

## การรบกวนของเอสเคปพีคที่เกิดจากหัววัดรังสี HPGe (LEPS) ต่อสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว

สุรพงษ์ นิมน์จันทร์ กองนิสิทส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

### บทคัดย่อ

ได้ศึกษาการรบกวนของเอสเคปพีคที่เกิดจากหัววัดรังสี HPGe (LEPS) ในขณะวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีธาตุเหล็กผสมกับธาตุนีโอเบียมด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ของธาตุเหล็กจะถูกรบกวนโดยเอสเคปพีคของธาตุนีโอเบียมซึ่งเกิดจากหัววัดรังสี จนไม่สามารถคำนวณความเข้มของรังสีได้ จึงนำสเปกตรัมสารมาตรฐานมาทำการปรับค่าให้มีความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุนีโอเบียมเทียบเท่ากับความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุนีโอเบียมในสเปกตรัมของตัวอย่างแล้วนำมาหักลบออกจากสเปกตรัมของตัวอย่างเดิมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ผลที่ได้สามารถคำนวณหาความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุเหล็กได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และจากการประยุกต์ใช้วิธีนี้วิเคราะห์ปริมาณธาตุนีโอเบียมและธาตุแทนทาลัมในตัวอย่างแร่เศรษฐกิจ ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ได้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับวิธีนิวตรอนแอคทีเวชัน มีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

### *Interference of Escape Peaks from HPGe(LEPS) Detector on Characteristic X-rays Spectrum.*

Surapong Pimjurn, Physics division Office of Atomic Energy for Peace

### Abstract

Analyses for concentrations of Iron, Niobium and Tantalum in valuable ores by X-Ray fluorescence analysis (XRF) method, characteristic X-Rays of Fe was interfered by the escape peak of Nb from HPGe(LEPS) detector. To solve this problem, normalizations of Nb spectra with the computer program were used. The result analyzed for Fe, Nb and Ta concentration in the sample, compared to those with the neutron activation analysis (NAA) method, the corresponding errors about 5% were obtained satisfactorily. This method of XRF can be applied efficiently instead of NAA method during the reactor shut-down for a long period.

## คำนำ

การวัดรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาด้วยระบบวัดที่ประกอบด้วยหัววัดรังสีประเภทกึ่งตัวนำ นอกจากจะได้โฟโตพีคซึ่งเป็นตัวแทนของรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรงแล้ว ยังปรากฏพีคอื่นๆอีก เช่น เอสเคพีค เอ็กซ์เรย์เอสเคพีค รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของวัสดุกำบังรังสี และคอมพ์ตันเอตจ์เป็นต้น พีคเหล่านี้อาจจะรบกวนโฟโตพีคอื่นๆที่สนใจวิเคราะห์ในสเปกตรัม ทำให้การคำนวณความเข้มของพีคผิดไป ยังผลทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลผิดพลาดได้

การวัดสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Analysis) ด้วยหัววัดรังสี HPGe (LEPS) จะมีการรบกวนของเอ็กซ์เรย์เอสเคพีคในสเปกตรัม เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุต่างๆที่ทำการวัด มีพลังงานอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 130 keV ซึ่งสามารถกระตุ้นให้ธาตุเจอร์มาเนียม (Ge) ที่ใช้ทำหัววัดรังสีเกิดรังสีเอ็กซ์ (Fluorescent X-Rays) ได้ การศึกษาการเกิดเอ็กซ์เรย์เอสเคพีคจากการวัดรังสีเอ็กซ์ของธาตุต่างๆ ทำให้สามารถคำนวณแก้ค่าการรบกวนของเอสเคพีคต่อรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของธาตุต่างๆ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยวิธีนี้ถูกต้องยิ่งขึ้น

### สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดรังสี HPGe (LEPS)

เนื่องจากพลังงานของรังสีเอ็กซ์ของธาตุต่างๆมีพลังงานต่ำ อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อหัววัดรังสีส่วนใหญ่จะเป็นแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) ยังผลทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ของธาตุที่ใช้ทำหัววัดรังสี ถ้ารังสีเอ็กซ์นั้นหลุดออกจากหัววัดรังสี จะเกิดพีคที่เรียกว่า X-Ray Escape Peak ในสเปกตรัม เอสเคพีคนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ทำการวัดและชนิดของธาตุที่ใช้ทำหัววัดรังสี

