

เอกสารอ้างอิง

1. นเรศร์ จันทรชาน "การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์เชิงปฏิบัติ" เอกสารประกอบการสอนวิชา NT 172521 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
2. เสถียร สุนทรพงศ์เผ่า "โมลิบดีนัม" เอกสารเศรษฐศาสตร์ศึกษา เล่มที่ 6 กรุงเทพฯ, 2517.
3. John, H.Y. et al. "Extractive Metallurgy of Refractory Metals"  
A Publication of the Metallurgical Society of AIME,  
1982.
4. Archer, R.S., et al. in Molybdenum Steels-Iron Alloys,  
The Hudson Press, Inc., New York, 1948.
5. Johnson, Carl. G and William, R. "Metallurgy" American Technical  
Society, Chicago, 1956.
6. Edneral, F.P. Electrometallurgy of Steel and Ferro-Alloys, Moscow:  
Mir Publishers, 1979.
7. Kummer, John. T. "Mineral Facts and Problems" Bureau of Mines Bull.  
No.671 pp.591-610 Washington, 1981.
8. Newton, Joseph. Extractive Metallurgy. New York : John Wiley &  
Sons, Inc., 1959.
9. Johnson, Carl G. "Metallurgy" American Technical Society, Chicago,  
1959.
10. Elyvtin, V.P. and al. Production of Ferro-alloys Electrometallurgy  
Moscow : The State Scientific and Technical Publisher House  
for Literature on Ferro and Nonferro Metallurgy, 1957.

11. Marh, Herman "Molybdenum And Molybdenum Alloys." Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (3rd.) 15(1981):996.
12. Peters, Anthony.T. Ferro Production Metallurgy. New York : John Wiley & Sons, 1982.
13. Bertin, Eugene. P. Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis, 2nd., New York: Plenum Press, 1975.
14. Brien, W.L. and Blickensderfer. R. "Strengthening Molybdenum by Powder Metallurgical Internal Oxidation of ZrMo<sub>2</sub>" Report of Investigation No.7958, Albany Metallurgy Research Center, Albany Oreg, Bureau of Mines, United States of The Interior, 1974.
15. Birks, L.S. X-Ray Spectrochemical Analysis. New York:John Wiley & Sons, Inc., 1969.
16. Stross, W. and Clark. "The Analysis of Aluminium Alloys Containing Molybdenum" J. Metallurgia., 67 (1963) : 47-49.
17. Wilson, Robert. Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels McGraw-Hill, London, 1957.
18. Weast, Robert. (ed). in Handbook of Chemistry and Physics, Chemical Rubber Co., U.S.A., 1971.
19. Strassburger, Julius H. (ed) in Blast Furnace Theory and Prace Vol.2. American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum Engineers, Inc, New York, 1969.

20. Rauch, A.H. (ed) in Source Book on Ductile Iron, American Society For Metals, New York, 1977.
21. Morrow, Huger, III. "Molybdenum" Encyclopedia of Science and Technology (5th) 8(1982) : 702-707.
22. Lynch, Charles. T. General Properties, in Handbook of Materials Science, Vol.1. pp.29-30. CRC. Press. Inc., U.S.A.,1974.
23. Briggs, Janet. Z. and Barr, Robert. Q. "Molybdenum and It's Compounds" The Encyclopedia of Chemistry (3rd), (1973) : 693-696.
24. Vogel, Arthur. in A Tool-book of Quantitative Inorganic Analysis, 3rd.ed., pp.647-904, Lawe & Brydone. Ltd., London, 1961.
25. Lapeds, Daniel, N. (ed). "Thermite Process" Encyclopedia of Chemical Technology (Kirk-Othmer.ed.) 2(1978) : 194.
26. Marczenko Zygmunt. Spectrophotometric Determination of Element. New York : John Wiley & Sons, 1976.
27. Bradly, George. S. "Materials Handbook," An Encyclopedia for Executives (9th.ed.), McGraw-Hill : 1963.
28. Allen, Dell. K, "Metallurgy Theory and Practice" 7th.ed.American Technical Society, Chicago, 1978.
29. Snow, William. W. "Electropolishing" Encyclopedia of Science & Technology (McGraw-Hill 4(1977) : 719.

30. Moldolfo, L.F. Aluminium Alloys : Structure and Properties.  
London : The Whitefriars Press, Ltd., 1976.
31. Rhoads, S.C., Bullard, S.J., and Glenn, M.L. "Partial Replacement of Chromium in Austenitic Stainless Steels by Molybdenum, Copper and Vanadium" Report of Investigation No.8900, United States Department fo The Interior, Bureau of Mines, Washington, 1984.
32. Kolthoff, I.M. and Sandel, E.B. in Textbook of Quantitative Inorganic Analysis, pp.726-729 Macmillan Co., New York, 1974.
33. Brewster, Q. Ray and Mcwen, E. William. in Organic Chemistry, 3rd. ed., pp.756-757, Prentice-Hall of India Private Ltd., New Delhi, 1968.
34. Bowen, H.J.M. and Gibbons, D.A. Radioactivation Analysis.  
Oxford: Charendou Press, 1963.
35. Laul, J.C. "Neutron Activation Analysis of Geological Material"  
Atomic Energy Review, 17(1979) IAEA, Vienna, 603-615.
36. Benedict, Manson et al. Nuclear Chemical Engineering. 2nd, ed.  
New York: McGraw-Hill. Co., 1981.
37. Cullity, B.D. Element of X-Ray Diffraction 2nd. ed. New York:  
Addison-Wesley, 1978.

38. Barr, Rober. Q. Molybdenum and Molybdenum Alloys. 15 (1979)  
Climax Molybdenum Company, 670-682.
39. Timm. John Arrend. General Chemistry. New York: McGraw-Hill Book  
Co., 1966.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

6.1 พลังงานและความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เรือง

รังสีเอกซ์เรือง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับรังสีแกมมา (ต่างกันเพียงรังสีเอกซ์เกิดขึ้นใน electron shell ส่วนรังสีแกมมาเกิดขึ้นภายในนิวเคลียสของอะตอม) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เรือง (E) กับความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots (6.1)$$

เมื่อ  $h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

$$6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$v$  = ความถี่ของรังสีเอกซ์

$$c = \text{ความเร็วของแสง} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

เมื่อแทนค่าคงที่  $h$  และ  $c$  ลงในสมการที่ 6.1 จะได้ความสัมพันธ์

$$E(\text{keV}) = \frac{12.396}{\lambda(\text{\AA})} \dots\dots\dots (6.2)$$

(หมายเหตุ :  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )

6.2 คุณสมบัติเกี่ยวกับการเรืองรังสีเอกซ์ของโมลิบดีนัม

คุณสมบัติเฉพาะของ โมลิบดีนัมบางประการ เกี่ยวกับการเรืองรังสีเอกซ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 6.2 และ 6.3

ตารางที่ 6.1 แสดงพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K L และ M ของ  
โมลิบดีนัม เหล็ก และอะลูมิเนียม (kV)

Element	K	LI	LII	LIII	MI	MII	MIII	MIV	MV
13-Al	1.559	0.087	0.073	0.072	-	-	-	-	-
26-Fe	7.111	0.849	0.721	0.708	0.093	-	-	-	-
42-Mo	20.002	2.884	2.627	2.523	0.507	0.412	0.394	0.232	0.228

ตารางที่ 6.2 แสดงพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ส่งออกจากวงโคจร K และ L ในอะตอม  
โมลิบดีนัม เหล็ก และอะลูมิเนียม (keV)

Element	K $\alpha_1$	K $\alpha_2$	K $\beta_1$	K $\beta_2$	L $\alpha_1$	L $\alpha_2$	L $\beta_1$	L $\beta_2$	L $\gamma_1$
13-Al	1.487	1.486	1.553	-	-	-	-	-	-
26-Fe	6.403	6.390	7.057	-	0.704	-	0.717	-	-
42-Mo	17.478	17.373	19.607	19.964	2.293	2.290	2.395	2.518	2.623

ตารางที่ 6.3 แสดงค่า x-ray absorption edges ในรูปความยาวคลื่นในวงโคจร  
K L และ M ของโมลิบดีนัม เหล็ก และอะลูมิเนียม (Å)

Element	K	LI	LII	LIII	MI	MII	MIII	MIV	MV
13-Al	7.951	142.500	163.022	163.942	-	-	-	-	-
26-Fe	1.743	14.650	17.188	17.504	132.991	-	-	-	-
42-Mo	0.620	4.323	4.716	4.913	24.413	30.083	31.401	53.277	54.201



ตารางที่ 6.4 แสดงค่าความยาวคลื่น (Å) ของรังสีเอกซ์เรียงจากอะตอมโมลิบดีนัม  
เหล็ก และอะลูมิเนียม K-series

Line Electron transition K ←	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_3$	$\beta_2$
		LIII	LII	MIII	MII	NII, NIII
13-Al	8.339	8.339	8.341	7.981	-	-
26-Fe	1.937	1.936	1.940	1.757	-	-
42-Mo	0.710	0.709	0.713	0.632	0.633	0.621

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความยาวคลื่น (Å) ของรังสีเอกซ์เรียงจากอะตอมโมลิบดีนัม  
เหล็ก และอะลูมิเนียม L-series

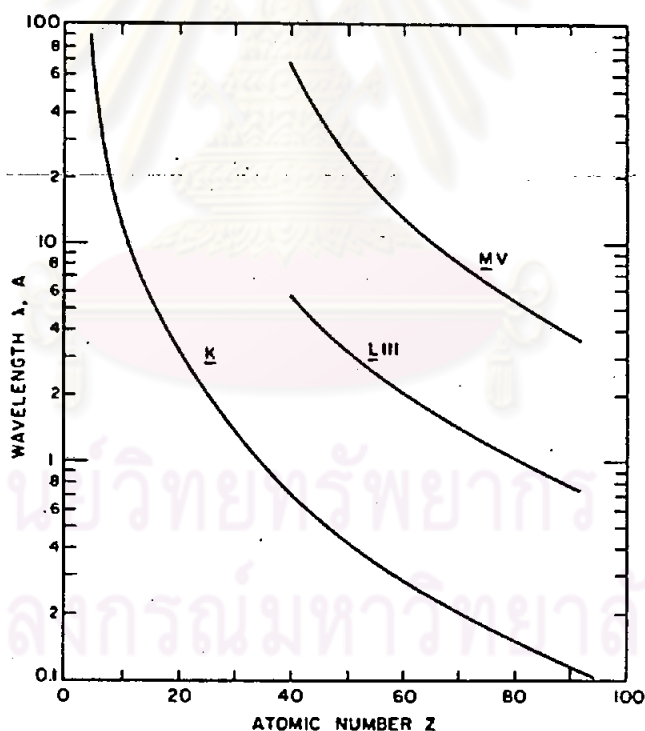
line Electron transition	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_6$	$\lambda$	$\eta$
LIII ←	MV	MIV		NV			OV, OV						NI	
LII ←			MIV					NIV				OIV		MI
LI ←					MIII	MII			NII	NIII	OIII			
13-Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Fe	17.602	17.290	-	-	15.710	-	-	-	-	-	-	-	20.201	19.730
42-Mo	5.406	5.414	5.176	4.923	5.013	5.048	-	4.726	4.380	-	-	-	6.150	5.847

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

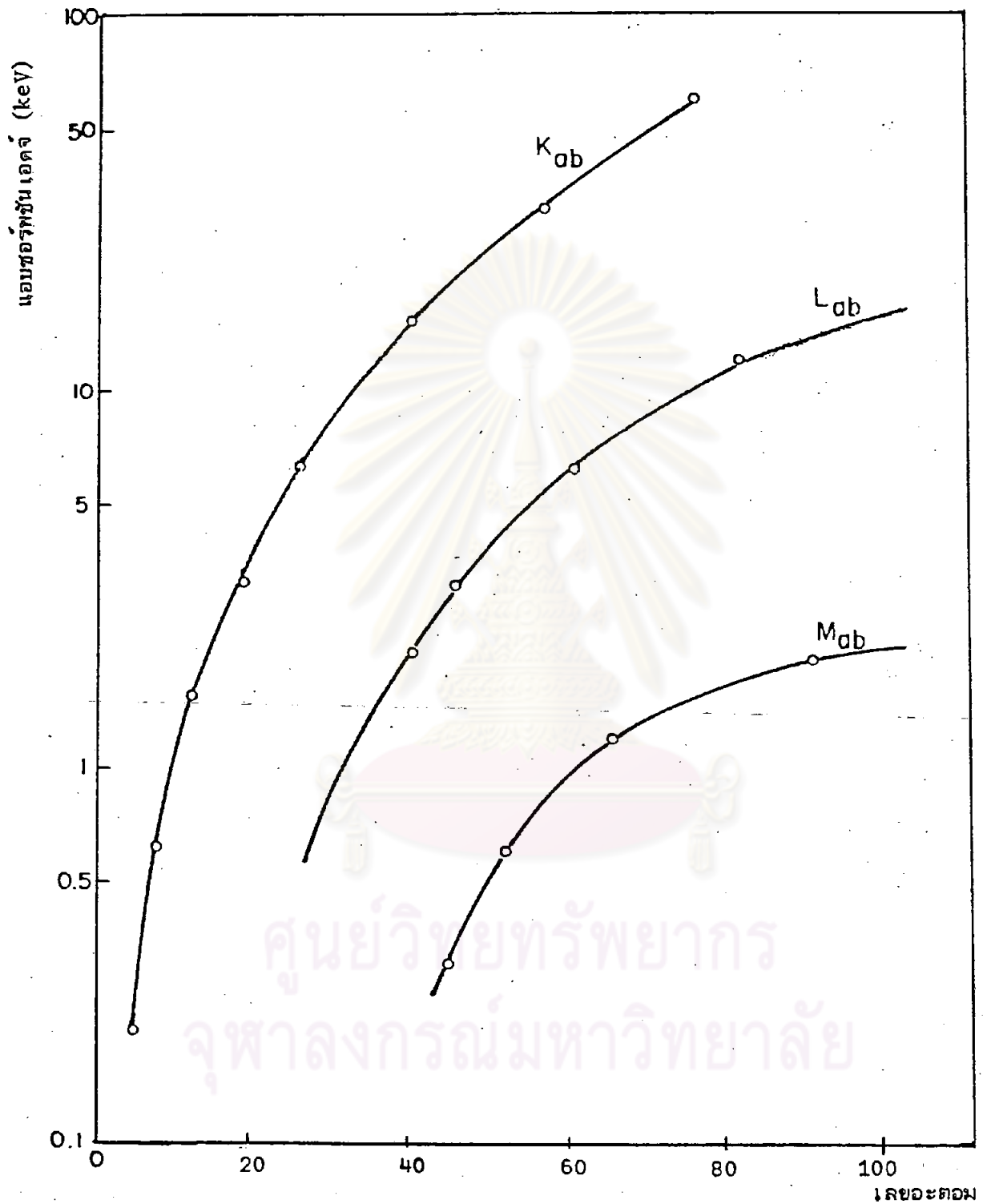


### 6.3 แอ็บซอร์พชันเอจ (absorption edge)

เป็นคุณสมบัติเฉพาะของธาตุที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานโฟตอน คุณสมบัตินี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้นแต่จะมีระดับพลังงานของโฟตอนค่าหนึ่งที่ธาตุสามารถดูดกลืนได้เป็นพิเศษ เราเรียกพลังงานที่จุดนี้ว่าเป็นแอ็บซอร์พชันเอจของธาตุนั้นๆ ซึ่งค่าพลังงานแอ็บซอร์พชันเอจนี้สำหรับอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรจะตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรนั้น ๆ หอติ (ตารางที่ 6.1) และจะเป็นปฏิภาคกับเลขอะตอมของธาตุดังรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอ็บซอร์พชันเอจในรูปของความยาวคลื่น (Å) กับเลขอะตอม



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอมซอร์ทซ์เอ็นเอคค์ (keV) กับ เลขอะตอม

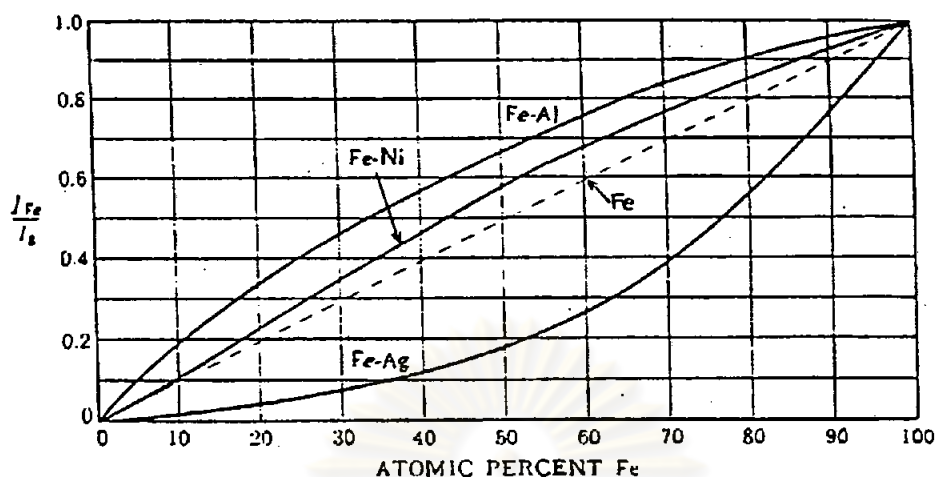
ในการกระตุ้นอะตอมของธาตุให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์โดยใช้โฟตอนนั้น หากใช้โฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าแอมซอร์พชันเอจจ์เล็กน้อย จะทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่ามาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากโฟตอนที่มีพลังงานสูงมีอำนาจทะลุทะลวงสูงจึงถูกธาตุดูดกลืนได้น้อย

#### 6.4 แมทริกซ์ เอฟเฟกต์ (matrix effect)

ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์โดยวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากสารตัวอย่างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยธาตุหลายชนิด ทำให้ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผันแปรไปตามความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ และกับธาตุอื่นที่เป็นตัวประกอบในตัวอย่าง (matrix elements) ผลจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ เรียกว่า "แมทริกซ์ เอฟเฟกต์ (matrix effect)" ซึ่งมี 2 แบบที่สำคัญ คือ

6.4.1 Matrix Absorption เมื่อส่วนประกอบของตัวอย่างเปลี่ยนไป เป็นผลให้การดูดกลืนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและรังสีเอกซ์เรือง เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยที่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่มีอะตอมสูงจะมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ เช่น โลหะผสม เหล็กกับเงิน และเหล็กกับอะลูมิเนียม ดังแสดงในกราฟที่ 6.3 เมื่อพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กพบว่าเมื่อเหล็กปนอยู่กับเงินนั้น จะวัดความเข้มรังสีได้น้อยกว่าปกติ เพราะว่าเงินดูดกลืนรังสีได้ดีในทางตรงกันข้ามเมื่อเหล็กผสมอยู่กับอะลูมิเนียม กลับวัดความเข้มรังสีได้สูงกว่าปกติ ซึ่งเป็นเพราะอะลูมิเนียมดูดกลืนรังสีได้น้อย

6.4.2 Enhancement Effect เกิดขึ้นเนื่องจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุในตัวอย่างมีพลังงานสูงกว่า absorption edge ของธาตุอื่นที่เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนั้นสามารถกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เรืองของอีกธาตุหนึ่งได้ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะมีผลมากในกรณีที่มีพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุหนึ่งมีค่าสูงกว่า absorption edge ของอีกธาตุหนึ่งเล็กน้อย จากกราฟรูปที่ 6.3 ถ้าเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองของเหล็กในเหล็กผสมนิเกิล กับในเหล็กบริสุทธิ์ จะเห็นว่าความเข้มรังสีในเหล็กผสมนิเกิลสูงกว่า ทั้งนี้เพราะเหล็กมี K absorption edge 7.11 keV ส่วนนิเกิลให้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเหล็กที่เกิดขึ้นจากรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับรังสีเอกซ์ของนิเกิล จึงมากกว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวในเหล็กบริสุทธิ์



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงอัตราส่วนของความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเหล็กในโลหะผสม ( $I_{Fe}$ ) Fe-Ni Fe-Al และ Fe-Ag ต่อความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเหล็กบริสุทธิ์  $I_S$

ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์จึงต้องมีเทคนิคในการแก้ปัญหาแมทริกซ์ เอฟเฟกต์ ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง

### 6.5 ฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ (fluorescence yield)

อัตราการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะน้อยกว่าอัตราการเกิดที่ว่างในวงโคจรอิเล็กตรอนเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น ไปชนอิเล็กตรอนของวงโคจรนอก ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกชนหลุดออกไป แล้วรังสีเอกซ์หายไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "Auger effect" อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า "Auger electron" ซึ่งมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานของรังสีเอกซ์ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

ถ้าให้  $W_k$  เป็นฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ ของ K x-rays

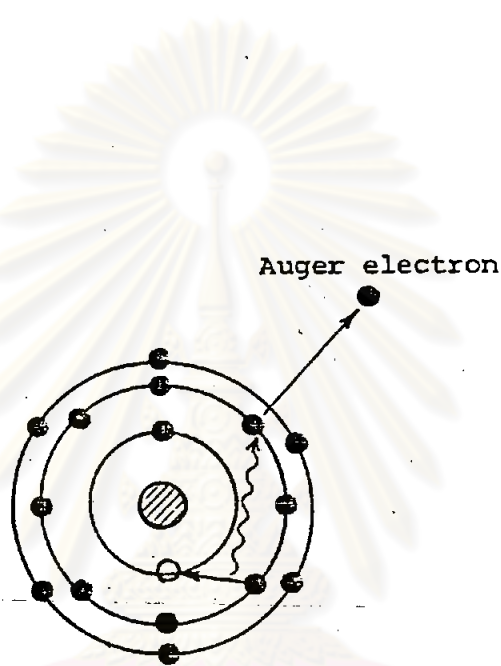
$n$  เป็นจำนวน K x-rays ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา

$N_k$  เป็นจำนวนที่ว่างที่เกิดขึ้นในวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้น K ต่อหน่วยเวลาเดียวกัน

$$W_k = \frac{\text{อัตราการเกิด K x-rays}}{\text{อัตราการเกิดที่ว่างใน K-shell}} \dots\dots\dots (6.3)$$

$$= \frac{\Sigma (n)_k}{N_k} \dots\dots\dots (6.4)$$

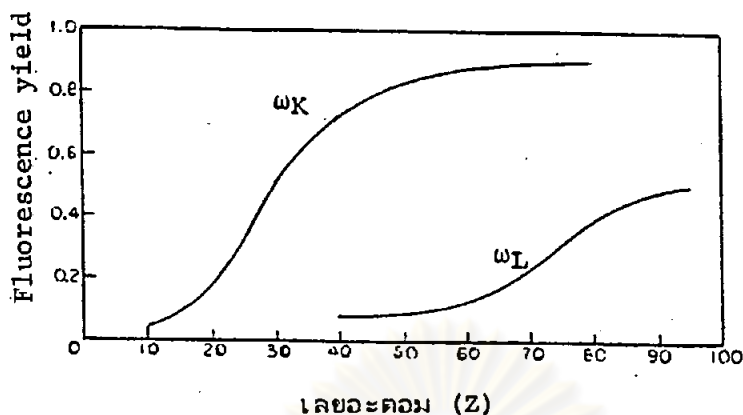
$$= \frac{n(K_{\alpha_1}) + n(K_{\alpha_2}) + n(K_{\beta_1}) + \text{etc}}{N_k} \dots\dots\dots (6.5)$$



- = อิเล็กตรอน
- = ที่ว่างของอิเล็กตรอน
- > = กิจทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
- ~~~~~> = กิจทางการเคลื่อนที่ของรังสีเอ็กซ์เตงาอะตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.4 แผนภาพแสดงการเกิด Auger Effect



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ กับ เลขอะตอม

จากกราฟรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่า ค่าฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม (Z)

สำหรับโมลิบดีนัมฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ ในแต่ละวงโคจรมีค่าดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าฟลูออเรสเซนซ์ ยิลด์ ของธาตุโมลิบดีนัม, เหล็ก และ อะลูมิเนียมในวงโคจรต่าง ๆ

Element	K	L	M
13-Al	0.026	-	-
26-Fe	0.324	0.003	-
42-Mo	0.749	0.039	0.001

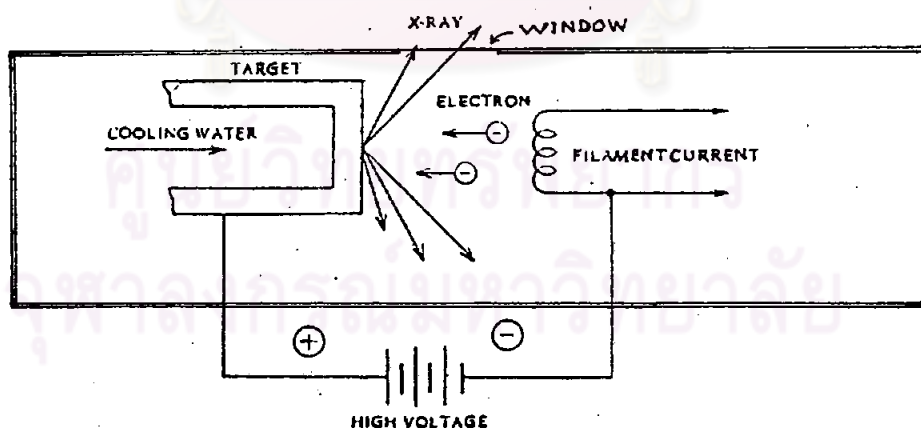
#### 6.6 ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (primary radiation source)

ในกระบวนการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ จำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิกระตุ้นสารตัวอย่าง เพื่อให้อะตอมของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์-เรืองออกมาเพื่อจะทำการวิเคราะห์ต่อไป

สำหรับต้นกำเนิดรังสีปรมาณูที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นพลังงานโฟตอนที่ได้จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (x-ray tube) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาพลังงานต่ำจากไอโซโทปรังสี

#### 6.6.1 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เป็นหลอดสูญญากาศ ประกอบด้วยขั้วลบ มีลักษณะเป็นไส้หลอด (filament) ทำด้วยโลหะทั้งสแตน ชีววมกเป็นแผ่นโลหะ (target) ทำด้วยโลหะหนัก เช่น โครเมียม นิกเกิล ทังสแตน และโรเดียม ระหว่างขั้วทั้งสองต่อกับศักดาไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ 6.6 เมื่อเผาไส้หลอดร้อนจะปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกรังด้วยศักดาไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ อิเล็กตรอนจะวิ่งไปชนเป้า (target) เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งผ่านอะตอมของเป้า จะปล่อยพลังงานจลน์ออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-rays) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงพอที่จะไอออนไนซ์อิเล็กตรอนของ เป้าหลุดออกจากวงโคจรจะเกิดรังสีเฉพาะตัวขึ้นซ้อนทับกับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง



รูปที่ 6.6 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดของรังสีเอกซ์ (มีพลังงานสูงสุด) กับศักดาไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{V} = \frac{12,400}{V} \dots\dots\dots (6.3)$$

$$= \frac{12.4}{V(\text{kV})} \dots\dots\dots (6.4)$$

ความเข้มรวมของรังสีเอกซ์ต่อเนื้อที่ที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Z)

ของธาตุที่เป็นเป้า กระแส (i) และศักดาไฟฟ้า (V) ที่ให้แก่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

$$I_{\text{cont. spectrum}} \propto iZV^m \dots\dots\dots (6.5)$$

เมื่อ  $I_{\text{cont. spectrum}}$  คือความเข้มรังสีเอกซ์ต่อเนื้อที่  
m คือค่าคงที่

### 6.6.2 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาชนิดไอโซโทป

ต้นกำเนิดรังสีเหล่านี้ แบ่งได้ 3 พวก

ก. ต้นกำเนิดที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา หรือรังสีแกมมาแต่อย่างใด พลังงานของรังสีที่ให้ออกมา มีพลังงานแยกจากกัน (discrete energy) ให้เห็นเป็นยอด (peak) อย่างเด่นชัด อาจจะมีพลังงานเดียวหรือหลายพลังงานก็ได้ เช่น  $^{55}\text{Fe}$   $^{109}\text{Cd}$

ข. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง เป็นต้นกำเนิดรังสีที่สร้างขึ้นด้วยต้นกำเนิดรังสีเบต้ากับธาตุคงตัว ธาตุพวกนี้ที่ใช้ส่วนมากเป็นโลหะหนักเพราะจะให้รังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่มีความเข้มสูงกว่ารังสีเอกซ์ต่อเนื่องของธาตุเบา ธาตุที่ผสมเข้าไปนี้ทำหน้าที่เป็นเป้าเมื่อรังสีเบต้าผ่านอะตอมของธาตุเหล่านี้จะให้รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง ซึ่งนิยมเรียกเป็นภาษาเยอรมันว่า "เบรมสตราห์ลุง (bremsstrahlung) ซึ่งแปลว่า "braking radiation" ตัวอย่างเช่น  $^3\text{H}/\text{Ti}$ ,  $^3\text{H}/\text{Zr}$ ,  $^{147}\text{Pm}/\text{Zr}$

ค. ต้นกำเนิดรังสีพวกอิเล็กตรอนแคปเจอร์ พวกนี้เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่นิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนมากเกินไป ทำให้นิวเคลียสไม่สามารถอยู่ในสภาวะสมดุล จึงมีการดึงอิเล็กตรอนจากวงโคจรใกล้นิวเคลียส ได้แก่ วงโคจรชั้น K เพื่อรวมโปรตอนซึ่งจะกลายเป็น



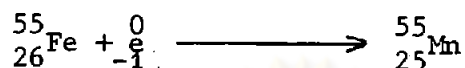


ตารางที่ 6.7

แสดงคุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทปครึ่งสัปดาห์ชนิด

RADIOISOTOPE	HALF-LIFE (Year)	MODE OF DECAY	USEFUL RADIATION EMITTED (keV)	γ PHOTON PER DISINTEGRATION	TYPICAL ACTIVITY	
					FOR SCINTILLATION & PROPORTIONAL COUNTERS	FOR HIGH RESOLUTION Si AND Ge DETECTORS
<sup>55</sup> Fe	2.7	EC	5.9 (Mn K X-Rays)	28.5	2 mCi	5 mCi
<sup>3</sup> H/Zr	12.3	β	2-12 (Bremss.) 2 (Zr L X-Rays)	$4 \times 10^{-3}$ $10^{-3} - 10^{-2}$	2 Ci	2 Ci
<sup>3</sup> H/Ti	12.3	β	2-12 (Bremss.) 4.5 (Ti K X-Rays)	$10^{-2}$ $10^{-2}$	2 Ci	2 Ci
<sup>238</sup> Pu	86.4	α, γ	12-22 (U L X-Rays)	13	10 mCi	30 mCi
<sup>109</sup> Cd	1.3	EC	22.1 (Ag K X-Rays) 88 (γ-Ray)	107 4	1 mCi	3 mCi
<sup>147</sup> Pm/Al	2.6	β	10-100 (Bremss.)	0.4	0.5 Ci	10 Ci
<sup>241</sup> Am	458	α, γ	12-22 (Np L X-Rays) 26 (γ-Ray) 59.6 (γ-Ray)	37 2 3	10 mCi	100 mCi
<sup>153</sup> Gd	0.65	EC	41 (Eu K X-Rays) 70 (γ-Ray) 97 (γ-Ray) 103 (γ-Ray)	110 2.6 30 20	1 mCi	3 mCi
<sup>57</sup> Co	0.74	EC	6.4 (Fe K X-Rays) 14 (γ-Ray) 122 (γ-Ray) 136 (γ-Ray) 700 (γ-Ray)	48 8.2 85 11 0.2	1 mCi	3 mCi

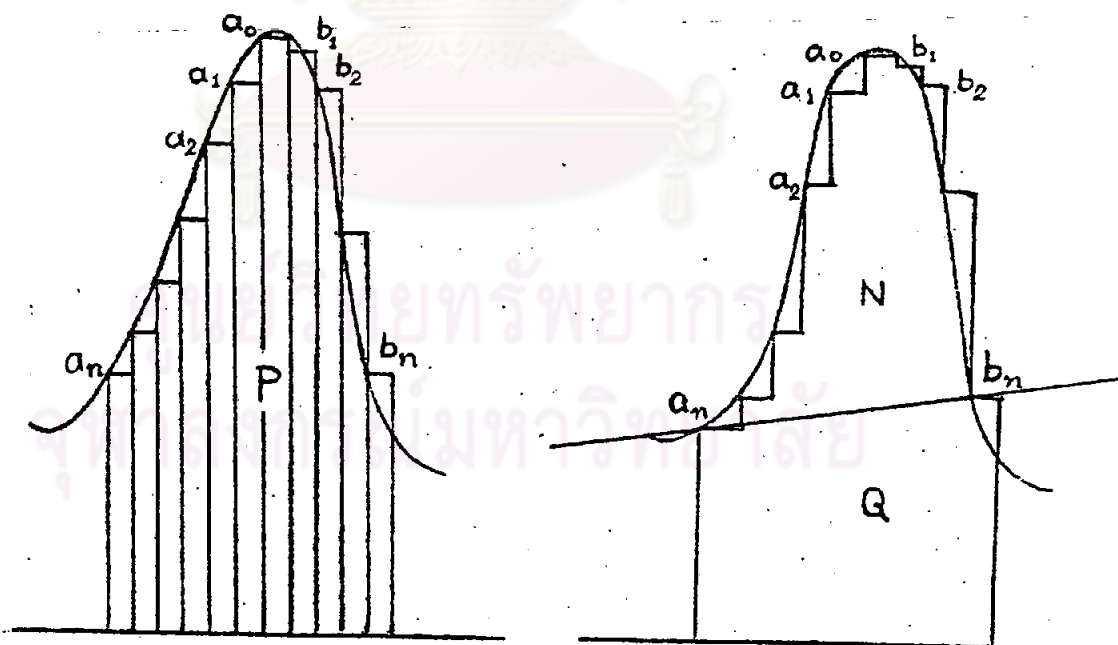
นิวตรอน ได้ธาตุใหม่เกิดขึ้น มีเลขมวล (mass number) เท่าเดิม แต่จำนวนโปรตอนลดลง 1 ตัว เรียกว่าเป็นไอโซบาร์ (isobar) กับนิวไคลด์เดิม เมื่ออิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K หลุดออกไป อิเล็กตรอนจากวงโคจรนอกจะเข้าไปแทนที่ จะคายพลังงานส่วนเกินออกมาเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เช่น



จะได้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของแมงกานีส K x-rays มีพลังงาน 5.9 keV

### 6.7 การคำนวณค่าความแรงรังสี

การคำนวณความแรงของรังสีเอกซ์เรื่องโดยใช้การคำนวณพื้นที่ภายใต้ peak จากสเปกตรัมของรังสีที่ปรากฏ โดยคิดคำนวณพื้นที่ฐาน (base area) แล้วหักออกจากพื้นที่ทั้งหมดของ peak ตามวิธีของ Covell



รูปที่ 6.7 แสดงการหาพื้นที่สุทธิได้หัดตามวิธีของ Covell

(P = พื้นที่ใต้หัด, N = พื้นที่สุทธิได้หัด, Q = พื้นที่ฐานของหัด)

รูปที่ 6.7 และ 6.8 ให้  $a_0$  = ความแรงรังสีสูงสุดของ  
 $a_1, a_2, \dots, a_n$  = ความแรงรังสีใน peak ทางด้านซ้ายของ  $a_0$   
 $b_1, b_2, \dots, b_n$  = ความแรงรังสีใน peak ทางด้านขวาของ  $a_0$

ให้  $P$  = ความแรงรังสีทั้งหมด

$Q$  = ความแรงรังสีของพื้นที่ฐาน

$N$  = ความแรงรังสีภายใต้ peak

จะได้  $N = P - Q$

แต่  $P = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i$

และ  $Q = \frac{(2n-1)(a_n + b_n)}{2} + (a_n + b_n)$   
 $= (n + \frac{1}{2})(a_n + b_n)$

แทนค่า  $P$  และ  $Q$  จะได้

$$N = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i - (n + \frac{1}{2})(a_n + b_n) \dots\dots\dots(6.6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### 7.1 การวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis)

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน เป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยมีหลักการโดยสรุปดังนี้คือ เมื่ออนุภาคนิวตรอนถูกยิง (bombard) เข้าใส่อะตอมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส (nuclear transformation) ของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นสารกัมมันตรังสีหรือเรดิโอไอโซโทป ซึ่งอาจเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิมหรือธาตุใหม่ก็ได้ จากคุณสมบัติเฉพาะตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นนี้ ได้แก่ ครึ่งชีวิต (half-life) ชนิดของรังสีและระดับของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ก็สามารถจะทำให้ทราบได้ว่าเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด และจากปริมาณรังสีที่วัดได้จากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานนั้น ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณปริมาณของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชันมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ

7.1.1 พลังงานของนิวตรอน เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนที่มีพลังงานไม่เท่ากันกับสารหนึ่ง ๆ ให้ผลแตกต่างกัน พลังงานของนิวตรอนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง Kruger ได้จำแนกอนุภาคนิวตรอนตามขนาดของพลังงานออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. นิวตรอนช้า (slow neutron) เป็นนิวตรอนที่มีช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-1 ซึ่งยังแบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย ๆ ดังนี้

ก. เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ซึ่งจะมีการกระจายของพลังงานส่วนใหญ่ที่ 0.025 eV

ข. อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) จะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.025-0.2 eV

ค. รีโซแนนท์นิวตรอน (resonant neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1-1000 eV

2. อินเทอร์มีเดียตนิวตรอน (intermediate neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1-500 keV

3. นิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.5 MeV นิวตรอนที่มีพลังงานมากเช่นนี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์ได้หลายแบบ ซึ่งไม่ปรากฏให้เห็นในช่วงของพลังงานต่ำ มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ที่ใช้เทอร์มีลนิวตรอนไม่ได้ผล

7.1.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (neutron source) ได้มีการตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับอนุภาคนิวตรอนมานานหลายปีแล้ว ก่อนที่ Chadwick จะค้นพบว่ามีอยู่จริงในปี ค.ศ.1932 อนุภาคนิวตรอนมีมวลเป็น  $1.68 \times 10^{-24}$  กรัม ซึ่งมีมวลมากกว่ามวลของอนุภาคโปรตอนเพียงเล็กน้อย ไม่มีประจุ และเนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงทำให้มันมีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถทำให้นิวตรอนเกิดขึ้นได้ด้วยขบวนการทั่วไป คือ

7.1.2.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้มาจากสารกัมมันตรังสี (radioactive source) ต้นกำเนิดรังสีแบบนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่มีปริมาณน้อย ตัวอย่างสารรังสีที่สลายตัวให้นิวตรอนออกมาตามธรรมชาติ เช่น  $\text{Cf}^{252}$  ให้ปริมาณนิวตรอนมีความเข้มของนิวตรอนประมาณ  $2.6 \times 10^{12}$  n/cm<sup>3</sup>-sec

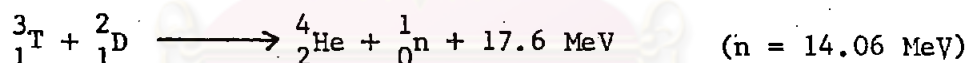
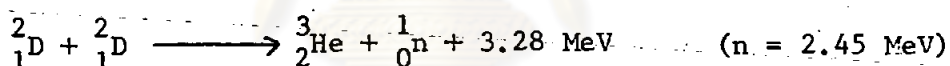
7.1.2.2 แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้มาจากการระดมยิงนิวเคลียสของสารที่ใช้เป็นเป้าด้วยอนุภาค แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้ทำขึ้นโดยการผสมสารที่ใช้เป็นเป้าเข้ากับสารกัมมันตรังสีที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวยิงรังสีเข้าไปในเป้าเพื่อให้ปลดปล่อยนิวตรอนออกมา

แหล่งกำเนิดนิวตรอนโดยวิธีนี้ทำกันมากโดยใช้สารกัมมันตรังสีที่ให้อนุภาคอัลฟา หรือรังสีแกมมา โดยการยิงอนุภาคอัลฟา หรือแกมมานี้เข้าไปในเป้าซึ่งเป็นธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบอริลเลียม (beryllium), โบรอน (boron) หรือดิวทีเรียม (deuterium) เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ผลจากปฏิกิริยานี้ทำให้นิวตรอนออกมา นิวตรอนที่เกิดขึ้นจะเป็นนิวตรอนเร็ว ด้วยวิธีการนี้จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux) มีค่าน้อย ไม่สามารถจะนำไปศึกษาหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ โดยวิธีนิวตรอนแอคทีเวชัน ยกเว้นแต่เราจะทำการหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณมาก ๆ และธาตุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติเอื้ออำนวยต่อปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นแก่รังสีนิวตรอน เช่น มี effective cross-section สูง ครึ่งชีวิตสั้น และไอโซโทปอิสระแบนด์สูง เป็นต้น

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา ( $\alpha, n$ ) ได้แก่  $\text{Be}(\alpha, n)$  และ  $\text{B}(\alpha, n)\text{N}$  โดยอนุภาคอัลฟาที่ใช้ยิงเข้าได้จาก  $\text{Po}^{210}$ ,  $\text{Pa}^{226}$ ,  $\text{Pu}^{239}$  และ  $\text{Am}^{241}$  สำหรับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา ( $\gamma, n$ ) ได้แก่  ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$   $\text{Be}$  และ  ${}^2\text{D}(\gamma, n)$ ,  ${}^1\text{H}$  รังสีแกมมาได้จากไอโซโทปกัมมันตรังสี เช่น  ${}^{124}\text{Sn}$ ,  ${}^{24}\text{Na}$

### 7.1.2.3 เครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron generator) เครื่อง

กำเนิดรังสีนิวตรอนสามารถผลิตนิวตรอนออกมาได้โดยอาศัยปฏิกิริยา ( $d, n$ ) และ ( $p, n$ ) เนื่องจาก  ${}^2\text{D}$  และ  ${}^1\text{H}$  เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ถ้าอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานต่ำ โอกาสที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเป้าหมายนั้นจะน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้ตัวท่อนหรือโปรตรอนมีพลังงานสูงขึ้น โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) ซึ่งอาจจะเป็น high voltage supply, linear accelerator หรือไซโคลตรอน (cyclotron) เป็นต้น ส่วนนิวเคลียส (nuclei) ที่ใช้เป็นเป้าจะเป็นพวกนิวเคลียสเบา ๆ (light nuclei) ซึ่งให้แรงผลักรวมคูลอมบ์ (coulomb repulsion) น้อย เมื่อยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไปยังเป้า จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้นิวตรอนออกมา เช่น ปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



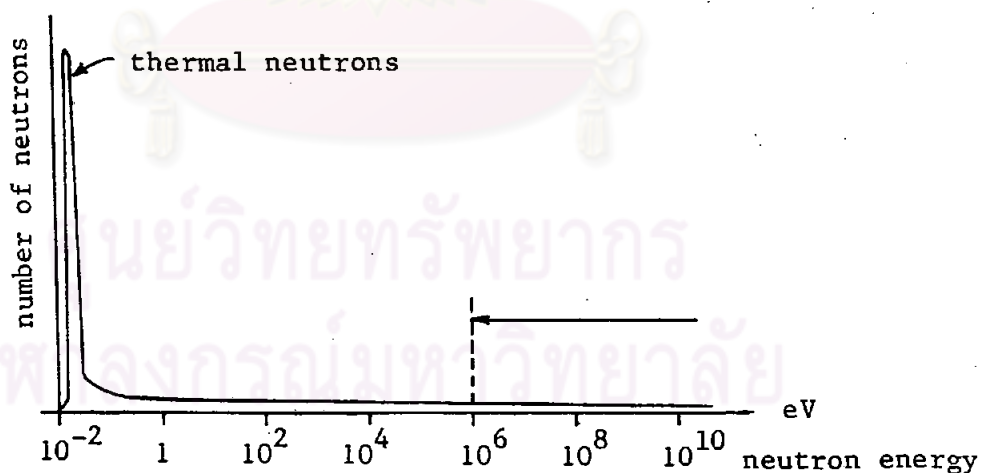
