

2.1 รังสีนิวตรอน

การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน เป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณโดยมีหลักการเบื้องต้นดังนี้ เมื่อนิวตรอนถูกยิง (bombard) เข้าใส่อะตอมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส (nuclear transformation) ของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีหรือเรดิโอไอโซโทป ซึ่งอาจจะเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุเดิมหรือธาตุใหม่ก็ได้ จากการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่ ครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และระดับพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ก็สามารถจะหาทราบได้ว่าเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด และจากปริมาณรังสีที่วัดได้จากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานของธาตุนั้นที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณปริมาณของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพร้อมต้นกำเนิดมาจากการอาบรังสีนิวตรอน (PGNAA) เป็นเทคนิคที่แตกต่างจากเทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation Analysis, NAA) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แต่ทั้ง PGNAA และ NAA ต้องการอุปกรณ์ต่าง ๆ เหมือนกันคือ

2.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source) (6) Chadwick เป็นผู้ค้นพบอนุภาคนิวตรอน ในปี ค.ศ. 1932 อนุภาคนิวตรอนมีมวล $1.68 \times 10^{-24} \text{ g}$ (1.00898 amu) ซึ่งมีมวลมากกว่ามวลของอนุภาคโปรตอนเล็กน้อย นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร ไม่มีประจุ มีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที และสลายตัวให้โปรตอน (p) 1 ตัว อิเล็กตรอน (e^-) 1 ตัว และนิวตริโน ($\bar{\nu}$) 1 ตัว แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

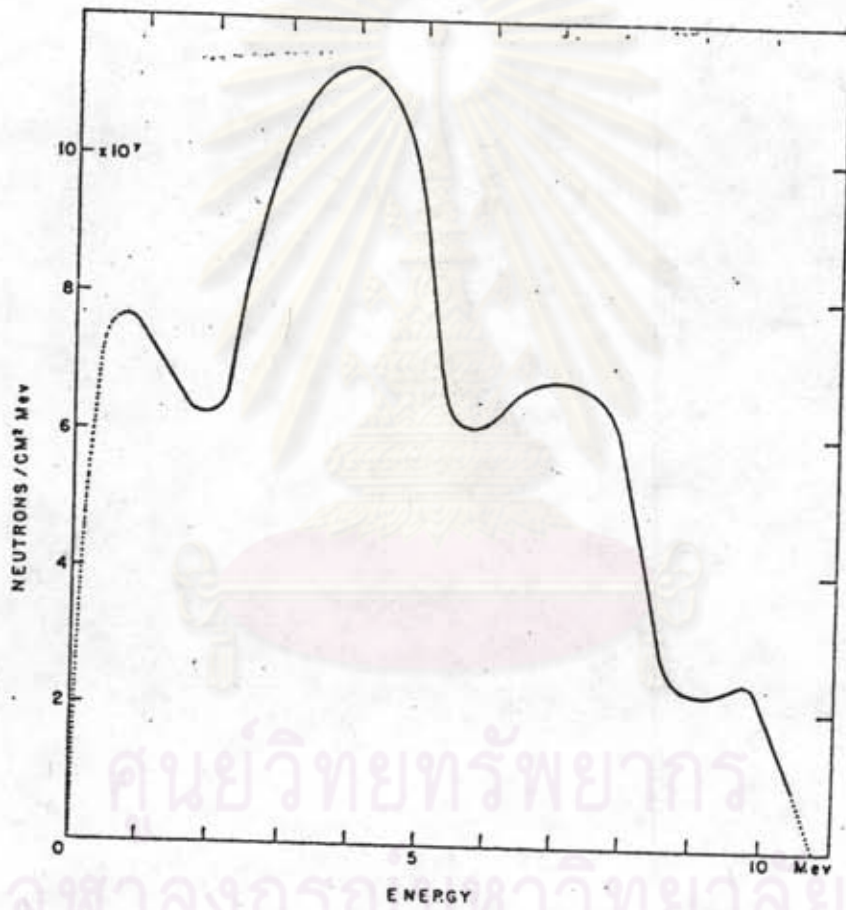
2.1.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี (isotopic neutron source) แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบส่วนใหญ่ทำขึ้นได้โดยการผสมสารที่ใช้เป็นเป้าเข้ากับสารกัมมันตรังสีที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวยิง (bambard) รังสีเข้าไปในเป้าแล้วปลดปล่อยนิวตรอนออกมา แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้มักจะมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนย้าย และดัดแปลงให้เข้ากับการทดลองต่าง ๆ ได้ง่าย แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้มีผลผลิตกันมาก โดยอาศัยสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคแอลฟา (α) หรือรังสีแกมมา (γ) ออกมาเข้าไปชนเป้าที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวตรอนต่ำ เช่น เบริลเลียม (Beryllium) โบรอน (Boron) หรือดิวทีเรียม (Deuterium) เป็นต้น แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ แบบ (α, n) หรือ (γ, n) ทำให้กำเนิดนิวตรอนออกมา จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10^3 ถึง 10^7 ใน 1 วินาทีต่อความแรง 1 คูรี ซึ่งค่าเกินไปสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณ

ของธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันได้ ยกเว้นแต่เราจะทำการหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณมาก ๆ และธาตุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติเอื้ออำนวยต่อปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นแก่รังสีนิวตรอน เช่น มีภาคตัดขวางสูง ครึ่งชีวิตสั้น และเป็นไอโซโทปที่มีตามธรรมชาติสูงเป็นต้น แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n) ได้แก่ $^{210}\text{Po-Be}$, $^{226}\text{Ra-Be}$, $^{241}\text{Am-Be}$, $^{238}\text{Pu-Be}$ และที่ได้จากปฏิกิริยา (γ, n) ได้แก่ $^{124}\text{Sb-Be}$

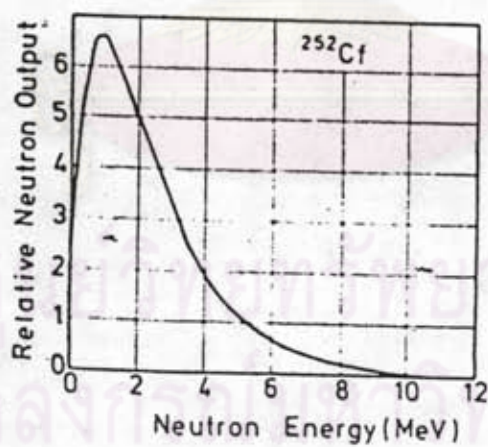
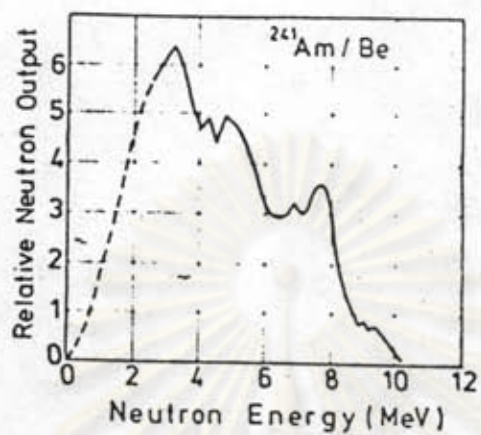
แหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดไอโซโทปรังสีอ่อนชนิดหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลายคือคาลิฟอร์เนียม-252 (Cf^{252}) เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่กำเนิดนิวตรอนจากการแตกตัวเอง (Spontaneous Fission) มีค่าครึ่งชีวิต 2.6 ปี มี neutron yield สูงมากคือประมาณ $2.3 \times 10^6 \text{ ns}^{-1} \mu\text{g}^{-1}$ มีค่าความแน่นอนในการให้นิวตรอนสูง

ตาราง 2.1 แหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีบางชนิดที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n)

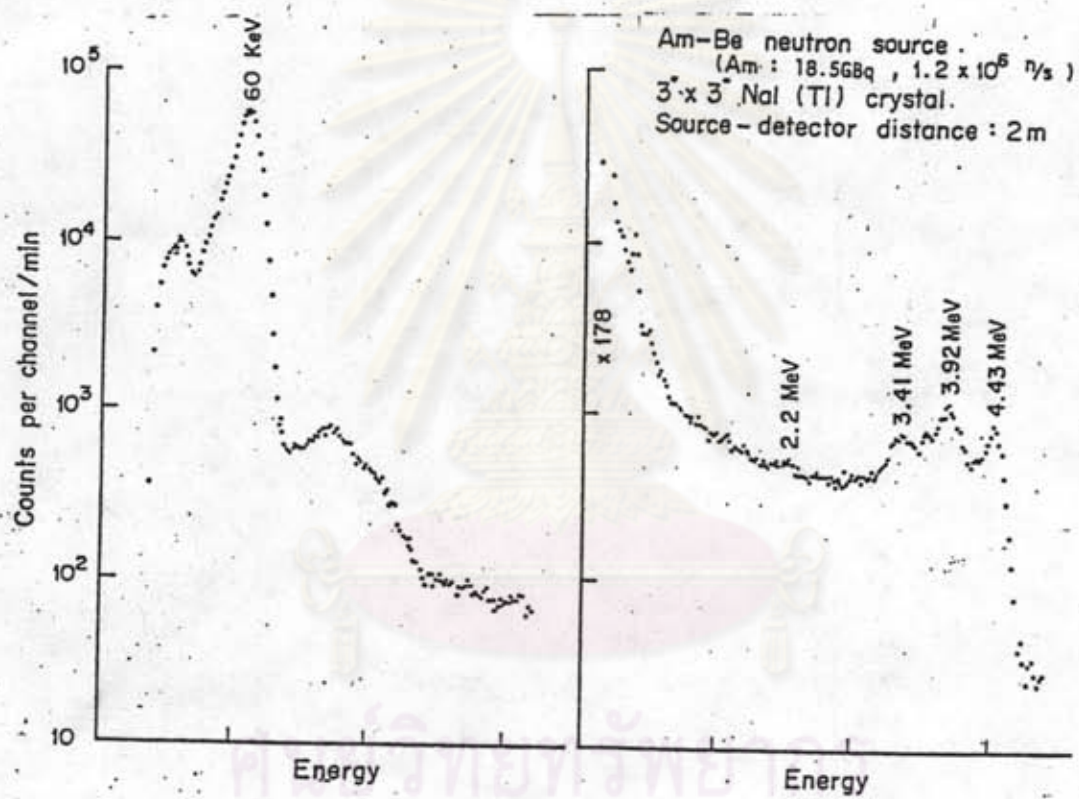
Source	$^{210}\text{Po-Be}$	$^{238}\text{Pu-Be}$	$^{241}\text{Am-Be}$
Yield (n/sec-Ci)	2.5×10^6	1.7×10^6	2.2×10^6
Grams emitter/Ci	2.24×10^{-4}	16	0.3
Half-life	138.4d	86y	433y
Heating (W/Ci)	0.032	0.031	0.033
Approx, Size (ml/Ci)	0.1	12	3
Largest source (Ci)	100	10	5
Gamma energy Mev.	0.8, 4.43	4.43	0.06, 4.43
Gamma Dose (mR/hr-m-Ci)	0.006, 0.11	0.08	10, 0.1



รูป 2.1 นิวตรอนสเปกตรัมของ $^{238}\text{Pu-Be}$ (α, n)

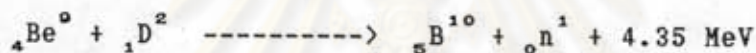
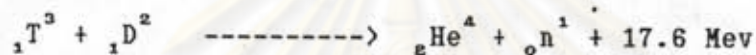
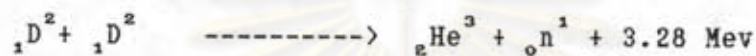


รูป 2.2 นิวตรอนสเปกตรัมของ $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ (α, n)n และ ^{252}Cf (f, n)



รูป 2.3 แกมมาสเปกตรัมของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$

2.1.1.2 เครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron Generator) ผลิตนิวตรอนออกมาได้โดยอาศัยปฏิกิริยา (d,n) และ (p,n) เนื่องจากดิวเทรียม (Deuteron) และโปรตอน (Proton) เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ถ้าอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานต่ำ โอกาสที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคือเป้านั้นจะมีน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้ดิวเทรียมหรือโปรตอนมีพลังงานสูงขึ้น โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) ส่วนนิวเคลียส ที่ใช้เป็นเป้าจะเป็นพวกธาตุเบาซึ่งให้แรงผลักแบบคูลอมบ์น้อยเมื่อถึงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไปยังเป้า จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้นิวตรอนออกมา เช่น ปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ความเข้มนิวตรอนปริมาณนิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอนจะมีค่าอยู่ระหว่าง $10^0 - 10^{11}$ นิวตรอน/วินาที จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ดังกล่าวนอกจากจะให้นิวตรอนแล้ว ยังเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ อีกเช่น รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง หรือ Bremsstrahlung ด้วย