หัววัดรังสี HPGe (LEPS) เป็นหัววัดรังสีที่ทำด้วยผลึก Ge ที่มี K-Absorption Edges 11.103 keV และ มีรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว 9.882 keV (GeK $\alpha$ ) และ 10.981 keV (GeK $\beta$ ) ถ้าใช้หัววัดรังสีนี้วัดรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานมากกว่า 11.103 keV จะเกิดเอสเคพีคที่มีพลังงาน (Es) เท่ากับ ผลต่างของพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ทำการวัด (EK $\alpha$ , EK $\beta$ ) และพลังงานรังสีเฉพาะตัวของธาตุ Ge (GeK $\alpha$ , GeK $\beta$ ) โฟโตพีค 1 พีคจะทำให้เกิดเอสเคพีค 2 พีคคือเกิดจาก GeK $\alpha$  และ GeK $\beta$  หลุดออกจากหัววัดรังสี เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุต่างๆจะมีเอ็กซ์เรย์ 2 พีค (K $\alpha$  และ K $\beta$ ) ดังนั้นเอ็กซ์เรย์ของธาตุหนึ่งๆจะก่อให้เกิดเอสเคพีค 4 พีค ดังนี้

EsKa1 คือเอสเคพีคเกิดจาก EK $\alpha$  - GeK $\alpha$  มีพลังงาน = EK $\alpha$  - 9.885 keV

EsKa2 คือเอสเคพีคเกิดจาก EK $\alpha$  - GeK $\beta$  มีพลังงาน = EK $\alpha$  - 10.981 keV

EsKb1 คือเอสเคพีคเกิดจาก EK $\beta$  - GeK $\alpha$  มีพลังงาน = EK $\beta$  - 9.885 keV

EsKb2 คือเอสเคพีคเกิดจาก EK $\beta$  - GeK $\beta$  มีพลังงาน = EK $\beta$  - 10.885 keV

Figure 1. ที่เป็นสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการวัดธาตุนี้โอเบียม (Nb) ด้วยหัววัดรังสี HPGe (LEPS) จะเห็นว่าในสเปกตรัมนอกจากมีโฟโตพีคของนีโอเบียมคือ NbK $\alpha$  (16.614 keV) และ NbK $\beta$  (18.621 keV) แล้ว ยังมีเอสเคพีคอีก 4 พีคคือ EsKa1 (6.729 keV), EsKa2 (5.633 keV), EsKb1 (8.736 keV) และ EsKb2 (7.640 keV)

จากการศึกษาอัตราส่วนของเอสเคปพีคของหัววัดรังสีต่อโฟโตพีคของธาตุต่างๆ (EsK $\alpha$ 1/K $\alpha$  และ EsK $\beta$ 1/K $\beta$ ) พบว่าอัตราการเกิดเอสเคปพีคแปรผกผันกับพลังงานรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสี ดังได้แสดงใน Figure 2. ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสการเกิดการวาวรังสีเอ็กซ์ (Fluorescent Yield) ของธาตุ Ge จะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีสูงขึ้นนั่นเอง

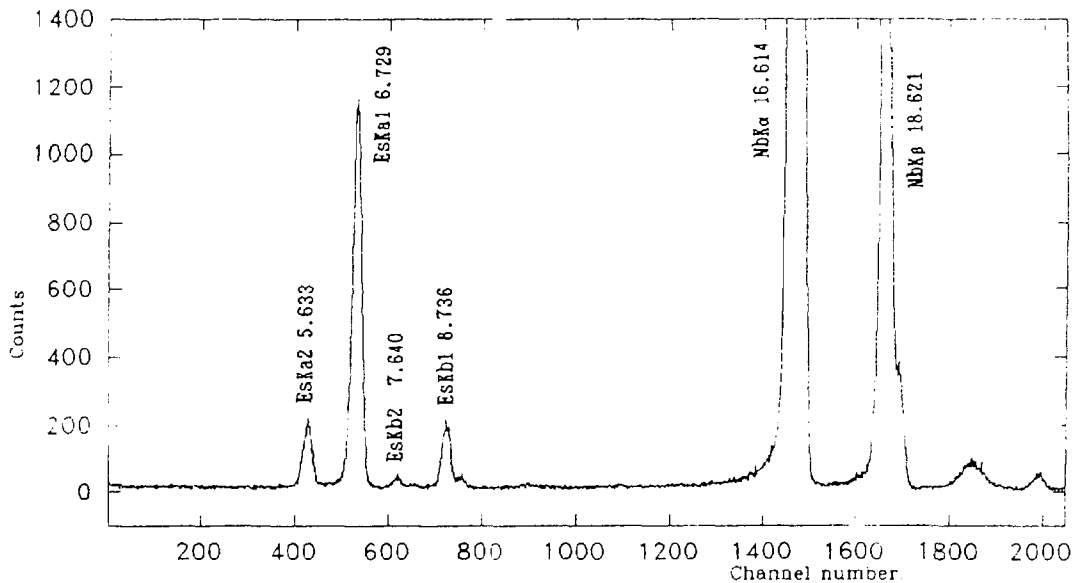


Figure 1. X-Ray Spectrum of Niobium detected by HPGc(LEPS) detector.

