

บทที่ 3

เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดการกระจายพลังงานเอ็กซ์เรย์

3.1 บทนำ

ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์คือ ใช้ต้นกำเนิดพลังงานกัมมันตภาพรังสี เป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ทำส่วนประกอบนั้นทำการเปล่งแคแตรก เทอริสติก เอ็กซ์เรย์ (characteristic x-ray) จากนั้นทำการวิเคราะห์ทำส่วนประกอบของธาตุ เทรสที่ปรากฏในสเปกตรัมของ เอ็กซ์เรย์ ยิ่งอุปกรณ์ตรวจวัดสเปกตรัมมีเรโซลูชันสูงจะทำให้สามารถวัดพลังงานและความเข้ม เอ็กซ์เรย์ได้ละเอียดยิ่งขึ้น ในปัจจุบัน มีการใช้หัววัดกัมมันตภาพรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการวัดพลังงาน เอ็กซ์เรย์ แม้ต้นกำเนิดจะมีความเข้ม เอ็กซ์เรย์ต่ำก็ตาม ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการวิเคราะห์

วิธีการกระตุ้นให้เกิดการเปล่ง เอ็กซ์เรย์ที่ใช้กันแพร่หลายในช่วงเวลานี้มีหลายแบบ โดยใช้ต้นกำเนิดพลังงานต่างๆกัน เช่น หลอด เอ็กซ์เรย์ ไอโซโทปกัมมันตภาพรังสี (radioisotope) ลำอนุภาคหนักมีประจุ (heavy-charged particle beam) เป็นต้น แต่ละวิธีการย่อมมีข้อดีและข้อบกพร่อง ซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้ให้เหมาะสมกับประโยชน์ที่ต้องการ สิ่งสำคัญคือ ต้องคำนึงถึงขอบข่ายการใช้ประโยชน์ ราคา ความรวดเร็ว ความถูกต้อง และแน่นอน และความสามารถในการบันทึกวัดค่า เอ็กซ์เรย์

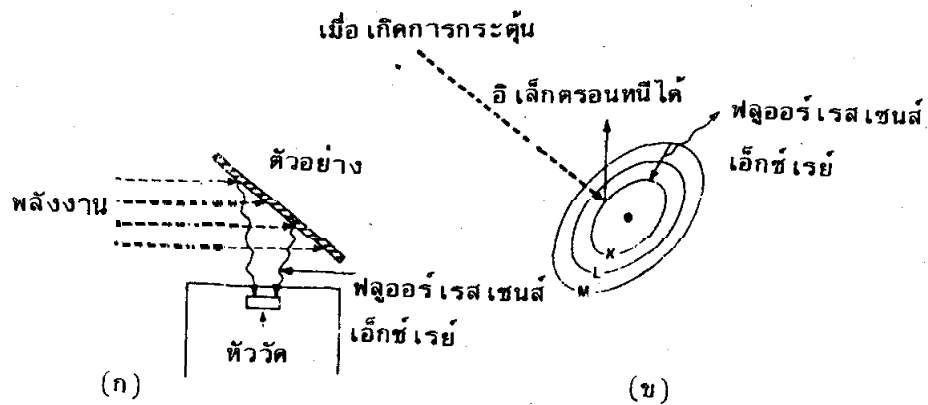
ในบทนี้จะกล่าวรายละเอียดของวิธีการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกปฏิบัติ หรือทำการเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการกระตุ้นให้เกิดฟลูออเรสเซนส์-เอ็กซ์

3.2.1 การใช้โฟตอน

ขบวนการ เกิด เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์แสดงในรูป 3.1 อธิบายขั้นตอนดังนี้

- (1) กัมมันตภาพรังสีตกกระทบบนสารตัวอย่าง ในบางกรณีอาจก่อให้เกิดช่องว่างในวงโคจรอิเล็กตรอนของธาตุที่ต้องการศึกษา
- (2) อะตอมในขั้นตอนที่ (1) อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและมีลักษณะไม่เสถียร จึงต้องการ เรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอมใหม่
- (3) ในการจัดเรียงดังกล่าวในลำดับที่ (2) อาจมีการ เปล่ง เอ็กซ์เรย์ซึ่งมีพลังงานค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า "แคแรคเทอริสติกเอ็กซ์เรย์"
- (4) ใช้หัววัดทำการนับวัดและบันทึกค่าเอ็กซ์เรย์ในขั้นตอนที่ (3)