ปริมาณนิวตรอนหลักซ์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $10^9 - 10^{11}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

### 7.1.2.4 นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor)

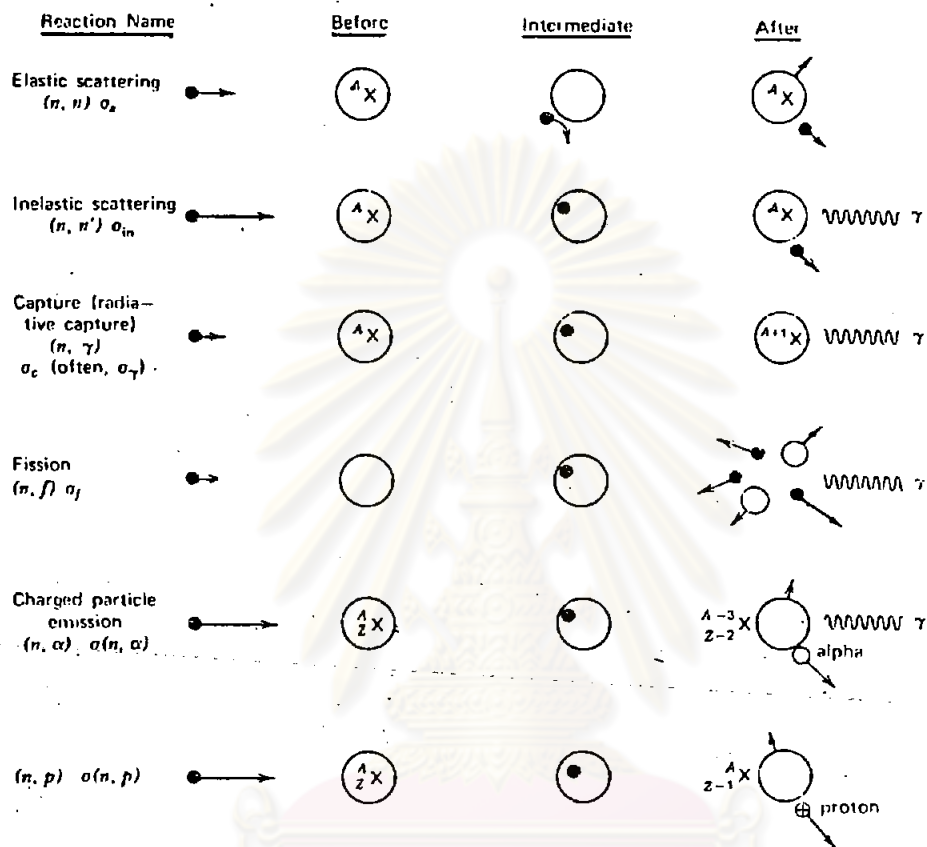
เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่สามารถควบคุมการเกิดของนิวตรอน กับยังให้นิวตรอนที่มีค่าพลังงานต่าง ๆ โดยมีสเปกตรัมของพลังงานอยู่ในช่วงกว้างระหว่าง  $0.001 \text{ eV}$  จนถึง  $15 \text{ MeV}$  หรือบางที่อาจจะถึง  $25 \text{ MeV}$  และมีค่านิวตรอนหลักซ์อยู่ในระดับ  $10^8 - 10^{14}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที อนุภาคนิวตรอนที่ใช้ในการอาบรังสีสารตัวอย่างจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นอนุภาคนิวตรอนนี้เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว (fission reaction) ของเชื้อเพลิงปรมาณูยูเรเนียมในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค

ขณะเดียวกันจะเกิดพลังงานจำนวนมากประมาณ 200 MeV ถูกปลดปล่อยออกมาด้วย และการกระจายพลังงานของอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยทั่ว ๆ ไป ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.1 ซึ่งจะเห็นว่านิวตรอนส่วนใหญ่ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ส่วนนิวตรอนเร็วหรือนิวตรอนพลังงานสูงจะมีเพียงส่วนน้อย

7.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอน (neutron interaction) เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ดังนั้นจึงสามารถวิ่งเข้าสู่นิวเคลียสของเป้าได้โดยไม่ถูกแรงคูลอมบ์ (coulomb force) กระทบกัมัน ดังนั้นนิวตรอนจึงสามารถวิ่งเข้ากระทบกับนิวเคลียสต่าง ๆ ของเป้าได้ เทอร์มัลนิวตรอนซึ่งมีพลังงาน 0.025 eV นับว่าเป็นนิวตรอนที่มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอน อย่างไรก็ตาม "ปฏิกิริยานิวตรอน" ก็จะสามารถเกิดได้ทั้งกับเทอร์มัล-นิวตรอนและนิวตรอนชนิดอื่น ๆ ที่มีพลังงานสูงขึ้นไปอีก ปฏิกิริยาที่สำคัญ ๆ ที่มักเกิดขึ้นเสมอ ๆ มีอยู่ 5 แบบใหญ่ ๆ ดังรูป 7.2



รูปที่ 7.1 แสดงการกระจายพลังงานของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

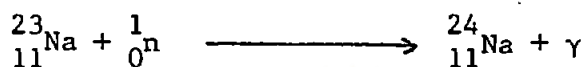


รูปที่ 7.2 แสดงอันตรกริยาของนิวตรอนต่อสสาร

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



7.1.3.1 เรดิเอทีฟ แคปเจอร์ (radiative capture) หรือปฏิกิริยานิวตรอนแกมมา ( $n, \gamma$ ) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนพลังงานต่ำถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของสารที่ใช้เป็นเป้า แล้วอะตอมของธาตุจะเปลี่ยนไปเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุเดิมพร้อมกับปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ตัวอย่างปฏิกิริยานี้ ได้แก่



เขียนแบบย่อได้ว่า  ${}^{23}\text{Na}(n, \gamma){}^{24}\text{Na}$

7.1.3.2 ทรานมิวเตชัน (transmutation) หรือ charged particle emission คือปฏิกิริยาที่เกิดจากการที่อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมที่ใช้เป็นเป้า แล้วอะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไปเป็นสารกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา อนุภาคที่มีประจุที่ถูกปลดปล่อยออกมาส่วนมากคือ อนุภาคโปรตอน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน ( $n, p$ ) ส่วนปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่อาจมีโอกาสดังกล่าวได้บ้าง ก็คือปฏิกิริยานิวตรอน-แอลฟา ( $n, \alpha$ ) เป็นต้น ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน ได้แก่



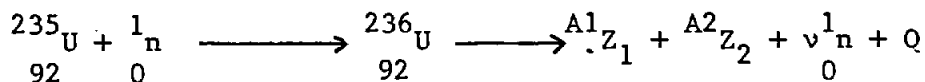
เขียนย่อได้  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$

ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวตรอน-แอลฟา ได้แก่



เขียนย่อได้  ${}^7\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$

7.1.3.3 การแตกตัว (fission) ขบวนการเกิดการแตกตัวจะประกอบด้วย การดูดกลืนเอาอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่มีค่าอะตอมมีค่านับ เบอร์สูงมาก ๆ ( $Z > 90$ ) และผลที่เกิดขึ้นก็คือ นิวเคลียสของธาตุนั้นก็จะแตกตัวเป็นสองเสี่ยงใหญ่ ๆ พร้อมกันนั้นก็ปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค ตัวอย่างปฏิกิริยานี้ ได้แก่ การแตกตัวของ U-235 เมื่อจับ  ${}_0^1\text{n}$



เมื่อ  $Z_1, Z_2$  คือแฟรคเมนต์ (fission fragment)

$Q$  คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากขบวนการนี้มีหน่วยเป็น MeV

กรณีของยูเรเนียม-235 จะมีค่าประมาณ 200 MeV

$\nu$  คือจำนวนนิวตรอนที่เกิดต่อหนึ่งอะตอมเมื่อเกิดการแตกตัว

#### 7.1.3.4 การกระเจิงแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน (elastic scattering)

คือปฏิกิริยาที่นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียส ผลที่ได้คือได้นิวตรอนออกมาเช่นเดิม ( $n, n$ ) และพลังงานของอะตอมจะยังคงอยู่ที่ระดับปกติ (ground state)

#### 7.1.3.5 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (inelastic scattering)

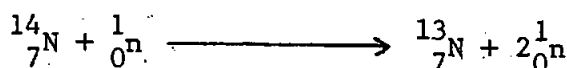
ปฏิกิริยานี้แตกต่างไปจากขบวนการทั้ง 4 ขบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นิวตรอนจะวิ่งเข้าสู่ นิวเคลียสของอะตอมของเป้า โดยการถ่ายเทพลังงานจลน์บางส่วนให้แก่ นิวเคลียสนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดแบบนี้ที่น่าสนใจมีอยู่ 2 ปฏิกิริยา

1) ปฏิกิริยา ( $n, n'$ ) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงได้ถ่ายเทพลังงานให้แก่ นิวเคลียสของอะตอมของสารที่ใช้เป็น เป้ามากพอสมควรที่จะยกพลังงานของมันไปอยู่ในสถานะ "meta state" ตัวอย่างเช่น



เขียนย่อว่า  ${}^{103}\text{Rh}(n, n') {}^{103m}\text{Rh}$

2) ปฏิกิริยา ( $n, 2n$ ) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงให้พลังงานอย่างเพียงพอแก่นิวเคลียสของอะตอมที่ใช้เป็น เป้าจนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนที่ยึดเหนี่ยวตัวสุดท้าย ในที่สุดผลที่ได้ก็คือนิวตรอนตัวสุดท้ายหลุดออกไปจากนิวเคลียสที่ใช้เป็นเป้า ดังตัวอย่างข้างล่างนี้



เขียนย่อเป็น  ${}^{14}\text{N}(n, 2n) {}^{13}\text{N}$

เพราะว่าพลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสำหรับนิวตรอนตัวหนึ่ง ๆ นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 6 MeV ถึง 8 MeV ดังนั้นนิวตรอนที่จะใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ จึงต้องมีพลังงานสูงมากพอสมควร โดยมีค่าประมาณ 10 MeV ขึ้นไป เช่นเดียวกับปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าอะตอมมิกนัมเบอร์ (Z) คงเดิม แต่จะมีค่าแมสซิมเบอร์ (A) ลดลงและนิวเคลียสใหม่ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้มักจะเป็นสารกัมมันตรังสี สำหรับค่าพลังงานต่ำสุด ( $E_T$ ) ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้ อาจจะมาได้จาก การสังเกตจากปฏิกิริยา  $(\gamma, n)$  ด้วยเครื่องเร่งอนุภาค เราสามารถผลิตรังสีแกมมาให้มีพลังงานตามที่ต้องการได้ เมื่อเราทราบพลังงานต่ำสุด ( $E_{T(\gamma, n)}$ ) ของรังสีแกมมาในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา  $(\gamma, n)$  ก็สามารถที่จะแปลงไปเป็นพลังงานต่ำสุด ( $E_{T(n, 2n)}$ ) ของอนุภาคนิวตรอนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา  $(n, 2n)$  ได้โดยความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ ดังสมการข้างล่างนี้

$$E_{T(n, 2n)} = \frac{A+1}{A} E_{T(\gamma, n)}$$

เมื่อ  $A =$  แมสซิมเบอร์ของนิวไคลด์ที่ต้องการทราบพลังงานต่ำสุดของนิวตรอนในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา  $(n, 2n)$

$E_{T(n, 2n)} =$  พลังงานจลน์ต่ำสุดของอนุภาคนิวตรอนในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา  $(n, 2n)$

$E_{T(\gamma, n)} =$  พลังงานจลน์ต่ำสุดของรังสีแกมมาในการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา  $(\gamma, n)$

#### 7.1.4 อัตราการเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่อนำสาร (ตัวอย่าง) ที่จะวิเคราะห์ไปอบนิวตรอนก็จะมีบางส่วนของอะตอมของสารนั้น เกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้น ในขณะที่เดียวกันไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก็จะสลายตัวเพื่อเข้าสู่สถานะเสถียร โดยที่อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอน (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron cross section)

ของธาตุที่นำเข้าอบรังสี จำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน และรวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในธรรมชาติ (isotopic abundance) ดังนั้นอัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$A = N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

และ 
$$N = \frac{NoWf}{M} \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

จากสมการ (7.1) และ (7.2) จะได้ว่า

$$A = \frac{NoWf}{M} \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

เมื่อ  $A =$  activity ของไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อสิ้นสุดเวลาการอบรังสี (dps)

$N =$  จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

$\sigma =$  ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ (cross section) มีหน่วยเป็น ซม.<sup>2</sup>

$\phi =$  ปริมาณของนิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที หรือค่า neutron flux

$\lambda =$  ค่าคงที่ของการสลายตัวของไอโซโทปที่เกิดขึ้น  
(decay constant) =  $\frac{0.693}{t_{1/2}}$

$t_{1/2} =$  ค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปที่เกิดขึ้น (วินาที)

$t_i =$  เวลาที่ใช้อบรังสี (วินาที)

$No =$  Avogadro's number =  $6.023 \times 10^{23}$

$W =$  น้ำหนักของธาตุ (กรัม)

$f =$  สัดส่วนของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ  
(% abundance)

$M =$  มวลอะตอมของธาตุ (atomic mass)

จากความแรงรังสีที่เกิดขึ้น (activity) สามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ ในทางปฏิบัตินิยมอบรังสีสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานพร้อมกัน เพื่อขจัดปัญหา

เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณนิวตรอน ระยะเวลาที่อาบรังสีและตำแหน่งของการอาบรังสี ดังนั้น เมื่อนำสารตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานจะมีความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน}}$$

## 7.2 เทคนิคของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

โดยทั่ว ๆ ไปเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันมี 2 แบบ ใหญ่ ๆ

คือ

7.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน โดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี เป็นการวิเคราะห์โดยการนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีพร้อมกัน แล้ววัดความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่ต้องการหาปริมาณ เทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง การวัดปริมาณจำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจจับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาตามขนาดพลังงานต่าง ๆ ได้ วิธีนี้ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญในการใช้เครื่องมือตรวจจับรังสีเป็นอย่างมาก

7.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน โดยผ่านกรรมวิธีการแยกทางเคมี เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานมาผ่านกรรมวิธีทางเคมี เพื่อแยกชนิดของธาตุที่ต้องการก่อนหรือหลังการอาบรังสี ทั้งนี้เพื่อให้ปราศจากการรบกวนจากไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุตัวอื่นในสารตัวอย่างนั้น แล้วจึงวัดความแรงรังสีเทียบกับสารมาตรฐาน กรรมวิธีทางเคมีที่อาจนำมาใช้ เช่น การกลั่น การสกัด การตกตะกอน การทำละลาย การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

## 7.3 คุณสมบัติบางประการของโมลิบดีนัมไอโซโทปต่าง ๆ

คุณสมบัติบางประการที่จำเป็นต้องทราบในการวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงรายละเอียดของไอโซโทป (isotopes) ต่าง ๆ ของโมลิบดีนัม

Element (Symbol) At. no., Z	Mass no., A	Mass, amu	Abundance (a/o) or half-life	Decay		Effective energy per decay, MeV		Neutron reactions			
				Type	Percent	Total	$\gamma$	Prod.	Barns		
									2200 m/s cross section	Reso- nance integral	
Molybdenum (Mo) 42		95.94									
	92	91.906810	15.84 a/o					$\gamma$	2.65	22	
	93	92.90683	> 100 y	EC	100	0.019	0*	$\gamma$	0.0045	0.52	
	94	93.905090	9.04 a/o					$\gamma$	0.016	0.57	
	95	94.905839	15.72 a/o					$\gamma$	14.5	105	
	96	95.904673	16.53 a/o					$\gamma$	1.0	20	
	97	96.906021	9.46 a/o					$\gamma$	2.2	13	
	98	97.905408	23.78 a/o					$\gamma$	0.13	6.2	
	99	98.90772	67 h	-m	86.7	0.687	0.149				
				-	13.3						
	100	99.907474	9.63 a/o					$\gamma$	0.199	3.75	
	101	100.910353	14.6 m		100	2.080	1.666				
	102	101.91025	11 m								

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดของข้อมูลการหาปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลัก

8.1 รายละเอียดของข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลัก โมลิบดีนัม โดย  
เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

8.1.1 รายละเอียดข้อมูลการวิเคราะห์โมลิบดีนัมในโลหะผสมหลักโดยเทคนิคการเรือง  
รังสีเอกซ์ระบบ EDX

ในการวิเคราะห์ปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลักครั้งนี้ ทำโดยวิธีการเดิมสาร  
มาตรฐาน ตัวอย่างละ 5 จุด และหาค่าโดยใช้วิธีอัตราส่วนความชัน (รายละเอียดของทฤษฎี  
วิเคราะห์แสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.2 และวิธีดำเนินการหัวข้อ 3.2.1.1) รายละเอียดของข้อมูล  
มีดังนี้ คือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 8.1 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโพลีบีนีนตัวอย่างที่ 1

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์ เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิด เป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0.000	1518476	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.0052	0.086649	1725612	
3	0.008	0.133307	1798849	
4	0.01796	0.29927	2123009	
5	0.01904	0.31727	2186229	

สำหรับรายละเอียดของข้อมูลของแต่ละจุดและผลการวิเคราะห์มีดังนี้คือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



```
#####
#
# LEAST SQUARED METHOD #
#
#####
```

$X(I) \times 10^{-2}$	$Y(I) \times 10^6$
0	1.518476
8.6649	1.725612
13.3307	1.798849
29.927	2.123009
31.727	2.186229

RESULT

SLOPE = .0203408232

Y-INTERCEPT = 1.53013466

% of Mo contents = 15.044963

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ลำดับที่ 1

## ตัวอย่างที่ 1

เคมสารมาตรฐาน  $\text{MoO}_3$  = 0 กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ Mo = 0 % ของน้ำหนักตัวอย่าง

TAG NO. = 0                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME=            1000 TRUE TIME=            1038            21 JUN 85 16:01  
 ENERGY(KEV )= 0.93556E-01\* CH#    -0.55351E-01

TAG NO. = 1                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME=            1000 TRUE TIME=            1038            21 JUN 85 16:03

ENERGY(KEV )= 0.93556E-01\* CH#    -0.55351E-01

ROI# 1 FROM 16.7 KEV TO 18.3 KEV  
 INTEGRAL 1906971                      AREA 1512476

TAG NO. = 1                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 2  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME=            1000 TRUE TIME=            1038            21 JUN 85 16:05

CHANNEL#	DATA							
179	13115	17024	24293	36818	60061	92221	149903	210429
187	260111	278536	262102	212260	150518	96609	58516	31769
195	17783	10898						

## ลำดับที่ 2

## ตัวอย่างที่ 1

เคมสารมาตรฐาน  $\text{MoO}_3$  = 0.0052 กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ Mo = 0.086649 % ของน้ำหนักตัวอย่าง

TAG NO. = 3                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME=            1000 TRUE TIME=            1078            21 JUN 85 16:45

ENERGY(KEV )= 0.93556E-01\* CH#    -0.55351E-01

ROI# 1 FROM 16.7 KEV TO 18.3 KEV  
 INTEGRAL 2413095                      AREA 1725612

TAG NO. = 3                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 2  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME=            1000 TRUE TIME=            1078            21 JUN 85 16:45

CHANNEL#	DATA							
179	23495	27897	35208	48098	71866	112100	171411	241303
187	302518	330915	313336	257560	186014	120521	73249	44627
195	30001	22976						

ลำดับที่ 3

ตัวอย่างที่ 1

เคมสารมาตรฐาน  $\text{MoO}_3$  = 0.008 กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ Mo = 0.133307 % ของน้ำหนักตัวอย่าง

TAG NO. = 2                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1040    21 JUN 85 16:26

ENERGY(KEV )= 0.93553E-01\* CH# -0.55351E-01

ROI# 1 FROM 16.7 KEV TO 18.3 KEV  
 INTEGRAL 2310292                      AREA 1798849

TAG NO. = 2                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 2  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1040    21 JUN 85 16:26

CHANNEL#	DATA							
179	15609	19673	26876	40955	66741	110103	172422	244806
187	306816	331867	311029	252105	177006	110083	61632	33076
195	18157	11432						

ลำดับที่ 4

ตัวอย่างที่ 1

เคมสารมาตรฐาน  $\text{MoO}_3$  = 0.01796 กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ Mo = 0.29927 % ของน้ำหนักตัวอย่าง

TAG NO. = 4                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1046    21 JUN 85 17:22

ENERGY(KEV )= 0.93556E-01\* CH# -0.55351E-01

ROI# 1 FROM 16.7 KEV TO 18.3 KEV  
 INTEGRAL 2666537                      AREA 2123009

TAG NO. = 4                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 2  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1046    21 JUN 85 17:22

CHANNEL#	DATA							
179	18368	21717	27869	40065	66147	113424	186536	277892
187	358836	399660	378034	306251	211273	126916	67739	34352
195	18764	12694						

ลำดับที่ 5

ตัวอย่างที่ 1

เคมสารมาตรฐาน  $\text{MoO}_3$  = 0.01904 กรัม

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ Mo = 0.31727 % ของน้ำหนักตัวอย่าง

TAG NO. = 5                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 1  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1044    21 JUN 85 17:40

ENERGY(KEV )= 0.93556E-01\* CH# -0.55351E-01

ROI# 1 FROM 16.7 KEV TO 18.3 KEV  
 INTEGRAL 2653095                      AREA 2186229

TAG NO. = 5                      SERIES 40 V- 2.4                      PAGE 2  
 MEMORY= 2/4    LIVE TIME= 1000    TRUE TIME= 1044    21 JUN 85 17:40

CHANNEL#	DATA							
179	15428	18273	23326	35017	59889	108128	183992	277985
187	365589	409188	388503	312768	214202	125375	63711	29354
195	13911	8477						

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 8.2 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเดิมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 2

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0	1527263	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.0064	0.1066457	1605473	
3	0.0128	0.21332915	1753955	
4	0.01367	0.2277886	1769840	
5	0.0164	0.2732797	1864292	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
# LEAST SQUARED METHOD #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	1.527263
10.66457	1.605473
21.332915	1.753955
22.77886	1.76984
27.32797	1.864292

RESULT

SLOPE = .012094745

Y-INTERCEPT = 1.50555845

% of Mo contents = 24.8960761

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างที่ 3

ตารางที่ 8.3 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเติมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 3

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0.0000	2210588	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00862	0.14363	2439568	
3	0.01400	0.2332876	2522747	
4	0.01640	0.273297	2615746	
5	0.01731	0.28844	2620966	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST   SQUARED   METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	2.210588
14.363	2.439568
23.32876	2.522747
27.3297	2.615746
28.844	2.620966

RESULT

---

SLOPE = .014123639

Y-INTERCEPT = 2.21677863

% of Mo contents = 31.3910408

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ตัวอย่างที่ 4

ตารางที่ 8.4 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเติมสารมาตรฐานและจำนวนนับ

ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 4

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0.00000	2949936	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00840	0.13997	3120739	
3	0.00880	0.1466417	3188672	
4	0.01764	0.29394	3380211	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
# LEAST SQUARED METHOD #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	2.949736
13.997	3.120739
14.66417	3.188672
29.394	3.380211

RESULT

---

SLOPE = .0146873109

Y-INTERCEPT = 2.94672092

% of Mo contents = 40.1260782

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 5

ตารางที่ 8.5 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเติมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 5

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรียงของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0	2924936	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรียง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00649	0.1081454	3056857	
3	0.00892	0.1486375	3138797	
4	0.0142	0.23662	3206492	
5	0.01617	0.2694471	3242439	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



```
#####
#
#   LEAST SQUARED METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	2.924936
10.81454	3.056857
14.86375	3.138797
23.662	3.206492
26.94471	3.242439

-----  
 RESULT  
 -----

SLOPE = .0117570273

Y-INTERCEPT = 2.93452725

% of Mo contents = 49.9195446

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 6

ตารางที่ 8.6 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 6

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น% Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0.000	0	1,029,030	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.0071	0.11831	1,235,894	
3	0.01187	0.19779	1,293,197	
4	0.0176	0.29327	1,406,206	
5	0.01880	0.313272	1,565,052	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST SQUARED METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	1.02903
11.831	1.235894
19.779	1.293197
29.327	1.406206
31.3272	1.565052

RESULT

---

SLOPE = .0148974061

Y-INTERCEPT = 1.03097635

% of Mo contents = 13.8410183

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างที่ 7

ตารางที่ 8.7 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคมสารมาตรฐานและจำนวนนับ

ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 7

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น% Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0.000	1133107	วิเคราะห์โดยเทคนิค การเรืองรังสีเอกซ์ ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00857	0.14280	1390379	
3	0.01601	0.2667786	1476452	
4	0.01801	0.300010	1504352	
5	0.02240	0.37326	1601566	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST   SQUARED   METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	1.133107
14.28	1.390379
26.67786	1.476452
30.001	1.504352
37.326	1.601566

RESULT

SLOPE = .0118824347

Y-INTERCEPT = 1.16383365

% of Mo contents = 19.5871444

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวอย่างที่ 8

ตารางที่ 8.8 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคม็สารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 8

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เคม็ลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น% Mo ในสารตัวอย่าง		
1.	0	0.000	1810014	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00842	0.1403	2058023	
3	0.01010	0.1683	2091177	
4	0.01321	0.22012	2129247	
5	0.01640	0.2732797	2221898	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
# LEAST SQUARED METHOD #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	1.810014
14.03	2.058023
15.83	2.091177
22.012	2.129247
27.32797	2.221898

RESULT

SLOPE = .0147326666

Y-INTERCEPT = 1.82870645

% of No contents = 24.8251929

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 9

ตารางที่ 8.9 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 9

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง Mo		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น% Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0	2057204	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00794	0.1323074	2249413	
3	0.01360	0.2266222	2398737	
4	0.0152	0.2532836	2413170	
5	0.02103	0.3504313	2466123	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST SQUARED METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	2.057204
13.23074	2.249413
22.66222	2.398737
25.32836	2.41317
35.04313	2.466123

RESULT  
-----

SLOPE = .0122394952

Y-INTERCEPT = 2.08128375

% of Mo contents = 34.0093071

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 10

ตารางที่ 8.10 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเติมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลัก โมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 10

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์ เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0	3151922	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00697	0.1161439	3404477	
3	0.01047	0.1744658	3444948	
4	0.01161	0.193462	3519701	
5	0.01859	0.3097726	3559034	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST SQUARED METHOD   #
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I)x 10<sup>6</sup></u>
0	3.151922
11.61439	3.404477
17.44658	3.444948
19.3462	3.519701
30.97726	3.559034

RESULT

-----

SLOPE = .0132749322

Y-INTERCEPT = 3.20525182

% of Mo contents = 48.2902927

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตัวอย่างที่ 11



ตารางที่ 8.10 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการเคมสารมาตรฐานและจำนวนนับ  
ที่ได้ของโลหะผสมหลักโมลิบดีนัมตัวอย่างที่ 11

ลำดับที่	ปริมาณสารมาตรฐาน $\text{MoO}_3$ ที่เติมลงในสารตัวอย่าง		ปริมาณความเข้มของ รังสีเอกซ์ เรืองของ Mo ในสารตัวอย่าง (counts/1000 sec)	หมายเหตุ
	น้ำหนัก (กรัม)	คิดเป็น % Mo ในสารตัวอย่าง		
1	0	0	3496581	วิเคราะห์โดย เทคนิคการเรือง รังสีเอกซ์ระบบ EDX หัววัด HPGe
2	0.00660	0.110100	3611142	
3	0.00900	0.149977	3652635	
4	0.01200	0.1999694	3704653	
5	0.01440	0.2399632	3746267	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
#####
#
#   LEAST SQUARED METHOD
#
#####
```

<u>X(I) x 10<sup>-2</sup></u>	<u>Y(I) x 10<sup>6</sup></u>
0	3.496581
11.01	3.611142
14.9977	3.652635
19.99694	3.704653
23.99632	3.746267

RESULT

SLOPE = .0104051843

Y-INTERCEPT = 3.49658104

% of Mo contents = 67.2084404

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



8.1.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลัก โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบ WDX



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถานัน 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 พญาไท กรุงเทพฯ 10500

THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTER CHULALONGKORN UNIVERSITY  
CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD BANGKOK 10500 THAILAND

Analysis Report

Sample from : คุณพิทักษ์ ทองคง  
Sample received : แร่ Molybdenum  
Instrument : X-Ray Fluorescence Spectrometer  
JEOL JSX-60PA

Result :

<u>Sample No.</u>	<u>% Mo</u>
1.	14.36
2.	25.60
3.	31.47
4.	39.26
5.	51.28
6.	13.62
7.	19.80
8.	24.94
9.	35.04
10.	50.20

N.B. The results are good only for those specimens analysed.

Analyst

Date

July 23, 1985



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์ ขอบ 62 พญาไท กรุงเทพฯ 10500

THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTER CHULALONGKORN UNIVERSITY  
CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD BANGKOK 10500 THAILAND

### Analysis Report

Sample from : คุณพิทักษ์ ทองคง  
Sample received : Mo-ores  
Instrument : X-Ray Fluorescence Spectrometer  
JEOL JSX-60PA  
Result :

Sample No.11 Mo 68.97 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

N.B. The results are good only for those specimens analysed.

Analyst

Date

September 17, 1985

8.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลัก โดย เทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน

ที่ พ 6601/3729



สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ  
ถนนวิภาวดีรังสิต บางเขน กรุงเทพมหานคร - 10900

หนังสือแจ้งผลการวิเคราะห์

วันที่ 15... เดือน กรกฎาคม... พ.ศ. 2528.....

สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้ดำเนินการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่ ตามคำร้องขอของ .....  
ร.ศ. น. รัชชวิน สุเมธีพร ..... ลงวันที่ 15... เดือน กรกฎาคม... พ.ศ. 2528... เสร็จเรียบร้อยแล้ว  
แล้ว ปรากฏผลดังต่อไปนี้

ตัวอย่างเลขที่	ผลการวิเคราะห์ (ร้อยละ หรือ ppm)		
	% Fe	% Al	% Mo
1	26.17 ± 0.39	8.40 ± 0.13	56.28 ± 1.15
2	2.81 ± 0.11	19.04 ± 0.34	53.62 ± 1.78
3	1.74 ± 0.03	72.44 ± 0.82	18.20 ± 1.15
4	18.05 ± 0.26	7.79 ± 0.35	51.00 ± 1.15
5	27.32 ± 0.57	3.05 ± 0.16	17.16 ± 0.22
6	72.21 ± 0.98	7.78 ± 0.22	16.31 ± 0.69

ลงชื่อ .....  
(นางอารมย์ มขมงคล)  
นักนิวเคลียร์ เกรด 5  
ผู้อำนวยการ

ลงชื่อ .....  
(นางกรรติกา ศรีเสนา)  
ผู้อำนวยการกองเคมี ปฏิกิริยาการแทน  
เลขานุการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ  
เลขาธิการ

### 8.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ปริมาณโมลิบดีนัมในโลหะผสมหลักโดยวิธี ICPS



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถานี 2 จุฬาลงกรณ์ ซอย 62 พญาไท กรุงเทพฯ 10500

THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTER CHULALONGKORN UNIVERSITY  
CHULALONGKORN ST. 62 PHAYA-THAI ROAD BANGKOK 10500 THAILAND

#### รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่างจาก : คุณพิทักษ์ ทองคง  
ประเภทของตัวอย่าง : สารละลายที่เตรียมจากแร่โมลิบดีนัม (Mo)  
วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ : เพื่อหาปริมาณธาตุ Mo ในตัวอย่าง  
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ : Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer  
Shimadzu ICPS-50  
วันที่วิเคราะห์ : 22 กรกฎาคม 2528  
ผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ Mo ( % )
1.	14.22
2.	26.24
3.	32.30
4.	43.47
5.	54.50
6.	13.52
7.	20.13
8.	26.54
9.	36.12
10.	52.51
11.	72.81

  
ผู้วิเคราะห์

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้ เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการ  
ทดสอบจาก ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเท่านั้น.

## ๑. การวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา

### ๑.1 หลักการทั่วไป

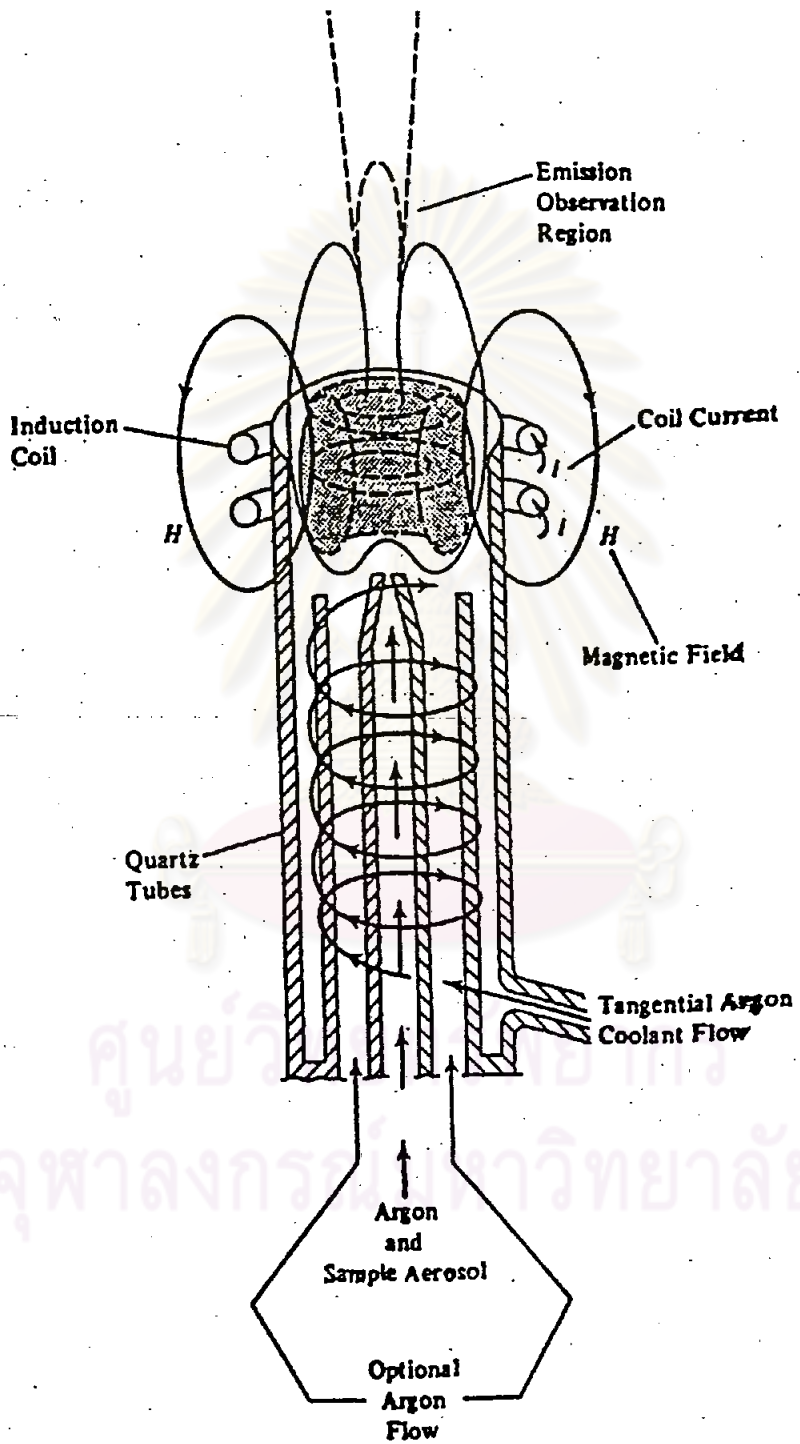
เมื่ออิออนของแก๊สหรือโมเลกุลของแก๊สถูกกระตุ้น จะทำให้พลังงานภายในอยู่ในสถานะ excite จากนั้นจะพยายามกลับสู่สถานะปกติ (ground state) โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา สำหรับกรณีการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี inductive coupled plasma spectrometry (ICPS) จะใช้ความร้อนสูงมากจากคพลาสมากระตุ้นให้อิออนหรือโมเลกุลของแก๊สเกิดการ excite และจะปล่อยคลื่นรังสีในช่วงเหนือม่วงและรังสีที่ตามองเห็นได้ออกมาจากกระบวนการ deexcitation จากนั้นจะผ่านคลื่นรังสีที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ โดยตรวจสอบและบันทึกไว้ด้วยเครื่อง spectrometer หรือ spectrograph แผนผังการวิเคราะห์ได้แสดงไว้แล้ว ในรูปที่ 2.23 หน้า 38

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง ICPS นี้ สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ในปริมาณที่มีขนาดความเข้มข้นต่ำมาก ในกรณีของธาตุโมลิบดีนัมจะมีค่า emission spectroscopic detection limit เท่ากับ 0.0001 µg/ml

### ๑.2 ต้นกำเนิดพลังงานในการกระตุ้น

ในการวิเคราะห์โดยวิธี emission spectrometry ส่วนที่สำคัญก็คือ แหล่งกำเนิดพลังงานที่มากพอที่จะทำให้ตัวอย่างที่วิเคราะห์กลายเป็นไอและเปลี่ยนธาตุที่ประกอบอยู่ในตัวอย่างนั้นให้อยู่ในสถานะเป็นอิออนและเกิด electronic excitation และ deexcitation ในที่สุดได้ คุณลักษณะเฉพาะของเครื่อง ICPS นี้แสดงในตารางที่ ๑.1

พลังงานความร้อนของ ICP discharges นี้เกิดขึ้นได้จากผลของ radio-frequency (RF) ขนาด 5-75 MHz ที่มีต่อ flowing gas ทำให้สนามแม่เหล็กในแก๊สเปลี่ยนไป แก๊สนั้นจะร้อนมากขึ้น จนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าและจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิด eddy current และจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นกับแก๊สที่เป็นตัวนำนั้นอย่างมหาศาล



รูปที่ ๑.๑ แสดงคบบ ICP discharge

ตารางที่ 9.1 คุณสมบัติเฉพาะของ ICPS excitation source

Type	Characteristics	Samples Used
Inductively Coupled Plasma Discharge	An electrodeless radio-frequency discharge produced by magnetically induced eddy currents in flowing argon confined in a quartz tube at atmospheric pressure.	liquids, powders, gases

ปกติในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICPS นี้จะใช้แก๊ซอาร์กอนผ่านเป็น 2 streams ในคอมเพลกซ์ตามรูปที่ 9.1 คือส่วนหนึ่งให้ไหลผ่านไปที่ผิวของท่อ quartz เพื่อไม่ทำให้ quartz เกิด high-temperature discharge ได้ และส่วนที่สองจะเป็นตัวนำตัวอย่างเข้าไปในส่วนศูนย์กลางของการ discharge คอมเพลกซ์ที่มีกำลังขนาด 1-2 kW จะให้อุณหภูมิสูงประมาณ 9,000-10,000 K

### 9.3 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วย ICPS

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง ICPS นี้มีความไวในการวิเคราะห์สูงและทำการวิเคราะห์ได้รวดเร็ว การวิเคราะห์แบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

#### 9.3.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยเครื่อง ICPS นี้ ปกติจะบันทึก spectra ของธาตุตัวอย่างบน photographic film หรือ plate และวิเคราะห์หาธาตุต่าง ๆ ในตัวอย่าง

ได้โดยใช้เทียบกับ line ของธาตุหนึ่งส่วนมากจะใช้เหล็กซึ่งจะใช้ 3 lines ในการ identify ธาตุหนึ่ง ๆ

### 9.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเครื่อง ICPS มีหลายวิธีที่นิยมใช้กันส่วนมาก ได้แก่ วิธีการสร้างกราฟเทียบปรับ การเติมสารมาตรฐาน และอินเทอร์นัลสแตนดาร์ด (internal standard method) โดยหลักการวิเคราะห์จะวัดความแตกต่างของค่าความเข้มของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ กรณีของวิธีสร้างกราฟเทียบปรับ และเติมสารมาตรฐาน โดยหลักการทั่วไปจะเหมือนกับวิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.3 เพียงแต่วัดความเข้มของ emission line แทนการวัดรังสีเอกซ์เรือง

วิธีอินเทอร์นัลสแตนดาร์ดเป็นวิธีวิเคราะห์ปริมาณที่ให้ความแม่นยำวิธีหนึ่ง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้แก่ในกรณีที่มีการแปรปรวนของ excitation source ซึ่งจะทำให้วิธีเปรียบเทียบสเปกตรัมทำได้ยาก ในการวิเคราะห์โดยวิธีอินเทอร์นัลสแตนดาร์ดจะทำโดยการเติมธาตุอื่นที่ไม่ใช่ธาตุที่จะวิเคราะห์ลงในตัวอย่างและสารมาตรฐานในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นจะได้ ratio ของความเข้มที่ line ของอินเทอร์นัลสแตนดาร์ดคงที่ระหว่างตัวอย่างและสารมาตรฐาน อันจะเป็นการแก้ความเข้มของธาตุที่จะวิเคราะห์ให้ถูกต้อง

ถ้าให้  $I_s$  เป็นอินเทอร์นัลสแตนดาร์ด

$I_A$  เป็นความเข้มรังสีของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่างซึ่งมีความเข้มข้น  $C_A$

$I_{is}$  เป็นความเข้มของรังสีของธาตุมาตรฐานในไอเอสและมีความเข้มข้นเป็น  $C_{is}$

$$\text{ดังนั้น} \left( \frac{I_A}{I_{is}} \right)_s = K \left( \frac{C_A}{C_{is}} \right)_s \quad \dots\dots\dots 9.1$$

ถ้าทำให้ความเข้มข้น  $C_A = C_{is}$  จะได้

$$\left( \frac{I_A}{I_{is}} \right)_s = K \text{ ซึ่งเรียกว่า intensity correction factor}$$



เช่นเดียวกัน ถ้าเติมไอเอสจำนวนหนึ่งลงในสารตัวอย่าง จะทำให้ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ เท่ากับ  $C_{Ax'}$  และความเข้มข้นของธาตุในไอเอสที่เติมลงไปเป็น  $C_{isx'}$  ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความเข้มของรังสีจะเป็น

$$\frac{C_{Ax'}}{C_{isx'}} K = \left( \frac{I_A}{I_{is}} \right) x' \dots\dots\dots 9.2$$

$$C_{Ax'} = C_{isx'} \left( \frac{I_{is}}{I_A} \right)_s \left( \frac{I_A}{I_{is}} \right) x'$$

แต่เนื่องจาก  $C_{Ax'}$  =  $\frac{A}{W_x + W_{is}} = \frac{A}{W_x} \frac{W_x}{W_x + W_{is}}$

$$= C_x \cdot D$$

$$\therefore C_x = \frac{C_{isx'}}{D} \left( \frac{I_{is}}{I_A} \right)_s \left( \frac{I_A}{I_{is}} \right) x' \dots\dots 9.3$$

เมื่อ  $C_x$  คือความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในตัวอย่างก่อนเติมไอเอส (ต้องการหา)

$C_{Ax'}$  คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในตัวอย่างหลังเติมไอเอส

$C_{isx'}$  คือความเข้มข้นของธาตุมาตรฐานในไอเอสในตัวอย่างที่เติมด้วยไอเอสแล้ว

$\left( \frac{I_A}{I_{is}} \right) x'$  คืออัตราความเข้มของรังสีในสารตัวอย่างที่เติมไอเอสแล้ว

$W_x$  คือน้ำหนักของสารตัวอย่าง

$W_{is}$  คือน้ำหนักของไอเอส

$A$  คือน้ำหนักธาตุที่สนใจในตัวอย่าง

ซึ่ง internal standard ควรจะมีลักษณะดังนี้

- ความเข้มข้นที่เติมลงไปในตัวอย่างและสารมาตรฐานต้อง เท่ากัน
- ควรมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ใกล้เคียงกับธาตุที่จะวิเคราะห์มากที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความแตกต่างเรื่อง volatilization

- ควรมี emission line เส้นหนึ่งที่ตรงกับ excitation energy ของธาตุที่จะวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดผลของ temperature fluctuation เช่นเดียวกัน
- ควรมี ionization energy ใกล้กับธาตุที่จะวิเคราะห์ เพื่อให้แน่ใจว่า distribution ratio ของอะตอมและไอออนใน excitation source คงที่
- emission lines จาก internal standard ควรอยู่ใกล้กับธาตุที่จะวิเคราะห์ วิเคราะห์ โดยเฉพาะกรณีใช้ photographic method
- emission intensity ควรใกล้เคียงกับธาตุที่จะวิเคราะห์



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติ

นายพิทักษ์ ทองคง สำเร็จการศึกษาการศึกษามัธยมศึกษา สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน 2520 และประกาศนียบัตรมัธยมศึกษา สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี มัธยมศึกษา  
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2525



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย