

การจัดระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิด
รังสีเอกซ์*

Systematization of a tube-excited energy dispersive x-ray fluorescence system for
analysis of light elements

คณิงนิจ สกุศลศรีผ่อง และคณะ**

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบ
แจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดรังสีเอกซ์และใช้หัววัดเจอร์มานีเยมบริสุทธิ์สูงแบบที่ใช้วัดรังสีเอกซ์
พลังงานต่ำมาก โดยได้ทำการทดลองหาเงื่อนไขในการจัดระบบที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ธาตุเบาบางชนิด
ได้แก่ กำมะถัน แคลเซียม ซึ่งพบว่ามุมที่เหมาะสมของลำรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบชิ้นงานเท่ากับ 45° ระยะห่าง
จากสารตัวอย่างถึงหัววัดรังสี 2 ซม. และระยะห่างจากหัววัดรังสีถึงหลอดรังสีเอกซ์เท่ากับ 3.85 ซม. ความ
เข้มข้นของธาตุกำมะถันและแคลเซียมน้อยสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ที่ 8 kV 0.1 mA และเวลา 100 วินาที
คือ 2.61% และ 0.34 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นของธาตุทองแดงน้อยสุดที่สามารถ
วิเคราะห์ได้ที่ 12 kV 0.1 mA และเวลา 100 วินาที พบว่าอยู่ที่ 51 ส่วนในล้านส่วน

Abstract

This research was aimed to develop a tube-excited energy dispersive x-ray fluorescence system for analysis of light elements using an ultra low energy high-purity germanium (HPGe) detector. The optimum geometric arrangement of the developed system was experimentally investigated for analysis of some light elements. It was found that the optimum incident angle of x-ray beam on the specimen, the detector to specimen distance and the x-ray tube to detector distance were 45° , 2 cm and 3.85 cm respectively. The lower limits of detection (LLD) of sulfur and calcium at 8 kV, 0.1 mA and 100 seconds counting time were found to be 2.61% and 0.34% by weight respectively. The LLD of copper at 12 kV, 0.1 mA and 100 seconds counting time was found to be 51 ppm.

* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต เรื่อง การพัฒนาระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยการเรือง
รังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดรังสีเอกซ์ โดยได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

** นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย E-mail: nittley@hotmail.com อาจารย์ เดโช ทองอร่าม ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: Decho.T@chula.ac.th รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: naresck@yahoo.co.th

1. บทนำ

การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในวัสดุตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์อาศัยหลักการกระตุ้นสารตัวอย่างด้วยรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary x-ray) จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี หรือรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (x-ray tube) โดยสารตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งดังที่กล่าวมา จะปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) ของธาตุต่างๆ ที่อยู่ในสารตัวอย่างนั้นออกมาและสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์ (x-ray spectrometer) ปัจจุบันการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างทางด้านโลหกรรม ทางด้านเคมีธรณี ทางด้านสิ่งแวดล้อม และการตรวจวิเคราะห์กัมมะถันและธาตุอื่นๆ ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ดังงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Fluorescence: EDXRF หรือ EDX) ที่อาศัยการกระตุ้นตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ทำงานร่วมกับหัววัดชนิดซิลิกอนลิเทียม [Si(Li)] มาใช้วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุในทางแร่ สำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อมพบว่าการนำเทคนิค EDX มาใช้วิเคราะห์หาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ โดยใช้กระดาษกรองชุบสารละลายบางชนิดเป็นตัวดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และนำกระดาษกรองนั้นมาวัดวิเคราะห์โดยใช้หัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนล ซึ่งระบบดังที่กล่าวมาข้างต้นยังมีประสิทธิภาพและความไวไม่เพียงพออันเนื่องจากข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความสามารถในการแยกแยะพลังงานของหัววัดรังสี ขีดจำกัดของหัววัดในเรื่องการวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาและการจัดระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และใช้หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงสำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

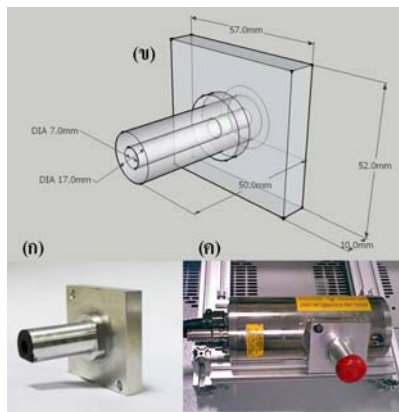
2. วิธีการวิจัย

2.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ เพื่อประกอบรวมขึ้นเป็นระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และใช้หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงสำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

- ออกแบบสร้างคอลลิเมเตอร์ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ได้เลือกใช้วัสดุคือแท่งและแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงมากลิ้นรูปเป็นอุปกรณ์บังคับลำรังสีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 7 มิลลิเมตร และเคลือบด้วยคาร์บอนภายในท่อบังคับลำรังสี (ภาพที่ 1)

- ออกแบบสร้างคอลลิเมเตอร์ของหัววัดรังสี ได้เลือกใช้แท่งแกรไฟต์มากลิ้นรูป (ภาพที่ 2) โดยคอลลิเมเตอร์ที่ทำขึ้นมีความสูงพอดีกับหัววัดรังสี และมีปากสำหรับวางคอลลิเมเตอร์ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อจัดตำแหน่งมุมกระตุ้นสารตัวอย่าง

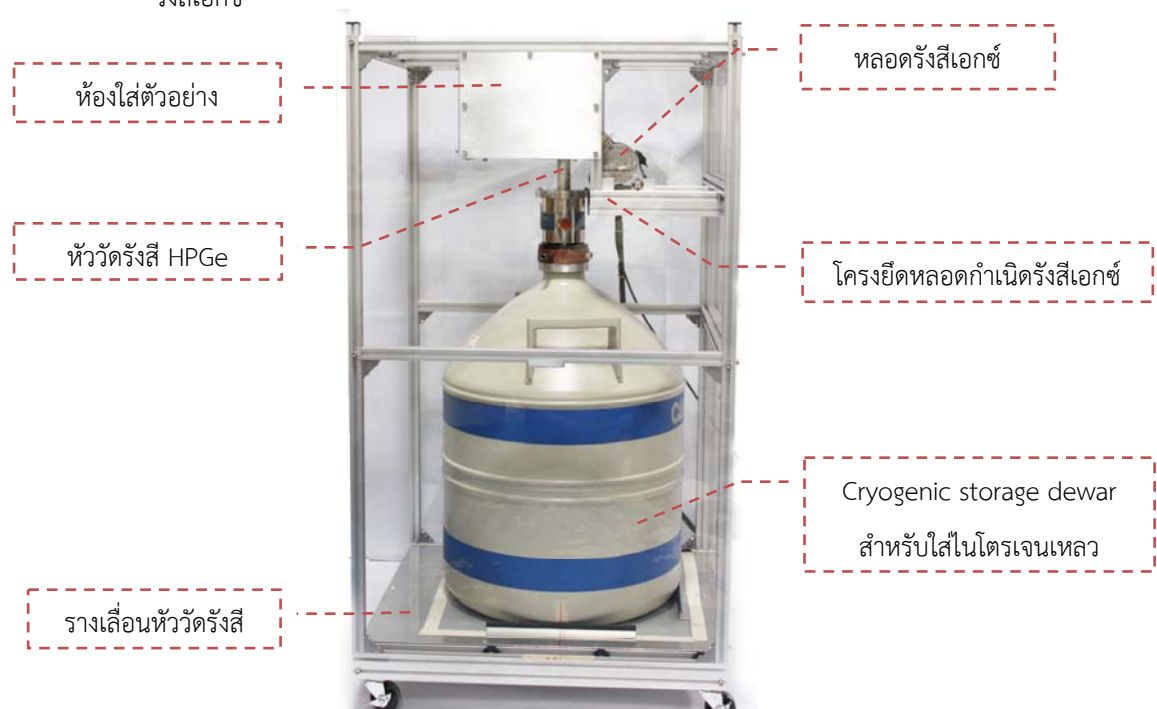
- ออกแบบสร้างโครงหลักของระบบเพื่อใช้ติดตั้งอุปกรณ์ ได้แก่ โครงบรรจุหัววัดรังสีเอกซ์และโครงยึดหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำด้วยอะลูมิเนียมเฟรมพื้นที่หน้าตัดขนาด 2 X 2 ตารางเซนติเมตร แยกชิ้นส่วนประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างเครื่องมือตามแบบในภาพที่ 3 และได้ออกแบบฐานโครงบรรจุหัววัดรังสีเอกซ์ ให้มีลักษณะเป็นรางเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายหัววัดรังสีออกมาเติมไนโตรเจนเหลว สำหรับห้องใส่ตัวอย่าง (chamber) ได้ออกแบบเป็นทรงกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด 24 x 24.5 x 18.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) โครงสร้างของห้องใส่ตัวอย่างทำด้วยอะลูมิเนียมเฟรม ผนังและฝาของห้องใส่ตัวอย่างทำจากแผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 1 (ก), (ข) รูปร่างและขนาดของคอลลิเมเตอร์
(ค) การติดตั้งใช้งานกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

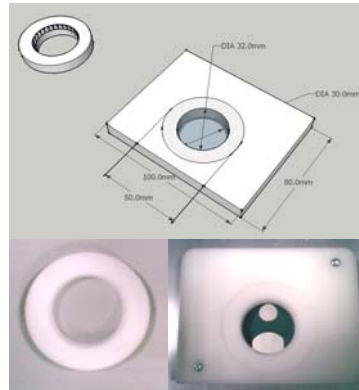


ภาพที่ 2 (ก), (ข) ขนาดและรูปร่างคอลลิเมเตอร์
ของหัววัดรังสีเอกซ์



ภาพที่ 3 โครงบรรจุหัววัดรังสีเอกซ์ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ และโครงห้องใส่ตัวอย่างที่ประกอบใช้งาน
รวมกัน

- ออกแบบสร้างที่วางตัวอย่างสำหรับงานวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทของแข็งและของเหลว งานวิจัยนี้ได้เลือกพอลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene) หรือพลาสติก POM มากลึงขึ้นรูปเป็นที่วางตัวอย่างสำหรับงานวิเคราะห์ โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 32 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ที่วางตัวอย่างสำหรับงานวิเคราะห์

2.2 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบ

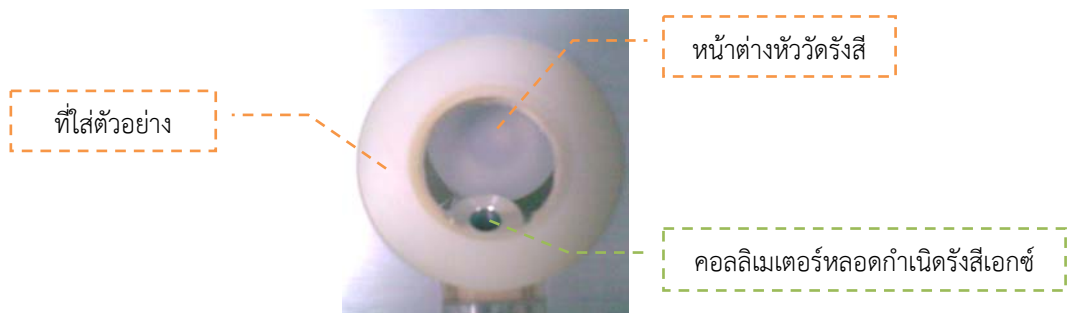
2.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์กับขนาดพื้นที่ของลำรังสีที่ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพรังสีด้วยแผ่นบันทึกภาพ (Imaging plate) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของขนาดและการกระจายตัวของความเข้มรังสีที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่าง ในการศึกษาได้ทำการกำหนดระยะตำแหน่งแผ่นบันทึกภาพห่างจากหัววัดรังสีไว้ 2 ระยะ คือที่ระยะ 1.5 และ 2 เซนติเมตร (เปรียบได้กับระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับหัววัดรังสี) แล้วทำการทดลอง โดยที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร กำหนดมุมกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีขนาดมุม 40 องศาจากแนวระดับ จากนั้นวางแผ่นบันทึกภาพบนฐานห้องใส่ตัวอย่างแล้วทำการถ่ายภาพ ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เท่ากับ 4 kV 0.06 mA ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 20 วินาที ภาพที่ได้นำไปอ่านข้อมูลภาพด้วยเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพของ FUJI FILM รุ่น FLA-5100 ทำซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนมุมกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีขนาดมุม 45 องศา (ที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร ไม่สามารถเปลี่ยนมุมกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีขนาดมุม 50 องศาได้ เนื่องจากข้อจำกัดจากโครงสร้างคอลลิเมเตอร์ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และหัววัดรังสี) สำหรับที่ระยะ 2 เซนติเมตร ทำการทดลองเหมือนกับที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร โดยเปลี่ยนมุมกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีขนาดมุม 40, 45 และ 50 องศาตามลำดับ

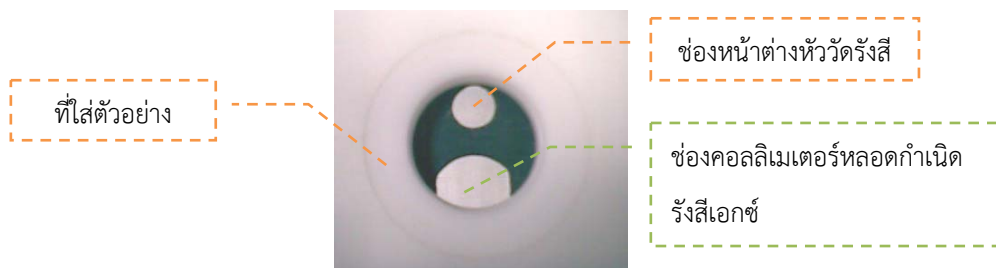
2.2.2 ศึกษารูปแบบฐานวางตัวอย่างและระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์กับหัววัดรังสี และระยะจากหัววัดรังสีถึงหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ในการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบเพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุเบา ได้แก่ กำมะถัน แคลเซียม ได้ออกแบบฐานวางตัวอย่างในห้องใส่ตัวอย่างไว้ 2 ลักษณะคือ ช่องวงกลมใหญ่เดี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 5 และช่องเล็กสองช่อง ดังแสดงในภาพที่ 6 สำหรับฐานวางตัวอย่างแบบช่องเล็ก

สองช่อง ช่องหนึ่งเป็นทางเข้าของลำรังสีจากคอลลิเมเตอร์หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 เซนติเมตร ลักษณะวงจะเอียงลาดลงเล็กน้อย และช่องที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สำหรับเป็นช่องให้รังสีเอกซ์เรียงจากตัวอย่างหลังถูกกระตุ้นตกลงสู่หน้าต่างของหัววัดรังสีฐานของช่องใส่ตัวอย่างทำจากวัสดุอะลูมิเนียมเคลือบด้วยคาร์บอน



ภาพที่ 5 ฐานช่องใส่ตัวอย่างของ chamber แบบช่องวงกลมใหญ่เดี่ยว



ภาพที่ 6 ฐานช่องใส่ตัวอย่างของ chamber แบบช่องวงกลมเล็กสองช่อง

สำหรับระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีเอกซ์และสารตัวอย่างนั้นกำหนดไว้ 2 ระยะ คือระยะ 1.5 และ 2 เซนติเมตร มุมกระตุ้นปฐมภูมิกำหนดไว้ที่ 45 องศา จากนั้นได้ทำการศึกษาหาระยะที่เหมาะสมระหว่างหัววัดรังสีกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยใช้ตัวอย่าง 4 ชนิดคือ แผ่นอะลูมิเนียม (Al), ผงแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4), แผ่นทองแดง (Cu) และผงเซอร์โคเนียม (Zr) เป็นตัวแทนของธาตุใน 3 กลุ่มพลังงาน ได้แก่ กลุ่มที่ให้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (ธาตุเบา) ได้แก่ อะลูมิเนียม ($K\alpha$ 1.49 keV), กำมะถัน ($K\alpha$ 2.3 keV), แคลเซียม ($K\alpha$ 3.7 keV) กลุ่มที่ให้รังสีเอกซ์พลังงานระดับปานกลาง ได้แก่ ทองแดง ($K\alpha$ 8.04 keV) และกลุ่มที่ให้รังสีเอกซ์พลังงานสูงได้แก่ เซอร์โคเนียม ($K\alpha$ 15.77 keV)

- การวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ 10 kV 0.12 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 60 วินาที ซึ่งในการวัดตัวอย่างแต่ละครั้ง หัววัดรังสีจะถูกเลื่อนห่างออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ครั้งละ 0.25 เซนติเมตร โดยเริ่มที่ระยะ 3.35 เซนติเมตร ไปจนถึงระยะ 4.85 เซนติเมตร จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมที่บันทึกไว้มาหาอัตราส่วนค่านับรังสีสุทธิต่อแบคกราวด์ของตัวอย่างที่ระยะต่างๆ

- การวิเคราะห์ธาตุกำมะถันและแคลเซียม ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ 8 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่างครั้งละ 30 วินาที และทำการเลื่อนหัววัดรังสีออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม
- การวิเคราะห์ธาตุทองแดง ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 12 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่างครั้งละ 30 วินาที และทำการเลื่อนหัววัดรังสีออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม
- การวิเคราะห์ธาตุเซอร์โคเนียม ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 20 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่างครั้งละ 30 วินาที และทำการเลื่อนหัววัดรังสีออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ธาตุอะลูมิเนียม

จากระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างและหัววัดรังสีเอกซ์ที่กำหนดไว้ 2 ระยะ คือที่ 1.5 และ 2 เซนติเมตรนั้นเนื่องจากข้อจำกัดทางจีโอเมตรี (geometry) ของเครื่องมือ

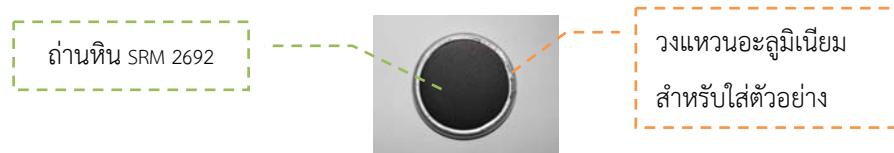
2.3 การหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์ธาตุเบาของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

หลังจากได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และใช้หัววัดรังสีเจอร์มานีเยมบริสุทธิ์สูงสำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำแล้ว ได้ทำการหาขีดจำกัดของระบบในการวิเคราะห์ธาตุเบา โดยเตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันของธาตุกำมะถัน (S), แคลเซียม (Ca) และ ทองแดง (Cu) ใช้ผง Na_2SO_3 , CaO และ CuO ผสมกรดบอริก (H_3BO_3) อัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร สำหรับกำมะถันที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 1.93, 2.87, 6.49, 13.62 และ 20.16 % (w/w) แคลเซียมที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.18, 0.51, 0.93, 3.78, 7.89, 14.77 และ 35.70 % (w/w) ทองแดงที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.01, 0.05, 0.67 และ 4.35 % (w/w) และนำตัวอย่างที่เตรียมไปวัดหาอัตรานับรังสีสุทธิกับระบบวิเคราะห์ธาตุที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อหาขีดจำกัดในการวิเคราะห์ คือเพื่อให้ทราบปริมาณหรือความเข้มข้นน้อยสุดของสารตัวอย่างที่ระบบสามารถวิเคราะห์ได้ ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียมและกำมะถัน ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 8 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุทองแดง ได้ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 12 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที

2.4 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ได้พัฒนาขึ้นโดยการทดลองวิเคราะห์ธาตุเบาในตัวอย่างบางชนิดทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพในตัวอย่างเส้นผม โดยนำเส้นผมมาบดละเอียดใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างแล้วนำไปวัดวิเคราะห์ ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 12 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณกำมะถันในถ่านหินตัวอย่างด้วยวิธีเทียบสารมาตรฐาน โดยนำถ่านหินมาตรฐาน SRM 2682a, SRM 2683a, SRM 2684a, SRM 2685 และ SRM 2692 ซึ่งทราบปริมาณของธาตุกำมะถันที่

แน่นอน อัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตรหนา 0.3 เซนติเมตร ดังภาพที่ 7 แล้วนำไปวิเคราะห์กับระบบวิเคราะห์ธาตุเบาที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 8 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที อ่านค่าความเข้มฟลักพลังงาน (energy peak) ของธาตุกำมะถันที่ได้นำมาสร้างกราฟสำหรับเทียบมาตรฐาน (calibration curve) จากนั้นนำถ่านหินตัวอย่างได้แก่ ถ่านหินรหัส A, B, C, D, E และ F อัดเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตรหนา 0.3 เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์กับระบบวิเคราะห์ธาตุเบาที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เหมือนกับที่กำหนดให้กับการวิเคราะห์ถ่านหินมาตรฐาน ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที จากนั้นอ่านค่าความเข้มฟลักพลังงานของธาตุกำมะถันที่ได้มาเทียบหาค่าปริมาณธาตุกำมะถันจากกราฟเทียบมาตรฐาน

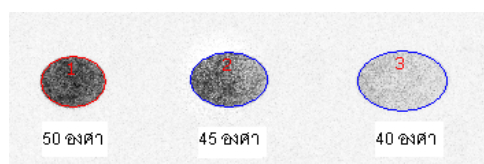


ภาพที่ 7 ตัวอย่างถ่านหิน SRM 2692 อัดแผ่นกลม

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระตุนจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์กับขนาดพื้นที่ลำรังสีตกกระทบบนตัวอย่าง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบเพื่อการวิเคราะห์ธาตุเบาได้แก่ กำมะถัน แคลเซียม พบว่ามุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมในการใช้กระตุนสารตัวอย่างมีค่า 45 องศา



ภาพที่ 8 ภาพถ่ายพื้นที่ลำรังสีที่ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ มุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีขนาด 40, 45 และ 50 องศา แผ่นบันทึกภาพห่างจากหัววัดรังสีเป็นระยะ 2 เซนติเมตร

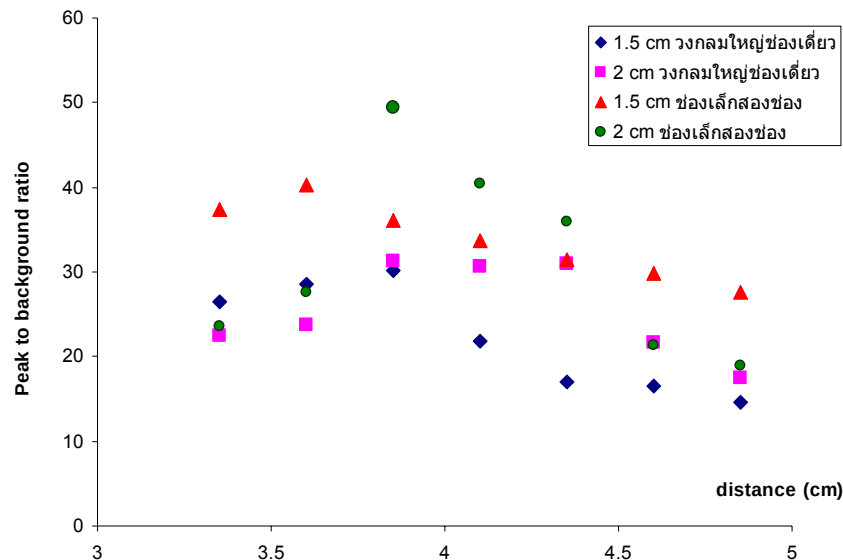
ตารางที่ 1 ขนาดพื้นที่ครอบคลุมลำรังสีและค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อหน่วยพื้นที่ที่ระยะและมุมต่างๆ

ระยะห่างระหว่างแผ่นบันทึกภาพกับหัววัดรังสี (mm)	มุมกระตุน (θ)	เส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ครอบคลุมลำรังสี (วงรี) แกนเอก x แกนโท (mm)	พื้นที่ครอบคลุมลำรังสี (mm^2)	ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อหน่วยพื้นที่ (PSL/mm^2)	ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อหน่วยพื้นที่เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์(%)
15	40	12.8 x 8.4	82.85	15.40	22.79
	45	10.8 x 7.6	66.56	25.88	30.45
20	40	13.6 x 8.90	90.26	7.49	14.74
	45	11.3 x 8.15	69.25	16.49	24.89
	50	9.6 x 7.60	55.70	35.48	43.08

จากตารางที่ 1 พบว่าพื้นที่ลำรังสีเอกซ์ตกกระทบบนตัวอย่างมีลักษณะเป็นวงรีและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีขนาดลดลง ถ้ากำหนดให้ระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับหัววัดรังสีอยู่ที่ระยะ 1.5 เซนติเมตร ควรกำหนดมุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไว้ที่ 45 องศา ทั้งนี้พิจารณาจากค่าความเข้มรังสีเอกซ์ต่อหน่วยพื้นที่ของมุมกระตุนที่มุม 40 และ 45 องศา พบว่าแตกต่างกันมาก ที่มุม 40 องศาความเข้มรังสีเอกซ์ต่อพื้นที่มีค่าน้อยกว่า และการที่ความเข้มรังสีเอกซ์ป้อนภูมิไปกระตุนตัวอย่างน้อย ทำให้รังสีเอกซ์เรืองของธาตุจากตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์น้อยลงด้วย ในทำนองเดียวกันกับที่ระยะ 2 เซนติเมตรจากหัววัดรังสีถึงสารตัวอย่าง ควรกำหนดมุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไว้ที่ 45 องศา แม้ว่าที่มุม 50 องศา จะมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่า แต่ก็ไม่สามารถกำหนดให้เป็นมุมกระตุนตัวอย่างของหลอดรังสีกำเนิดเอกซ์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางการจัดระบบเครื่องมือซึ่งไม่สามารถเลื่อนหัววัดรังสีเข้าใกล้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ได้มาก (ที่มุม 50 องศา หัววัดรังสีติดกับฐานที่วางหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์) และสำหรับมุม 40 องศา ไม่ถูกเลือกเป็นมุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้นในระยะที่ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งการทดลองดังกล่าวข้างต้นทำโดยอาศัยแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์แทนสารตัวอย่างเพื่อสามารถเห็นลักษณะของลำรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนตัวอย่างได้

สำหรับระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์กับหัววัดรังสี และระยะจากหัววัดรังสีถึงหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์หลังกำหนดมุมกระตุนของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไว้ที่ 45 องศา และได้ออกแบบฐานช่องใส่ตัวอย่างไว้ 2 ลักษณะคือ แบบวงกลมใหญ่ช่องเดี่ยวและแบบช่องเล็กสองช่องพบว่า ฐานวางตัวอย่างแบบช่องเล็กสองช่องให้อัตราส่วนค่านับรังสีสุทธิต่อแบคกราวด์ดีกว่าแบบวงกลมใหญ่ช่องเดี่ยวที่ระยะห่างจากสารตัวอย่างถึงหัววัดรังสีเท่ากับ 2 เซนติเมตร และระยะห่างจากหัววัดรังสีถึงหลอดกำเนิด

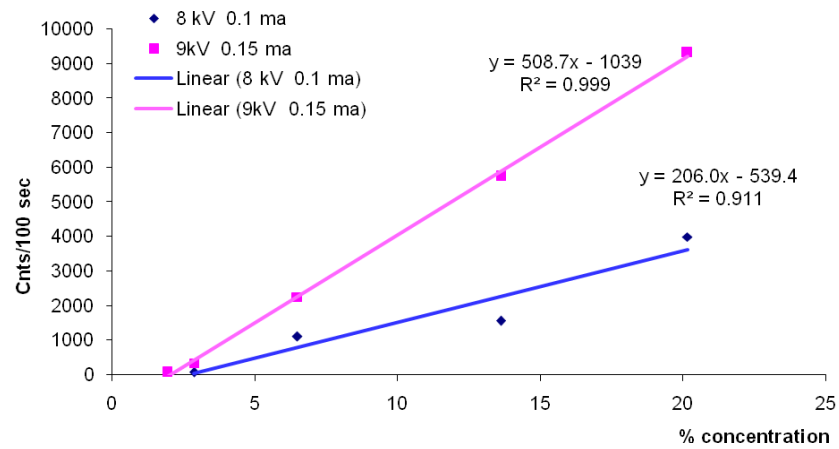
รังสีเอกซ์ 3.85 เซนติเมตร จะให้อัตราส่วนค่านับรังสีสุทธิต่อแบคกราวด์ของธาตุ Al, S และ Ca สูงกว่าที่ระยะอื่นๆ ซึ่งอัตราส่วนค่านับรังสีสุทธิต่อแบคกราวด์ที่ดีกว่าทำให้ความไวในการวิเคราะห์ที่ดีกว่า



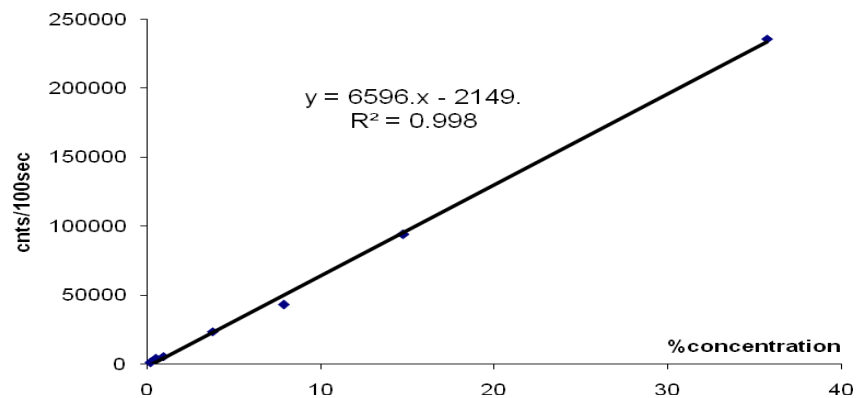
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่านับรังสีสุทธิต่อแบคกราวด์ของตัวอย่าง (Cu) ที่ระยะต่างๆ ของหัววัดรังสีกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เปรียบเทียบระหว่างฐานวางตัวอย่างแบบวงกลมใหญ่ช่องเดี่ยวและแบบช่องเล็กสองช่อง (สารตัวอย่างห่างจากหัววัดรังสีเป็นระยะ 1.5 และ 2 เซนติเมตร)

3.2 ขีดจำกัดในการวิเคราะห์ธาตุเบาของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

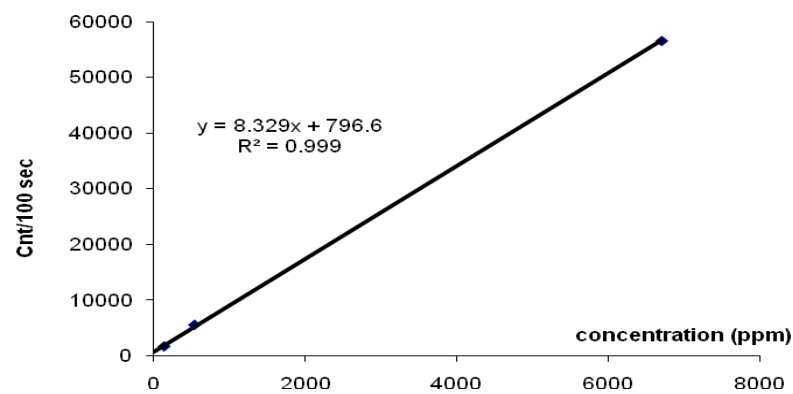
จากการทดลองเพื่อหาขีดจำกัดของระบบในการวิเคราะห์ธาตุเบา พบว่าระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 13 ขึ้นไป (ธาตุอะลูมิเนียม) และวัดวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 14 ขึ้นไป เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 10 และ 11 พบความเข้มข้นของธาตุกำมะถันและแคลเซียมน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 8 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที คือ 2.61% และ 0.34% ตามลำดับ และเมื่อปรับเพิ่มค่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและค่ากระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 9 kV 0.15 mA ที่เวลาวัดเท่าเดิม พบว่าความเข้มข้นของธาตุกำมะถันน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวัดวิเคราะห์ได้คือ 2.04% เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 12 พบความเข้มข้นของธาตุทองแดงน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวัดวิเคราะห์ได้อยู่ที่ 51 ppm เมื่อตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 12 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีสุทธิกับความเข้มข้นต่างๆ ของธาตุกำมะถัน



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีสุทธิกับความเข้มข้นต่างๆ ของธาตุแคลเซียม

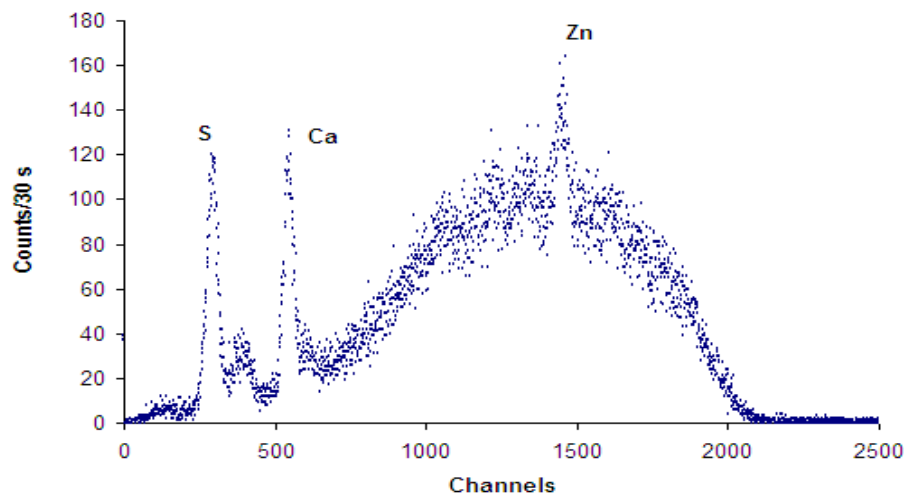


ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีสุทธิกับความเข้มข้นต่างๆ ของธาตุทองแดง

3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุเบาในตัวอย่างบางชนิดทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพกับระบบที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

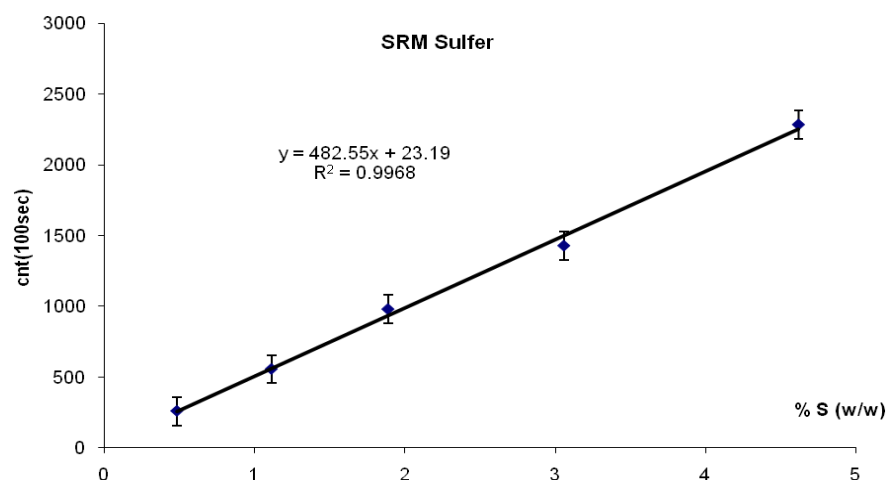
ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพในตัวอย่างเส้นผมพบว่าไม่มีฟอสฟอรัสของธาตุแคลเซียมกำมะถัน และสังกะสีปรากฏชัดเจนอยู่ในสเปกตรัม ตามภาพที่ 13



ภาพที่ 13 สเปกตรัมของธาตุในตัวอย่างเส้นผม

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ผลการอ่านค่าความเข้มฟอสฟอรัสของธาตุกำมะถันในถ่านหินมาตรฐานเพื่อนำมาสร้างกราฟสำหรับเทียบมาตรฐานระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุกำมะถันกับความเข้มข้นของสารกำมะถันในถ่านหินมาตรฐาน แสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุกำมะถันกับความเข้มข้นของสารกำมะถันในถ่านหินมาตรฐาน

ตารางที่ 2 จำนวนนับรังสีสุทิตที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารกำมะถันในถ่านหินมาตรฐาน

รหัสตัวอย่าง	อัตรานับรังสี สุทิต (1)	อัตรานับรังสี สุทิต (2)	อัตรานับรังสี สุทิต (3)	อัตรานับรังสี สุทิตเฉลี่ย	กำมะถัน %(w/w)
2682a	260	268	252	260.00	0.486 ± 0.006
2683a	976	972	990	979.33	1.89 ± 0.03
2684a	1422	1433	1427	1427.33	3.06 ± 0.03
2685	2420	2047	2383	2283.33	4.62 ± 0.18
2692	552	550	567	556.33	1.115 ± 0.019

ปริมาณกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินตัว A, B, C, D, E และ F ที่วิเคราะห์ได้จากการเทียบกราฟมาตรฐาน แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตรานับรังสีสุทิตของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินเบอร์ต่างๆ และปริมาณกำมะถันในถ่านหินตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้

รหัสตัวอย่าง	อัตรานับรังสี สุทิต (1)	อัตรานับรังสี สุทิต (2)	อัตรานับ รังสีสุทิต (3)	อัตรานับรังสี สุทิตเฉลี่ย	กำมะถัน %(w/w)
A	1808	1848	1819	1825	3.73 ± 0.08
B	585	596	574	585	1.16 ± 0.05
C	978	930	933	947	1.91 ± 0.07
D	1180	1192	1218	1196.67	2.43 ± 0.08
E	1744	1727	1753	1741.33	3.56 ± 0.09
F	2312	2239	2321	2290.67	4.70 ± 0.11

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันในตัวอย่างถ่านหินเดียวกันกับวิธีอื่น

รหัสตัวอย่าง	การวิเคราะห์ทางเคมี %(w/w)	ระบบ EDXRF ที่ได้พัฒนาขึ้น ในงานวิจัยนี้ %(w/w)	ระบบ EDXRF อื่น %(w/w)
A	3.6	3.73 ± 0.08	4.39
B	1.3	1.16 ± 0.05	1.74
C	1.7	1.91 ± 0.07	2.48
D	2.3	2.43 ± 0.08	2.77
E	3.9	3.56 ± 0.09	3.25
F	5.1	4.70 ± 0.11	5.73

4. สรุปผลการวิจัย

เงื่อนไขที่เหมาะสมในการจัดระบบวิเคราะห์ธาตุเบาด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อการวิเคราะห์ธาตุเบาได้แก่ กัมมะถัน แคลเซียมพบว่ามีมวลกระตุ้นของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมในการใช้กระตุ้นสารตัวอย่างมีค่า 45 องศาจากแนวระดับ ระยะจากสารตัวอย่างถึงหัววัดรังสีเท่ากับ 2 เซนติเมตร ฐานวางที่ใส่ตัวอย่างเป็นแบบช่องเล็กสองช่อง ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างหัววัดรังสีกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์คือ 3.85 เซนติเมตร โดยระบบที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 13 ขึ้นไป และวัดวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 14 ขึ้นไป ความเข้มข้นของธาตุกัมมะถันและแคลเซียมน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสที่ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 8 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที คือ 2.61% และ 0.34% ตามลำดับ และเมื่อปรับเพิ่มค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและค่ากระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 9 kV 0.15 mA พบว่าความเข้มข้นของธาตุกัมมะถันน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวัดวิเคราะห์ได้คือ 2.04% สำหรับความเข้มข้นของธาตุทองแดงน้อยสุดในสารตัวอย่างที่สามารถวัดวิเคราะห์ได้อยู่ที่ 51 ppm เมื่อตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น 12 kV 0.1 mA ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 100 วินาที จากผลข้างต้นเห็นว่า การเพิ่มความต่างศักย์และกระแสให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้ LLD ของระบบวัดวิเคราะห์ลดลงได้ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ การจ่ายค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นระยะเวลานานทำให้อายุการใช้งานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์สั้นลง

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพในตัวอย่างเส้นผมพบว่ามีพีคพลังงานของธาตุแคลเซียม กัมมะถันและสังกะสีปรากฏชัดเจนอยู่ในสเปกตรัม จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในเส้นผมของมนุษย์นั้นมีธาตุแคลเซียม สังกะสี และกัมมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่เส้นผมของมนุษย์มีแร่ธาตุจำพวกแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี โซเดียม และกัมมะถันเป็นองค์ประกอบหลัก แร่ธาตุในเส้นผมสามารถเป็นตัวชี้วัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ ถ้าสภาพแวดล้อมที่มนุษย์อยู่มีมลพิษจากสารหรือธาตุจำพวกโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม จะสามารถตรวจพบธาตุเหล่านี้ในเส้นผมได้นอกจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นผม

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณกัมมะถันในตัวอย่างถ่านหินด้วยวิธีเทียบสารมาตรฐานจากกราฟเทียบมาตรฐานพบว่า ถ่านหินรหัส A, B, C, D, E และ F มีปริมาณความเข้มข้นของกัมมะถันคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของตัวอย่างเท่ากับ 3.73, 1.16, 1.91, 2.43, 3.56 และ 4.70 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมะถันในตัวอย่างถ่านหินเดียวกันกับวิธีอื่นได้แก่ วิธีทางวิเคราะห์ทางเคมี และวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยไอโซโทปรังสีและใช้หัววัดพรอพอร์ชันแนลวัดรังสีเอกซ์ของกัมมะถันพบว่า ระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ทางเคมีมากกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงานที่กระตุ้นด้วยไอโซโทปรังสีและใช้หัววัดพรอพอร์ชันแนลวัดรังสีเอกซ์ของกัมมะถัน

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ระบบวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ เมื่อทำการวัดวิเคราะห์ตัวอย่างจะมีพิคพลังงานของธาตุอาร์กอนปรากฏในสเปกตรัมด้วยเสมอ เนื่องจากไม่ได้ทำการวัดในสภาวะแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศหรือสภาวะแวดล้อมที่เป็นแก๊สเฉื่อยเช่น ฮีเลียม หรือไนโตรเจน ทั้งนี้เพราะต้องการให้เป็นระบบวัดประหยัดและใช้งานได้สะดวกที่สุด การปรากฏของพีคอาร์กอนจะส่งผลต่อการวิเคราะห์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ธาตุที่ให้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ นอกจากนี้อากาศเองก็มีผลต่อการดูดกลืนรังสีเอกซ์จากตัวอย่างไปบางส่วนก่อนลงมาถึงหัววัดรังสี การแก้ปัญหาการรบกวนสามารถทำได้โดยใช้แก๊สฮีเลียมหรือแก๊สไนโตรเจนไหลผ่านในห้องใส่ตัวอย่างหรือ chamber ซึ่งปกติแล้วแก๊สฮีเลียมจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าไนโตรเจนแต่มีข้อเสียคือ แก๊สฮีเลียมสามารถซึมผ่านหน้าต่างหัววัดรังสีได้ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบสุญญากาศภายในหัววัดรังสีได้ในภายหลัง และไม่แนะนำให้ใช้ระบบสุญญากาศในห้องใส่ตัวอย่างของระบบวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เนื่องจากหน้าต่างของหัววัดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนาเพียง 8 ไมครอน ซึ่งถ้าใช้ระบบสุญญากาศอาจสร้างความเสียหายต่อหัววัดรังสีได้

5.2 ระบบวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ ไม่เหมาะกับการวิเคราะห์ธาตุคลอรีนโดยตรง ต้องใช้แผ่นกรองรังสีที่สามารถวัดวิเคราะห์ธาตุคลอรีนในตัวอย่างได้ เนื่องจากพิคพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุคลอรีน ($K\alpha$ 2.62 keV) จะไปซ้อนทับกับพิคพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุโรเดียมซึ่งเป็นวัสดุใช้ทำเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ($L\alpha$ 2.69 keV) โดยค่าพลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของโรเดียมนี้มีค่าใกล้เคียงกับคลอรีนมาก หัววัดรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของพลังงานที่ใกล้เคียงกันขนาดนี้ได้ ถ้าหากต้องการวิเคราะห์ธาตุคลอรีนด้วยระบบวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถทำได้แต่ต้องใช้แผ่นกรองรังสี (filter) กรองรังสีที่ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ก่อน เพื่อตัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของโรเดียมทิ้งไป จึงจะสามารถวิเคราะห์ธาตุคลอรีนในตัวอย่างได้

5.3 การวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพกับระบบที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและที่ความดันบรรยากาศปกติ การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์นั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการวัดวิเคราะห์ธาตุ เช่น อุณหภูมิ ความกดอากาศ องค์ประกอบในสารตัวอย่าง ผลจากเนื้อผิวหน้าตัวอย่าง ขนาดอนุภาค และความหนาของสารตัวอย่าง ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้อาจส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับผลการวิเคราะห์ได้ ฉะนั้นในการวิเคราะห์แต่ละครั้งควรพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ ถ้าใช้วิธีวิเคราะห์แบบเทียบมาตรฐานควรจัดเงื่อนไขในการวิเคราะห์สารมาตรฐานและสารตัวอย่างให้เหมือนกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณ อาจารย์ไพโรจน์ อนันตเศรษฐกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณรัฐภูมิ โคกศิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความกรุณาในการหล่อกลึงโลหะและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- จเด็จ เย็นใจ. การพัฒนาระบบวิเคราะห์ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544
- รัชชัย สุมิตร, นเรศร์ จันทน์ขาว และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ. การพัฒนาวิธีการวัดปริมาณกำมะถันในถ่านหินลิกไนต์โดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์. โครงการหน่วยปฏิบัติการวิจัยการประยุกต์เทคนิคนิวเคลียร์ในงานอุตสาหกรรมและการพัฒนาแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534

ภาษาต่างประเทศ

- Baranowska, I., Barchasni, L. and Smolec, M. X-Ray Fluorescence Spectrometry in Multielemental Analysis of Hair and Teeth. Polish Journal of Environmental Studies Vol.13, No. 6 (2004): 639-646
- Sumitra, T., Punnachaiya, S., Chankow, N. and Laopaibul, R. Determination of SO₂ in stacks of a tobacco curing plant using XRF technique. Department of Nuclear Technology, Chulalongkorn University, 1989.
- Yoshiaki Okada. Model SLFA-1800 Fluorescent X-ray Analyzer for Sulfur in oil. Readout HORIBA Technical Reports No.6 (July 1992): 43-51.