



## ทฤษฎีการวิเคราะห์ทางนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์ทางแอกติเวชัน (activation analysis) เป็นการวิเคราะห์ธาตุ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในนิวเคลียส (nuclear transformation) เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของธาตุกับอนุภาคที่ยิง (bombard) เข้าไป ไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) ของธาตุที่เกิดขึ้น จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ซึ่งทำให้ทราบว่าเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใด และเมื่อนำปริมาณรังสีที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้จากสารมาตรฐาน ซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนของธาตุนั้น จะสามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่จะวิเคราะห์นั้นได้ อนุภาคที่จะใช้ยิงอะตอมของธาตุในการวิเคราะห์แบบแอกติเวชันมีอยู่หลายชนิด เช่น อนุภาคนิวตรอน อนุภาคโปรตอน อนุภาคอัลฟา อนุภาคควิที่รอน เป็นต้น

การวิเคราะห์ทางแอกติเวชัน ซึ่งใช้อนุภาคนิวตรอนยิงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุที่จะวิเคราะห์นั้น เรียกว่า การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis : NAA)

### 2.1 ทฤษฎีของนิวตรอนแอกติเวชัน (12, 13, 14)

#### 2.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (neutron sources)

แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนมีอยู่หลายอย่าง เช่น สารกัมมันตรังสีกำเนิดนิวตรอน (radioisotope neutron sources) เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerators) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactors) เป็นต้น

อนุภาคจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction) ของเชื้อเพลิงปรมาณูยูเรเนียม-235 ในการเกิดฟิชชันแต่

ละครั้ง จะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมา 2-3 อนุภาค และมีพลังงานเกิดขึ้นจำนวนมาก อนุภาคที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะมีพลังงานต่างๆกัน อาจจำแนกออกตามขนาดของพลังงานได้ ดังนี้

2.1.1.1 เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ พลังงานเฉลี่ย 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt, eV) วัสดุส่วนใหญ่จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron cross-section) สูง ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาแบบ (n,  $\phi$ )

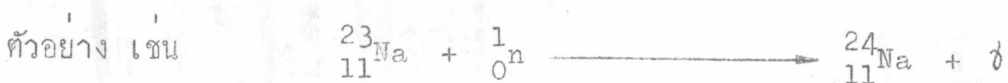
2.1.1.2 นิวตรอนเร็ว (fast neutron) เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (million electron volt, MeV) นิวตรอนเร็วนี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์หลายแบบ เช่น (n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n), (n, 3n) เป็นต้น

2.1.1.3 อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) เป็นอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานระหว่าง 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์

### 2.1.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอน

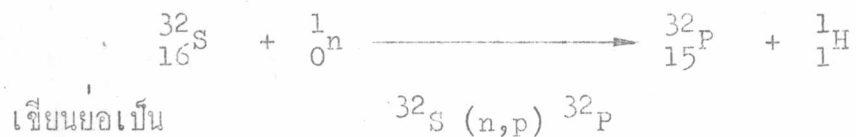
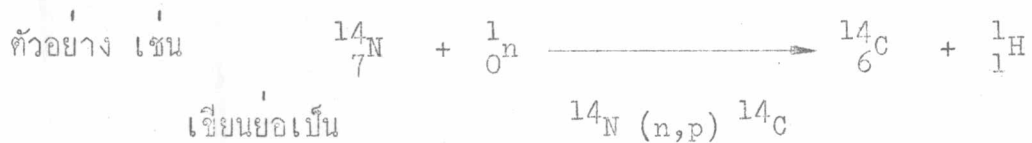
เมื่อยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันแล้วแตชนิดของนิวตรอน

2.1.2.1 ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา (n,  $\gamma$ ) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุเดิม พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา



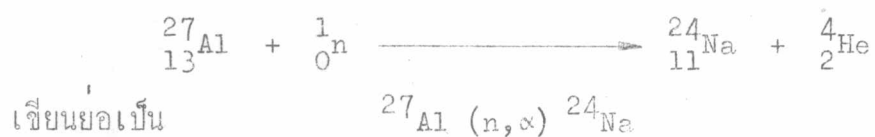
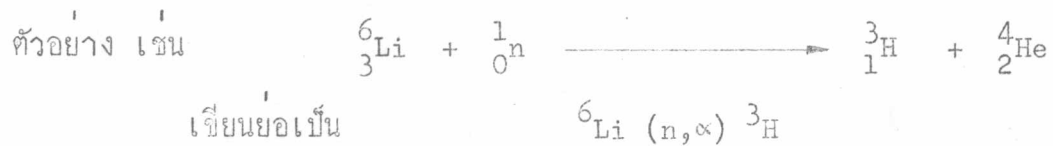
ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมานี้ เหมาะสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติ-  
เวชัน เนื่องจากกระทำได้ง่ายและสะดวก

2.1.2.2 ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน (n,p) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิง  
ยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุนั้น เปลี่ยน  
ไปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา



ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอนนี้ นิยมใช้ในการผลิตสารกัมมันตรังสีเนื่องจากไอโซโทป  
กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นนั้นเป็นธาตุใหม่ ซึ่งเป็นคนละชนิดกันกับธาตุเดิม เป็นการสะดวกที่จะแยก  
ไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นออกมาอย่างบริสุทธิ์

2.1.2.3 ปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา (n,α) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิง  
อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไป  
เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา



ปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟานี้ กระทำได้ยาก จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบ  
นิวตรอนแอกติเวชัน หรือในการผลิตสารกัมมันตรังสี

นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นๆอีก เช่น ปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน (n,2n)



ปฏิกิริยานิวตรอน-ฟิชชัน ( $n, f$ ) เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยานิวเคลียร์เหล่านี้ต้องใช้อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงมาก

### 2.1.3 การเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่อยิงอะตอมของธาตุเสถียรด้วยอนุภาคนิวตรอน อะตอมบางส่วน of ธาตุนั้นจะเปลี่ยนเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มของอนุภาคนิวตรอน (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron cross-section) ของธาตุนั้นและจำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยนิวตรอน ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี} \quad P = N\sigma\phi \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N$  = จำนวนอะตอมที่มีอยู่ทั้งหมดของไอโซโทปเสถียร  
 $\sigma$  = ความสามารถในการจับนิวตรอนของไอโซโทปเสถียร มีหน่วยเป็น บาร์น\*  
 $\phi$  = ความเข้มของนิวตรอน มีหน่วยเป็น นิวตรอน ต่อ ตร.ซม. ต่อ วินาที

ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะมีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลา อัตราของการสลายตัวนี้จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่

$$\text{อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี} \quad -\frac{dN^*}{dt} = \lambda N^* \quad (2.2)$$

เมื่อ  $N^*$  = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่  
 $\lambda$  = ค่าคงที่ในการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี (decay constant) มีค่าเท่ากับ  $0.693/t_{1/2}$   
 $t_{1/2}$  = ครึ่งชีวิต (half-life) คือ เวลาที่ไอโซโทปกัมมันตรังสีใช้สำหรับการสลายตัวจนเหลือปริมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณเมื่อเริ่มต้น

\*บาร์น (barn) เป็นหน่วยค่า activation cross-section ของธาตุในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

1 บาร์น เท่ากับ  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตร

ดังนั้น อัตราการเพิ่มพูนของไอโซโทปกัมมันตรังสี จะเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสีกับอัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^* \quad (2.3)$$

$$N^* = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) + N_0^* e^{-\lambda t_a}$$

เมื่อ  $N^*$  = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่ ที่เวลา  $t_a$  ใดๆ  
 $t_a$  = เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี (activation time)  
 $N_0^*$  = จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่เวลา  $t_a = 0$  ;  $N_0^* = 0$

$$N^* = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a})$$

$$\lambda N^* = P (1 - e^{-\lambda t_a}) \quad (2.4)$$

ให้  $A_0$  เป็น ความแรงแรงรังสี (activity) คือ อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อขณะที่สิ้นสุดการอาบรังสี มีหน่วยเป็น disintegration per second (dps.)

จากสมการ (2.2) นั่นคือ  $A_0 = - (dN^*/dt)_0 = \lambda N^*$

เมื่อแทนค่า P จากสมการ (2.1) ลงในสมการ (2.4) แล้ว จะได้ ค่าความแรงแรงรังสี  $A_0$

$$A_0 = N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t_a}) \quad (2.5)$$

เมื่อนำสารตัวอย่างเข้าอาบรังสี ไอโซโทปเสถียรของธาตุที่จะวิเคราะห์ในสารตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคนิวตรอน เกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี จำนวนอะตอมทั้งหมด (N) ของไอโซโทปเสถียรของธาตุที่จะวิเคราะห์ จะคำนวณได้ดังนี้

$$N = \frac{N_0 W f}{M} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $N_0$  = ค่าคงที่ของอวอกาโดร (Avogadro's number)

มีค่าเท่ากับ  $6.022 \times 10^{23}$  อะตอมต่อกรัมอะตอม

005630

$W$  = น้ำหนักทั้งหมดของธาตุที่จะวิเคราะห์ มีหน่วยเป็น กรัม

$f$  = สัดส่วนปริมาณของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ  
(fractional isotopic abundance)

$M$  = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

แทนค่า  $N$  ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$A_0 = \frac{N_0 W f \phi (1 - e^{-\lambda t_a})}{M} \quad (2.7)$$

$$\text{หรือ } W = \frac{M A_0}{N_0 f \phi (1 - e^{-\lambda t_a})} \quad (2.8)$$

ความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่เวลา  $t_w$  ใดๆ หลังจากสิ้นสุดการอว  
รังสีจะลดลงด้วยแฟกเตอร์  $e^{-\lambda t_w}$  ตามสมการ (2.2) ดังนั้น

$$\text{ความแรงรังสีที่เวลา } t_w \text{ ใดๆ} \quad A_{t_w} = A_0 e^{-\lambda t_w}$$

แทนค่า  $A_0$  จากสมการ (2.7) จะได้

$$A_{t_w} = \frac{N_0 W f \phi (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_w}}{M} \quad (2.9)$$

$$\text{หรือ } W = \frac{M A_{t_w} e^{\lambda t_w}}{N_0 f \phi (1 - e^{-\lambda t_a})} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $t_w$  = เวลาที่ปล่อยให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีสลายตัว (waiting time)

## 2.2 การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน (neutron activation analysis)

### 2.2.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

จากความแรงรังสีที่วัดได้ ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารตัว  
อย่างใด โดยอาศัยสมการ (2.10) แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าพารามิเตอร์บางตัวในสมการ

เป็นค่าที่ไม่อาจจะหาได้ถูกต้องแน่นอน เช่น ความเข้มของนิวตรอนระหว่างการอบรังสีอาจไม่คงที่ ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้อง เป็นต้น การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน จึงนิยมใช้การเปรียบเทียบระหว่างธาตุที่จะวิเคราะห์ในสารตัวอย่างกับในสารมาตรฐาน โดยนำสารมาตรฐานเข้าอบรังสีในเวลาและตำแหน่งเดียวกับสารตัวอย่าง แล้ววัดความแรงแรงรังสีเปรียบเทียบกัน

จากสมการ (2.10) จะได้ความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงแรงรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงแรงรังสีของสารมาตรฐาน}} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 เทคนิคการวิเคราะห์ทางนิวตรอนแอกติเวชัน

เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางนิวตรอนแอกติเวชัน มีอยู่ 2 วิธี คือ

#### 2.2.2.1 Instrumental neutron activation analysis (INAA)

เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสีเท่านั้น โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน และปล่อยให้ไว้ในช่วงเวลาที่เหมาะสมอันหนึ่ง แล้วทำการวัดความแรงแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง วิธีการนี้ จะไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่าง และลักษณะ (non-destructive) แต่การวัดปริมาณรังสีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมา (gamma-ray spectrometer) ตามขนาดของพลังงานต่างๆได้ รวมทั้งต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างมาก

#### 2.2.2.2 Radiochemical neutron activation analysis (RNAA)

เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องผ่านขบวนการทางเคมีเพื่อแยกเอาไอโซโทปกัมมันตรังสีที่จะวิเคราะห์ออกจากสารตัวอย่างภายหลังการอบรังสีเพื่อให้ปราศจากการรบกวนของไอโซโทปกัมมันตรังสีตัวอื่นที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างด้วย แล้วจึงทำการวัดความแรงแรงรังสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน วิธีการนี้จะทำให้สูญเสียรูปและลักษณะของสารตัวอย่างไป (destructive)

กรรมวิธีทางเคมีซึ่งนำมาใช้ในการแยกไอโซโทปกัมมันตรังสี มีต่างๆกัน เช่น การทำละลาย การสกัด การกลั่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

การนำสารตัวอย่างมาผ่านขบวนการแยกเอาธาตุที่จะวิเคราะห์ออกมาก่อนการอาบรังสีไม่เป็นที่ยอมรับเท่ากัน เพราะอาจจะมีการเปราะเปื้อนเกิดขึ้น วิธีการนี้จะกระทำต่อเมื่อมีความจำเป็นอย่างยิ่งเท่านั้น เช่น ธาตุที่จะวิเคราะห์ให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นมาก และมีการรบกวนอย่างมากจากไอโซโทปกัมมันตรังสีอื่นที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องแยกเอาไอโซโทปที่มารบกวนนั้นออกไป ก่อนที่จะนำสารตัวอย่างไปอาบรังสี เป็นต้น

### 2.2.3 ความไวของวิธีวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

ความไวของการวิเคราะห์ (sensitivity) ในที่นี้หมายถึง ความสามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งในปริมาณที่ต่ำสุดได้เพียงใด ภายใต้สภาวะที่กำหนดให้

ความไวของการวิเคราะห์นี้จะปรับปรุงให้สูงขึ้นได้ โดยการทำให้ค่าความแรงรังสีจำเพาะ (specific activity) คือ ความแรงรังสีต่อหน่วยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้น

$$\text{จากสมการ (2.7)} \quad A_0 = \frac{N_0 W f \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_a})}{M}$$

$$\text{จะได้} \quad A_0/W = \frac{N_0 f \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_a})}{M} \quad (2.12)$$

จะเห็นว่าความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีค่าสูงขึ้นได้ เมื่อ

- ความเข้มข้นของนิวตรอน ( $\phi$ ) มีค่าสูงขึ้น
- ความสามารถในการจับนิวตรอนของไอโซโทปเสถียร ( $\sigma$ ) สูงขึ้น
- สัดส่วนปริมาณของไอโซโทปเสถียรในธรรมชาติ ( $f$ ) สูงขึ้น
- น้ำหนักอะตอมของธาตุ ( $M$ ) ลดลง
- ครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสี ( $t_{1/2}$ ) ที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงเมื่อเวลาในการอาบรังสีคงที่
- เวลาในการอาบรังสี ( $t_a$ ) เพิ่มขึ้น

ความสามารถในการจับนิวตรอน สัดส่วนปริมาณของไอโซโทปในธรรมชาติ และ



น้ำหนักอะตอมของธาตุ เป็นค่าเฉพาะตัวของไอโซโทปหนึ่งๆ ค่าเหล่านี้จะแปรผันในช่วงกว้างมากสำหรับธาตุต่างชนิดกัน ทำให้ความไวของการวิเคราะห์ธาตุต่างชนิดกันไม่เท่ากัน ธาตุที่เป็น monoisotopic elements จะมีความไวในการวิเคราะห์สูงกว่าพวกธาตุที่เป็น multi-isotopic elements ธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อยจะมีความไวในการวิเคราะห์สูงกว่าธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมมาก เมื่อสภาวะอย่างอื่นเหมือนกัน