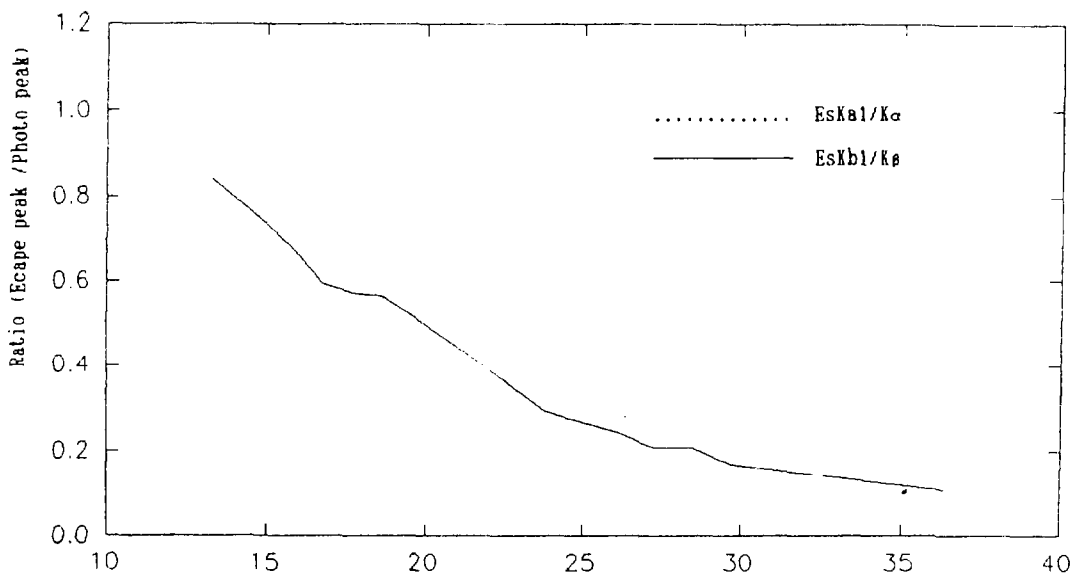


Figure 2. Plot of Escape peak / Photo peak energy VS Atomic number.

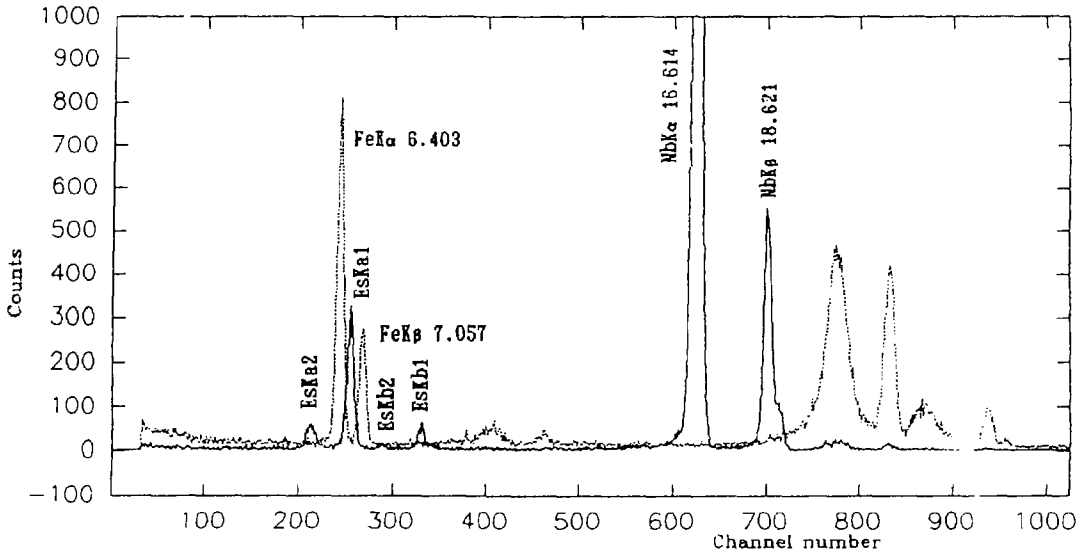


Figure 3. X-Ray spectrum of Fe and Nb detected by HPGe (LEPS) detector.

**การแก้การรบกวนของเอสเคปที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุนีโอเบียมต่อรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของธาตุเหล็ก**

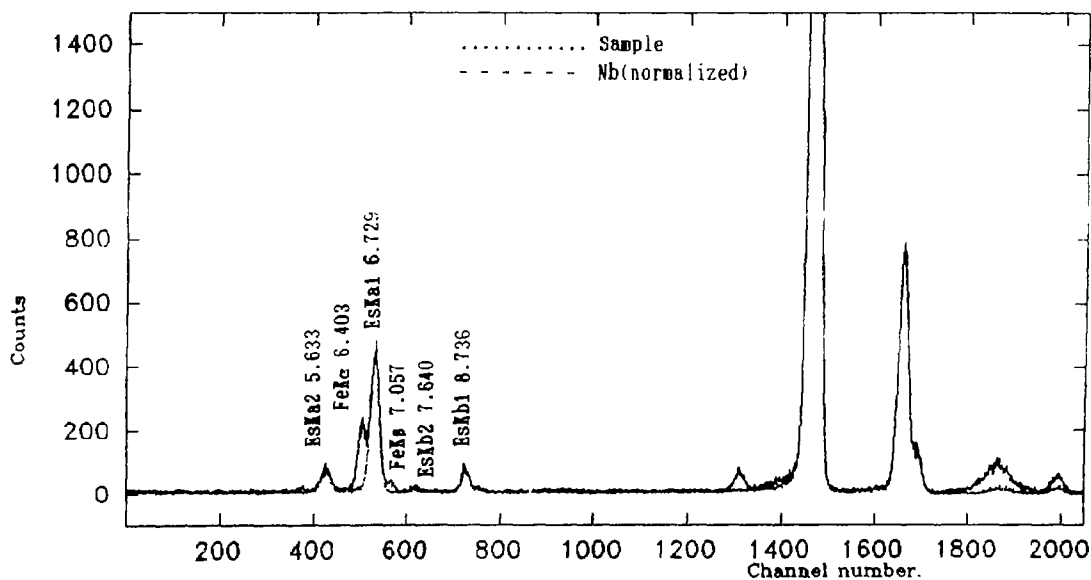
ได้ศึกษาวิธีคำนวณแก้การรบกวนของเอสเคปที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุนีโอเบียมต่อรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของธาตุเหล็ก โดยทำการวัดความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุนีโอเบียมในแต่ละตัวอย่างและในสารมาตรฐานธาตุนีโอเบียมบริสุทธิ์ หาค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีเอ็กซ์นีโอเบียมของตัวอย่างและสารมาตรฐานดังได้แสดงไว้ใน Table 2. นำค่าอัตราส่วนนี้มาใช้ในการปรับสเปกตรัมของสารมาตรฐานนีโอเบียม เพื่อให้ได้สเปกตรัมของสารมาตรฐานที่มีความเข้มรังสีเอ็กซ์ของนีโอเบียม (NbKα) เท่ากับของตัวอย่างในแต่ละตัวอย่าง เมื่อนำสเปกตรัมของสารมาตรฐานที่ได้ปรับค่าแล้วมาหักลบออกจากสเปกตรัมของตัวอย่าง ก็จะได้สเปกตรัมของตัวอย่างที่ได้แก้การรบกวนของเอสเคปที่สามารรถคำนวณความเข้มรังสีเอ็กซ์ของเหล็กได้ การปรับสเปกตรัมของสารมาตรฐานและการแก้การรบกวนเอสเคปในสเปกตรัมของตัวอย่างต่างๆ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาทำการปรับเทียบแฟ้มข้อมูลของตัวอย่างและของสารมาตรฐานนีโอเบียม

Figure 4. เป็นรูปที่ได้จากการนำสเปกตรัมของตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ได้ปรับค่าแล้วมาซ้อนกัน ซึ่งจะเห็นลักษณะการรบกวนของเอสเคปที่ซ้อนกันของเหล็ก

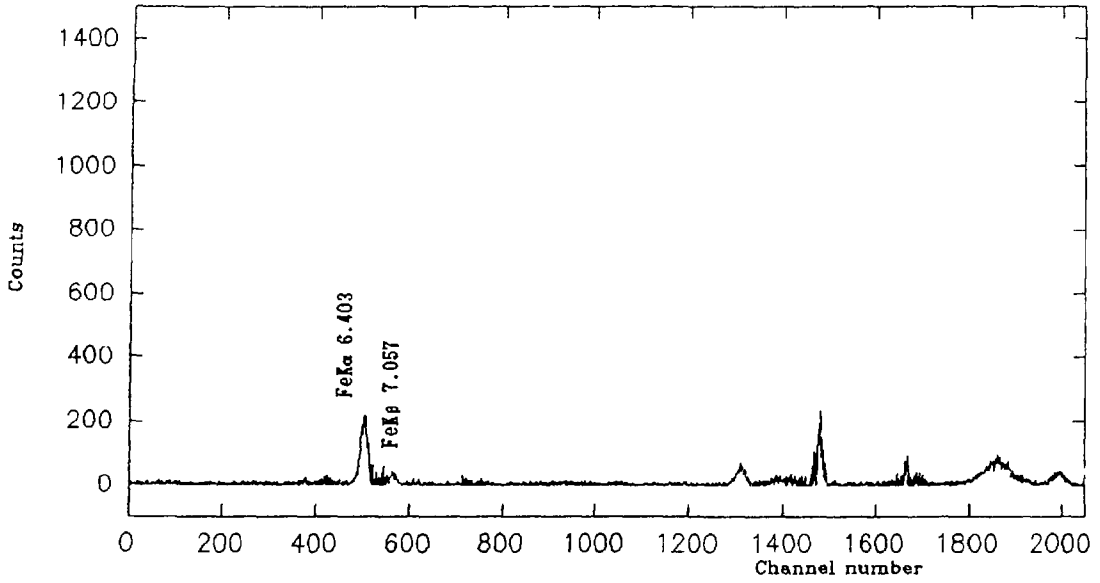
Figure 5. แสดงสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างที่ได้แก้การรบกวนของเอสเคปซึ่งไม่มีการรบกวนของเอสเคปที่เกิดจากหัววัดรังสีHPGe (LEPS) ต่อรังสีเอ็กซ์ของเหล็ก ทำให้สามารถคำนวณความเข้มรังสีเอ็กซ์ของเหล็ก (FeKα) ของแต่ละตัวอย่างได้ดังแสดงใน Table 3. และความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีเอ็กซ์ของเหล็กกับปริมาณของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้แสดงใน Figure 6. จะเห็นว่าความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุเหล็ก (FeKα) แปรผันตามปริมาณของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แสดงว่าการแก้การรบกวนของเอสเคปที่เกิดจากโฟโตนิคของนีโอเบียมที่มีต่อพีค FeKα โดยวิธีนี้ได้ผลดี

**Table 2.** Intensity of NbK $\alpha$  in Samples and standard Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Sample No.	Concentration of Elements		NbK $\alpha$ (Counts)	Normalized Factor (NbK $\alpha$ /88992)
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)		
1	2.5045	10.1285	94192 + 399	1.065
2	4.9920	10.0085	91201 + 269	1.029
3	7.3745	10.0275	82217 + 429	0.930
4	9.9500	10.0135	77535 + 375	0.867
5	12.4270	9.9610	67906 + 522	0.765
STD-Nb			88992 + 296	1.000



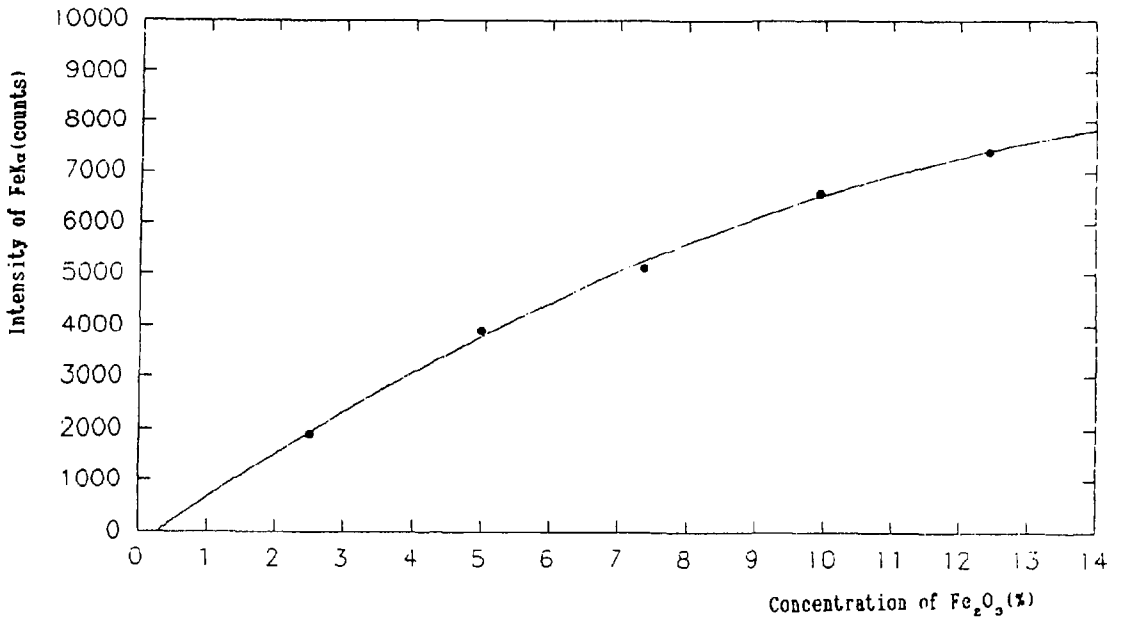
**Figure 4.** X-ray spectrum of samples No.2 and normalized spectrum of Nb.



