

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### แทนทาลัม

แทนทาลัมเป็นธาตุที่ 73 ในตารางธาตุ มีมวลอะตอมเท่ากับ 180.9 จัดอยู่ในกลุ่มธาตุทรานสิชันหมู่ 5 (B V) มีวานาเดียมและไนโอเบียมอยู่ร่วมหมู่เดียวกัน ในธรรมชาติแทนทาลัมมี 2 ไอโซโทปคือมี Ta-181 อยู่ 99.988 % และ Ta-182 อยู่ 0.012 % และมีไอโซโทปรังสีประมาณ 22 ไอโซโทป ซึ่งผลิตจากการนำไอโซโทปเสถียรของแทนทาลัมไปอบรังสีนิวตรอน หรือนำไอโซโทปเสถียรของธาตุอื่นที่อยู่ใกล้เคียงมาอบรังสีอนุภาคพลังงานสูง เช่น โปรตอนที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาค หรือนิวเคลียสของธาตุเบาเช่นออกซิเจนที่มีพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาค โดยทั่วไปคุณสมบัติทางเคมีของแทนทาลัมคล้ายกับไนโอเบียม และมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนปกติเท่ากับ 5 สมบัติที่แตกต่างจากธาตุอื่นๆคือ จะไม่ไวต่อปฏิกิริยาของกรดแก่หลายชนิดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของกรดเหล่านั้น ในปี 1902 แทนทาลัมถูกใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก ในรูปของลวดไส้หลอดไฟฟ้าก่อนถูกแทนที่ด้วยทังสเตนในราวปี 1909 และจากช่วงเวลานั้นจนถึงปี 1922 มีการใช้แทนทาลัมในวงจำกัดเฉพาะทางทันตแพทย์และใช้เป็นเครื่องมือผ่าตัดเท่านั้น ภายหลังจากค้นพบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแทนทาลัม และนำไปผลิตตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในเวลาต่อมาจนถึงปัจจุบัน

แทนทาลัมถูกค้นพบโดย Ekeberg ในปี 1802 และในปี 1866 Maignac สามารถแยกแทนทาลัมออกจากไนโอเบียมได้สำเร็จ โดยอาศัยความแตกต่างของความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนฟลูออไรด์ของธาตุทั้งสอง และใช้วิธีนี้ในการผลิตแทนทาลัมเชิงพาณิชย์จนถึงช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction Technique) และใช้วิธีนี้ในการผลิตแทนทาลัมมาจนถึงปัจจุบัน

## 2.1 แหล่งแร่แทนทาลัม

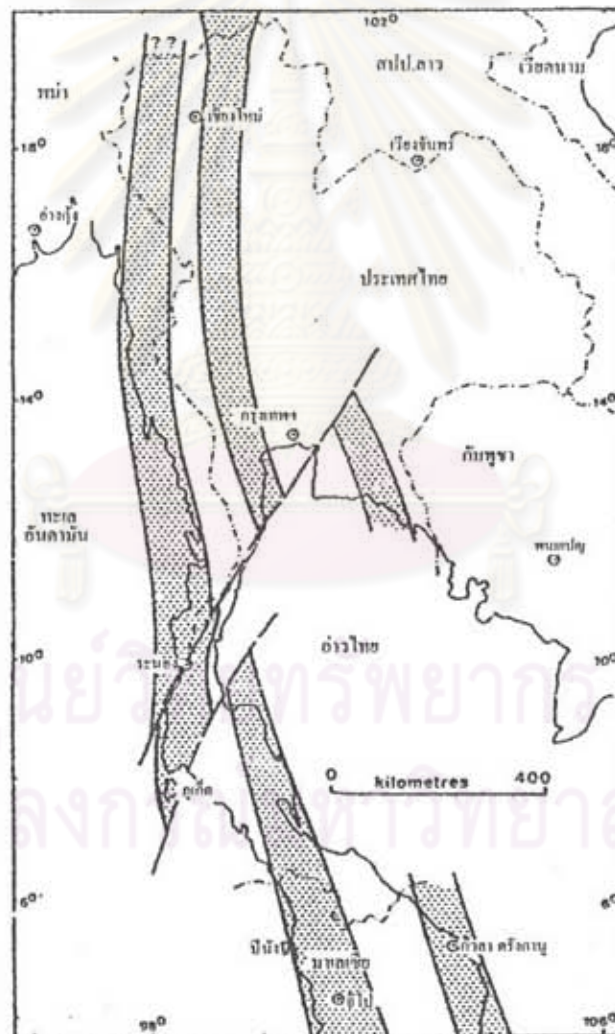
แร่ที่เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตโลหะหรือสารประกอบแทนทาลัมคือ แร่แทนทาลไซด์ โคลัมไบต์ นอกจากนี้ยังมีแร่ชนิดอื่น ๆ ที่มีแทนทาลัมปนอยู่ในปริมาณสูง เช่นแมงกานีสแทนทาลไซด์ เป็นต้น แร่เหล่านี้จะมีแทนทาลัมปนอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แหล่งสำคัญของแร่เหล่านี้ได้แก่ แอฟริกาตอนกลาง ไชบีเรีย ตะวันออก คาบสมุทรอารเบีย เขตทรานส์ไบคาล คาซัคสถาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบปนอยู่ในแหล่งหินก็ได้แก่ คาบสมุทรมาลาชาและแถบซีกตะวันตกของประเทศไทย ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้แหล่งสำคัญอีกแหล่งหนึ่งคือวัสดุที่ทำมาจากแทนทาลัม เช่น ผงโลหะแทนทาลัม แผ่นฟอยล์ ลวดแทนทาลัมหรือตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 แสดงชื่อชนิดและองค์ประกอบของแร่ของที่สำคัญ และปริมาณแทนทาลัมในแร่

ชนิดของแร่	องค์ประกอบ	ปริมาณแทนทาลัม (%)
Tantalite	( Fe, Mn )( Ta, Nb ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1-48
Columbite	( Fe, Mn )( Nb, Ta ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	48-84
Manganotantalite	( Mn, Fe )( Ta, Nb ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	35-82
Stibotantalite	SiTaO <sub>4</sub>	60.24
Simpsonite	Al <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	81.25
Samaskite	( Y, Er, Ce, U, Ca, Fe, Pb, Th ) ( Nb, Ta, Ti, Sm ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	2-27
Euxenite	( Y, Ce, Ca, Th )( Nb, Ta, Ti ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1-6
Strueverite	( Fe, Mn )( Ta, Nb, Ti ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	5-26

## 2.2 กระบวนการผลิตโลหะแทนทาลัมและสารประกอบที่สำคัญ

การผลิตแทนทาลัมเริ่มจากการสกัดแทนทาลัมออกจากแร่หรือตะกอนดินบุก และนำส่วนที่สกัดได้ไปแยกเอาแทนทาลัมออกจากโลหะชนิดอื่น แล้วนำไปทำให้เป็นสารประกอบบริสุทธิ์ โดยทั่วไปนิยมทำให้อยู่ในรูปของโปแตสเซียมฟลูออโรโรแทนทาเลต และนำไปผ่านขบวนการรีดักชันจะได้ผงโลหะแทนทาลัม ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่นนำไปผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือนำไปทำให้เป็นก้อนโลหะแทนทาลัมโดยกระบวนการทาง powder metallurgy หรือใช้วิธีหลอม



รูปที่ 2.1 แสดงบริเวณที่มีสายแร่ของโลหะหายากและแทนทาลัม  
ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

สำหรับไนโอเบียม ซึ่งมักพบร่วมกับแทนทาลัม จะถูกดึงออกจากสารละลายฟลูออไรด์ โดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนีย แล้วนำไปเผา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไนโอเบียมออกไซด์ ขั้นตอนทั้งหมดจะแสดงในรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงไอโซโทปต่างๆของแทนทาลัมที่พบในปัจจุบัน

เลขมวล	ค่าครึ่งชีวิต T <sub>1/2</sub>	ประเภทการสลายตัว หรือ %Abundance	ปฏิกิริยาก่อเกิด
157	5.3 msec	$\alpha$	-
158	3.7 msec	$\alpha$ 93 %, $\epsilon$ 7 %	daughter Re-162
159	570 msec	$\alpha$ 80 %, $\epsilon$ 20 %	$^{170}\text{As}$ ( $^{58}\text{Ni}$ , )
161	-	$\alpha$	-
164	13.6 sec	$\alpha$ 0.02 %, $\epsilon$ 99.98 %	$^{127}\text{I}$ ( $^{40}\text{Ca}$ , 3n )
166	3.2 sec	$\epsilon$	Hg ( p, ), Re ( p, )
167	2.9 min	$\epsilon$	Hg ( p, ), Re ( p, )
168	2.4 min	$\epsilon$	Hg ( p, ), Re ( p, )
169	4.9 min	$\epsilon$	Hg ( p, ), Re ( p, )
171	23.3 min	$\epsilon$	$^{165}\text{Ho}$ ( $^{12}\text{C}$ , 6n )
172	36.8 min	$\epsilon$	$^{175}\text{Lu}$ ( $^3\text{He}$ , 6n )
173	3.65 h	$\epsilon$	$^{165}\text{Ho}$ ( $^{12}\text{C}$ , 4n )
174	1.18 h	$\epsilon$	$^{175}\text{Lu}$ ( $\alpha$ , 6n )
175	10.5 h	$\epsilon$	$^{175}\text{Lu}$ ( $\alpha$ , 5n )
176	8.1 h	$\epsilon$	$^{175}\text{Lu}$ ( $\alpha$ , 4n )
178	9.31 min	$\epsilon$	$^{175}\text{Lu}$ ( $\alpha$ , 3n )
180m	>1.2E15 y	$\epsilon, \beta^-$ , 0.012%	
180	8.1 h	$\epsilon$ 87 %, $\beta^-$ 13 %	$^{181}\text{Ta}$ ( n, 2n )
181	-	99.988%	-
182	115.2 d	$\beta^-$ , IT	$^{181}\text{Ta}$ ( n, $\gamma$ ), $^{182}\text{W}$ ( n, p )

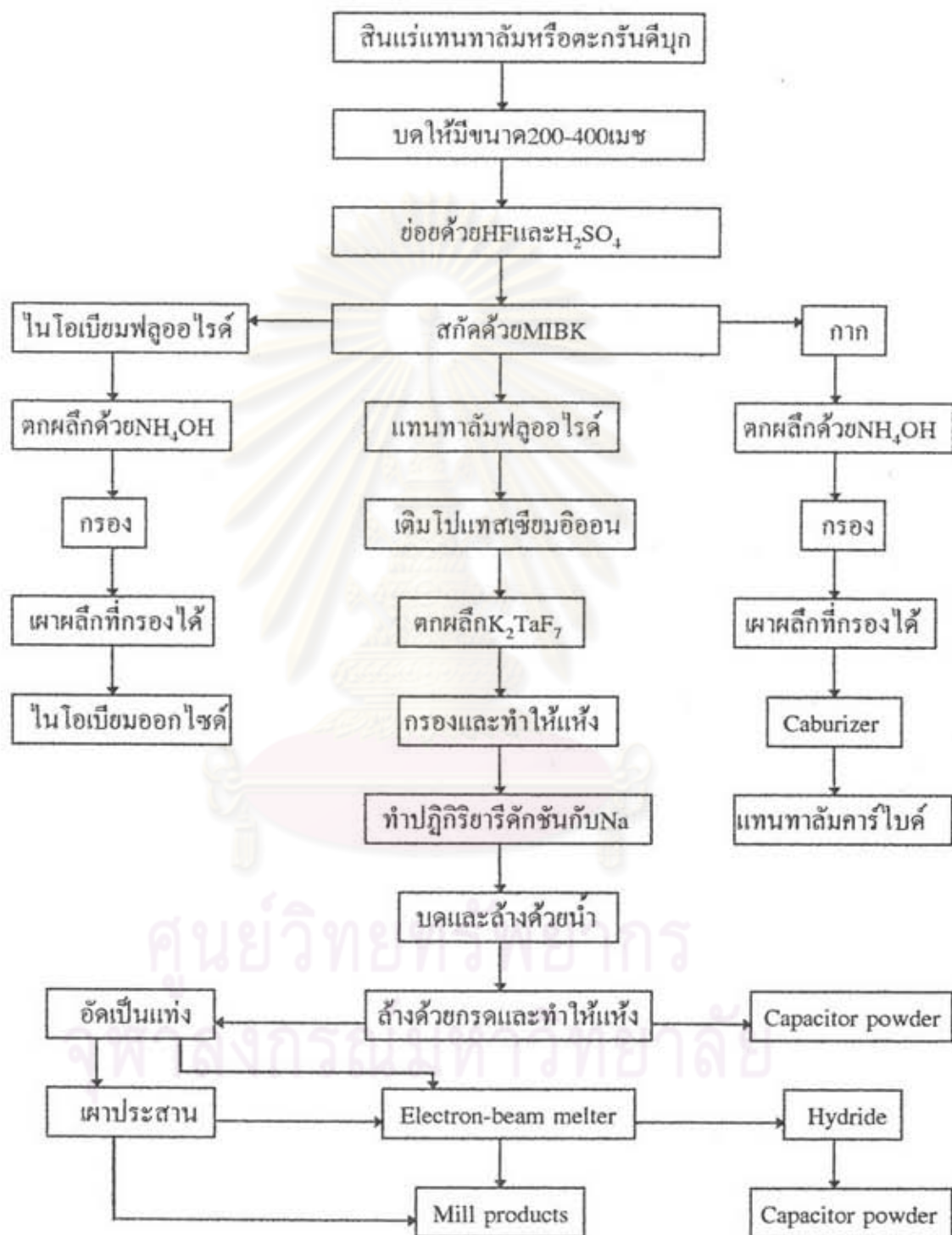
ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

เลขมวล	ค่าครึ่งชีวิต T <sub>1/2</sub>	ประเภทการสลายตัว หรือ %Abundance	ปฏิกิริยาก่อเกิด
183	5.1 d	$\beta^-$	multiple n-capture of <sup>181</sup> Ta
184	8.7 h	$\beta^-$	<sup>186</sup> W ( d, $\alpha$ )
185	49 min	$\beta^-$	<sup>186</sup> W ( n, np )
186	10.5 min	$\beta^-$	<sup>186</sup> W ( n, 2n )

### 2.2.1 กระบวนการผลิตแทนทาลัม

กระบวนการผลิตแทนทาลัมเริ่มจากนำสินแร่หรือตะกรันสีบุกที่ผ่านการแต่งแร่ เพื่อเพิ่มปริมาณแทนทาลัมในวัตถุดิบแล้ว มาบดด้วยเครื่องบดแร่ให้มีขนาด 200-400 เมช แล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้ไปย่อยสลายด้วยกรดกัดแก้ว ( hydrofluoric acid, HF) และกรดกำมะถัน ( sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) กรดจะละลายแทนทาลัมและสิ่งเจือปนต่างๆออกมาในรูปของสารละลายฟลูออไรด์ ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 16-24 ชั่วโมงแล้วนำไปกรองเพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นสารละลายออกไปทำการสกัดด้วย Methyl Isobutyl Ketone (MIBK)

ก่อนที่จะสกัดด้วย MIBK ให้ปรับสารละลายให้มีสภาพเป็นกรดแล้วนำมาสัมผัสกับ MIBK ใน mixer-settler แทนทาลัมและไนโอเบียมจะเข้าไปอยู่ในชั้นของ MIBK ในขณะที่สารเจือปนอื่นยังคงอยู่ในชั้นสารละลายไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นนำ MIBK ที่มีแทนทาลัมและไนโอเบียมมาสัมผัสกับกรดกำมะถันเจือจาง ไนโอเบียมจะเข้าไปอยู่ในชั้นสารละลายกรดและนำไปตกผลึกด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) แล้วนำ MIBK ไปสัมผัสกับไอน้ำต่อ แทนทาลัมจะเข้าสู่ชั้นของน้ำในรูปของสารประกอบฟลูออไรด์ แล้วตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ กรองตะกอนแล้วนำไปเผาเพื่อให้อยู่ในรูปออกไซด์ หรือนำสารประกอบฟลูออไรด์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับ KCl จะอยู่ในรูปสารประกอบโปแตสเซียม แล้วนำไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับโลหะโซเดียม จะได้ผงโลหะแทนทาลัมออกมา



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตผงโลหะแทนทาลัม

### 2.3 คุณสมบัติของแทนทาลัม

แทนทาลัมมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ความต้านทานการกัดกร่อนต่อสารต่างๆ เช่น กรด สารอินทรีย์หลายชนิด เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติในด้านนี้แสดงในตารางที่ 2.3 ส่วนคุณสมบัติอื่นๆแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ความต้านทานการกัดกร่อนของแทนทาลัม

สารที่กัดกร่อนได้น้อย		
acetic acid	amines	aqua regia
body fluid	bromine to 300°C	chlorine
chromic acid	ferric chloride	formic acid
hydroiodic acid	hydrobromic acid	hydrochloric acid
hydrogen peroxide	hypochlorous acid	iodine to 300°C
nitric acid	nitrous acid	organic chlorides
phenol	sulfuryl chlorides	sulfuric acid to 175°C
สารที่กัดกร่อนได้โดยขึ้นกับสภาพที่เหมาะสม		
ammonium hydroxide	fluorides	hydrogen
potassium hydroxide, dilute	sodium hydroxide, dilute	
sulfuric acid, over 175°C		
สารที่กัดกร่อนได้ดี		
fuming sulfuric acid	hydrofluoric acid	hydrogen fluoride
potassium hydroxide, concentration	sodium hydroxide, concentration	
sulfur trioxide		

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติต่างๆของแทนทาลัม

คุณสมบัติ	ปริมาณ/หน่วย
เลขอะตอม	73
น้ำหนักอะตอม	180.95
ความหนาแน่น	16.6 g/cm <sup>3</sup>
lattice type	body-centered cubic
การจัดเรียงvalance eletron	5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>
จุดหลอมเหลว	2996°C
จุดเดือด	5426±100°C
Thermal neutron corss section	21.3 mb
การนำไฟฟ้า,%IACS	13.0
การนำความร้อน ที่20°C	0.544 J/(s*cm*K)
Tensile strength, room temp.	241-483 MPa
Young's modulus, room temp.	186 MPa