2.1.1.3 นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor neutron) นิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Nuclear Fission) ของธาตุหนักบางชนิดซึ่งโดยทั่วไปคือ ยูเรเนียม สเปกตรัมพลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงกว้างระหว่าง 0.001 MeV จนถึง 15 MeV มีค่านิวตรอนฟลักซ์อยู่ในระดับ $10^8 - 10^{14}$ (n/cm².sec⁻¹) ในจำนวนแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่กล่าวมาแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะให้เทอร์มอลนิวตรอนสูงที่สุด

การเลือกใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย อายุการใช้งาน ความสะดวกในการใช้งาน ความเข้มของนิวตรอนที่ได้ และความสม่ำเสมอในการให้นิวตรอนออกมา เครื่องกำเนิดนิวตรอน และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะให้จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ที่มากกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากสารกัมมันตรังสี แต่ทั้งสองแบบนี้มีราคาแพง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ตลอดจนค่าใช้จ่ายขณะทำการวิจัย และความแน่นอน (Stability) ของการให้นิวตรอนไม่ดีเท่าต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี นอกจากนี้ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสียังมีขนาดเล็กจึงเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมมากกว่า

2.1.2 พลังงานของนิวตรอน Kruger(6) ได้จำแนกอนุภาคนิวตรอนตามขนาดของพลังงานออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

2.1.2.1 นิวตรอนช้า (Slow Neutron) จะมีการกระจายของพลังงานส่วนใหญ่ตั้งแต่ 0-1 keV แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อยดังนี้คือ

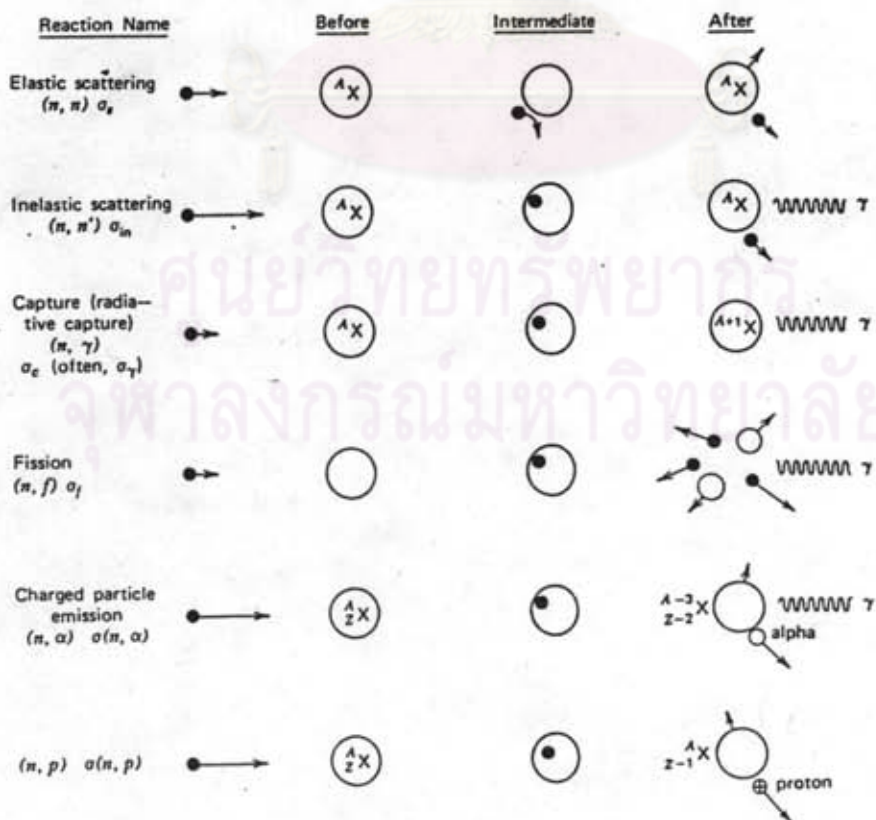
2.1.2.1.1 เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal Neutron) ซึ่งจะมีการกระจายของพลังงานเฉลี่ยที่พบมากที่สุดที่ 0.0253 eV ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2.1.2.1.2 อีพิเทอร์มาลนิวตรอน (Epithermal Neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 0.0253 eV-0.2 eV

2.1.2.1.3 อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate Neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง 1-500 keV

2.1.2.2 นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.5 MeV

2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสารต่าง ๆ (Interaction of Neutron With Matter) เมื่ออนุภาคนิวตรอนชนกับอนุภาคตัวกลางหรือนิวเคลียสอื่น ๆ ย่อมจะเกิดการกระเจิงหรือเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางนั้น อันตรกิริยาที่สำคัญของนิวตรอนกับสสารมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ของนิวตรอน

2.1.3.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) ของนิวตรอน การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน เป็นอันตรกิริยาที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น ๆ แล้วพลังงานของนิวตรอนจะลดลง ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนจะรับพลังงานไปโดยที่นิวเคลียสนั้นยังคงอยู่ในสภาวะกราวด์สเตต (ground state) พลังงานและโมเมนตัมรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนและหลังชนจะมีค่าเท่าเดิม ในการเกิดการกระเจิงของนิวตรอนเมื่อเกิดกับอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคนิวตรอนเช่น โปรตอน ดิวเทรียม นิวตรอนจะเสียพลังงานมาก ทำให้พลังงานลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว สารประกอบของธาตุเบาโดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจน จึงถูกใช้เป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (neutron moderator)

ถ้าให้ E_1 เป็นพลังงานก่อนการชน
 E_2 เป็นพลังงานหลังการชนหนึ่งครั้ง
 ϕ เป็นการเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อการชน 1 ครั้ง ในรูปลอการิทึม (logarithm)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \phi &= \ln(E_1/E_2) \\ E_2/E_1 &= \exp(-\phi) \end{aligned} \quad \dots\dots (2.1)$$

ϕ มีความสัมพันธ์กับเลขมวล (mass number) ของนิวเคลียสที่ถูกชนดังนี้

$$\phi = 1 - [(A-1)^2/2A] \cdot [\ln(A+1)/(A-1)] \quad \dots\dots (2.2)$$

เมื่อ A เป็นเลขมวลของ ตัวหน่วงพลังงานนิวตรอน (moderator)

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } n &= \text{จำนวนการชนเฉลี่ยเพื่อลดพลังงานจาก } E_0 \text{ เป็น } E \\ n &= (1/\phi) \cdot \ln(E_0/E) \end{aligned} \quad \dots\dots (2.3)$$

จำนวนการชนเฉลี่ยในการลดพลังงานนิวตรอนจาก 2 MeV ลงเหลือ 0.0253 eV โดยใช้ตัวหน่วงพลังงานต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบบางชนิดในการลดพลังงานของนิวตรอน

ธาตุที่ใช้เป็นตัวหน่วง ความเร็วหรือลดพลังงาน	A	ξ	n สำหรับการลดพลังงานนิวตรอน 2 MeV ลงเหลือ 0.0253 MeV
ไฮโดรเจน ^1H	1	1.00	18
ดิวเทอเรียม ^2D	2	0.725	25
ฮีเลียม ^4He	4	0.425	43
ลิเทียม ^7Li	7	0.268	67
เบอริลเลียม ^9Be	9	0.208	87
คาร์บอน ^{12}C	12	0.158	114
ออกซิเจน ^{16}O	16	0.120	150
ยูเรเนียม ^{238}U	238	0.0084	2150

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนมีคุณสมบัติในการลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด รองลงมาคือดิวเทอเรียม แต่ไฮโดรเจนและดิวเทอเรียมเป็นก๊าซ โอกาสที่นิวตรอนจะชนจึงมีน้อยมากเพราะก๊าซมีความหนาแน่นของอะตอมน้อยกว่าของแข็งและของเหลว ในทางปฏิบัติการใช้ไฮโดรเจนและดิวเทอเรียมเป็นตัวหน่วงพลังงานนิวตรอนจึงใช้อยู่ในรูปของน้ำ (H_2O) และน้ำชนิดหนัก (D_2O) ตามลำดับ การพิจารณาคุณสมบัติของตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอนจึงต้องพิจารณาค่าสโลว์ดาวน์เพาเวอร์ (Slowing-down power) ด้วย

$$\text{สโลว์ดาวน์ เพาเวอร์ ของตัวหน่วงพลังงานนิวตรอนมีค่า} = \xi N \sigma_s = \xi \Sigma_s \dots (2.4)$$

เมื่อ N คือจำนวนอะตอมของตัวหน่วงพลังงานนิวตรอนต่อปริมาตร

σ_s คือค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิงของนิวตรอน

Σ_s คือค่าภาคตัดขวางมหภาคของการกระเจิงของนิวตรอน

นอกจากนี้ จะต้องพิจารณาถึงสัดส่วนของนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนไปโดยตัวหน่วงนิวตรอนด้วย เพราะหากมีการดูดกลืนนิวตรอนไปมากจะมีการสูญเสียนิวตรอนไปจากระบบมาก ในการนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนการหน่วงพลังงาน (moderation ratio) ซึ่งเท่ากับ $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ หรือ $\xi \sigma_s / \sigma_a$

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของการหน่วงความเร็วนิวตรอน

Moderator	Slowing-down power (cm^{-1})	Moderating ratio
H ₂ O	1.53	72
D ₂ O	0.370	12,000
Be	0.176	159
Graphite	0.064	170

จากตาราง 2.3 จะเห็นได้ว่าน้ำมีสโลว์ิง คาร์บอน-เพาเวอร์มากแสดงว่าสามารถลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุดแต่ปรากฏว่าอัตราส่วนการลดพลังงานมีค่าน้อย ดังนั้นถึงแม้พลังงานของนิวตรอนจะลดลงมากแต่ก็เหลืออนุภาคนิวตรอนปริมาณน้อย ส่วนน้ำชนิดหนักมีสโลว์ิง คาร์บอน-เพาเวอร์ปานกลาง แต่คอลลีชันนิวตรอนน้อยมาก จึงเหลืออนุภาคนิวตรอนจำนวนมาก

2.1.3.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

การชนแบบนี้นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) มีการถ่ายเทพลังงานให้นิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) และมีนิวตรอนหลุดออกมา 1 ตัว เมื่อกลับสู่สภาวะปรกติก็จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังนั้นพลังงานจลน์ก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือ พลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบนี้เป็นแบบเทรชโฮลด์ (threshold reaction) คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ ปฏิกริยาแบบนี้มักเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 1 MeV ขึ้นไป และเป็นปฏิกริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (endothermic reaction) ใช้สัญลักษณ์ของปฏิกริยาเป็น (n,n')

2.1.3.3 การจับนิวตรอน (neutron capture) หรือเรียกว่า

"radiative capture" หรือปฏิกริยาคดกลืนนิวตรอน (neutron absorption reaction) เมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมา (captured gamma-rays หรือ neutron captured gamma) ปฏิกริยาจะเป็นแบบปลดปล่อยพลังงาน (exothermic reaction) สัญลักษณ์ของปฏิกริยาเป็น (n, γ) เช่น $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$, $^{60}\text{Co}(n,\gamma)^{61}\text{Co}$, $^{14}\text{N}(n,\gamma)$ เป็นต้น ปฏิกริยา

แบบนี้เป็นปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุแบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (neutron activation analysis, NAA) และการวิเคราะห์ธาตุแบบการวัดรังสีพร้อมทันแกมมา (prompt gamma-ray neutron activation analysis, PGNAA)

2.1.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน หรือปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) เมื่อนิวตรอนไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิดเกิดเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นจะแบ่งตัวเป็น 2 ส่วนแตกออกมาได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัว หลุดออกมาด้วย ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาหลักของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูทั้งชนิดที่ใช้ผลิตนิวตรอนและผลิตพลังงาน สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, f) ธาตุหนักที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้กับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และพลูโตเนียม-239 เป็นต้น

2.1.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด ภายหลังการเกิดนิวเคลียสรวมแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน ตัวอย่างของปฏิกิริยาได้แก่ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$; $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$; $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ เป็นต้น

2.1.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (neutron-producing) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นชนิดคูณพลังงาน ผลของปฏิกิริยาก็คือจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา $(n, 2n)$; $(n, 3n)$ ได้แก่ $^{27}\text{Al}(n, 2n)^{26}\text{Al}$

2.1.4 ภาคตัดขวาง (Cross section) ภาคตัดขวางจุลภาค (σ , microscopic cross section) คือ เป็นค่าที่บอกถึงโอกาส (probability) ที่นิวเคลียสจะเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคนิวตรอนที่วิ่งเข้าชน มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น = 10^{-24} ตร.ซม. ภาคตัดขวางจุลภาครวม (σ_t) ของนิวเคลียสประกอบด้วย 2 ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่สำคัญคือ ปฏิกิริยาคูณนิวตรอนและการกระเจิงของนิวตรอน

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \dots\dots (2.5)$$

- σ_s = ภาคตัดขวางของการกระเจิง
 = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น
 σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน
 = ผลรวมของภาคตัดขวางจุลภาคของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน การแตกตัว การปลดปล่อยอนุภาคและการผลิตนิวตรอน

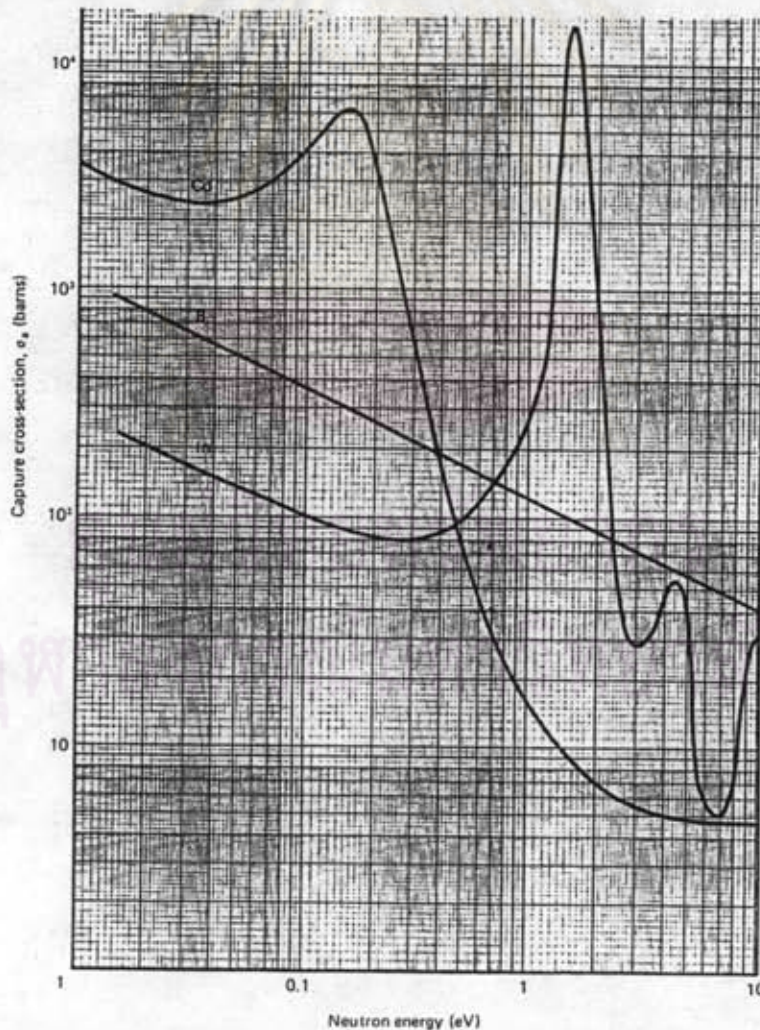
ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้าหมายจำนวนนิวเคลียส N ต่อ ลบ.ซม. ผลคูณของ N กับ Σ เรียกว่า "ภาคตัดขวางมหภาค" (Σ , macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\Sigma = N\sigma \quad \dots\dots(2.6)$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ โอกาสต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของนิวตรอนที่จะเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียส ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่ง ๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section ($\sigma(E)$) ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวางมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \int \phi(E) \sigma(E) dE / \int \phi(E) dE \quad \dots\dots(2.7)$$

นอกจากนี้ยังพบว่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสำหรับธาตุบางธาตุจะมีค่ามากเป็นพิเศษสำหรับนิวตรอนพลังงานหนึ่ง ๆ เรียกว่า ภาคตัดขวางรีโซแนนซ์ (resonance cross section) ดังจะเห็นได้จากธาตุ Cd, B และ In ตามรูปที่ 2.5 ธาตุทั้งสามนี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับนิวตรอนพลังงานต่ำได้มาก



รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางของ B, Cd, In กับพลังงานนิวตรอน

ถ้ามีอนุภาคนิวตรอนจำนวน n/cm^3 วิ่งด้วยความเร็ว v cm/sec จะมีค่านิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) = nv n/cm².sec เมื่อผ่านเข้าไปในตัวกลางหนา X cm นิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าลดลง โดยมีความสัมพันธ์กับค่าภาคตัดขวางและความหนาของตัวกลางดังนี้

$$\phi_x = \phi_0 \exp(-\Sigma_t X) \quad \dots\dots(2.8)$$

ϕ_0 = คือนิวตรอนฟลักซ์ก่อนผ่านเข้าสู่ตัวกลาง

ϕ_x = คือนิวตรอนฟลักซ์ภายหลังผ่านตัวกลาง

Σ_t = ภาคตัดขวางมหภาครวมของตัวกลาง

2.2 การหาปริมาณตัวอย่างด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน

เมื่อนำสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ไปอบรังสีนิวตรอน อะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบสามารถเกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นได้ ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะสลายตัวเพื่อเข้าสู่สถานะเสถียร อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มของนิวตรอน (neutron flux) ความสามารถในการจับนิวตรอน (neutron cross section) ของธาตุที่นำเข้ามาอบรังสี จำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยนิวตรอน รวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้น ๆ ที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Isotopic Abundance) อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะเขียนได้เป็นสมการ

$$P = N\phi\sigma \quad \dots\dots(2.9)$$

P = อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี

ϕ = neutron flux n/cm².sec

σ = thermal cross section ของปฏิกิริยา cm²

$$\text{ถ้ากัมมันตรังสีที่เกิดการสลายตัวด้วยอัตราการสลาย} = \lambda N^* \quad \dots\dots(2.10)$$

λ = ค่าคงตัวในการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี (decay constant) มีค่า $0.693/T_{1/2}$ เมื่อ $T_{1/2}$ คือค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

$N^*_{t_i}$ = เป็นจำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด ๆ (t_i)

A_{t_i} = อัตราการสลายตัวของไอโซโทปเมื่อสิ้นสุดการอบรังสีเป็นเวลา t_i



$$\text{เพราะฉะนั้น อัตราการเกิดกัมมันตรังสีสุทธิ} = N\phi\sigma - \lambda N^* \quad \dots\dots (2.11)$$

$$N^*_{t_i} = P/\lambda [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad \dots\dots (2.12)$$

$$A_{t_i} = \lambda N^*_{t_i} = P [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad \dots\dots (2.13)$$

$$A_{t_i} = N\phi\sigma [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad \dots\dots (2.14)$$

จำนวนอะตอมหรือนิวเคลียส (N) ทั้งหมดที่ถูกนำไปอบรังสีนิวตรอน หาได้จาก

$$N = N_0 WK/M \quad \dots\dots (2.15)$$

N_0 = ค่าคงที่ของอโวกาโดร (Avogadro's number)

ซึ่งมีค่า 6.023×10^{23} อะตอม/โมล

W = น้ำหนักของธาตุที่เราต้องการหา หน่วยเป็นกรัม

K = สัดส่วนจำนวนของไอโซโทปของธาตุนั้นในธรรมชาติ
(Isotope Abundance) หน่วยเป็นร้อยละ

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

เมื่อแทนค่าสมการ (2.15) ใน (2.14) จะได้สมการของนิวตรอนแอคทีเวชัน

$$A_{t_i} = N_0 WK\phi [1 - \exp(-\lambda t_i)]/M \quad \dots\dots (2.16)$$

หรือ $W = MA/N_0 K\phi [1 - \exp(-\lambda t_i)] \quad \dots\dots (2.17)$

ถ้าภายหลังการอบรังสีนิวตรอนแล้วต้องเสียเวลาก่อนนำตัวอย่างไปวัดรังสีเป็นเวลา T_w และใช้เวลานับรังสี t_c จะได้ว่า

$$A = N_0 WK\phi \cdot [1 - \exp(-\lambda t_i)] \cdot \exp(-\lambda t_w) \cdot [1 - \exp(-\lambda t_c)] \quad \dots\dots (2.18)$$

หรือ $W = MA / (N_0 K\phi \cdot [1 - \exp(-\lambda t_i)] \cdot \exp(-\lambda t_w) \cdot [1 - \exp(-\lambda t_c)]) \quad (2.19)$

ดังนั้น จากความแรงรังสี A ที่เกิดขึ้นถ้าเราทราบค่า ϕ , σ , λ , t , H , K และค่าประสิทธิภาพในการวัดรังสี สามารถคำนวณหาปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้โดยใช้สมการ (2.19) วิธีนี้ชื่อว่า วิธีสัมบูรณ์ (absolute method) แต่ในทางปฏิบัติการใช้วิธีสัมบูรณ์มีปัญหาในทางปฏิบัติหลายประการ เช่น มีความแปรปรวนจากประสิทธิภาพวัดรังสีความเข้มนิวตรอนในระหว่างการอบรังสีอาจมีค่าไม่เท่ากันทุกครั้ง และความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้องแน่นอนเป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันจึงนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างธาตุในสารตัวอย่างกับธาตุนั้นในสารมาตรฐาน โดยการนำสารมาตรฐานเข้าอบรังสีในตำแหน่งเดียวกันอาจจะอบรังสีต่างเวลาหรือเวลาเดียวกันก็ได้กับสารทดลองแล้ววัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ให้ } W_x &= \text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง} \\ W_s &= \text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน} \\ C_x &= \text{จำนวนการนับรังสีของสารตัวอย่างที่ต้องการจะหาปริมาณธาตุ} \\ C_s &= \text{จำนวนการวัดรังสีของสารมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบ} \\ t_x &= \text{เป็นเวลาที่ใช้ในการอบรังสีนิวตรอนของสารตัวอย่าง} \\ t_s &= \text{เป็นเวลาที่ใช้ในการอบรังสีนิวตรอนของสารมาตรฐาน} \end{aligned}$$

จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$W_x/W_s = (C_x / C_s) \cdot [\exp(\lambda t_x) / \exp(\lambda t_s)] \quad \dots\dots (2.20)$$

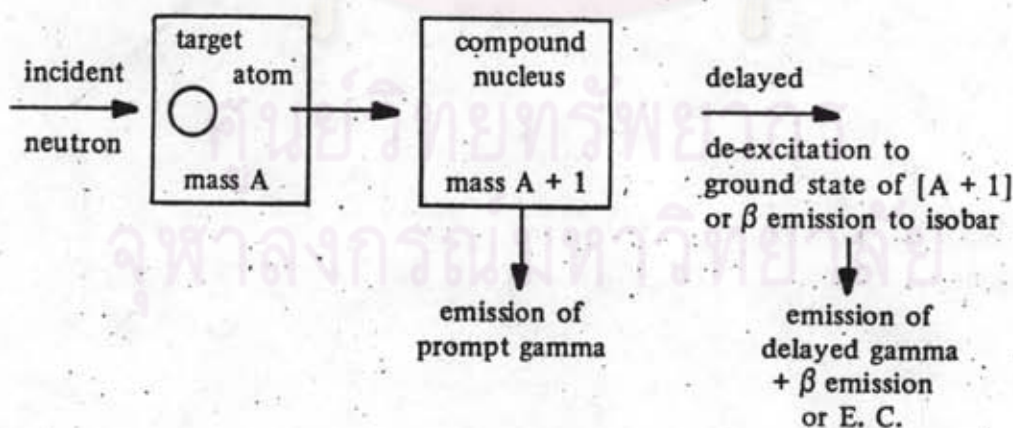
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค PGNA

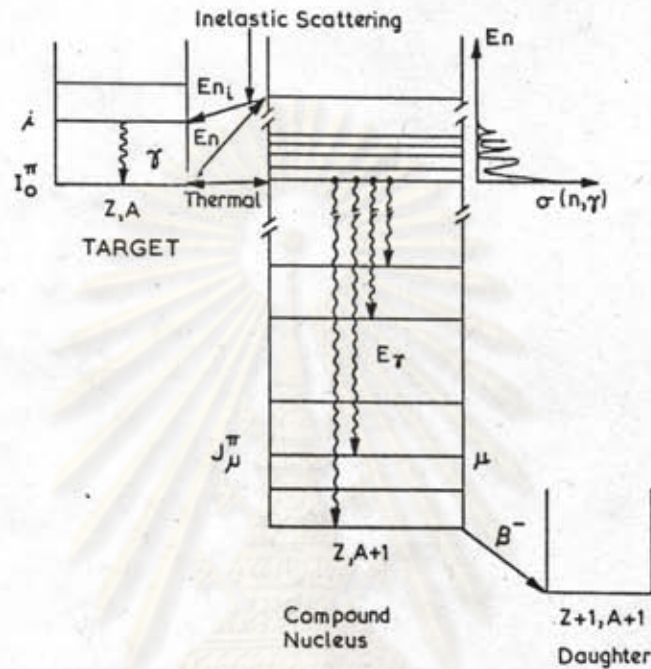
เทคนิคการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แถมมาจากการอาบรังสีนิวตรอน (PGNA) นั้น ต่างกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน (NAA) ตรงที่เทคนิค NAA เป็นการวัดรังสีแถมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น และยังเหลืออยู่ภายหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน ส่วนเทคนิค PGNA เป็นการวัดรังสีแถมมาที่ปลดปล่อยออกมาขณะที่กำลังอาบรังสีนิวตรอน ดังนั้นเทคนิค PGNA จึงมีข้อดีที่สำคัญบางประการเมื่อเทียบกับเทคนิค NAA คือ

1. การที่สามารถวัดรังสีแถมมาที่ปลดปล่อยออกมาทันที ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น
2. สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่ผลิตจากปฏิกิริยากับนิวตรอนไม่เป็นไอโซโทปรังสี เช่น โนโตรเจน H, B, P, Li และที่เป็นไอโซโทปรังสี แต่ไม่สามารถวัดรังสีได้อย่างถูกต้อง หรือมีประสิทธิภาพดีพอ

2.3.1 การเกิดรังสีพรอมต์แถมมา จากปฏิกิริยา $A(n, b)B$ เมื่อนิวตรอนเข้าชนกับอะตอมของ A จะทำให้นิวเคลียสของ B ถูกยกระดับพลังงาน ซึ่งจะสลายตัวอย่างรวดเร็วสู่สภาวะปกติและปลดปล่อยรังสีแถมมาออกมา ซึ่งใช้เวลาสั้นมากเป็นพิโควินาที แตกต่างจากรังสีแถมมาจากการสลายตัวตามค่าครึ่งชีวิตดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์การจับนิวตรอนของอะตอม A



รูปที่ 2.7 การปลดปล่อยรังสีฟอตอนแกมมาจากปฏิกิริยานิวตรอน

ปฏิกิริยานิวตรอนที่ให้รังสีฟอตอนแกมมามีด้วยกัน 3 แบบคือ ปฏิกิริยาจับนิวตรอน (n, γ) ปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (n, n'γ) และ ปฏิกิริยาการเกิดประจุ (n, αγ) หรือ (n, pγ) จากกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎอนุรักษ์พลังงานสามารถพิจารณาการเกิดปฏิกิริยา A(n, b)B โดยเขียนเป็นสมการได้

$$E_n + Q_0 = E_b + E_b + E_\gamma \quad \dots\dots(2.21)$$

$$Q_0 = C^2(m_A + m_n - m_b - m_B) \quad \dots\dots(2.22)$$

E_γ เป็นพลังงานของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากการกลับสู่สภาวะปกติของ B

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานของรังสีรอมด์แกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของธาตุบางชนิด (7)

Element	Crosssection (σ) barn	Atomic mass(A)	Energy (MeV)	Intensity (I) (photon/100 n)	Sensitivity ($I\sigma/A$)	Spectral contrast
N	0.075	14.007	10.828	15.0	0.080	P
			8.309	4.22	0.022	
			7.299	8.36	0.047	P
			6.321	16.65	0.089	P
			5.560	9.05	0.048	
			5.532	17.79	0.095	
			5.297	18.58	0.099	
			5.267	25.41	0.136	P
			4.508	15.81	0.084	P
			3.675	15.52	0.083	P
Fe	2.620	55.847	9.298	3.85	0.181	P
			7.646	22.14	1.040	P
			7.632	27.19	1.270	P
			7.279	4.60	0.216	P
			6.018	8.08	0.379	P
			5.921	8.29	0.389	P
			4.810	1.66	0.078	P
			4.407	1.31	0.061	
			4.219	4.02	0.188	P
			3.437	1.35	0.063	
Pb	0.170	207.190	7.368	94.77	0.077	P
			3.414	1.50	0.070	
			3.268	1.19	0.056	

* P - Prominent peak

2.3.2 ปริมาณการให้รังสีพร้อมต้นแกมมา

จำนวนรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากตัวอย่างที่บรรจุ N อะตอม เมื่อถูกนิวตรอนเข้าชนด้วยฟลักซ์ ϕ n.cm⁻².s⁻¹ ในเวลา t วินาที เขียนเป็นสมการได้

$$Y = N \cdot \phi \cdot t \sigma(n, \gamma) \quad \dots\dots(2.23)$$

สำหรับในสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ และบรรจุธาตุอยู่ 1 ชนิด ค่า total cross section σ_{ti} จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของนิวตรอนลดลง ดังนั้น ปริมาณรังสีแกมมาจากปฏิกิริยาจะต้องคูณด้วยแฟคเตอร์ $(1 - \exp(-\Sigma_a t))$ โดยที่

$$\Sigma_{total} = \sum_{i=1}^n N_i(\sigma_i) \quad \dots\dots(2.24)$$

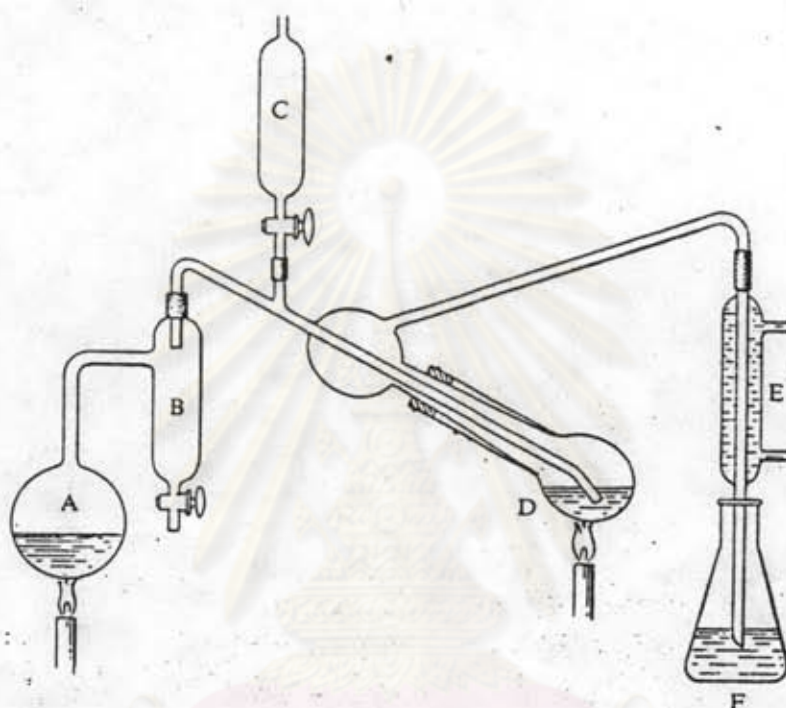
2.4 วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนวิธีต่าง ๆ ที่ใช้กันในปัจจุบัน

ตามปกติวิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนใช้วิธีการทางเคมีดังนี้

2.4.1 วิธี Kjeldahl Method มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 Prereduction เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลาย แล้วนำสารละลายนั้นมา 10 ml มาใช้ในการวิเคราะห์
- ขั้นตอนที่ 2 Digestion ทำการแยกสารละลายตัวอย่างที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียโดยมีสมการดังนี้

$$\text{Organic (C, H, N)} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{HSO}_4$$
 นอกจากเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นแล้วยังเติม K₂SO₄ ลงไปเพื่อทำให้จุดเดือดสูง และมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น CuSO₄ เพื่อทำให้กระบวนการแยกได้เร็วขึ้น จนทำให้น้ำจากสารละลายไ้ใช้เวลาประมาณ 1 ชม. ปล่อยให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่น
- ขั้นตอนที่ 3 distillation โดยเติม NaOH 40% แล้วนำไปกลั่นเพื่อเก็บ NH₃ จะเกิดปฏิกิริยา วิชาเก็บ NH₃(g) โดยใช้ 4% สารละลายกรดบอริก 50 ml ในขวดรูปกรวยขนาด 500 ml.
- ขั้นตอนที่ 4 titration นำสารละลายในขวดรูปกรวย titrate กับ 0.1N H₂SO₄



รูปที่ 2.8 การกลั่นโดยวีซี Kjeldahl

A = Steam generator

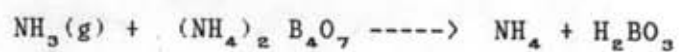
B = Steam trap

C = บรรจุ 40% NaOH

D = กรวยกลั่น บรรจุสารละลาย NH_3

E = Water-Cooled Condenser

F = ขวด flask สำหรับเก็บก๊าซ $\text{NH}_3(\text{g})$ ภายใน flask มี boric acid ไว้สำหรับจับ $\text{NH}_3(\text{g})$ โดยมีสมการ



สูตรการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในสารอินทรีย์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} = (A-B) \times 14.0007 \times N / [10 \times \text{g}(\text{ของ Sample})] \dots (2.25)$$

A = ml ของ Acid ในการ titrate กับ Sample

B = ml ของ Acid ในการ titrate กับ Blank

N = Normality ของ Acid ที่ใช้ในการ titrate

Reagent ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไนโตรเจน โดยวิธี Kjeldahl

1. Conc H_2SO_4
2. 40% NaOH Solution
3. 4% Boric Acid
4. std H_2SO_4 Soln 0.1 N
5. Mixed indicator (methyl red + methylene blue)

ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Kjeldahl คือ

1. ขนาดของตัวอย่าง
 - ถ้าเป็นของแข็ง > 5 กรัม
 - ถ้าเป็นสารละลาย > 15 ml. (ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่)
2. ความสามารถในการวัด
 - (1-160) mg ไนโตรเจน

ข้อเสียของเทคนิค Kjeldahl คือ

ไม่สามารถทำการวัดไนโตรเจนในสารตัวอย่างที่เป็นองค์ประกอบที่แตกตัวได้ หรือสารอินทรีย์ที่มีแป้งอยู่มาก เป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่างและเวลาในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง

2.4.2 วิธีวิเคราะห์ด้วย CHN ELEMENTAL ANALYZER มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เตรียมเครื่อง CHN โดยไล่อากาศออกให้หมดในห้องเผาไหม้ โดยก๊าซ Ar หรือ He
- ขั้นตอนที่ 2 เตรียมตัวอย่างและสารมาตรฐาน โดยชั่งน้ำหนักก่อนที่จะทำการเผาในแคปซูลแพลทินัม
- ขั้นตอนที่ 3 ส่งตัวอย่างเข้าไปเผาในห้องเผาไหม้อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียสโดยใช้หลักการของ transfer โดยแรงแม่เหล็ก แล้วใช้หัววัด (Thermal Conductivity Detector)

หลักการทำงานของ (Thermal Conductivity Detector) TCD

ภายใน TCD นั้น โดยปกติแล้วมีเส้นลวดแพลทินัมหรือทังสเตน ซึ่งทำหน้าที่เป็นลวดความต้านทานในการตรวจวัด การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเส้นลวดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซที่ไหลผ่านเส้นลวดในอัตราเร็วคงที่ ถ้ามีก๊าซของสารประกอบชนิดอื่นผสมอยู่กับก๊าซพาทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนทำให้เส้นลวดความต้านทานของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป จากการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยการต่อเส้นลวดที่เป็น Reference กับลวด TCD เป็นแบบวงจรบริดจ์ ทำให้รับรู้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวโดยจะมีกระแสไหลผ่านขั้วนำกระแสที่เกิดขึ้นที่จุดนี้ไปยังวงจรขยายสัญญาณ แล้วทำการประมวลผลต่อไป

TCD เหมาะสำหรับวิเคราะห์สารประกอบต่าง ๆ ได้หลายชนิดได้แก่

1. Fatty Acid เช่น Propionic Acid, Acrylic Acid
2. Inert inorganic gases เช่น N_2 , CO_2 , CO, H_2 , O_2
3. Liquid and Solid Hydrocarbon เช่น Petroleum Benzene Xylene Isomer
4. Organic Halogen Compound เช่น Freon-11
5. Oxygen Compounds เช่น Esters, Ethanol, Ketones
6. Organic Nitrogen Compounds เช่น toluene-diisocyanate
7. Inorganic gas and Volatile Organic Substances in blood เช่น O_2 , N_2 , CO_2 , CO, N_2O

การวิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลา 12 min/cycle

ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ 1.3 mg. ค่าความแน่นอนในการวัด C,H,N ภายใน $\pm 0.4\%$

ข้อเสียของการวิเคราะห์แบบการวัด Thermal Conductivity Analyzer (CHN) คือ ไม่สามารถทำการวัดไนโตรเจนในสารตัวอย่างที่เป็นองค์ประกอบในวัฏกระเปิดได้และเป็นการทดสอบโดยทำลายสารตัวอย่าง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย