



บทที่ 2

ทฤษฎี

### ประวัติและความสำคัญของยูเรเนียม

ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีการค้นพบครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1789 ในแร่พิทช์เบลนด์ (pitchblende) โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน คือ มาร์ตินไฮน์ริช คลาพรอธ (Martin Heinrich Klaproth) ต่อมาในปี ค.ศ. 1841 มีการค้นพบ วิธีแยกธาตุยูเรเนียม และในปี ค.ศ. 1896 ได้บันทึกลักษณะเฉพาะตัวของสารแผ่รังสีของยูเรเนียม โดยนายอังรี เบคเคอเรล (Henri Becquerel) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1942 มีการพัฒนาทางด้านพลังงานนิวเคลียร์ ยูเรเนียม จึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านวัสดุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยไอโซโทปที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มีเพียง 2 ชนิด คือ ยูเรเนียม-235 ที่มีอยู่ในธรรมชาติ และพลูโตเนียม-239 ที่ได้มาจากการอาบรังสีนิวตรอนยูเรเนียม-238 ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้นำเอาพลังงานนิวเคลียร์ไปใช้ประโยชน์ด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปัจจุบันแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน และน้ำมันมีปริมาณลดลง ประกอบกับปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อม การผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ จึงยังมีความสำคัญอยู่ทั้งในปัจจุบันและอนาคต

### ธาตุยูเรเนียม

ธาตุยูเรเนียม มีคุณสมบัติเป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความหนาแน่นเท่ากับ 19.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย และทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับความชื้นในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ ยูเรเนียมละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในกรดซัลฟูริก แร่ยูเรเนียมสามารถทำให้ฟิล์มถ่ายภาพเป็นสีดำ

ธาตุยูเรเนียมเป็น "ธาตุกัมมันตรังสี" จะแผ่รังสีแกมมา เบตา และอัลฟา รังสีอัลฟา ออกมา

### อนุกรมยูเรเนียม และแอกติเนียม

ไอโซโทปรังสีในธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็นอนุกรมใหญ่ๆ ได้ ดังนี้ คือ

1. อนุกรมยูเรเนียม
2. อนุกรมแอกติเนียม
3. อนุกรมทอเรียม

อนุกรมยูเรเนียม และอนุกรมแอกติเนียม มีไอโซโทปรังสีตัวตั้งต้นอนุกรมคือ ยูเรเนียม-238 และยูเรเนียมและยูเรเนียม-235 ตามลำดับ

#### อนุกรมยูเรเนียม

อนุกรมนี้เริ่มจากยูเรเนียม-238 (U-238) ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 99.28 โดยอะตอมของยูเรเนียมในธรรมชาติ ยูเรเนียม-238 สลายตัว โดยปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมาแล้วเกิดเป็นทอเรียม-234 ซึ่งจะสลายตัวต่อไป และไปสิ้นสุดที่ปรอท-206 (Hg-206) การสลายตัวในแต่ละครั้งจะมีการปลดอนุภาคอัลฟา หรืออนุภาคเบตา และรังสีแกมมา มีการสลายตัว 14 ชั้น นิวไคลด์กัมมันตรังสีทุกตัวในอนุกรมนี้มีเลขมวล  $4n+2$  เมื่อ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

#### อนุกรมแอกติเนียม

อนุกรมนี้เรียกอีกอย่างว่า แอกทิโน-ยูเรเนียม (Ac-U) โดยจะเริ่มต้นจากยูเรเนียม-235 ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 0.72 โดยอะตอมของยูเรเนียมในธรรมชาติ แล้วไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-207 (Pb-207) อนุกรมชุดนี้ยูเรเนียม-235 มีอายุยาวที่สุด โดยมีค่าครึ่งชีวิต  $7.1 \times 10^8$  ปี มีการสลายตัว 14 ชั้น อนุกรมแอกติเนียมนี้ทุกธาตุมีเลขมวล  $4n+3$  เมื่อ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม

เรเดียม-226 เป็นนิวไคลด์หนึ่งในอนุกรมยูเรเนียม มีครึ่งชีวิต 1620 ปี สลายตัวให้พลังงานรังสีแกมมาพลังงาน 186 keV (4%) และสลายตัวให้อนุภาคอัลฟากลายเป็นเรดอน-222 ดังแผนภูมิการสลายตัวในรูปที่ 2.2

ยูเรเนียม-235 สลายตัวให้รังสีแกมมาโดยตรงหลายพลังงานได้แก่ 93 keV (5.7%) , 143 keV (9.72 %) และ 186 keV ( 54.0% ) จึงทำให้สามารถวัดรังสีแกมมาเหล่านี้ได้โดยตรงเพื่อหาปริมาณยูเรเนียม-235

#### กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

ในการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี จะเป็นไปตามหลักสถิติที่เกี่ยวกับโอกาส กล่าวคือ ทุกนิวเคลียสมีโอกาสที่จะสลายตัวในช่วงเวลาหนึ่งๆ ได้เท่าๆกัน นั่นคือ อัตราการสลายตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอะตอมที่มีอยู่ กล่าวได้ว่า

$$-dN/dt = \lambda N \text{ -----2.2}$$

เมื่อ  $dN/dt$  = อัตราการสลายตัว(disintegration rate)

$\lambda$  = ค่าคงที่การสลายตัว

$N$  = จำนวนอะตอมที่มีอยู่ ณ เวลา  $t$  ใดๆ

$N_0$  = จำนวนอะตอมที่มีอยู่ ที่เวลา  $t = 0$

U 92	$U^{238}, U_I$ (uranium I) $4.51 \times 10^9$ years		$U^{234}, U_{II}$ (uranium II) $2.48 \times 10^5$ years			
Pa 91		$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\alpha$	
		$Pa^{234}, UX_2$ 1.18 minutes (99.85%)	$Pa^{234}, UZ$ 6.7 hours (0.15%)			
Th 90	$Th^{234}, UX_1$ (uranium X <sub>1</sub> ) 24.1 days		$Th^{230}, Io$ (ionium) $7.52 \times 10^4$ years			
Ac 89			$\alpha$			
Ra 88			$Ra^{226}, Ra$ (radium) 1622 years			
Fr 87			$\alpha$			
Rn 86			$Rn^{222}, Rn$ (radon) 3.825 days			
At 85			$\alpha$	$At^{218}$ 1.3 seconds		
Po 84			$Po^{218}, RaA$ (radium A) 3.05 minutes	$\beta$ $Po^{214}, RaC'$ (radium C') $1.6 \times 10^{-4}$ second (0.02%)	$\alpha$	$Po^{210}, RaF$ (polonium) 138.4 days
Bi 83		$\alpha$ (99.98%)	$Bi^{214}, RaC$ (radium C) 19.7 minutes (99.96%)	$\beta$	$\alpha$	$Bi^{210}, RaE$ (radium E) 5.01 days
Pb 82		$\beta$	$Pb^{214}, RaB$ (radium B) 26.8 minutes	$\alpha$ (0.04%)	$\beta$	$Pb^{210}, RaD$ (radium D) 22 years
				$\alpha$ ( $5 \times 10^{-5}\%$ )		$Pb^{206}, RaG$ (stable lead isotope)
Tl 81			$Tl^{210}, RaC''$ (radium C'') 1.32 minutes	$\beta$	$\alpha$ ( $1.8 \times 10^{-6}\%$ )	$Tl^{206}, RaE''$ (radium E'') 4.3 minutes
Hg 80				$\beta$		$Hg^{206}$ 8.5 minutes