รูป 3.1 แผนภาพแสดงวิธีการกระจายพลังงาน เอ็กซ์เรย์

- (ก) การจัดมุม เรขาคณิตระหว่างพลังงานที่ใช้กระตุ้น - ตัวอย่าง - หัววัด
- (ข) ขบวนการ เกิด เอ็กซ์เรย์อย่างง่าย

เนื่องจากต้องการกำหนดพลังงาน เอ็กซ์เรย์ที่บันทึกไว้ เป็นสัดส่วนกับความเข้มของธาตุที่สนใจทำการวิเคราะห์ จึงจำกัดขอบเขตให้อะตอมดังกล่าว กระจายอยู่ในปริมาตรที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และถือว่าฟลักซ์ (flux) ของกัมมันตภาพรังสีตกกระทบนั้นมีลักษณะเดียวกันตลอด (uniform)

ในสารตัวอย่างชีวภาพมักมีส่วนประกอบของธาตุเบาๆ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) เมื่อฟลักซ์กับมันตกภาพรังสีตกกระทบบนปริมาณในสารตัวอย่างอาจก่อให้เกิด เอ็กซ์เรย์ทุติยภูมิ (secondary x-rays) และปรากฏเป็นแบคกราวนด์ในสเปกตรัมของฟลูออเรสเซนส์เอ็กซ์ โดยทั่วไป เมื่อโฟตอนตกกระทบบนสารตัวอย่าง โอกาสในการเกิดขบวนการโคโน 3 ขบวนการ (คือโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการเกิดคู่อิออน) ขึ้นกับพลังงานกับมันตกภาพรังสี ถ้าเป็นขบวนการคู่อิออนแบบโฟโตอิเล็กทริก โอกาสในการเกิดช่องว่างอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงสุดสำหรับโฟตอนที่พลังงานสูงกว่าค่าวิกฤติของพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน จากนั้นโอกาสดังกล่าวจะมีค่าลดลงเป็นส่วนกลับของพลังงานยกกำลังสาม ลักษณะการขึ้นกับค่าพลังงาน เช่นนี้นับว่าสำคัญมาก เมื่อต้องการวิเคราะห์ธาตุที่มีช่วงพลังงานกว้างโดยใช้โฟตอนพลังงานเดี่ยว สารตัวอย่างที่ประกอบด้วยธาตุเบา เป็นส่วนใหญ่มักเกิดปัญหาการกระเจิงของโฟตอน เมื่อตกกระทบสารตัวอย่าง

แหล่งกำเนิดโฟตอนอาจเป็นหลอดเอ็กซ์เรย์หรือต้นกำเนิดกับมันตกภาพรังสี ถ้าเป็นแหล่งชนิดแรก โฟตอนเกิดจากการชนกันของลำอิเล็กตรอนกับสารที่ใช้ทำแอนโนด (anode) ในหลอดเอ็กซ์เรย์ แต่ถ้าใช้ต้นกำเนิดกับมันตกภาพรังสี โฟตอนเป็นผลจากการสลายตัวของสารกับมันตกภาพรังสี

3.2.2 อนุภาคแอลฟาและโปรตอน

การใช้อนุภาคแอลฟาและโปรตอนเป็นเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดเอ็กซ์เรย์โดยอนุภาคเรียกชื่อย่อเป็น PIXE (รายละเอียดเสนอในบทที่ 4) โดยทั่วไปมักใช้โปรตอน เนื่องจากส่วนใหญ่มักมีเครื่องเร่งโปรตอนอยู่แล้ว และผลจากการวิจัยพบว่า โปรตอนช่วงพลังงาน 1-2 MeV จะมีความไวในการวิเคราะห์ธาตุเธอสได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม อนุภาคแอลฟาแม้จะมีความไวไม่ดีเลิศเท่าโปรตอน แต่นิยมใช้ในช่วงพลังงาน 10-20 MeV เนื่องจากปลอดภัยจากแบคกราวนด์รังสีแกมมา ส่วนการทดลองเปรียบเทียบความไวของอนุภาคทั้งสองยังไม่มีผลการเสนอไว้ ข้อเสียเปรียบหรือขีดจำกัดของอนุภาคแอลฟาคือ เบ้าอาจเกิดความร้อนสูงจนเสียหายได้ ถ้าใช้ลำอนุภาคแอลฟายังต้องคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานของอนุภาคด้วย

ลำอนุภาคแอลฟาและโปรตอนได้จาก เครื่องเร่งอนุภาค หรือไซโคลตรอน (cyclotron) ดังนั้น โอกาสในการสร้างอุปกรณ์จำต้องคำนึงถึงประโยชน์ใช้งาน เนื่องจากการสร้างเพื่อวิเคราะห์เพียงอย่างเดียว ดูจะเป็นการสิ้นเปลือง ควรใช้ทำประโยชน์อื่นๆ ร่วมใช้ในการวิเคราะห์เพียงบาง เวลา เท่านั้น ส่วนรายละเอียดอื่นๆ เสนอในบทที่ 4

3.2.3 การใช้อิเล็กตรอน

ลำอิเล็กตรอน สามารถใช้เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดฟลูออเรสเซนส์เอ็กซ์เรย์ได้ ผู้ใช้อาจกำหนดพลังงานให้พอ เหมาะต่อการก่อให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนตามต้องการ เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบ เป้าจะ เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตย์กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เป้า ผลคือ เกิดการแตกตัว (ionization) โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่าสูง อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ และแม้จะเกิดการแตกตัวได้มาก ลักษณะเช่นนี้ย่อม เกิดได้มากในวงโคจรนอกๆของอะตอมสารตัวอย่างด้วย เอ็กซ์เรย์ที่เกิดจะมีพลังงานต่ำกว่าค่าที่ต้องการ นับ เป็นข้อเสียของวิธีการ นอกจากนี้ ยังเกิดขบวนการหน่วงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กล่าวคือ อิเล็กตรอนที่วิ่งมา เพื่อชนสารตัวอย่างจะถูกต้านด้วยประจุลบของกลุ่มอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมสารตัวอย่าง ผลคืออิเล็กตรอนอิสระจะมีความเร็วลดลง และเกิดการปล่อยพลังงานส่วน เกินในรูปของ เอ็กซ์เรย์ เบรมสตราห์ลิ่ง (bremsstrahlung) และจะปรากฏ เป็นแมคกราวนด์ในสเปกตรัมที่ต้องการวิเคราะห์ ถือเป็นขีดจำกัดของวิธีการสเปกตรัมโดยประมาณอาจ เขียนได้ในรูปของพลังงาน ดังนี้

$$dN(E) = 2.76 \times 10^{-6} Z \frac{(E_0 - E)}{E} dE$$

โดย dN เป็นจำนวนโฟตอนระหว่างพลังงาน E และ $(E + dE)$

Z เป็นหมายเลขอะตอม

เทคนิคนี้นิยมใช้ร่วมกับไมโครโพรบ (microprobe) หรือกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ อิเล็กตรอนเป็นตัวกวาด (scanning electron microscope) เพื่อศึกษารายละเอียดของ ส่วนประกอบ ซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถใช้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุ เซเรสได้ เลย เป้าต้องมี ลักษณะบางเฉียบ อาจใช้ในงานธรณีวิเคราะห์ร่วมกับสเปกโตรมิเตอร์แบบผลึก (crystal spectrometer)

3.3 แหล่งกำเนิดโฟตอน

ดังได้กล่าวแล้วว่าแหล่งกำเนิดโฟตอนเพื่อผลิตเอ็กซ์เรย์ในสารตัวอย่างคือ หลอด เอ็กซ์เรย์ และไอโซโทปรังสี แยกกล่าวรายละเอียดดังนี้

3.3.1 หลอดเอ็กซ์เรย์

หลอดเอ็กซ์เรย์เป็นต้นกำเนิดโฟตอนที่มีความเข้มสูงที่สุด สำหรับอิเล็กตรอน 50 KeV เมื่อตกกระทบบะตอมเป้าจะก่อให้เกิด 10^{-5} โฟตอน/อิเล็กตรอนตกกระทบบ (ค่าโดยประมาณ) ถ้ากระแสอิเล็กตรอน 10 mA จะก่อให้เกิด 6×10^{11} โฟตอน/วินาที พลังงานของโฟตอนเหล่านี้จะมีค่ากระจายอยู่ระหว่างเอ็กซ์เรย์ของสารใช้ทำแอนโนด กับเบรมสตราห์ลิ่งก็สามารถนำโฟตอนไปใช้ได้โดยตรง หรืออาจดัดแปลงโดยใช้ตัวดูดกลืนที่อยู่ภายนอกสารตัวอย่าง เพื่อให้กัมมันตภาพรังสีมีพลังงานเดียวให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีการผลิตสเปกตรัมที่ง่ายสุดทำโดยวางตัวกรองลำแสงเอ็กซ์เรย์ ซึ่งประกอบด้วยสารที่ใช้ทำแอนโนด มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (ประมาณ 2.5×10^{-3} ซม.) วางอยู่ระหว่างแอนโนดและเป้า โดยทั่วไปมักใช้หลอดที่มีโมลิบดีนัมเป็นแอนโนด ร่วมกับตัวกรองซึ่งทำด้วยโมลิบดีนัม ผลิตสเปกตรัม K_{α} และ/หรือ K_{β} ของโมลิบดีนัม โมลิบดีนัมแผ่นบางๆที่ใช้เป็นตัวกรองจัดว่าทำหน้าที่ได้ดี เนื่องจากแคแรกเทอริสติกเอ็กซ์เรย์ของธาตุที่กำหนดจะทำการวิเคราะห์นั้นมีพลังงานต่ำกว่าพลังงาน η บริเวณเส้นของการดูดกลืน (absorption edge) อย่างรวดเร็วทันที่ทันใด

วิธีการดังกล่าวเหมาะสมในการกระตุ้น เซลล์ K ของธาตุคั่งแคแคลเซียม (Ca) ถึงสตรอนเซียม (sr) ตามตารางธาตุ และเหมาะในการกระตุ้น เซลล์ ของธาตุหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) และปรอท (Hg)

ได้มีการเสนอเทคนิค เป้าทุติยภูมิซึ่งประโยชน์ในการใช้จะกว้างกว่า พลังค์ที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกส่งผ่านไปยัง เป้าที่ต้องการให้ แปลงรังสีเอ็กซ์ ส่วน เอ็กซ์ เรย์จากหลอดที่ถูกปล่อย เป็นอันดับแรกจะมีพลังงานสูงกว่าเส้นการดูดกลืนของ เป้าทุติยภูมิ และเกิดปฏิกิริยาการดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก สุดท้ายคือปล่อยแคแคเรคเทอร์ิสติก เอ็กซ์ เรย์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นลำรังสีที่มีความสม่ำเสมอของพลังงานตลอด และกระจายออกทุกทิศทุกทาง ดังนั้น ย่อมมีการสูญเสียพลังค์ไปมากพอสมควร แต่อย่างไรก็ตาม เปลี่ยนพลังงานที่ใช้ เป็นตัวกระตุ้น เพื่อจัดให้ระบบการวิเคราะห์ธาตุที่สนใจมีความไวอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ต้องคำนึงถึงจีโอเมทรีของหัววัด-สารตัวอย่าง- เป้าทุติยภูมิ หรืออาจใช้หลอด เอ็กซ์ เรย์ที่มีกำลังสูงก็ได้

วิธีการดังกล่าวใช้ได้กับสารตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวกว้าง (1-10 ตร.ซม.) แต่ควรมีลักษณะบาง เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด และมีความสม่ำเสมอ (ไม่เป็นตะปุ่มตะป่ำ) ซึ่งค่อนข้างจะเข้าเกณฑ์ของสารตัวอย่างอุดมคติ ความบางจะช่วยลดผลเนื่องจากการดูดกลืน เอ็กซ์ เรย์พลังงานต่ำ ส่วนความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอดจะเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการวิเคราะห์ ปัญหาการมีลักษณะของสารตัวอย่างผิดไปจากอุดมคติจะแก้ไขได้อย่างไร? ก่อนอื่นต้องคำนึงถึงสาเหตุที่จะก่อผลในการวิเคราะห์ ซึ่งอาจเป็นกรณีการดูดกลืนพลังงานที่บริเวณขอบปริมาตรของสารตัวอย่าง หรือขนาดของอนุภาคในสารตัวอย่าง เป็นต้น แก้ไขโดยสร้างสัมประสิทธิ์ เพื่อเป็นตัวแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว

3.3.2 ไอโซโทปรังสี

ไอโซโทปรังสีที่ใช้เป็นต้นกำเนิดโฟตอน เพื่อกระตุ้นให้เกิด เอ็กซ์ เรย์ฟลูออเรสเซนส์ เลือกใช้ไอโซโทปที่ปล่อยรังสีเอ็กซ์ หรือแกมมาที่มีพลังงานเหมาะสม ข้อได้เปรียบคือราคาถูกกว่า และสะดวกในการใช้งาน แต่ความเข้มของฟลูออเรสเซนส์ที่ได้จะต่ำกว่า

ของหลอด เอ็กซ์เรย์ เทคนิคนี้อาจใช้สารตัวอย่างแบบหนา เวลาในการวิเคราะห์ทำได้นานกว่าวิธีอื่น เนื่องจากสารตัวอย่างไม่เกิดความร้อน

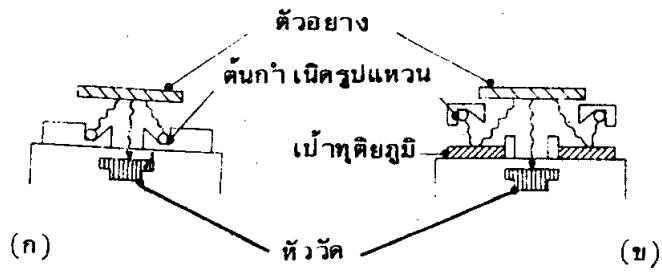
ในตารางที่ 3-1 แสดงตัวอย่างไอโซโทปรังสีที่มีพลังงานต่างกัน ผู้ใช้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับธาตุเรซินที่ต้องการวิเคราะห์ ดังกล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 1 และในรูป 3.2 แสดงจีโอเมทรีนิยมใช้ทั่วไปในงานวิเคราะห์ โดยรูป 3.2 (ก) แสดงการใช้ไอโซโทป ตาราง 3-1 ไอโซโทปรังสีที่นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ด้วยเอ็กซ์เรย์

นิวไคลด์	ครึ่งอายุ	พลังงานที่ปล่อยออก (keV)
Fe-55	2.7 ปี	5.9
Cd-109	453 ปี	22.1 , 87.7
1-125	60 วัน	27
Am-241	458 ปี	12-17 , 60
Co-57	270 วัน	6.4 , 122 , 144
Pu-238	86.4 ปี	12-17

รังสีกระตุ้นสารตัวอย่างโดยตรง และในรูป 3.2 (ข) เป็นการกระตุ้นทางอ้อม

รูป 3.3 เป็นผลการวิเคราะห์โดยไม่ผลโดยใช้แหล่งกระตุ้นต่างกัน สเปกตรา (ก) ใช้หลอดเอ็กซ์เรย์ -Mo ส่วนสเปกตรา (ข) และ (ค) ใช้ไอโซโทปรังสี ส่วนสารตัวอย่างเหมือนกันทั้งสามกรณี ผลคือสเปกตราจากหลอดเอ็กซ์เรย์มีแบคกราวนด์สูงกว่า ทั้งนี้ เนื่องจากแบคกราวนด์สูงนั่นเอง ไอโซโทปรังสีที่ใช้คือ Cd-109 และ Fe-55

