บทที่ 5
การจัดเตรียมการทดลอง PIXE

5.1 บทนำ

สืบเนื่องจากบทที่ 4 ซึ่งเป็นการแนะนำเทคนิคของ PIXE ในบทนี้จะได้เสนอทฤษฎีเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการทดลองด้วยเทคนิค PIXE เริ่มจากปริมาตรที่ใช้ทำการอาบรังสี การตรวจวัดเอ็กซ์เรย์ที่ได้ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์สเปคตรัมที่ปรากฏ ซึ่งรวมถึงปรากฏการณ์แทรกสอด (interference) การเตรียมสารตัวอย่างและปรากฏการณ์ดูดกลืนพลังงานภายในสารตัวอย่าง ทุกหัวข้อได้แนะนำทฤษฎี ปัญหาต่างๆที่เกิดซึ่งได้จากบทความต่างๆในวารสารต่างประเทศ และในบางกรณีเป็นความเห็นของผู้เขียนเอง

อย่างไรก็ตาม เนื้อหาเกี่ยวกับ PIXE ยังมีแนะนำต่ออีกในบทที่ 6 เกี่ยวข้องกับแนวทางการตัดสินใจเลือกเทคนิคการวิเคราะห์ (ถ้ามีโอกาส)

5.2 ปริมาตรที่ทำการอาบรังสี

ในยุคแรกเริ่มใช้ PIXE นักวิทยาศาสตร์ใช้ห้องทดลองที่ได้รับการออกแบบสำหรับงานด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ (nuclear physics) แต่ในปัจจุบันมีหลายแห่งใช้ห้องทดลองที่มีระบบกึ่งอัตโนมัติ ทั้งการเปลี่ยนสารตัวอย่างและการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบห้องทดลองต้องคำนึงถึงประโยชน์ใช้สอยอื่นๆอีกด้วย ควรใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างได้หลายแบบ สิ่งสำคัญคือ

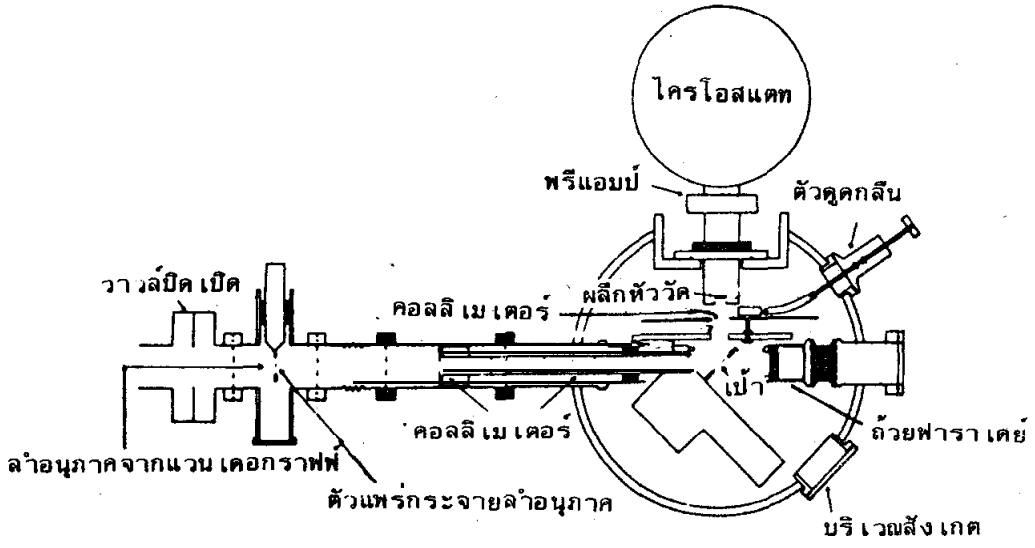
(1) เกิดแบคกราวนด์ต่ำ

(2) ลำอนุภาคมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความเข้มพอสมควร

(3) ลักษณะการจัดอุปกรณ์ ต้องมีคุณสมบัติทางเรขาคณิตที่เหมาะสม

(4) กลไกการเปลี่ยนสารตัวอย่าง หรือวัสดุดูดกลืน ต้องมีความสะดวกและปลอดภัยต่อผู้ทำการทดลอง และเหมาะสมต่อเงื่อนไขการทดลอง

รูป 5.1 แสดงโครงร่างของปริมาตรที่ได้รับการออกแบบตามทฤษฎีดังกล่าว ถ้ามีการเปลี่ยนสารตัวอย่าง จะทำภายในปริมาตรโดยยังคงรักษาสภาวะสูญญากาศไว้ เป้า (หรือสารตัวอย่าง) ติดตั้งอยู่บนขาตั้งซึ่งเลื่อนตำแหน่งได้ และอุปกรณ์ทุกส่วนดังกล่าวจะถูกบรรจุอยู่ในถาดที่เลื่อนได้ ซึ่งจุสารตัวอย่างได้ถึง 35 ตัวอย่าง กลไกการเปลี่ยนเป้าดัดแปลงจาก



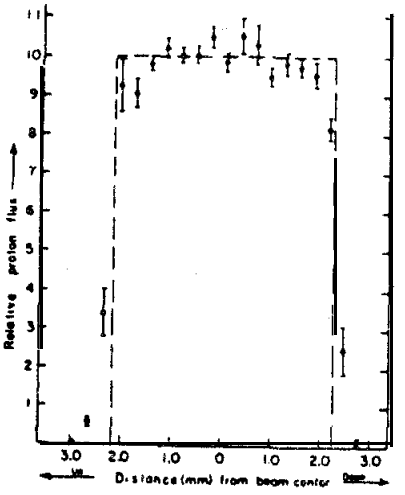
รูป 5.1 ตัวอย่างปริมาตรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย PIXE

ลักษณะการเปลี่ยนแผ่นสไลด์ จัดตำแหน่งของเป้าโดยใช้สกรูไมโครมิเตอร์ (micrometer screws) ซึ่งติดอยู่ ณ ตำแหน่งยึดสารตัวอย่าง

การลดแบคกราวนด์ภายในปริมาตร ทำโดยเลือกใช้วัสดุที่ก่อให้เกิดแบคกราวนด์น้อยสุดถ้าลำอนุภาคบังเอิญชน โดยทั่วไปใช้อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง เหตุผลคือ แม้อลูมิเนียมจะเกิดเปล่งรังสีเอ็กซ์ จะเป็นเพียงชนิดพลังงานต่ำเท่านั้นแต่มีความเข้มสูง แก้ไขโดยใช้คอลลิเมเตอร์บังคับลำเอ็กซ์เรย์ซึ่งคอลลิเมเตอร์นี้ทำจากอลูมิเนียมเช่นกัน จึงถือว่าได้กำจัดเอ็กซ์เรย์ที่เกิดจากโปรตอนซึ่งกระเจิงจากคอลลิเมเตอร์และจากเป้า อย่างไรก็ตาม

ภายใน เนื้ออลูมิเนียมย่อมต้องมีสาร เจือปะปนอยู่บ้าง ซึ่งจะ เป็นต้นกำ เนิด เอ็กซ์ เรย์ได้ แก้ไข โดยใช้ เท็ฟลอน (teflon) ทำทุกอุปกรณ์ที่คาดว่าจะ เปล่งรังสี เอ็กซ์ เข้าสู่หัววัด คอลลิ เม เตอร์ ก็มีศักยภาพในการผลิตแบคกราวนด์ความ เข้มสูง เช่นกัน ทำการลดปริมาณนี้โดย เลือกใช้วัสดุทำ คอลลิ เม เตอร์ให้ เหมาะสม โดยทั่วไปมักใช้คาร์บอน คู่กับการใช้โปรตอนพลังงานต่ำกว่า 1.6 MeV เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอนุภาคนี้มีช่วง 1-10 มม.

ลำอนุภาคต้องมีคุณสมบัติ เป็น เนื้อ เดียว ซึ่งจำ เป็นอย่างยิ่งสำหรับปริมาณวิ เคราะห์ ทำโดยกวาดลำอนุภาคซึ่งถูกโฟกัสอย่างดีไปยังคอลลิ เม เตอร์ หรือโดย เพิ่มตัวกระจายลำอนุภาค ซึ่งมีลักษณะ เป็นแผ่นบางๆ จุดประสงค์คือ เพื่อให้คอลลิ เม เตอร์ เลือกบังคับ เฉพาะส่วนที่อยู่กึ่งกลาง ลำอนุภาคที่แพร่กระจายผ่านไปได้ หรืออาจใช้แม่ เหล็กกวาดลำอนุภาค ผู้วิ เคราะห์ต้องทดสอบ ดูว่า วิธีการใดที่ เลือกมาใช้ก็ตาม เหมาะสมต่อความต้องการหรือไม่ ในรูป 5.2 เป็นตัวอย่าง ของลักษณะ เป็น เนื้อ เดียวกันของลำอนุภาค

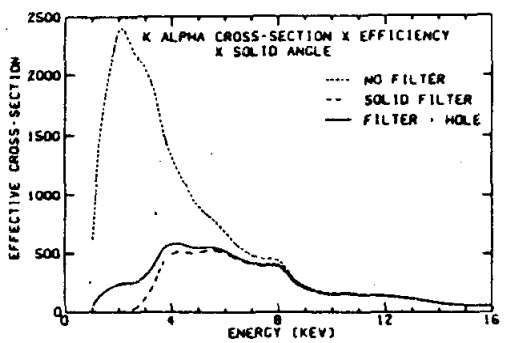


รูป 5.2 การกระจายความ เข้มของลำโปรตอนที่ใช้ เทคนิค PIXE

การใช้วัสดุแผ่นบางช่วยแพร่กระจายลำอนุภาค ง่ายในการจัดการทดลองที่สุด แต่ ต้องใช้ลำอนุภาคมีความ เข้มมาก เนื่องจากมีการลดความ เข้มถึง 10-20 เท่า ต้อง เลือกใช้

วัสดุที่จะก่อให้ 90-95% ของพื้นที่อุปกรณ์นี้ถูกลำอนุภาค เคลื่อนผ่าน และต้องจัดให้อุปกรณ์อยู่ใกล้หัววัดมากที่สุด ดังนั้น แบคกราวนด์ย่อม เพิ่มมากขึ้น อาจแก้ไขโดยใช้อลูมิเนียมแผ่นบาง 9 มิลลิกรัม/ซม.^{2} มีวัตถุกำบังอย่างดี และวางห่างจาก เป้า 1 เมตร อย่างไรก็ตาม ปริมาณวิเคราะห์อาจมีข้อผิดพลาด (error) น้อยกว่า 5% โดยประมาณ นักวิเคราะห์ส่วนใหญ่มักจัดให้หัววัด เอ็กซ์เรย์ตั้งฉากกับลำอนุภาค ให้สารตัวอย่างอยู่ใกล้หัววัดมากที่สุด (ประมาณ 2-3 ซม. หรือน้อยกว่า)

กรณีวิเคราะห์ธาตุมีค่า Z ต่ำ เช่น ซัลเฟอร์ (sulphur) ซึ่งปะปนอยู่กับธาตุมีค่า Z สูงกว่า ลักษณะ เช่นนี้ เหมือนกับแบคกราวนด์เด่นจาก เบรมสตราห์ลังก์ ธาตุที่สนใจจะวิเคราะห์กลับมีความไวลดลงอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณรบกวนของต้นกำเนิดดังกล่าว แก้ไขปัญหาโดย เพิ่มความ เข้มของลำอนุภาคไม่ได้ ต้องใช้ตัวดูดกลืนช่วย ตัวดูดกลืนในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุมีคุณสมบัติ เด่นในการดูดกลืนพลังงานอนุภาค มักใช้ฟิล์มมิลาร์ (Mylar film) ขนาด 10 มิลลิกรัม/ตร.ซม. หรืออาจใช้ 2 ตัวดูดกลืนที่ต่างกัน และ 2 ลำอนุภาค มีพลังงานต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่จัดอยู่ในช่วงค่า Z ต่างกันมากๆ หรืออีกวิธีหนึ่งคือ เจาะรู เล็กๆที่ตัวดูดกลืน เพื่อให้ เอ็กซ์เรย์พลังงานอ่อนๆ เข้าสู่หัววัด แต่มุมโซลิดที่หัววัดจะน้อยกว่า เอ็กซ์เรย์พลังงานสูง รูป 5.3 แสดงพื้นที่ภาคตัดขวางของ เส้น K_α ซึ่งประสิทธิภาพและ



รูป 5.3 ค่ายังผลของพื้นที่ภาคตัดขวาง K_α โดยใช้วัสดุดูดกลืน เจาะรู เล็กๆ ทำจาก เคปตัน 30 มิลลิกรัม ต่อ ตร.ซม. รูมีขนาด 0.1 เท่าของหัววัด

มุมโซลิดของหัววัด เกิดจากการทดลอง 3 ลักษณะ เทคนิค เช่นนี้จะ เพิ่มความไวขึ้น 3 เท่า สำหรับธาตุขนาดกลางและขนาดหนัก เพื่อความสะดวกควรใช้อุปกรณ์ควบคุมการ เลือกตัวดูดกลืน จะดีกว่าใช้มือ เปลี่ยน เองอย่างใกล้ชิด ส่วนประจุของลำอนุภาคมักวัดจากถ้วยฟารา เดย์

โดยทั่วไปมักจัดระบบให้ทำงานภายใต้สภาวะสูญญากาศประมาณ 10^{-5} - 10^{-6} ทอร์ (torr) อาจใช้ปั๊มพ์ชนิดน้ำมันหรือปรอทก็ได้ เพื่อกำจัดการ เปรอะ เปื้อนธาตุหนักบน เป้า นอกจากนี้ ถ้า เป็นธาตุมีค่า Z ต่ำ มักใช้หัววัดแบบไม่มีหน้าต่าง หรือมีลิ้นรูป เห็ด (poppet valve) เป็นตัวสารตัวอย่างได้ ณ ความดันบรรยากาศ

5.3 ทฤษฎีการตรวจวัดรังสี เอ็กซ์

ทฤษฎีพื้นฐานในการตรวจวัด เอ็กซ์ เรย์แยกได้ เป็น 2 แบบ ดังนี้

(1) ตรวจวัดการกระจายพลังงาน

(2) ตรวจวัดการกระจายความยาวคลื่น

หัววัดประ เภทแรกจะทำการบันทึกโฟตอนจากพลังงาน เอ็กซ์ เรย์ และสร้างส เปคตรา ดังแสดงในรูป 5.2 (โดยอาศัยอุปกรณ์อิ เล็กทรอนิกส์ช่วย) โดยทั่วไปใช้หัววัด Si (Li) ซึ่งมี เรโซลูชัน (resolution) อยู่ในช่วง 150-180 eV หัววัดมีพื้นที่ 30 มม.^{2} หัววัดชนิดนี้ทำงานได้ เร็ว เนื่องจากสามารถนับวัดทุกพลังงาน (ช่วงที่ได้ เลือกไว้) อย่างต่อ เนื่องโดยไม่ต้อง เริ่มตั้ง เครื่องใหม่

ส่วนระบบหัววัดที่ตรวจวัดการกระจายของความยาวคลื่นจะทำงานโดยมีมุมโซลิด เล็กกว่าระบบแรก และมีประสิทธิภาพน้อยกว่า ใช้หลักการกวาดหัววัด (scanning) เพื่อบันทึกช่วงความยาวคลื่น เรโซลูชันอยู่ในอันดับ 10 eV แต่ยังไม่ เคยปรากฏว่าถูกประยุกต์ใช้กับการวิ เคราะห์ธาตุหรือหาสถานะทาง เคมี

การ เลือกใช้หัววัดขึ้นกับลักษณะงานวิ เคราะห์ ถ้าต้องการ เรโซลูชันดี เยี่ยมต้องใช้ระบบกระจายความยาวคลื่น แต่จะมีขีดจำกัดในกรณีที่ส เปคตรัมมีการแทรกสอด (ด้วยพลังงาน

อื่น) ถ้าหัววัดประเภทกระจายพลังงานจะเกิดพีคกว้างหรือบวมขึ้นอาจมีการซ้อนพีคพลังงานบ้าง และถ้าเป็นกรณีซับซ้อนมากๆอาจทำให้ผลปริมาณวิเคราะห์ผิดพลาด แต่ใช้เวลาน้อย และบางกรณีมีกไม่มีปัญหาการแทรกสอดพลังงานใดๆ จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง

หัววัดที่ใช้หลักการกระจายพลังงานจะมีประสิทธิภาพสูง มุมโซลิดที่หัววัดรองรับอยู่มีขนาดใหญ่ จึงสามารถใช้ได้กับต้นกำเนิดพลังงานต่ำ (เปรียบเทียบกับหัววัดระบบกระจายความยาวคลื่น) ในการวิเคราะห์ธาตุเธรสด้วยเทคนิค PIXE บางครั้งแบคกราวนด์มีค่าสูงซึ่งถูกนับวัดเช่นเดียวกับพลังงานพีคที่สนใจวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม สำหรับ PIXE ยังคงนิยมใช้หัววัดระบบกระจายพลังงาน ตัวอย่างปัญหาการแทรกสอดพลังงาน เช่น วิเคราะห์ธาตุปะปนกันอยู่ Ba-Ti, K-Cd และ Pb-S ถ้าเป็นกรณีนี้ข้อเสนอแนะคือน่าจะใช้หัววัดทั้งสองระบบ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ซึ่งน่าจะให้ผลถูกต้องดีขึ้น และได้ข้อมูลมากกว่าจะเลือกใช้เพียงระบบใดระบบหนึ่งเท่านั้น

อาจมีข้อสงสัยว่าจะต้องทำการหาประสิทธิภาพของหัววัดในการวัดพีคพลังงานทุกค่าก่อนหรือไม่? (วิธีการเช่นนี้ปฏิบัติกับหัววัด NaI(Tℓ)) คำตอบคือไม่จำเป็นต้องตรวจสอบเสมอไป หลักการทั่วไปคือ ประสิทธิภาพของหัววัดจะแปรตามพลังงานเอ็กซ์เรย์และ ณ พลังงานต่ำๆอาจมีการดูดกลืนพลังงานที่บริเวณหน้าต่างหัววัด หรือถ้าพลังงานสูงๆอาจมีการทะลุทะลวงผ่านผลึกออกไปได้ แต่ถ้าเป็นกรณีปริมาณวิเคราะห์จำเป็นต้องหาประสิทธิภาพของหัววัดก่อนทำโดยใช้ต้นกำเนิดเอ็กซ์เรย์เป็นหลักในการเทียบวัด (calibrate) ซึ่งบางครั้งประสิทธิภาพของหัววัดที่ได้จากการทดลองอาจไม่ตรงกับค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตได้แจ้งไว้ (ขึ้นกับการคำนวณและข้อกำหนดปลีกย่อยอื่นๆต่างกัน ทำให้ค่าที่ได้โดยประมาณแต่ละกรณีต่างกันไป) และถ้าเป็นเอ็กซ์เรย์พลังงานต่ำ เทคนิคดังกล่าวจะถูกจำกัด เนื่องจากไม่มีต้นกำเนิดพลังงานต่ำๆซึ่งประการสำคัญคือเป็นช่วงที่ประสิทธิภาพของหัววัดแปรตามพลังงานที่แปรไปอย่างรวดเร็ว แก้ไขโดยใช้ฟิล์มบางๆที่ทราบส่วนประกอบแน่นอน จากนั้นหาประสิทธิภาพตามสมการ (4-10) ซึ่งอาจคำนวณประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากพื้นที่ของพีคก็ได้

5.4 อิเล็กทรอนิกส์

ประสิทธิภาพของหัววัดย่อมขึ้นกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักต่อวงจรวิเคราะห์กับคอมพิวเตอร์ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการประมวลผลข้อมูล หัววัดจะทำการรับสัญญาณจากประจุ แล้วส่งต่อไปยังพรีแอมพลิไฟเออร์ (pre-amplifier) ซึ่งทำหน้าที่แปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ FET ในการนี้ต้องรักษาไฟกระแสตรงให้มีระดับคงที่ ทำโดยใช้ตัวต้านทานป้อนกลับ หรือป้อนกลับด้วยพัลส์ออพติคัล (pulsed-optical feedback) วงจรขยาย (amplifier) จะทำหน้าที่ปรับสัญญาณ เพื่อตอบสนองเงื่อนไขการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นตัวเลข หรือที่เรียกย่อๆว่า ADC (analog-to-digital-converter) จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณแบบมัลติแชนนัล (multichannel analyzer) ในปัจจุบัน วงจรขยายถูกออกแบบให้สามารถนับวัดได้ค่าสูงๆ ทั้งยังมีคุณภาพของสัญญาณดี

ปัญหาคือปรากฏการณ์สัญญาณจากประจุจำนวนมากๆ เข้าสู่หัววัดในเวลาเดียวกัน และช่วงเวลาตายของหัววัด (dead-time) ถ้าเป็นกรณีแรก ฟลักซ์ของโฟตอนพลังงานสูง (อาจเป็นรังสีแกมมาถูกทำให้กระเจิงเข้าสู่หัววัด) ตกกระทบหัววัดในเวลาเดียวกับเอ็กซ์เรย์ ผลปรากฏจะเป็นค่านับวัดจากโฟตอนพลังงานต่ำ ทำให้การวิเคราะห์เทคนิค PIXE เกิดผิดพลาดได้ แก้ปัญหาโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ตรึงให้ไม่มีการรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดใดๆ ในขณะที่หัววัดกำลังอยู่ในขบวนการประมวลผลสัญญาณอยู่ช่วงเวลาที่ขบวนสัญญาณถูกก่อขึ้นดังกล่าวนั้น เป็นดัชนีปรับปรุงระบบการทำงานของอุปกรณ์นับวัดได้ดี

ถ้าต้องทำการออกแบบวงจรเอง ต้องคำนึงถึงการหักเหของลำอนุภาค เนื่องจากถ้าแหล่งกำเนิดไอออนถูกควบคุมเป็นเวลานานๆ อาจเกิดการล่าช้าของสัญญาณได้ จึงมีการใช้ตัวหักเหไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic deflection) ข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือสารตัวอย่างถูกทำลายน้อยหรืออาจไม่เสียหายเลยก็ได้ และลดแบคกราวนด์ของปริมาตรนับวัด อาจใช้ลำอนุภาคที่มีความเข้มสูงได้ในการใช้แผ่นหักเบนลำอนุภาค มักควบคู่กับเทคนิคการกวาดลำอนุภาค

ซึ่งต้องศึกษาถึง เรโซลูชันในระยะว่างของตัวกลาง หรือ เรียกชื่อ เป็นส เปเชียล-เรโซลูชัน (spatial resolution)

5.5 การวิเคราะห์สเปคตรัม

วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์สเปคตรัมคือ เพื่อหาปริมาณธาตุที่มีปะปนอยู่ในสารตัวอย่าง ขั้นตอนแรกคืออ่านค่าพลังงาน (ที่ปรากฏในสเปคตรัม) และความเข้มของทุกๆพีคในสเปคตรัมของเอ็กซ์เรย์ ถ้าสารตัวอย่างมีเพียง 2-3 ธาตุปะปนอยู่ และพีคพลังงานแยกได้อย่างชัดเจน ย่อมไม่เป็นการยากที่จะวิเคราะห์บางกรณีที่ยุ่งยากคือมีหลายธาตุปะปนกันอยู่ และอาจมีการบดบังหรือซ้อนพลังงานเป็นต้น สิ่งสำคัญที่ช่วยในการวิเคราะห์คือความแม่นยำและรวดเร็วของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผลข้อมูล

การวิเคราะห์พีคในสเปคตราอาจทำได้หลายวิธี ดังนี้

(1) ใช้สูตรเกาเซียน (Gaussian) กับพีคที่สนใจวิเคราะห์ และใช้ฟังค์ชันโพลีนอเมียลกับกับแบคกราวนด์

(2) หักแบคกราวนด์ออกจากค่านับวัดที่ได้ จากนั้นวิเคราะห์พีคที่ซ้อนกันอยู่

(3) รวมผลจากกลุ่มแชนนัลที่สนใจ จากนั้นคาดคะเนแบคกราวนด์ แล้วจึงหาปริมาณวิเคราะห์โดยวิธีการเติมสารมาตรฐานลงในตัวอย่าง เช่น จากผลการวิเคราะห์เลือดของเบียร์สและคณะ (Bearse et al.) ได้วิเคราะห์ Fe, Cu, Zn, Se และ Rb เป็นปริมาณวิเคราะห์ ใช้ Pd เป็นสารมาตรฐาน นอกจากนี้ยังคำนวณหา K, Ca และ Ti ปัญหาที่เกิดคือ Cu มีพีคพลังงานต่ำและใกล้เคียงกับ K_α ของ Zn

ปัญหาสำคัญคือปรากฏการแทรกสอดพลังงาน เนื่องจากขีดจำกัดของเรโซลูชันของหัววัด Si(Li) ถ้าวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย ไม่น่าจะเป็นปัญหาใดๆในกรณีนี้ เพราะมีโค้ดสำหรับการวิเคราะห์อยู่แล้ว กรณีอื่นๆทั่วไป ต้องหาค่าแก้เกี่ยวกับปรากฏการณ์แทรกสอดเมื่อได้ตำแหน่งพีคแล้ว และทำการคำนวณพื้นที่ใต้พีคต่อไป ตัวอย่างเช่น K_α ของธาตุ Z จะ

เกิดการแทรกสอดพลังงาน K_β ของธาตุ (Z - 1) ส่วนธาตุอื่นที่มีค่า Z สูงกว่านี้ขึ้นไปจะมีพลังงานต่างกัน จึงไม่เป็นปัญหาใดๆในการนับวัด

พวกธาตุมีค่า Z ประมาณ 35 และค่าใกล้เคียงกันนี้ขึ้นไปจะเกิดปรากฏการณ์แทรกสอดพลังงานระหว่างเส้นเอ็กซ์เรย์ L ของธาตุกลุ่มนี้ กับเส้น K ของธาตุกลุ่มเบากว่า จึงสมควรอย่างยิ่งจะต้องคำนึงถึงและแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดได้ พวกธาตุใกล้เคียงตะกั่วจะเกิดการแทรกสอดระหว่างเส้น M ของธาตุกลุ่มนี้ กับเส้น K ของธาตุกลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur) ตาราง 5-1 แสดงตัวอย่างการแทรกสอดของพลังงานเอ็กซ์เรย์ที่มีค่าใกล้เคียงกันที่อาจเกิดขึ้นได้ ที่กล่าวว่าอาจเกิดขึ้นได้ หมายถึงบางกรณีอาจไม่เกิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณที่มีปรากฏในธรรมชาติของแต่ละค่าพลังงานและความไวของระบบวิเคราะห์

ถ้าไม่แก้ปัญหาเกี่ยวกับการแทรกสอดพลังงาน จะมีผลอย่างไร? คำตอบคืออาจมีผลถึงความถูกต้องในการวิเคราะห์ สมมติมีธาตุหนึ่งเปล่งเอ็กซ์เรย์เส้น K อย่างสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดกระตุ้นให้เกิดการเปล่งรังสี จึงเลือกใช้ K_α และ K_β เป็นพลังงานเทียบวัดเรโซลูชันของหัววัด หรือในกรณีที่ต้องการหาขนาดของเส้น L และ M แต่ในการทดลองไม่สามารถเลี่ยงเส้น K และ L ได้ แม้ว่าโอกาสในการเปล่งเอ็กซ์เรย์เส้น M จะมากกว่าเส้น L ก็ตาม ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดเนื่องจากหัววัดได้บันทึกค่าแทรกสอดพลังงาน K และ L ด้วย ในการวิเคราะห์แอร์โรซอล การแทรกสอดของคู่ Ba-Ti และ Pb-S เป็นกรณียากที่สุดในการวิเคราะห์

5.6 การเตรียมสารตัวอย่าง

ปัญหาสำคัญของเทคนิค PIXE คือการเตรียมสารตัวอย่าง กรณีง่ายสุดทำโดยอาบรังสีโดยตรงไปยังสารตัวอย่าง วิธีการเช่นนี้ประยุกต์ใช้กับสารตัวอย่างชีวภาพบางชนิดได้ เช่น ฟัน หรือสารตัวอย่างที่มีโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถเตรียมเป็นสารตัวอย่างชนิดบางได้ สิ่งที่ด้อยกว่าวิธีอื่นคือความไวของวิธีการจะน้อยกว่า และต้องอาศัยหลายสัมประสิทธิ์เป็นค่าแก้

โดยทั่วไปนิยมใช้เป้าชนิดบาง ส่วนจะกำหนดให้สารตัวอย่างอยู่ในรูปแบบ เช่นใดนั้น ขึ้นอยู่กับผู้ทดลองและสามารถจัดเตรียมได้หลายรูปแบบ (นับเป็นข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้) หลักในการพิจารณาคือความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์และความสะดวกของผู้วิเคราะห์

สิ่งสำคัญคู่กับการเตรียมสารตัวอย่างคือวัสดุที่ใช้ทำแบคกิงก์ (backing) ต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า Z ต่ำ และมีสารเจือปะปนอยู่น้อยที่สุด ทั้งนี้ เพื่อเลี่ยงพีคแทรกสอดกับพลังงานของธาตุที่สนใจ แบคกิงก์ควรมีลักษณะบาง เพื่อจะลดแบคกราวนด์เอ็กซ์เรย์ได้ดีแต่เพิ่มความไวของเทคนิค ท้ายสุดคือความแกร่งของแบคกิงก์ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญอันดับหนึ่ง เพื่อทนทานต่อสภาพการถูกอาบรังสี การจัดเคลื่อนย้ายตำแหน่ง และเหมาะสมต่อขบวนการเตรียมสารตัวอย่าง ตาราง 5-2 เสนอข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุที่นิยมใช้ทั่วไป การตัดสินใจเลือกดีที่สุดขึ้นกับสถานะการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่สามารถจัดให้ทุกพารามิเตอร์มีค่าเหมาะสมได้ในเวลาเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ฟิล์มคาร์บอน ถ้าลำอนุภาคที่มีความเข้มสูง อาจนับได้ว่าเป็นวัสดุดีเยี่ยมในการเลือกใช้ทำเป็นแบคกิงก์เพื่อให้ได้ความไวสูง (สารตัวอย่างปริมาณน้อยๆ) แต่มีความเปราะ ดังนั้น ไม่เหมาะสมกับงานที่มีธาตุหลายๆธาตุรวมกันอยู่ในสารตัวอย่าง หรืองานที่จัดต้องสารตัวอย่างบ่อยๆ

ข้อได้เปรียบของแบคกิงก์ขนาดบางคือก่อเบรมสตราห์ลังก์น้อย อาจเลือกใช้โพลีสไตรีน (polystyrene) หรือฟอร์มวาร์ (formvar) แผ่นบางๆแทนคาร์บอนได้ ซึ่งวัสดุดังกล่าวแกร่งกว่าคาร์บอน แต่ทนลำอนุภาคอาบได้น้อยกว่าส่วนฟิล์มมิลาร์ (mylar) และแคปตัน (kapton) ที่มีขายในท้องตลาดนั้นแข็งแรงมากแต่ก็มีความหนากว่ามาก จากผลการทดลองพบว่า เบรมสตราห์ลังก์จากแบคกิงก์ดังกล่าวเพิ่มขึ้น 15 เท่าในบริเวณช่วงธาตุที่มักเป็นที่สนใจวิเคราะห์ ความไวขึ้นกับความหนาของเป้าในช่วง 70-8000 ไมโครกรัม ต่อ ตร.ซม. ซึ่งผู้ทำการวิเคราะห์ต้องเลือกเงื่อนไขการทดลองว่าจะยอมสูญเสียความไวบ้าง (ในขีดจำกัดที่ยอมรับได้) แต่สะดวกในการหยิบถือสารตัวอย่างหรือไม่ นอกจากนี้ ในตาราง 5-2 ยังได้แนะนำ "นุคเคลอพอร์" (nuclepore) และ "มิลลิพอร์" (millipore) ซึ่งเป็นกระดาษกรอง ปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้พอสมควร เช่น กระดาษกรอง "วอทแมน"

การขาดไอโอดีนจะก่อให้เกิดสภาวะร่างกายมีไอโอดีนต่ำกว่าปกติ เรียกชื่อโรค "ไฮโปธัย-รอยด์" (hypothyroid) มีผลให้พลังงานที่ถูกสร้างในเซลล์มีน้อยลง ซึ่งเข้าใจว่าสารที่ทำให้เกิดคอพอก (goitrogenic substances) อื่นๆจะส่งผลเช่นเดียวกัน เช่นการมีธาตุดังต่อไปนี้มากเกินไป คือแคลเซียม (calcium) และฟลูโอรีน หรือขาดธาตุต่อไปนี้คือ วิตามินเอ ทองแดง หรือสังกะสี

ถ้ารับประทานไอโอดีนมากเกินไปมักไม่เกิดปัญหา เนื่องจากขับออกทางไตได้ง่าย

(6) เหล็ก (iron)

ในร่างกายสัตว์จะมีเหล็กเกาะกับโปรตีน เช่น ฮีโมโกลบิน (haemoglobin) โปรตีนของกล้ามเนื้อ (myoglobin) สารประกอบที่ไม่มีฮีม (non-haem compounds) เช่น เฟอร์ริติน ทรานส์เฟอร์ริน และฮีโมซิเดอริน (haemosiderin) และในน้ำย่อยที่จำเป็นต่อการหายใจและขนส่งอ็อกซิเจน

เหล็กในพลาสมามีปริมาณในช่วง 0.7-1.5 มิลลิกรัม/ลิตร จากพลาสมาเหล็กจะถูกดูดโดยไขกระดูก (bone marrow) เพื่อใช้สร้างฮีโมโกลบิน (haemoglobin) เหล็กถูกดูดซึมออกจากทางเดินอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดูโอดีนัม (duodenum) ซึ่งมักเป็นเหล็กในรูปเฟอร์รัส (ferrous) กรดแอสคอร์บิค (ascorbic) ช่วยเพิ่มการดูดซึม โดยลดเฟอร์ริค (ferric) ให้กลายเป็นเฟอร์รัส เหล็กในสารประกอบฮีมจะถูกดูดซึมโดยตรงเข้าสู่เซลล์เยื่อบุของลำไส้โดยไม่ต้องเปลี่ยนรูปการขับเหล็กออกจากร่างกายมีน้อยมาก โดยทั่วไปขับออกทางอุจจาระหรือน้ำดี

อาการเมื่อขาดธาตุเหล็กคือ ผิวหนังซีด เยื่อบุลูกตามีสีจาง เป็นโรคโลหิตจางชนิดเม็ดเลือดแดงมีเหล็กประกอบน้อย (hypchromic microcytic anaemia) ซึ่งสีจะจางนั่นเอง ปริมาณเข้มข้นในเลือดและไมโอโกลบิน (myoglobin) ในกล้ามเนื้อลดลง

7.3 ธาตุเธรสที่จัดเป็นมลภาวะ

ธาตุเธรสบางพวกจัดเป็นมลภาวะ (pollution) ในอากาศ ได้แก่ เบอร์รีเลียม (beryllium) นิคเกิล (nickel) แคดเมียม (cadmium) ตะกั่ว (lead) ซีลีเนียม (selenium) ปรอท (mercury) อาร์เซนิค (arsenic) และดีบุก (tin)

อาจจำแนกกลไกของสาเหตุการเกิดสารพิษจากธาตุเธรส ดังนี้

(1) ถ้าขาดธาตุเธรส ทำให้โครงสร้างของธาตุหรือส่วนประกอบสำคัญผิดไป (จากที่ควรจะเป็น) ดังนั้น จึงเกิดลักษณะเป็นพิษขึ้นได้

(2) อะตอมของสารพิษ (toxic) อาจไปแทนตำแหน่งของธาตุจำเป็นซึ่งร่างกายต้องการเป็นหลัก ซึ่งลักษณะเช่นนี้ ทั้งสองอะตอมต้องมีโครงสร้างทาง เคมี เหมือนกัน เจ้าของร่างกายดังกล่าวจะแสดงอาการขาดธาตุที่ถูกแทนที่ตำแหน่งดังกล่าว

(3) อาจ เป็นพิษโดยตรงกับ เซลล์ โดยมีการ เปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโปรตีน ผลคือ แสดงอาการผิดไปจากธรรมชาติที่ควร เป็น

โดยทั่วไป ธาตุที่มีการจัดตัวของอิ เล็กตรอนในวงโคจรนอกสุด เหมือนกัน (คืออยู่ในกลุ่ม เดียวกันในตารางธาตุ) มักจะแทนที่กันได้ เสมอ ดังนั้น แมงกานีสอาจแทนที่ด้วย เบอร์รีเลียม รูบิ เดียมแทนที่โปแตส เซียม (potassium) หรือซี เซียม (cesium) หรือธัล เลียม (thallium) ซัล เฟอร์ (sulphur) แทนได้ด้วย เธลลู เรียม (tellurium) หรือซิลิ เนียม และสังกะสีแทนได้ด้วยแคด เมียม (cadmium) หรือปรอท ผลของการแทนที่คืออาจ เกิดการกระตุ้นหรือแปลงหน้าที่ของน้ำย่อย (โดยทั่วไปจะลดการทำงานของน้ำย่อย)

7.4 ธาตุเธรสในมนุษย์

แยกกล่าวรายละ เอียด เป็นส่วนในน้ำ เลือด และใน เนื้อ เยื่อ ดังนี้

7.4.1 ธาตุเธรสในน้ำ เลือด

น้ำ เลือดจัด เป็นแหล่งที่ดีในการศึกษาส่วนประกอบของธาตุ เธรส เนื่องจาก เป็นแหล่ง

จัดส่งไปทั่วร่างกายส่วนต่างๆ ทั้งยังไม่เป็นการเสี่ยงต่อคนไข้ และไม่เป็นการรบกวนใดๆต่อคนไข้

ทฤษฎีพื้นฐานคือ อาการแสดงโรคภัยอาจเนื่องจากความเข้มข้นของธาตุเธรสในน้ำเลือดแปรไป ธาตุเธรสที่นิยมวิเคราะห์คือทองแดง เนื่องจากเป็นค่าที่ถูกกำหนดแน่นอน และการแปรค่าของทองแดงแสดงถึงโรคต่างๆหลายโรค อีกปรากฏการณ์หนึ่งคือ ถ้ามีการลดปริมาณของธาตุหนึ่ง อาจมีธาตุอื่นเพิ่มปริมาณมากขึ้นกลับกัน เช่น น้ำเลือดที่ขาดเหล็ก มีทองแดงเพิ่มมากขึ้นกว่าระดับปกติ เป็นต้น ตัวอย่างธาตุเธรสที่ทำการศึกษามาแล้ว มีดังนี้

(1) ทองแดง ในหญิงมีครรภ์จะมีทองแดงมากในน้ำเลือด หรือพวกมะเร็งในเม็ดโลหิต โรคโลหิตจางอย่างร้ายแรง เบาหวาน ไฮเปอร์ธัยรอยด์ (hyperthyroidism) โรคตับต่างๆ เป็นต้น

(2) เหล็ก ขาดธาตุเหล็กในโรคโลหิตจาง มาลาเรีย อาร์เซนิคเป็นพิษ และระบบประสาทปรวนแปร

(3) สังกะสี มีปริมาณลดลงในพวกต่อมน้ำเหลืองอักเสบ นิวโมเนียหรือปอดบวม เป็นต้น

ทั้งนี้ ปริมาณอ้างอิงของแต่ละธาตุเธรสต้องคำนวณหาจากคนปกติก่อน

7.4.2 ธาตุเธรสในเนื้อ da

นอกจากการหาปริมาณสัมบูรณ์ของธาตุเธรส บางกรณีหาปริมาณเป็นอัตราส่วนเปรียบกับธาตุอื่น เช่น ในเนื้อเยื่อมะเร็งจะมีอัตราส่วนของสังกะสีต่อโปแตสเซียมต่ำกว่าเนื้อเยื่อปกติ เป็นต้น เส้นผม เป็นเนื้อเยื่อชนิดหนึ่งที่ศึกษาได้ง่ายที่สุด มักใช้ตรวจระดับความเป็นพิษของตะกั่ว ปรอท และอาร์เซนิค ซึ่งจะมีปริมาณมากในเส้นผม ในทางตรงข้าม ถ้าขาดธาตุใดย่อมปรากฏธาตุนั้นๆด้วยปริมาณต่ำในเส้นผม ข้อควรระวังคือ สิ่งของเครื่องใช้ต่างๆอาจเป็นตัวเพิ่มปริมาณธาตุเธรสในเส้นผมได้ เช่น แชมพู ธาตุต่างๆในอากาศ และในการเตรียมสารเคมีต่างๆซึ่งอาจมีการติดค้างบนเส้นผมบ้าง

7.5 การเลือกเทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่างชีวภาพ

โดยทั่วไป นิยมใช้อนุภาคมีประจุเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดเอ็กซ์เรย์ เรียกชื่อย่อว่า PIXE ความเข้มข้นของส่วนประกอบธาตุเธรสมักมีค่าประมาณ > 1 ppm สิ่งที่ควรคำนึงถึงคือวิธีการเตรียมสารตัวอย่าง เพื่อให้มีรูปแบบเหมาะสมต่อการถูกกระตุ้น แต่ต้องไม่มีการสูญเสียธาตุเธรสหรือต้องไม่ก่อให้เกิดการเปรอะเปื้อน (contamination) ซึ่งที่นิยมใช้มีอยู่ 3 เทคนิค ดังนี้

(1) ตัวอย่างเนื้อเยื่อสด ทำให้แข็งตัว ณ อุณหภูมิต่ำมากๆ จากนั้นตัดเป็นชิ้นบางๆ ด้วยใบมีดโกน แผ่ชิ้นส่วนเล็กๆดังกล่าวไว้บนแบคกิงก์พลาสติค

(2) ตัวอย่างเนื้อเยื่อสด ทำให้คงรูปโดยใช้ฟอร์มาลิน (formalin) และฝังในพาราฟิน จากนั้นฝานเป็นชิ้นบางๆ วางบนแบคกิงก์บาง จากนั้นลอกเอาพาราฟินออก

(3) ตัวอย่างเนื้อเยื่อสด ผสมในน้ำกลั่น จากนั่นทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenized) ในเครื่องมือผสมซึ่งมีความเร็วสูง

ถ้าเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี วิธีการแรกน่าจะดีที่สุด เนื่องจากสะดวกในการจับถือและยึดแน่นดีกับแบคกิงก์ จากการศึกษาพบว่าทั้งสองวิธีหลังมีการสูญเสียธาตุไปบ้าง นอกจากนี้ ยังมีวิธีการเผาให้เป็นขี้เถ้า อาจใช้อุณหภูมิสูง 500°C (Kliwer et al.) ซึ่งสารอินทรีย์ถูกเผาไหม้ ลดปริมาณแบคกราวนด์ลงด้วย ซึ่งเพิ่มความไวของระบบ แต่จะสูญเสียธาตุที่ระเหยได้ แคมป์เบลและคณะ (Campbell et al.) ใช้วิธีย่อยแบบเหลวโดยใช้สารตัวอย่าง 0.25 กรัม ละลายในกรดไนตริคที่มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นหยดสารละลายลงบนแผ่นบางๆของถ่าน (carbon foil) ทิ้งให้ระเหย และเทคนิคเดียวกันนี้ แต่ใช้กระดาษกรองนุคเคลอพอร์ (nuclepore) ทำโดยนักวิทยาศาสตร์กลุ่มอื่น

นอกจากนี้ ตัวอย่างชนิดหนาของสารชีวภาพมีการเตรียมโดยแช่แข็งแบบแห้ง (freeze dried) เติมสารเจือบางชนิด จากนั้นอัดจนเป็นเม็ด หรือวิธีง่ายๆที่อาจใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลว เช่น เลือด น้ำเลือด น้ำลาย เป็นต้น ทำโดยหยดสารตัว-

อย่างบนแบคกิงก์ ซึ่งอาจทำด้วยพลาสติคบาง ผงถ่าน หรือกระดาษกรอง แล้วทำให้แห้ง ปัญหาสำคัญของ เทคนิค PIXE คือสารตัวอย่างมีลักษณะ เปราะบาง แตกหักง่าย หรืออาจ เผาสารชีวภาพ เหลว เหล่านี้ให้ เป็นขี้ เถ้าก็ได้

ข้อได้ เปรียบของตัวอย่างชนิดหนา มีดังนี้

(1) ขั้นตอนของวิธีการ เตรียมไม่ยุ่งยากซับซ้อน

(2) สะดวกในการ เตรียม ประหยัด เวลา และลดการ เปรอะ เปื้อน

ตัวอย่างชีวภาพบางชนิดไม่สามารถทำให้บางได้ (อาจยากลำบากในการ เตรียม) เช่น เนื้อ เยื่อหนา กระดูก ฟัน เป็นต้น อาจนำไปติดตั้งบนอุปกรณ์ยึด จากนั้นใช้ เทคนิค กระตุ้นให้ เกิด เอ็กซ์ เรย์ได้โดยตรง

ข้อ เสีย เปรียบของตัวอย่างชนิดหนา มีดังนี้

(1) สารตัวอย่างมีลักษณะไม่สม่ำ เสมอกันโดยตลอด

(2) เกิดความร้อนมาก เมื่อถูกฉายกับมันตภาพรังสี

(3) การคำนวณส่วนประกอบของธาตุในตัวอย่างชนิดหนา ทำได้ยากกว่าในตัวอย่าง ชนิดบาง

(4) ปัญหาสำคัญคือ เกิด เอ็กซ์ เรย์บริ เวณขอบของสารตัวอย่าง ซึ่งอาจบดบังธาตุ เธรส ที่มีผสมอยู่ในตัวอย่างได้

7.6 บทสรุป

ธาตุ เธรสจำ เป็นต่อ เมตะบอลิสมของร่างกายมนุษย์ แต่ต้องการในปริมาณน้อยๆ ถ้า ร่างกายขาดหรือมีธาตุ เธรสไม่ เพียงพอ ระบบอวัยวะต่างๆอยู่ในสภาวะไม่สมดุลย์ ดังนั้นย่อม ส่ออาการโรคต่างๆ ธาตุ เธรสที่จำ เป็นต่อร่างกายมี 10 ธาตุ ได้แก่

โคร เมียม	สังกะสี
แมงกานีส	ซิลิ เนียม (selenium)
เหล็ก	โมลิบดีนัม(molybdenum)
โคบอลต์	ดีบุก
ทองแดง	ไอโอดีน

ธาตุ เธรสที่มีลักษณะ เป็นพิษต่อมนุษย์ เช่น เบอร์รี เลียม (beryllium) นิค เกิล (nickel) แคด เมียม (cadmium) ตะกั่ว (lead) ซีลี เนียม (selenium) ปรอท (mercury) อาร์ เซนิค (arsenic) และดีบุก (tin)

สา เหตุของการกลาย เป็นสารพิษของธาตุดังกล่าวข้างต้นนั้น เข้าใจว่าธาตุ เหล่านี้ เป็นตัวการ เปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบซึ่ง เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ทำให้โครงสร้าง เหล่านั้นมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่าง ไปจาก เดิม เซลล์ร่างกายอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์คือ - เลือกแต่ละธาตุหรือสารตามขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของอะตอมหรือโม เลกุล ดังนั้น การดูดซึม จึง เกิดได้น้อย ทำให้ร่างกายขาดปริมาณ เท่าที่ควรจะได้รับจนอาจถึงขีดจำกัดซึ่งก่อให้ เกิดอาการ ผิดปกติต่างๆ นอกจากนี้ กลไกอื่นๆ เช่น การแทนที่ของสารพิษโดยตรงต่อธาตุที่ร่างกายต้อง การ หรือ เป็นตัว เปลี่ยนคุณสมบัติของโปรตีน เป็นต้น

เทคนิคที่ใช้วิ เคราะห์ธาตุ เธรสในร่างกายมนุษย์มักนิยมวิธีการ PIXE ซึ่งปัญหาสำคัญ อยู่ที่การ เตรียม เป้า ตัวอย่างชีวภาพบางชนิดยากลำบากในการ เตรียมให้ เป็น เป้าชนิดบาง เช่น เส้นผม กระดูก ฟัน เป็นต้น

แบบฝึกหัดบทที่ 7

1. ธาตุเธรส คืออะไร? จำเป็นต่อมนุษย์มากน้อยเพียงใด?
2. ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตเธรสด้านการแพทย์มีอะไรบ้าง?
3. สมมุติมีตับ (ก้อนเล็กๆ) ท่านจะเลือกเตรียมตัวอย่างนี้อย่างไร? เพราะเหตุใด?
4. วิจารณ์ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของตัวอย่างชนิดหนา
5. กระดูก จัดเป็นตัวอย่างชีวภาพ ถ้าต้องการใช้เทคนิค PIXE จะเตรียมในลักษณะใดได้บ้าง?
6. อธิบายสาเหตุการเกิดสารพิษในร่างกายเท่าที่จะเป็นไปได้
7. เป็นไปได้หรือไม่ ที่ธาตุเธรสหนึ่งเกิดมีปริมาณมากในร่างกาย แต่จะทำให้อีกธาตุเธรสหนึ่งลดน้อยลง (ในร่างกายเดียวกัน) จงอธิบายกลไกดังกล่าวที่เกิดขึ้นโดยอาศัยความรู้พื้นฐานฟิสิกส์