รูปที่ 2.1 อนุกรมยูเรเนียม



U 92	U <sup>236</sup> , AcU (actinouranium) 7.13 × 10 <sup>8</sup> years				
Pa 91		Pa <sup>231</sup> , Pa (protactinium) 3.48 × 10 <sup>4</sup> years			
Th 90	Th <sup>231</sup> , UY (uranium Y) 25.6 hours		Th <sup>227</sup> , RdAc (radioactinium) 18.17 days		
Ac 89		Ac <sup>227</sup> , Ac (actinium) 22.0 years			
Ra 88			Ra <sup>223</sup> , AcX (actinium X) 11.7 days		
Fr 87		Fr <sup>223</sup> , AcK (actinium K) 22 minutes			
Rn 86			Rn <sup>219</sup> , An (actinon) 3.92 seconds		
At 85		At <sup>219</sup> 0.9 minute		At <sup>215</sup> 10 <sup>-4</sup> second	
Po 84			Po <sup>215</sup> , AcA (actinium A) 1.83 × 10 <sup>-3</sup> second		Po <sup>211</sup> , AcC' (actinium C') 0.52 second
Bi 83		Bi <sup>215</sup> 8 minutes		Bi <sup>211</sup> , AcC (actinium C) 2.15 minutes	
Pb 82			Pb <sup>211</sup> , AcB (actinium B) 36.1 minutes		Pb <sup>207</sup> , AcD (stable lead isotope)
Tl 81				Tl <sup>207</sup> , AcC" (actinium C'') 4.79 minutes	

รูปที่ 2.2 อนุกรมแอกติเนียม



**Decay Properties:**

$$T_{1/2} = 7.1 \times 10^8 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.60, 4.40, 4.36 \text{ MeV.}$$

**Daught Nuclides:**

$$^{231}\text{Th } T_{1/2} = 25.5 \text{ h}$$

$$E_{\beta} = 0.299, 0.218, 0.134, 0.090 \text{ MeV.}$$

$$^{231}\text{Pa } T_{1/2} = 3.25 \times 10^4 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 5.06, 5.03, 5.01, 4.95, 4.75 \text{ MeV.}$$

$$^{227}\text{Ac } T_{1/2} = 21.6 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.95, 4.86 \text{ MeV}$$

$$E_{\beta} = 0.046 \text{ MeV ; beta-branching} = 0.986$$

$$^{227}\text{Th } T_{1/2} = 18.2 \text{ days}$$

$$E_{\alpha} = 6.04, 5.98, 5.76, 5.72 \text{ MeV.}$$

$$^{223}\text{Fr } T_{1/2} = 22 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 1.15 \text{ MeV.}$$

$$^{223}\text{Ra } T_{1/2} = 11.43 \text{ days}$$

$$E_{\alpha} = 5.75, 5.71, 5.61, 5.54 \text{ MeV.}$$

$$^{219}\text{Rn } T_{1/2} = 4 \text{ s}$$

$$E_{\alpha} = 6.82, 6.55, 6.42 \text{ MeV.}$$

$$^{215}\text{Po } T_{1/2} = 1.78 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$E_{\alpha} = 7.37 \text{ MeV.}$$

$$^{211}\text{Pb } T_{1/2} = 36 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 1.36 \text{ MeV.}$$

$$^{211}\text{Bi } T_{1/2} = 2.15 \text{ min}$$

$$E_{\alpha} = 6.62, 6.28 \text{ MeV.}$$

$$^{207}\text{Tl } T_{1/2} = 4.79 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 1.44 \text{ MeV.}$$

รูปที่ 2.3 คุณสมบัติบางชนิดของธาตุในอนุกรมแอกติเนียม



**Decay Properties:**

$$T_{1/2} = 4.51 \times 10^9 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.20, 4.15 \text{ MeV.}$$

**Daught Nuclides:**

$$^{234}\text{Th } T_{1/2} = 24.1 \text{ h}$$

$$E_{\beta} = 0.194, 0.104 \text{ MeV.}$$

$$^{234\text{a}}\text{Pa } T_{1/2} = 6.75 \text{ h}$$

$$E_{\beta} = 1.51, 1.20, 0.68, 0.51, 0.23 \text{ MeV.}$$

$$^{224\text{m}}\text{Pa } T_{1/2} = 1.17 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 2.29 \text{ MeV}$$

$$^{234}\text{U } T_{1/2} = 2.47 \times 10^5 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.773, 4.722 \text{ MeV.}$$

$$^{230}\text{Th } T_{1/2} = 8 \times 10^4 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.685, 4.621 \text{ MeV.}$$

$$^{226}\text{Ra } T_{1/2} = 1602 \text{ yr}$$

$$E_{\alpha} = 4.785, 4.602 \text{ MeV.}$$

$$^{222}\text{Rn } T_{1/2} = 3.82 \text{ day}$$

$$E_{\alpha} = 5.49 \text{ MeV.}$$

$$^{218}\text{Po } T_{1/2} = 3.05 \text{ min}$$

$$E_{\alpha} = 6.00 \text{ MeV.}$$

$$^{214}\text{Pb } T_{1/2} = 26.8 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 1.0, 0.7 \text{ MeV.}$$

$$^{214}\text{Bi } T_{1/2} = 19.7 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 3.27, 1.89, 1.54, 1.51, 1.07 \text{ MeV}$$

$$E_{\alpha} = 5.5 \text{ MeV ; alpha branching ratio} = 0.021\%$$

$$^{214}\text{Po } T_{1/2} = 164 \text{ s}$$

$$E_{\alpha} = 7.687 \text{ MeV.}$$

$$^{210}\text{Pb } T_{1/2} = 21 \text{ yr}$$

$$E_{\beta} = 0.061, 0.015 \text{ MeV.}$$

$$^{210}\text{Bi } T_{1/2} = 5.01 \text{ day}$$

$$E_{\beta} = 1.160 \text{ MeV.}$$

$$^{210}\text{Po } T_{1/2} = 138.4 \text{ min}$$

$$E_{\beta} = 5.305 \text{ MeV.}$$

รูปที่ 2.4 คุณสมบัติบางชนิดของธาตุในอนุกรมยูเรเนียม

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.1) จะได้

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \text{-----} 2.2$$

ให้ครึ่งชีวิตของสาร =  $T_{1/2}$  ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สารแม่ (parent) จะสลายตัวเหลือครึ่งหนึ่งของที่มีอยู่เดิม คือ  $N = N_0/2$