## 2.4 การนำไปใช้ประโยชน์

แทนทาลัมส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยผลิตจากผงโลหะแทนทาลัมที่ผ่านการอัดขึ้นรูปและเผาประสาน ใช้แทนทาลัมออกไซด์เป็น dielectric และใช้แทนทาลัมออกไซด์ที่เคลือบด้วย MnO<sub>2</sub> เป็นขั้วตรงข้ามกับขั้วของโลหะแทนทาลัม นอกจากนี้แทนทาลัมยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆดังนี้

### 2.4.1 แทนทาลัมคาร์ไบด์ ( Tantalum Carbide )

ผงแทนทาลัมคาร์ไบด์ใช้ผสมในทั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ (WC-Co) เพื่อนำไปทำเครื่องมือตัดที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งที่อุณหภูมิสูง การเพิ่มแทนทาลัม



คาร์ไบด์ลงใน WC-Co มีสองช่วงที่สำคัญคือ มีแทนทาลัมคาร์ไบด์ผสมอยู่น้อยกว่า 1% โดยน้ำหนักและมีแทนทาลัมคาร์ไบด์ผสมอยู่มากกว่า 2% โดยน้ำหนัก

เครื่องมือที่มีแทนทาลัมคาร์ไบด์ผสมอยู่เพียงเล็กน้อย ได้แก่เครื่องมือที่ใช้สำหรับตัดโลหะที่เป็น nonferrous หรือไม้ ส่วนเครื่องมือที่มีแทนทาลัมคาร์ไบด์ผสมอยู่มากมักใช้สำหรับเครื่องจักรกลโลหะ

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อกำหนดของปริมาณสิ่งเจือปนในแทนทาลัม

ธาตุ	capacitor grade <sup>a</sup>	B521-70 metal <sup>b</sup>	Extra high purity <sup>a</sup>	K <sub>2</sub> TaF <sub>7</sub> (ppm)
อะลูมิเนียม	-	-	-	<7
โครเมียม	0.0005	-	-	<7
เหล็ก	0.002	0.02	0.001	<9
นิกเกิล	0.001	0.02	-	<7
ไนโอเบียม	0.0025	0.1	0.003	<9
ซิลิกอน	0.0015	0.02	0.0005	<7
ทั้งสแตน	-	0.03	0.005	-

<sup>a</sup> %,Commercial grade

<sup>b</sup> %,ASTM specifications

#### 2.4.2 การใช้งานที่ต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีในอุตสาหกรรมที่จะต้องใช้กับสารที่มีการกัดกร่อนสูงเช่นกรดเข้มข้น หรือใช้คลอรีน หรือใช้ในการผลิตยาที่ไม่ต้องการการปนเปื้อนใดๆ มักจะเคลือบด้วยแทนทาลัม หรืออาจจะใช้แทนทาลัมอัลลอยเป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์นั้นๆ



รูปที่ 2.3 การนำแทนทาลัมไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

#### 2.4.3 ใช้ทำ Superalloy สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้กับอากาศยาน

แทนทาลัมใช้ผสมลงใน Superalloy ที่มีนิกเกิลเป็นหลัก เพื่อทำเป็นแผ่นใบพัดในเครื่องยนต์ของอากาศยาน และยังเป็นส่วนสำคัญใน Superalloy ที่มีโคบอลต์เป็นหลัก ซึ่งใช้ทำเป็นส่วนประกอบอื่นๆ ในเครื่องยนต์แบบกังหัน (turbine engines) ปริมาณแทนทาลัมที่มีใน Superalloy อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 12%

#### การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ด้วยนิวตรอน

การเอกซเรย์ด้วยนิวตรอนหมายถึง การนำนิวไคลด์ที่เสถียรไปอาบรังสีนิวตรอนซึ่งจะทำให้เกิดนิวไคลด์ที่ไม่เสถียร และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสี ปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวไคลด์เสถียรที่ใช้เป็นเป้าและจำนวนของนิวตรอนและองค์ประกอบที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (cross section) ซึ่งหมายถึงโอกาสที่จะเกิดการเอกซเรย์สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากการเอกซเรย์ จะเกิดการสลายตัวตามคุณสมบัติที่เรียกว่าครึ่งชีวิต

(half life) คำนวณค่ากัมมันตภาพที่เพิ่มขึ้นขณะอาบรังสี จะขึ้นอยู่กับค่าครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น พลังงานของนิวตรอนที่ใช้แยกนิวเคลียสจะเป็นตัวบอกถึงชนิดอันตรกิริยาและประเภทของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

## 2.5 อันตรกิริยาที่เกิดจากนิวตรอน

อันตรกิริยาของนิวตรอนจะที่เกิดกับสสารทั่วไปมีดังต่อไปนี้

### 2.5.1 Elastic scattering

เกิดจากนิวตรอนวิ่งชนนิวไคลด์ และกระเจิงออกมาซึ่งนิวไคลด์ที่ถูกชน ยังคงอยู่ในสถานะพื้น (ground state) เหมือนเดิม

### 2.5.2 Inelastic scattering

เกิดจากนิวตรอนวิ่งชนนิวไคลด์ และกระเจิงออกมาทำให้นิวตรอนมีความเร็วลดลง และนิวไคลด์ที่ถูกชนจะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) แล้วจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า inelastic  $\gamma$ -ray

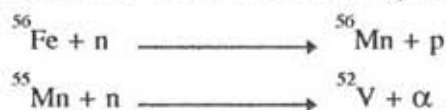
### 2.5.3 Radiative capture หรือปฏิกิริยา ( n, $\gamma$ )

เกิดจากนิวเคลียสของธาตุที่เป็นเป้าจับนิวตรอนไว้ ทำให้นิวเคลียสนั้นอยู่ในสภาพถูกกระตุ้น (excited state) จึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีแกมมา ปฏิกิริยานี้มักเกิดกับ Thermal neutron เป็นส่วนใหญ่ และเป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์มากที่สุด ตัวอย่างของปฏิกิริยานี้ก็คือ

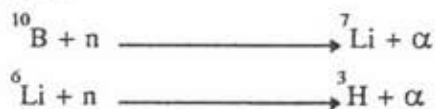


### 2.5.4 Charged-Particle reaction

ปฏิกิริยา ( n, p ) หรือ ( n,  $\alpha$  ) ปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงกับธาตุที่มีเลขอะตอมประมาณ 30 หรือต่ำกว่า จะได้นิวไคลด์ใหม่ที่ต่างจากธาตุเดิมสามารถแยกออกจากกันได้ด้วยกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างของปฏิกิริยานี้ได้แก่



ยกเว้นปฏิกิริยาต่อไปนี้



ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะเกิดจาก Thermal neutron

### 2.5.5 Neutron-Producing reaction

ปฏิกิริยา (n,2n) ส่วนใหญ่จะเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงเช่นกัน แต่ธาตุที่เป็นเป้าหมายจะมีเลขอะตอมมากกว่า 30 ขึ้นไป นิวไคลด์ที่เกิดใหม่จะเป็นธาตุเดิมแต่มีเลขมวลต่างออกไปและนิวตรอนที่ออกมาจะเป็นคนละตัวกับที่ยังเข้าไป ตัวอย่างของปฏิกิริยานี้คือ



### 2.5.6 fission

ปฏิกิริยา (n, f) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดกับธาตุหนักเช่นยูเรเนียมหรือพลูโตเนียม และจะได้นิวไคลด์ขนาดเล็ก 2 นิวไคลด์ และพลังงานอีกจำนวนหนึ่ง ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

## 2.6 การแอกติเวชันด้วยนิวตรอน

ในการแอกติเวชัน การเพิ่มขึ้นของสารกัมมันตรังสีนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของฟลักซ์ของนิวตรอน ถ้าฟลักซ์มีขนาดใหญ่ อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสีก็จะมากด้วย

Activation rate  $\propto$  ฟลักซ์นิวตรอน ( $\phi$ )

นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวไคลด์ที่นำมาแอกติเวชันด้วย

Activation rate  $\propto$  จำนวนนิวไคลด์ ( $N$ )

ถ้า  $N$  ยังขึ้นกับ isotopic abundance ของไอโซโทปที่พิจารณา ตัวอย่างเช่นอะลูมิเนียมมีไอโซโทปเสถียรไอโซโทปเดียวคือ Al-27 และถ้ากำหนดให้  $N_A$  คือเลขอาโวกาโดรและ  $A$  คือมวลอะตอม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$N = \frac{N_A}{A} \quad (2.1)$$

ถ้าอะลูมิเนียมมีมวลเท่ากับ  $w$

$$N = \frac{wN_A}{A} \quad (2.2)$$

แต่ถ้าเป็นธาตุที่มีไอโซโทปเสถียรหลายไอโซโทป ตัวอย่างเช่น โปแทสเซียมมีไอโซโทปเสถียร 2 ไอโซโทปคือ K-39 และ K-41 พิจารณา K-41 ซึ่งมี isotopic abundance เท่ากับ 6.7 % ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ค่า N ด้วยค่า isotopic abundance ( $\theta$ )

$$N = \frac{wN_A\theta}{A} \quad (2.3)$$

จากสมการ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

Activation rate  $\propto$  มวลของธาตุที่เป็นเป้า

จากความสัมพันธ์ระหว่าง Activation rate กับฟลักซ์ของนิวตรอนและจำนวนนิวไคลด์ สามารถเขียนเป็นสมการได้โดยมีเทอมของค่าภาคตัดขวาง (cross section,  $\sigma$ ) เป็นค่าคงที่

$$\text{Activation rate} = \sigma\phi wN_A\theta/A \quad (2.4)$$

เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากการแยกแอกติเวชันเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งจะเกิดการสลายตัวตามธรรมชาติ ดังนั้นขณะแอกติเวชันจะเกิดการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น พร้อมกันไปด้วย

$$\text{Production rate} = \text{Activation rate} - \text{อัตราการสลายตัว} \quad (2.5)$$

จากสมการ 2.5 จะได้

$$\text{ความแรงรังสี}(A_0) = \sigma\phi N\theta(1 - \exp(-\lambda_1 t)) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือค่าคงที่การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (decay constant) ซึ่ง

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (2.7)$$

และ  $t_1$  คือระยะเวลาที่ใช้แอกติเวชัน

แทนค่า N ในสมการ 2.6 ด้วยสมการ 2.3 จะได้

$$w = \frac{A_0 A}{N_A \sigma \phi \theta (1 - e^{-\lambda_1 t_1}) (e^{-\lambda_d t_d})} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $t_d$  คือระยะเวลาก่อนเริ่มวัดรังสี

เมื่อนำสารกัมมันตรังสีที่ได้จากการแยกแคว้นมาวัดรังสี ค่าที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับความแรงรังสีดังนี้

$$\text{ความแรงรังสี} = \frac{\text{อัตรานับรังสี}}{EP} \quad (2.9)$$

เมื่อ อัตรานับรังสี = ค่าที่ได้จากการวัดรังสีต่อหน่วยเวลา

$E$  = ค่าประสิทธิภาพการวัดรังสีของหัววัดรังสี

$P$  = อัตราส่วนการสลายตัว

จะได้

$$w = \frac{(\text{อัตรานับรังสี})A}{EPN_A \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_c})(e^{-\lambda t_c})} \quad (2.10)$$

ถ้าสารกัมมันตรังสีที่ได้จากการแยกแคว้น มีค่าครึ่งชีวิตสั้นก็ต้องมีการปรับแก้โดยคุณสมบัติของการสลายตัวขณะวัดรังสี ( $t_c$ )

$$\frac{\lambda t_c}{(1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (2.11)$$

## 2.7 ค่าขีดจำกัดการวัด (Detection limit, $L_D$ )

ค่าขีดจำกัดการวัดหมายถึง ระดับที่ผลการวิเคราะห์บอกได้ว่ามีสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์นั้นมีอยู่จริง

$$L_D = B + 3\sigma \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้  $B$  คือ background ในช่วงของ gamma peak ที่พิจารณา และ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ background

## 2.8 เครื่องกำเนิดนิวตรอน

ในปี 1932 เครื่องเร่งอนุภาคมีประจุได้ถูกสร้างขึ้นโดย J.D. Cockcroft และ E. TS. Walton



ซึ่งเร่ง atomic ion ด้วยพลังงานจลน์ที่เหมาะสมในการก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ถึงแม้ว่า Rutherford จะได้สาริตผลการเกิดการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียส ด้วยอนุภาคอัลฟาพลังงานสูงมาก่อน แต่การทดลองของ Cockcroft และ Walton ใช้โปรตอนที่เกิดโดยทำให้แก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนใน discharge tube และเร่ง gaseous ion ด้วยไฟฟ้าศักย์สูงแล้วให้โปรตอนเข้าชนกับ ลิเทียม (Lithium) ซึ่งก่อให้เกิดการสลายตัวของ  ${}^7\text{Li}$  จากปฏิกิริยา  ${}^7\text{Li} (p, \alpha) {}^4\text{He}$

เครื่องกำเนิดนิวตรอนมีส่วนประกอบสำคัญคือ 1.แหล่งกำเนิดไอออน 2.Evacuated Accelerator tube และ 3.เป้า ที่ซึ่งไอออนที่ถูกเร่งจะวิ่งเข้าชนเพื่อผลิตนิวตรอน เครื่องกำเนิดนิวตรอนจะทำงานที่ความดันต่ำและแก๊สคิวเทอริยมจะถูกปล่อยเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออนในอัตราที่กำหนด ไอออนจะถูกผลิตขึ้นจากสนามไฟฟ้าแล้วเข้าสู่ส่วนเร่งอนุภาค อนุภาคจะถูกเร่งจนพลังงานเท่ากับศักย์ไฟฟ้าตลอดระยะในส่วนเร่งอนุภาค หลังจากนั้นจะผ่านเข้าสู่ส่วนที่ปราศจากไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า drift tube ซึ่งในส่วนนี้ไอออนที่ถูกเร่งจะวิ่งเข้าชนกับเป้า จะได้นิวตรอนพลังงานสูงออกมา

### 2.8.1 เครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบsealed tube

เครื่องนิวตรอนมีส่วนประกอบทั่วไป gas reservoir แหล่งกำเนิดไอออน lens gap ซึ่งทำหน้าที่ที่คล้ายเครื่องเร่งอนุภาค และเป้าสำหรับผลิตนิวตรอน เครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบนี้สามารถลดส่วนประกอบบางอย่างได้ เช่น pump power supply และ drift tube เป็นต้น

ปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตนิวตรอน คือ  $T (d,n) He$  จะได้นิวตรอนพลังงาน 14.3 MeV ออกมา ขั้นตอนผลิตนิวตรอนเริ่มจาก แหล่งกำเนิดไอออนแบบPenning gauge ทำให้แก๊สคิวเทอริยมและตรีเทียมแตกตัวเป็นไอออน ไอออนบวกจะถูกแยกออกจากแหล่งกำเนิด และถูกเร่งเข้าสู่ grounded target assembly แก๊สจาก gas reservoir จะเข้ามาแทนที่แก๊สที่ถูกใช้ไปใน accelerator การหมุนเวียนของแก๊สภายใน accelerator จะถูกควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน reservoir

ความเข้าใจเกี่ยวกับการดำเนินการของเครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบนี้มีข้อควรพิจารณาดังนี้

1. แกสจะถูกส่งเข้าไปในแหล่งกำเนิดไอออน โดยการไหลผ่าน reservoir ของ กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ

2. การแตกตัวเป็นไอออนของแกส เกิดขึ้นโดยให้ความต่างศักย์ที่อาโนด ประมาณ 5-6 kV และค้อย ๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้น เมื่อแกสเข้าไปในส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดไอออน

3. ไอออนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทดของ high voltage lens assembly ขั้วของศักย์ไฟฟ้าจะต้องเป็นบวกเมื่อเทียบกับเป้า

เมื่อเดินเครื่องที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่บนอาโนดของแหล่งกำเนิดไอออน beam current จะมีความสัมพันธ์กับความดันใน accelerator column beam current จะถูกควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนที่เป้า

ในกรณีเดียวกันกระแสที่อาโนด จะมีความสัมพันธ์กับกระแสที่เป้า เนื่องจากการง่ายที่จะ ควบคุมและวัดกระแสที่แหล่งกำเนิด และสามารถแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความดันใน accelerator และเป้า เนื่องจาก servo ในแผงควบคุมที่ใช้กระแสจากแหล่งกำเนิดไอออน เป็น เสมือนสัญญาณเข้าและกระแสในแกส reservoir หรือสัญญาณออก ดังนั้นผลของ servo ที่ควบคุม ความดันมาจากกระแสจากแหล่งกำเนิดไอออนทำให้สามารถควบคุมความดันใน accelerator ได้ โดยตรง

### 2.8.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบ pumped

เครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบนี้ มีส่วนที่เพิ่มขึ้นจากแบบsealed tubeคือ drift tube ซึ่งเป็นส่วน ที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศ อยู่ระหว่าง accelerating tube กับเป้า (target) ทำหน้าที่ดึงอากาศออกจาก accelerating tube เพื่อให้ความดันภายในเหลือประมาณ  $10^{-8}$  torr โดยใช้วิธีปั๊มอากาศออกเป็น ช่วงๆ ในช่วงแรกจะใช้ปั๊มแบบธรรมดาสูบล้ออากาศออกให้เหลือความดันประมาณ  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-2}$  torr แล้วจึงใช้ระบบ oil diffusion pumping หรือ ion pump เพื่อลดความดันให้เหลือ  $10^{-8}$  torr ซึ่งเป็น สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่อง เพราะจะมีสิ่งรบกวน ion beam ใน accelerator น้อย