บทที่ 2

ทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของนิวตรอนแอคติเวชัน

2.1.1 การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis)

การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันถูกนำมาใช้กันมากในการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง การวิเคราะห์ธาตุวิธีนี้ทำได้โดยการยิงธาตุด้วยนิวตรอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของธาตุนั้นๆ เกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี(radioisotope) ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ ครึ่งชีวิต ชนิดรังสี และพลังงานที่ปล่อยออกมา เหล่านี้ทำให้รู้ได้ว่าเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใด โดยอัตราการเกิดสารกัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุที่นำไปอาบรังสี คุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุนั้น เช่น ความสามารถในการจับนิวตรอน ระยะเวลาที่ใช้ในการอาบรังสี และปริมาณนิวตรอนที่ใช้อาบธาตุนั้น (John J. Fardy,1986)

2.1.2 หลักการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันมีอยู่ 2 แบบคือ

2.1.2.1 การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง(Non-Destructive Neutron Activation Analysis) หรือเรียกว่า Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) เป็นการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกัน วัดรังสีแกมมาจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเปรียบเทียบกันโดยตรง แล้วคำนวณหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน

2.1.2.2 การวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่าง(Destructive Neutron Activation Analysis) วิธีนี้มีความยุ่งยากกว่าแบบ INAA ในการวิเคราะห์ต้องนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปผ่านกระบวนการทางเคมีก่อนการอาบรังสีนิวตรอน เรียกว่า Chemical Neutron Activation Analysis (CNAA) หรือหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน เรียกว่า Radiochemical Neutron Activation Analysis (RNAA) ทั้งนี้เพื่อให้ปราศจากการรบกวนจากสารกัมมันตรังสีอื่นในสารตัวอย่างนั้น จากนั้นจึงสามารถวัดความแรงรังสีของสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐานได้ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบนี้เช่น การตกตะกอน การทำละลาย การสกัด การกลั่นและการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน มีขั้นตอนในการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 2.1

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Sources)

2.1.3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactors)

อนุภาคนิวตรอนที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว(fission reaction) ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เช่น ยูเรเนียม - 235 ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมา นิวตรอนที่ได้มีพลังงานต่างๆกันตามแหล่งกำเนิดในเครื่องปฏิกรณ์ นิวตรอนที่เกิดขึ้นนี้จะแบ่งตามกลุ่มของพลังงานได้ดังนี้

นิวตรอนพลังงานสูง	มีพลังงาน	มากกว่า 10 MeV
นิวตรอนเร็ว (fast neutrons)	มีพลังงาน	0.01 - 10 MeV
นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutrons) แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ		
- อิพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutrons)	มีพลังงาน	1 eV – 1 KeV
- เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutrons)	มีพลังงาน	ประมาณ 0.025 ev
นิวตรอนช้า(slow neutrons)	มีพลังงาน	0.03 – 1 eV

2.1.3.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerators)

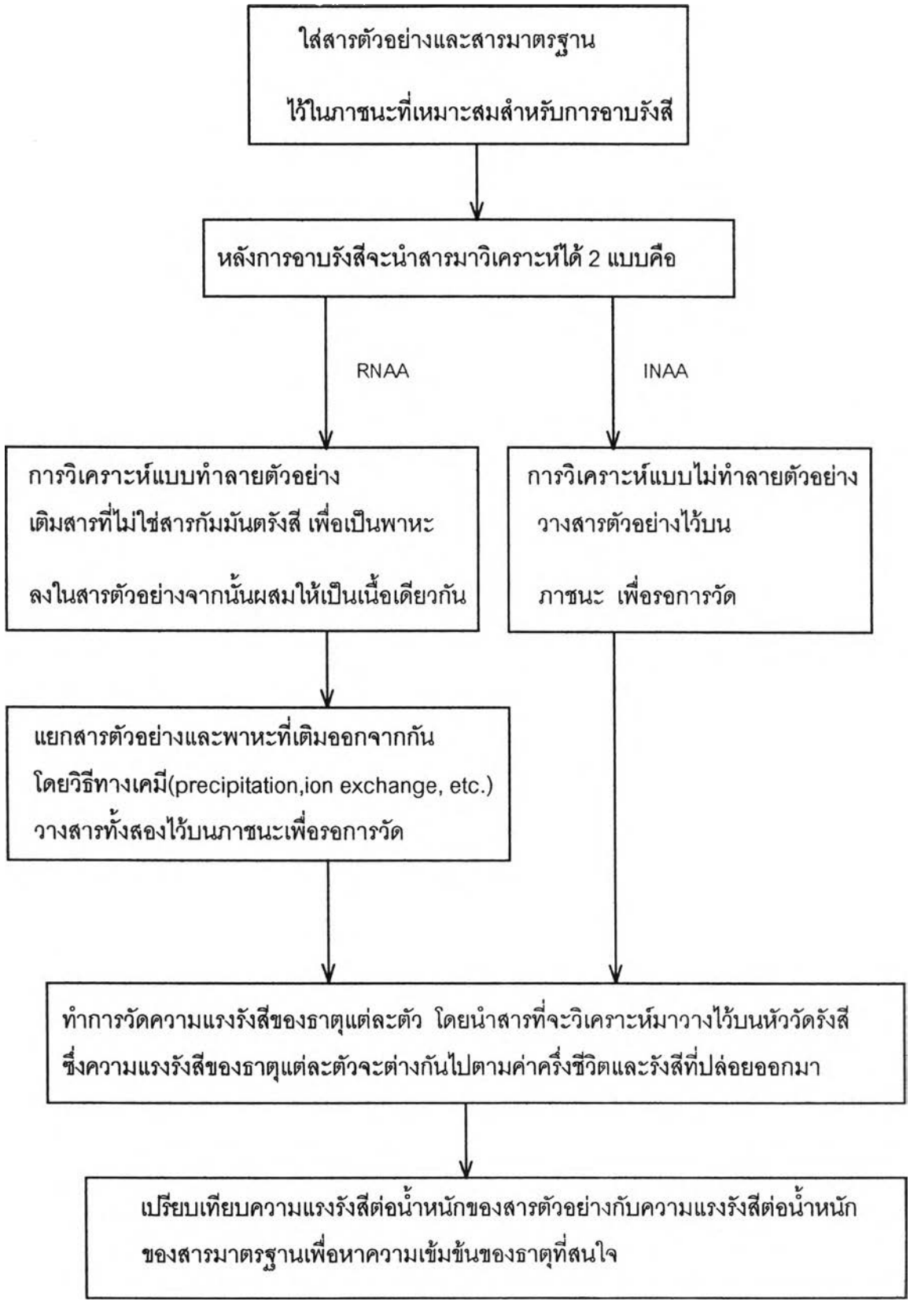
เครื่องเร่งอนุภาคนี้ใช้สำหรับเร่งอนุภาค(โปรตอน, อัลฟา, ดิวทีเรียม และทริเตียม) ให้มีพลังงานสูงขึ้น จากนั้นจึงใช้อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้ยิงเป้า(target) ก็จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้นิวตรอนออกมา เช่น ปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$H^2(d,n)\,He^3$$

$$H^3(d,n)\,He^4$$

$$Li^7(p,n)\,Be^7$$

$$Be^9(d,n)\,B^{10}$$



รูปที่ 2.1 แผนผังวิธีดำเนินการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

2.1.3.3 แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic Neutron Sources)

นิวตรอนสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์คือ แกมมา - นิวตรอน (γ,n) หรืออัลฟา - นิวตรอน (α,n) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับธาตุเบาเช่น เบริเรียม หรือแหล่งกำเนิดชนิดที่ให้นิวตรอนออกมาโดยการแตกตัวด้วยตัวเอง (spontaneous fission) เช่น Cf - 252 จะให้นิวตรอนออกมาประมาณ 3.5 ตัวต่อการเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง

2.1.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอน

ปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ จะเกิดขึ้นต่างกันไปขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนที่ใช้ยิงธาตุนั้นๆ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอนอาจเกิดได้หลายแบบด้วยกัน