จาก(2.2) จะได้  $T_{1/2} = 0.693/\lambda \text{-----} 2.3$

การลดทอน (attenuation) ของรังสีแกมมา

เมื่อลำรังสีแกมมาผ่านสาร จะทำให้ความเข้มของรังสีลดลง เป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$-dI \propto I$$

$$\propto dx$$

$$dI = -\mu I dx \text{-----} 2.4$$

$\mu$  = สัมประสิทธิ์ของการลดทอน (attenuation coefficient) ขึ้นกับค่าพลังงานของลำรังสีแกมมา และชนิดของตัวดูดกลืน

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.4) จะได้

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \text{-----} 2.5$$

$I$  = ความเข้มของรังสีแกมมาที่สามารถทะลุผ่านออกมาจากวัสดุ

$I_0$  = ความเข้มของรังสีแกมมาที่มาตกกระทบวัสดุ

$x$  = ความหนาของวัสดุ

กล่าวคือความเข้มของลำแสงเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับความหนาและความเข้มของรังสีแกมมา

ในการวัดพลังงานรังสีแกมมาพลังงานต่ำ จะต้องคำนึงถึงการดูดกลืนรังสีแกมมาในสารตัวอย่างเอง ซึ่งจะทำให้จำนวนนับรังสีที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น จากสมการที่ 2.5 จะได้ว่าค่าดูดกลืนโดยตัวเอง (self absorption) ของสารตัวอย่างที่สนใจ<sup>1</sup> มีค่าเท่ากับ

$$f = (1 - e^{-\mu x}) / \mu x \\ = (1 - I/I_0) / (-\ln I/I_0) \text{-----} 2.6$$

$f$  = ค่า self absorption

---

<sup>1</sup> International Atomic Energy, "Laboratory Training Manual on Use of Nuclear Techniques in Animal Parasitology", Technical reports series No.219,(1982):9.



### อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร (Interaction of Gamma Ray with matters)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเกิดอันตรกิริยากับสสาร จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่อะตอม หรือโมเลกุลอย่างต่อเนื่องโดยการเกิดการไอออไนเซชัน (ionization) และการตื่นตัว (excitation) การเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนรังสีแกมมา นั้นกับพาหะทางไฟฟ้า (carrier of electricity) พอสรุปรูปแบบได้ดังนี้ คือ

1. กับอิเล็กตรอนในอะตอม
2. กับอิเล็กตรอนอิสระแต่ละตัว
3. กับสนามकुlomบ์ของนิวเคลียสหรือของอิเล็กตรอน
4. กับนิวคลีออน (แต่ละนิวคลีออนหรือทั้งนิวเคลียส)

รูปแบบของอันตรกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดผลใน 3 ลักษณะ คือ

1. คุกกลืนโฟตอนทั้งหมด
2. เกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)
3. เกิดการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

โดยทางทฤษฎีแล้วโฟตอนเกิดอันตรกิริยากับสสารได้ถึง 12 กระบวนการ แต่พลังงานที่มีส่วนเกี่ยวข้อง จะอยู่ในช่วง 10 keV ถึง 10 MeV ผลของอันตรกิริยาส่วนมากจะเกิดในกระบวนการต่อไปนี้ คือ

1. โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ถ้าพลังงานต่ำ โฟโตอิเล็กทริกจะเด่นกว่า กล่าวคือ โฟตอน จะมีการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสของอะตอมของสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอนในวง K และ L ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปภายนอกอะตอม เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน โดยที่

$$\text{พลังงานรังสีแกมมา} = \text{พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน} + \text{พลังงานของอิเล็กตรอนขณะที่อยู่ที่วงรอบนิวเคลียส}$$

หรือ

$$h\nu = 1/2mv^2 + w \text{ -----2.7}$$

เมื่อ

- h = ค่าคงที่ของพลังค์
- v = ความถี่ของพลังงานรังสีแกมมา
- m = มวล
- v = ความเร็วแสง
- w = พลังงานของอิเล็กตรอน

โอกาสการเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกแปรตามค่าเลขอะตอมยกกำลังสี่ และแปรผกผันกับพลังงานรังสียกกำลังสาม



2. การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering) ถ้าพลังงานสูงขึ้น โฟตอนอาจกระเจิงโดยอะตอม หรือ โดยแต่ละอิเล็กตรอน ซึ่งอาจมีการสูญเสียพลังงานบางส่วน หรือทั้งหมด หรืออาจไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย

ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่าสูงมากๆ โฟตอนจะเกิดการกระเจิงเสมือนว่า อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะอิสระและหยุดนิ่ง เรียกว่า การเกิดคอมพ์ตันเอฟเฟกต์ จะเด่นที่พลังงานประมาณ 1 MeV ดังในรูปที่ 2.5 พลังงานรังสีบางส่วนที่เหลืออกมากหลังจากถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h\nu' = h\nu - 2mv^2 + w$$

$$h\nu' = h\nu / [1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos\theta)]$$

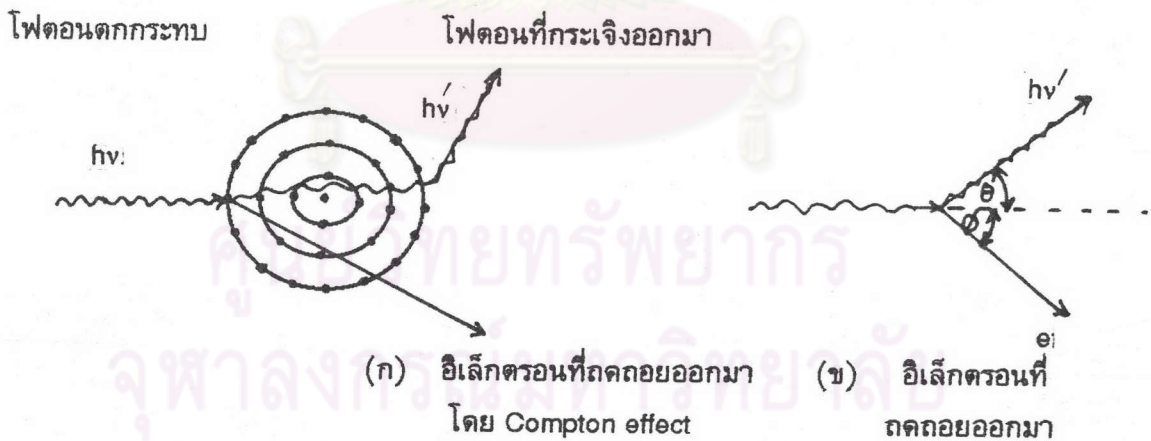
โดยที่  $h\nu$  = พลังงานเดิมของรังสีแกมมา