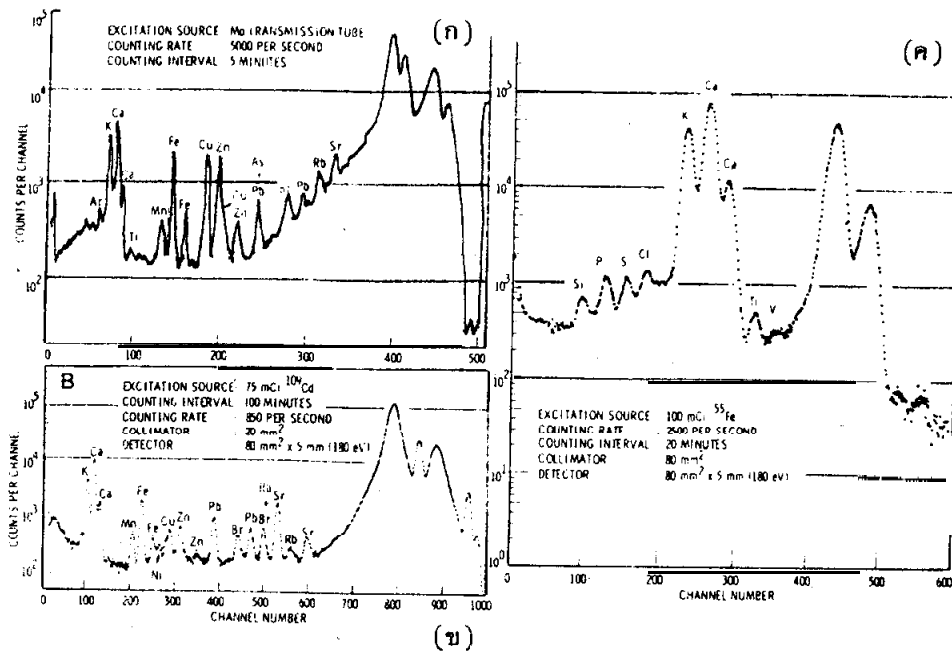
ในรูป 3.4 เป็นสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนวางบนแก้ว ใช้ต้นกำเนิดแอลฟาเป็นตัวกระตุ้น ทั้งสารตัวอย่าง ไอโซโทปใช้กระตุ้น และตัววัดอยู่ในปริมาณที่ปิดซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศ



รูป 3.2 การจัดมุม เรขาคณิตสำหรับกระตุ้นด้วยไอโซโทปรังสี

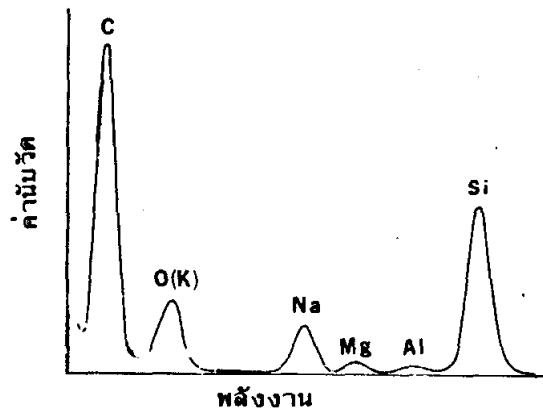
(ก) กระตุ้นโดยตรง

(ข) ใช้ฟลูออเรสเซนส์ทุติยภูมิ



รูป 3.3 สเปกตรัมของมาตรฐาน NBS orchard leaf โดยใช้พลังงานกระตุ้นต่างๆกัน

(ก) หลอด เอ็กซ์เรย์โมลิบดีนัม, (ข) ไอโซโทปรังสี Cd-109, (ค) Fe-55



รูป 3.4 สเปกตรัมจากการใช้ไอโซโทปรังสี (อนุภาคแอลฟา) กระตุ้นฟิล์มคาร์บอนบน
แบคกิ้งแก้ว ทั้งระบบอยู่ในปริมาณสูญญากาศ

3.4 แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน

วิธีการกระตุ้นด้วยลำอิเล็กตรอนมีความไวต่ำ (โดยเฉลี่ย เมื่อ เทียบกับวิธีอื่น) จึง ไม่ใช้กับสารตัวอย่างที่มีลักษณะ เป็นก้อน มักประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยลำอิเล็กตรอน เช่น ไมโครโพรบ และกล้องจุลทรรศน์ซึ่งอาศัยหลักการกวาดอิเล็กตรอน เป็นต้น อุปกรณ์พวกนี้จะมีขีดความสามารถสูงในการแยกข้อแตกต่าง (หรือรายละเอียด) ของภาพหรือบริเวณที่ทำการสำรวจ หรือกล่าวได้ว่า สเปซียล เรโซลูชัน (spatial resolution) สูง เนื่อง จากลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสอย่างดี

ถ้าเป็นพวกไมโครโพรบ ลำอิเล็กตรอนมีกระแสประมาณ 10^{-6} - 10^{-9} A สเปซียล เรโซลูชัน $0.3 \mu\text{m}$ ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์ ซึ่งหาส่วนประกอบในสารตัวอย่างโดย พิจารณาลำที่มีความยาวคลื่นกระจายอยู่ต่างกันไปในสารตัวอย่าง ส่วนกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ หลักการกวาดอิเล็กตรอน เรียกชื่อย่อ เป็น SEM (Scanning Electron Microscopes) มีสเปซียล เรโซลูชันดีกว่าไมโครโพรบ (ค่าประมาณ $0.01 \mu\text{m}$ หรือ 1 \AA) และทำงานได้ เมื่อมีกระแส 10^{-7} - 10^{-12} A

สารตัวอย่าง โดยทั่วไปจะ เตรียมโดยใช้วิธีฉาบ เป็นชั้นฟิล์มบางๆบนถ่าน เพื่อป้องกัน การรบกวนซึ่งอาจ เกิดจากการประจุ (charging) ให้สารตัวอย่าง ตัวอย่างควรทนภาวะ อยู่ในสุญญากาศได้โดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตลอดช่วง การทดลอง เทคนิคดังกล่าว จะได้ผลไม่ถูกต้องนักสำหรับตัวอย่างชีวภาพ เนื่องจากมีการสูญเสียลำอิ เล็กตรอนบ้างในการ สร้างโฟตอน และการ เดินทางหรือการส่งผ่านของ มันไม่สามารถคำนวณได้ แต่ผลแบบกึ่งการทดลองอาจใช้วิเคราะห์ได้

3.5 บทสรุป

เทคนิคที่ใช้ เพื่อกระตุ้นให้สารตัวอย่าง เกิดพลังงาน เอ็กซ์ เรย์ แยกได้ เป็น 3 วิธี ดังนี้

- (1) การใช้โฟตอน
- (2) อนุภาคแอลฟาและโปรตอน
- (3) อิ เล็กตรอน

ซึ่งแหล่งกำเนิดของโฟตอนคือหลอด เอ็กซ์ เรย์ หรือไอโซโทปรังสี ส่วนอนุภาค แอลฟาและโปรตอนได้จาก เครื่อง เร่งอนุภาค ซึ่งอธิบายรายละเอียด ในบทที่ 4 และ 5 จึง ไม่กล่าวถึงแหล่งกำเนิด เลยในบทนี้

ข้อสังเกตจากตาราง 3-1 ไอโซโทปรังสีที่ใช้ เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนมักมีอายุานาน หลายปี ราคาในการบำรุงรักษาต่ำกว่า PIXE

แบบฝึกหัดที่ 3

1. อธิบายขั้นตอนการ เกิดฟลูออรั เรส เซนส์โดยใช้โฟตอน
2. สาเหตุของแบคกราวนด์ เค่นในสารตัวอย่างชีวภาพคืออะไร?
3. จากตาราง 3-1 ไอโซโทปรังสีมีหลายพลังงาน ท่านมีหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้แต่ละไอโซโทปรังสีอย่างไรบ้าง
4. การใช้ลำอิ เล็กตรอนกระตุ้นให้ เกิดฟลูออรั เรส เซนส์เอ็กซ์ ต่างจากการใช้โฟตอนอย่างไร?
5. เหตุใดจึงนิยมใช้คาร์บอน เป็นแบคกิ้งสำหรับเทคนิค FEA
6. วิเคราะห์ประโยชน์ของการใช้ เป้าทุติยภูมิในเทคนิค FEA
7. จากรูป 3.3 วิเคราะห์ข้อแตกต่างของสเปคตราจากทั้ง 3 รูป