2.1.4.1 ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา (n,γ) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุเดิม พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมานี้เหมาะสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน เพราะสามารถกระทำได้ง่ายและสะดวก

ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา เช่น

$$^{75}As + {}^{1}n \longrightarrow {}^{76}As + \gamma$$

หรือเขียนย่อได้เป็น $^{75}As(n,\gamma)^{76}As$

และ $$^{23}Na + {}^{1}n \longrightarrow {}^{24}Na + \gamma$$

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

2.1.4.2 ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน (n,p) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่พลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุนั้นกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา การเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่หลังจากเกิดอันตรกิริยานี้ทำให้เป็นการสะดวกที่จะแยกไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นออกมาอย่างบริสุทธิ์ ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน เช่น

$$^{14}N + {}^{1}n \longrightarrow {}^{14}C + {}^{1}H$$

หรือเขียนย่อได้เป็น $^{14}N(n,p)^{14}C$

และ $^{32}S + {}^{1}n \longrightarrow {}^{32}P + {}^{1}H$

หรือเขียนย่อได้เป็น $^{32}S(n,p)^{32}P$

2.1.4.3 ปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา(n,α) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่พลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมของธาตุนั้นกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยรังสีอัลฟาออกมา ปฏิกิริยานี้กระทำได้ยากจึงไม่นิยมใช้ในการวิเคราะห์นิวตรอนแอคติเวชัน ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา เช่น

$$^{27}Al + {}^{1}n \longrightarrow {}^{24}Na + {}^{4}He$$

หรือเขียนย่อได้เป็น $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$

และ $^{19}F + {}^{1}n \longrightarrow {}^{16}N + {}^{4}He$

หรือเขียนย่อได้เป็น $^{19}F(n,\alpha)^{16}N$

นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากนิวตรอนอื่นๆอีก เช่น ปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน (n,n)หรือ(n,2n) และปฏิกิริยานิวตรอน-ฟิสชัน (n,f) ปฏิกิริยาเหล่านี้จะใช้อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงทั้งสิ้น

2.1.5 การเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี

เมื่ออะตอมของธาตุที่เสถียรถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน ก็จะมีอะตอมของธาตุบางส่วนกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี โดยที่อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสีนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของอนุภาคนิวตรอน(neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน(neutron cross-section)ของธาตุนั้น และจำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน ซึ่งอัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสีสามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$P = N\sigma\phi \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ P คือ อัตราการเกิดของเรดิโอไอโซโทป

N คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปเสถียรของธาตุที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

σ คือ ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ (cross - section) มีหน่วยเป็นบาร์น (bam) (1 bam = 10^{-24} ตร.ซม.)

ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็น นิวตรอน ต่อ ตร.ซม. ต่อ วินาที

และ
$$N = \frac{N_0 WK}{M} \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ N_0 คือ Avogadro's number = 6.02×10^{23} โมเลกุลต่อกรัมต่อโมล

W คือ น้ำหนักของธาตุทั้งหมดเป็นกรัม

K คือ สัดส่วนของไอโซโทปเสถียรที่มีอยู่ในธรรมชาติ

M คือ น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้นๆ

เมื่อเรดิโอไอโซโทปเกิดขึ้นด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ เรดิโอไอโซโทปนั้นก็จะมีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลาด้วย ดังนั้นอัตราการเพิ่มของไอโซโทปรังสี(dN^*/dt)จะเท่ากับผลต่างของอัตราการเกิด ($N\sigma\phi$) และอัตราการสลายตัวของไอโซโทปรังสี(λN^*) ดังสมการ

$$dN^*/dt = N\sigma\phi - \lambda N^* \qquad (2\text{-}3)$$

เมื่อ N^* คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี

λ คือ ค่าคงตัวในการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทป (decay constant) ซึ่งเท่ากับ $0.693/T_{1/2}$

$T_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิตของเรดิโอไอโซโทป (half - life)

t คือ ระยะเวลาที่นำสารเข้าอาบรังสีนิวตรอน

จากสมการที่(2-3) ความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่ เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา t คือ

$$\lambda N_t^{\cdot} = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t}) + N_0^{\cdot} e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}4)$$

และที่ $t = 0,\ N_0^{\cdot} = 0$ จะได้

$$\lambda N_t^{\cdot} = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t}) \qquad (2\text{-}5)$$

จากสมการที่ (2-1) $P = N\sigma\phi$ สามารถเขียนความแรงรังสีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\lambda N^{\cdot} = P(1 - e^{-\lambda t}) \qquad (2\text{-}6)$$

หลังจากอาบรังสีแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา T ความแรงรังสี (A_T) ที่เกิดขึ้นคือ

$$A_T = \lambda N = P(1 - e^{-\lambda t})\ .e^{-\lambda T} \qquad (2\text{-}7)$$

จากสมการที่ (2-1), (2-2) และ (2-7) จะได้ความแรงของโอไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นหลังจากอาบนิวตรอนแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา T ดังนี้

$$A = \frac{N_0 WK\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})\ .e^{-\lambda T}}{M} \qquad (2\text{-}8)$$

หรือ

$$W = \frac{AM\ .\ e^{\lambda T}}{N_0 K\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})} \qquad (2\text{-}9)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อรู้ความแรงรังสีที่เกิดขึ้น ก็สามารถคำนวณหาปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ แต่ในความเป็นจริงความเข้มของนิวตรอนในระหว่างการอาบรังสีมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ และความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้อง ฉะนั้นในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันจึงต้องใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างสารตัวอย่างและสาร

มาตรฐาน โดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนในตำแหน่งและเวลาเดียวกัน แล้ววัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกัน ดังสมการความสัมพันธ์นี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน}} \qquad (2\text{-}10)$$

2.1.6 ความไวของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

ความไวของการวิเคราะห์ หมายถึงความสามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งในปริมาณต่ำสุดได้ ภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งความไวในการวิเคราะห์นี้จะปรับให้สูงขึ้นได้ โดยทำให้ค่าความแรงรังสีต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาสมการที่(2-8) เมื่อ T = 0 จะได้

$$A = \frac{N_0 WK\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})}{M}$$

$$A/W = \frac{N_0 K\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})}{M} \qquad (2\text{-}11)$$

จากสมการ(2-11) จะเห็นว่าความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสีมีค่าสูงขึ้น เมื่อน้ำหนักอะตอมของธาตุ(M)มีค่าลดลง และความเข้มของนิวตรอน(ϕ) ความสามารถในการจับนิวตรอนของไอโซโทปเสถียร(σ) สัดส่วนปริมาณของไอโซโทปเสถียรในธรรมชาติ(K) และเวลาในการอาบรังสีนิวตรอน(t) มีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอนมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นหลายๆเท่า ค่าของ($1 - e^{-\lambda t}$) จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งเรียกกันว่า saturation factor จะได้ความแรงรังสีของไอโซโทปกัมมันตรังสีดังนี้

$$A = \frac{N_0 WK\sigma\phi}{M} \qquad (2\text{-}12)$$

ความไวของการวิเคราะห์จะสูงขึ้นเมื่อความแรงรังสีจำเพาะ(A/W) มีค่าสูงขึ้น นั่นคือ ค่าA มีค่ามาก ค่า W มีค่าน้อย จึงสามารถวิเคราะห์หาธาตุที่มีปริมาณน้อยๆในสารตัวอย่างได้ ส่วนความสามารถในการจับนิวตรอน สัดส่วนปริมาณไอโซโทปเสถียรในธรรมชาติ และน้ำหนักอะตอม เป็นค่าเฉพาะตัวของไอโซโทปนั้นๆ ซึ่งทำให้ความไวในการวิเคราะห์ธาตุต่างชนิดกันไม่เท่ากัน

นอกจากนี้ ความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีด้วย ถ้าเครื่องมือนับรังสีมีประสิทธิภาพสูง จะทำให้ความไวในการวิเคราะห์สูงขึ้นด้วย

2.1.7 ขีดจำกัดในการวิเคราะห์

ขีดจำกัดในการวิเคราะห์หมายถึง ความเข้มข้นต่ำสุดของธาตุใดธาตุหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง โดยที่ขีดจำกัดของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน จะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน และเวลาที่ใช้ในการนับรังสี เมื่อความเข้มของนิวตรอน และประสิทธิภาพของเครื่องมือนับรังสีคงที่

การแสดงค่าขีดจำกัดในการวิเคราะห์จะต้องระบุสภาวะที่ใช้อย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งหรือทั้งหมด จะทำให้ขีดจำกัดในการวิเคราะห์ลดลง นั่นหมายถึงความไวในการวิเคราะห์จะเพิ่มขึ้น

2.1.8 ข้อดี ข้อเสีย และข้อผิดพลาดของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

2.1.8.1 ข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

ความไวของการวิเคราะห์สูง ความไวในการวิเคราะห์นี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ความเข้มข้นของอนุภาคนิวตรอน ความสามารถในการจับนิวตรอน ปริมาณของธาตุนั้นในธรรมชาติและประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี ถ้าสิ่งเหล่านี้มีปริมาณสูงทำให้ความไวในการวิเคราะห์สูงนั่นหมายถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยเป็นไมโครกรัมได้ดี โดยรายงานค่าต่ำสุดของการตรวจวิเคราะห์ธาตุบางชนิด โดยนิวตรอนแอคติเวชันแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมากซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีธรรมดาได้เพราะวิธีนี้วัดเฉพาะปริมาณรังสีที่เกิดขึ้น ทั้งนี้อาจมีการใช้กรรมวิธีทางเคมีเข้าช่วยในการวิเคราะห์แบบ RNAA

ไม่จำเป็นต้องแยกธาตุที่จะวิเคราะห์ออกมาอย่างสมบูรณ์ เพียงแต่แยกออกมาให้บริสุทธิ์ และมากพอเท่านั้น

ไม่ต้องกังวลกับข้อผิดพลาดที่อาจเกิดจากสิ่งเจือปน เนื่องจากธาตุที่ต้องการจะกลายเป็นสารกัมมันตรังสีที่ปล่อยพลังงานเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดหลังการอาบนิวตรอน

สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพ(Qualitative) และเชิงปริมาณ(Quantitative)ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่สูญเสียสารตัวอย่าง

ตารางที่ 2.1 ขีดต่ำสุดของการตรวจวิเคราะห์ของธาตุบางชนิดโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (Guinn,ค.ศ.1980อ้างถึงในอัจฉรา,พ.ศ.2523)

ขีดจำกัดต่ำสุด(ส่วนในล้านส่วน)	ธาตุ
0.009	Mn, In
0.003	Co, Ir
0.009	Br, Au
0.03	V, Cu, As, Ag, I, W
0.09	Na, Sr, Sb, Cs, La, U
0.3	Al, Cl, K, Sc, Hg
0.9	Si, Ni, Rb, Cd, Ba, Pt
3.0	P, Zn, Mo, Sn
9.0	Mg, Ca, Bi
30.0	Cr, Zr
900.0	Fe

หมายเหตุ ความเข้ม นิวตรอน 10^{13} นิวตรอนต่อตร.ซม.ต่อวินาทีเวลาอาบรังสี 1 ชั่วโมง

2.1.8.2 ข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน

ใช้เงินลงทุนสูง เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงและต้องมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนซึ่งมีราคาแพง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกัน และตรวจสอบรังสีชนิดต่างๆ และไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทุกธาตุในตารางธาตุ

2.1.8.3 ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชัน อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

การเตรียมสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ในบางครั้งอาจต้องมีการเผาหรือทำให้แห้งก่อนนำไปอาบรังสี ซึ่งทำให้มีการสูญเสียธาตุที่สามารถระเหยเป็นไอได้ หรือบางครั้งต้องผ่านการบดให้ละเอียด คลุกเคล้าให้เข้ากันจึงมีโอกาสเปรอะเปื้อนสารปนเปื้อนบางอย่างจากภาชนะและฝุ่นละออง ซึ่งอาจทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คาดเคลื่อนได้

การนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปอาบรังสีโดยได้รับปริมาณนิวตรอนไม่เท่ากัน เนื่องจากความเข้มของนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน อาจแก้ไขโดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีพร้อมกันและใกล้กันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้รับปริมาณนิวตรอนใกล้เคียงกัน

การสุ่มตัวอย่างก่อนนำไปอาบรังสีต้องใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อย จึงต้องมีการคลุกเคล้าเพื่อให้สารตัวอย่างที่ได้เป็นตัวแทนของทั้งหมด แต่การคลุกเคล้าที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้

การกำบังตนเองขณะอาบรังสี เป็นเพราะธาตุบางธาตุมีความสามารถในการจับนิวตรอนได้ดี ถ้าธาตุเหล่านี้มีมากจะทำให้นิวตรอนไม่สามารถเข้าถึงบริเวณใจกลางของสารตัวอย่างได้ทำให้เกิดสารกัมมันตรังสีได้ไม่ดีนัก เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้

การรบกวนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์อื่นๆ เช่น ในการนำสารตัวอย่างเข้าวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ต้องการ อาจมีธาตุอื่นทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบนิวตรอน-แกมมา(n,γ) แล้วให้พีคพลังงาน(peak energy) ของธาตุทั้งสองนี้ใกล้เคียงกันมาก ข้อผิดพลาดนี้แก้ไขโดยใช้เครื่องวัดรังสีที่มีความสามารถในการแยกพลังงาน(Energy Resolution) สูง หรืออาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบนิวตรอน-โปรตอน(n,p)และ/หรือนิวตรอน-อัลฟา(n,α)ร่วมด้วย เนื่องจากในการนำสารเข้าอาบรังสีนิวตรอนในแต่ละครั้งมีนิวตรอนที่มีพลังงานต่างๆกันปนอยู่ อาจแก้ไขโดยใช้ปลอกหุ้มสารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ทำด้วยสารพิเศษเช่นแคดเมียม เพื่อป้องกันนิวตรอนช้า(slow neutron) หรือนำสารเข้าอาบรังสีนิวตรอนในตำแหน่งที่มีเฉพาะเทอร์มัลนิวตรอน เช่น อาบในเทอร์มัลคอลัมน์(thermal columm)

การใช้วิธีวิเคราะห์แบบที่ต้องใช้วิธีทางเคมีอาจมีข้อผิดพลาดจากการเปรอะเปื้อนของสารรังสีอื่น การดูดซับ(adsorption)ที่ผิวของภาชนะบรรจุสาร และการเทสารออกจากภาชนะไม่หมด

การปฏิบัติงานอื่นๆเช่น การวัดปริมาตร การชั่งสาร และความบกพร่องของผู้ปฏิบัติงาน

การปฏิบัติงานอื่นๆเช่น การวัดปริมาตร การชั่งสาร และความบกพร่องของผู้ปฏิบัติงาน

2.1.9 การวิเคราะห์รังสีแกมมา (Gamma – Ray Spectrometry)

สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันคือการปรับปรุงหัววัดรังสีแกมมาให้มีประสิทธิภาพในการแยกพีคพลังงาน(energy peak)ของรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาจากการสลายตัวของไอโซโทปรังสีได้ดีและเหมาะสม หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำเป็นหัววัดที่นิยมใช้กันมากชนิดหนึ่ง ซึ่งหัววัดแต่ละชนิดมีความสามารถในการแยกพีคพลังงานต่างกันเช่น หัววัดเจอร์เมเนียม(ลิเทียม)สามารถแยกรังสีแกมมา 2 พลังงานที่แตกต่างกัน 3 – 6 keV ส่วนหัววัดแบบโซเดียม-ไอโอไดด์ สามารถแยกรังสีแกมมา 2 พลังงานที่แตกต่างกัน 130 – 150 keV หัววัดแบบเจอร์เมเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง(high purity germanium) มีสิ่งเจือปนอยู่ประมาณ 1 ใน 10^{12} อะตอมของธาตุเจอร์เมเนียม หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหัววัดรังสีแบบ hyperpure Ge (HPGe) ซึ่งมีความสามารถในการวัดรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานตั้งแต่ 3 keV ถึง 10 MeV ภายในผลึกเจอร์เมเนียมจะแบ่งสารกึ่งตัวนำเป็น p-type และ n-type เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปยังผลึกเจอร์เมเนียมเกิดอันตรกิริยาอันเนื่องมาจากการถ่ายเทพลังงานของรังสีแกมมา เกิดอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยที่อิเล็กตรอน – โฮล 1 คู่ใช้พลังงาน 2.96 eV ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอน – โฮลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Q_0 = E.e / \varepsilon \qquad (2\text{-}13)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา(MeV)

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

ε คือ พลังงานที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอน – โฮล 1 คู่ = 2.96 eV

ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี สามารถหาได้จากสมการ

$$Eff = [cps/(dpsxf)] \times 100 \quad (2\text{-}14)$$

โดยที่ Eff คือ ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (เปอร์เซ็นต์)

cps คือ อัตรานับ (จำนวนนับต่อวินาที)

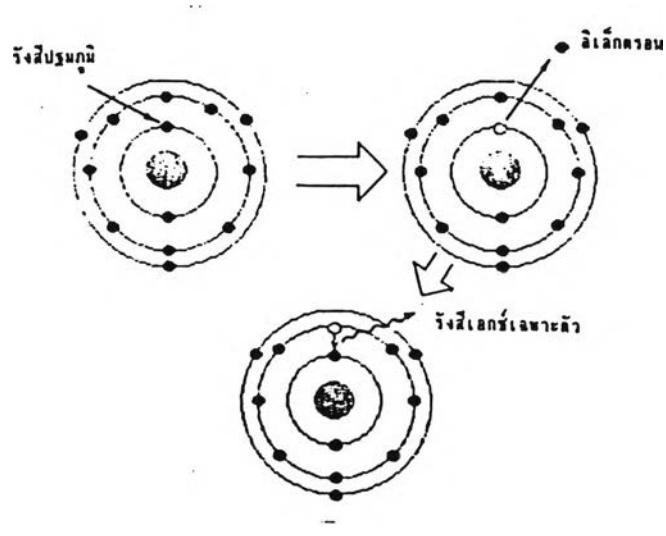
dps คือ ความแรงรังสี

f คือ สัดส่วนของการสลายตัวแล้วให้รังสีที่ทำการวัด

2.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์(X-ray fluorescence technique)

2.2.1 หลักการของวิธีเรืองรังสีเอกซ์

หลักการของวิธีเรืองรังสีเอกซ์ คือ ทำให้อิเลคตรอนในวงโคจร (shell) ชั้นในๆ (ชั้น K หรือชั้น L) เกิดอิออนไนเซชัน (ionization) หลุดออกจากอะตอม โดยการยิงรังสีปฐมภูมิ (primary radiation) เข้าไป ก็จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเลคตรอนจากวงโคจรชั้นนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้าไปแทนที่ว่างนั้น พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า "รังสีเอกซ์เรือง (fluorescent x-ray)" และเรียกกระบวนการนี้ว่า "การเรืองรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence)" ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ ในการวิเคราะห์คุณภาพและปริมาณของธาตุด้วยวิธีนี้ วิเคราะห์ได้โดยการวัดพลังงานและความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองนั่นเอง

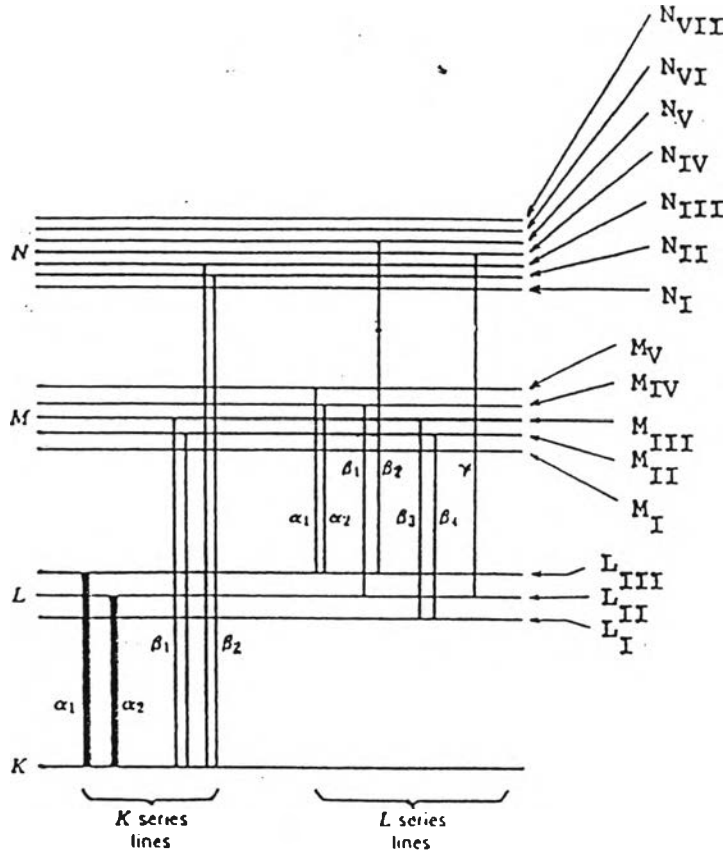


รูปที่ 2.2 การกำเนิดรังสีเอกซ์เรือง(เสมา สอนประสม,2533)

พลังงานรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของอิเลคตรอนในวงโคจรชั้นนอกที่เข้าไปแทนที่ กับระดับพลังงานของอิเลคตรอนชั้นในที่เกิดที่ว่าง ถ้าพลังงานของอิเลคตรอนในวงโคจร L มีค่าเท่ากับ E_L พลังงานของอิเลคตรอนในวงโคจร K มีค่าเท่ากับ E_K และ E แทนระดับพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น ก็สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E = E_L - E_K$$

เนื่องจากวงโคจรของอิเลคตรอน (electron shell) ยังแบ่งออกเป็นวงโคจรย่อย (subshell) อีก ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ (2n-1) subshell (เมื่อ n คือ principal quantum number) คือ วงโคจรชั้น K, L, M และ N,...มีจำนวนวงโคจรย่อยเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7,...วงโคจรย่อย ตามลำดับ ดังนั้นการแทนที่ของอิเลคตรอนที่หลุดออกมาจากวงโคจรวงในจึงทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้หลายพลังงานแล้วแต่ว่าเกิดจากการแทนที่ระหว่างอิเลคตรอนในวงโคจรหรือวงโคจรย่อยใด ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการแทนที่ของอิเลคตรอนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (นเรศร์ จันทน์ขาว,2525)

2.2.2 ระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ แบ่งได้เป็น 2 ระบบใหญ่ ได้แก่

2.2.2.1 ระบบ EDX (Energy Dispersive X-ray Fluorescence) หรือ non-dispersion เป็นระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรืองที่ส่งออกมาจากตัวอย่างโดยตรง หลังจากถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมของอิเลคตรอน ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ

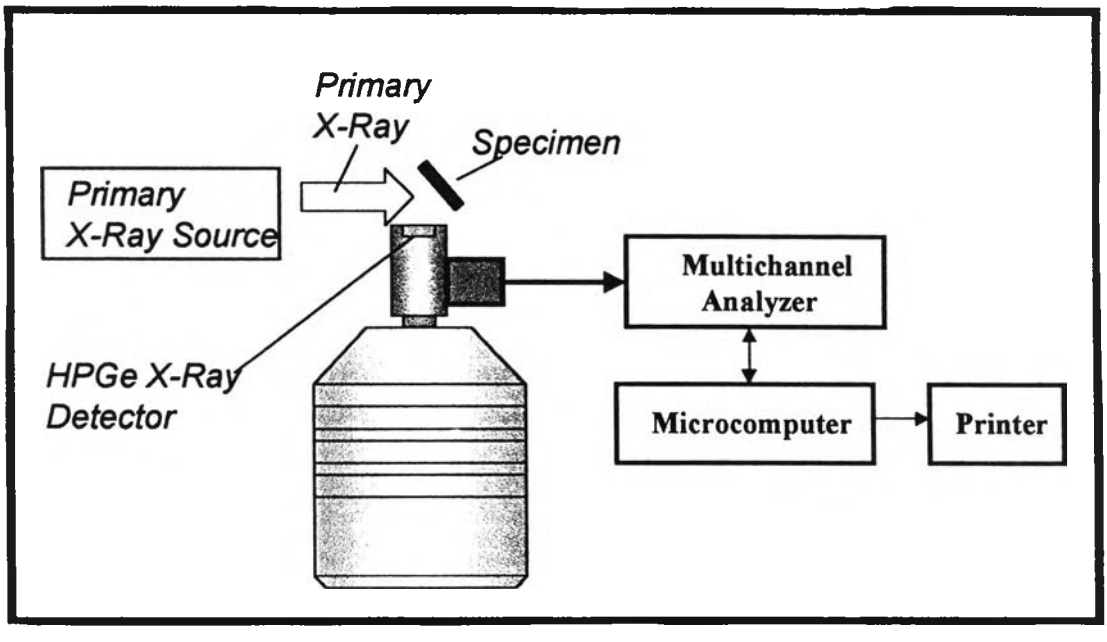
ก. หัววัดรังสีเอกซ์(x-ray detector) ที่ใช้กันมี 3 ชนิด คือ หัววัดชนิดเรืองรังสี (scintillation detector)ได้แก่หัววัด NaI(Tl)แบบบาง หัววัดชนิดพรอพอชั่นแนล(proportional detector) มีทั้งแบบบรรจุก๊าซ(gas-filled) และแบบก๊าซไหลผ่าน(gas-flow) และ หัววัดชนิดกึ่งตัวนำ(semiconductor detector) ซึ่งบรรจุอยู่ในไนโตรเจนเหลว(liquid nitrogen) มีประสิทธิภาพสูงและความสามารถสูงในการแยกพลังงาน

หัววัดทั้งสามชนิดนี้มีความสามารถในการแยกพลังงาน (energy resolution) ที่ 5.9 KeV ได้ต่างกัน คือ หัววัดเรืองรังสี 52% หัววัดพรอพอร์ชั่นแนล 16% และหัววัดกึ่งตัวนำ 2.7%

ข. ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) และภาคขยายหลัก(amplifier) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สำหรับปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากหัววัดให้มีรูปร่าง และขนาดที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์

ง. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (analyzer) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลที่ได้ปรับแต่งและขยายสัญญาณแล้ว โดยทำการแยกนับและรวบรวมรังสีเอกซ์เรืองจากหัววัดได้ในหน่วยความจำ (memory) โดยจะแยกเป็นแต่ละช่วงพลังงาน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (mutichannel analyzer : MCA) และสามารถแสดงผลในรูปสเปคตรัมของพลังงานและความเข้มรังสี ทำให้ทราบถึงชนิดและปริมาณธาตุในตัวอย่างได้สะดวกและรวดเร็ว

เนื่องจากการวิเคราะห์ในระบบนี้แสดงผลออกมาในรูปพลังงาน จึงได้เรียกระบบการวิเคราะห์นี้ว่า energy despersive x-ray fluorescence analysis หรือเรียกย่อๆว่า "EDX" แสดงขั้นตอนของระบบไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองระบบ EDX

2.2.2.2 ระบบ WDX (Wavelength Dispersive X-ray fluorescence) หรือ dispersion เป็นระบบการวิเคราะห์รังสีเอกซ์ โดยอาศัยหลักที่ว่า รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเกิดการเลี้ยวเบน(diffraction)และแทรกสอด(interference)ได้ เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในระบบนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญคือ

ก. ผลึกวิเคราะห์ (analyzing crystal) จะทำหน้าที่แยกพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่างหลังจากถูกกระตุ้นและสะท้อนพลังงานที่มีค่าความยาวคลื่น(λ)ไปที่มุมต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามหลักการเสริมสร้างและหักล้างของคลื่น (constructive and destructive interfemce) ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดคลื่นเสริมกัน จะมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบตามกฎของ Bragg ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$2d \sin\theta = n\lambda \qquad (2\text{-}16)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมของผลึกวิเคราะห์

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์เรือง

λ คือ ค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวก 1,2,3,...

เนื่องจากหัววัดรังสีเอกซ์จะทำหน้าที่เคลื่อนไปรับรังสีเอกซ์ที่แยกระดับพลังงานในรูปของความยาวคลื่นโดยผลึกวิเคราะห์แล้ว ดังนั้นหัววัดรังสีระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการแยกพลังงานได้เหมือนกับระบบ EDX ส่วนใหญ่จะใช้หัววัด NaI(Tl) แบบบาง และหัววัดพรอพอชั่นแนล

ข. ภาคขยาย จะเหมือนกับระบบ EDX

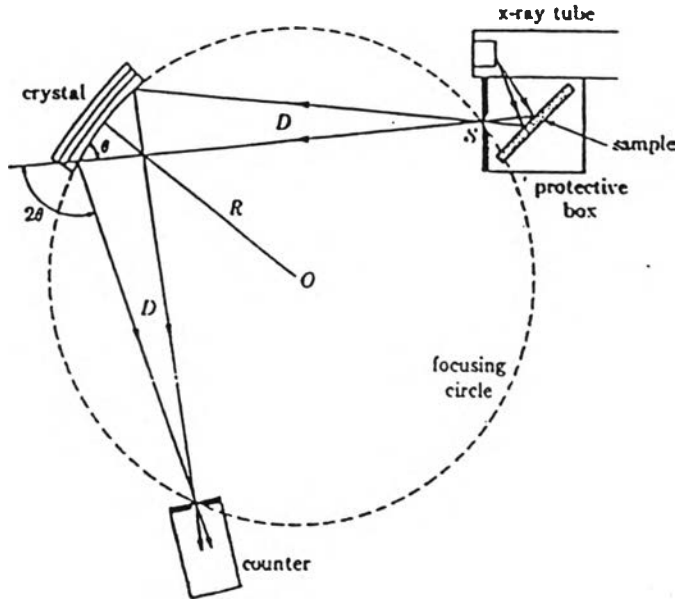
ค. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ จะนับรังสีจากหัววัดซึ่งเป็นแบบเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดี่ยว(single channel analyzer : SCA)

เนื่องจากการวิเคราะห์ในระบบนี้แสดงผลออกมาในรูปของความยาวคลื่น จึงนิยมเรียกว่า WDX แผนผังการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 2.5

2.2.3 การจัดระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

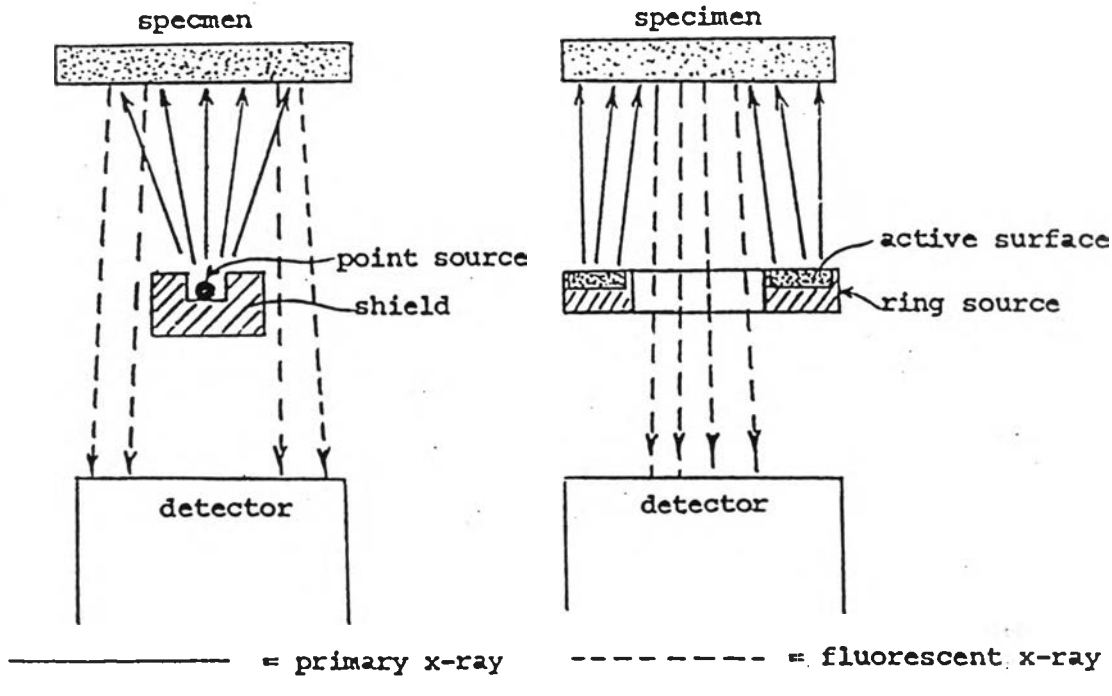
ระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ส่วนของตัวอย่าง และส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ การจัดระบบโดยยึดการจัดวาง(geometry) ของส่วนหลัก 3 ส่วนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 แผนภูมิของระบบวัดรังสีเอ็กซ์เรืองแบบ WDX (นเรศร์ จันทน์ขาว,2525)

2.2.3.1 coaxial geometry เป็นระบบที่จัดส่วนของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ตัวอย่าง และส่วนของหัววัดรังสีอยู่ในแนวแกนเดียวกัน การจัดระบบในลักษณะนี้จัดได้ในกรณีที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิเป็นชนิดไอโซโทปรังสี ซึ่งใช้ได้กับระบบวิเคราะห์แบบ EDX ดังแสดงในรูปที่ 2.6

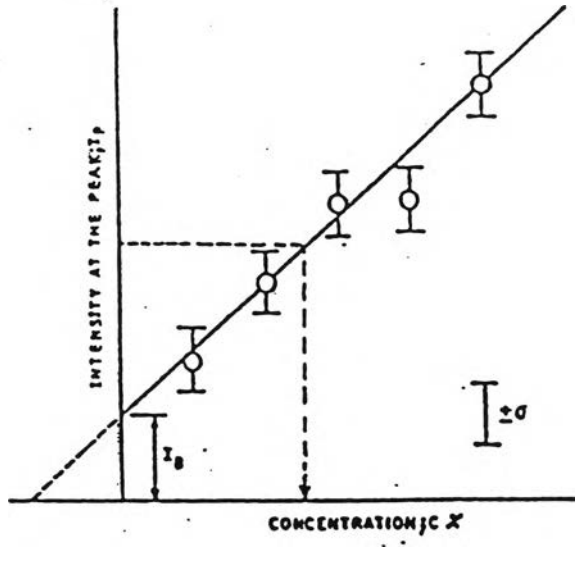


รูปที่ 2.6 การจัดระบบวิเคราะห์แบบ coaxial geometry (นเรศร์ จันทน์ขาว,2525)

2.2.3.2 non-coaxial geometry เป็นระบบที่จัดส่วนของต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ตัวอย่าง และส่วนของหัววัดรังสีให้อยู่ในแนวแกนเดียวกันไม่ได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์(x-ray tube) เป็นต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ สามารถใช้ได้กับระบบ EDX และระบบ WDX ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.2.4 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ ที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ วิธีการสร้างกราฟปรับเทียบ (calibration curve) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์เรืองที่วัดได้ กับความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ กราฟดังกล่าวนี้จะสร้างขึ้นมาจากสารมาตรฐานซึ่งทราบความเข้มข้นแน่นอนต่างๆกัน มาหาอัตรานับรังสีต่อหน่วยเวลา ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีเอ็กซ์เรืองกับความเข้มข้นของธาตุในสารมาตรฐาน(สุนันทา ทิพย์มาลย์มาศ,2532)

เมื่อต้องการหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่างก็นำสารตัวอย่างนับรังสีเอ็กซ์เรืองซึ่งเกิดจากการกระตุ้นด้วยรังสี วัดอัตรานับรังสีต่อหน่วยเวลา ดังในรูปที่ 2.7 จะได้ปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ดังนี้

$$I_p = mC + I_B \quad (2\text{-}17)$$

$$C = (I_p - I_B) / m \quad (2\text{-}18)$$

เมื่อ I_p คือ อัตรานับที่นับได้จากสารตัวอย่าง

I_B คือ อัตรานับที่นับได้เมื่อไม่มีสารตัวอย่าง(background)

C คือ ปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่าง(ppm)

m คือ ความชันของเส้นกราฟซึ่งเป็น calibration factor ของระบบวัดนี้ (count per unit time per unit concentration)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีนี้ สารตัวอย่าง และสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณน้อยวิธีอื่นได้แก่ การทำให้ตัวอย่างเจือจาง เพื่อลดอิทธิพลของ matrix effect ที่เกิดขึ้น หรือวิธีเติมธาตุมาตรฐานที่มีชนิดเดียวกับธาตุที่จะวิเคราะห์ลงไปในตัวอย่าง เพื่อวัดค่าความเข้มรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เพิ่มขึ้นเทียบกับความเข้มรังสีเอ็กซ์ก่อนเติมธาตุสามาตรฐาน เป็นต้น(นเรศร์ จันทน์ขาว,2525)

2.3 หญ้าแฝก (Vetiver Grass)(กรมพัฒนาที่ดิน,2541)

แฝกจัดเป็นพืชตระกูลหญ้าชนิดหนึ่ง พบกระจายอยู่ทั่วไปในหลายพื้นที่ตั้งแต่ที่ลุ่มจนถึงที่ดอน เนื่องจากสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆได้ดี นักพฤษศาสตร์สันนิษฐานว่ามีถิ่นกำเนิดที่ประเทศอินเดียซึ่งปลูกโดยชาวไมเซอร์(Mysore) นำมาใช้ประโยชน์ในงานพิธีกรรมต่างๆ และการนำรากไปใช้เป็นเครื่องหอม ส่วนแนวความคิดเรื่องการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ เพิ่งมีการริเริ่มเมื่อประมาณ 50 ปีที่ผ่านมานี้เอง ในประเทศไทยได้มีการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ เพื่อป้องกันการชะล้างพังทลายและปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น เนื่องจากหญ้าแฝกมีรากที่ยาว หยั่งลึก และมีลักษณะเป็นตาข่ายหรือเรียกกันว่า "กำแพงที่มีชีวิต"

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆของหญ้าแฝกลุ่มและหญ้าแฝกดอน (กรมพัฒนาที่ดิน,2541)

หญ้าแฝกลุ่ม	หญ้าแฝกดอน
ถิ่นกำเนิด - ตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย - มีการนำไปขยายพันธุ์ทั่วไป *ลักษณะกอ* - มีพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง - สูงประมาณ 150-200 ซม. - มีการแตกตะเกียงและแตกแขนงลำต้นได้ *ใบ* - ยาวประมาณ45-100 ซม. กว้าง 0.6-1.2 ซม. - ใบสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ท้องใบออกสีขาวมีรอยกั้นขวางเนื้อใบ ส่องกับแดดเห็นชัดเจน - เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูนุ่มมัน *ช่อดอกและดอก* - ช่อดอกสูง 150-250 ซม. - ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง - ดอกย่อยไม่มีระยางค์แข็ง *เมล็ด* - ขนาดโตกว่าหญ้าแฝกดอนเล็กน้อย สีไม่แตกต่างกัน *ราก* - มีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหยอยู่เฉลี่ย1.4-1.6% ของน้ำหนักแห้ง - โดยทั่วไปรากจะหยั่งลึกได้ประมาณตั้งแต่100-300 ซม. *การใช้ประโยชน์* - รากใช้ทำน้ำมันหอม สบู่ เครื่องประดับ เช่นกระเป๋า พัด ไม้แขวนเสื้อ สมุนไพรและเป็นยากันแมลงในตู้เสื้อผ้า	*ถิ่นกำเนิด* - เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ประเทศไทย ลาว เขมร และเวียดนาม - กระจายพันธุ์อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติไม่มีการนำไปปลูกขยายพันธุ์ *ลักษณะกอ* - เป็นพุ่ม ใบยาวปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอตะไคร้ ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม - สูง100-150 ซม. - ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น *ใบ* - ยาว 35-80 ซม. กว้าง 0.4-0.8 ซม. - ใบสีเขียวขีด หลังใบพับเป็นสันแข็งสามเหลี่ยม ท้องใบสีเดียวกับด้านหลังใบแต่ขีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ - เนื้อใบหยาบ สากคาย มีไขเคลือบน้อยทำให้ดูกร้านไม่เหลือบมัน *ช่อดอกและดอก* - สูง 100-150 ซม. - มีได้หลายสีเช่น สีขาวครีม สีม่วง - ดอกมีระยางค์แข็ง *เมล็ด* - ขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกหอม *ราก* - ไม่มีความหอม - รากสั้นกว่าโดยทั่วไปจะหยั่งลึกประมาณ 80-100 ซม. *การใช้ประโยชน์* - ปัจจุบันเมืองไทยใช้ใบมาทำวัสดุมุงหลังคาแต่ไม่เป็นที่นิยม

นักพฤษศาสตร์ได้ตรวจพบว่าในประเทศไทย มีหญ้าแฝกอยู่ 2 ชนิดคือ หญ้าแฝกหอมหรือแฝกลุ่ม(Vetiveria zizanioides Nash) และหญ้าแฝกดอน(Vetiveria nemoralis A. Camus) ซึ่งหญ้าแฝกทั้ง 2 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้หญ้าแฝกหอม(แฝกลุ่ม) แหล่งพันธุ์ สุราษฎร์ธานี เนื่องจากเจริญเติบโตได้ดีในสภาพพื้นที่ที่เป็นดินร่วนเหนียว (กรมพัฒนาที่ดิน,2541) ซึ่งตรงกับลักษณะดินที่ใช้ในการวิจัย

2.3.1 ประโยชน์ของหญ้าแฝก

นอกเหนือจากการอนุรักษ์ดินและน้ำแล้วยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆอีกดังนี้

2.3.1.1 ด้านการเกษตร โดยนำต้นและใบของหญ้าแฝกมาใช้เป็นอาหารสัตว์ วัสดุเพาะเห็ด และทำปุ๋ยหมักได้

2.3.1.2 ด้านเครื่องหอมและยาสมุนไพร สารสกัดที่ได้จากรากของหญ้าแฝกสามารถใช้เป็นยาสมุนไพรพื้นบ้าน และน้ำมันหอมระเหยที่จะใช้ทำเป็นน้ำหอมได้

2.3.1.3 ด้านศิลปหัตถกรรม ใบหญ้าแฝกนำมาใช้ทำเป็นวัสดุมุงหลังคา และเครื่องจักรสานต่างๆ

2.3.1.4 ด้านการพิทักษ์สิ่งแวดล้อม แนวของหญ้าแฝกที่ปลูกป้องกันการชะล้างพังทลายของดินยังสามารถดูดซับสารพิษต่างๆไม่ให้แพร่กระจายไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน เป็นต้น

2.4 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักจะมีอยู่ 68 ธาตุจากธาตุต่างๆ ที่ค้นพบในโลกประมาณ 105 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) สมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนักคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน(complex-compound) ที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์(organicmetallic comlpound) ซึ่งสามารถจะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร(food chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และพืช จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีทั้งประโยชน์ และอันตรายอย่างร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ โดย

ที่ ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิเกิล และโครเมียม แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเป็นพิษของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิเกิล และโครเมียม

ชนิดโลหะหนัก	การใช้ประโยชน์	ความเป็นพิษ
ตะกั่ว *	ตะกั่วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางเช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้ผสมเชื้อเพลิงเพื่อให้เครื่องเดินเรียบ ทำสีหุ้มสายเคเบิ้ล การบัคกรี ลูกปืน ฯลฯ	ตะกั่วจะเข้าสู่ร่างกายทางการกิน หายใจหรือทางผิวหนัง ผลกระทบส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับระบบประสาท ทางเดินอาหาร และกล้ามเนื้อแข็งแกร็งจนเป็นอัมพาต
สังกะสี **	สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การนำสังกะสีมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่ายแต่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่า สารประกอบสังกะสีใช้ในการทำสีย้อม กาว และเรยอน	สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือ ปวดท้อง คลื่นไส้อาเจียน เกิดการผุกร่อนของเยื่อบุทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ช็อค และอาจถึงตายได้
ทองแดง **	ทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และความร้อน มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน ง่ายต่อการแปรรูป การใช้ประโยชน์ได้แก่ การทำอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์และไฟฟ้า ใช้ก่อสร้างอาคารและเครื่องจักร ใช้เป็นส่วนประกอบของยากำจัดศัตรูพืช ทำเม็ดสีในอุตสหกรรมเส้นใยและเซรามิก	ทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมาก ถ้าได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจเสียชีวิตได้
นิเกิล **	นิเกิลส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่นๆเป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิเกิลบริสุทธิ์จะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมน้ำมันเบนซินในงานชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก	เกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นของนิเกิล และนิเกิลคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง
โครเมียม ***	โครเมียมเป็นสารฟอกหนักชนิดหนึ่งที่รู้จักกันแพร่หลายทั่วโลก นอก โครเมียมยังเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชและสัตว์รวมทั้งมนุษย์ โดยใช้ในกระบวนการกลูโคสเมตาโบลิซึม การสังเคราะห์กรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิก	โครเมียมมีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและสิ่งมีชีวิตในน้ำต่ำกว่าโลหะหนักอื่นๆ ถ้าสะสมในปริมาณมากทำให้เกิดโรคเรื้อรังได้เช่น คลื่นไส้อาเจียน ผิวหนังเป็นแผลพุพอง มะเร็งปอด

* Patterson,1985อ้างถึงใน อัญชลี เจตน์สัมฤทธิ์,2535

** Bailey,1986อ้างถึงในพณจิตร ธนสิน,2539 / *** ศศิธร เจริญวิเศษศิลป์,2536

2.5 สถิติทดสอบ

ในการวิจัยเชิงทดลองทางวิทยาศาสตร์ ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง ก็คือ การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการเลือกตัวสถิติทดสอบที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ผลสรุปของการทำวิจัยนั้นๆมีความถูกต้องและเชื่อถือได้มากขึ้น การวิเคราะห์ทางสถิติตัวหนึ่งที่ใช้กันมากในงานวิจัยคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือเรียกกันว่า ANOVA (Analysis of Variance) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่จะนำมาใช้มีลักษณะเป็นการสุ่มเลือกแบบสมบูรณ์ (Completely Randomized Design:CRD) ซึ่งหน่วยทดลอง(experiment unit) ที่นำมาใช้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันมากที่สุด (Homogenous) หรือให้ความแปรปรวนระหว่างหน่วยทดลองน้อยที่สุด เพื่อให้แผนการทดลองที่ออกแบบไว้มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากนั้นแบ่งหน่วยทดลองออกเป็นกลุ่มต่างๆตามวิธีการ (Treament)ที่ได้วางแผนไว้ โดยแต่ละวิธีต้องทดสอบหน่วยทดลองภายในกลุ่มและระหว่างกลุ่ม เป็นการนำเอาการกระจายของข้อมูลมาพิจารณาด้วย โดยจะนำความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดในทุกกลุ่มมารวมกันแล้วแยกความแปรปรวนออกเป็นส่วนๆ ซึ่งในกรณีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแบบสุ่มสมบูรณ์นี้จะแยกความแปรปรวนที่มีทั้งหมด (total meansquare $=MS_t$) ออกเป็น 2 ส่วนคือ ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม(between mean square$=MS_b$) อันเนื่องมาจากอิทธิพลของวิธีการที่ให้ และความแปรปรวนภายในกลุ่ม(within mean square $=MS_w$) อันเนื่องมาจากหน่วยทดลองที่มีอยู่อาจไม่สม่ำเสมอกันจริงเป็นผลของตัวแปรอื่นๆที่ทำให้คลาดเคลื่อนไป ค่าความแปรปรวนทั้งสองนี้ ถ้าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แสดงว่าข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบนั้นไม่แตกต่างกันหรืออยู่ภายใต้โค้งเดียวกัน แต่ถ้าค่าความแปรปรวนทั้งสองแตกต่างกันและแตกต่างกันมากๆ แสดงว่าข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบมาจากประชากรที่ต่างกันหรือข้อมูลนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในการทดสอบนัยสำคัญจึงใช้อัตราส่วน F ระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่มกับความแปรปรวนภายในกลุ่ม ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์
(บุญธรรม กิจปรีดาบริสุทธิ์,2531)

สาเหตุของความแปรปรวน	ความเบี่ยงเบนกำลังสอง	ระดับความเป็นเสรี	ความเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย	สถิติทดสอบ
ระหว่างกลุ่ม	$SS_b = \sum n_i(X - M_T)$	$k - 1$	$MS_b=SS_b/(k-1)$	$F = MS_b/MS_w$
ภายในกลุ่ม	$SS_w = \sum(X_i - M_i)^2$	$n_t - k$	$MS_w=SS_w/(n_t - k)$	
ผลรวม	$SS_t = \sum(X - M_T)^2$	$n_t - 1$		

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในตาราง

n_i = จำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ i (i=1,2,3,...,k)

M_i = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ i

M_T = ค่าเฉลี่ยรวม

X_i = ค่าของข้อมูลแต่ละตัวในกลุ่มที่ i

X = ค่าของข้อมูลแต่ละตัวในทุกกลุ่ม

การแปลผลการวิเคราะห์นั้นต้องนำค่า F ที่คำนวณได้จากตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับค่า F ที่เปิดจากตารางที่กำหนดที่ระดับนัยสำคัญ(α)ที่กำหนด โดยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติจะใช้ 3 ค่าคือ .05 .01 และ.001 ส่วนระดับความเป็นเสรีนั้นก็จะนำระดับความเป็นเสรีของความแปรปรวนระหว่างกลุ่มเป็นตัวตั้ง และระดับความเป็นเสรีของความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นตัวหาร พิจารณาที่αและdf เดียวกัน ถ้าค่า F ที่คำนวณได้จากตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าค่า F ที่เปิดจากตารางที่กำหนดที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนด จะแปลผลว่ากลุ่มต่างๆที่นำมาศึกษานั้นมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แต่ถ้าค่า F ที่คำนวณได้จากตัวอย่างเท่ากับหรือมากกว่าค่า F ที่เปิดจากตารางที่กำหนดที่ระดับนัยสำคัญ(α)ที่กำหนด จะแปลผลว่ากลุ่มต่างๆที่นำมาศึกษาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด

แต่อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติการทดลองทางวิทยาศาสตร์นั้นจำนวนหน่วยทดลองจะมีจำนวนน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดต่างๆคือ จำนวนหน่วยทดลองเอง เวลา ค่าใช้จ่าย หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่ง ปัญหาที่พบคือความแปรปรวนของประชากรไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้ ทำให้ผลสรุปของการวิจัยที่ได้จากการวิจัยอาจจะไม่ตรงตามข้อตกลงเบื้องต้นที่กำหนดไว้ ดังนั้นค่าต่างๆที่นำมา วิเคราะห์จึงเป็นเพียงค่าประมาณมากกว่าเป็นค่าที่แท้จริง และการที่ข้อตกลงเบื้องต้นไม่เป็นจริงนี้ยังมีผลต่อระดับนัยสำคัญของการทดสอบ และความไวของสถิติทดสอบด้วย(Kirk,1969อ้างถึงในกิ่งทอง ยงยุทธมีชัย,2539)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zheng Chum Rong, Tu Cong และChen Huai Man,1998 ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Priliminary Experiment on Purification of Eutrophic Water with Vetiver เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการลดปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำเสีย การปลูกหญ้าแฝกจะปลูกแบบลอยน้ำ(floating island) และน้ำเสียที่ใช้มาจาก 4 แหล่งคือ river water1, river water2, tap water และpond water พร้อมทั้งบันทึกการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในน้ำเสียทั้ง 4 แหล่ง ผลการวิจัยพบว่า หญ้าแฝกสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ 74% ภายใน 5 อาทิตย์ และลดปริมาณฟอสฟอรัสได้ 99% ภายใน 3 อาทิตย์ การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกในriver water ดีกว่าใน pond water และ tap water ตามลำดับ โดยความสูงของหญ้าแฝกในน้ำเสียจากriver water pond water และtap water เท่ากับ 68.5 - 80, 60 และ 50 ซม. ตามลำดับ

Xia Hanping, Ao Huixiu, Liu Shizhong และ He Daoquan,1998 ได้ศึกษาในหัวเรื่อง A Priliminary Study on Vetiver's Purification for Garbage Leachate ในศึกษาวิจัยนี้เป็นการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์จากน้ำชะขยะชุมชน โดยใช้พืช 4 ชนิดคือ Vetiveria zizanioides, Alternanthera philoxeroides, Paspalum notatum และ Eichhornia crassipes น้ำชะขยะที่ใช้มาจากหลุมฝังกลบขยะของเมืองกวางเจา(Guangzhou) โดยแบ่งน้ำเสียเป็น 3 ลักษณะคือ high concentrated leachate(HCL) low concentrated leachate(LCL) และ clean water ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพืชทั้ง 4 ชนิด จากการวิจัยพบว่า V. zizanioides มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่า A. philoxeroides ส่วน E. crassipes ตายในน้ำชะขยะทั้ง 2 ชนิด(HCL,LCL) ส่วน P. notatum ตายใน HCL

Paul Truong และ Dennis Baker, 1997 ทำการศึกษาเรื่อง The Role of Vetiver Grass in the Rehabilitation of Toxic and Contaminated Lands in Australia งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับความทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนักของหญ้าแฝก การวิจัยนี้ได้ปลูกหญ้าแฝกในกระถางและโลหะหนักที่ใช้ได้แก่ แมงกานิส(Mn) อาร์เซนิก(As) แคดเมียม(Cd) ทองแดง(Cu) โครเมียม (Cr) และนิเกิล(Ni) ผลการวิจัยพบว่า หญ้าแฝกสามารถทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก ซึ่งผลของความทนทานของหญ้าแฝกต่อความเป็นพิษของโลหะหนักชนิดต่างๆมีดังนี้ Mn(578), As(100 - 250ppm), Cd(10 - 20ppm), Cu(10 -20ppm), Cr(200 - 600ppm) และ Ni(50 - 100ppm)

บรรจบ สุดประเสริฐ, 2518 ได้ศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในดินและแร่ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ในการปฏิบัติได้แบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนคุณภาพวิเคราะห์ได้แก การหาHf-178 ใน zirconium nitrate Ag-109 ในแผ่นทองเปลว และหา Si Al-27 Mn-55 และA-40 ในแร่ ส่วนปริมาณวิเคราะห์ได้แก่ การหาปริมาณของ Al-27 K-41 Na-23 และMn-55 ในดิน ซึ่งการวิจัยนี้แสดงให้เห็นประโยชน์ที่ได้จากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยเฉพาะด้านการเกษตร คือ สามารถวิเคราะห์หาธาตุบางอย่างซึ่งอยู่ในดิน อันเป็นประโยชน์ต่อพืช จากการวิเคราะห์แสดงว่าดินแต่ละตำบลจะมีปริมาณของธาตุต่างๆไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของตำบลนั้นๆ นอกจากนี้ ยังใช้วิเคราะห์หาสิ่งเจือปน ในกรณีที่เราต้องการใช้สารที่มีความบริสุทธิ์มากๆ