$h\nu'$  = พลังงานของรังสีแกมมาที่กลับออกมา

$\theta$  = มุมที่รังสีแกมมาเบนไปจากแนวเดิมที่เข้ามา

$m_0$  = มวลของอิเล็กตรอนในสภาวะนิ่ง

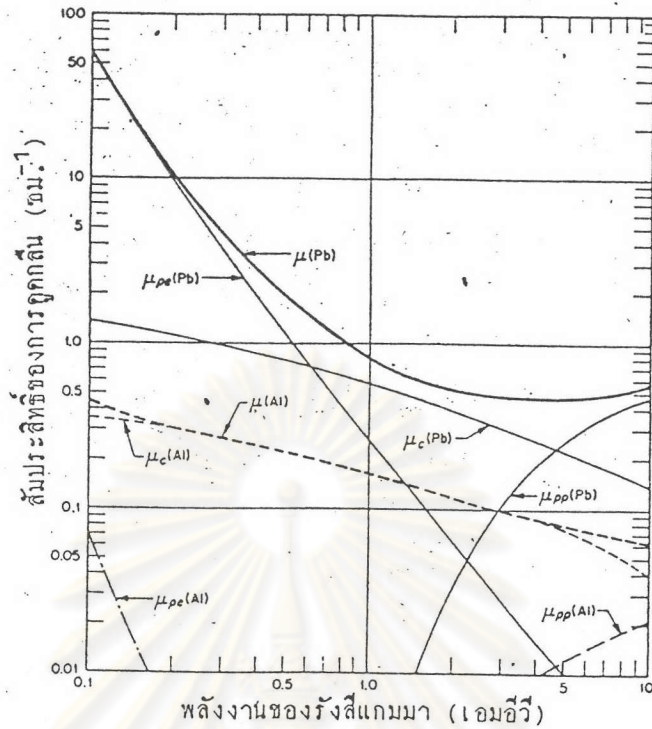
$c$  = ความเร็วแสง



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาคอมพ์ตัน

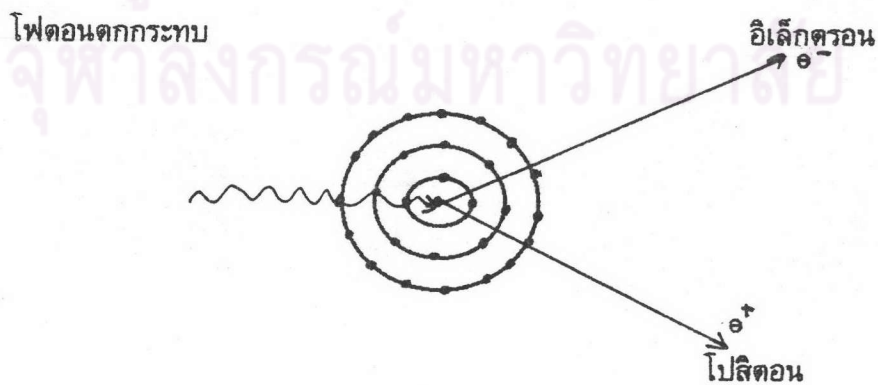
อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานแล้วหลุดออกมา จะมีพลังงาน

$$E_e = h\nu / (1 + m_0c^2/2h\nu)$$



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\mu$  ของธาตุต่างๆ กับพลังงานรังสีแกมมา

3. การเกิดอิเล็กตรอนคู่ (Pair production) ถ้าพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบมากกว่า 1.022 MeV อาจเกิดคู่อิเล็กตรอน (pair production) คือ โปสิตรอนและอิเล็กตรอนในบริเวณใกล้เคียงกับสนามคูลอมบ์ของอะตอม พลังงานที่ใช้ในการเกิดอิเล็กตรอนและโปสิตรอนแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ 0.511 MeV ส่วนพลังงานที่เหลือจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโปสิตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเสถียร แต่โปสิตรอนที่เกิดขึ้นจะมีอายุสั้นเมื่อสูญเสียพลังงานจลน์หมดจะวิ่งไปรวมกับอิเล็กตรอน (ซึ่งมีอยู่ทั่วไป) กลายเป็นรังสีแกมมามีพลังงาน 0.511 MeV 2 ตัววิ่งในทิศทางตรงกันข้าม กระบวนการนี้เรียกว่า 'แอนนิฮิเลชัน (annihilation)' โอกาสในการเกิดปฏิกิริยานี้แปรตามเลขอะตอมยกกำลังสอง



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดปฏิกิริยาแบบอิเล็กตรอนคู่

### การวัดพลังงานรังสีแกมมา

เนื่องจากการวัดพลังงานรังสีแกมมา เราไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้เป็นเพราะรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ดังนั้นจึงต้องทำการวัดพลังงานรังสีทางอ้อม โดยที่อาศัยอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์และการเกิดอิเล็กตรอนคู่ ซึ่งมีความสำคัญมาก ส่วนการเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นหรือแบบโคฮีเรนท์ มีความสำคัญในช่วงพลังงานต่ำๆ จนถึง 100 keV อิเล็กตรอนที่ยึดเกาะ(bond)อย่างเหนียวแน่นกับธาตุหนัก มักเกิดการกระเจิงลักษณะนี้ แต่ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบโคฮีเรนท์มีค่าน้อยกว่าค่าภาคตัดขวางของโฟโตอิเล็กทริกมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

### หัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ

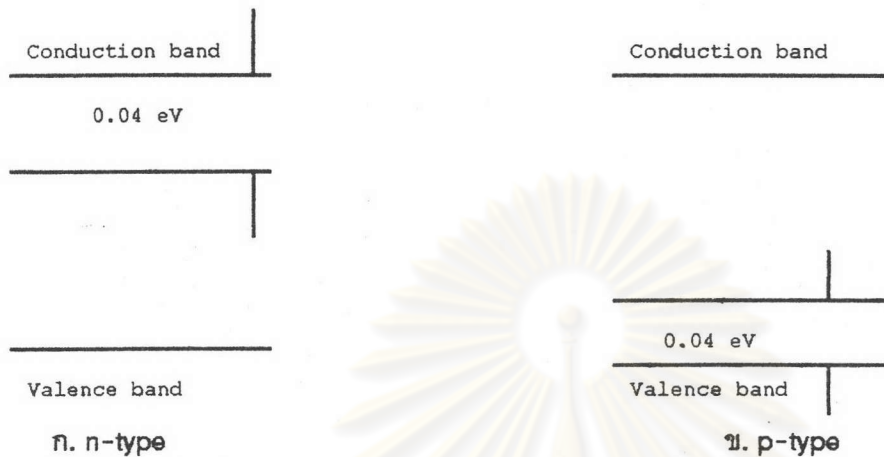
โลหะกึ่งตัวนำ เป็นธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำอยู่ระหว่างโลหะและอโลหะ นำไฟฟ้าได้น้อยกว่าโลหะแต่มากกว่าอโลหะ ธาตุพวกนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 การจับบอนด์(bond)เป็นแบบโควาเลนต์(covalent) ธาตุพวกนี้ได้แก่ ธาตุซิลิกอน (silicon, สัญลักษณ์ Si) และธาตุเจอร์มาเนียม(germanium, สัญลักษณ์ Ge)เป็นต้น โดยปกติแถบพลังงานของธาตุพวกนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแถบพลังงานปกติของธาตุซิลิกอน  
เขียนตามแกนของพลังงานของอิเล็กตรอน

ช่วงพลังงานตรงช่วง gap มีค่าเท่ากับ 1.1 eV สำหรับซิลิกอน และเท่ากับ 0.66 eV สำหรับเจอร์มาเนียม





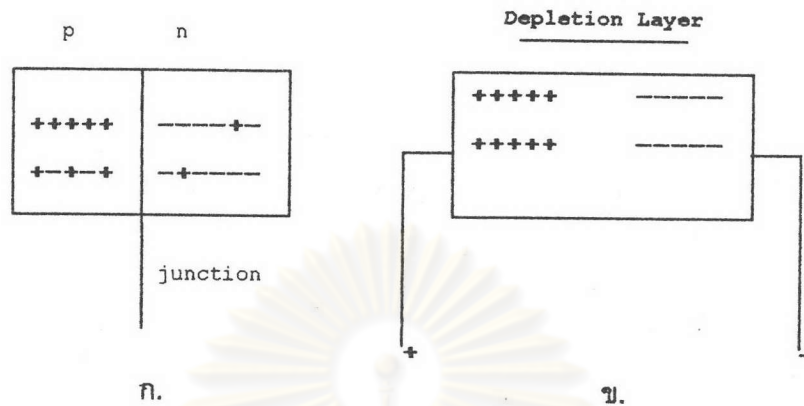
รูปที่ 2.9 แสดง n-type และ p-type ของพวกโลหะกึ่งตัวนำ

ถ้านำเอาธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 5 (เช่น อาเซนิก, แอนติโมนี, ฟอสฟอรัส เป็นต้น) จำนวนน้อย ๆ เติมหรือแทรกเข้าไประหว่างอะตอมของธาตุซิลิกอน จะมีอิเล็กตรอนที่เหลือจากการจับคู่อยู่ 1 ตัว ทำให้ธาตุซิลิกอนนี้เป็นตัวนำให้อิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น ช่องว่างระหว่างคอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์จะลดลงเหลือ 0.04 eV สำหรับซิลิกอน และ 0.01 eV สำหรับเจอร์มาเนียมซิลิกอนที่มีอิเล็กตรอนเหลือนี้เรียกว่าเป็นพวกที่ให้อิเล็กตรอน (donor) หรือ (n-type semiconductor) ดังในรูปที่ 2.9 ก.

กรณีที่เติมธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 (เช่น โบรอน แกลเลียม) ลงไปในผลึกธาตุซิลิกอนเล็กน้อย จะทำให้ผลึกขาดอิเล็กตรอน ทำให้เป็นพวกที่รับอิเล็กตรอนได้ (acceptor) ความสามารถที่รับอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า โฮล (hole) ซึ่งคล้ายกับประจุไฟฟ้าบวก พวกซิลิกอนแบบนี้เรียกว่า p-type semiconductor มีช่องว่าง 0.04 eV ถัดจากวาเลนซ์แบนด์ขึ้นมาสำหรับซิลิกอนและ 0.01 eV สำหรับเจอร์มาเนียม

#### หลักการวัดรังสีของผลึกของธาตุพวกโลหะกึ่งตัวนำ

เมื่อเอาผลึก n-type และ p-type ต่อกันดังรูปที่ 2.10 จะมีการกระจายอิเล็กตรอนและโฮลบางส่วนผ่านรอยต่อ (junction)



รูปที่ 2.10 แสดง p-n type ของโลหะกึ่งตัวนำ

เมื่อต่อศักดาไฟฟ้าบวกเข้ากับปลาย n-type และศักดาไฟฟ้าลบเข้ากับปลาย p-type อิเล็กตรอนและโฮลจะไปออกันอยู่ที่ปลาย n-type และ p-type ตามลำดับ ทำให้มีช่องว่างตรงรอยต่อ เรียกว่าดีเพลทชันเลเยอร์ (depletion layer) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับฉนวน ดังนั้นเมื่อรังสีเข้ามาที่ดีเพลทชันเลเยอร์ จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล แล้วต่างวิ่งไปที่โฮลและอิเล็กตรอนออกอยู่ ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าตามขนาดรังสี แล้วส่งเป็นสัญญาณต่อไปยังอุปกรณ์ช่วยทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

#### ข้อดีของหัววัดแบบโลหะกึ่งตัวนำ

1. วัดได้ละเอียดมาก ในการทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น ใช้พลังงานเพียง 3.5 eV/pair เท่านั้น เมื่อเทียบกับก๊าซซึ่งต้องใช้ถึง 36 eV/pair
2. มีความไวในการวัดสูง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในหัววัดนั้นประมาณ 1500 ซม<sup>2</sup> ต่อโวลต์ต่อวินาที และของโฮลมีความไว 500 ซม<sup>2</sup> ต่อโวลต์ต่อวินาที เวลาที่วิ่งในหัววัดเพียง 10<sup>-8</sup> วินาทีต่อการวัดครั้งหนึ่ง ๆ
3. มีกำลังแยกช่วงพลังงาน (Energy Resolution) สูง สามารถแยกพลังงานรังสีแกมมาได้ละเอียดมาก
4. หัววัดมีขนาดเล็ก

#### หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง [Hyperpure Germanium Detector]: (HPGe)

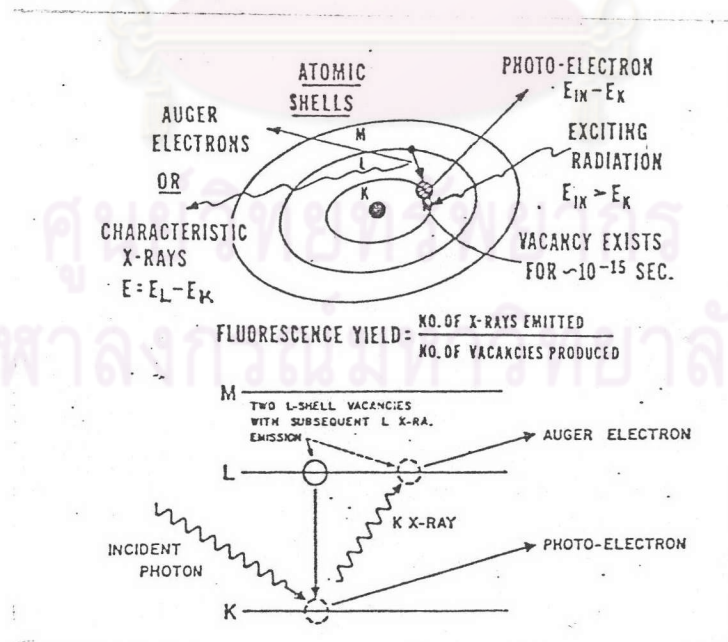
เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีหัววัดเป็นผลึกโลหะกึ่งตัวนำของ Ge ซึ่งเป็นแบบ p-n junction ทำจาก p-type ของเจอร์มาเนียมที่มีคุณภาพสูงมาก โครงสร้างอะตอม

ของเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงต้องการอุณหภูมิต่ำๆ เพื่อที่จะรักษาให้ผลึกหัววัดอยู่ที่ อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องมีระบบทำความเย็นและถังเก็บไนโตรเจนเหลว หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงที่ใช้ นี้ เป็นแบบกระบอกแกนร่วม (cylinder coaxial)

### ทฤษฎีการเรืองรังสีเอกซ์

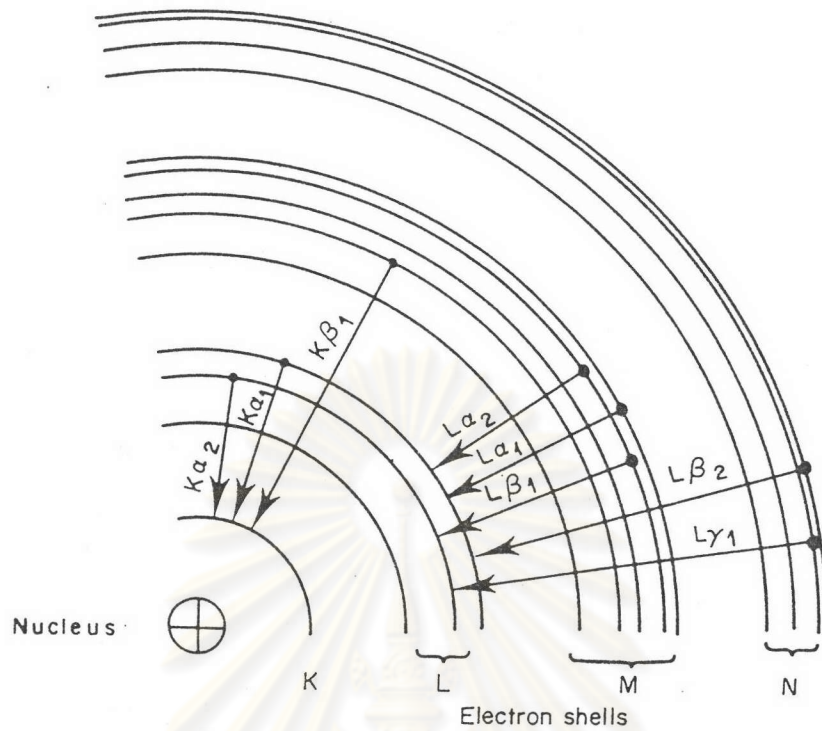
#### หลักการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence)

กระบวนการเรืองรังสีเอกซ์เกิดจากการที่ระดมยิง (bombard) วัตถุ เช่น โลหะ หรือ สารประกอบ เป็นต้น ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น ลำอิเล็กตรอน (electron) หรือ โปรตอน หรือ โฟตอนลำรังสีเอกซ์ หรือแกมมา หรือโฟตอน อิเล็กตรอนที่ประกอบอยู่ในอะตอมที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้น เมื่อถูกระดมยิง ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกไปจากอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นพลังงานถัดไปจะย้ายลงมาแทนที่พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray)” หรือ “ฟลูออเรสเซนต์เอกซ์เรย์ (fluorescent X-ray)” ธาตุแต่ละชนิดจะให้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานหรือความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุนั้น ๆ พลังงานรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะมากกว่าที่เกิดจากการกระตุ้นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ความเข้มรังสีเอกซ์ที่ให้ออกมานั้น จะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีที่ใช้ในการกระตุ้น และขึ้นกับพลังงานของรังสีที่ใช้กระตุ้นด้วย ถ้าวรังสีที่ใช้ในการกระตุ้นมีพลังงานมากกว่าเค-แอบซอร์พชันแอดจ์ (K-absorption edge) ของธาตุนั้นเพียงเล็กน้อย จะให้ประสิทธิภาพในการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนั้นสูงสุด



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว





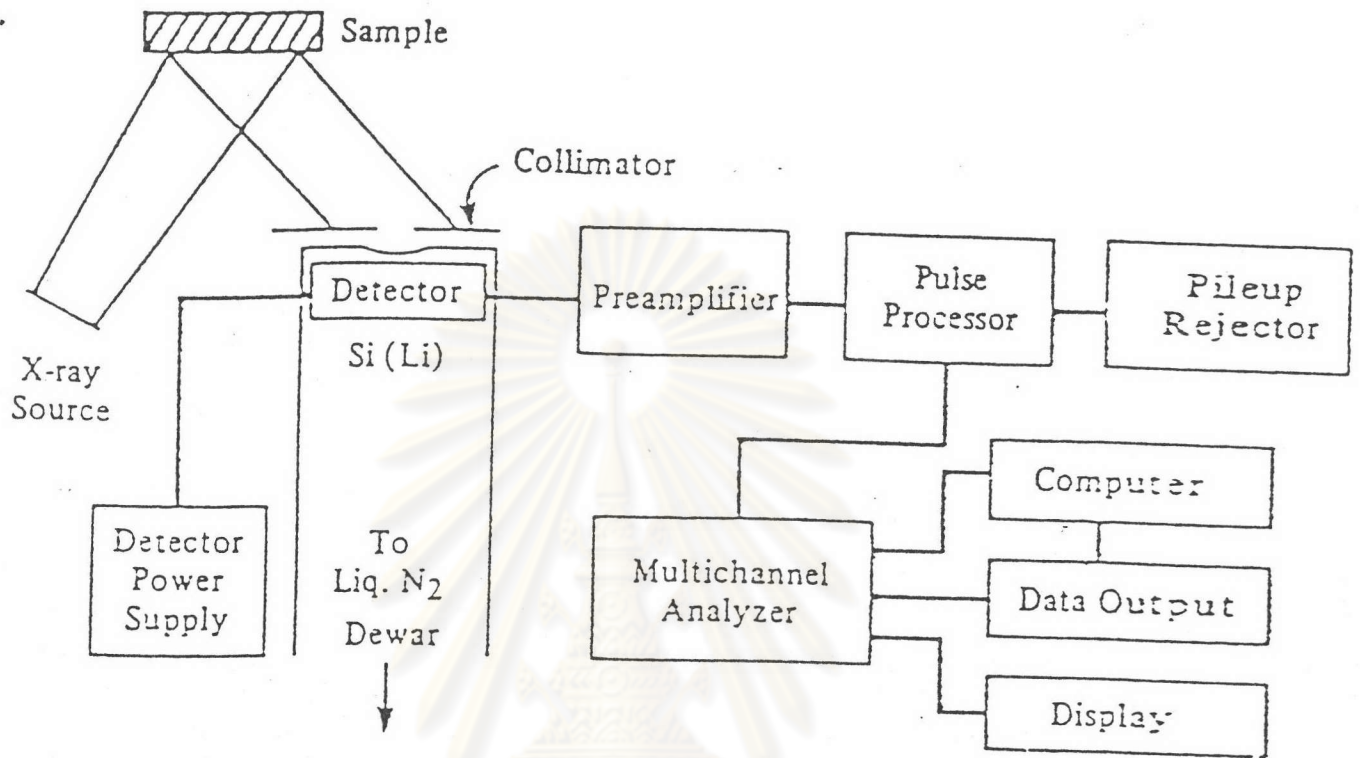
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

### เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุแบบการเรืองรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์นั้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ

- ก. Non-dispersion หรือ Energy Dispersive X-ray Fluorescence System (EDXRF)
- ข. Dispersion หรือ Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence System (WDXRF)

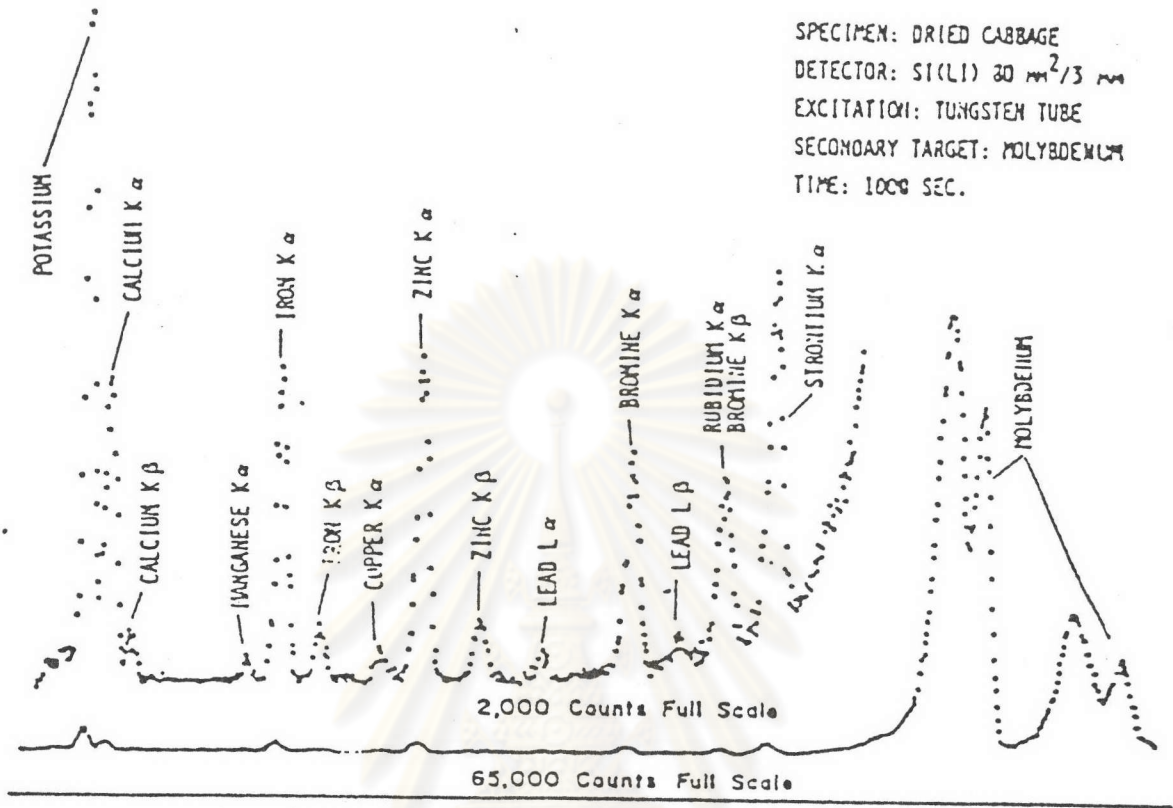
ก. ระบบ Non-dispersion เป็นระบบที่วิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เกิดจากตัวอย่างโดยตรง โดยที่ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ (Primary radiation source) อาจมาจากแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray generator) จากหลอดรังสีเอกซ์ หรือ ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นธาตุกัมมันตรังสี ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเครื่อง EDXRF

องค์ประกอบของเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบ EDXRF ประกอบด้วย

1. หัววัดรังสีเอกซ์ โดยทั่วไป หัววัดที่ใช้ในการวัดมี 3 ชนิด ได้แก่ หัววัดชนิดเรืองแสง (Scintillation detector) , หัววัดพรอพอร์ชันนัล (Proportional detector) และหัววัดชนิดกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น Si(Li) , HPGe
2. detector power supply
3. ระบบ Cooling ซึ่งเป็นไนโตรเจนเหลวเพื่อทำให้ detector เย็น (สำหรับหัววัดชนิดกึ่งตัวนำ )
4. แหล่งผลิตเอกซ์เรย์ (X-ray source) ซึ่งอาจใช้ X-ray generator หรือ radioisotopes
5. preamplifier และ amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ
6. multichannel analyzer (MCA) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมสัญญาณจาก หัววัดรังสี แสดงผลเป็นกราฟระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้กับพลังงาน ซึ่งเรียกว่าสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของกระหล่ำปลี

7. Control unit and data acquisition ซึ่งประกอบด้วย computer และ software เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องเก็บข้อมูลต่างๆ และผลการวิเคราะห์

ข. ระบบ WDXRF เป็นระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ โดยคุณสมบัติการเลี้ยวเบน(diffraction) และการแทรกสอด (interference) ของรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.ผลึกวิเคราะห์ (Analyzing crystal) ทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่างๆกัน ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นจะหักล้างกัน และเสริมสร้างกันเป็นไปตาม

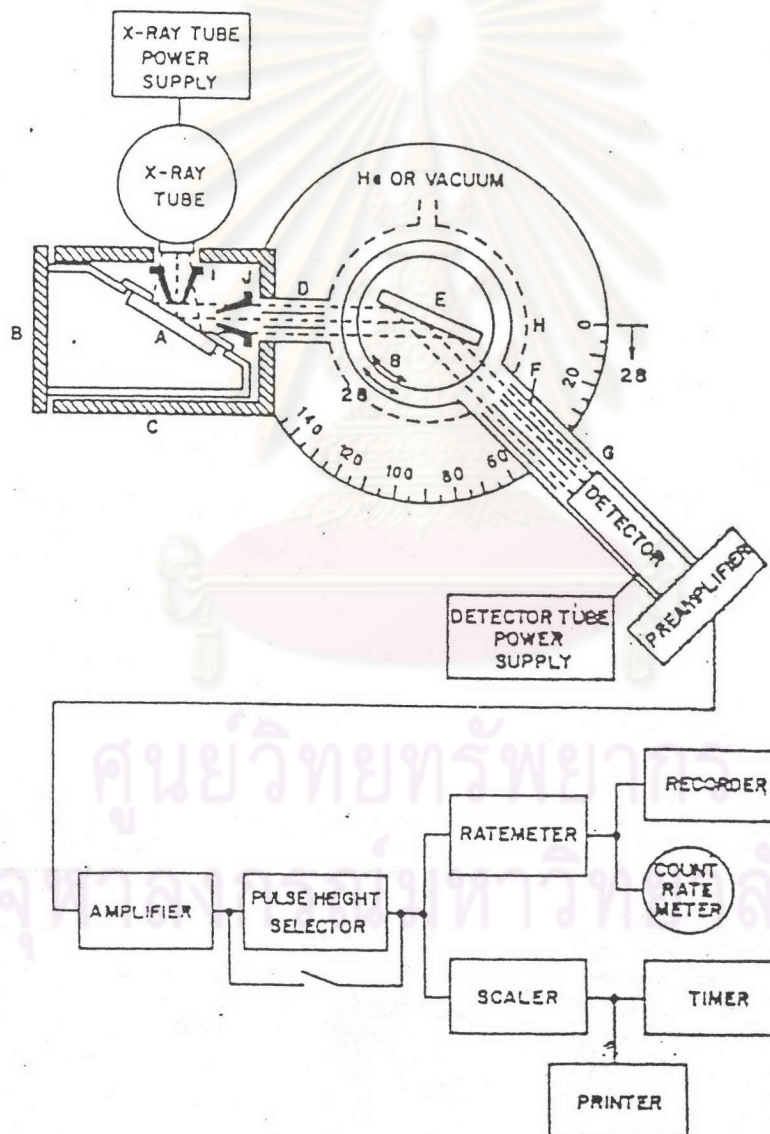
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{-----} \quad 2.11$$

ซึ่งรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน จะถูกวัดความเข้มรังสี ด้วยการสแกน(scan)ของหัววัดรังสี สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่องพิมพ์



หรือ เครื่องเขียนกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับมุม  $2\theta$  ซึ่งแปรผันตามความยาวคลื่น

2. ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
3. หัววัดรังสีเอกซ์ ส่วนมากใช้หัววัดชนิดเรืองแสง และหัววัดชนิดพรอพอร์ชันนัล
4. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นแบบช่องเดียว (SCA)
5. Goniometer detection System
6. Preamplifier และ amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงองค์ประกอบต่างๆของเครื่อง WDXRF

### เทคนิคการวิเคราะห์

#### ก. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยวิธี XRF นั้นกระทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจเป็น EDXRF เนื่องจากระบบนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ทำให้สามารถจัดแบ่งช่องรับสัญญาณให้ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างๆ ได้ ด้วยเหตุนี้ การตรวจวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าสู่หัววัดรังสี จึงสามารถกระทำได้พร้อมๆ กันหลายๆ ระดับพลังงาน แต่มีข้อเสียคือเกิดมีปัญหาการเกิดซ้อนกันของพีคที่มีพลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ขีดจำกัด ในด้านความสามารถในการแยกพลังงานของหัววัดรังสี ส่วนระบบ WDXRF ระบบจะยุ่งยากและให้ผลช้ากว่า แต่มีข้อดี คือ มีความสามารถแยกพลังงานรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าระบบ EDXRF เพราะผลึกวิเคราะห์สามารถแยกพลังงานได้ดีกว่าหัววัดรังสีมาก โดยเฉพาะในช่วงพลังงานรังสีเอกซ์ต่ำกว่าประมาณ 20 KeV ลงไป

ข. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่าง กับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน โดยความเข้มที่เกิดขึ้นจากธาตุนั้นๆ จะเกี่ยวข้องกับค่าการดูดกลืน และการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของธาตุนั้น และธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ที่เรียกว่า “matrix element” ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องมีการแก้หรือลดผลจาก matrix effect นี้ ทำให้ในทางปฏิบัติมีเทคนิคการวิเคราะห์หลายวิธี เช่น

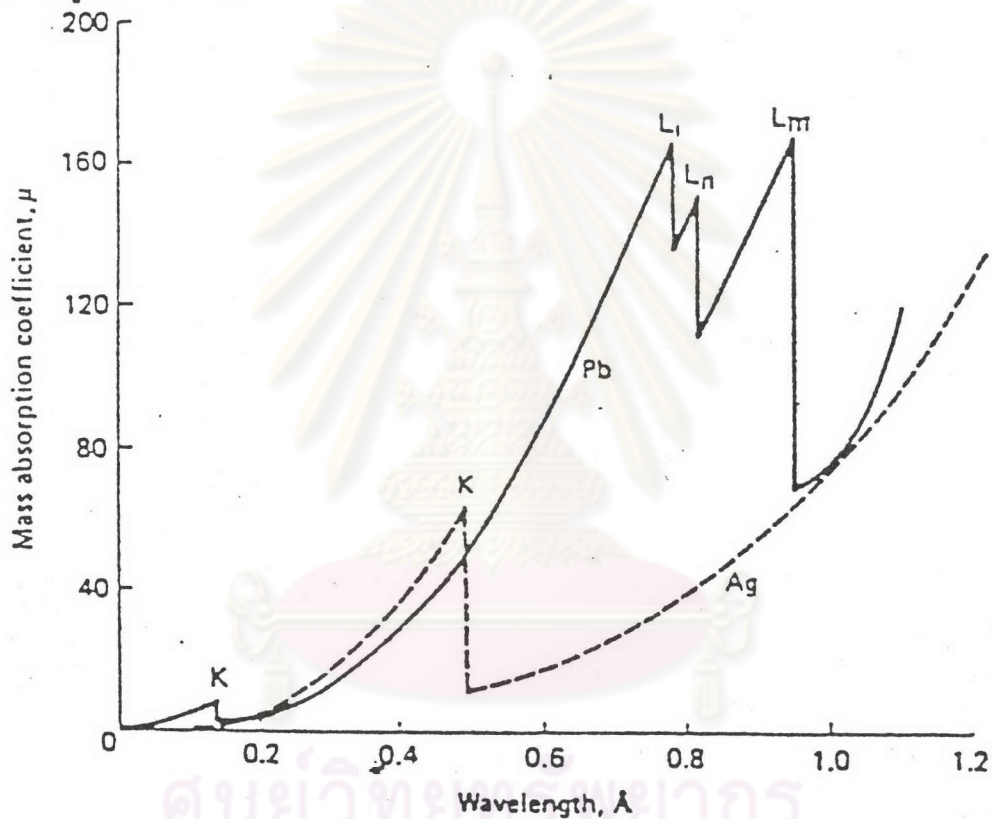
1. ใช้วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน
2. ใช้ thin film technique
3. ใช้ dilution technique
4. ใช้ standard addition technique
5. ใช้ internal standard technique
6. ใช้ scatter correction
7. ใช้ mathematical correction

สำหรับในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ประกอบกับการแก้ matrix effect โดยการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของสารตัวอย่างที่พลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของยูเรเนียม

#### สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบตัวอย่าง รังสีเอกซ์จะทะลุผ่านได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ และเลขอะตอมของธาตุในตัวอย่าง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน

ของเงินและตะกั่วกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูป 2.16 จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นน้อยลง (พลังงานสูงขึ้น) ยกเว้นตรงค่าความยาวคลื่นที่ตรงกับพลังงานอ็อกโตไอไนเซชัน (ionization energy) หรือ พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้นๆ ซึ่งที่ค่านี้จะมีสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเพิ่มขึ้นมาก แล้วจึงค่อยๆลดลง ตามลำดับ ดังนั้นในการกระตุ้นธาตุต่างๆ ให้ปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา ต้องใช้พลังงานอย่างน้อยเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น แต่ต้องไม่มีค่าสูงเกินไป เพราะเมื่อพลังงานสูงขึ้นโอกาสการดูดกลืนจะลดลง



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่น

ศูนย์วิทยุชุมชน  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย