

บทที่ 8 การประยุกต์ใช้ PIXE

8.1 บทนำ

เทคนิคการใช้ PIXE วิเคราะห์ธาตุธรรมชาติประสิทธิภาพสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์คือ เครื่องเร่งอนุภาค ฯลฯ สูงตามไปด้วย จากการศึกษาของนักวิจัยหลายกลุ่มกล่าวว่า การใช้โฟตอนเป็นเทคนิคที่อาจทดแทน PIXE ได้ แต่ย่อมต้องมีลำดับหรือมีหมายเลขอะตอมของธาตุต้องการวิเคราะห์เป็นขอบเขต ดังจะกล่าวในบทนี้ อย่างไรก็ตาม รายละเอียดในบทนี้เป็นตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ PIXE ที่ได้ผลสำเร็จดี ทั้งนี้ ได้รวบรวมผลจากการวิเคราะห์สารตัวอย่างหลายๆชนิด และแยกออกเป็นประเภทตามสถานะของสารตัวอย่าง เช่น ละอองอากาศ ตัวอย่างของเหลว ตัวอย่างชีวและชีวการแพทย์ ตัวอย่างชนิดหนา เป็นต้น

8.2 การศึกษาละอองอากาศ

ละอองอากาศหรือมักเรียกทับศัพท์เป็น "แอโรโซล" (aerosol) มักถูกศึกษาในเชิงเพื่อหามลภาวะในบรรยากาศ ซึ่งคุณสมบัติของเทคนิค PIXE เหมาะสมและประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์ดี ตัวอย่างละอองอากาศอาจประกอบด้วยธาตุต่างๆ 10-15 ชนิดในปริมาณ 10-0.01 ng และถูกจัดเตรียมให้เป็นสารตัวอย่างที่มีลักษณะบาง โดยทั่วไปใช้กระดาษกรองเป็นตัวจับเก็บ สารหรือวัสดุที่ใช้ทำกระดาษกรอง เช่น มิลลิพอร์ (millipore) นูเคลียร์พอร์ (nuclepore) ได้ถูกใช้ทั้งสองแบบ แต่นูเคลียร์พอร์นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากบางกว่าแต่ทนทานล้าอนุภาคได้ดีกว่า การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุชนิดอื่นควรคำนึงถึงการเปราะ เอนซึ่งอาจรบกวนพีคเอ็กซ์เรย์ของธาตุที่สนใจ นอกจากนี้ การจับเก็บละอองอากาศอีกวิธีหนึ่งคือแยกออกเป็นส่วนๆตามขนาดของอนุภาค ต้องอาศัยปริมาตรซึ่งภายในประกอบด้วยแผ่นพลาสติกบาง (plastic foil) ละอองอากาศจะถูกฉีกผ่านรูเล็กๆและ

จะลกระยะเส้นผ่าศูนย์กลางลงเรื่อยๆ อนุภาคหนัก (มีโมเมนตัมมากกว่า) จะถูกจับเก็บบนแผ่นพลาสติกบางดังกล่าว จากนั้นอาจต่ออุปกรณ์วัดสารตัวอย่างและทำการอาวรังสีได้ทันที เทคนิคนี้นิยมใช้ในงานวิเคราะห์มลภาวะและสภาวะเคมีในบรรยากาศ

ลักษณะการกระจายของละอองอากาศตามขนาดของอนุภาค เป็นกลไกที่สำคัญ ข้อมูลจากการปฏิบัติภารกิจดังกล่าวยังเป็นประโยชน์ด้านการแพทย์ เนื่องจากระบบหายใจจะรับอนุภาคของละอองอากาศมากน้อยอย่างไรขึ้นกับขนาดของอนุภาค ข้อสังเกตคือการจับเก็บละอองอากาศแบบหลังจะได้ตัวอย่างปริมาณน้อยๆ ถ้าจะเพิ่มหรือจำกัดช่วงเวลาในการจับเก็บต้องคำนึงถึงการทนต่อสภาวะในปริมาตร (หมายถึงอุณหภูมิและความดัน) ของธาตุด้วย

คาฮิลและคณะ (Cahill et al.) ได้ทดลองวิเคราะห์ละอองอากาศในแคลิฟอร์เนียร์ (California) โดยใช้อนุภาคแอลฟา 18 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาค เดวิส (Devis cyclotron) ตัวอย่างถูกจับเก็บโดยใช้ปริมาตรอัดและใช้กระดาษกรองเพื่อเก็บอนุภาคขนาดเล็กที่สุด ใช้กระดาษกรอง 7 ชั้นใน 1 ลิปคาร์ท และปิดด้วยแผ่นมิลาร์ (mylar) เพื่อแยกเป็นช่วงเวลา 2-3 ชม. ก็ได้ ความไวประมาณ 2-3 ng/อากาศ 1 ลบ.ม. ข้อผิดพลาด (error) ประมาณ 10%

ข้อสังเกตคือการจับเก็บละอองอากาศควรคำนึงถึงทิศทางและความเร็วของลมในบรรยากาศด้วย นอกจากนี้ ถ้าเป็นละอองอากาศที่ถูกสูดหายใจเข้าสู่ร่างกาย อาจถูกแปรสภาพหรือแปรไป เป็นสารประกอบอื่นๆโดยกลไกอวัยวะภายในร่างกาย ดังนั้น ลักษณะมลภาวะในอากาศควรทำเปรียบเทียบทั้งลมหายใจเข้าและลมหายใจออกของมนุษย์

8.3 ตัวอย่างที่เป็นของเหลว

กรณีที่ธาตุเฮรอสเป็นสารละลาย ส่วนมากปะปนอยู่ในน้ำ เช่น น้ำบาดาล หรือน้ำคลอง เป็นต้น วิธีง่ายสุดในการเตรียม เม้าคือหยดสารละลายลงบนแมคกิงก์แผ่นบางทำด้วยคาร์บอนหรือพลาสติก แล้วทิ้งให้แห้ง ปัญหาคือเมื่อธาตุต่างๆแห้ง การก่อโครงสร้างเป็นผลึก

อาจไม่สมบูรณ์และผลคือสารตัวอย่างมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ อาจแก้ไขโดยเติมอินซูลิน (insulin) ลงในสารละลาย ซึ่งเป็นเพียงการลดสภาวะที่จะก่อ เป็นสารตัวอย่างที่ไม่สม่ำเสมอได้มาก ๆ เท่านั้น ไม่สามารถกำจัดได้โดยสมบูรณ์ หรืออาจเลือกแมคกิงก์ใหม่ เป็นพวกนุคเคลอรัฟอรั หรืออาจใช้เทคนิคพ่นฝอยสารละลายให้ติดบนแมคกิงก์ 2 ครั้ง จากนั้นทำให้หยด เล็กๆของสารตัวอย่างดังกล่าวระเหย เมื่อแห้งจะได้ลักษณะสม่ำเสมอ

เทคนิค PIXE ในการวิเคราะห์น้ำได้ผลการวิเคราะห์รวดเร็ว มีความไวและความถูกต้องดี นอกจากนี้เพื่อหาสารมลภาวะในน้ำยังสามารถบ่งชี้ถึงแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งน้ำอีกด้วย ปัญหาอาจเกิดเนื่องจากมีธาตุเบาเจือปนอยู่ เช่น น้ำในดินมักมีแคลเซียม น้ำทะเลมีโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น วิธีแก้ปัญหอย่างหนึ่งคือใช้เตรียมแผ่นชนิดหนา (Van Rinsvelt et al.) โดยวิธีทำให้แห้ง ณ อุณหภูมิต่ำ (freeze - drying) และอัดตะกอนเป็นเม็ด แต่ความเร็วและความถูกต้องจะลดลง อาจช่วยเพิ่มด้วยการเติมสารมาตรฐานในสารตัวอย่าง (internal standard) หรืออีกวิธีหนึ่ง เรียกทับศัพท์ "preconcentration" (Lochmüller et al.) เป็นวิธีการเตรียมความเข้มข้นของสารละลายไว้ก่อน ทำโดยใช้เยื่อชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยเรซิน (resin) แลกเปลี่ยนไอออนบวก เมื่อวางเยื่อนี้ในสารละลาย จะเกิดการดูดซึมไอออนโลหะไว้ จากนั้นชะล้างเยื่อดังกล่าว แล้วทำให้แห้ง ค่อยไปคืออบรังสีด้วยโปรตอนขนาด 3 MeV วิธีนี้สามารถวัดตะกั่วปริมาณ 10^{-8} โมลาร์ (molar) ได้ แต่ถ้าต้องการปริมาณวิเคราะห์จะต้องเทียบปรับการดูดซึมไอออนของ เยื่อดังกล่าว

พวกของเหลวในร่างกาย เช่น เลือด ซีรัม (serum) บัสสาวะ ฯลฯ จะรวมอยู่ในรายละเอียด 8.4 ซึ่งเป็นสารตัวอย่างชีวภาพ

นอกจากนี้ อาจมีการวิเคราะห์ธาตุเฮรัสในน้ำมัน ซึ่งน้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันต่างๆ จะมีธาตุเฮรัสประกอบอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ เช่นนี้ เป็นการหาสิ่งแปลกปนในน้ำมัน เทคนิค PIXE ใช้วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว สารตัวอย่างถูกเตรียมโดยหยคน้ำมันลงบนแมคกิงก์คาร์บอน (Johansson et al.) เช่นนี้สามารถวิเคราะห์ธาตุเฮรัสหลักในน้ำมันได้

8.4 ตัวอย่างชีวภาพและชีวการแพทย์

คังได้กล่าวรายละเอียด เมื่อร่างกายขาดหรือมีธาตุ เซเรสไม่เพียงพอแล้วในบทที่ 7 ธาตุ เซเรสสำคัญอาจเป็นส่วนประกอบ 1 ppm หรือสูงกว่า ดังนั้น สามารถใช้เทคนิค PIXE ในการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว สิ่งสำคัญคือการเตรียม เป้าหรือสารตัวอย่าง พวกตัวอย่างชีวภาพจะต้องอยู่ในรูปร่างหรือลักษณะที่สะดวกต่อการอบรังสีโดยไม่เกิดการสูญเสียธาตุ เซเรส และทั้งไม่เกิดการเปราะ เหมือน

วิธีการทั่วไปที่ใช้เตรียมพวก เนื้อ เยื่อต่างๆ มีดังนี้

- (1) ตัวอย่าง เนื้อ เยื่อสด แช่เย็นจนแข็ง จากนั้นตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ (ระดับไมโคร) และวางบนแม่คิงก์ฟอร์มวาร์ (formvar) บางๆ
- (2) ตัวอย่าง เนื้อ เยื่อสด ใช้ฟอร์มาลิน (formalin) ทำให้คงรูป เคลือบด้วยพาราฟิน (paraffin) ตัดออกเป็นชิ้นบางๆ และวางบนแม่คิงก์บาง จากนั้นกำจัดพาราฟินออก
- (3) ตัวอย่าง เนื้อ เยื่อสด ผสมในน้ำกลั่นโดยใช้เครื่องปั่นความเร็วสูง ซึ่งเนื้อ เยื่อจะถูกแยกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆโดยละเอียด

จากผลการวิจัยพบว่าวิธีแรกดีที่สุด ตัวอย่างสามารถถูกหยิบถือได้ง่าย และติดแน่นอยู่บนแม่คิงก์ ส่วนสองวิธีหลังพบว่าการสูญเสียบางธาตุไปบ้าง นอกจากนี้ อีกวิธีหนึ่งคืออบละเอียด เป็นผง (Kliwer et al.) โดยใช้วิธีการแช่เย็นจนแข็งภายในสุญญากาศ แล้วบดเป็นผงละเอียด ต่อไปใช้กาวโพลีสตีเร็น (polystyrene) ที่เจือจางมากเพื่อเกาะผงตัวอย่างไว้บนแม่คิงก์ หรืออาจเผาที่ 500°C ซึ่งสารอินทรีย์ถูกเผาไป จึงเป็นการลดแม่คราเวนค์ แต่ข้อเสียคือธาตุระเหยได้ (เช่น ไอโอดีน) จะทำให้พลาดในการวิเคราะห์ได้ ถ้าเผาที่อุณหภูมิค่า จากนั้นละลายด้วยกรดไนตริก (nitric acid) ซึ่งจะละลายสารอินทรีย์ได้เป็นส่วนใหญ่ จากนั้นวางสารตัวอย่างบนกระดาษกรองนุค เคลอฟอร์

อาจเตรียมสารตัวอย่างชนิดนี้โดยวิธีย่อยเมือก (wet digestion) ซึ่งเป็นวิธีการย่อยโดยใช้สารเคมี เช่น กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) หรือกรดไนตริก (nitric acid) เข้มข้น เป็นต้น แต่กรดที่ใช้ต้องบริสุทธิ์พอสมควร (Campbell et al.) จากนั้นหยดสารละลาย (มีฤทธิ์ เป็นกรด) บนแผ่นคาร์บอนบางๆและทำให้แห้ง

วิธีการทั้งหมดข้างต้นนั้น เป็นการเตรียมสารตัวอย่างลักษณะบาง ถ้าเตรียมแบบ เป้าหนาทำโดยแช่เย็นแข็งแบบแห้ง จากนั้นอัด เป็น เม็ด ตัวอย่างพวกนี้อาจ เป็นหนองแมลงวัน หรือแมลงอื่นๆ ซึ่งผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ธาตุเฮรอส นอกจากนี้ อาจ เป็นการศึกษาการแปร ความ เข้มข้นของคลอรีน (chlorine) ในตัวอย่าง หรือสำหรับทะเล หรือศึกษาผลของการแปรความ เข้มข้นซึ่งก่อผลกับใบตัวอย่างไร หรือหาความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุในดินกับปริมาณธาตุ ซึ่งถูกพืชดูดไป เป็นต้น

ตัวอย่างชีวภาพของเหลว เช่น เลือด ซีรัม น้ำลาย ฯลฯ มักเตรียมโดยหยดของเหลวบนแมคกิงก์บาง (อาจเป็นคาร์บอนหรือพลาสติก) จากนั้นปล่อยให้แห้ง ปัญหาคือในบางกรณีตัวอย่างอาจมีลักษณะ เป็น เกล็ด เมื่อแห้ง หรือแมคกิงก์อาจฉีกขาด เป็นต้น แก้ไขโดยใช้พลาสติกบางปิดทับสารตัวอย่างด้านบนอีกชั้นหนึ่ง หรืออาจเตรียมตัวอย่าง เหล่านี้โดยทำให้แห้งแล้ว เหยาก็ได้

พวกน้ำย่อย จัดว่ามีโมเลกุลใหญ่และประกอบด้วยธาตุที่จำเป็นในการ เกิดปฏิกิริยาเคมี ฮีโมโกลบิน (hemoglobin) มีเหล็ก 0.3% โดยน้ำหนัก

ประโยชน์ด้านการแพทย์คือวิเคราะห์ธาตุเฮรอส (บางธาตุ) ในคนไข้ อาจบ่งถึงอาการของโรคซึ่งสรุปไว้ในตาราง 8-1

ตาราง 8-1 ตัวอย่างโรคและการขาดธาตุ เฮอร์สที่สัมพันธ์กัน

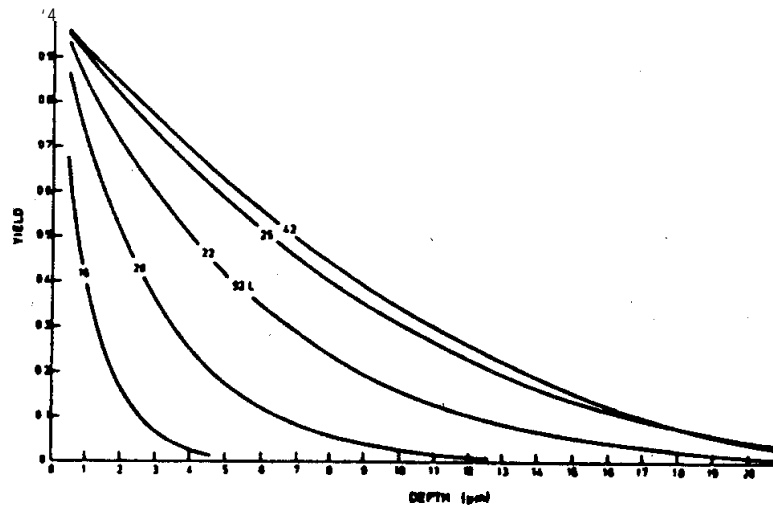
คณะวิจัย	โรคของคนไข้	ผลการวิเคราะห์
Kliwer	เม็ดเลือดสลายตัว	ผิวหนังมีปริมาณผิดปกติพวก tin Cd และ Mo ขาด [*] Br
Watson	เม็ดเลือดสลายตัว	พบอาการ เช่น เดียวกันแต่ Zn เกินในตัวอย่างเลือด
Barnes	มาลาเรียในหนู	ในเม็ดเลือดแดงมีปริมาณเพิ่มของ K Ca Cu และ Zn
Lear	-	พบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นแคดเมียมในไตกับอายุและโรค
Valkovic'		ธาตุเฮอร์สในเส้นผมให้ข้อมูลความเข้มข้นในร่างกาย

8.5 ตัวอย่างชนิดหนา

เหตุผลสำคัญในการใช้ตัวอย่างชนิดหนา เนื่องจากง่ายและสะดวก ทุ่มเวลาในการเตรียมตัวอย่าง เช่น ถ้าเป็นเนื้อเยื่อ อาจตัด เป็นชิ้น เล็กๆ แล้วใช้อุปกรณ์ยึด เพื่ออามรังสีได้โดยตรง ข้อได้เปรียบคือลดการเปราะ ระเบิด ใดๆ และบางกรณีพวกกระดูก และ เส้นผม เตรียมให้เป็นสารตัวอย่างชนิดบางได้ยาก ข้อเสียเปรียบของการใช้ตัวอย่างชนิดหนามีมาก แต่จำแนกเป็นส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

(* คำว่า "ขาด" ธาตุใด หมายถึงร่างกายมีธาตุนั้นๆ ในปริมาณต่ำกว่าปกติ)

- (1) ตัวอย่างมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แม้ปริมาตรของตัวอย่างชนิดหนึ่งจะมีมาก แต่การเปล่งเอ็กซ์เรย์มักเกิดบริเวณพื้นหรือมากที่ผิวหน้า ความสัมพันธ์แสดงในรูป 8.1 ดังนั้น ผลที่ได้อาจไม่ใช่ส่วนประกอบของธาตุทั้งหมดในก้อนตัวอย่างดังกล่าว



รูป 8.1 ความสัมพันธ์ของยิลด์รังสีเอ็กซ์ที่ความลึกต่างๆในตัวอย่าง เหล็กกล้า เส้นกราฟสมนัยกับค่า Z ออบตัวอย่างด้วยโปรตอน 2.5 MeV

- (2) ความร้อนในสารตัวอย่างจะมีมาก เนื่องจากใช้ลำอนุภาคมีพลังงานมาก แต่ถ้าใช้พลังงานต่ำจะสูญเสียความไวในการวิเคราะห์
- (3) การคำนวณส่วนประกอบของธาตุ ทำได้ยากกว่าตัวอย่างชนิดบาง เช่น ต้องทราบส่วนประกอบของเมทริกซ์และการกระจายตัวของธาตุ เซเรสที่ประกอบอยู่ เนื่องจากอนุภาคตกกระทบจะลดปริมาณพลังงานเมื่อมันวิ่งผ่านไป ในเนื้อสารตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องรวมการเปล่งรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ระยะทางเดินของอนุภาค เรียกว่า เป็นการ "อินทิเกรต" อาจแก้ปัญหาโดยวิธีการ "อินเทอร์นัลสแตนดาร์ด"
- (4) วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (absorber) อาจจำเป็นต้องใช้ในบางกรณี

8.6 การประยุกต์ใช้กับตัวอย่างชนิดอื่นๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีตัวอย่างชนิดอื่นๆอีกที่ใช้เทคนิค PIXE วิเคราะห์ จำแนกได้ดังนี้

- (1) ธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์หิน อาจทำได้ถึง 28 ธาตุ ซึ่งต้องวัดทั้ง เอ็กซ์เรย์และแกมมา
- (2) นิติเวชวิทยา เช่น พิสูจน์เขม่าดินปืน (เมื่อมีการยิงปืนแล้ว)
- (3) โบราณวัตถุ ใช้หาอายุโบราณวัตถุโดยดูจากปริมาณความเข้มข้นของธาตุ
- (4) สารที่อยู่ในสถานะของแข็ง เช่น สารกึ่งตัวนำ เพื่อหาความบริสุทธิ์หรือหาส่วนประกอบของ เหล็กกล้า เป็นต้น
- (5) การหาสถานะทางเคมี ประโยชน์ด้านนี้คือใช้หาสถานะของบางโมเลกุลในอากาศหรือสิ่งแวดล้อมที่ต้องการสำรวจ เพื่อสรุปผลในด้านมลภาวะนั้นเอง การวิเคราะห์ได้ผลสอดคล้องกับวิธีการอื่น แต่มีนักวิจัยหลายกลุ่มสรุปผลว่ามีการ เกิด เส้น เอ็กซ์เรย์ซ้อนกันเหมือนลักษณะดาวหาง (เช่น Burkhalter et al., Deconninck, Hurlwy and White, Gohsi et al.)

8.7 บทสรุป

สามารถประยุกต์ใช้เทคนิค PIXE ได้กับหลายสาขาวิชา โดยจำแนกตามลักษณะตัวอย่างต่างๆถึง 5 ลักษณะใหญ่ๆ เช่น ละอองอากาศ ตัวอย่างชีวภาพและชีวการแพทย์ ตัวอย่างชนิดบาง ตัวอย่างชนิดหนา เป็นต้น สำหรับตัวอย่างชนิดหนา มีคุณสมบัติเด่นคือความง่ายในการวิเคราะห์ แต่อาจมีข้อยุ่งยากในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่า PIXE มีความเหมาะสมในงานวิเคราะห์ธาตุเธรส

ข้อได้เปรียบของ เทคนิค PIXE

- (1) สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน (อาจถึง 20 ธาตุ)
- (2) ในการปฏิบัติการวิเคราะห์เพียงหนึ่งครั้ง สามารถวิเคราะห์ลำดับธาตุตามตารางธาตุได้ ซึ่งความไวในการวิเคราะห์ค่อนข้างคงที่ สำหรับธาตุมีค่า $Z > 12$ จะแปรค่าไม่เกิน 3 เท่า (จากค่ากลาง)
- (3) มีความไวในการวิเคราะห์สูง สามารถวิเคราะห์ปริมาณต่ำสุดได้ถึง 10^{-6} - 10^{-7} ซึ่งปริมาณตัวอย่างอาจน้อยๆจนถึง 10^{-15} g
- (4) ใช้เวลาน้อย โดยทั่วไปประมาณ 2-5 นาที
- (5) ตัวอย่างไม่ถูกทำลาย

ข้อเสียเปรียบของ เทคนิค PIXE

- (1) เกิดการแทรกสอดในธาตุเบา คือ เอ็กซ์เรย์อนุกรม K และ L ทำให้ความไวลดลง
- (2) ตัวอย่างชนิดบาง จะเหมาะสมที่สุดสำหรับ PIXE (ขนาดน้อยกว่า 1 mg/cm^2)

อนึ่ง ราคาของการวิเคราะห์ด้วย PIXE ต้องแยกกล่าวตามกรณี คือถ้าเป็นห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องเร่งอนุภาคอยู่แล้ว และใช้ประโยชน์อื่นๆร่วมด้วย ลักษณะดังกล่าวถ้าวิเคราะห์โดยใช้ PIXE จะราคาถูกและผลแน่นอนกว่าวิธีการอื่น แต่ถ้าต้องสร้างเครื่องเร่งเพื่อการวิเคราะห์โดย PIXE เพียงอย่างเดียว ราคาจะแพงเกินความจำเป็น

นอกจากนี้ ยังได้มีการเปรียบเทียบ เทคนิค PIXE กับ XRF ซึ่งนักวิจัยมากกลุ่มได้ทำการศึกษาและอธิบายข้อเปรียบเทียบ สรุปได้ดังนี้

ตาราง 8 - 2 สรุปผลเปรียบเทียบเทคนิค PIXE และ XRF

กลุ่มนักวิจัย (ปี พ.ศ.)	ผล
Kliwer et al. (1972)	PIXE มีความไว เหนือกว่า XRF
Perry and Brady (1973)	α 30 MeV ให้ผลดีกว่า เอ็กซ์เรย์จาก Mo สำหรับธาตุเบา ($Z < 22$) โปรตอนพลังงานต่ำกว่า ให้ผลดีกว่า α สำหรับธาตุหนักๆ
Cooper (1973)	ความไวใกล้เคียงกันสำหรับโปรตอนพลังงานต่ำ และโฟตอน
Couldong & Jaklevic (1973)	สำหรับเหล็ก XRF มีขีดจำกัดค่าสุดในการวิเคราะห์ 1 ppm และ 4 ppm
Johansson (1976)	PIXE มีความไวกว่า XRF

การเปรียบเทียบทั้งสองเทคนิค อาศัยความไว เป็นเกณฑ์ตัดสิน เนื่องจากความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์นั้น เปรียบเทียบได้ยาก ขึ้นกับรูปร่างของสารตัวอย่าง พวกฟิล์มบาง อาจใช้ได้ทั้งสองวิธี

ส่วน เทคนิคอื่นๆไม่มีผลการศึกษา เปรียบเทียบ เสนอไว้

แบบฝึกหัดบทที่ 8

1. จุดประสงค์หลักในการวิเคราะห์ aerosol คืออะไร?
2. แคมกิ้งสำหรับจับแอร์โรซอลมีอะไรบ้าง? เปรียบเทียบได้หรือไม่?
3. ตัวอย่างของ เทลวที่ใช้ PIXE วิเคราะห์มีอะไรบ้าง? ข้อมูลที่ได้นำไปใช้ประโยชน์อย่างไร?
4. การเผา อาจทำลายธาตุที่ระเหย เช่น ¹I-125 แต่อาจมีผลดีบ้าง คืออะไร?
5. ข้อเสียเปรียบของตัวอย่างแบบหนา มีอะไรบ้าง?
6. ถ้ามีเส้นผม ต้องการวิเคราะห์โดยเทคนิค PIXE จะใช้ตัวอย่างลักษณะบางหรือหนา ถ้าชนิดหนาจะมีผลเสียจากคำตอบในข้อ 5 เกี่ยวข้องหรือไม่ อธิบายพร้อมทั้งเสนอแนะวิธีแก้ไข
7. วิเคราะห์ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของ PIXE