2532 ชนิดของอาหารที่ฉายรังสีเพื่อฆ่าเชื้อโรคได้แก่ กุ้งแช่แข็ง ปลาแช่แข็ง ปูแช่แข็ง เนื้อไก่แช่แข็ง แฮม เครื่องเทศ กุ้งผง และปลาหมึกผง (โกวิทย์, 2550)

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 297 (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2549) กำหนดให้อาหารฉายรังสีต้องแสดงฉลากและรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

1. ชื่อและที่ตั้งของสำนักงานใหญ่ของผู้ผลิตและผู้ฉายรังสี
2. แสดงข้อความว่า “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกัน
3. ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ด้วยข้อความดังนี้ “เพื่อ.....” (ความที่เว้นไว้ให้ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี)

4. การแสดงเครื่องหมายการฉาขรังสีอาจจะแสดงหรือไม่ก็ได้ แต่หากจะแสดงต้องใช้ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ดังภาพที่ 1 ใกล้เคียงชื่อของอาหาร

5. วันเดือนและปีที่ทำการฉาขรังสี



ภาพที่ 1 เครื่องหมายการฉาขรังสี

ที่มา: สำนักนายกรัฐมนตรี (2549)

ในปัจจุบันประเทศสมาชิกสหภาพยุโรปบางประเทศ ได้อนุญาตให้จำหน่ายสินค้าฉาขรังสีรวม 28 ชนิด (ตารางผนวกที่ 1) สำหรับสินค้าประเภทอาหารฉาขรังสีจากประเทศไทยยังไม่ได้รับอนุญาตให้นำเข้าและจำหน่ายในตลาดสหภาพยุโรปจนกว่าจะมีการปฏิบัติตามเงื่อนไขภายใต้ Directive 1999/2/EC และ 1999/3/EC (กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2548) ซึ่งมีสาระสำคัญ คือ

1. ต้องมีฉลากกำกับอาหารฉาขรังสี
2. ต้องมีเอกสารรับรองการฉาขรังสีโดยระบุชื่อและสถานที่ตั้ง และจัดเก็บบันทึกข้อมูลการฉาขรังสีไว้เป็นเวลา 5 ปี
3. สถานที่ฉาขรังสีต้องได้รับการตรวจสอบรับรองและขึ้นบัญชีโดยผู้เชี่ยวชาญของสหภาพยุโรป

การตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี

การฉายรังสีทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายลักษณะเช่น ผลจากการฉายรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ ทำให้เกิด Compton scattering ซึ่งเป็นการเกิด ionization หรือการแตกตัวเป็นไอออน ของอะตอม ทำให้เกิด secondary electron ผลที่ตามมาคือ การเกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า radiolytic products การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบ เพื่อยืนยันว่าอาหารได้ผ่านการฉายรังสีหรือไม่ (Jacques, 1998) วิธีการตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี สามารถตรวจสอบได้หลายวิธี ดังนี้ (เสาวพงศ์ และสุรศักดิ์, 2550)

1. วิธีทางกายภาพ เป็นการตรวจสอบลักษณะของกระดูก ผลึกน้ำตาล เซลลูโลส

สารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกต และสารชีวอนินทรีย์ (bioinorganic) ต่างๆ สารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ไขมัน โปรตีน เพอร์ออกไซด์ โดยอาศัยวิธีการต่างๆ ดังนี้

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

1.2 Thermoluminescence - TL เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ปลดปล่อยจากสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตและสารชีวอนินทรีย์ในอาหาร โดยการกระตุ้นด้วยความร้อน ใช้กับตัวอย่างประเภท หอย กุ้ง ปู เครื่องเทศ สมุนไพรแห้ง และเมล็ดธัญพืช เป็นต้น

1.3 Photostimulated luminescence - PSL เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ปลดปล่อยจากสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกต หรือ calcites ในอาหาร หลังจากการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด สามารถตรวจสอบอาหารประเภทสมุนไพร สัตว์น้ำจำพวกมีเปลือก เช่น หอย กุ้ง และปู

1.4 Viscosity การตรวจวัดการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น รูปทรงและการไหล (Rheological) ของอาหารจากการฉายรังสี โดยใช้เครื่อง Rheotest rotational viscometer สามารถใช้กับอาหารประเภทพริกไทย อบเชย และกุ้ง

1.5 การตรวจวัดสภาพการนำไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ สำหรับอาหารพวกของเหลว เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ และน้ำส้มสายชู

2. วิธีทางเคมี เป็นการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ไขมัน โปรตีน เปอร์ออกไซด์ ไซโคลบิวทาโนน ไทโรซีน และ ไขมันไกลคอล โดยอาศัยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS)

3. วิธีทางชีวภาพ ได้แก่ การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของ DNA สารประกอบโปรตีน การตรวจสอบความมีชีวิตของเมล็ด และการตรวจนับปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

1.6 DNA comet assay โดยตรวจวัด DNA ภายในอาหารฉายรังสี โดยใช้ Microgel electrophoresis ใช้กับตัวอย่างประเภทไก่ หมู ปลา ผักและผลไม้

1.7 การวัดปริมาณโอไทโรซีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่เซลล์ใช้สังเคราะห์โปรตีนในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ไก่ ปลา และอาหารทะเล

1.8 Direct epifluorescent/aerobic plate count (DEFT/APC) เป็นการตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารหลังการฉายรังสี เหมาะกับอาหารประเภทเครื่องเทศ ไก่ และสมุนไพร

การตรวจพิสูจน์ด้วยวิธีการเหล่านี้ อาจมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบอาหารประเภทใดประเภทหนึ่ง ขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและวัตถุประสงค์ที่ต้องการตรวจสอบ แต่ยังไม่มียุทธวิธีที่รายงานว่ามีเครื่องมือใดที่สามารถตรวจสอบอาหารฉายรังสีทุกประเภท ได้ถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตาม คณะกรรมการยุโรปว่าด้วยการมาตรฐาน ได้กำหนดวิธีมาตรฐานในการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ดังตารางที่ 2 ซึ่งมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 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 และเมล็ดจากสตอเบอรี่
EN 1788	การตรวจวัดแสงที่ได้จากการกระตุ้นสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกตในตัวอย่างด้วยเทคนิค Thermoluminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก กุ้ง ปลาแห้ง ผลไม้ ผักและมะเขือเทศ
prEN13708	การวิเคราะห์ผลึกน้ำตาลด้วยเทคนิค ESR	ผลไม้อบแห้ง (มะละกอ มะม่วง มะเดื่อและลูกเกด)
prEN13751	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photostimulated luminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก และปลา
prEN 13783	การตรวจนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Direct Epifluorescent Filter Technique/Aerobic Plate Count (DEFT/APC)	เครื่องเทศ สมุนไพรและพริก
prEN13784	การวิเคราะห์ความเสียหายของ DNA ด้วยเทคนิค DNA comet assay	ไก่ หมู และเมล็ดพืช

ที่มา: Delincée (2002)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

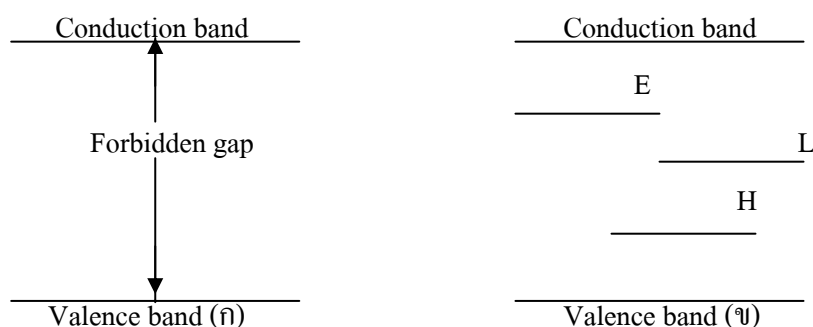
วิธีการ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
Gas chromatographic (GC) analysis of hydrocabons and 2-alkylcyclobutanones	ความไวสูง	1. เครื่องมือมีราคาสูง 2. ต้องสกัดแยกสารที่ต้องการวิเคราะห์เช่น alkane/alkene ออกมาจากตัวอย่างก่อน
ESR spectroscopy	1. รวดเร็ว 2. มีความไวสูง	1. เครื่องมือมีราคาสูง 2. ความไวขึ้นกับชนิดของโครงสร้างผลึก
Thermoluminescence of silicate minerals	1. ความไวสูงและเฉพาะมาก 2. ตรวจสอบได้ถูกต้อง แม้เก็บไว้เป็นระยะเวลานานเป็นปี	ต้องแยกสารประกอบอนินทรีย์ออกจากตัวอย่างก่อน
Photostimulated luminescence	1. สะดวกรวดเร็ว 2. สามารถตรวจสอบซ้ำได้	มีข้อจำกัดเรื่องความผิดพลาดที่เกิดจากชนิดและปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ที่กระจายตัวบนผิวขณะตรวจสอบ
Microbiological screening (DEFT/APC)	สะดวกและรวดเร็ว	ใช้กับอาหารที่ผ่านความร้อนไม่ได้
DNA comet assay screening	1. ราคาถูก 2. รวดเร็ว	ใช้ได้กับอาหารสดที่ไม่ผ่านกระบวนการเท่านั้น

ที่มา: Meier (1991)

การนำเทคนิคการตรวจสอบอาหารฉายรังสีไปใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านต่างๆ เช่น ความเหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละชนิด ความละเอียดและความถูกต้องในการวิเคราะห์ ความสะดวก รวดเร็วและราคาที่เหมาะสม เป็นต้น

การตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิคการเรืองแสง

การตรวจสอบอาหารฉายรังสีโดยเทคนิค luminescence อาศัยกระบวนการเรืองแสงของสารประกอบอินทรีย์ที่เก็บสะสมพลังงานจากการฉายรังสีไว้ เช่น สารประกอบประเภทซิลิเกตที่แยกออกมาจากผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งกระบวนการเรืองแสงของสารสามารถอธิบายได้ โดยทฤษฎีของแถบพลังงาน (band theory) ประกอบด้วยแถบการนำ (conduction band) ซึ่งมีระดับพลังงานสูง และแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า ระยะระหว่างแถบการนำและแถบวาเลนซ์จะอยู่ห่างกันในระดับพลังงานที่เรียกว่า ช่องว่างหวงห้าม (forbidden gap) ในผลึกบริสุทธิ์ (ideal crystal) อิเล็กตรอนทั้งหมดจะมีอยู่ในแถบวาเลนซ์ (valence band) เท่านั้น ถ้าปราศจากอิทธิพลจากแรงภายนอก (external forces) มีโอกาสน้อยมากที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะข้ามช่องว่างหวงห้ามไปสู่แถบการนำ แต่ในกรณีของผลึกทั่วไป ซึ่งในช่องว่างหวงห้ามจะมีระดับพลังงานอื่นเพิ่มขึ้นเรียกว่า trap ได้แก่ electron trap (E), hole trap (H) และ luminescence trap (L) ดังแสดงในภาพที่ 2 ทำให้โอกาสการข้ามช่องว่างหวงห้ามไปสู่แถบการนำของอิเล็กตรอนมากขึ้น

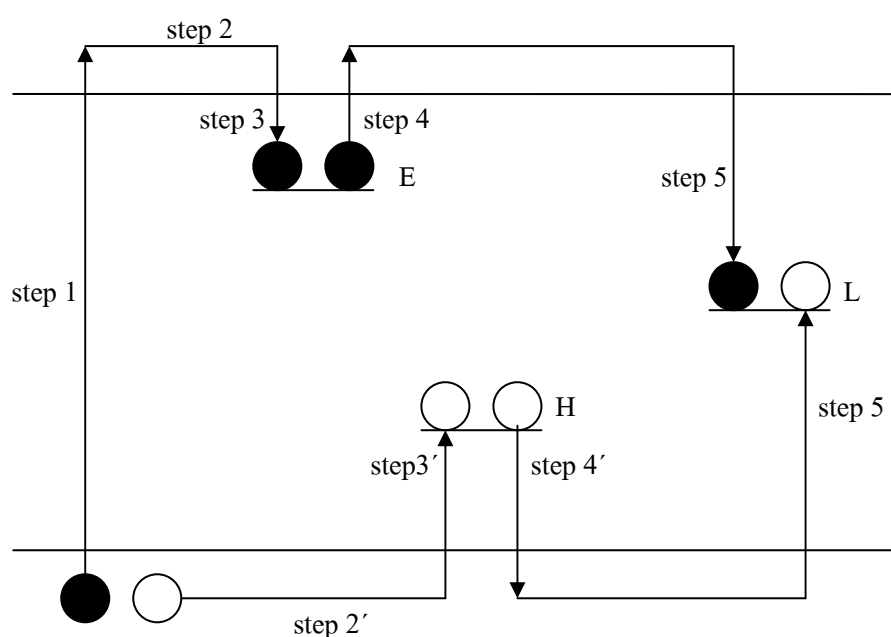


ภาพที่ 2 แบบจำลองแถบพลังงานของผลึกบริสุทธิ์ (ก) และผลึกทั่วไป (ข)

ที่มา: Mckinlay (1981)

จากภาพที่ 3 ซึ่งเป็นแบบจำลองทั่วไปของการเรืองแสงแสดงให้เห็นแถบพลังงานแต่ละชั้น เมื่อผลึกได้รับพลังงานจากรังสี อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ (step 1) ในขั้นนี้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (step 2) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มี electron trap อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ (step 3) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ ทำให้เกิดที่ว่างภายในแถบวาเลนซ์เรียกว่า โฮล (hole) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในแถบวาเลนซ์ได้อย่างอิสระเช่นเดียวกัน (step 2') และอาจถูกจับไว้ที่บริเวณ hole trap (step 3') และถ้า

ได้รับพลังงานเล็กน้อย เช่น เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิห้อง โฮลจะเคลื่อนที่ออกจาก hole trap (step 4') และอิเล็กตรอนใน electron trap ก็จะหลุดออกไป เมื่อได้รับพลังงานความร้อนหรือแสง ในช่วงคลื่นที่เหมาะสม (step 4) และเมื่ออิเล็กตรอนมารวมกับโฮลที่ luminescence trap (L) พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของแสง (step 5) การรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลจะให้แสงออกมาเมื่อรวมกันที่ luminescence trap เท่านั้น (Greening, 1981)



ภาพที่ 3 แบบจำลองอย่างง่ายของแถบพลังงานของ TL ที่แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (●) และการเกิดที่ว่างหรือโฮล (○)

ที่มา: Mckinlay (1981)

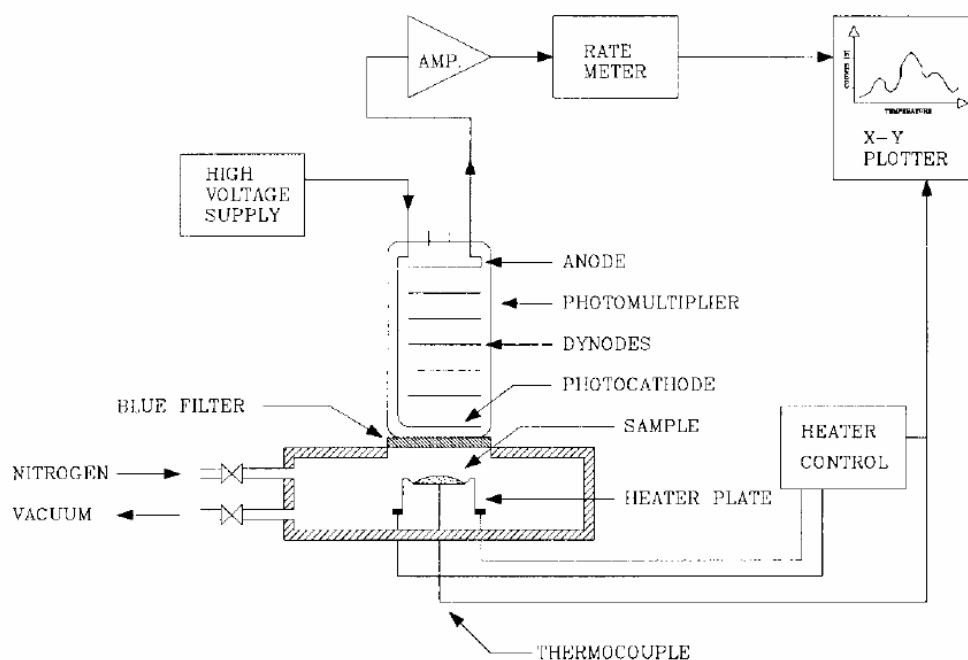
หลังจากผลึกทั่วไปได้รับรังสี อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ที่ trap แต่ถ้าทิ้งผลึกไว้ในระยะเวลาหนึ่งจำนวนอิเล็กตรอนใน trap จะลดลงเนื่องจากเกิดการจางหาย (fading) โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการจางหายได้แก่ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้อ่านค่าปริมาณรังสีได้น้อยกว่าความเป็นจริง

Photostimulated luminescence (PSL)

เทคนิค PSL เป็นเทคนิคที่พัฒนาโดย The Scottish Universities Research and Reactor Center (SURRC) พื้นฐานของเทคนิคนี้คือ การกระตุ้นสารอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตหรือสารชีวอนินทรีย์ ซึ่งพบได้มากในอาหาร เช่น calcite ในเปลือกหอยหรือเปลือกหุ้มของสัตว์หรือ hydroxyapatite ในกระดูกหรือฟัน ด้วยแสงในช่วงอินฟราเรด ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ไม่ทำลายตัวอย่าง ถึงแม้ว่าการอ่านสัญญาณซ้ำจะทำให้สัญญาณลดลง (Elahi *et al.*, 2008) การฉายรังสีอาหารจะทำให้เกิดการกักเก็บพลังงาน เมื่อกระตุ้นด้วยแสงในช่วงอินฟราเรดก็จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการเรืองแสง ซึ่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นจำนวนโฟตอนต่อนาที่ ซึ่งสัญญาณ PSL ที่ได้จากตัวอย่างฉายรังสีจะมีค่ามากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาที่ (positive) ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการฉายรังสีจะให้ค่าสัญญาณ PSL ต่ำกว่า 700 โฟตอนต่อนาที่ (negative) (European Standard EN 13751, 2002) เมื่อผลการตรวจสอบอยู่ในช่วง 700 ถึง 5,000 โฟตอนต่อนาที่ (intermediate) จำเป็นต้องยืนยันผลการตรวจสอบโดยวิธีการอื่นๆ ซึ่งวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการยืนยันผลจากเทคนิค PSL เช่น เทคนิค TL (Elahi *et al.*, 2008) เป็นต้น

Thermoluminescence (TL)

การตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค TL จะอาศัยการปลดปล่อยพลังงานแสงจากการเปลี่ยนระดับพลังงานซึ่งเกิดในสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตหรือสารชีวอนินทรีย์ที่ปนอยู่ในอาหาร โดยการกระตุ้นด้วยความร้อน เทคนิคนี้จำเป็นต้องแยกสารประกอบอนินทรีย์ประเภทซิลิเกตออกจากตัวอย่างก่อน แล้วใส่ลงบนแผ่นสแตนเลสหรืออะลูมิเนียม และนำไปทำการตรวจวัด โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนจากเครื่องอ่านสัญญาณ TL (ภาพที่ 4) ความเข้มของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะต่อเนื่องเรียกว่า glow curve (Elahi *et al.*, 2008) ซึ่ง glow curve เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมากับอุณหภูมิหรือเวลาที่ให้ความร้อน การยืนยันผลการตรวจสอบทำได้ โดยการหาค่าอัตราส่วนระหว่าง glow curve ก่อน (G1) และหลัง (G2) ฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ (reference dose) ค่าอัตราส่วนที่ได้เรียกว่าค่า TL ratio (G1/G2) (European Standard EN 1788, 2001) โดยทั่วไป G1 ของอาหารฉายรังสีจะมีค่ามากที่สุดในช่วง 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ส่วนอาหารที่ไม่ได้ฉายรังสีจะให้สัญญาณในช่วง 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการได้รับรังสีพลังงานต่ำหรือรังสีในธรรมชาติและเก็บสะสมอยู่ใน deep traps (Elahi *et al.*, 2008)



ภาพที่ 4 ระบบการทำงานของเครื่องอ่านสัญญาณ TL ที่ใช้ heater plate

ที่มา: Bøtter-Jensen (1997)

การตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสีด้วยเทคนิค TL และเทคนิค PSL

เทคนิค TL และ PSL เป็นวิธีการตรวจสอบทางกายภาพที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด เหมาะสมกับตัวอย่างประเภทผัก สมุนไพร และเครื่องเทศ โดยเทคนิค PSL จะใช้สำหรับการตรวจสอบขั้นต้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพื่อยืนยันผลอีกครั้ง โดยวิธีการอื่นๆ เช่น เทคนิค TL เป็นต้น ส่วนเทคนิค TL สำหรับการตรวจสอบอาหารฉายรังสีนั้น มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องฉายรังสีสำหรับการฉาย normalizing dose หรือ reference dose (Elahi *et al.*, 2008)

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีความสนใจนำเทคนิค TL มาใช้ในการศึกษาตัวอย่างอาหารหลายชนิด เช่น การศึกษาตัวอย่างที่เป็นเครื่องเทศ โดย Kitis *et al.* (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างสารอนินทรีย์ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น quartz (SiO_2) ร้อยละ 60 albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ร้อยละ 30 และ ortose (KAlSi_3O_8) ร้อยละ 10 ซึ่งได้รับรังสีในช่วง 1 เกรย์ ถึง 10 กิโลเกรย์ พบว่าสัญญาณ TL ที่ได้ มีความไวสูงและรูปแบบสัญญาณคงที่ แม้ว่าจะทำการอ่านเกิน 10

ครั้ง และเมื่อวิเคราะห์ glow peak ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 องศาเซลเซียส ขึ้นไป จะไม่พบการจางหาย (fading) ของสัญญาณจากตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ Engin (2005) ได้ศึกษาลักษณะสัญญาณ TL จากตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากพริกไทยดำที่ผ่านการฉายรังสี พบว่าสามารถแยกความแตกต่างของพริกไทยดำฉายรังสีและไม่ฉายรังสีได้ดีในช่วงปริมาณรังสี 1 ถึง 10 กิโลเกรย์ Khan และ Bhatti (2007) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีผลิตภัณฑ์ประเภทข้าวและข้าวสาลี ปริมาณ 0.5 และ 1.0 กิโลเกรย์ โดยใช้เทคนิค TL พบว่าสามารถตรวจสอบได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค TL ในการศึกษาตัวอย่างผักและผลไม้แห้ง (Khan *et al.*, 2002) เช่น เมล็ดพิสตาชิโอ ผลแอปเปิ้ลคอกเทล เมล็ดอัลมอนด์และลูกเกด ที่ฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1 ถึง 3 กิโลเกรย์หรือลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณ 0.75 ถึง 3.9 กิโลเกรย์และศึกษา TL glow curve ที่อุณหภูมิช่วง 50 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาแยกแยะระหว่างผลไม้แห้งที่ฉายและไม่ฉายรังสีได้ดี

อย่างไรก็ตาม เทคนิค TL ก็ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ ซึ่งอาจมีเทคนิคอื่นที่มีความเหมาะสมกว่าสำหรับตัวอย่างบางชนิด โดย Ziegelmann *et al.* (1999) ได้ศึกษาสัญญาณ TL และ ESR ที่ได้จากตัวอย่างเปลือกหอย 10 ชนิด รวม 18 ตัวอย่าง พบว่าเทคนิค ESR มีความไวและมีความเหมาะสมกับตัวอย่างเปลือกหอยมากกว่าเทคนิค TL นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยใช้เทคนิค PSL ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Chung *et al.* (2004) ได้ใช้เทคนิค PSL, DNA comet assay, ESR และ TL ตรวจสอบลูกเกล็ดที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0 ถึง 0.5 กิโลเกรย์ พบว่าเทคนิค PSL, DNA comet assay และ ESR มีความสามารถต่ำ ในการแยกความแตกต่างระหว่างเกล็ดที่ฉายรังสีกับไม่ฉายรังสี เมื่อเทียบกับเทคนิค TL ในขณะที่ Bayram และ Delincée (2004) ได้ศึกษาการตรวจสอบอาหารฉายรังสีประเภทต่างๆ ของประเทศตุรกี ด้วยเทคนิค PSL, ESR และ TL โดยฉายรังสีพริก ชา ผลไม้แห้ง และถั่ว ด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณ 0.5 ถึง 10 กิโลเกรย์ พบว่าทั้งเทคนิค PSL และ ESR ให้ผลการตรวจสอบที่ไม่แน่นอนเพราะสัญญาณที่ได้มีค่าต่ำ และตัวอย่างมีความแตกต่างกันไปตามแหล่งของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต ส่วนเทคนิค TL แม้จะใช้เวลาตรวจสอบยาวนานกว่า แต่ให้ผลการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือมากกว่า

Chung *et al.* (2002) ได้ศึกษาความแตกต่างของเทคนิคในการวิเคราะห์ระหว่างเทคนิค PSL, TL และ ESR โดยใช้ตัวอย่างอาหารฉายรังสีจำพวกปลาแอนโชวีแห้ง และ กุ้ง ซึ่งได้รับการฉายลำอิเล็กตรอนปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ พบว่าเทคนิค PSL สามารถตรวจสอบผลได้อย่างถูกต้อง แต่ไม่พบสัญญาณที่มีลักษณะเฉพาะจากตัวอย่างฉายรังสีทั้งสองประเภทเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค ESR ส่วนเทคนิค TL พบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสีแสดง glow curves ที่อุณหภูมิ 300

องศาเซลเซียส และมีความเข้มของสัญญาณต่ำ ส่วนตัวอย่างที่ได้รับรังสีแสดง glow curves ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีความเข้มของสัญญาณสูงเพียงพอสำหรับการแยกความแตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ได้รับรังสี

Bhatti *et al.* (2008) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีของผลิตภัณฑ์ประเภทไข่ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 3 กิโลเกรย์ โดยตรวจสอบส่วนเปลือกไข่ด้วยเทคนิค PSL และเทคนิค TL พบว่า ตัวอย่างฉายรังสีบางตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่เก็บไว้นาน 6 เดือน คำนับโฟตอนมีค่าอยู่ในช่วง intermediate ซึ่งไม่สามารถยืนยันผลได้ สำหรับเทคนิค TL ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.53 ถึง 4.27 ส่วนตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสีจะค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.06 ถึง 0.38 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสำหรับอาหารที่ไม่ฉายรังสีคือ 0.1

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. สารเคมี

1.1 น้ำกลั่น

1.2 Sodium polystungstate ($\text{Na}_6\text{W}_{12}\text{O}_{39} \cdot \text{H}_2\text{O}$) บริษัท Fluka (Germany)

1.3 Hydrochloric acid (1M HCl) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)

1.4 Ammonium hydroxide (1M NH_4OH) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)

1.5 Acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)

1.6 carboxymethyl cellulose (ร้อยละ 0.2 ในน้ำ) บริษัท Fluka (Finland)

1.7 Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) บริษัท MERCK (Darmstadt, Germany)

1.8 nitrogen gas สำหรับเครื่องอ่านสัญญาณ TL บริษัท ไทยอินดัสเทรียล แก๊ส จำกัด

1.9 ตัวอย่างกระเทียมผงและเครื่องปรุงรสผสมชนิดต่างๆ จากบริษัท ทีเอ็ม ฟู้ดส์ จำกัด

1.11 X-ray Mix Powder Binding (สารยึดเหนี่ยว)

1.12 สารอ้างอิงมาตรฐาน Bovine Muscle Powder (NIST-SRM 8414)

2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 ปีกเกอร์ (beaker) 1000 ml

2.2 ปีเปตต์ (pasteur pipette)

2.3 centrifuge tube 50 ml

2.4 ultrasonic bath บริษัท NDI รุ่น 136 H

2.5 centrifuge with swing-out rotor, at least 1000 g ($g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$) (SANYO รุ่น

MSB 080 CR)

2.6 aluminum disc พร้อม panchet

2.7 ตู้อบแห้ง (CONTHERM รุ่น Series Five)

2.8 เครื่องอ่านสัญญาณ TL (Harshaw รุ่น 4500)

2.9 เครื่อง PSL screening (SUERC laboratorie รุ่น SURRC Pulsed PSL System)

2.10 เครื่องฉายรังสีแกมมา (JL Shepherd รุ่น Mark I Cs-137)

2.11 เครื่องฉายรังสีแกมมา (MDS Nordion รุ่น Gammacell 220 Excell Co-60)

2.12 เครื่องบดตัวอย่าง (Gy-Ro Mill รุ่น Z-TDA 71 MR)

2.13 เครื่องอัดตัวอย่าง (ICL รุ่น CE99)

2.14 เครื่องมือวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองแสงแบบกระจายพลังงาน (EDXRF) (Oxford รุ่น ED2000)

วิธีการ

1. การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDXRF

วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสม 3 ชนิด (101A3D, 070AI2, BBE092007) ด้วยเครื่อง EDXRF (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer) โดยใช้เทคนิควิเคราะห์แบบกึ่งปริมาณ (semi-quantitative) เพื่อหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปสู่การกำหนดขั้นตอน วิธีการ และปริมาณของตัวอย่างเริ่มต้น ในการสกัดแยกเพื่อให้ได้สารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกตที่มีปริมาณเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณ TL โดยการนำตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมมาบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง 2 นาที แล้วชั่งตัวอย่างมา 2 กรัม ผสมกับสารยัดเหนียว 1 กรัม แล้วนำไปบดอีกครั้งนาน 2 นาที จากนั้นนำไปอัดด้วยเครื่องอัดตัวอย่างด้วยน้ำหนักกดขนาด 15 ตัน ที่ใช้เวลา 1 นาที จะได้ตัวอย่างผงปรุงรสอัดเม็ด จึงนำไปวิเคราะห์แบบกึ่งปริมาณด้วยเครื่อง EDXRF เทียบกับสารมาตรฐาน NIST-SRM 8414

2. การสกัดแยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่างสำหรับตรวจสอบด้วยเทคนิค TL

สกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกตออกจากตัวอย่าง โดยใช้วิธีมาตรฐาน EN-1788 (European Standard EN 1788, 2001) ซึ่งปรับให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างเครื่องปรุงรสชนิดต่างๆ มีขั้นตอน ดังนี้

2.1 แยกสารอินทรีย์ออกจากตัวอย่าง โดยนำตัวอย่าง 50 กรัม มาผสมกับน้ำ 700 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ใน ultrasonic bath 15 นาที คูลสารแขวนลอยออกให้เหลือประมาณ 10 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge นาน 1 นาที (1,000 กรัม) ปลอ่ยทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วคูลส่วนที่เป็นของเหลวออก

2.2 แยกสารประกอบอนินทรีย์ออกจากตัวอย่าง ด้วยสารละลาย sodium polytungstate ความหนาแน่น 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรโดยใช้สารละลาย sodium polytungstate 10 มิลลิลิตร ในหลอด centrifuge ที่มีตะกอนนอนก้นในขั้นตอน 2.1 แล้วนำไปเขย่าด้วย ultrasonic bath นาน 3 นาที นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 2 นาที (1000 กรัม) เติมน้ำกลั่นจนเต็มหลอดเพื่อให้ง่ายต่อการแยกสารอนินทรีย์ออก ค่อยๆ คูดสารชั้นบนและสารละลาย sodium polytungstate ออก โดยให้ตะกอนที่ต้องการยังอยู่ที่ก้นหลอด เติม 1M HCl 1 ถึง 2 มิลลิลิตร เขย่าแล้วเก็บไว้ในที่มืด 10 นาที ทำให้เป็นกลางด้วย 1M NH_4OH แล้วเติมน้ำกลั่นให้เต็มหลอด นำไปเหวี่ยงด้วย centrifuge แล้วทำความสะอาดตะกอนด้วยน้ำ 2 ครั้ง และขจัดน้ำออกโดยใช้ acetone แล้วเขย่าใน ultrasonic bath ล้างด้วย acetone จนกว่าจะขจัดน้ำออกได้หมด

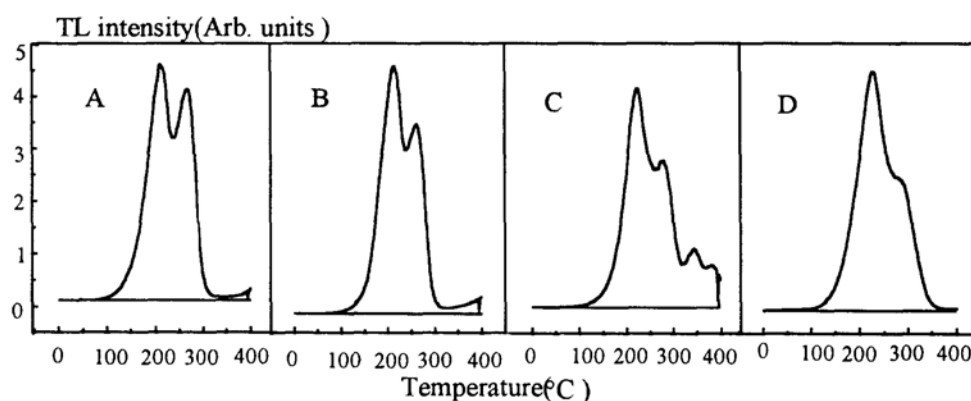
2.3 คูดสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้ลงบนแผ่นอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักแล้วตรึงตัวอย่างให้ติดกับแผ่นอะลูมิเนียม ด้วย carboxymethyl cellulose (ร้อยละ 0.2 ในน้ำ) นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้ง

2.4 นำแผ่นอะลูมิเนียมมาวางบน panchet เพื่อทำการอ่านสัญญาณ TL ต่อไป

ในการทดลองได้ใช้น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นที่ 50 กรัม ก่อนเข้ากระบวนการสกัดแยก และนำผลการทดลองไปใช้กำหนดน้ำหนักเริ่มต้นในการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ต่อไป

3. การเลือกเวลาที่เหมาะสมในการวัดด้วยเทคนิค TL

หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ (glow curve) จากเครื่องอ่านสัญญาณ TL ในการอ่านสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องอ่าน TL จะมีรอบการให้ความร้อน (heating cycle) เพื่อให้ความร้อนแก่สารเรืองแสงจนกระทั่งอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมา โดยตั้งค่าระบบการวิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (initial temperature) อัตราการให้ความร้อน (heating rate) และ อุณหภูมิสูงสุด (final temperature) เพื่อให้ได้ลักษณะ glow curve ที่สมบูรณ์ ซึ่งลักษณะของ glow curve ที่อ่านได้จะมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่างแต่ละชนิด (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 ตัวอย่าง TL glow curve ของ red pepper paste powder (A), soy sauce powder (B), soybean paste powder (C), Ramen soup mixes (D)

ที่มา: Kwon *et al.* (1998)

ในการทดลองได้นำตัวอย่างแร่ feldspar 0.004 กรัม มาใช้ในการทดลองร่วมกับสารประกอบอินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสม 3 ชนิด ได้แก่ 101A3D, 070AI2 และ BBE092007 โดยในการทดลองเริ่มต้นได้ตั้งค่าในการวิเคราะห์ดังนี้

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

เปรียบเทียบลักษณะ glow curve ของตัวอย่างเครื่องปรุงรสกับ glow curve ของ feldspar โดยทดลองปรับเวลาในการวัด เพื่อให้ได้ glow curve ที่สมบูรณ์ที่สุด และทดลองฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 1 และ 2.5 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่องฉายรังสี Mark I เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ glow curve ตามปริมาณรังสีดูดกลืนที่เพิ่มขึ้น

จากนั้นนำสภาวะในการวิเคราะห์ที่ศึกษาได้มาทดลองตรวจสอบตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยนำสารประกอบอินทรีย์ที่แยกได้มาวัดสัญญาณ TL จะได้ glow curve 1 (G1) นำไปฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ แล้ววัดสัญญาณ TL อีกครั้งได้ glow curve 2 (G2) กำหนด

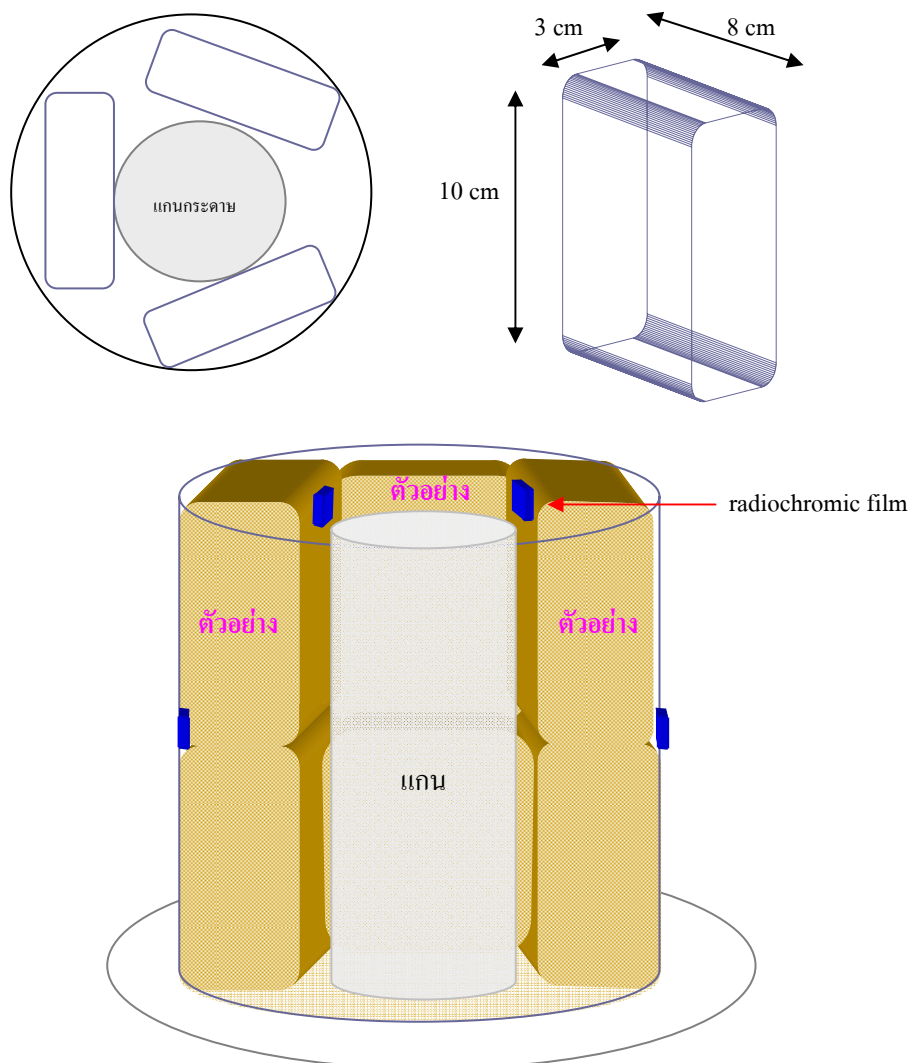
ขอบเขตการวิเคราะห์ (region of interest; ROI) ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากลักษณะของ glow curve โดยเลือกขอบเขตการวิเคราะห์ 3 ช่วงคือ channel 1 ถึง 200 (50 ถึง 300 องศาเซลเซียส), channel 29 ถึง 69 (111 ถึง 195 องศาเซลเซียส) และ channel 29 ถึง 89 (111 ถึง 237 องศาเซลเซียส) แล้วคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณกระแสรวม G1/G2 (TL ratio) โดยเครื่องปรุรงสลายรังสีจะมีค่า TL ratio มากกว่า 0.5 ส่วนเครื่องปรุรงสลายที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะมีค่า TL ratio น้อยกว่า 0.1 (European Standard EN 1788, 2001)

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสี

บรรจุกระเทียมผงในซองพลาสติกขนาด 200 มิลลิกรัม (ภาพที่ 6) นำไปติด dosimeter (radiochromic film) แล้วบรรจุใน container ดังภาพที่ 7 จากนั้นนำไปฉายรังสีที่ปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 โดยใช้เวลา 5 นาที 5 วินาที, 15 นาที 14 วินาที, 25 นาที 31 วินาที และ 51 นาที 2 วินาที ตามลำดับ โดยเวลาในการฉายรังสีได้มาจากการทดลองฉายรังสีตัวอย่างจำลองก่อนการฉายรังสีตัวอย่างจริง ดังผลการตรวจวัดปริมาณรังสีในตารางผนวกที่ 5



ภาพที่ 6 ภาพแสดงตัวอย่างกระเทียมผงบรรจุซองพลาสติกสำหรับการฉายรังสี



ภาพที่ 7 ขนาดของตัวอย่าง ตำแหน่งการวางตัวอย่างและการติด dosimeter

4.1 การหาขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจสอบตัวอย่างกระเทียมผง

หาขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับตัวอย่างกระเทียมผง โดยใช้ตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเปรียบเทียบกับลักษณะ glow curve ของกระเทียมผงกับตัวอย่าง feldspar และคำนวณหา TL ratio ในช่วง channel 1 ถึง 200, channel 29 ถึง 69 และ channel 29 ถึง 89

4.2 ผลของปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose)

นำตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมาแยกสารประกอบอนินทรีย์และวัดสัญญาณ TL ตามวิธีการในข้อ 1 และ 2 โดยเลือกขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.1 คำนวณหา TL ratio เพื่อศึกษาผลของปริมาณรังสีดูดกลืนต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสี

4.3 ผลของเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี

นำตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี มาเก็บรักษาในที่มืดเป็นเวลา 1, 7, 30 และ 90 วัน จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์สัญญาณ TL ด้วยขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 คำนวณหา TL ratio เพื่อวิเคราะห์การจางหายของสัญญาณ (fading) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ หลังการฉายรังสี

5. การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีระหว่างเทคนิค TL กับเทคนิค PSL

นำตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ และตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี มาตรวจสอบด้วยเครื่อง PSL screening มีหน่วยเป็นจำนวนโฟตอนต่อนาที สัญญาณ PSL ที่ได้จากตัวอย่างฉายรังสีจะมีค่ามากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาที ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการฉายรังสีจะให้ค่าสัญญาณ PSL ต่ำกว่า 700 โฟตอนต่อนาที (European Standard EN 13751, 2002) นำผลการตรวจสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL โดยการหาสมการเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิค PSL กับเทคนิค TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี ปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์

สถานที่ทำการทดลองและระยะเวลาทำการวิจัย

6. สถานที่

- ห้องปฏิบัติการของภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ศูนย์บริการฉายรังสีแกมมาและวิจัยนิวเคลียร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- บริษัท ทีเอ็ม ฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน) อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท

7. ระยะเวลาทำการวิจัย

ประมาณ 1 ปี โดยเริ่มทำการทดลองประมาณเดือนมิถุนายน 2549 และสิ้นสุดเดือนมิถุนายน 2550

ผลและวิจารณ์

ผล

1. การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDXRF

การวิเคราะห์ชนิดและสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ได้รับจากห้องปฏิบัติการควบคุมคุณภาพของบริษัท ที เอ็ม ฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน) รหัส 101A3D, 070AI2 และ BBE092007 ด้วยเครื่อง EDXRF โดยใช้เทคนิค semi-quantitative แสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4 และตารางผนวกที่ 2 ถึง 4 พบว่า ในตัวอย่างเครื่องปรุงรสทั้ง 3 ชนิด มีธาตุโซเดียม อะลูมิเนียม โพแทสเซียม และแคลเซียม ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบสำคัญในโมเลกุลของแร่ซลิเกต

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างเครื่องปรุงรสด้วยเครื่อง EDXRF

ธาตุองค์ประกอบ	ความเข้มข้น (ppm) (mean $\pm$ SD, n = 3)		
	101A3D	070AI2	BBE092007
โซเดียม	2342.8 $\pm$ 50.8	2338.9 $\pm$ 53.3	2216.7 $\pm$ 84.6
แมกนีเซียม	786.4 $\pm$ 32.6	796.7 $\pm$ 70.8	790.5 $\pm$ 25.1
อะลูมิเนียม	1.5 $\pm$ 0.1	1.7 $\pm$ 0.2	1.5 $\pm$ 0.1
กำมะถัน	5850.5 $\pm$ 432.7	4797.8 $\pm$ 677.4	5458.9 $\pm$ 534.3
โพแทสเซียม	9365.8 $\pm$ 1202.4	9477.9 $\pm$ 754.7	11436.9 $\pm$ 5310.3
แคลเซียม	161.2 $\pm$ 5.9	144.7 $\pm$ 5.7	146.6 $\pm$ 20.4
เหล็ก	68.0 $\pm$ 2.3	77.9 $\pm$ 8.2	77.8 $\pm$ 13.6
ฟอสฟอรัส	5795.7 $\pm$ 583.5	5352.4 $\pm$ 449.4	7847.1 $\pm$ 1024.7
คลอรีน	1618.3 $\pm$ 80.9	2139.5 $\pm$ 105.5	1479.5 $\pm$ 41.3
นิกเกิล	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0
ทองแดง	3.3 $\pm$ 0.2	2.7 $\pm$ 0.1	3.1 $\pm$ 0.6
แบเรียม	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0
สังกะสี	151.9 $\pm$ 7.7	146.8 $\pm$ 12.2	137.9 $\pm$ 18.9
โบรมีน	1.2 $\pm$ 0.1	1.2 $\pm$ 0.0	1.1 $\pm$ 0.3
สตรอนเชียม	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0	0.1 $\pm$ 0.0

2. การสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ออกจากตัวอย่างสำหรับตรวจสอบด้วยเทคนิค TL

สกัดสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกตออกจากตัวอย่างเครื่องปรุงรสทั้ง 3 ชนิด โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นในการสกัดแยก ซึ่งได้ทำการปรับปรุงวิธีการในการสกัดให้เหมาะสม เนื่องจากตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด เป็นตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงเหมือนกัน ดังนั้น จึงมีขั้นตอนในการสกัดแยกที่เหมือนกัน แต่ผลที่ได้จากการสกัดมีความแตกต่างกัน (ตารางที่ 5) โดยพบว่า เมื่อใช้น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น 50 กรัม จะสามารถสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์ได้ประมาณ 2 มิลลิกรัม จนถึง 8 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่มากเกินไป จึงปรับลดลงจากน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น 50 กรัม เป็น 30 กรัม ซึ่งเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL ทั้งนี้ได้มีข้อกำหนดในเรื่องน้ำหนักของสารประกอบอินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่างในวิธีมาตรฐาน EN-1788 โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 5 มิลลิกรัม สำหรับงานวิจัยนี้ น้ำหนักของสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดแยกได้และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 2.0 มิลลิกรัม

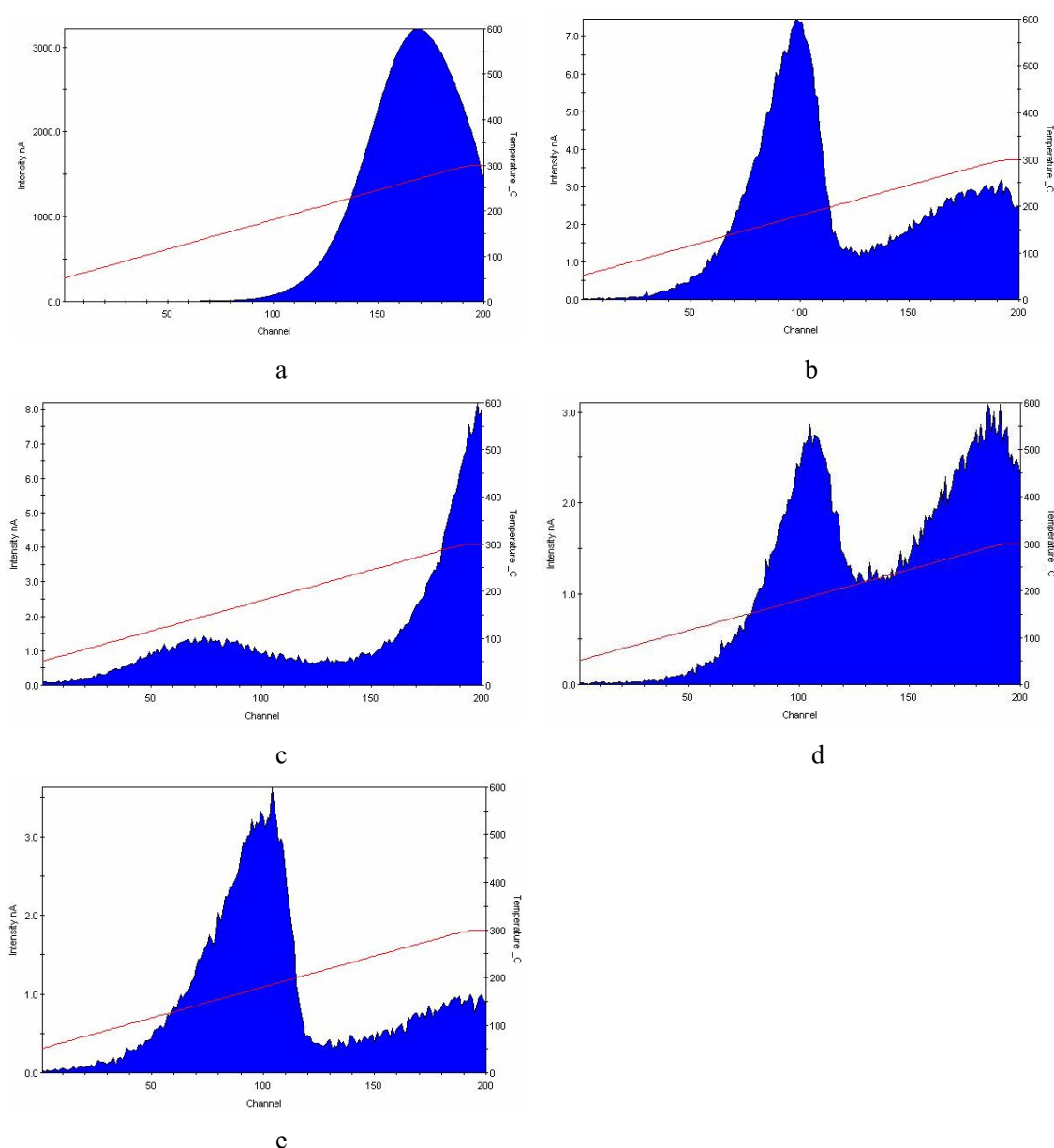
ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดจากตัวอย่างเครื่องปรุงรส 3 ชนิด เมื่อใช้ตัวอย่างเริ่มต้น 50 กรัม

ตัวอย่างเครื่องปรุงรส	น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักแร่ที่แยกได้ (มิลลิกรัม)	อัตราส่วนของน้ำหนักที่แยกได้ต่อน้ำหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)
101A3D	49.9991	2.0215	0.0404
070AI2	50.0003	8.2143	0.1642
BBE092007	50.0005	2.5138	0.0502

3. การเลือกเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL

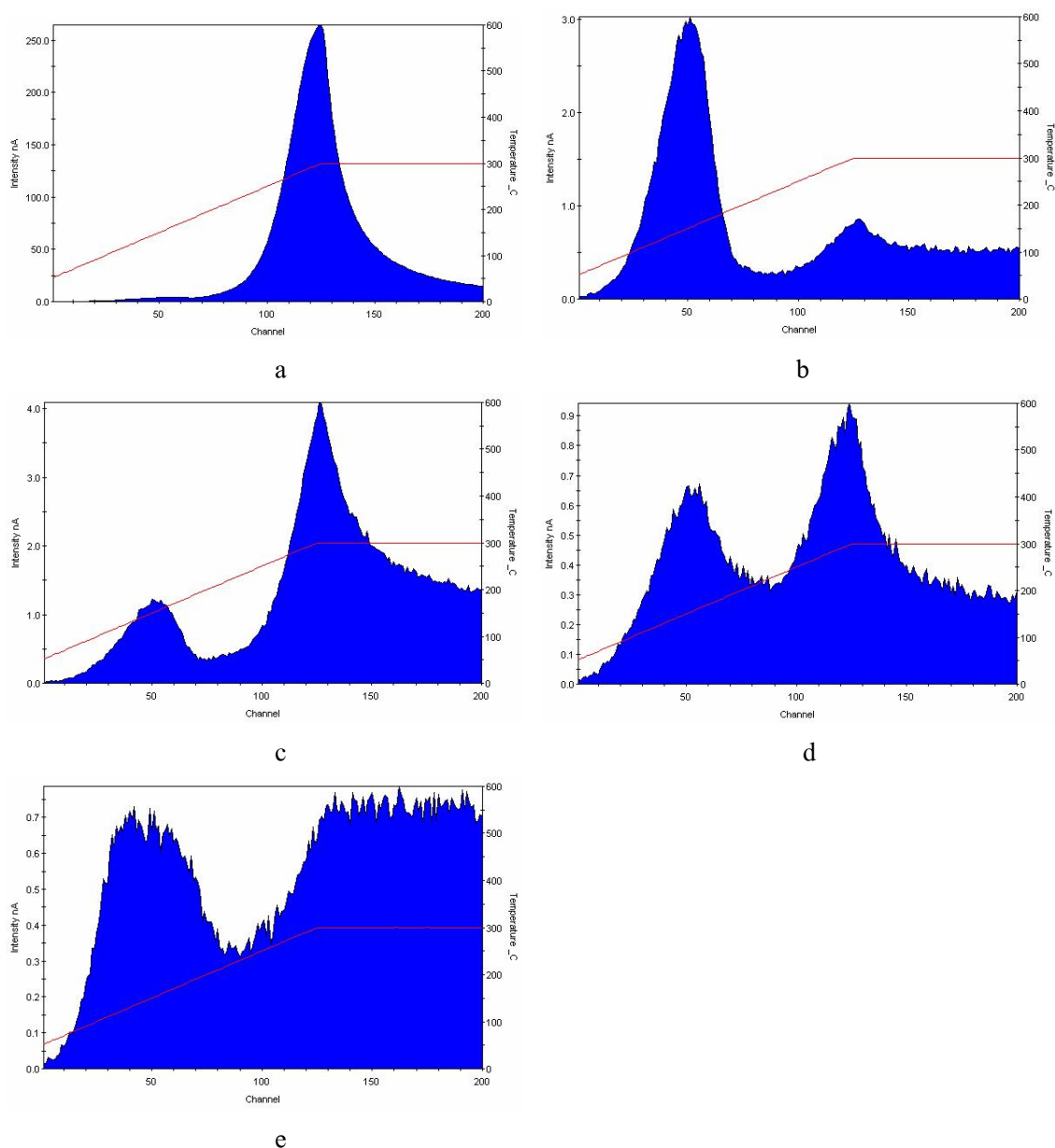
การทดลองนี้ได้เปรียบเทียบลักษณะ glow curve ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่ feldspar กับ glow curve ของสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่างเครื่องปรุงรส ทั้งนี้ได้ศึกษาการปรับตั้งค่าการทำงานของเครื่อง TL reader เพื่อให้ได้ glow curve ที่สมบูรณ์ที่สุด

จากการตั้งค่าในการวิเคราะห์ ด้วยอุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที และใช้เวลาในการวัด 42 วินาที ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 8 พบว่า glow curve ที่ได้ยังไม่สมบูรณ์ดีพอ โดยมีส่วนท้ายของ glow curve ขาดหายไป ซึ่งจะมีผลต่อการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในการหาปริมาณกระแสรวม



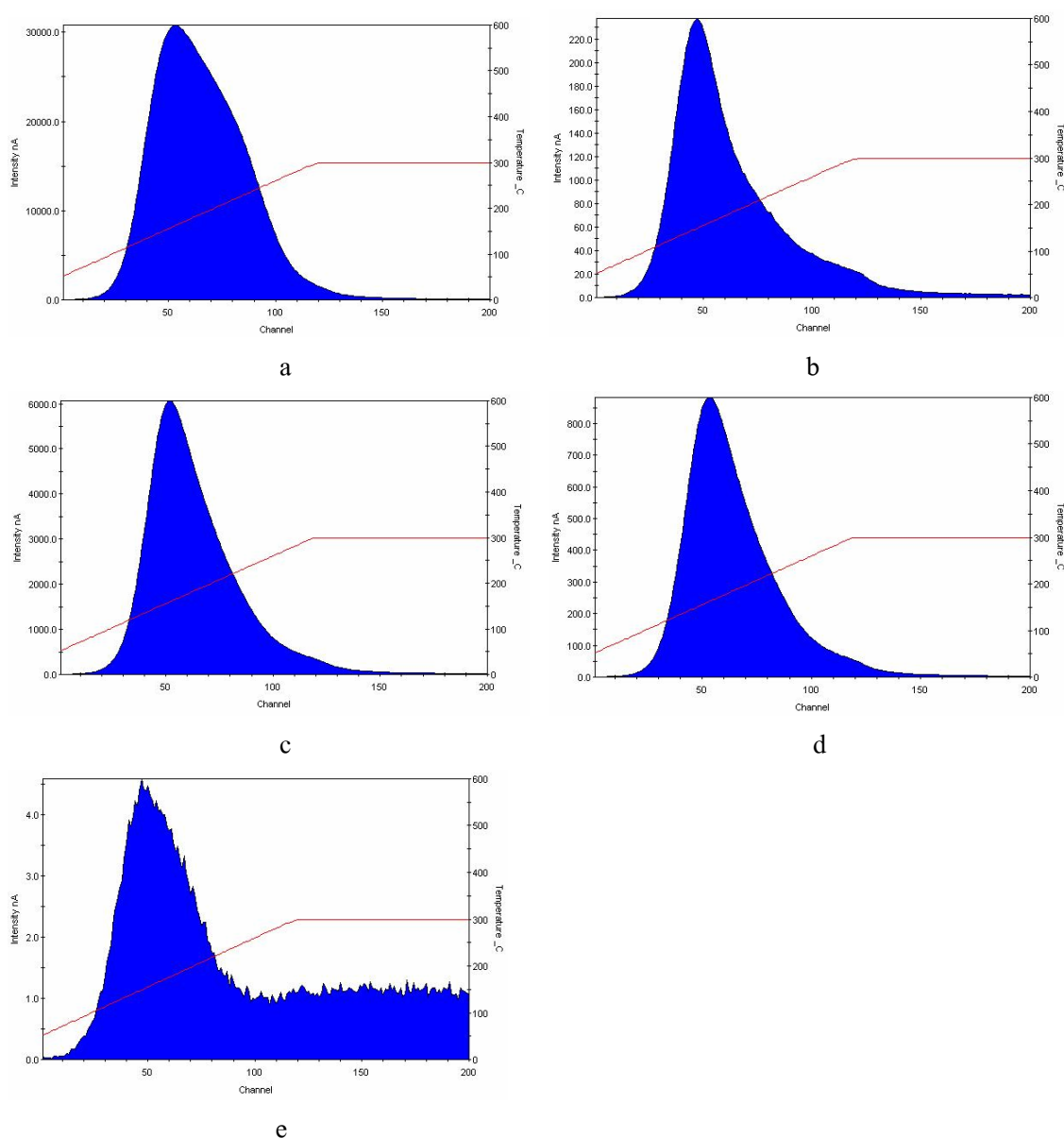
ภาพที่ 8 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 42 s)

เมื่อปรับเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นจาก 42 วินาทีเป็น 70 วินาที พบว่า ลักษณะ glow curve มีความสมบูรณ์มากขึ้น มีความต่อเนื่องสามารถกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ได้ครอบคลุม glow curve ทั้งหมด (ภาพที่ 9) นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวอย่างสารประกอบอนินทรีย์ที่ยังไม่ฉายรังสีมีปริมาณกระแสรวมต่ำและ glow peak อยู่ในช่วง channel 100 ถึง 150 (250 ถึง 300 องศาเซลเซียส) โดยมีค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ channel 50 ถึง 130 (150 ถึง 300 องศาเซลเซียส)



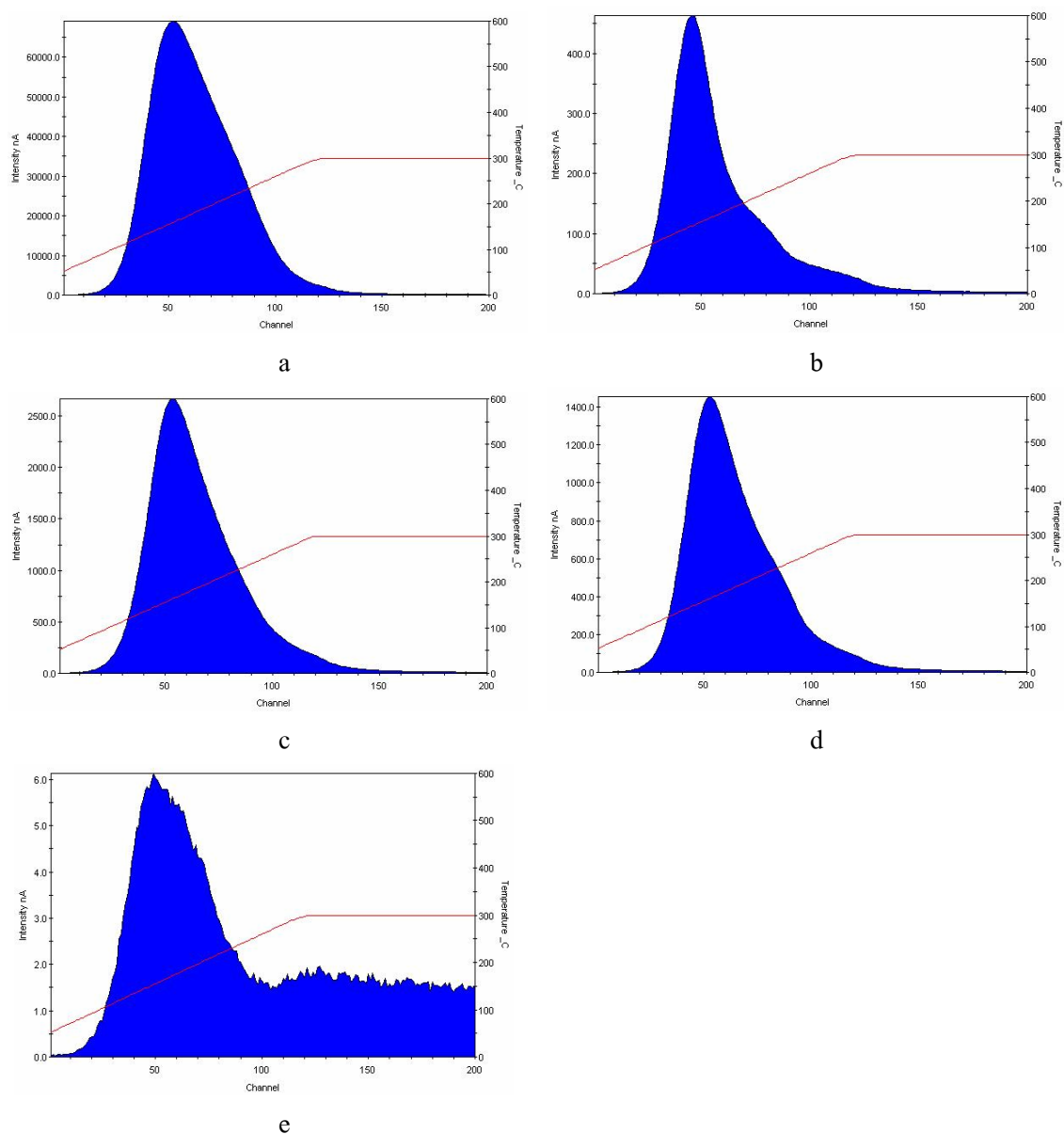
ภาพที่ 9 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)

เมื่อได้ glow curve ที่สมบูรณ์ จึงนำข้อมูลการตั้งค่าการทำงานของเครื่องไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยนำตัวอย่างสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมและตัวอย่างแร่ feldspar ไปฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ พบว่า ลักษณะ glow curve มีความแตกต่างจากเดิม โดย glow peak ที่ได้จากการฉายรังสี อยู่ในช่วงอุณหภูมิมีต่ำกว่า glow peak ของตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสี ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีปริมาณกระแสรวมสูงกว่าและ glow curve อยู่ในช่วง channel 28 ถึง 100 (110 ถึง 250 องศาเซลเซียส) มีค่ากระแสสูงสุดที่ channel 55 (153 องศาเซลเซียส) (ภาพที่ 10)



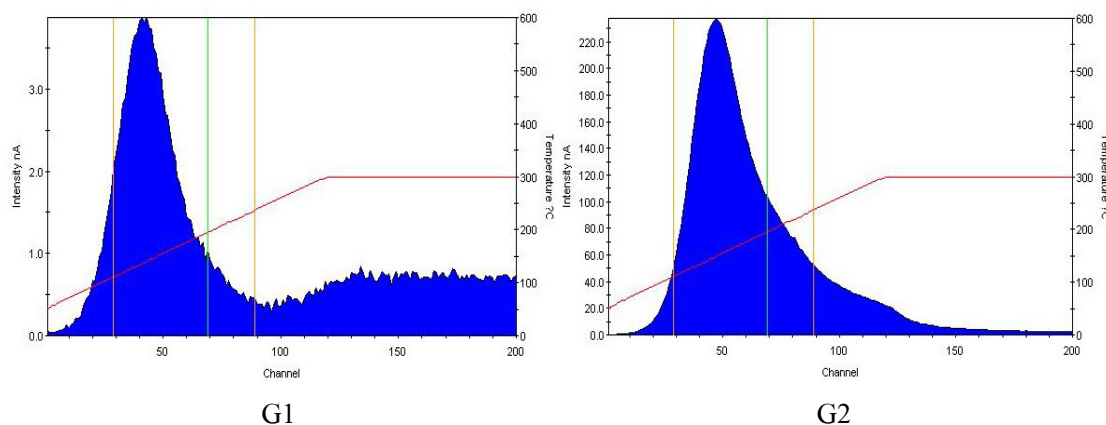
ภาพที่ 10 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุงรส 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)

เมื่อนำตัวอย่างไปทดลองฉายรังสีที่ 2.5 กิโลเกรย์ ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 11 พบว่า ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความเข้มของสัญญาณ TL โดยปริมาณของกระแสรวมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ แต่ตำแหน่งของ glow curve อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกัน

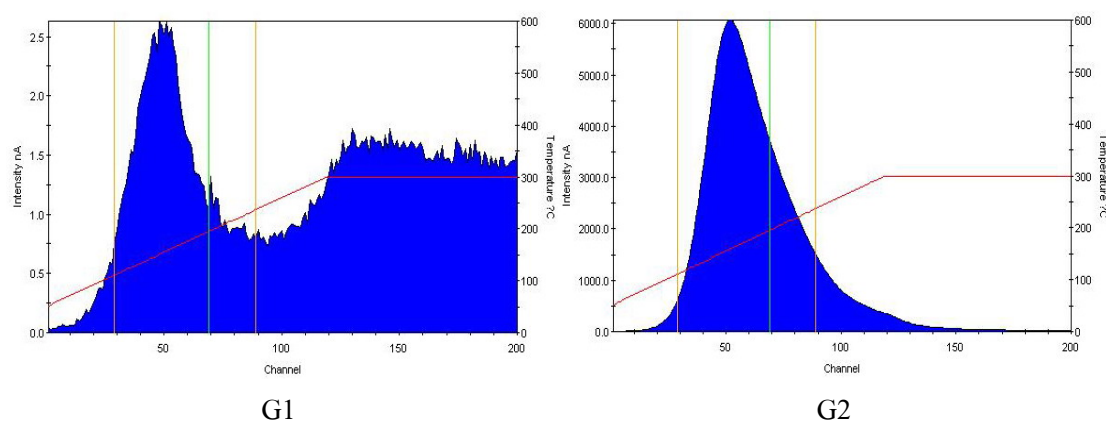


ภาพที่ 11 ลักษณะ glow curve ของ feldspar (a) ตัวอย่างเครื่องปรุรต 101A3D (b), 070AI2 (c), BBE092007 (d) ที่ผ่านการฉายรังสี 2.5 กิโลเกรย์ และ blank (e) (initial temperature 50°C, final temperature 300°C, heating rate 6°C/s, acquisition time 70 s)

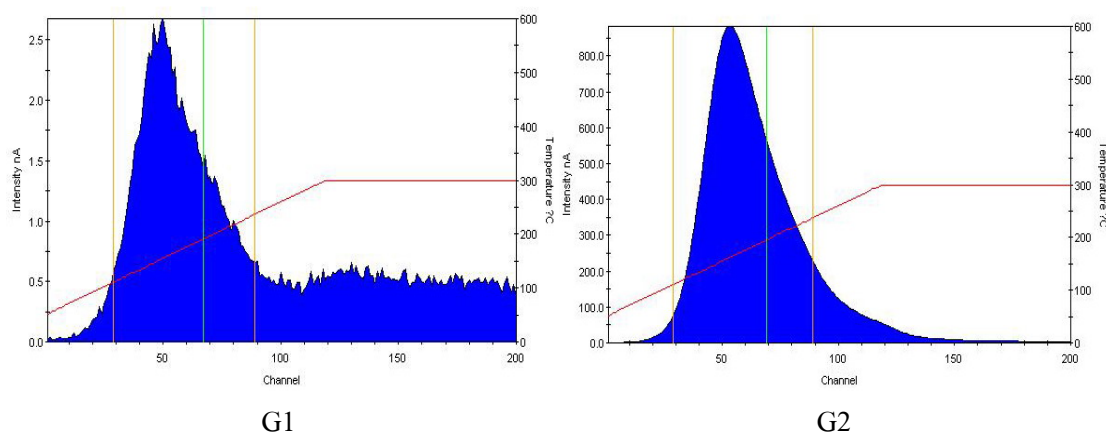
จากนั้นทดลองตรวจวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างเครื่องปรุณรศผสม 3 ชนิดก่อนและหลังฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ได้ glow curve ดังภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 14 และคำนวณค่า TL ratio โดยกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 1 ถึง 200 (ตารางที่ 6) channel 29 ถึง 69 (ตารางที่ 7) และ channel 29 ถึง 89 (ตารางที่ 8) พบว่า glow curve ก่อนและหลังฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ สำหรับทุกตัวอย่างมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ค่ากระแสสูงสุดและกระแสรวมมีค่าเพิ่มขึ้นมาก โดยค่ากระแสสูงสุดอยู่ในช่วง channel 29 ถึง 69 ทุกตัวอย่างให้ค่า TL ratio น้อยกว่า 0.1 ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และพบว่า การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ทุกช่วง channel สามารถให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องมีความเหมาะสมกับตัวอย่างเครื่องปรุณรศผสมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งค่า TL ratio มีความแตกต่างกัน โดย channel 29 ถึง 89 มีค่า TL ratio ต่ำที่สุด ในขณะที่ channel 1 ถึง 200 มีค่า TL ratio มากที่สุด



ภาพที่ 12 glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุณรศ 101A3D



ภาพที่ 13 glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุณรศ 070A12



ภาพที่ 14 glow curve ก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรส BBE092007

ตารางที่ 6 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 1 ถึง 200

ตัวอย่าง เครื่องปรุรงรส	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบการฉายรังสี
	G1	G2		
101A3D	70.10	3450.00	0.0203	ไม่ฉายรังสี
070AI2	87.35	86400.00	0.0010	ไม่ฉายรังสี
BBE092007	54.05	12600.00	0.0043	ไม่ฉายรังสี

ตารางที่ 7 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69

ตัวอย่าง เครื่องปรุรงรส	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบการฉายรังสี
	G1	G2		
101A3D	36.01	2305.00	0.0156	ไม่ฉายรังสี
070AI2	25.76	58170.00	0.0004	ไม่ฉายรังสี
BBE092007	25.64	8349.00	0.0031	ไม่ฉายรังสี

ตารางที่ 8 ค่า TL ratio ของตัวอย่างเครื่องปรุรงรศผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 89

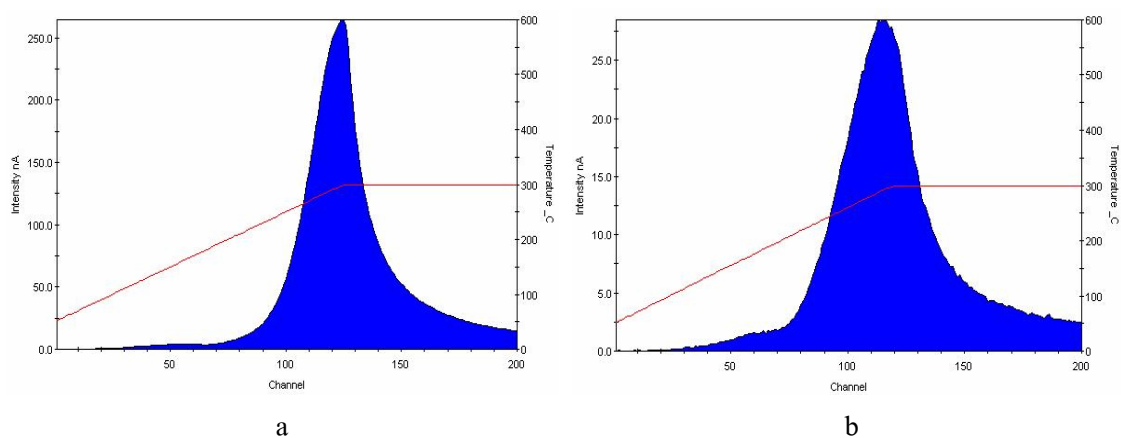
ตัวอย่าง เครื่องปรุรงรศ	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบการฉายรังสี
	G1	G2		
101A3D	40.38	2829.00	0.0143	ไม่ฉายรังสี
070AI2	32.23	75460.00	0.0004	ไม่ฉายรังสี
BBE092007	32.55	10960.00	0.0029	ไม่ฉายรังสี

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสี

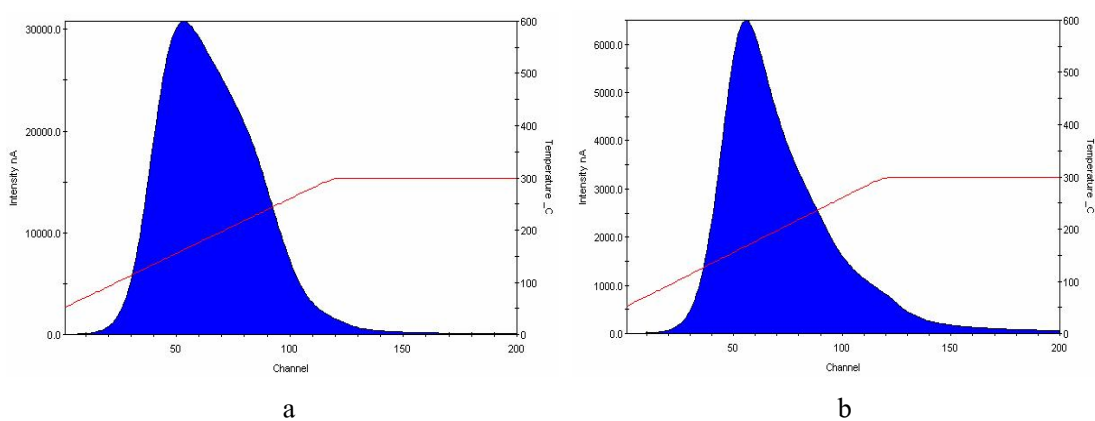
ในการฉายรังสีแกมมาด้วยเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 ได้ทำ dose mapping เพื่อวิเคราะห์การกระจายของปริมาณรังสีดูดกลืนภายใน container ตามขั้นตอนการฉายรังสี และตรวจวัดปริมาณรังสีดูดกลืนโดยใช้ Film dosimeter ซึ่งเปรียบเทียบกับ Fricke dosimeter (ตารางผนวกที่ 5)

4.1 การหาขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจสอบตัวอย่างกระเทียมผง

เมื่อนำตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมาสกัดแยกสารประกอบอินทรีย์แล้ววิเคราะห์สัญญาณ TL รวม 3 ซ้ำ พบว่า ลักษณะ glow curve ของตัวอย่างกระเทียมผงมีความคล้ายคลึงกับ glow curve ของตัวอย่าง feldspar (ภาพที่ 15 ถึง 16) จากนั้นได้คำนวณค่า TL ratio ในช่วง channel 1 ถึง 200, channel 29 ถึง 69 และ channel 29 ถึง 89 (ตารางที่ 9) พบว่า การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ 29 ถึง 89 ให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องทั้ง 3 ซ้ำ ในขณะที่การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 1 ถึง 200 มีผลการตรวจสอบ 1 ครั้ง ที่ให้ค่า TL ratio อยู่ในช่วงที่ยืนยันไม่ได้ (intermediate) หรือกล่าวได้ว่าการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ดังกล่าวให้ผลการตรวจสอบที่มีความผิดพลาดเป็นบางครั้ง ดังนั้น ในการทดลองขั้นต่อไปจึงได้นำขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ 29 ถึง 89 มาใช้ตรวจสอบการฉายรังสีของตัวอย่างกระเทียมผง



ภาพที่ 15 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของ feldspar (a) และตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (b) (initial temperature 50°C , final temperature 300°C , heating rate 6°C/s , acquisition time 70 s)



ภาพที่ 16 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของ feldspar (a) และตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี (b) (initial temperature 50°C , final temperature 300°C , heating rate 6°C/s , acquisition time 70 s)

ตารางที่ 9 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

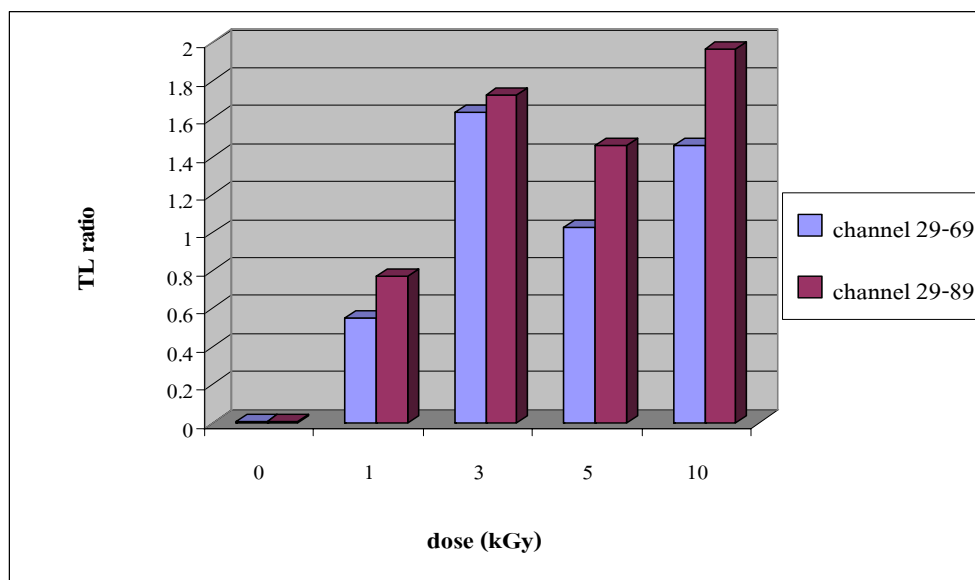
ช่วงการวิเคราะห์ สัญญาณ (channel)	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบการ ฉายรังสี
	G1	G2		
1 ถึง 200	83.43	1,029.00	0.0811	ไม่ฉายรังสี
	103.60	2,359.00	0.0439	ไม่ฉายรังสี
	54.77	218.70	0.2504	ยืนยันไม่ได้
29 ถึง 69	13.68	703.80	0.0194	ไม่ฉายรังสี
	16.32	1,491.00	0.0109	ไม่ฉายรังสี
	9.49	110.40	0.0859	ไม่ฉายรังสี
29 ถึง 89	20.03	881.90	0.0227	ไม่ฉายรังสี
	20.56	1,935.00	0.0106	ไม่ฉายรังสี
	12.06	142.30	0.0848	ไม่ฉายรังสี

4.2 ผลของปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose)

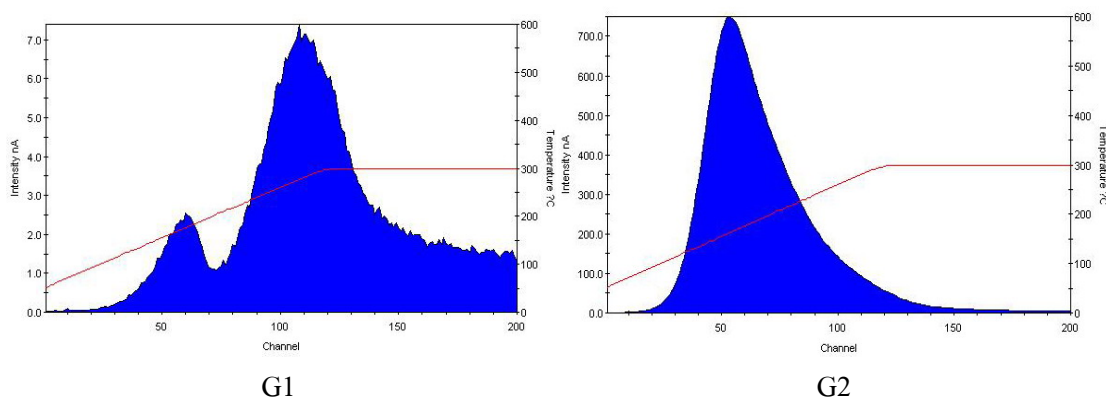
เมื่อนำตัวอย่างกระเทียมผงที่ฉายรังสีปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ มาแยกสารประกอบอินทรีย์โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นนำมาวัดสัญญาณ TL และคำนวณหา TL ratio ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ channel 29 ถึง 89 เพื่อศึกษาผลของปริมาณรังสีดูดกลืนต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเครื่องปรุรงสลายรังสี ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 10 และภาพที่ 17 พบว่า ค่า TL ratio ที่ได้มีค่าต่ำกว่า 0.1 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีและมีค่ามากกว่า 0.5 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี โดยที่ปริมาณรังสี 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ มีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 และเมื่อพิจารณาลักษณะของ glow curve ที่ได้จากตัวอย่างก่อน (G1) และหลังฉายรังสี reference dose (1 กิโลเกรย์) (G2) (ภาพที่ 18 ถึงภาพที่ 22) พบว่า G1 ที่ได้จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ มีลักษณะที่แตกต่างกัน G1 ของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีจะมี glow peak อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเมื่อเทียบกับตัวอย่างฉายรังสี สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี พบว่า glow peak ของ G1 และ G2 อยู่ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน แต่รูปร่างของ G1 จะมีลักษณะที่แตกต่างกันตามปริมาณรังสีที่ฉาย

ตารางที่ 10 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีที่เก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี

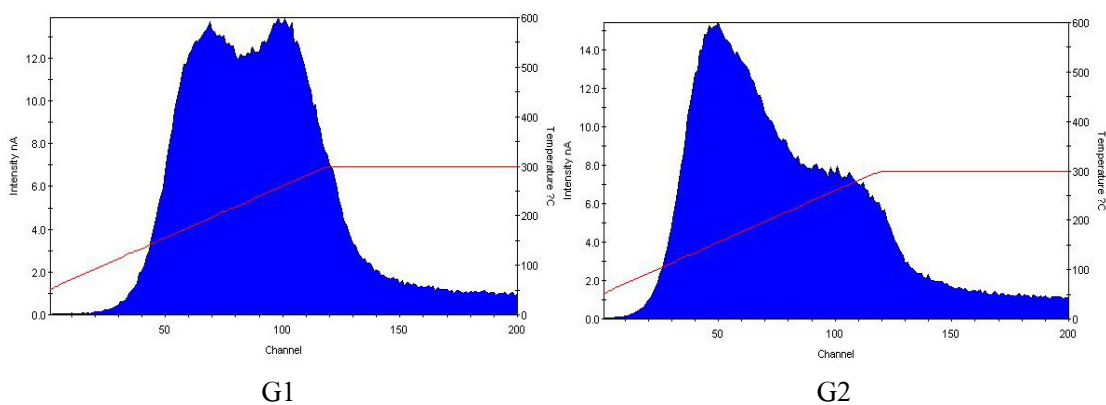
ช่วงการวิเคราะห์ สัญญาณ (channel)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2		
29 ถึง 69	0	18.89	7010.00	0.0027	ไม่ฉายรังสี
	1	96.12	174.80	0.5499	ฉายรังสี
	3	1,974.00	1,211.00	1.6301	ฉายรังสี
	5	8,645.00	8,405.00	1.0286	ฉายรังสี
	10	2,773.00	1,905.00	1.4556	ฉายรังสี
29 ถึง 89	0	31.64	9406.00	0.0034	ไม่ฉายรังสี
	1	184.00	238.30	0.7721	ฉายรังสี
	3	2838.00	1648.00	1.7221	ฉายรังสี
	5	19100.00	13090.00	1.4591	ฉายรังสี
	10	4542.00	2309.00	1.9671	ฉายรังสี



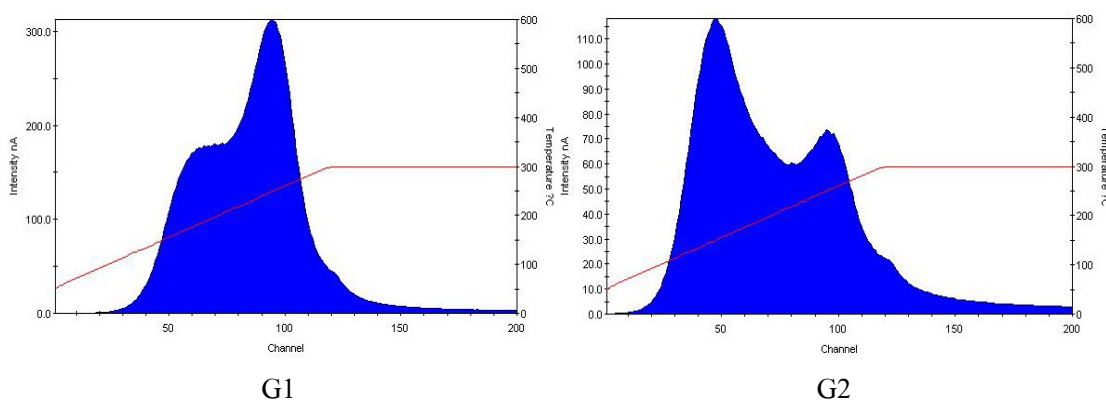
ภาพที่ 17 ค่า TL ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี เมื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ channel 29 ถึง 89



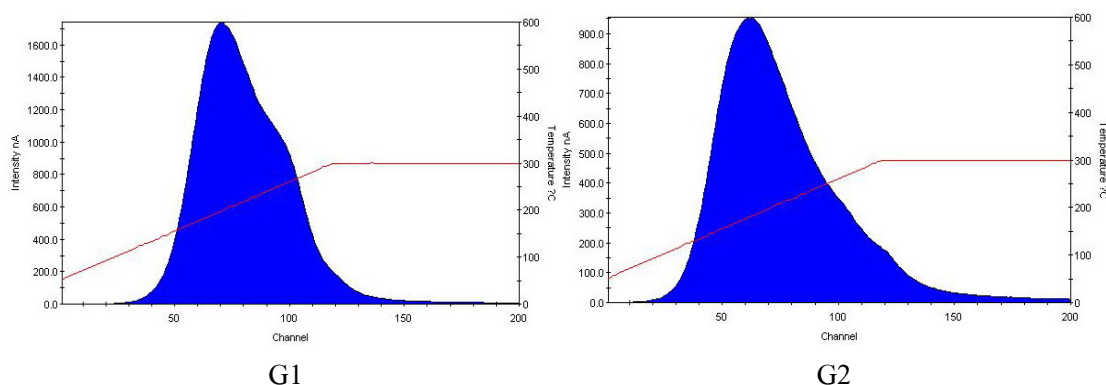
ภาพที่ 18 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของ ตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี



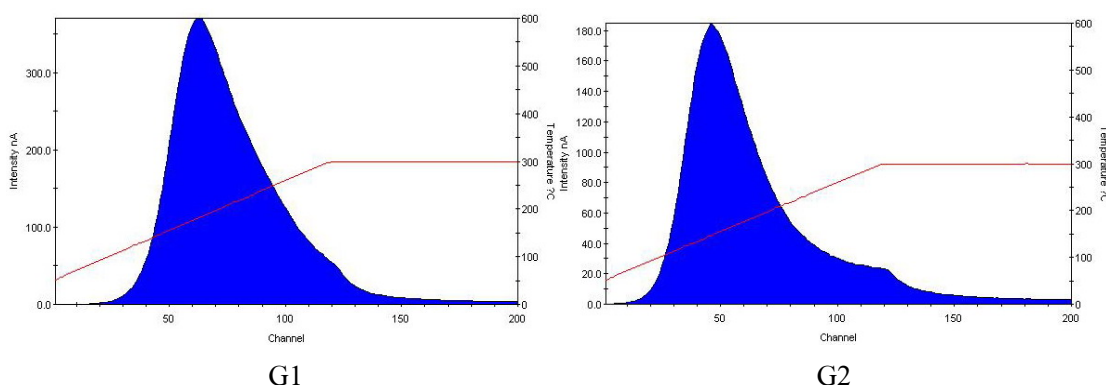
ภาพที่ 19 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของ ตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 20 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของ ตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 21 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของ ตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 5 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 22 ลักษณะ glow curve 1 (G1) และ glow curve 2 (G2) ของ ตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บไว้ในที่มืด 7 วัน หลังการฉายรังสี

4.3 ผลของเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี

เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ ในที่มืดเป็นเวลา 1, 7, 30 และ 90 วัน แล้ววิเคราะห์สัญญาณ TL โดยกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ 29 ถึง 89 และคำนวณค่า TL ratio เพื่อการจางหายของสัญญาณที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของตัวอย่างหลังการฉายรังสีได้ผลการทดลองดังตารางที่ 11 และ 12 พบว่า การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 ให้ผลการตรวจสอบการฉายรังสีที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่เก็บไว้นาน 1 และ 7 วัน ส่วนตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีที่เก็บไว้นาน 30 และ 90 วัน พบว่าไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบได้ในบางตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่ไม่สามารถยืนยันผลการตรวจสอบ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบซ้ำเพื่อยืนยันผล ในขณะที่การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 89 ให้ผลการตรวจสอบการฉายรังสีที่ถูกต้องทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาเก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสีมากขึ้นส่งผลต่อสัญญาณ TL ทำให้ glow curve 1

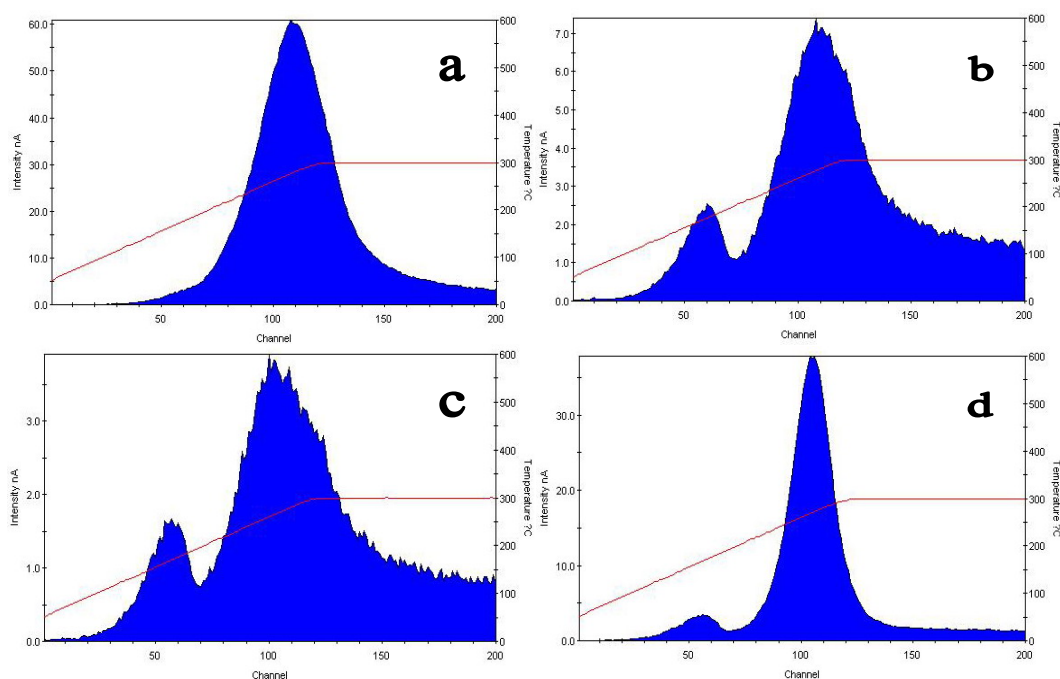
(G1) มีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 23 ถึง 27 และภาพผนวกที่ 1 ถึง 4 ดังนั้นการตรวจสอบการฉายรังสีจึงต้องพิจารณาถึงลักษณะของ G1 เพื่อกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณต่างๆ ที่เก็บรักษาไว้ที่เวลา 1, 7, 30 และ 90 วัน ได้แสดงไว้ในภาพผนวกที่ 5 ถึง 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีในช่วง channel 29 ถึง 69

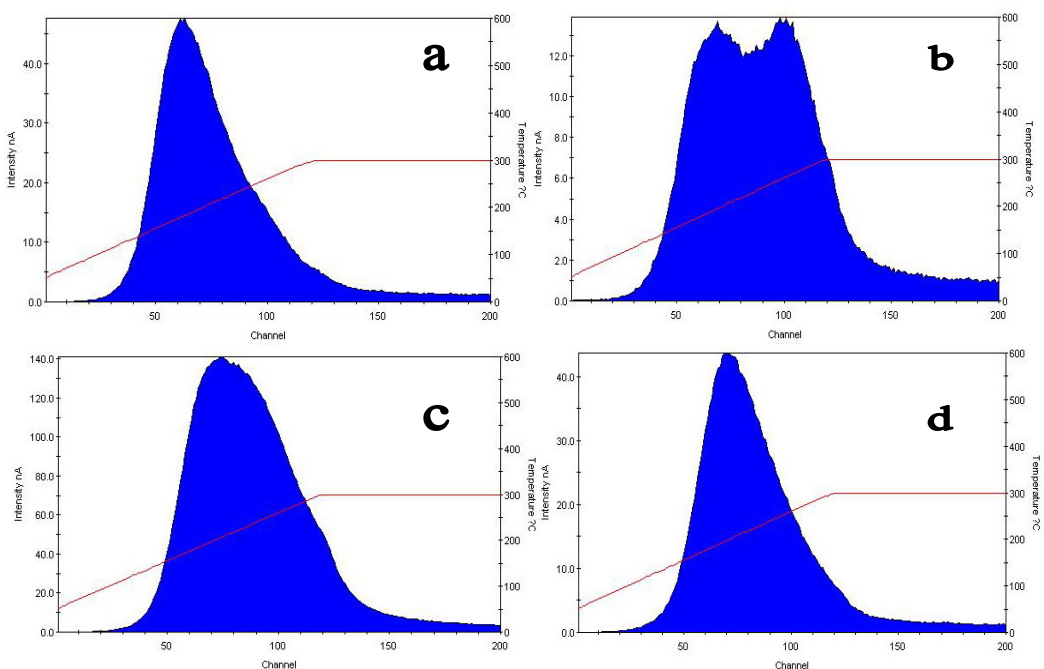
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	เวลาในการ เก็บรักษา ตัวอย่าง (วัน)	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2		
0	1	26.25	17,650.00	0.0015	ไม่ฉายรังสี
	7	18.89	7,010.00	0.0027	ไม่ฉายรังสี
	30	13.36	1,901.00	0.0070	ไม่ฉายรังสี
	90	27.15	1644.00	0.0165	ไม่ฉายรังสี
1	1	362.80	670.40	0.5412	ฉายรังสี
	7	96.12	174.80	0.5499	ฉายรังสี
	30	757.80	1,938.00	0.3910	ยืนยันไม่ได้
	90	235.70	579.80	0.4065	ยืนยันไม่ได้
3	1	3,289.00	3,555.00	0.9252	ฉายรังสี
	7	1,974.00	1,211.00	1.6300	ฉายรังสี
	30	797.70	843.80	0.9454	ฉายรังสี
	90	567.00	1,255.00	0.4518	ยืนยันไม่ได้
5	1	1,907.00	1,926.00	0.9901	ฉายรังสี
	7	8,645.00	8,405.00	1.0286	ฉายรังสี
	30	1,411.00	1,050.00	1.3438	ฉายรังสี
	90	234.00	365.90	0.6395	ฉายรังสี
10	1	7,419.00	4,079.00	1.8188	ฉายรังสี
	7	2,773.00	1,905.00	1.4556	ฉายรังสี
	30	6,032.00	2,903.00	2.0779	ฉายรังสี
	90	508.10	2,605.00	0.1950	ยืนยันไม่ได้

ตารางที่ 12 ค่า TL ratio ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีในช่วง channel 29 ถึง 89

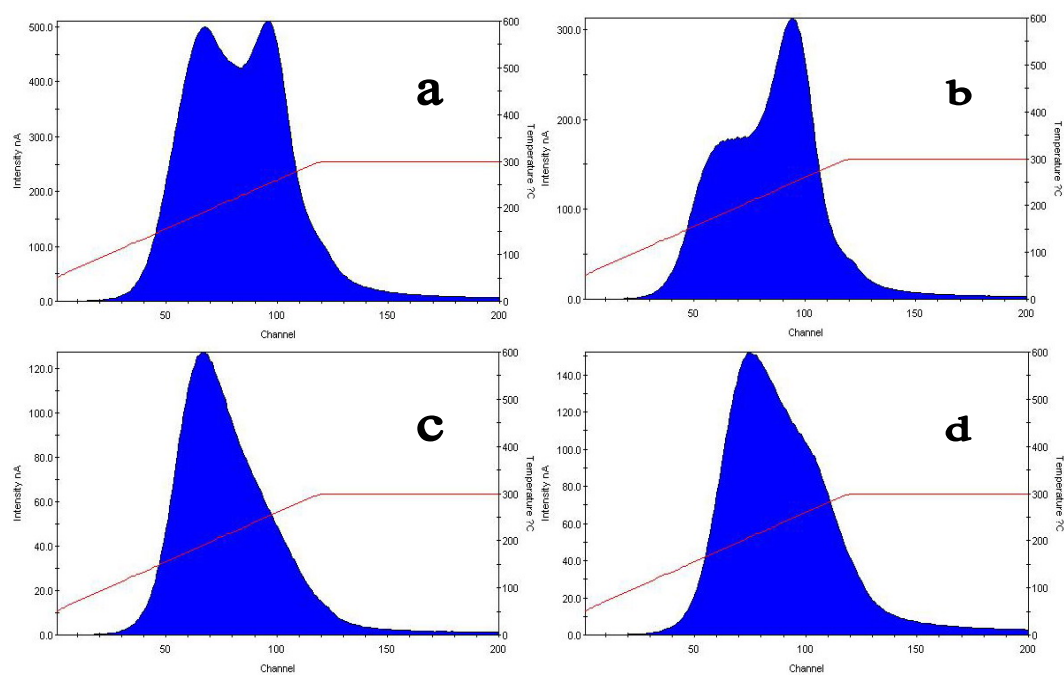
ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	เวลาในการ เก็บรักษา ตัวอย่าง (วัน)	ความเข้มของสัญญาณ (นาโนคูลอมป์)		TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
		G1	G2		
0	1	128.10	22,570.00	0.0057	ไม่ฉายรังสี
	7	31.64	9,406.00	0.0034	ไม่ฉายรังสี
	30	23.57	2,503.00	0.0094	ไม่ฉายรังสี
	90	55.09	2,021.00	0.0273	ไม่ฉายรังสี
1	1	582.20	796.80	0.7307	ฉายรังสี
	7	184.00	238.30	0.7721	ฉายรังสี
	30	1,712.00	2,523.00	0.6786	ฉายรังสี
	90	498.90	747.50	0.6674	ฉายรังสี
3	1	6,426.00	5,157.00	1.2461	ฉายรังสี
	7	2,838.00	1,648.00	1.7221	ฉายรังสี
	30	1,481.00	1,099.00	1.3476	ฉายรังสี
	90	1,565.00	1,733.00	0.9031	ฉายรังสี
5	1	3,266.00	2,414.00	1.3529	ฉายรังสี
	7	19,100.00	13,090.00	1.4591	ฉายรังสี
	30	3,498.00	1,649.00	2.1213	ฉายรังสี
	90	627.40	537.80	1.1666	ฉายรังสี
10	1	16,490.00	5,767.00	2.8594	ฉายรังสี
	7	4,542.00	2,309.00	1.9671	ฉายรังสี
	30	12,420.00	4,115.00	3.0182	ฉายรังสี
	90	2,090.00	3,536.00	0.5911	ฉายรังสี



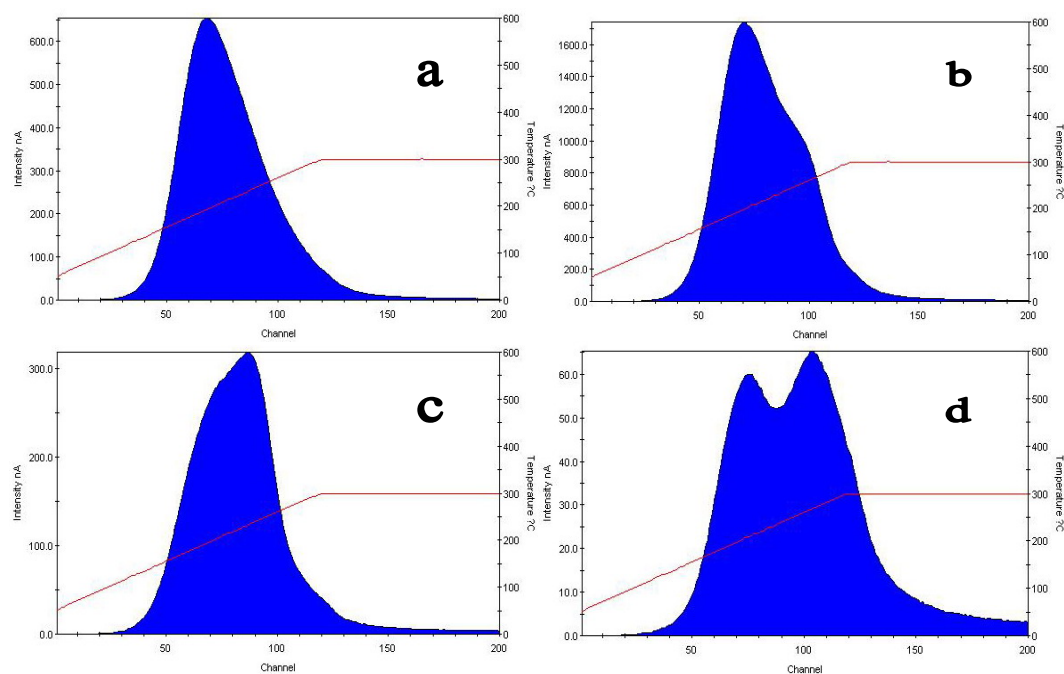
ภาพที่ 23 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี



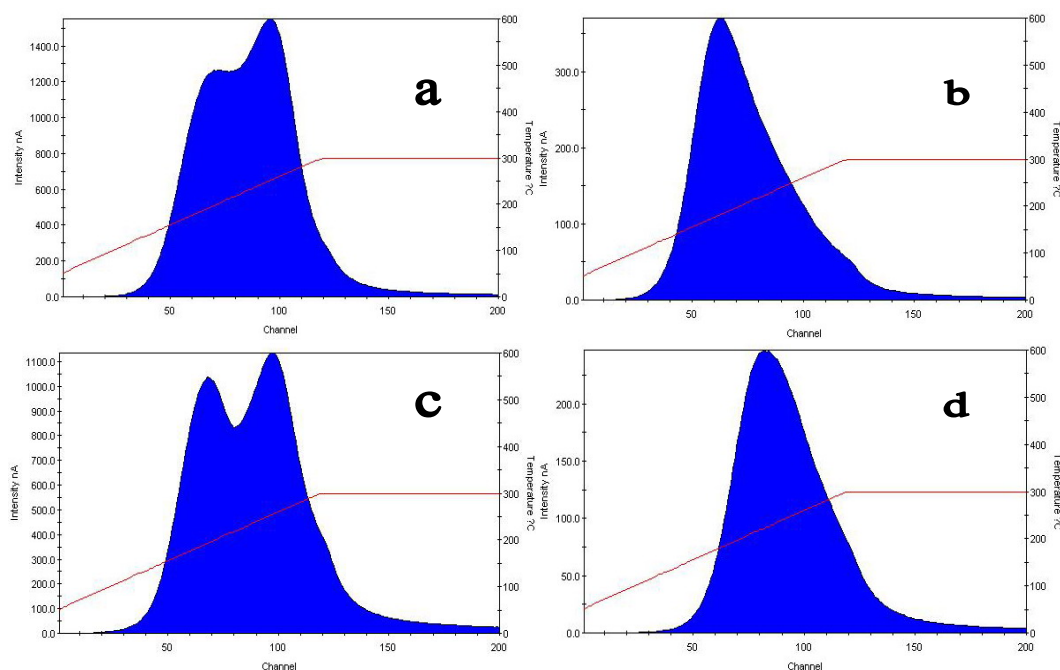
ภาพที่ 24 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 25 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลกรัม เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 26 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 5 กิโลกรัม เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี



ภาพที่ 27 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์ เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 (a), 7 (b), 30 (c) และ 90 วัน (d) หลังการฉายรังสี

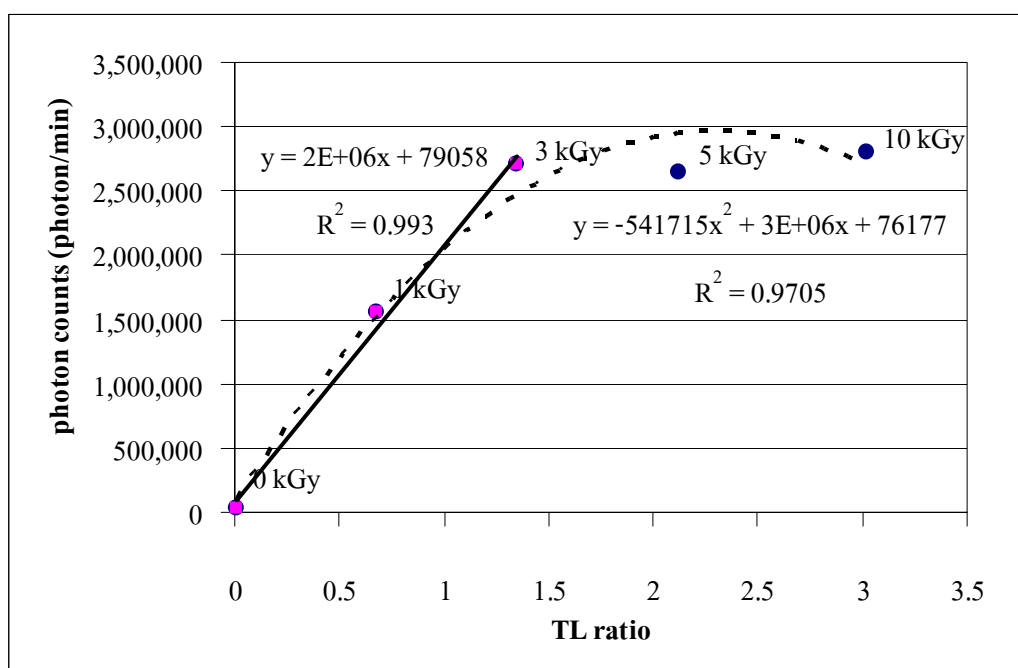
5. การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีระหว่างเทคนิค TL กับเทคนิค PSL

เมื่อนำตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์ มาตรวจสอบด้วยเครื่อง PSL screening เปรียบเทียบกับเทคนิค TL ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 13 พบว่า ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง PSL screening มีความผิดพลาดในตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยให้ค่าสัญญาณ PSL มากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาทีก่อน ในขณะที่เทคนิค TL สามารถตรวจสอบตัวอย่างดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์สัญญาณ PSL และ TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	เทคนิค PSL		เทคนิค TL (channel 29 ถึง 89)	
	จำนวนโฟตอน ต่อนาที	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี	TL ratio (G1/G2)	ผลการตรวจสอบ การฉายรังสี
0	32,919	ฉายรังสี	0.0094	ไม่ฉายรังสี
1	1,561,563	ฉายรังสี	0.6786	ฉายรังสี
3	2,700,486	ฉายรังสี	1.3476	ฉายรังสี
5	2,643,083	ฉายรังสี	2.1213	ฉายรังสี
10	2,800,384	ฉายรังสี	3.0182	ฉายรังสี

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสี ระหว่างเทคนิค PSL กับเทคนิค TL ดังภาพที่ 28 พบว่า เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิค PSL กับเทคนิค TL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ จะเป็นแบบพหุนามมากกว่าเชิงเส้น ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ $y = -541715x^2 + 3E+06x + 76177$ เมื่อ y คือ ค่า photon counts และ x คือ ค่า TL ratio และในช่วงปริมาณรังสี 0 ถึง 3 กิโลเกรย์ เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ $y = 2E+06x + 79058$ เมื่อ y คือ ค่า photon counts และ x คือ ค่า TL ratio สรุปได้ว่า ค่าสัญญาณ PSL ของตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีปริมาณ 3 ถึง 10 กิโลเกรย์ อยู่ในช่วง 2,600,000 ถึง 2,800,000 โฟตอนต่อนาที ซึ่งไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่ฉายรังสีในช่วง 3 ถึง 10 กิโลเกรย์ ได้ ในขณะที่ ค่า TL ratio ที่ได้จากตัวอย่างที่ฉายรังสีในช่วงปริมาณรังสีดังกล่าว มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า photon counts ของเทคนิค PSL กับค่า TL ratio ของเทคนิค TL ที่ได้จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสี 0 ถึง 3 กิโลเกรย์ (เส้นทึบ) และ 0 ถึง 10 กิโลเกรย์ (เส้นประ)

วิจารณ์

1. การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDXRF

เมื่อวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสม พบว่ามีธาตุโซเดียม อะลูมิเนียม โพแทสเซียมและแคลเซียม ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบสำคัญของซีลีเกต ซึ่งสามารถสกัดออกจากตัวอย่างเครื่องปรุงรสได้โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น (density gradient separation) และสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ได้ ทั้งนี้ซีลีเกตที่สามารถนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิค TL ได้คือ ซีลีเกตในกลุ่มของ quartz, feldspar และ zeolite ซึ่งธาตุธรรมชาติจะมีโครงสร้างอยู่ในรูป Tectosilicates หรือ $[Al_xSi_yO_{2(x+y)}]^{x-}$

2. การสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ออกจากตัวอย่างสำหรับตรวจสอบด้วยเทคนิค TL

เมื่อใช้น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น 30 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 0.2 มิลลิกรัม จนถึง 2 มิลลิกรัม ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL ทั้งนี้ ได้มีข้อกำหนดในเรื่องน้ำหนักของสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL ในวิธีมาตรฐาน EN-1788 โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 5 มิลลิกรัม สำหรับน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้นจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์แตกต่างกัน เช่น การทดลองของ D'Oca *et al.* (2006) ซึ่งใช้ตัวอย่างผง oregano เริ่มต้นเพียง 15 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ได้น้ำหนักอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 มิลลิกรัม ส่วน Engin (2005) ต้องใช้ตัวอย่างพริกไทยดำสูงถึง 400 กรัม ในการสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณ TL เป็นต้น

3. การเลือกเวลาที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL

3.1 การตั้งค่าในการวิเคราะห์ของเครื่องอ่านสัญญาณ TL ได้พิจารณาจากลักษณะของ glow curve พบว่า การปรับค่าในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที และใช้เวลาในการวัดนาน 70 วินาที สำหรับงานวิจัยอื่นๆ จะมีการปรับค่าในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน เช่น Bayrem และ Delincée (2004) ได้ใช้ อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที Khan *et al.* (2002)

ใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และ D'Oca *et al.* (2006) ได้ใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด 400 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมในการศึกษาครั้งนี้มี glow curve ที่ลักษณะคล้ายกับ glow curve ของ feldspar และมีค่ากระแสสูงสุดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับ feldspar (Soika และ Delincée, 2000)

3.2 ตัวอย่างสารประกอบอนินทรีย์ที่ยังไม่ฉายรังสีมีปริมาณกระแสรวมต่ำและ glow curve อยู่ในช่วง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยมีค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ 270 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างสารประกอบอนินทรีย์ที่ฉายรังสีจะมีปริมาณกระแสรวมสูงและ glow curve อยู่ในช่วง 110 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยมีค่ากระแสสูงสุดอยู่ที่ 153 องศาเซลเซียส ลักษณะของ glow curve มีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้ และตำแหน่งของ glow curve ที่ได้จากตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสีจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าตัวอย่างที่ฉายรังสี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Chung *et al.* (2004) ที่ได้ศึกษาสัญญาณ TL ของสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จาก chestnut (*Castanea bungena*) พบว่า glow curve ของตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสีอยู่ที่ประมาณ 277 องศาเซลเซียส ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมี glow curve อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำลงคือ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส

3.3 เมื่อทดลองตรวจวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยพิจารณาจากค่า TL ratio พบว่า ทุกตัวอย่างให้ค่า TL ratio น้อยกว่า 0.1 ให้ผลการตรวจสอบว่าไม่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริง โดยค่า TL ratio ที่ได้ในช่วงระหว่าง 0.0203 ถึง 0.0004 เช่นเดียวกับการทดลองของ Khan และ Bhatti (2007) ที่ทดลองตรวจสอบการฉายรังสีผลิตภัณฑ์ประเภทข้าวและข้าวสาลีด้วยเทคนิค TL พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี มีค่า TL ratio 0.056 และ 0.015 ซึ่งน้อยกว่า 0.1 และ Cutrubinis *et al.* (2007) ได้ศึกษาการตรวจสอบอาหารฉายรังสีจากตลาดในประเทศโรมาเนีย พบว่าอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 0.0085 ถึง 0.0733 นอกจากนี้ยังพบว่า การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์มีผลต่อค่า TL ratio ซึ่งขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 89 จะให้ค่า TL ratio ต่ำที่สุด ในขณะที่ channel 1 ถึง 200 จะมีค่า TL ratio มากที่สุด

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสี

4.1 ขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจสอบตัวอย่างกระเทียมผง

จากการทดลองนำตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมาสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์แล้ววิเคราะห์สัญญาณ TL และคำนวณหา TL ratio พบว่า ขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 69 และ 29 ถึง 89 สามารถตรวจสอบตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีได้อย่างถูกต้อง แต่ขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 1 ถึง 200 ให้ค่า TL ratio อยู่ในช่วง intermediate ในบางซ้ำ จึงสามารถสรุปได้ว่าการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเครื่องปรุงรสฉายรังสี

4.2 ผลของปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose)

เมื่อทำการวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างกระเทียมผง พบว่า ค่า TL ratio ที่ได้มีค่าต่ำกว่า 0.1 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีและมีค่ามากกว่า 0.5 สำหรับตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสี โดยเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นค่า TL ratio ก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปด้วย โดยที่ปริมาณรังสี 3, 5 และ 10 กิโลเกรย์จะมีค่า TL ratio อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีมีผลต่อปริมาณกระแสรวม โดยเฉพาะปริมาณกระแสรวมของ glow curve 1 (G1) และพบว่าที่ปริมาณรังสี 5 กิโลเกรย์ ค่า TL intensity ของ G1 และ G2 และค่า TL ratio มีค่าต่ำกว่าที่ปริมาณรังสี 3 กิโลเกรย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในความเป็นจริงสัญญาณ TL นอกจากจะขึ้นกับปริมาณรังสีอาจขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง ที่มีผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดได้หรือลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่าง (Pinnioja *et al.*, 1999) เนื่องจากลักษณะของ glow curve มีความแตกต่างกัน การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์จึงทำได้ยาก ลักษณะของ glow curve ที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่า จำนวนของ trap ที่ระดับพลังงานต่างๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นกับปัจจัยด้านองค์ประกอบภายในของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดได้จากตัวอย่าง โดย Pinnioja *et al.* (1999) ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบของ feldspar ต่อความเข้มของสัญญาณ TL จากสารประกอบอนินทรีย์ที่แยกได้จากอาหาร พบว่า TL intensity มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายใน เช่น ปริมาณ FeO หรือ CaO/Na₂O ratio เป็นต้น

4.3 เวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี

จากการตรวจวัดสัญญาณ TL จากตัวอย่างกระเทียมผงฉายรังสีภายหลังจากการเก็บรักษาในที่มืดเป็นเวลา 1, 7, 30 และ 90 วัน พบว่า การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ในช่วง channel 29 ถึง 89 สามารถตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีได้ถูกต้องทั้งหมดแม้เก็บไว้นาน 90 วัน ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่สามารถใช้เทคนิค TL ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีที่เก็บไว้เป็นเวลานานได้อย่างถูกต้อง เช่น D'Oca *et al.* (2006) พบว่า เทคนิค TL สามารถตรวจสอบ oregano ฉายรังสีที่เก็บไว้นาน 7 เดือน Villavicencio *et al.* (1998) ตรวจสอบผลของการฉายรังสีของตัวอย่างถั่วบราซิลหลังจากเก็บไว้นาน 6 เดือน พบว่า เทคนิค TL สามารถให้ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องและ Malec-Czechowska *et al.* (2003) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีของตัวอย่างเห็ดอบแห้ง พบว่า ผลการตรวจสอบการฉายรังสีด้วยเทคนิค TL มีความถูกต้องแม่นยำแม้เก็บตัวอย่างไว้นาน 8 เดือน

5. การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบกระเทียมผงฉายรังสีระหว่างเทคนิค TL กับเทคนิค PSL

ในการตรวจสอบการฉายรังสีของตัวอย่างกระเทียมผงด้วยเทคนิค PSL พบว่า ค่าสัญญาณ PSL ที่ได้จากตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีมีค่ามากกว่า 5,000 โฟตอนต่อนาฬิกา โดยแปลผลว่าเป็นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งไม่ถูกต้อง ทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Chung *et al.* (2002) ซึ่งได้ศึกษาการตรวจสอบตัวอย่างอาหารฉายรังสีจำพวกปลาแอนโชวีแห้งและกุ้ง ด้วยเทคนิค PSL พบว่า ตัวอย่างอาหารประเภทกุ้งที่ไม่ผ่านการฉายรังสีให้สัญญาณ PSL อยู่ในช่วง 700 ถึง 5000 โฟตอนต่อนาฬิกา ซึ่งไม่สามารถยืนยันได้ว่าเป็นตัวอย่างอาหารฉายรังสีหรือไม่ จำเป็นต้องยืนยันผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคอื่น Bhatti *et al.* (2008) ได้ศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีของผลิตภัณฑ์ประเภทไข่ด้วยเทคนิค PSL และเทคนิค TL พบว่า ตัวอย่างฉายรังสีบางตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่เก็บไว้นาน 6 เดือน คำนับโฟตอนมีค่าอยู่ในช่วง 700 ถึง 5000 โฟตอนต่อนาฬิกา ซึ่งไม่สามารถยืนยันผลได้ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค PSL นั้นเป็นการตรวจวัดสัญญาณที่ได้จากตัวอย่างโดยตรงจากบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างภายใน Petri-dish สำหรับใส่ตัวอย่าง การตรวจวัดสัญญาณดังกล่าว อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ถ้าตัวอย่งนั้นมีปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ปนอยู่ในปริมาณมาก แต่สำหรับเทคนิค TL นั้นปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์จะมีผลต่อลักษณะของ glow curve เท่านั้น แต่จะไม่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบ ดังนั้นเทคนิค TL จึงเป็นเทคนิคที่นำมาช่วยยืนยันผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค PSL ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในกรณีที่มีการตรวจสอบเบื้องต้นด้วย PSL ให้ผลที่ไม่ชัดเจน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการนำเทคนิค TL มาใช้ในการตรวจสอบเครื่องปรุรงรสนายรังสี โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องและเปรียบเทียบผลการตรวจสอบกับเทคนิค PSL สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างตามวิธีมาตรฐานของ EN-1788 โดยปรับให้มีความเหมาะสมกับตัวอย่างประเภทเครื่องปรุรงรสน พบว่า ตัวอย่างเครื่องปรุรงรสนหนัก 30 กรัม สามารถสกัดแยกสารประกอบอนินทรีย์ได้ประมาณ 0.2 ถึง 2 มิลลิกรัม ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์สัญญาณ TL
2. การเพิ่มเวลาในการวัดมีผลทำให้ลักษณะของ glow curve มีความสมบูรณ์มากขึ้น สามารถกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ได้ครอบคลุม glow curve ทั้งหมด สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกค่าในการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อวินาที และใช้เวลาในการวัดนาน 70 วินาที
3. ลักษณะของ glow curve ที่ได้จากตัวอย่างเครื่องปรุรงรสนมีลักษณะคล้ายกับ glow curve ที่ได้จาก feldspar ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า สารประกอบอนินทรีย์ในตัวอย่างเครื่องปรุรงรสนผสมอยู่ในรูป feldspar เป็นส่วนใหญ่
4. สารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ผ่านการฉายรังสีจะมีปริมาณกระแสรวมต่ำและ glow curve อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าสารประกอบอนินทรีย์ที่ผ่านการฉายรังสี และปริมาณกระแสรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ตัวอย่างได้รับเพิ่มขึ้น
5. การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญยิ่งต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเครื่องปรุรงรสนายรังสี ดังนั้น ในการตรวจสอบการฉายรังสีของเครื่องปรุรงรสนแต่ละประเภทจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาขอบเขตการวิเคราะห์ที่เหมาะสมก่อน

6. ปริมาณรังสีที่ตัวอย่างเครื่องปรุรงสได้รับมีผลต่อปริมาณกระแสรวม ค่า TL ratio รวมทั้งการแปรผลการตรวจสอบ นอกจากนี้องค์ประกอบและปริมาณของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่างก็มีผลต่อปริมาณกระแสรวมและค่า TL ratio ด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องในการตรวจสอบว่าเป็นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีหรือไม่

7. ในการวิเคราะห์ตัวอย่างว่าเป็นตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีหรือไม่นั้น จำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลอื่นร่วมด้วย นอกเหนือจากค่า TL ratio ได้แก่ ลักษณะของ glow curve 1 (G1) และช่วงอุณหภูมิของ glow peak เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อลักษณะของ glow curve เช่น เวลาหลังการฉายรังสี ปริมาณรังสีดูดกลืน ปริมาณและองค์ประกอบของสารประกอบอนินทรีย์ที่สกัดแยกได้จากตัวอย่าง เป็นต้น

8. ระยะเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างหลังจากฉายรังสีในช่วง 1 ถึง 90 วัน มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเพียงเล็กน้อย โดยการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ที่มีความเหมาะสมจะสามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี สำหรับงานวิจัยนี้ขอบเขตในการวิเคราะห์ที่สามารถนำมาตรวจสอบได้ถูกต้องตัวอย่างเครื่องปรุรงสกระเทียมผงฉายรังสีอยู่ในช่วง channel 29 ถึง 89

9. เทคนิค PSL เป็นเทคนิคที่มีความรวดเร็วแต่ผลการตรวจสอบมีความผิดพลาดได้ง่าย โดยเฉพาะในกรณีที่มีตัวอย่างมีองค์ประกอบของสารประกอบอนินทรีย์ปะปนอยู่มากหรือหลายชนิด และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเทคนิค TL เป็นเทคนิคที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า แม้จะต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบยาวนานกว่า เทคนิค TL จึงเหมาะสมกับการใช้ยืนยันผลการตรวจสอบได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบการฉายรังสีอาหารด้วยเทคนิค TL เป็นการตรวจสอบที่ให้ผลถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งได้มีการศึกษาและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยการนำเทคนิค TL มาใช้ยังเป็นเรื่องใหม่และจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมกับตัวอย่างอาหารอีกหลายชนิด โดยเฉพาะอาหารส่งออกของประเทศ ซึ่งยังสามารถพัฒนาและศึกษาเพิ่มเติมได้หลายเรื่อง เช่น

1. การตรวจสอบในเชิงปริมาณ เพื่อให้ทราบปริมาณรังสีที่ตัวอย่างอาหารได้รับ
2. การศึกษาผลของการเพิ่มเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังจากฉายรังสี
3. การศึกษาการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TL โดยการทำให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เช่น การบดตัวอย่างให้ละเอียดก่อนการสกัดแยก เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความคงที่
4. การศึกษาการลดต้นทุนการเตรียมตัวอย่าง โดยใช้สารเคมีที่มีราคาถูกกว่า sodium polytungstate
5. การศึกษาโครงสร้างและประเภทของสารประกอบอินทรีย์ที่พบในตัวอย่างอาหารภายในประเทศ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการอื่น
6. การศึกษาขีดจำกัดในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค TL

นอกจากนี้ในการทดลองยังจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความผิดพลาดจากการปนเปื้อนของฝุ่น (contaminating dust) ในขณะเตรียมตัวอย่างซึ่งทำให้ค่า TL intensity ของ G2 มีค่าสูง ส่งผลให้ค่า TL ratio มีค่าลดลง และแปรผลการวิเคราะห์ผิดพลาด โดยการตรวจสอบการปนเปื้อนของฝุ่นสามารถทำได้โดยการทำ full process blank ซึ่งถ้า TL intensity ของ G2 (หลังจากฉายรังสี 1 กิโลเกรย์) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่มีตัวอย่างมีค่ามากกว่า 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย TL intensity ของ G1 จะถือว่าแผ่นอะลูมิเนียมนั้นมีการปนเปื้อนเกิดขึ้น ซึ่งการศึกษาเพิ่มเติมที่กล่าวมาข้างต้น จะนำไปสู่การพัฒนาเป็นวิธีการมาตรฐานสำหรับตรวจสอบอาหารที่ผลิตภายในประเทศต่อไปในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สำนักนายกรัฐมนตรี. 2549. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 123 ตอนพิเศษ 93 ง หน้า 12-15 เรื่อง “อาหารฉายรังสี” ลงวันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2549. สำนักพิมพ์ คณะรัฐมนตรีและราชกิจจานุเบกษา, กรุงเทพฯ.

กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2548. มาตรการอาหารฉายรังสีของ สหภาพยุโรป. สารานุกรมสำหรับผู้ประกอบการ. แหล่งที่มา: <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/food/saranaroo/XrayFood.pdf>, 11 มีนาคม 2551.

โกวิท นุชประมุล. 2550. การปรับปรุงความปลอดภัยของอาหารด้านจุลินทรีย์ด้วยรังสี. แหล่ง เรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003m.html>, 11 มีนาคม 2551.

บริษัท iWISDOM จำกัด. 2550. USFDA ผ่อนผันโลโก้อาหารฉายรังสี. แหล่งที่มา: http://www.wisdomvalue.com/v1/index.php?option=com_content&task=view&id=350&Itemid=308, 11 มีนาคม 2551.

ยุทธพงศ์ ประชาสิทธิศักดิ์. 2550. กฎหมายอาหารฉายรังสีของประเทศไทย. แหล่งเรียนรู้ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc-index50.html>, 11 มีนาคม 2551.

ศิริวรรณ บุรีคำ. 2548. การตรวจสอบความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี. วารสารข่าวศูนย์ ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง 19 (2): 5-7

เสาวพงศ์ เจริญและสุรศักดิ์ สัจจบุตร. 2550. รู้ได้อย่างไรว่าอาหารนี้ผ่านการฉายรังสีแล้วหรือยัง. แหล่งเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5002/nkc5002y.html>, 11 มีนาคม 2551.

- 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 photostimulated luminescence and thermoluminescence. **Food Control**. 19: 587-591.
- Bøtter-Jensen, L. 1997. Luminescence techniques: instrumentation and methods. **Radiat. Meas.** 17: 749-768.
- Chung, H.W., H. Delincée and J.H. Kwon. 2002. The application of different detection methods for irradiated dried anchovy and shrimp. **Radiat. Phys. Chem.** 63: 411-414.
- Chung, H.W., H. Delincée, 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.
- Cutrubinis M., D. Chirita, D. Savu, C. E. Secu, R. Mihai, M. Secu and C. Ponta. 2007. Preliminary study on detection of irradiated foodstuffs from the Romanian market. **Radiat. Phys. Chem.** 76: 1450-1454.
- Delincée, H. 2002. Analytical methods to identify irradiated food-a review. **Radiat. Phys. Chem.** 63: 455-458.
- D'Oca, M.C. 2007. Qualitative and quantitative thermoluminescence analysis on irradiated oregano. **Food Control**. 18: 996-1001.
- Elahi, S., I. Straub, K. Thurlow, P. Farnell and M. Walker. 2008. Referee analysis of suspected irradiated food. **Food Control**. 19: 269-277.

- Engin, B. 2007. Thermoluminescence parameters and kinetics of irradiated inorganic dust collected from black peppers. **Food Control**. 18:243-250.
- European Standard EN 13751. 2002. **Foodstuffs — Detection of irradiated food using photostimulated luminescence**. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- European Standard EN 1788. 2001. **Foodstuffs — Thermoluminescence Detection of Irradiated Food from Which Silicate Minerals can be Isolated**. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Greening, J. R. 1981. **Fundamentals of radiation dosimetry**. The Institute of Physics. Adam Hilger Ltd, Techno House, Redcliffe Way, Bristol BS1 6NX.
- IAEA. 2002. New approvals of irradiated foods. **Food and Environmental Protection**. Available Source: <http://www.iaea.org/programmes/nafa/d5/public/newsletter-jan02.pdf>, May 20, 2006.
- Jacques, R. 1998. Identifying irradiated foods. **Trends in analytical chemistry**. 14: 226-233.
- Khan, H.M. and I.A. Bhatti. 2007. Identification of radiation treatment of wheat (*Triticum aestivum*. L) and rice (*Oryza sativa* L) samples using thermoluminescence of contaminateing minerals. **Nuclear Science and Technique**. 18: 26-29.
- Khan, H.M., I.A. Bhatti and H. Delincée. 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.

- Kwon, J.H., H.W. Chung, M.W. Byun and I.J. Kang. 1998. Thermoluminescence detection of Korean traditional foods exposed to gamma and electron-beam irradiation. **Radiat. Phys. Chem.** 52: 151-156.
- Malec-Czechowska, K., G. Strzelczak, A.M. Dancewicz, W. Stachowicz and H. Delincee. 2002. Detection of irradiation treatment in dried mushrooms by photostimulated luminescence, ESR spectroscopy and thermoluminescence measurements. **Eur. Food Res. Technol.** 216:157-165.
- Mckinlay, A.F. 1981. **Thermoluminescence Dosimetry**. Adam Hilger, Bristol, England.
- Meier, W. 1991. Analysis of Irradiated Food. **Mikrochim. Acta.** 2: 71-79.
- Pinnioja, S., M. Siitari-Kauppi and A. Lindberg. 1999. Effect of feldspar composition on thermoluminescence in minerals separated from food. **Radiat. Phys. Chem.** 54: 505-516.
- Rosenthal, I. 1992. **Electromagnetic radiations in Food Science**. Springer Verlag, Berlin.
- Satin, M. 1993. **Food Irradiation a guidebook**. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, PA.
- 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.

Villavicencio, A.L.C.H., J. Mancini-Filho and H. Delincée. 1998. Application of different techniques to identify the effects of irradiation on Brazilian beans after six months storage. **Radiat. Phys. Chem.** 52: 161-166.

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

Ziegelmann, B., K.W. Bogl and G.A. Schreiber. 1999. TL and ESR signals of mollusk shells- correlations and suitability for the detection of irradiated foods. **Radiat. Phys. Chem.** 54: 413-423.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 รายการสินค้าเกษตรที่ได้รับอนุญาตให้จำหน่ายได้ในประเทศสมาชิก EC
(บางประเทศ)

รายการสินค้า	ประเทศสมาชิก EC (บางประเทศ)				
	เบลเยียม (BE)	ฝรั่งเศส (FR)	อิตาลี (IT)	เนเธอร์แลนด์ (NL)	อังกฤษ (UK)
1. สมุนไพรแห้ง เครื่องเทศ และ เครื่องปรุงรส	*ประเทศสมาชิก EC (ทุกประเทศ)				
2. สมุนไพรแช่แข็ง		/			
3. มันฝรั่ง	/		/		/
4. แยม					/
5. หอมหัวใหญ่	/	/	/		/
6. กระเทียม	/	/	/		/
7. หอมแดง	/	/			/
8. ผักรวมทั้งถั่ว					/
9. ถั่ว				/	
10. ผลไม้รวมทั้งเห็ด มะเขือเทศ และรูบาร์บ					/
11. ผักและผลไม้แห้ง		/		/	
12. ธัญพืช					/
13. ผักชีนึ่งและต้นอ่อนธัญพืช สำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์นม		/			
14. ธัญพืชชั้นเล็ก ๆ				/	
15. แป้งข้าวเจ้า		/			
16. กัมอะราบิก (Gum Arabic)		/		/	
17. เนื้อมะพร้าว				/	
18. สัตว์ปีก		/			
19. สัตว์ปีกได้แก่ สัตว์ปีก พื้นเมือง ห่าน เป็ด ไก่ต๊อก นกพิราบ นกกระทา และไก่ทอง					/

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

รายการสินค้า	ประเทศสมาชิก EC (บางประเทศ)				
	เบลเยียม (BE)	ฝรั่งเศส (FR)	อิตาลี (IT)	เนเธอร์แลนด์ (NL)	อังกฤษ (UK)
20. ไก่ชำแหละ		/			
21. ซากไก่ (Offal of chicken)		/			
22. ขากบแช่แข็ง (Frozen frog legs)	/	/		/	
23. เลือดแห้ง (Dehydrated blood plasma, coagulates)		/			
24. ปลาและสัตว์น้ำมีเปลือก เช่น กุ้ง ปู หอย รวมปลาไหล					/
25. กุ้งปอกเปลือกตัดหัวแช่เย็นจนแข็ง	/	/			
26. กุ้ง				/	
27. ไข่ขาว		/		/	
28. โปรตีนจากนม (Casein, caseinates)		/			

ที่มา: กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (2548)

ตารางผนวกที่ 2 ผลวิเคราะห์การหาองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุงรสผสมรหัส 101A3D

ธาตุ องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (ppm)				RSD	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD		
โซเดียม	2321.65	2306.01	2400.84	2342.83 ± 50.84	2.17	11.56
แมกนีเซียม	781.09	821.32	756.84	786.42 ± 32.57	4.14	-18.08
อะลูมิเนียม	1.51	1.62	1.48	1.54 ± 0.07	4.54	-9.61
กำมะถัน	5937.43	5380.92	6233.13	5850.49 ± 432.70	7.40	-26.41
โพแทสเซียม	9314.68	10592.89	8189.78	9365.78 ± 1202.37	12.84	-38.26
แคลเซียม	167.72	159.36	156.39	161.16 ± 5.87	3.64	11.14
เหล็ก	69.97	65.49	68.55	68.00 ± 2.29	3.37	-4.49
ฟอสฟอรัส	5612.23	6448.97	5325.99	5795.73 ± 583.54	10.07	-30.67
คลอรีน	1593.52	1670.19	1591.25	1618.32 ± 80.99	5.00	-13.92
นิกเกิล	0.04	0.05	0.04	0.04 ± 0.01	13.95	-13.33
ทองแดง	3.28	3.53	3.12	3.31 ± 0.21	6.34	16.55
แบเรียม	0.05	0.05	0.05	0.05 ± 0.00	0.00	0.00
สังกะสี	144.42	159.74	151.50	151.89 ± 7.67	5.05	6.96
โบรมีน	1.21	1.19	1.07	1.16 ± 0.08	6.55	5.15
สตรอนเชียม	0.07	0.06	0.07	0.07 ± 0.01	8.96	28.20

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุจรสสมรหัทธ 070AI2

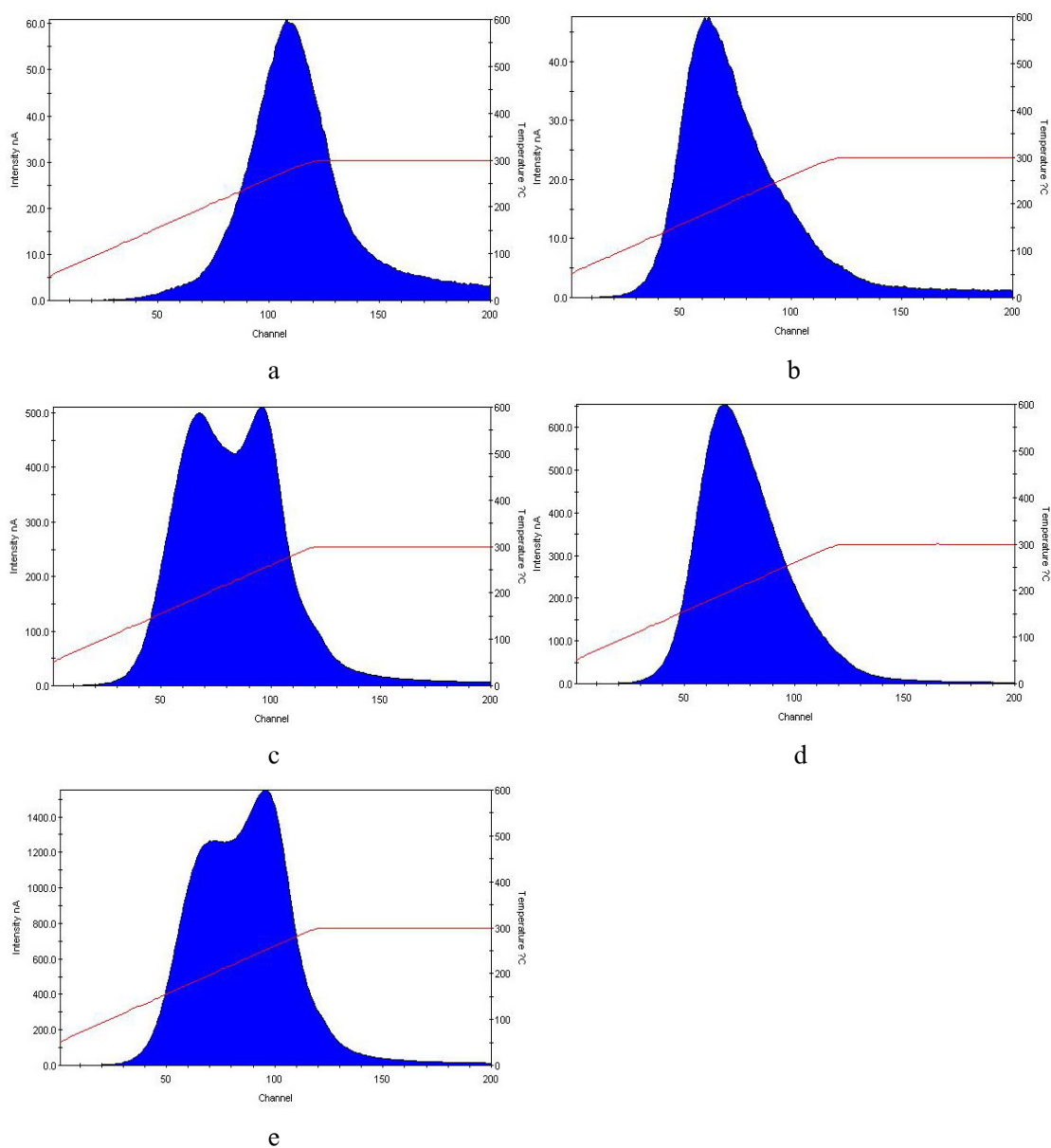
ธาตุ องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (ppm)				RSD	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD		
โซเดียม	2299.38	2399.57	2317.57	2338.97 $\pm$ 53.30	2.28	11.38
แมกนีเซียม	878.06	762.12	749.79	796.66 $\pm$ 70.77	8.88	-17.01
อะลูมิเนียม	1.64	1.46	1.86	1.65 $\pm$ 0.20	12.12	-2.74
กำมะถัน	4397.81	5579.90	4415.64	4797.78 $\pm$ 677.39	14.12	-39.65
โพแทสเซียม	9897.68	8606.69	9929.47	9477.95 $\pm$ 754.70	7.96	-37.52
แคลเซียม	144.97	150.21	138.87	144.68 $\pm$ 5.68	3.92	-0.22
เหล็ก	68.81	80.45	84.70	77.99 $\pm$ 8.23	10.55	9.53
ฟอสฟอรัส	5491.55	5715.76	4849.88	5352.40 $\pm$ 449.40	8.40	-35.98
คลอรีน	2232.76	2160.88	2024.94	2139.53 $\pm$ 105.54	4.93	13.80
นิกเกิล	0.05	0.06	0.07	0.06 $\pm$ 0.01	16.67	20.00
ทองแดง	2.79	2.68	2.72	2.73 $\pm$ 0.06	2.20	-3.87
แบเรียม	0.05	0.05	0.05	0.05 $\pm$ 0.00	0.00	0.00
สังกะสี	158.84	134.39	147.28	146.84 $\pm$ 12.23	8.33	3.41
โบรมีน	1.24	1.19	1.21	1.21 $\pm$ 0.03	2.07	10.30
สตรอนเชียม	0.07	0.07	0.07	0.07 $\pm$ 0.00	100.00	34.62

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบตัวอย่างเครื่องปรุงรสพสมรหัตถ์ BBE092007

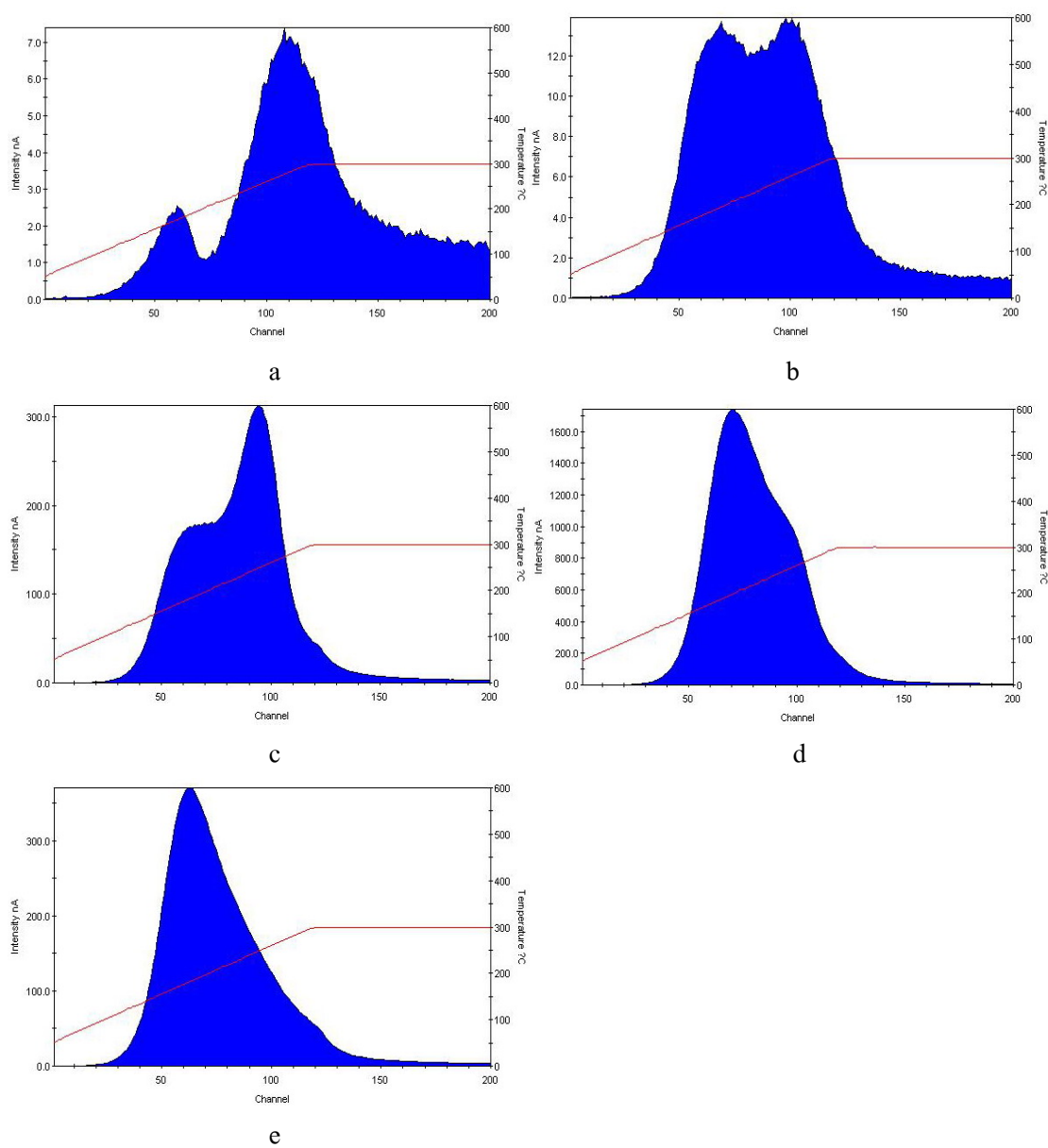
ธาตุ องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (ppm)				RSD	ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD		
โซเดียม	2119.47	2256.89	2273.77	2216.71 $\pm$ 84.63	3.82	5.56
แมกนีเซียม	811.78	762.84	796.74	790.45 $\pm$ 25.07	3.17	-17.66
อะลูมิเนียม	1.46	1.53	1.43	1.47 $\pm$ 0.05	3.40	-13.33
กำมะถัน	5414.99	4947.98	6013.87	5458.95 $\pm$ 534.30	9.79	-31.33
โพแทสเซียม	9440.26	17456.13	7414.42	11436.94 $\pm$ 5310.28	46.43	-24.61
แคลเซียม	128.21	168.52	142.94	146.56 $\pm$ 20.40	13.92	1.07
เหล็ก	62.15	86.97	84.15	77.76 $\pm$ 13.59	17.48	9.21
ฟอสฟอรัส	6885.08	7731.55	8924.64	7847.09 $\pm$ 1024.68	13.06	-6.14
คลอรีน	1526.88	1450.95	1460.65	1479.49 $\pm$ 41.32	2.79	-21.30
นิกเกิล	0.04	0.06	0.06	0.05 $\pm$ 0.01	18.87	6.67
ทองแดง	2.38	3.55	3.43	3.12 $\pm$ 0.64	20.51	9.86
แบเรียม	0.04	0.07	0.06	0.06 $\pm$ 0.02	35.09	13.33
สังกะสี	122.89	159.16	131.83	137.96 $\pm$ 18.90	13.7	-2.84
โบรมีน	0.81	1.22	1.26	1.10 $\pm$ 0.25	22.79	0.03
สตรอนเชียม	0.04	0.07	0.06	0.06 $\pm$ 0.02	35.09	8.97

ตารางผนวกที่ 5 ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตัวอย่างกระเทียมผงได้รับ เมื่อนำมาฉายรังสีปริมาณต่างๆ

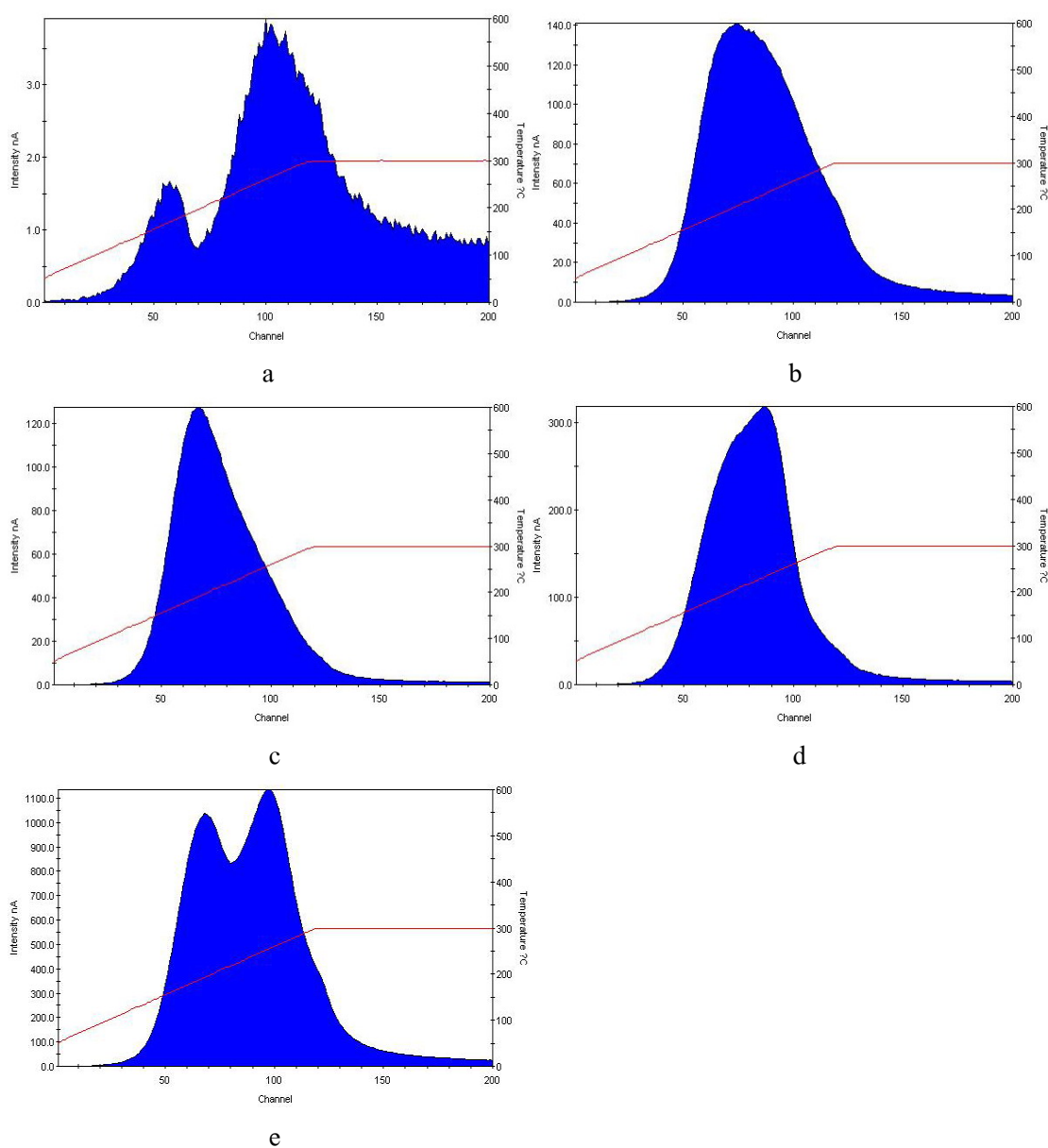
ปริมาณรังสีที่ต้องการ (กิโลเกรย์)	ผลการตรวจวัดปริมาณรังสีด้วย dosimeter (กิโลเกรย์)	ปริมาณรังสีเฉลี่ย (กิโลเกรย์)
1	1.09	1.14
	1.34	
	0.92	
	1.21	
3	2.63	2.905
	3.51	
	2.34	
	3.14	
5	4.34	5.045
	5.75	
	4.34	
	5.75	
10	8.85	9.6325
	11.66	
	7.73	
	10.29	



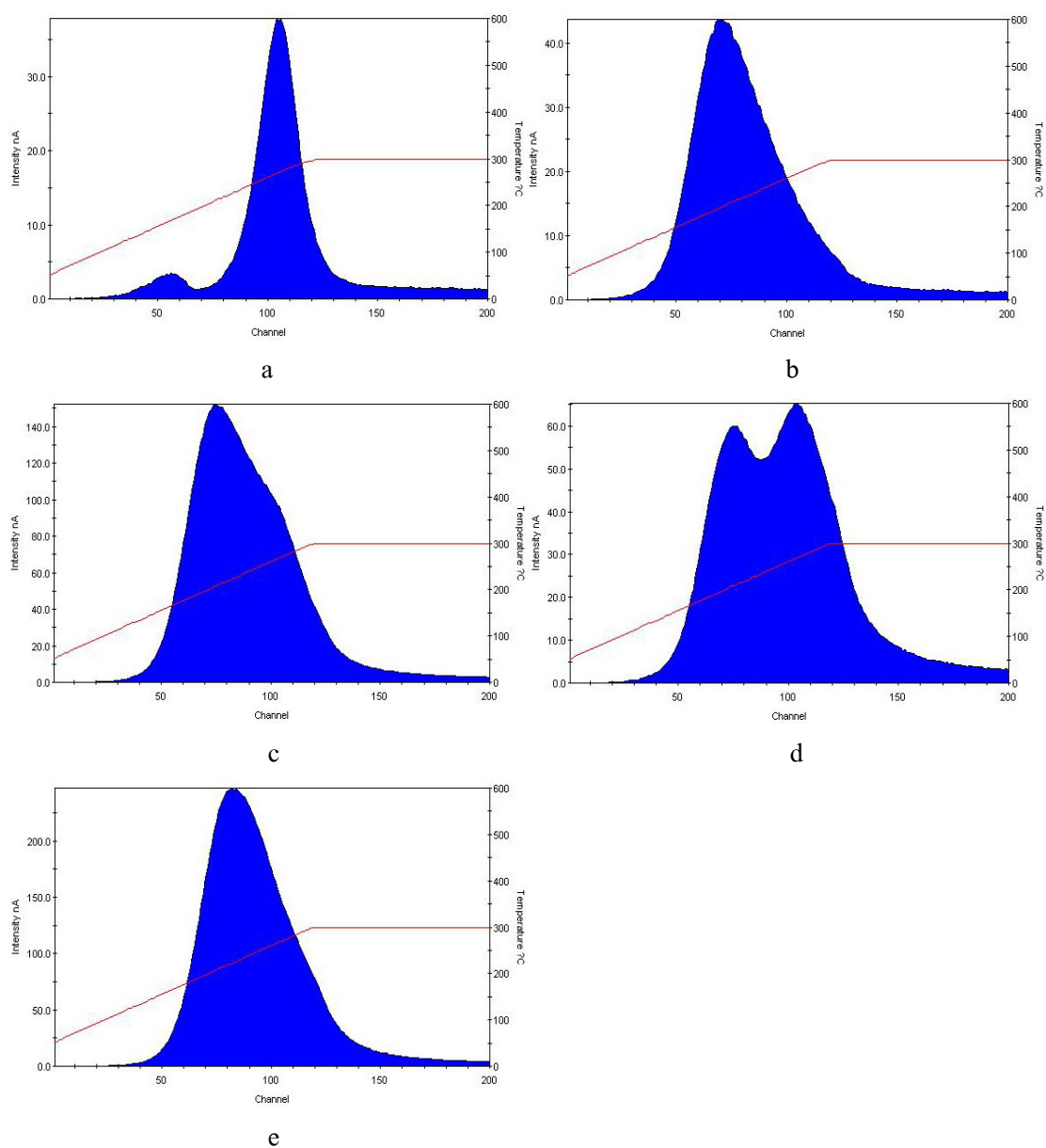
ภาพผนวกที่ 1 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี



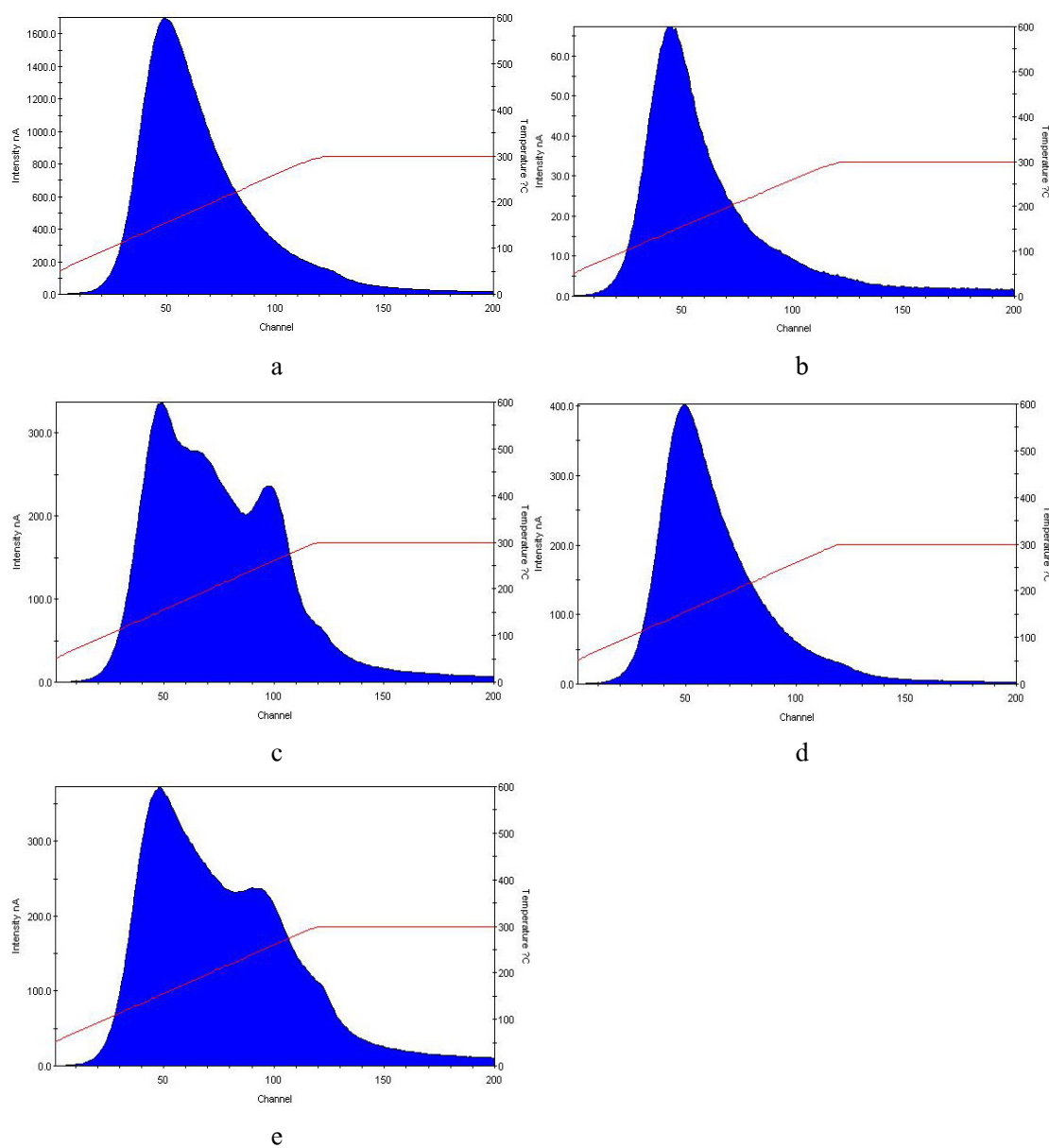
ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน หลังการฉายรังสี



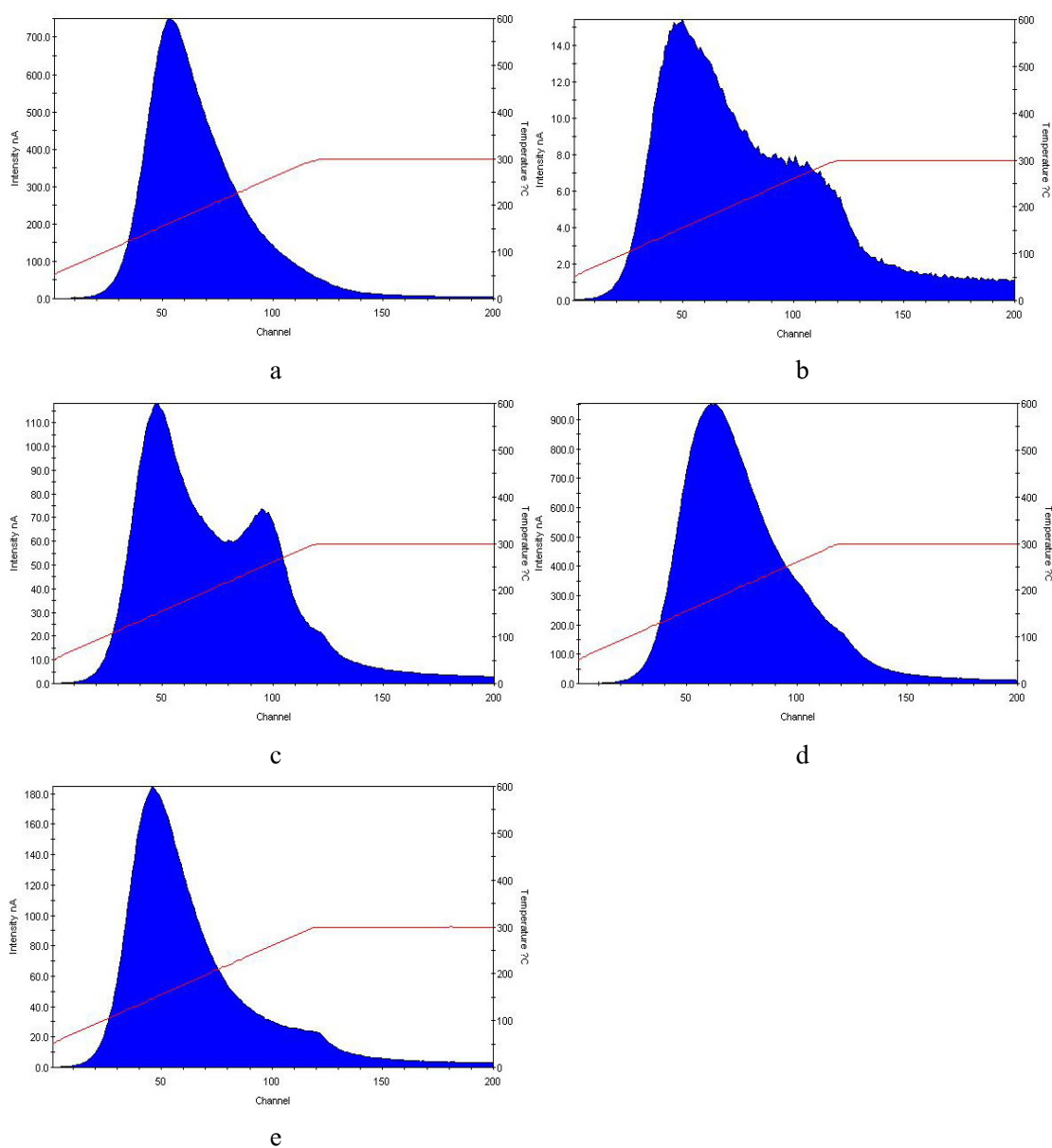
ภาพผนวกที่ 3 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 30 วัน หลังการฉายรังสี



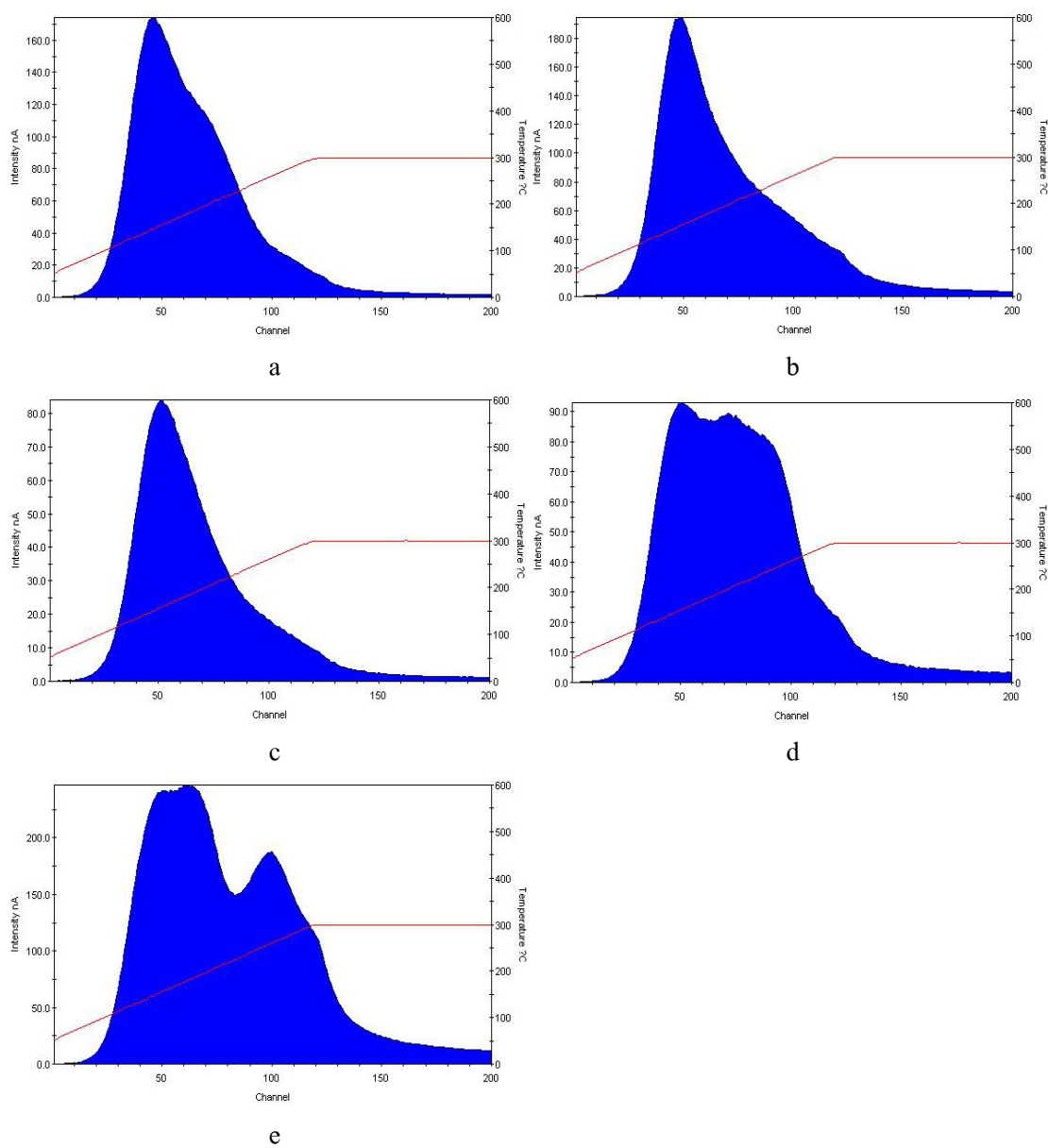
ภาพผนวกที่ 4 ลักษณะ glow curve 1 (G1) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 90 วัน หลังการฉายรังสี



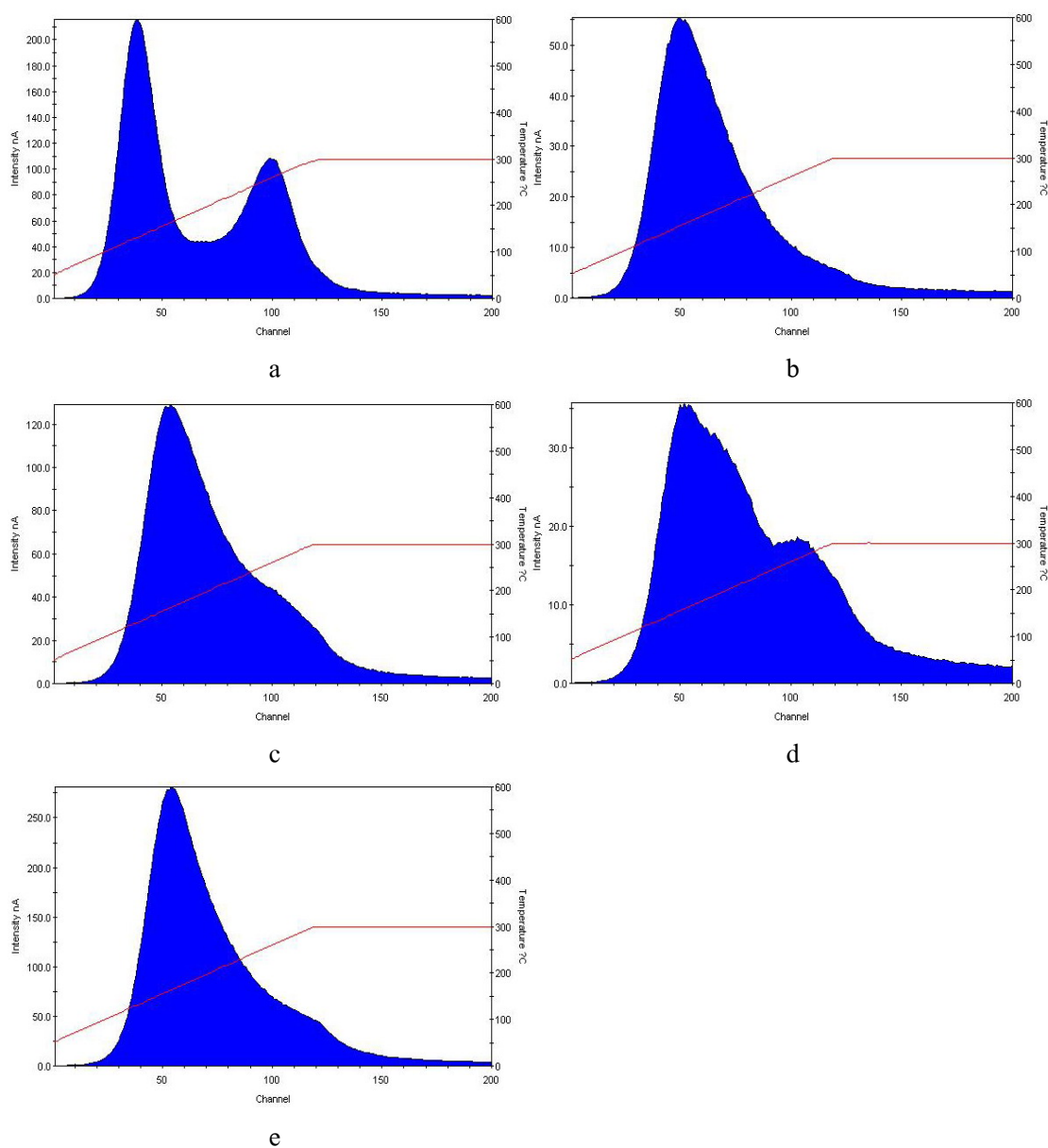
ภาพผนวกที่ 5 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพผนวกที่ 7 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 30 วัน หลังการฉายรังสี



ภาพผนวกที่ 8 ลักษณะ glow curve 2 (G2) ของตัวอย่างกระเทียมผงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0 (a) 1 (b) 3 (c) 5 (d) และ 10 กิโลเกรย์ (e) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 90 วัน หลังการฉายรังสี

ประวัติการศึกษา

ชื่อ –นามสกุล	นายณอมเกียรติ จันทร์จิรจิตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	แขวงป้อมปราบ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขารังสีประยุกต์และ ไอโซโทป (ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัย มหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พ.ศ. 2549)