ความเข้มของนิวตรอนจะเพิ่มไค้สูงสุดเท่าที่แหล่งกำเนิดนิวตรอนนั้นจะให้ไค้ และถ้าเวลาที่ใช้ในการอบรังสีมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น หลายเท่าแล้ว จะทำให้แฟคเตอร์  $(1 - e^{-\lambda t_a})$  มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งจะเรียกว่า saturation factor ดังนี้

$$A_0 = \frac{N_0 W f \phi}{M} \quad (2.13)$$

ซึ่งในสภาวะนี้  $A_0$  จะมีค่าสูงสุด เมื่อค่าอื่นๆเป็นค่าคงที่สำหรับการวิเคราะห์นั้นๆ

จากสมการ (2.13) ความแรงรังสีจำเพาะ  $A_0/W$  จะมีค่าสูงเมื่อ  $A_0$  มีค่ามาก และ  $W$  มีค่าน้อย นั่นคือ การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจะมีความไวสูง สามารถจะวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณอยู่น้อยๆในสารตัวอย่างได้

นอกจากนี้ ความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ (efficiency) ของเครื่องมือนับรังสีด้วย ปกติเครื่องมือนับรังสีจะมีขีดความสามารถในการนับรังสีได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

$$\text{ประสิทธิภาพของเครื่องมือนับรังสี} = \frac{\text{ความแรงรังสีที่วัดได้}}{\text{ความแรงรังสีจริง}} \times 100 \%$$

ถ้าเครื่องมือมีประสิทธิภาพสูง ย่อมจะนับความแรงรังสีได้ใกล้เคียงกับความแรงรังสีจริง ซึ่งทำให้ความไวของการวิเคราะห์สูงขึ้น

#### 2.2.4 ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (detection limit)

ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ ในที่นี้หมายถึง ความเข้มข้นต่ำสุดของธาตุใดธาตุหนึ่งที่สามารถจะวิเคราะห์หาได้อย่างถูกต้อง

ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ทางนิวตรอนแอกติเวชัน จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ

- น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้
- เวลาที่ใช้ในการอบรังสี เมื่อความเข้มของนิวตรอนคงที่
- เวลาที่ใช้ในการนับรังสี เมื่อประสิทธิภาพของเครื่องมือคงที่

ค่าความเข้มชนอันหนึ่งอาจจะไม่สามารถวิเคราะห์ได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดภายใต้สภาวะอันหนึ่ง แต่จะวิเคราะห์ได้ในอีกสภาวะหนึ่งที่ต่างออกไป การแสดงค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์จึงต้องบ่งสภาวะที่ใช้อย่างชัดเจน การเพิ่มค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งหมด จะทำให้ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ลดลง ซึ่งหมายถึงความไวของการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นนั่นเอง

2.3 ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอกติเวชันมีข้อดีเด่นที่พอจะสรุปได้ ดังนี้

1. ความไวของการวิเคราะห์สูง สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยในระดับไมโครกรัมในตัวอย่างได้ดี ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว สามารถจะวิเคราะห์ธาตุบางตัวในปริมาณที่ต่ำถึงหนึ่งในล้านส่วนของไมโครกรัมได้ ถ้าปราศจากการรบกวนของไอโซโทปกัมมันตรังสีอื่นๆ

Guinn และ Hoste (13) ได้รายงานขีดต่ำสุดในการวิเคราะห์ธาตุ 68 ธาตุ เมื่อไม่มีสิ่งรบกวนโดย INAA ภายใต้สภาวะที่ใช้กันค่อนข้างมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

2. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องกังวลต่อข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากสิ่งเจือปนในระหว่างการปฏิบัติงานภายหลังจากการอบรังสีแล้ว เนื่องจากธาตุที่จะวิเคราะห์ได้กลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี ไม่ใช่ไอโซโทปเดิม ซึ่งมีความแตกต่างไปจากสิ่งเจือปนอื่นๆ

3. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถใช้กับธาตุที่มีปริมาณน้อยซึ่งไม่สามารถจะวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีธรรมดา (conventional chemical technique) เช่น การตกตะกอน เนื่องจากวิธีการทางนิวตรอนแอกติเวชันจะวัดเฉพาะปริมาณรังสีที่เกิดขึ้น ดังนั้น จึงสามารถจะเติมไอโซโทปเสถียรของธาตุลงไปเป็นตัวพา (carrier) เพื่อป้องกันการสูญหายของไอ-

โซโทปแกมมันตรังสี ทำให้สามารถปฏิบัติการวิเคราะห์ตามขั้นตอนของวิธีทางเคมีธรรมดาได้

4. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่จำเป็นต้องแยกเอาธาตุที่จะวิเคราะห์ ออกมาให้สมบูรณ์ เพียงแต่แยกออกให้บริสุทธิ์ และมีปริมาณมากพอที่จะวัดความแรงรังสีได้เท่านั้น เนื่องจากสามารถคำนวณหา chemical yield ของขบวนการแยกได้จากน้ำหนักของตัวพาที่เติมลงไป และ radioactive yield จะมีค่าเท่ากับ chemical yield จึงสามารถจะปรับค่า radioactive yield ให้เป็นร้อยละ 100 ได้

5. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) เนื่องจากแต่ละไอโซโทปแกมมันตรังสีจะมีคุณสมบัติทางนิวเคลียร์เฉพาะตัว คือ ครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และ พลังงานที่ปลดปล่อย ทำให้สามารถจะตรวจสอบได้ว่า ปริมาณรังสีที่วัดได้เป็นของธาตุที่จะวิเคราะห์หรือไม่

6. การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันโดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี (INAA) เป็นวิธีวิเคราะห์ซึ่งทำได้สะดวกและรวดเร็ว โดยไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่างและลักษณะ และถ้าเลือกสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ยังสามารถจะทำการวิเคราะห์ได้หลายธาตุในคราวเดียวกัน ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

#### 2.4 ข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

1. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง เนื่องจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนและเครื่องมือนับรังสีซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์แบบนี้ มีราคาแพงมาก
2. จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกัน และตรวจสอบรังสีชนิดต่างๆอย่างพร้อมมูล
3. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถจะระบุได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์นั้นอยู่ในรูปใด ผลการวิเคราะห์จะเป็นน้ำหนักทั้งหมด (total weight) ของธาตุนั้น
4. เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ธาตุในตารางธาตุได้ทุกธาตุ
5. ผู้ปฏิบัติงานจะต้องได้รับการฝึกอบรมในการปฏิบัติการ เกี่ยวกับรังสีเป็นอย่างดี



ตารางที่ 1 ขีดจำกัดต่ำสุดของธาตุบางธาตุซึ่งวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน\* (13)

ขีดจำกัดต่ำสุด (ไมโครกรัม)	ธาตุ
1-3 x 10 <sup>-7</sup>	In, Eu, Dy
4-9 x 10 <sup>-7</sup>	Ho
1-3 x 10 <sup>-6</sup>	Mn, Sm, Au
4-9 x 10 <sup>-6</sup>	Rh, Lu, Re, Ir
1-3 x 10 <sup>-5</sup>	Co, Cu, Ga, As, I, Cs, La, Er, W, Hg, U
4-9 x 10 <sup>-5</sup>	Na, V, Br, Ru, Pd, Sb, Yb, Th
1-3 x 10 <sup>-4</sup>	Sc, Ge, Sr, Te, Ba, Nd, Ta
4-9 x 10 <sup>-4</sup>	Cl, Se, Cd, Gd, Tb, Tm, Hf, Pt
1-3 x 10 <sup>-3</sup>	Al, Zn, Mo, Ag, Sn, Ce, Os
4-9 x 10 <sup>-3</sup>	K, Ti, Cr, Ni, Rb, Y, Pr
1-3 x 10 <sup>-2</sup>	Mg
4-9 x 10 <sup>-2</sup>	Zr
1-3 x 10 <sup>-1</sup>	F, Ca, Nb
4-9 x 10 <sup>-1</sup>	ไม่มีรายงานไว้
1-3	Fe
4-9	Si
10-30	S, Pb

\*สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ :-

- neutron flux ( $\phi$ ) : 10<sup>13</sup> n cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup>
- activation time ( $t_a$ ) : 5 h
- waiting time ( $t_w$ ) : 0
- counting time ( $t_c$ ) : 100 min max.
- detector : a 40 cm<sup>3</sup> Ge(Li) detector
- geometry : 2 cm above detector