**Figure 5.** Spectrum of sample No.2 subtracted by normalized spectrum of Nb.

**Table 3.** Intensity of FeKa in Samples.

Sample No.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	FeKa (Counts)
1	2.5045	1903 ± 84
2	4.9920	3914 ± 121
3	7.3745	5121 ± 137
4	9.9500	6601 ± 210
5	12.4270	7409 ± 213

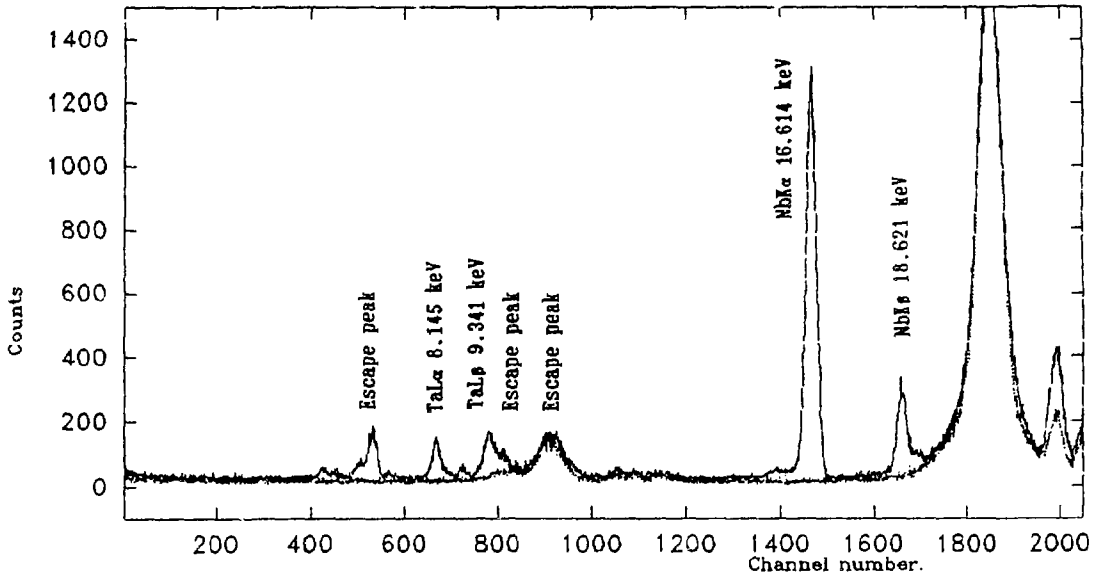


**Figure 6.** Plot of intensity of FeK $\alpha$  VS concentration of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in samples.

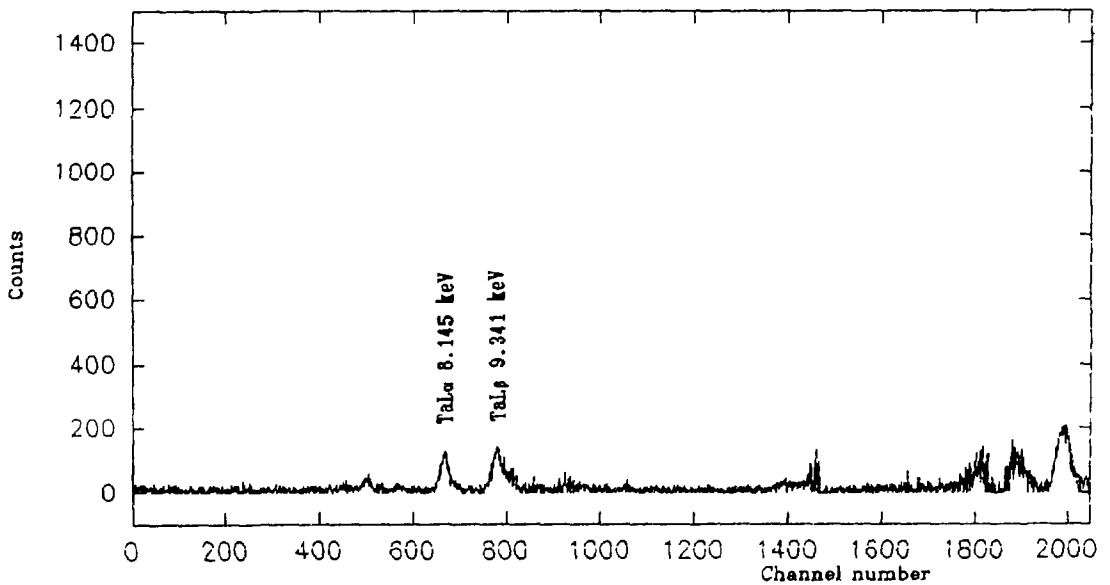
### วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลและแทนทาลัมในตัวอย่างแร่เศรษฐกิจ

ได้ทดลองทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุนิกเกิลและแทนทาลัม ในตัวอย่างแร่เศรษฐกิจ โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์เป็นแร่แทนทาลิไทต์โคลัมไบต์ (Tantalite-Columbite) ที่หน่วยงานเอกชนที่มีกิจการเกี่ยวกับค้าแร่ส่งมาให้วิเคราะห์ และทราบผลจากการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันแล้ว พบว่ามีรังสีเอ็กซ์ของแทนทาลัม (TeLa-8.145keV, TeLp-9.341keV และ TeLr-10.982keV) ถูกรบกวนจากเอสเคปพีคที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุอื่นที่มีอยู่ในตัวอย่าง คือเอสเคปพีคที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุนิกเกิล และรังสีคอมพ์ตันดังแสดงใน Figure 7. ซึ่งเป็นสเปกตรัมของตัวอย่าง PH-71 เมื่อได้ใช้วิธีการแก้การรบกวนของเอสเคปพีค จะได้สเปกตรัมที่ได้แก้การรบกวนของเอสเคปพีคแล้ว ที่ให้สามารถคำนวณความเข้มรังสีเอ็กซ์ของแทนทาลัมได้ ดังแสดงไว้ใน Figure 8.

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่โดยวิธีนี้ (XRF) ได้แสดงไว้ใน Table 4. จะเห็นว่าได้ผลใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (NAA) ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นที่ยอมรับของหน่วยงานเอกชนที่มีกิจการเกี่ยวกับการซื้อขายแร่ แสดงว่าการวิเคราะห์โดยวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่ได้



**Figure 7.** X-Ray spectrum of sample PH-71 detected by HPG $\epsilon$ (LEPS) detector.



**Figure 8.** Corrected escape peak X-Rays spectrum of sample PH-71.



**Table 4. Concentration of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in Samples**

Sample No.	XRF		NAA	
	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
PH-55	15.16 ± 0.81	27.28 ± 0.80	14.45 ± 0.28	28.66 ± 0.40
PH-56	23.28 ± 1.26	32.65 ± 0.38	21.81 ± 1.06	32.76 ± 0.27
PH-57	16.64 ± 1.30	31.28 ± 0.88	17.61 ± 0.43	29.27 ± 0.42
PH-71	31.01 ± 3.02	23.85 ± 1.01	31.09 ± 0.73	22.75 ± 1.37
PH-100	11.08 ± 0.77	9.18 ± 0.23	9.66 ± 1.02	6.81 ± 1.66
PH-101	18.77 ± 1.71	12.50 ± 0.03	19.94 ± 0.09	14.47 ± 1.82
PH-116	12.53 ± 0.98	13.09 ± 0.21	13.03 ± 0.45	18.92 ± 1.17
PH-1241	31.23 ± 1.23	27.02 ± 0.39	34.28 ± 0.54	26.95 ± 1.05
PH-1247	44.79 ± 2.02	25.46 ± 0.80	43.72 ± 0.19	22.73 ± 0.54

**สรุปผลการทดลองและอภิปราย**

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้หัววัดรังสีHPGe (LEPS) วัดรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานมากกว่าเค-แอมบอร์ฟชั้นเอกซ์ของGe (E>11.101keV) จะเกิดเอสเคปพีคที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานรังสีเอ็กซ์และพลังงานรังสีเอ็กซ์ของธาตุGe รังสีเอ็กซ์ที่ทำให้เกิดเอสเคปพีคได้ดีได้แก่รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 11.7 keV - 30.0 keV ซึ่งเป็นพลังงานรังสีเอ็กซ์ของธาตุ As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo และพบว่าอัตราการเกิดเอสเคปพีคจะแปรผกผันกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ทำการวัด

ในการวัดรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างที่มีธาตุหลักผสมกับธาตุนี้โอเบียม สเปคตรัมที่ได้ไม่สามารถคำนวณความเข้มรังสีFeKαได้โดยตรง เนื่องจากFeKαถูกรบกวนโดยเอสเคปพีคที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุนี้โอเบียม แต่สามารถทำการคำนวณFeKαได้ผลดี เมื่อนำสเปคตรัมของสารมาตรฐานนี้โอเบียมที่ได้ทำการปรับNbKαให้มีความเข้มเท่ากับNbKαที่มีในตัวอย่างมาลบออกจากสเปคตรัมของตัวอย่าง และได้ความเข้มFeKαที่แปรผันโดยตรงกับปริมาณเหล็กในตัวอย่าง

ในกรณีตัวอย่างมีส่วนประกอบเป็นธาตุหลายธาตุ ที่ให้รังสีเอ็กซ์ซึ่งทำให้หัววัดรังสีเกิดเอสเคปพีคได้ดี การคำนวณความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุที่ถูกรบกวนให้ถูกต้องจะกระทำได้อาก จะต้องทำการวัดสเปคตรัมมาตรฐานของธาตุเหล่านั้นทุกธาตุ แล้วทำการปรับเทียบให้ได้สเปคตรัมที่มีความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุเท่ากับความเข้มรังสีเอ็กซ์ของธาตุนั้นๆในตัวอย่าง ซึ่งสามารถกระทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย จะทำให้ได้สเปคตรัมของตัวอย่างซึ่งได้แก่การรบกวนของเอสเคปพีคที่สามารถคำนวณความเข้มรังสีได้ถูกต้อง

การใช้หัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำในงานวิเคราะห์ตัวอย่างโดยวิธีนิวเคลียร์ ไม่ว่าจะ เป็นวิธีนิวตรอนแอคทีเวชันหรือวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ต้องเลือกใช้หัววัดรังสีที่เหมาะสม แม้ว่าหัววัดรังสีหลายแบบซึ่งสามารถวัดรังสีที่มีพลังงานในช่วงที่ทำการทดลองได้ก็ตาม หัววัดรังสี ที่เหมาะกับงานด้านเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีที่สุดได้แก่ หัววัดรังสี Si(Li) LEPS(SLP) เพราะ สามารถวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของธาตุต่างๆได้ทุกธาตุโดยวัด K X-Raysของธาตุเบา( $Z < 50$ ) และสามารถวัด L X-raysของธาตุหนัก( $Z > 50$ ) โดยไม่มีแอลเคปนิครบกวนในสเปกตรัมแต่อย่าง ไร หัววัดรังสีชนิดนี้ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลวตลอดเวลาเพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพ ของหัววัดรังสี(สามารถห้องไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ประมาณ 1 สัปดาห์) หัววัดรังสี HPGe LEPS (GLP Series) สามารถใช้ในงานเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแต่ก็เหมาะสำหรับวัด K X-Rays ของธาตุหนักเท่านั้น ถ้านำมาวัดรังสีเอ็กซ์ของธาตุเบาจะเกิดแอลเคปนิครบกวนในสเปกตรัม ซึ่งจะ ทำให้การคำนวณความรังสีเอ็กซ์ของธาตุที่ทำการวิเคราะห์ผิดพลาดได้ สำหรับหัววัดรังสีแบบ Hyperpure Germanium อื่นๆ มีความเหมาะสมกับงานทางด้านแกมมาสเปกโตรสโคปีเพราะ สามารถวัดรังสีฟอสฟอรัสในช่วงพลังงานที่กว้าง และมี Energy Resolution พอเหมาะในการ แยกพลังงานของรังสีแกมมาของไอโซโทปต่างๆ หัววัดประเภทนี้สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง ได้เมื่อไม่ใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการใช้หัววัดนี้จะต้องคำนึงถึงแอลเคปนิคที่เกิดขึ้นเมื่อวัดรังสี แกมมาที่มีพลังงานในช่วง 11.20 keV ถึง 30 keV

### บรรณานุกรม

- 1 Gisque, Robert D., et al. "Trace Element Determination with Semiconductor Detector X-Ray Spectrometers" Analytical Chemistry. 45: 4, 1973
- 2 ORTEC Application Note AN 34. 2nd ed. U.S.A: ORTEC inc., 1978
- 3 H.K. Herglotz, X-Ray Spectrometry, Particle Spectroscopy ; V.2, 39-40 (1978)
- 4 Bertin, Eugene P. Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis. New York Plenum Press, 1970.
- 5 Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement. 2nd ed., Wiley, New York, 1989
- 6 สมพร จงคำ "การวิเคราะห์แร่โมนาไซด์โดยวิธีการเรืองรังสีเอ็กซ์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต แผนกวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2519
- 7 สุรพงษ์ นิมพ์จันทร์ "การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมในแร่ โดยวิธีการเรืองรังสีเอ็กซ์แบบวิเคราะห์จากอัตราส่วนของฟิค" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต แผนกวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522.