## 2.5 ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

ข้อผิดพลาด (errors) ที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันจะมีแบบเฉพาะของตัวเอง ข้อผิดพลาดเหล่านี้สามารถจะหลีกเลี่ยงหรือลดให้น้อยลงได้เมื่อรู้สาเหตุ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบนี้อาจจะแบ่งตามการเกิดได้เป็น

### 2.5.1 ข้อผิดพลาดที่เกิดจากสารตัวอย่าง

1. การสุ่มตัวอย่าง (sampling) เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันมีความไวของการวิเคราะห์ที่สูง จึงใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย ถ้าสารตัวอย่างมีเนื้อสารที่แตกต่างกันและการคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันไม่ได้กระทำอย่างดีแล้ว ตัวอย่างที่สุ่มมาจะไม่ได้เป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมด ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดได้

2. การเตรียมสารตัวอย่าง (sample preparation) กรณีของสารตัวอย่างทางชีววิทยาที่ต้องทำให้แห้งหรือเผาให้เป็นเถ้าก่อนการอบรังสี อาจมีการสูญเสียธาตุที่ระเหยเป็นไอได้ ตัวอย่างบางชนิดต้องผ่านการบดให้ละเอียดและคลุกเคล้ากันให้ดี อาจจะมีการเปราะเปื้อนจากอุปกรณ์ที่ใช่และจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ นอกจากนี้ ถ้าภาชนะที่ใส่บรรจุสารตัวอย่างมีการเปราะเปื้อนย่อมทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดได้เช่นกัน การแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้จะกระทำได้ โดยการเตรียมสารตัวอย่างด้วยความระมัดระวังทุกขั้นตอน ภาชนะและอุปกรณ์ที่ใช่ต้องสะอาด เพื่อหลีกเลี่ยงการเปราะเปื้อนที่จะเกิดขึ้นก่อนการอบรังสีสารตัวอย่าง

### 2.5.2 ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการอบรังสี

1. ความเข้มของนิวตรอนไม่คงที่ (flux inhomogeneity) ความเข้มของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ตำแหน่งต่างๆกัน จะมีค่าไม่เท่ากัน การนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอบรังสีที่ตำแหน่งต่างกัน หรือในเวลาต่างกันแล้ว ปริมาณของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะมีข้อแตกต่างกันอยู่ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้ การแก้ไขจะกระทำได้โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอบรังสีพร้อมกันในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ในภาชนะสำหรับอบรังสี

ถ้าไม่สามารถจะจัดตำแหน่งดังกล่าวได้จะต้องมีการปรับค่าปริมาณรังสีของสารตัวอย่างกับของสารมาตรฐานให้อยู่ในความเข้มของนิวตรอนเดียวกันโดยใช้สารเปรียบเทียบ (comparator) เป็นหลัก

2. การกำบังตนเองขณะอาบรังสี (self-shielding) วัสดุบางชนิดมีความสามารถในการจับ (absorption cross-section) อนุภาคนิวตรอนได้ดี ถ้าสารตัวอย่างมีธาตุเหล่านี้อยู่มาก อนุภาคนิวตรอนจะไม่สามารถเข้าถึงบริเวณใจกลางของสารตัวอย่างนั้น ทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่จะวิเคราะห์เกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ ซึ่งทำให้เกิดข้อผิดพลาดในผลการวิเคราะห์ได้

สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่มีสถานะแตกต่างกันจะมีการกำบังตนเองต่างกันแม้ว่าจะได้นำเข้าอาบรังสีพร้อมกันก็ตาม ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดไปได้ การแก้ไขจะทำให้ได้โดยการเตรียมสารมาตรฐานให้มีการกระจายของธาตุ ลักษณะและเนื้อสาร (matrix) ตลอดจนความเข้มข้นของธาตุอยู่ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับสารตัวอย่างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับการกำบังตนเอง

3. ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน (interfering nuclear reactions) ข้อผิดพลาดนี้เกิดขึ้นได้จากสาเหตุ 2 ประการ คือ มีธาตุใกล้เคียงกับธาตุที่จะวิเคราะห์ (ทั้งอะตอมมิกนัมเบอร์และแมสนัมเบอร์) อยู่ในสารตัวอย่างด้วย และประการที่สอง พลังงานของนิวตรอนในตำแหน่งที่นำสารเข้าอาบรังสีมีค่าแตกต่างกันหลายค่า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่น นอกเหนือจากปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมาที่ต้องการ เช่น เกิดปฏิกิริยา  $(n,p)$  หรือ  $(n,\alpha)$  เป็นต้น การแก้ไขปัญหานี้จะกระทำได้โดยเลือกตำแหน่งที่จะนำสารเข้าอาบรังสีให้มีนิวตรอนพลังงานเดียวกัน เช่น นำสารเข้าอาบรังสีในเทอร์มัลคอลัมน์ (thermal column) ซึ่งจัดให้มีเฉพาะเทอร์มัลนิวตรอน เป็นต้น

### 2.5.3 ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการนับรังสี

1. ลักษณะ รูปร่าง และ ขนาด ของสารตัวอย่าง ในการนำเข้านับรังสี (geometry of counting system) สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่จะนำเข้านับรังสีจะต้องมี geometry เหมือนกัน ภาชนะสำหรับใส่สารในการนับรังสีที่ไม่เหมือนกันจะทำให้

มี scattering และ absorption ไม่เหมือนกัน เป็นผลให้เกิดข้อผิดพลาดในการนับรังสีอย่างหนึ่ง สารตัวอย่างและสารมาตรฐานซึ่งมีสถานะต่างกัน หรือมีคุณสมบัติและลักษณะของเนื้อสารไม่เหมือนกัน รวมทั้งรูปร่าง หรือปริมาณที่ใช้ไม่เท่ากัน จะทำให้เกิด matrix effect ที่ต่างกัน เช่น มี self-absorption ในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไม่เหมือนกัน เป็นต้น นอกจากนี้ การนับรังสีโดยวางสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ตำแหน่งบนหัววัดรังสีต่างกัน หรือระยะที่ห่างจากหัววัดไม่เท่ากันตลอดจนการใช้หัววัดรังสีต่างชนิดกันจะทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดได้ทั้งสิ้น การแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้จะกระทำได้โดยจัดให้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่จะนำเข้านับรังสีอยู่ในลักษณะเดียวกันให้มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ ทั้งชนิดและขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุสาร สถานะและรูปร่าง ปริมาณ พื้นที่ผิวหน้าตลอดจนลักษณะและคุณสมบัติของเนื้อสาร รวมทั้งการจัดวางสารบนหัววัดในลักษณะและตำแหน่งเดียวกัน

2. เวลาที่ใช้นับรังสี (counting time) การนับรังสีสารตัวอย่างในช่วงเวลาสั้น จำนวนนับ (counts) ที่ได้จะมีค่าน้อย เป็นผลให้มี statistical error ในการนับมาก ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการนับรังสีจะต้องมากพอเพื่อให้จำนวนนับที่ได้มีค่ามากเป็นการลด statistical error ที่เกิดจากการนับรังสีลง

นอกจากนี้ การนับรังสีของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ไม่สามารถจะกระทำในเวลาพร้อมกันได้ กรณีที่ไอโซโทปกัมมันตรังสีมีครึ่งชีวิตค่อนข้างสั้น จะเป็นผลให้ปริมาณรังสีของสารที่ทำกาการนับทีหลังมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดถ้านำปริมาณรังสีนั้นมาเปรียบเทียบกัน การแก้ไขจะทำได้โดยการปรับค่าปริมาณรังสีให้อยู่ในเวลาเริ่มนับรังสีพร้อมกัน แล้วจึงนำปริมาณรังสีที่ปรับค่าแล้วมาเปรียบเทียบกัน

3. ประสิทธิภาพของเครื่องมือ (efficiency of detector) การทำงานของเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบใช้ในการนับรังสีอาจมีการผันแปรไปบ้าง ตามสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น ยังผลให้ประสิทธิภาพในการวัดรังสีมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดได้