

# บทที่ 16

## รังสีเคมี

### (Radiochemical Methods)

ไอโซโทปกัมมันตรังสีธรรมชาติและที่ประดิษฐ์ขึ้นได้มีการนำไปพัฒนา วิธีวิเคราะห์เนื่องจากมีสภาพไวและความจำเพาะสูง วิธีรังสีเคมีให้ความแม่นยำและความเที่ยงดี วิธีนี้ไม่ต้องผ่านกระบวนการแยกทางเคมีเช่นวิธีอื่น

วิธีรังสีเคมีมีสามแบบ การวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสี (activation analysis) กัมมันตภาพของธาตุหนึ่งธาตุหรือมากกว่าหนึ่งธาตุในสารตัวอย่างถูกชักนำโดยการอาบรังสีด้วยอนุภาคที่เหมาะสม (ปกติใช้เทอร์มาลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์) แล้ววัดกัมมันตรังสี (radioactivity) วิธีการเจือจางไอโซโทป (isotope dilution) วิธีนี้เติมสารที่มีกัมมันตรังสีชนิดเดียวกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้จนถึงสมดุลแยกเอาองค์ประกอบที่สนใจมาวัดกัมมันตภาพ และวิธีวัดรังสี (radiometric) ใช้สารกัมมันตรังสีแยกธาตุที่สนใจออกจากสารตัวอย่างทั้งหมด วัดกัมมันตภาพของสารที่แยกมาได้หรือวิเคราะห์สารที่สนใจโดยการไทเทรตกับสารกัมมันตรังสีแล้วหาจุดยุติโดยการวัดค่ากัมมันตภาพ

### ไอโซโทปกัมมันตรังสี Radioactive Isotopes

นิวเคลียสอะตอมทุกชนิดมีโปรตอนและนิวตรอนภายในนิวเคลียส ยกเว้นนิวเคลียสไฮโดรเจนที่มีเฉพาะโปรตอน สมบัติเชิงเคมีของอะตอมหาได้จากเลขอะตอม  $Z$   $Z$  แทนเลขโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียส ผลรวมของเลขนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสคือมวลเชิงอะตอม (atomic mass) ไอโซโทปของธาตุคืออะตอมที่มีเลขอะตอมเท่ากันแต่เลขมวลต่างกัน นั่นคือนิวคลีไอของไอโซโทปมีเลขโปรตอนเท่ากันต่างกันเฉพาะเลขนิวตรอน

ไอโซโทปเสถียร (stable isotopes) เป็นไอโซโทปที่ไม่มีการสลายทันทีทันใด ไอโซโทปกัมมันตรังสี เป็นไอโซโทปที่มีการแตกสลายทันทีทันใดแล้วให้ไอโซโทปที่เสถียร การแตกสลายหรือการสลายกัมมันตรังสี (radioactive decay) ของไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะมีการ

เปล่งรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา พร้อมกับให้อนุภาคพื้นฐาน เช่น อิเล็กตรอน โพสิตรอนและนิวเคลียสฮีเลียม หรือโดยการแบ่งแยกตัว (fission) ของนิวคลีไอ แล้วให้นิวคลีไอที่มีขนาดเล็กลง

### ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายกัมมันตรังสี (Radioactive Decay Products)

ตาราง 16-1 เป็นชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายผลิตภัณฑ์นี้ให้รังสีกัมมันตรังสี ผลิตภัณฑ์นี้ใช้หลักในการวิเคราะห์เชิงเคมี

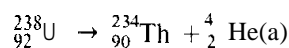
### กระบวนการสลาย (Decay Process)

กระบวนการสลายกัมมันตรังสีมีหลายแบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้แสดงในตาราง 16-1

ตาราง 16-1 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยออกจากไอโซโทปกัมมันตรังสี

อนุภาค	สัญลักษณ์	ประจุ	เลขมวล
แอลฟา	$\alpha$	+2	4
อิเล็กตรอน	$\beta^-$	-1	1/1840
โพสิตรอน	$\beta^+$	+1	1/1840
แกมมาเรย์	$\gamma$	0	0
เอกซเรย์	X	0	0
นิวตรอน	n	0	1
นิวตริโน	$\nu$	0	0

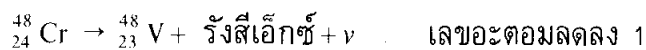
**อนุภาคแอลฟา (Alpha particle)** อนุภาคแอลฟาเกิดจากการแตกสลายของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีเลขอะตอมมาก เช่น ไอโซโทปที่มีมวลน้อยกว่า 150 ( $Z = 60$ ) ให้อนุภาคแอลฟา



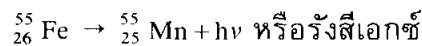
**อนุภาคแอลฟา** เป็นนิวเคลียสของฮีเลียมมีประจุบวกสองมีมวลสี่อนุภาคแอลฟาได้จากการแตกสลายของนิวคลีไอที่มีขนาดใหญ่ อนุภาคแอลฟาที่ได้จากการแตกสลายของไอโซโทปกัมมันตรังสีจะมีพลังงานค่าเดียว (monoenergetic) หรือมีการกระจายในช่วงแคบ ๆ ไม่ต่อเนื่อง เมื่ออนุภาคนั้นชนกับสารอื่นจะถ่ายโอนพลังงานให้กับสารอื่นและตัวมันเองต้องเปลี่ยนเป็นอะตอมฮีเลียมโดยการจับอิเล็กตรอนสองตัวจากสิ่งแวดล้อม อนุภาคนี้นี้มีขนาด

ใหญ่ (มีประจุและมวลมาก) ยังผลให้เกิดไอออนคู่ (ion pairs) ภายในสารขณะที่มันเดินทางผ่าน คุณสมบัตินี้ใช้ตรวจหาอนุภาคได้อนุภาคนี้มีขนาดใหญ่จึงมีความสามารถในการทะลุทะลวง (penetrate) ต่ำ อนุภาคนี้หาได้จากการวัดทางเดินหรือพิสัย (range) ที่อนุภาคแอลฟาให้ไอออนคู่ในตัวกลาง (ปกติใช้อากาศ)

**อนุภาคบีตา** (Beta particle) อนุภาคบีตาเกิดจากนิวเคลียสที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนนิวตรอนต่อโปรตอนหรือโปรตอนต่อนิวตรอนกันทันทีทันใด อนุภาคบีตาที่เป็นอิเล็กตรอนมีประจุลบ (negatron) ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบแรก ถ้าอนุภาคบีตาที่เป็นอิเล็กตรอนมีประจุบวก (positron) ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบหลัง และการจับอิเล็กตรอนหรือการจับ K electron (or K capture) ปฏิกริยาของสสารที่ให้อนุภาคบีตาจึงมีสามแบบ

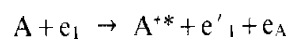


$\nu$  ในสองสมการแรกแทนนิวตริโน (neutrino) อนุภาคนี้ไม่มีความสำคัญทางการวิเคราะห์กระบวนการสุดท้ายให้รังสีเอกซ์ โดยการจับอิเล็กตรอน (electron capture) ปฏิกริยาการจับอิเล็กตรอน นิวเคลียสจับอิเล็กตรอนวงในสุด (วง K) ปฏิกริยานี้เป็นปฏิกริยานิวเคลียร์อิเล็กตรอนวงนอก L ที่มีพลังงานน้อยกว่าจะวิ่งไปแทนที่ที่ว่างวงใน (K) พร้อมทั้งปล่อยพลังงาน (รังสีเอกซ์) ออกมา



การสลาย ของสารกัมมันตรังสีให้อนุภาคบีตาสองชนิด  $\beta^-$  (เนกาตรอน) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดเมื่อจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเพิ่มขึ้น 1  $\beta^+$  (โพสิตรอน) เป็นอิเล็กตรอนที่มีประจุ +  $\beta^+$  เกิดเมื่อจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสลดลงหนึ่ง  $\beta^+$  มีชีวิตอยู่เพียงชั่วคราว แล้วจากไปโดยการทำปฏิกริยากับอิเล็กตรอนให้สองแกมมาโฟตอน (เกิดประลัยหรือ annihilate)

เมื่อมีอิเล็กตรอนวิ่งชนอะตอม A อาจเกิดปฏิกริยากระตุ้น



$e_1$  แทนอิเล็กตรอนที่วิ่งชน  $e'_1$  แทนอิเล็กตรอนตัวเดิมที่วิ่งออกมาแต่มีพลังงานลดลง  $e_A$  แทนอิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมที่หลุดออกมา

เมื่อมีการแตกสลายให้อนุภาคบีตาจะมีการให้พลังงานแบบต่อเนื่องจากค่าที่เกือบเป็นศูนย์ถึงค่าสูงสุดแล้วแต่ลักษณะของการสลาย อนุภาคบีตามีขนาดเล็กจึงไม่เกิดไอออนคู่เมื่อเดินทางผ่านสสารแต่จะเกิดการกระเจิงแทนจึงหาทางเดินหรือพิสัย โดยวิธีให้อนุภาคเดินทางผ่านอากาศไม่ได้ อนุภาคบีตามีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแอลฟา  $1/1700$  เท่า อนุภาคบีตามีความสามารถในการทะลุทะลวง (penetrate) ดีกว่าแอลฟา พลังงานของอนุภาคบีตาได้จากความหนาของตัวดูดกลืน (absorber) ปกติใช้อะลูมิเนียมหยุดอนุภาคนี้ ความหนาของตัวดูดหรือพิสัย (range) มีค่าเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การเปล่งรังสีแกมมา (Gamma Ray Emission) นิวเคลียสที่มีการปล่อยอนุภาคแอลฟาและบีตาแล้วนิวเคลียสนี้จะอยู่ในสถานะกระตุ้นที่ไม่เสถียร นิวเคลียสนี้จะกลับสู่สถานะพื้นพร้อมกับปล่อยพลังงานรังสีแกมมา (รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า) ที่มีพลังงานสูงมากออกมา โดยเกิดขึ้นขั้นตอนเดียวหรือหลายขั้นตอน สเปกตรัมที่ได้จากรังสีแกมมาของแต่ละนิวเคลียสมีค่าเฉพาะตัวจึงใช้หาไอโซโทปกัมมันตรังสีได้

รังสีแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงมาก เมื่อรังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยากับสสารรังสีแกมมาจะปล่อยพลังงานออกมาได้สามแบบ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปฏิกิริยาคอมป์ตัน (Compton effect) และการผลิตไอออนคู่ (Pair Production)

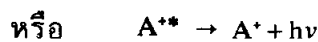
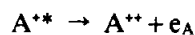
ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เกิดจากรังสีแกมมาที่มีพลังงานน้อยชนธาตุที่เป็นเป้า (target) หรือตัวดูด (absorber) ที่มีขนาดใหญ่ (ธาตุนหนัก) กระบวนการนี้รังสีแกมมาถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนที่อยู่วงในของธาตุที่เป็นเป้าหมายหมดพร้อมกับปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเป้าหมายหนึ่งตัว (การดูดกลืนรังสีเอกซ์)

ปฏิกิริยาคอมป์ตัน (Compton effect) เกิดจากรังสีแกมมาที่มีพลังงานปานกลาง (น้อยกว่า 3 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) ถ่ายโอนพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอนของธาตุที่มีขนาดเล็ก (ธาตุนเบา) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมพร้อมกับโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลงจากพลังงานของรังสีแกมมาและออกมา

การผลิตไอออนคู่ (Pair Production) ของโพสิตรอนและอิเล็กตรอนเกิดจากรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 1.02 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ถูกแอนนิฮิลเลต (annihilated) แล้วตามด้วยอันตรกิริยากับนิวเคลียสที่มีอะตอมขนาดใหญ่ กระบวนการนี้จะเกิดได้เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานนี้มีค่าเป็นสองเท่าของมวล

อิเล็กตรอนที่อยู่หนึ่ง เมื่อโพสิตรอนและอิเล็กตรอนรวมกันเข้าจะเกิดแอนนิฮิเลตสองรังสีแกมมา โดยแต่ละรังสีแกมมามีพลังงาน 0.51 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์

การเปล่งรังสีเอกซ์ (X-Ray Emission) กระบวนการที่นิวเคลียร์มีการสูญเสียอิเล็กตรอนวงในสุดจากอะตอมมีสองแบบ รังสีเอกซ์เกิดจากอิเล็กตรอนนิกแทรนซ์ชั้น โดยอิเล็กตรอนวงนอก (ส่วนใหญ่ L) วิ่งเข้าแทนที่อิเล็กตรอนวงในสุดที่ว่าง (K) พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมา (รังสีเอกซ์) แบบแรกเป็นการจับอิเล็กตรอน นิวเคลียสจับอิเล็กตรอนวงในสุด อิเล็กตรอนวงนอกวิ่งเข้าไปแทนที่พร้อมกับเปล่งรังสีเอกซ์ แบบที่สองเป็นการเปลี่ยนภายใน (internal conversion) เมื่อมีรังสี (พลังงาน) ชนนิวเคลียส นิวเคลียสจะเปลี่ยนไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นโดยอยู่ในรูปไอออนสถานะกระตุ้น ไอออนในสถานะกระตุ้นไม่เสถียรจะผ่อนคลายโดยการให้ฟลูออเรสเซนซ์ หรือออเกอร์อิเล็กตรอน ( $e_A$ ) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ



ผลต่างระหว่างพลังงานของนิวเคลียร์แทรนซ์ชั้นกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาทำให้วงในสุด K หรือ L ขาดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนวงนอกวิ่งเข้าไปแทนที่ (อิเล็กตรอนนิกแทรนซ์ชั้น) พร้อมกับเปล่งรังสีเอกซ์

### หน่วยกัมมันตภาพรังสี (Units of Radioactivity)

หน่วยกัมมันตภาพรังสี มีหลายหน่วย หน่วยที่นิยมใช้ได้แก่

คูรี (Curie) เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณหรือความมากน้อยของสารรังสี โดยกำหนดว่านิวไคลด์ที่มีการแตกสลาย (disintegrate)  $3.7 \times 10^{10}$  ครั้งต่อวินาที เรียกว่านิวไคลด์นั้นมีปริมาณรังสี 1 คูรี

เรินต์เกน (Roentgen) เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ โดยกำหนดว่ารังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ใดที่ทำให้อากาศหนัก 0.001293 กรัมเกิดประจุไฟฟ้า 1 อีเอสยู รังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์นี้มีปริมาณ 1 เรินต์เกน

เรม (Rem) เป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับโดยคิดจากผลทางชีววิทยาที่เกิดแก่ร่างกาย โดยกำหนดว่าปริมาณรังสีใดที่ก่อให้เกิดผลทางชีววิทยากับร่างกาย เท่ากับผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ 1 แรดแล้ว เราเรียกปริมาณรังสีนี้ว่า 1 เรม

### อัตราการสลายของกัมมันตรังสี (Radioactive Decay Rates)

กัมมันตรังสีมีการสลายตามยถากรรม นิวคลีโอไอที่มีการสลายเขียนแทนได้ด้วยสมการอันดับหนึ่ง

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{.....(16.1)}$$

N แทนจำนวนอะตอมของนิวคลีไอกัมมันตรังสีในสารตัวอย่าง ณ เวลา t λ ค่าคงที่การสลายของไอโซโทปกัมมันตรังสี (ต่อวินาที) เมื่อจัดสมการนี้ใหม่และอินทิเกรตจากช่วงเวลา t = 0 ถึง t = t (จำนวนนิวคลีไอกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างจาก N<sub>0</sub> ถึง N) ได้

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \text{.....(16.2)}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{.....(16.3)}$$

ครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีคือเวลาที่ทำให้จำนวนอะตอมใหม่ลดลงครึ่งหนึ่งจากอะตอมเดิม หรือ  $N = \frac{N_0}{2}$  เมื่อแทนค่านี้ลงในสมการ 16.2 ได้

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \text{.....(16.4)}$$

ครึ่งชีวิตของสปีชีส์กัมมันตรังสีมีช่วงเวลาจากเศษของวินาทีถึงล้านปี

การวัดกัมมันตรังสีไม่สามารถหาจำนวนอะตอม N ได้โดยตรง แต่วัดเป็นกัมมันตภาพ (activity) ปกติวัดเป็นอัตราการสลาย (-dN/dt) กัมมันตภาพ A แปรโดยตรงกับจำนวนอะตอม N

$$A = \lambda N$$

$$-\frac{dA}{dt} = -\lambda \frac{dN}{dt} \quad \text{.....(16.5)}$$

C สัมประสิทธิ์ในการตรวจหา ค่านี้เป็นค่าคงที่ C ขึ้นกับชนิดของเครื่องตรวจหาประสิทธิภาพการนับอัตราการสลาย รูปทรงทางเรขาคณิตของสารตัวอย่างและเครื่องตรวจหา จากกฎการสลาย 16-3 เขียนเป็นกัมมันตภาพได้

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

**ตัวอย่าง การใช้สถิติช่วยในการนับ (Counting Statistics)**

เครื่องตรวจหากัมมันตภาพรังสีนั้นรังสีที่เปล่งจากสารกัมมันตรังสีในรูปอิเล็กทรอนิกส์ พัลส์ โดยทำการนับในช่วงเวลาที่แน่นอน ตาราง 16-2 เป็นข้อมูลการนับการสลายของสารกัมมันตรังสีในช่วงเวลา 12 นาที โดยทำการนับทุกหนึ่งนาที กระบวนการสลายของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม (random) ข้อมูลที่ได้มีการแปรผัน จากข้อมูลในตารางนี้มี

การกระจาย SS เคนต์ต่อนาที่ (ค่าสูงสุด - ค่าต่ำสุด) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 13.7 เคนต์ต่อ  
 นาที่ ถ้าข้อมูลน้อยกว่า 20 ใช้  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$  .....(16.6)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

ถ้าข้อมูลน้อยกว่า 20 ใช้

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \mu)^2}{N}}$$
 .....(16.7)

**ตาราง 16-2**

การแปรผันที่ได้จากการนับแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีในหนึ่งนาที่

นาที่	เคนต์	นาที่	เคนต์
1	180	7	168
2	187	8	170
3	166	9	173
4	173	10	132
5	170	11	154
6	164	12	167

จำนวนนับที่นับได้ทั้งหมด = 2004

ค่าเฉลี่ยที่นับได้ต่อนาที่ =  $\bar{X} = 167$

แม้ว่าการสลายของสารกัมมันตรังสีเป็นแบบสุ่ม ถ้าทำการนับรังสีในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือนับสารที่มีความแรงรังสีน้อย ๆ ค่าที่นับได้ไม่สามารถแจกแจงโดย เกอซ์เซียน เพราะข้อมูลที่นับได้จะไม่มีการแจกแจงแบบสมมาตรรอบค่าเฉลี่ย

การอธิบายข้อมูลที่นับได้จากสารกัมมันตรังสี ควรใช้การแจกแจงแบบพอยซ์ชั้นอธิบาย โดย

$$y = \frac{\mu^{X_i} e^{-\mu}}{X_i!}$$
 ..... (16.8)

$Y$  คือความถี่ที่ได้จากการนับจากเครื่องนับได้  $X_i$  และ  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยของการนับของข้อมูลซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง

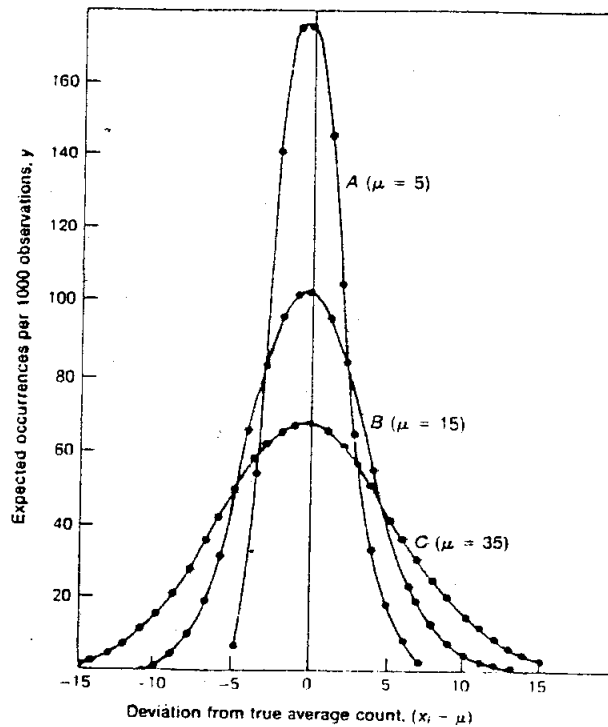
รูป 16-1 เป็นเคอร์ฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลจากสมการ 16-8 เคอร์ฟนี้แสดงค่าที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยจริง ( $X_i - \mu$ ) ใช้  $\mu$  เมื่อทำการนับซ้ำกันไม่น้อยกว่า 1000 ครั้ง รูป A แสดงการแจกแจงที่ได้จากการนับสารตัวอย่างที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยจริง 5 รูป B และ C ค่าที่นับได้มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยจริง 15 และ 35 ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $\mu$  เพิ่มขึ้น ส่วนค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ลดลง เคอร์ฟที่ได้จากการนับน้อยครั้งจะไม่สมมาตร ปกติถ้าทำการนับสารตัวอย่างมากกว่า 100 ครั้ง ข้อมูลที่ได้จากการนับการสลายของสารแทนได้ด้วยเกอชเชียน ถ้าน้อยกว่านี้ใช้พอยซ์ชัน

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่นับได้ (Standard Deviation of Counting Data) ความกว้างของเคอร์ฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลการแจกแจงแบบพอยซ์ชันไม่ขึ้นกับจำนวนครั้งที่นับ ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการนับจึงแทนด้วย

$$\sigma_M = \sqrt{M} \quad \dots\dots(16.9)$$

M แทนเลขที่นับได้ในเวลาที่กำหนดให้  $\sigma_M$  แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงแบบพอยซ์ชัน

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ( $\sigma_M$ ) เขียนแทนด้วย



รูป 16-1 การแจกแจงข้อมูลการนับ



$$(\sigma_M)_r = \frac{\sigma M}{M} = \frac{\sqrt{M}}{M} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad \dots(16.10)$$

แม้ว่าค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เพิ่มเมื่อจำนวนนับเพิ่ม แต่ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ลดลง

การวัดกัมมันตภาพของสารมักแทนด้วยอัตราการนับ (counting rate)  $R$  เคานต์ต่อนาที มากกว่าการนับในช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้น

$$R = \frac{M}{t} \quad \dots\dots(16.11)$$

$t$  เวลาเป็นนาทีที่ต้องการนับ  $M$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อัตราการนับ  $\sigma_R$  ได้จากการหารสมการ 16-9 ด้วย  $t$

$$\sigma_R = \frac{\sigma M}{t} = \frac{\sqrt{M}}{t}$$

เมื่อแทนค่าสมการนี้ด้วยสมการ 16-11 ได้

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{R}}{t} \quad \dots\dots(16.12)$$

ค่าเบี่ยงเบนอัตราการนับสัมพัทธ์แทนด้วย

$$(\sigma_R)_r = \frac{\sigma R}{R} = \frac{\sqrt{R/t}}{R} = \frac{1}{\sqrt{Rt}} \quad \dots\dots(16.13)$$

ตัวอย่าง จงคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ของอัตราการนับสำหรับ

- (ก) จากข้อมูลแรกของตาราง 16-2
- (ข) ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในตาราง
- (ค) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอัตราการนับ

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{R}}{t} = \frac{\sqrt{180}}{1} = 13.4 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

$$(\sigma_R)_r = \frac{13.4}{180} \times 100 = 7.4 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

- (ข) จากค่าเฉลี่ย  $R = 20004/12 = 167$

$$\sigma_R = \sqrt{167/1} = 12.9 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

$$(\sigma_R)_r = \frac{12.9}{167} \times 100 = 7.7 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับการนับ (Confidence Intervals for Counts) ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับการนับคือ ขีดจำกัดที่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยจริงหรือโอกาสที่วัดได้ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วัดได้แทนด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจริง ( $S \rightarrow \sigma$ ) ได้ ขีดจำกัดความเชื่อมั่น C.I. หาได้จากสมการ

$$\mu = X + Z\sigma$$

สำหรับอัตราการนับ สมการนี้เขียนในรูป

$$\text{C.I. สำหรับ } R = R + Z\sigma_R \quad (16.14)$$

Z คือระดับความเชื่อมั่น ดูได้จากตารางทั่ว ๆ ไป

**ตัวอย่าง** จงคำนวณขีดจำกัดความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ (ก) ข้อมูลแรกในตาราง 16-2 (ข) ค่าเฉลี่ยของทุกข้อมูลในตาราง

(ก) จากตัวอย่างแรก  $\sigma_R = 13.4$  เคานต์ต่อนาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์  $Z = 1.96$

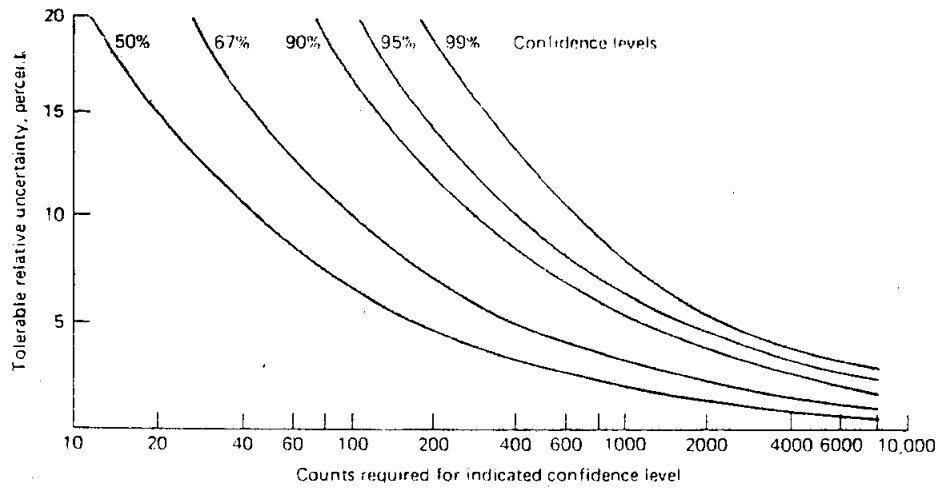
$$\begin{aligned} \text{ขีดจำกัดความเชื่อมั่น} &= 180 + 1.96 \times 13.4 \\ &= 180 \pm 26 \text{ เคานต์ต่อนาที} \end{aligned}$$

(ข) ค่าเฉลี่ยในตารางนี้  $\sigma_R = 3.7$  เคานต์ต่อนาที

$$\begin{aligned} \text{ขีดจำกัดความเชื่อมั่น} &= 167 \pm 3.7 \times 1.96 \\ &= 167 \pm 7 \text{ เคานต์ต่อนาที} \end{aligned}$$

มีโอกาส 95 ใน 100 ที่ค่าอัตราการนับจริงจะอยู่ระหว่าง 160 และ 174 เคานต์ต่อ นาที (เฉลี่ยการนับในช่วง 12 นาที) (ก) มีโอกาส 95 ออกจาก 100 ที่อัตราการนับจริงอยู่ระหว่าง 154 และ 206 เคานต์ต่อนาที

รูป 16-2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการนับทั้งหมดและระดับความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ (คำนวณจากสมการ 16-14) แกนราบเป็นแบบล็อก ค่าความไม่แน่นอนลดลง 10 เท่าขณะที่ค่าที่นับได้เพิ่มขึ้น 100 เท่า



รูป 16-2 ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในการนับ

การแก้ค่าภูมิหลัง (Background Corrections) ค่าที่นับได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีรังสีเคมีอาจมีผลอื่นนอกจากสารตัวอย่างด้วย เช่นค่าภูมิหลังที่เกิดจากไอโซโทปเรดอนที่อยู่ในบรรยากาศ ในสารที่ใช้ในการก่อสร้างห้องปฏิบัติการ รังสีคอสมิกสารรังสีที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ สารกัมมันตรังสีที่อยู่ในบรรยากาศโลก ค่าจริงที่นับจากสารตัวอย่างจึงต้องแก้ค่าภูมิหลัง ช่วงเวลาที่ใช้นับค่าภูมิหลังมักใช้ต่างจากสารตัวอย่าง อัตราการนับที่ถูกต้องหาได้จาก

$$R_c = R_x - R_b \quad \text{.....(16.15)}$$

$R_c$  อัตราการนับที่แก้ไข  $R_x$  และ  $R_b$  อัตราการนับสารตัวอย่างและภูมิหลัง การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับ  $R_c$  ในสมการ 16-15 ทำโดยใช้สมการ

$$\sigma^2_{R_c} = \left( \frac{SR_c}{SR_x} \right)^2 \sigma^2_{R_x} + \left( \frac{SR_c}{SR_b} \right)^2 \sigma^2_{R_b} \quad \text{.....(16.16)}$$

ถ้าใช้อนุพันธ์ย่อยของสมการ 16.15 โดยให้  $R_b$  และ  $R_x$  คงที่ให้

$$\left( \frac{SR_c}{SR_x} \right)_{R_b} = 1 \text{ และ } \left( \frac{SR_c}{SR_b} \right)_{R_x} = -1$$

แทนค่านี้ลงในสมการ 16.16 และใส่รากที่สองทั้งสองข้างจะได้สมการ

$$\sigma_{R_c} = \sqrt{\sigma^2_{R_x} + \sigma^2_{R_b}}$$

แทนค่า  $\sigma_{R_x}$  และ  $\sigma_{R_b}$  โดยใช้สมการ 16.12 จะได้

$$\sigma_{R_c} = \sqrt{(R_x/t_x) + (R_b/t_b)} \quad \dots\dots(16.17)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ( $\sigma_{R_c}$ )<sub>r</sub> เขียนได้เป็น

$$(\sigma_{R_c})_r = \frac{\sqrt{(R_x/t_x) + (R_b/t_b)}}{R_x - R_b} \quad \dots\dots (16.18)$$

ตัวอย่าง การนับสารตัวอย่างหนึ่งใช้เวลานับ 10 นาที นับได้ 1800 เคานต์ต่อนาที ส่วนการนับภูมิหลังใช้เวลานับ 4 นาทีนับได้ 80 เคานต์ต่อนาที จงคำนวณความไม่แน่นอนสัมบูรณ์ของอัตราการนับที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

$$R_x = \frac{1800}{10} = 180 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

$$R_b = \frac{80}{4} = 20 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ 16.17 ได้

$$\sigma_{R_c} = \sqrt{\frac{180}{10} + \frac{20}{4}} = 6.2 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ขีดจำกัดความเชื่อมั่น

$$= (180 - 20) \pm 1.96 \times 6.2$$

$$= 160 \pm 12 \text{ เคานต์ต่อนาที}$$

มีโอกาส 95 ใน 100 ที่จะนับสารตัวอย่างได้ระหว่าง 148 และ 172 เคานต์ต่อนาที

จากตัวอย่างข้างบนแสดงว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเมื่อค่าภูมิหลังที่นับได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่นับได้เทียบกับสารตัวอย่าง การแบ่งเวลาการนับระหว่างการนับค่าภูมิหลังและสารตัวอย่างให้มีผลดีที่สุดหาได้จาก

$$\frac{t_b}{t_x} = \sqrt{\frac{R_b}{R_x}} \quad \dots\dots(16.19)$$

การแก้ไขเวลาที่เครื่องนับหยุดนับ (Dead time Correction) เครื่องตรวจหารังสีมีเวลาที่เครื่องนับหยุดนับ ขณะที่เครื่องนับไม่นับรังสีหรืออนุภาคที่วิ่งเข้าชนเครื่องนับ เวลาที่เครื่องนับหยุดนับ  $\pi$  หาได้จากการเทียบมาตรฐานจากการนับรังสีจากสารกัมมันตรังสี (R) และการแก้ไขค่าการนับระหว่างเครื่องนับหยุดนับ อัตราการนับที่แก้ไขแล้ว  $R^*$  หาได้จาก

$$R^* = \frac{R}{1 - R\tau} \quad \dots\dots (16.20)$$

**ตัวอย่าง** ถ้าเครื่องนับมีเวลาหยุดนับนาน 250 ไมโครวินาที นับสารตัวอย่างได้ 240 เคานต์ต่อวินาที จงหาค่าการนับที่แก้ไขการหยุดนับจากเครื่องนับหยุดนับ

$$\begin{aligned} R^* &= \frac{R}{1 - R\tau} \\ &= \frac{240}{1 - 250 \times 10^{-6} \times 240} \\ &= 255 \text{ เคานต์ต่อวินาที} \end{aligned}$$

### วิชาการอุปกรณ์ Instrumentation

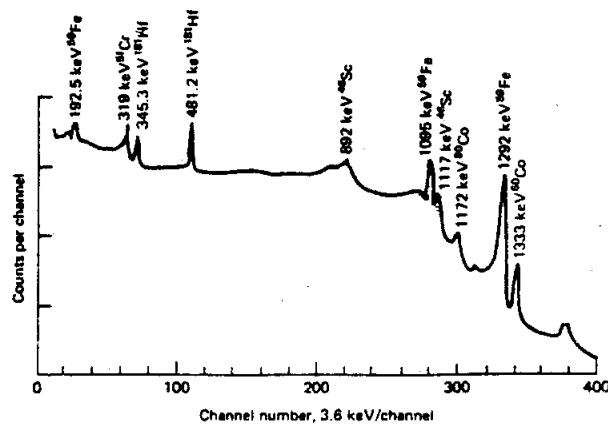
รังสีจากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีตรวจหาได้จากเครื่องตรวจหาชนิดใช้แก๊ส ตรวจนับการเปล่งแสงวับ เครื่องตรวจหาสารกึ่งตัวนำ เครื่องตรวจหาพวกนี้ไวต่ออนุภาคแอลฟา บีตาและรังสีแกมมา เครื่องนับเหล่านี้เมื่อดูดกลืนอนุภาคเหล่านี้จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นไอออนคู่ เครื่องตรวจหาจะนับอิเล็กทริกพัลส์ของแต่ละอนุภาค

**การวัดอนุภาคแอลฟา** (Measurement of Alpha Particles) สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ความแรงของอนุภาคแอลฟาต้องบางมากเพื่อลดการดูดกลืนร่วม หน้าต่างระหว่างสารตัวอย่างและเครื่องนับต้องบางเช่นกัน เพื่อตัดปัญหาการดูดกลืนจึงวัดอนุภาคแอลฟาที่ออกจากสารตัวอย่าง ภายในเครื่องนับชนิดแก๊สโฟลว์พรอพอร์ชันนัล (gas flow proportional counter) ที่ไม่มีหน้าต่าง อนุภาคแอลฟามีพลังงานแน่นอนจึงใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพได้ เครื่องวิเคราะห์แบบพัลส์ไฮท์ (pulse height analyzer) ใช้วัดอนุพันธ์ของอนุภาคแอลฟาได้

**การวัดอนุภาคบีตา** (Measurement of Beta Particles) อนุภาคบีตาที่มีพลังงานมากกว่า 0.2 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์นับได้โดยการเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นแผ่นมีขนาดสม่ำเสมอ

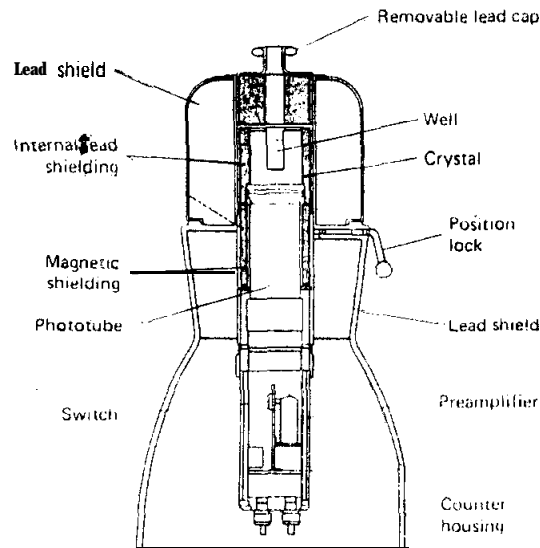
และนำไปนับโดยใช้เครื่องนับไกเกอร์ (Geiger counter) หรือเครื่องนับพรอพอร์ชันนัลที่มีหน้าต่างบาง ๆ สารตัวอย่างที่ให้อนุภาคบีตาพลังงานต่ำกว่านี้ (0.2 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) เช่น คาร์บอน-14 กำมะถัน-35 และทริเทียมใช้เครื่องนับการเปล่งแสงวับชนิดของเหลว วิธีการเตรียมสารตัวอย่างให้นำสารตัวอย่างไปละลายในสารละลายของสารประกอบ การเปล่งแสงวับ แล้วนำสารละลายนี้ใส่ลงในภาชนะพลาสติกและนำไปวางระหว่างหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์สองอัน สัญญาณที่ออกจากหลอดวัดทั้งสองให้ผ่านเข้าสู่เครื่องนับแบบโคอิตเดนซ์ (coincidence counter) ซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บันทึกสัญญาณการนับเมื่อพัลส์จากเครื่องนับทั้งสองนับได้พร้อมกัน เครื่องนับแบบนี้จะลดค่าแบล็คกราวด์จากเครื่องนับและเครื่องขยายหรือไม่ค่อยมีการรบกวน (noise) อนุภาคบีตาให้พลังงานแบบต่อเนื่อง เครื่องวิเคราะห์แบบพัลส์ไฮท์จึงใช้ไม่ได้

**การวัดรังสีแกมมา (Measurement of Gamma Ray)** สารตัวอย่างที่ให้รังสีแกมมาต้องนับโดยใช้เครื่องนับแบบเดียวกับเครื่องนับรังสีเอกซ์ อนุภาคแอลฟาและบีตาที่รบกวนกรองออกได้โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมหรือไมลาร์ (mylar) แกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์คล้ายกับเครื่องวิเคราะห์แบบพัลส์ไฮท์ รูป 16-3 เป็นสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์



รูป 16-3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของลวดอะลูมิเนียมหลังจากอบรังสีนิวตรอน

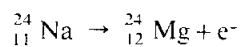
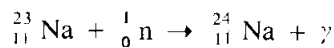
400 ช่อง พิคของธาตุต่าง ๆ ปรากฏบนแถบต่อเนื่องที่เกิดจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน รูป 16-4 เป็นภาพเครื่องนับการเปล่งแสงวับที่ใช้กับรังสีแกมมา สารตัวอย่างอยู่ในไวแอลเล็ก และวางในช่องรูปทรงกระบอกหรือในบ่อที่มีผลึกเปล่งแสงวับได้



รูป 16-4 เครื่องตรวจนับการเปล่งแสงวับแบบบ่อ

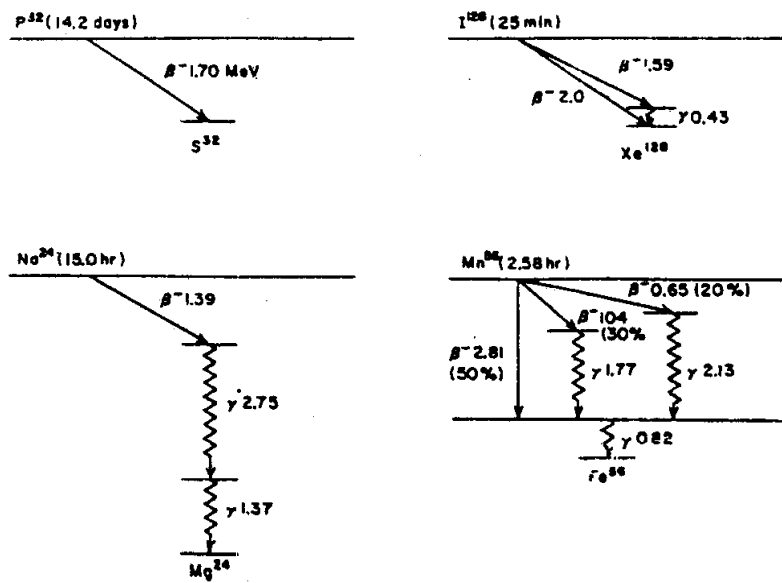
### การวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสี Activation Analysis

การวิเคราะห์โดยการอาบรังสี (irradiate) สารตัวอย่างด้วยนิวตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุ เช่น ไอออนโปรตอนหรือดิวเทอเรียม หรือฮีเลียม-3 ปกติใช้นิวตรอนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไอโซโทปกัมมันตรังสีแล้วนับรังสีที่เปล่งออกมา ธาตุส่วนมากเมื่อถูกอาบรังสีด้วยเทอร์มาลนิวตรอนให้สปีชีส์กัมมันตรังสีที่มีเลขอะตอมเท่าเดิมแต่มีมวลเพิ่มขึ้นหนึ่ง สปีชีส์นี้ไม่เสถียรจะเปล่งรังสีแกมมาออกมา



ไอโซโทปโซเดียม  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  เป็นสารกัมมันตรังสีมีครึ่งชีวิต 14.96 ชั่วโมงจะสลายให้  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$  พร้อมกับปล่อยอนุภาคบีตาซึ่งมีพลังงานสูงสุด 1.389 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์และพลังงานรังสีแกมมาสองค่า 1.368 และ 2.754 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูป 16-5 โซเดียมที่อยู่ในสารตัวอย่างวิเคราะห์ได้โดยอาบรังสีสารตัวอย่างด้วยเทอร์มาลนิวตรอนแล้ววัดพลังงานของอนุภาคบีตาหรือรังสีแกมมาที่ออกจากสารตัวอย่าง สภาพไฟในการวัดอนุภาคบีตาดีแต่ไม่ค่อยจำเพาะเนื่องจากอนุภาคบีตาที่ออกมามีพลังงานแบบต่อเนื่องจึงนิยมนับจากรังสีแกมมา

การวิเคราะห์โดยวิธีนี้มีสภาพไวสูง (high sensitivity) วิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุ และหาความเข้มข้นของธาตุได้ต่ำถึงส่วนในล้านส่วน



รูป 16-5 การสลายของไอโซโทปกัมมันตรังสีชนิดต่าง ๆ

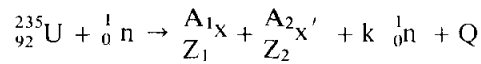
### นิวตรอนและแหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron and Neutron Sources)

นิวตรอนอิสระไม่เสถียรจะสลายให้โปรตอนและอิเล็กตรอน (ครึ่งชีวิต 12.5 วินาที) นิวตรอนอิสระไม่ค่อยพบเนื่องจากนิวตรอนชอบทำปฏิกิริยากับสสารที่อยู่รอบนิวตรอน และตัวมันก็สลายไป

คุณสมบัติของนิวตรอนดูจากพลังงานจลน์ในตัวมัน ปกติจัดนิวตรอนไว้สองแบบตามชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้อง ฟาสต์และสโลว์นิวตรอนกับเทอร์มาลนิวตรอน สโลว์นิวตรอนเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานจลน์น้อยกว่าประมาณ 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ( $10^3$  โวลต์) และฟาสต์นิวตรอนเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่าประมาณ 0.5 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ( $5 \times 10^5$  โวลต์) เทอร์มาลนิวตรอน เป็นนิวตรอนที่มีเทอร์มาลอีควิลิเบรียมกับสภาพแวดล้อม เช่นที่อุณหภูมิห้อง นิวตรอนนี้มีพลังงาน 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ก่อกำเนิดนิวตรอนโดยกระบวนการแตกตัว หลักการของเครื่องปฏิกรณ์พิจารณาได้จากเชื้อเพลิง  $^{235}_{92}P$  เมื่อมีการจับนิวตรอน นิวเคลียส  $^{235}_{92}P$  จะแตกตัวเป็นนิวคลีไอเบาและให้นิวตรอนจำนวนมาก





$$\text{โดย } A_1 + A_2 + k \qquad \qquad \qquad = \quad 236$$

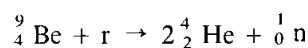
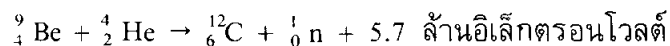
$$Z_1 + Z_2 \qquad \qquad \qquad = \quad 92$$

ปฏิกิริยานี้ให้นิวตรอนเฉลี่ย 2.5 ตัว เนื่องจากแต่ละนิวเคลียส  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ให้นิวตรอนจึงมีนิวตรอนจำนวนมากถูกปล่อยออกมา

การแบ่งแยกตัวของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ให้สเปกตรัมพลังงานจลน์แบบต่อเนื่องในช่วง 1 ถึง 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ นิวตรอนที่ออกมา มีพลังงานมาก (fast) การเปลี่ยนนิวตรอนนี้ให้เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานน้อย (slow) ทำได้โดยการผ่านนิวตรอนที่มีพลังงานมากเข้าไปในน้ำ ดิวเทอเรียมออกไซด์หรือแกรไฟต์ โดยสารเหล่านี้ทำตัวเป็นมอดเรเตอร์

นิวตรอนจากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี (Radioactive Neutron Sources) ไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นแหล่งให้นิวตรอนราคาถูก ความหนาแน่นนิวตรอนฟลักซ์อยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^8$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ขีดจำกัดการตรวจหาธาตุที่ได้จากแหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบนี้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ไม่ได้ นิวตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอโซโทปมีสองแบบ แบบแรกแหล่งกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี ได้แก่ ธาตุแทรนซิวเรเนียม ธาตุในหมู่ นี้มีการแบ่งแยกตัวแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous fission) ให้นิวตรอน เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 มีครึ่งชีวิต 2.6 ปี 3 เปอร์เซ็นต์ของธาตุนี้มีการแบ่งแยกตัวแบบเกิดขึ้นเอง ให้นิวตรอน 3.8 นิวตรอนต่อการแบ่งแยกตัวหนึ่งครั้ง ความหนาแน่นของเทอร์มาลฟลักซ์มีค่าประมาณ  $3 \times 10^7$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

แบบที่สองนำนิวไคลด์รังสีที่เปล่งรังสีแอลฟาหรือแกมมา มาผสมกับธาตุเบริลเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



เมื่อนิวตรอนนี้ผ่านมอดเรเตอร์ (น้ำหรือพาราฟิน) จะได้นิวตรอนที่มีพลังงานน้อย (0.025 อิเล็กตรอนโวลต์)

เครื่องเร่ง Accelerators เครื่องเร่งอนุภาคที่มีประจุใช้ผลิตลำนิวตรอนได้ เครื่องเร่งอนุภาคประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไอออนที่ให้ไอออนดิวเทอเรียม ไอออนนี้ถูกเร่ง

ด้วยศักย์ประมาณ 150 กิโลโวลต์ไปยังเป้าไทเทเนียมหรือเซอร์โคเนียมที่ฉาบด้วยทริเทียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



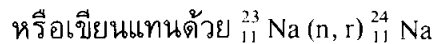
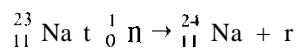
จากปฏิกิริยานี้ได้นิวตรอนที่มีพลังงานค่าเดียวและมีค่าประมาณ 14 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ นิวตรอนนี้ใช้หาปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนในสารตัวอย่าง เครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ผลิตเทอร์มาลนิวตรอนต้องมีพาราฟินเป็นมอดเรเตอร์ขวางทางเดินลำนิวตรอน

### อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร (Interaction of Neutron with Matter)

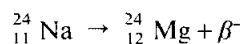
นิวตรอนเป็นอนุภาคที่นิยมยิงสสารได้ผลดีมากเนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ เมื่อนิวตรอนเกิดอันตรกิริยากับสสารนิวตรอนไม่ต้องปีนข้ามกำแพงประจุ (coulomb barrier) ส่วนอนุภาคที่มีประจุเมื่อเกิดอันตรกิริยากับสสารต้องปีนข้ามกำแพงประจุ นิวตรอนที่เกิดอันตรกิริยากับสสารดีที่สุดคือ เทอร์มาลนิวตรอน นิวตรอนนี้มีพลังงาน 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิห้องถ้าให้นิวตรอน (รังสี) ที่ออกจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนผ่านสารละลายมอดเรเตอร์พวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (ดีวเทอเรียมออกไซด์, น้ำ) การชนกันของนิวตรอนกับนิวคลีไอเบาจะลดพลังงานลงอย่างต่อเนื่อง

ปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนระดมยิงสสารมีหลายแบบ ที่สำคัญมีสองแบบ ได้แก่ การจับนิวตรอน และการแปรธาตุ (transmutation)

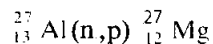
การจับนิวตรอน (Neutron capture) ปฏิกิริยาของนิวเคลียสที่เกี่ยวข้องกับนิวตรอน ส่วนใหญ่ นิวเคลียสจับนิวตรอนแล้วให้อิโซโทปใหม่ที่มีมวลเพิ่มขึ้นหนึ่ง กระบวนการนี้ มักมีการเปล่งรังสีแกมมาออกมาทันที



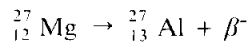
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจับนิวตรอนไม่ค่อยเสถียร มักจะสลายให้  $\beta$



การแปรธาตุ ปฏิกิริยานี้ นิวเคลียสดูดกลืนนิวตรอนตามด้วยการปล่อยโปรตอน (บางโอกาสให้อนุภาคแอลฟาหรือดีวเทอรอน) ปฏิกิริยานี้เขียนแทนด้วย



ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมักเกิดการสลายให้  $\beta^-$  แล้วกลับไปเป็นตัวเดิม



### ทฤษฎีวิธีการก่อกัมมันต์ (Theory of Activation Methods)

เมื่อนำธาตุไปอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ที่ผลิตนิวตรอน อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันตรังสีเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\frac{dN^*}{dt} = N\sigma\phi \quad \dots\dots(16.21)$$

$\frac{dN^*}{dt}$  = อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันต์เป็นนิวคลีไอต่อวินาที  $N$  จำนวนอะตอมเป้าที่เสถียร  $\phi$  ฟลักซ์เฉลี่ย นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร-วินาที  $\sigma$  พื้นที่หน้าตัดที่จับนิวตรอนเป็นตารางเซนติเมตรต่ออะตอมเป้า  $\sigma$  ใช้วัดโอกาสของนิวคลีไอที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน ตารางของปฏิกิริยาพื้นที่หน้าตัดสำหรับจับเทอร์มาลนิวตรอน บอกในหน่วยบาร์น 1 บาร์น =  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตรต่ออะตอมเป้า

ขณะที่เกิดนิวคลีไอกัมมันตรังสี นิวคลีไอนี้ก็จะมีการสลายด้วยอัตราเร็ว  $-dN^*/dt$  ดังสมการ 16-1

$$-dN^*/dt = \lambda N^*$$

ขณะที่อาบรังสีด้วยฟลักซ์นิวตรอนคงที่ อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันต์เขียนแทนด้วย

$$(dN^*/dt) \text{ รวม} = N\sigma\phi - \lambda N^* \quad \dots\dots(16.22)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตจากเวลา 0 ถึง  $t$  จะได้

$$N^* = \frac{N\sigma\phi}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)] \quad \dots\dots(16.23)$$

เมื่อแทนสมการ 16-4 ลงในเทอมยกกำลังจะได้

$$N^* = \frac{N\sigma\phi}{\lambda} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 t}{t_{1/2}}\right) \right] \quad \dots\dots(16.24)$$

เมื่อสิ้นสุดการอาบรังสี  $\lambda N^*$  มีค่าเท่ากับ  $-dN^*/dt$  (สมการ 16-1) และเขียนแทนด้วย

$$\lambda N^* = \frac{dN^*}{dt}$$

$$= N\sigma\phi \left[ 1 - \exp\left(\frac{-0.693 t}{t_{1/2}}\right) \right] = N\sigma\phi S \quad \dots\dots(16.25)$$

S แฟกเตอร์การอิ่มตัว (saturation factor) มีค่าเท่ากับ  $\left[ 1 - \exp\left(\frac{-0.693 t}{t_{1/2}}\right) \right]$   
 กัมมันตภาพที่วัดได้จากการทดลองเขียนแทนด้วยสมการ

$$\lambda A = \frac{-dA}{dt} = N\sigma\phi \left[ 1 - \exp\left(\frac{-0.693 t}{t_{1/2}}\right) \right] \quad \dots\dots(16.26)$$

กัมมันตภาพตอนเริ่มต้นของการอาบรังสีคือ  $A_0$  เป็นผลคูณของ  $\lambda N^*$  จึงเขียนเป็นสมการได้

$$A_0 = N\sigma\phi \left[ 1 - \left( \frac{\exp-0.693t}{t_{1/2}} \right) \right] \quad \dots\dots(16.27)$$

ตัวอย่าง จงคำนวณกัมมันตภาพสำหรับสารตัวอย่างโลหะผสมอะลูมิเนียม 10.0 มิลลิกรัม โลหะผสมนี้มีแมงกานีส 0.41 เปอร์เซ็นต์ หลังจากอาบรังสีสารนี้ด้วยสนามนิวตรอนที่มีความแรง  $5 \times 10^{13}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีที่นาน 0.50 ชั่วโมง กำหนดให้  $^{56}\text{Mn}$  มีในธรรมชาติ 100 เปอร์เซ็นต์,  $t_{1/2} \text{ } ^{56}\text{Mn} = 2.58$  ชั่วโมงน้ำหนักโมเลกุล Mn 54.94,  $\sigma = 13.3 \times 10^{-24}$  ตารางเซนติเมตรต่อนิวเคลียส (1 บาร์น =  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตรต่อนิวเคลียส)

$$A_0 = \sigma\phi N \left[ 1 - \exp\left(\frac{-0.693 t}{t_{1/2}}\right) \right]$$

$$= \frac{0.0041 \times 0.0100 \text{ กรัม} \times 1.00 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ นิวคลีไอต่อโมล}}{54.94 \text{ กรัมต่อโมล}}$$

$$\times 5 \times 10^{13} \text{ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \times 13.3$$

$$\times 10^{-24} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อนิวเคลียส} \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-0.693 \times 0.5 \text{ ชั่วโมง}}{2.58 \text{ ชั่วโมง}}\right) \right]$$

$$A_0 = 3.68 \times 10^6 \text{ ดิสอินทิเกรตต่อวินาที}$$

ตัวอย่าง การวิเคราะห์เหล็กในโลหะผสมอะลูมิเนียม วัดรังสีแกมมาของเหล็ก-59 ที่ 1.29 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ก่อนวิเคราะห์ทั้งสารตัวอย่างไว้นาน 1 สัปดาห์ เพื่อให้โซเดียม-24

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

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= A_0 e^{-\frac{(0.693)(24 \times 7 \text{ ชั่วโมง})}{15.0 \text{ ชั่วโมง}}} \\ &= 0.00235 A_0 \end{aligned}$$

หลังจากเวลาผ่านไป 7 วัน กัมมันตภาพของโซเดียม-24 สลายไปเหลือเพียง 0.00235 ของของเดิม รังสีแกมมาจากโซเดียม-24 ที่ 1.369 และ 2.754 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ไม่รบกวนการวิเคราะห์

ตัวอย่าง หลังจากเอาตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์แล้วทิ้งไว้นาน 120 นาที เฉพาะอะลูมิเนียม-28 (ครึ่งชีวิต 2.3 นาที) และไอโซโทปอื่นที่มีช่วงชีวิตสั้นสลายจนเหลือแต่กัมมันตภาพน้อยมากกัมมันตภาพของแมงกานีส-56 ในตัวอย่างบน ลดลงเหลือ  $2.153 \times 10^6$  เคนต์ต่อวินาที จงหากัมมันตภาพขณะที่เอาตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์  $t_{1/2} \text{ Mn-56} = 2.58$  ชั่วโมง

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ 2.153 \times 10^6 \text{ เคนต์ต่อวินาที} &= A_0 e^{-\frac{(0.693) \times 2.0 \text{ ชั่วโมง}}{2.58 \text{ ชั่วโมง}}} \\ A_0 &= 3.68 \times 10^6 \text{ เคนต์ต่อวินาที} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง สารตัวอย่างหนึ่งมีโพแทสเซียม -42 5 มิลลิลิตร (ครึ่งชีวิต 12.4 ชั่วโมง) จงคำนวณ

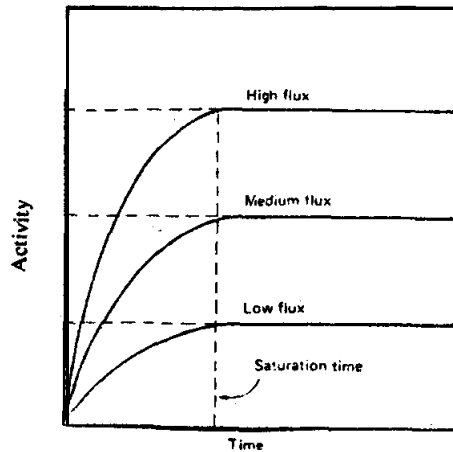
- อัตราการสลายตอนเริ่มแรกเป็นดิสอินทิเกรชันต่อนาที
- อัตราการสลายหลังจากเวลาผ่านไป 40.0 ชั่วโมง
- จำนวนกรัมของโพแทสเซียม -42 ที่มีในตอนแรก

$$\begin{aligned} \text{n. } 5 \text{ มิลลิลิตร} &= 5 \times 10^{-3} \text{ ลิตร} \\ &= 5 \times 10^{-3} \text{ ลิตร} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อวินาทีต่อลิตร} \\ &= 5 \times 10^{-3} \times 3.7 \times 10^{10} \times 60 \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อวินาที} \\ &= 1.11 \times 10^{10} \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ข. } A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 1.11 \times 10^{10} \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อนาที} e^{-\frac{(0.693) \times 40.0 \text{ ชั่วโมง}}{12.4 \text{ ชั่วโมง}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 1.11 \times 10^{10} \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อนาที } e^{-233} \\
&1.20 \times 10^9 \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อนาที} \\
N &= \frac{18.5 \times 10^7 \text{ ดิสอินทิเกรชันต่อวินาที}}{6.02 \times 10^{23} \text{ อะตอมต่อโมล}} \left[ e^{-0.693 \times 124 \text{ ชั่วโมง} \times 3600 \text{ วินาทีต่อชั่วโมง}} \right] \\
&\times 42 \text{ กรัมต่อโมล} \\
&= 8.30 \times 10^{-10} \text{ กรัม}
\end{aligned}$$

รูป 16.7 เป็นเคอร์ฟที่ได้จากพล็อตกัมมันตภาพของไอโซโทปที่ได้จากการอาบรังสีสารตัวอย่างด้วยฟลักซ์นิวตรอนที่มีความแรงสามระดับ แกนราบแทนอัตราส่วนเวลาที่ใช้อาบรังสีต่อครึ่งชีวิตของไอโซโทป  $t/t_{1/2}$  แต่ละระดับฟลักซ์ นิวตรอน กัมมันตภาพของไอโซโทปจะมีค่าคงที่เรียกกัมมันตภาพการอิ่มตัว (saturation activity บริเวณนี้อัตราการเกิดและอัตราการสลายของไอโซโทปจะมีค่าเท่ากัน) ดังนั้นการอาบรังสีไอโซโทปที่สนใจมากกว่าสี่หรือห้าครึ่งชีวิตจึงไม่เพิ่มสภาพไวในการวิเคราะห์



รูป 16-7 ผลของความแรงสนามนิวตรอนที่ใช้กระตุ้นสารตัวอย่างเมื่อเวลาต่าง ๆ

### การจัดจำแนกวิธีการก่อกัมมันต์ (Classification of Activation Methods)

วิธีการก่อกัมมันต์จำแนกได้หลายวิธี วิธีแรกขึ้นกับชนิดของรังสีที่ใช้กระตุ้นสารตัวอย่าง เช่น สโลว์นิวตรอน ฟาสต์นิวตรอน รังสีแกมมา และอนุภาคที่มีประจุ การกระตุ้นโดยทั่วไปใช้เทอร์มาลนิวตรอน

วิธีที่สองขึ้นกับชนิดของรังสีที่เปล่งจากสารตัวอย่าง การนับรังสีมักนับจากรังสีที่เปล่งจากขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยา ส่วนใหญ่เป็นรังสีบีตาและแกมมา การวิเคราะห์โดยการนับรังสีบีตามีสภาพไวสูงกว่ารังสีแกมมา พลังงานที่นับได้จากรังสีบีตาเป็นแบบต่อเนื่องจึงมีความจำเพาะน้อยกว่ารังสีแกมมา

วิธีที่สามขึ้นกับ การทำลายและไม่ทำลายสารตัวอย่าง วิธีการทำลายนำสารตัวอย่างไปอบรังสี ละลายสารตัวอย่างนี้ ใช้วิธีการเคมีหรือฟิสิกส์แยกไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่สนใจออกจากไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่รบกวน นำไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุที่สนใจไปวิเคราะห์ วิธีไม่ทำลายสารตัวอย่าง นำสารตัวอย่างไปอบรังสี นำสารนี้ไปวิเคราะห์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใด ๆ แกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้วัดต้องมีความสามารถแยกพลังงานที่อยู่ใกล้ ๆ กันออกจากกันได้ วิธีไม่ทำลายสารตัวอย่างทำได้รวดเร็ว ถ้าแกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์แยกพลังงานของธาตุที่รบกวนจากรังสีตัวอย่างไม่ได้ก็ต้องใช้วิธีทำลายสารตัวอย่าง

### วิธีทำลาย (Destructive Methods)

นำสารตัวอย่างที่อบรังสีแล้วมาละลาย ถ้าเป็นสารละลายก็นำไปอบรังสีโดยตรง นำเอาสารละลายนี้มาแยกเอาเฉพาะธาตุที่สนใจ นำสารนี้ไปนับรังสีบีตาหรือแกมมา การวิเคราะห์ทำได้โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาอบรังสีพร้อมกันด้วยฟลักซ์นิวตรอนที่มีเส้นแรงแสมสม่ำเสมอ โดยนำสารมาตรฐานที่มีธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หนัก  $w_s$  อบรังสีพร้อมกับสารตัวอย่างที่มีธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หนัก  $w_x$  กัมมันตภาพที่นับได้แปรโดยตรงกับมวล สารอื่น ๆ ที่อยู่ในสารตัวอย่างต้องไม่ให้รังสีรบกวนการวิเคราะห์ น้ำหนักของธาตุ  $w_x$  ที่มีในสารตัวอย่างมีค่า

$$w_x = w_s \frac{A_x}{A_s} \quad \dots\dots(16.20)$$

$A_x$  และ  $A_s$  กัมมันตภาพของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ถ้าสารตัวอย่างมีธาตุอื่นที่ให้ความแรงของรังสีออกมาด้วย ต้องทำการแยกเฉพาะธาตุที่สนใจออกจากสารตัวอย่างแล้วจึงวัดความแรงรังสีของธาตุที่สนใจ ถ้าธาตุที่ต้องการวิเคราะห์มีปริมาณน้อยการแยกสารทำได้ยาก จะวิเคราะห์โดยการเติมธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หนัก  $w_c$  ลงไปในสารละลายที่อบรังสีแล้ว สารที่เติมลงไปไม่ให้รังสี เรียกพาหะ (carrier) หรือ (collector) แยกธาตุที่เติมลงไป (พาหะ) กับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ( $w_x + w_c$ ) โดยการตกตะกอน การสกัดหรือการแลกเปลี่ยนไอออนหรือวิธีโครมาโตกราฟี นำสารที่แยกออกมาหนัก  $w'_x$  ไปนับกัมมันตภาพ ความแรงนี้สัมพันธ์กับกัมมันตภาพของสารตัวอย่างเดิม  $A_x$  ตามสมการ

$$a_x = A_x \frac{w_x'}{(W_x + w_x)} \quad \text{.....(16.21)}$$

ปกติน้ำหนักธาตุที่เติมลงไปมีค่ามากกว่าน้ำหนักธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้น  $w_x \ll W_x$  สมการ 16.21 เขียนได้เป็น

$$a_x = A_x \frac{w_x'}{W_x} \quad (16.22)$$

สารมาตรฐานก็ทำเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ดังนั้นสมการที่ใช้กับสารมาตรฐานเขียนได้

$$a_s = A_s \frac{w_s'}{W_s} \quad \text{.....(16.23)}$$

แทนสมการ 16.22 และ 16.23 ลงในสมการ 16.20 ได้

$$w_x = w_s \frac{a_x W_x w_s'}{a_s W_s w_x'} \quad \text{.....(16.24)}$$

ถ้า  $w_x$  ไม่น้อยกว่า  $W_x$  มาก สมการหา  $w_x$  จะซับซ้อนมากขึ้น

**วิธีหับสตอยชิโอเมตริก (The Substoichiometric Method)** ถ้าขณะทำการวิเคราะห์ คุ่ม  $W_x = W_s$  และ  $w'_x = w'_s$  สมการ 16.24 เขียนได้เป็นเป็น

$$w_x = w_s \frac{a_x}{a_s} \quad \text{.....(16.25)}$$

สมการที่เขียนในรูปนี้เป็นหลักของวิธีหับสตอยชิโอเมตริก ปกติมวลของพาหะที่เติมมากกว่ามวลไอโซโทปกัมมันตรังสี  $W_x$  และ  $W_s$  จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันเพื่อใช้น้ำหนักของพาหะที่เติมลงไปในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมีค่าเท่ากัน จากคุณสมบัตินี้ปริมาณสารที่แยกมาได้จะมีค่าเท่ากันโดย  $w'_x = w'_s$  การวิเคราะห์สารละลายที่มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ต้องแยกปริมาณสารได้เท่ากัน ปัญหานี้แยกโดยใช้สารเคมีที่เหมาะสมปริมาณน้อยกว่าปกติ (substoichiometric) เพื่อแยกเอาสปีชีส์ที่สนใจออกจากสารตัวอย่างหรือสารมาตรฐานหมด ถ้าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมและใช้กับสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเท่ากัน  $w'_x$  และ  $w'_s$  จะได้เท่ากันเพราะว่าปริมาณที่หาได้นี้ ( $w'_x$  และ  $w'_s$ ) ขึ้นกับปริมาณสารเคมีที่เติมลงไป

### วิธีไม่ทำลาย (Nondestructive Methods)

วิธีนี้ใช้แกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์วัดกัมมันตภาพของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานหลังจากอบรังสีแล้ว น้ำหนักสารตัวอย่างหาได้จากสมการ 16.20



แกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์ต้องแยกสัญญาณธาตุที่สนใจออกจากองค์ประกอบอื่นที่มีในสารตัวอย่างได้ เครื่องที่ดีจะต้องแยกสัญญาณที่รบกวน (พลังงานใกล้เคียง) ออกจากสัญญาณสารตัวอย่าง ถ้าใช้เครื่องที่แยกสัญญาณที่รบกวนไม่ได้ต้องใช้วิธีการทำลายสารตัวอย่าง วิธีไม่ทำลายสารตัวอย่างทำได้สะดวกและรวดเร็ว แต่เครื่องที่ใช้มักต้องมีอุปกรณ์ซับซ้อนจึงมีราคาแพง

### การประยุกต์การก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน (Application of Neutron Activation)

รูป 16-8 ธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ได้โดยใช้หลักการการกระตุ้นมี 69 ธาตุ วิธีนี้ใช้วิเคราะห์แก๊สเฉื่อยได้โดยให้แก๊สเฉื่อยทำปฏิกิริยากับเทอร์มาลนิวตรอนแล้วให้อิโซโทปกัมมันตรังสี นอกจากนี้ยังมีธาตุ ออกซิเจน ไนโตรเจนและฮีเลียมทำปฏิกิริยากับนิวตรอนที่มีพลังงานสูง (fast neutron) ให้อิโซโทปกัมมันตรังสี วิธีนี้วิเคราะห์สารตัวอย่างพวกโลหะ โลหะผสม วัตถุโบราณ วัสดุกึ่งตัวนำ หิน แร่ น้ำ และสารตัวอย่างชีววิทยา วิธีนี้มักใช้หาธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ

**ความแม่นยำ (Accuracy)** ความผิดพลาดในการวิเคราะห์โดยใช้หลักการกระตุ้นขึ้นกับการกีดกันร่วมกัน (self shielding) สารตัวอย่างและสารมาตรฐานได้รับความแรงจากนิวตรอนปริมาณไม่เท่ากัน ความไม่แน่นอนของเครื่องนับ ความผิดพลาดในการนับเนื่องจากการกระเจิง การดูดกลืน สารตัวอย่างและสารมาตรฐานอยู่ห่างจากเครื่องนับไม่เท่ากัน (different in geometry) ความผิดพลาดเหล่านี้แก้ไขได้โดยการอาบรังสีสารตัวอย่างและสารมาตรฐานพร้อมกัน

**สภาพไว (Sensitivity)** การวิเคราะห์โดยวิธีการกระตุ้นด้วยนิวตรอนมีสภาพไวต่อการวิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุ เช่นรูป 16-8 ธาตุหลายรูปที่มีปริมาณ  $10^{-5}$  ไมโครกรัม วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้ เช่น สภาพไวในการวิเคราะห์ เหล็ก 50 ไมโครกรัม สภาพไวในการวิเคราะห์ยูเรเนียม  $10^{-6}$  ไมโครกรัม สภาพไวของวิธีวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยกระตุ้นขึ้นกับตัวแปร เช่น คุณสมบัติของนิวเคลียส กระบวนการอาบรังสีและอุปกรณ์ที่ใช้นับ

### วิธีการเจือจางไอโซโทป Isotopic Dilution Methods

วิธีการเจือจางไอโซโทปนิยมใช้แก้ปัญหาทางเคมีได้ทุกสาขา ไอโซโทปที่เสถียรและไอโซโทปกัมมันตรังสีนิยมใช้กับเทคนิคการเจือจางไอโซโทป ส่วนใหญ่นักวิเคราะห์นิยมใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสีหาความเข้มข้นของไอโซโทปของธาตุที่สนใจ



## หลักการของวิธีการเจือจางไอโซโทป Principles of the Isotopic Dilution Procedure

วิธีการเจือจางไอโซโทปต้องเตรียมสารที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปกัมมันตรังสีเติมสารกัมมันตรังสีที่ทราบน้ำหนักแน่นอนลงในสารตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแล้วผสมให้เข้ากัน หลังจากได้สปีชีส์ที่กัมมันต์และไม่กัมมันต์ผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว แยกของผสมนี้ในรูปสารประกอบบริสุทธิ์ที่ทราบองค์ประกอบแน่นอน นำสารที่แยกมาได้ไปนับความแรงรังสี ขนาดของการเจือจางสารกัมมันต์สามารถคำนวณได้ ค่าที่คำนวณได้สัมพันธ์กับปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ (ไม่กัมมันต์) วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องแยกสารที่ต้องการวิเคราะห์ให้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่สารที่แยกได้ต้องบริสุทธิ์และมีองค์ประกอบแน่นอน

การเจือจางไอโซโทปโดยตรง (Direct Isotope Dilution) ใส่สปีชีส์กัมมันตรังสีที่สนใจหนัก  $w_0$  กรัม และมีกัมมันตภาพ  $A_0$  ลงในสารตัวอย่างที่มีสปีชีส์ที่สนใจแต่ไม่มีรังสีหนัก  $w_x$  กรัม ผสมให้เข้ากัน แยกและทำให้บริสุทธิ์ ได้สปีชีส์ที่สนใจและมีรังสีหนัก  $w_r$  กรัม และมีกัมมันตภาพ  $A_r$  ดังนั้นวิธีการนี้เขียนเป็นสมการได้

$$\frac{A_r}{A_0} = \frac{w_r}{w_0 + w_x} \quad \dots(16.26)$$

จัดสมการใหม่ได้

$$w_x = \frac{A_0}{A_r} w_r - w_0 \quad \dots\dots(16.27)$$

ถ้าสปีชีส์กัมมันตรังสีมีความแรงมากและใช้ปริมาณน้อยมาก สมการ 16.27 เขียนได้เป็น

$$w_x = \frac{A_0}{A_r} w_r \quad \dots\dots(16.28)$$

**ตัวอย่าง** สารละลายเจือจางมีความหนาแน่น 1.000 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีไอโอดีนไดด์ปนอยู่ นำสารละลายนี้มา 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีน โดยเติมสารละลายมาตรฐาน  $^{129}\text{I}^-$  0.00500 มิลลิกรัม  $\text{I}^-$  และมีกัมมันตภาพ 3120 เคานต์ต่อนาทีเขย่าของผสมนี้ให้เข้ากัน เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{AgNO}_3$  ลงไปเพื่อเกิดตะกอน  $\text{I}^-$  หนัก 0.0100 มิลลิกรัม กรองและล้างตะกอน นำตะกอนนี้มานับกัมมันตภาพนับได้ 347 เคานต์ต่อนาที

$$w_x = \frac{A_0}{A_r} w_r - w_0$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3120}{347} (0.0100) - 0.00500 \\
&= 0.0849 \text{ มิลลิกรัมไอโอไดด์} \\
\text{ส่วนในล้านส่วน} &= \frac{0.0849 \text{ มิลลิกรัม } I^- \times 10^{-3} \text{ กรัมต่อมิลลิกรัม} \times 10^6}{50.0 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \times 1.000 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}} \\
&= 1.7
\end{aligned}$$

ธาตุที่แยกออกมาต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะนับกัมมันตภาพได้ ข้อเสียของวิธีนี้ ธาตุที่ไม่มีรังสีในสารตัวอย่างและธาตุที่มีรังสีที่เติมลงไปต้องมีสมบัติคล้ายกันหรืออยู่ในระบบทางเคมีที่คล้ายกัน

**ตัวอย่าง** จงหาปรอทที่มีอยู่ในรูป  $HgCl_2$  ในตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอน โดยวิธีการเจือจางไอโซโทปด้วย  $Hg^{203}$  สารตัวอย่างหนัก 1.00 กรัมนำมาเติมของผสมที่มี  $Hg^{203}$  ร้อยละ 10 จำนวน 10 มิลลิกรัม มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะ 240000 เคนต์ต่อนาที่ต่อกรัม แยกสารนี้ได้หนัก 20 มิลลิกรัม แล้วย่นำมาวัดได้ 3000 เคนต์ต่อนาที่ต่อกรัม จงคำนวณร้อยละของปรอทในสารตัวอย่าง

$$\begin{aligned}
W_x &= \frac{A_o}{A_r} W_r - W_o \\
A_r = 3000 \times 20 \times 10^{-3} &= 60 \text{ เคนต์ต่อนาที่, } A_o = 240000 \times \frac{10}{100} \times 10 \times 10^{-3} \\
&= 240 \text{ เคนต์ต่อนาที่} \\
&= \frac{240}{60} \times 20 \times 10^{-3} - \frac{10}{100} \times \frac{10}{1000} \\
&= 0.08 - 0.001 \\
&= 0.0799 \text{ กรัม}
\end{aligned}$$

ร้อยละปรอทในสารตัวอย่างที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 7.99

**ตัวอย่าง** ของผสมหนึ่งมีวิตามินบี 12 ของผสมนี้ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณ  $B_{12}$  โดยวิธีการเจือจางไอโซโทป วิตามิน  $B_{12}$  มีอะตอมโคบอลต์เป็นองค์ประกอบ ส่วน  $B_{12}$  ที่มีรังสีได้จากการใช้  $^{60}Co$  ที่มีกัมมันตรังสี ใสสารละลาย  $B_{12}$  ที่มีกัมมันตภาพ 1500 เคนต์ต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีกัมมันตภาพจำเพาะ 125 เคนต์ต่อนาที่ต่อมิลลิกรัม  $B_{12}$  ในสารละลาย  $B_{12}$  ที่มีรังสี 5.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในของผสมที่สังเคราะห์หนัก 1.512 กรัม หลังจากผสมให้เข้ากัน ดำเนินการแยกโดยวิธีเคมีเพื่อแยกเอา  $B_{12}$  ที่บริสุทธิ์ออกมา จากการแยกนี้ไม่ทราบว่าแยกได้ที่เปอร์เซ็นต์แต่ได้

B<sub>12</sub> บริสุทธิ์หนัก 125 มิลลิกรัม และมีความแรง 2750 เคานต์ต่อนาที จงคำนวณเปอร์เซ็นต์ B<sub>12</sub> ในสารตัวอย่าง

ใส่สารละลาย B<sub>12</sub> ที่มีรังสีลงไป 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีกัมมันตภาพ = 1500 เคานต์ต่อนาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร × 5.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$B_{12} \text{ ที่เติมลงไปหนัก} = \frac{7500 \text{ เคานต์ต่อนาที } B_{12} \text{ ที่เติม}}{125 \text{ เคานต์ต่อนาทีต่อมิลลิกรัม } B_{12} \text{ ที่เติม}}$$

$$= 6.0 \text{ มิลลิกรัม}$$

จาก  $W_x = \frac{A_o W_r - W_o}{A_r}$

$$\frac{7500 \text{ เคานต์ต่อนาที}}{2750 \text{ เคานต์ต่อนาที}} \times 125 \text{ มิลลิกรัม} - 6.0 \text{ มิลลิกรัม}$$

มี B<sub>12</sub> อยู่ = 281 มิลลิกรัม

$$\text{เปอร์เซ็นต์ } B_{12} \text{ ในยาที่สังเคราะห์ได้} = \frac{281 \text{ มิลลิกรัม}}{1512 \text{ มิลลิกรัม}} \times 100$$

$$= 18.6$$

การเจือจางไอโซโทปแบบซับสโตยชิโอเมตริก (Substoichiometric Isotope Dilution) วิธีซับสโตยชิโอเมตริกแบบนี้คล้ายกับแบบวิธีการกระตุ้นแบบซับสโตยชิโอเมตริก การวิเคราะห์โดยการเจือจางไอโซโทปแบบซับสโตยชิโอเมตริกใส่ตัวตามรอย (tracer) ปริมาณเท่ากันลงในสารละลายสองชุดที่มีสมบัติเหมือนกันทุกประการ โดยชุดหนึ่งมีสปีชีส์ที่สนใจ ชุดสองไม่มีสปีชีส์ที่สนใจ ใส่สารเคมีที่เหมาะสมลงไปเพื่อแยกไอโซโทปของสปีชีส์ที่สนใจจากสารละลายทั้งสองชุดโดยเติมลงไปปริมาณเท่ากันสารเคมีที่เติมลงไปให้มีปริมาณน้อยกว่าปกติ เพราะต้องการแยกสปีชีส์ที่สนใจออกมาเพียงบางส่วน โดยสปีชีส์ที่สนใจที่แยกจากสารละลายทั้งสองชุดแยกได้เท่ากัน สำหรับสารละลายชุดหนึ่ง มีสารตัวอย่างอยู่ สมการเหมือนกับ 16.26

$$\frac{A_r}{A_o} = \frac{W_r}{W_o + W_x} \quad \dots (16.26)$$

สำหรับสารละลายชุดสองไม่มีสารตัวอย่าง

$$\frac{A_r'}{A_o} = \frac{W_r'}{W_o} \quad \dots (16.29)$$

วิธีนับสโตยชิโอเมตริก คุ่ม  $W_r = W_r'$  เมื่อนำสมการ 16-29 มาหารด้วยสมการ 16-26 และจัดสมการใหม่จะได้

$$W_x = W_o \left( \frac{A_r'}{A_r} - 1 \right) \quad \dots\dots(16.30)$$

วิธีนี้จะให้ผลแม่นยำมาก ถ้า  $W_r$  ที่แยกได้หนักน้อยมาก

ค่ากัมมันตภาพที่นับได้บางครั้งเขียนในทอมกัมมันตภาพจำเพาะ (specific activity)

$$S_A = \frac{A}{W}$$

### การเจือจางไอโซโทปผกผัน (Inverse Isotope Dilution)

วิธีนี้ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีรังสีโดยเติมธาตุที่สนใจแต่ไม่มีรังสีลงในสารตัวอย่างผสมให้เข้ากัน แยกเอาธาตุที่สนใจออกมาวัดกัมมันตภาพ คำนวณหาปริมาณธาตุที่สนใจในสารตัวอย่าง

ให้  $W_x$  และ  $A_x$  เป็นน้ำหนักและกัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีที่มีในสารตัวอย่างเติมธาตุที่สนใจแต่ไม่มีรังสีหนัก  $W_o$  ลงไป แยกเอาธาตุที่สนใจออกมาทำให้บริสุทธิ์ซึ่งได้น้ำหนัก  $W_r$  แล้วนับกัมมันตภาพได้  $A_r$

จากข้อมูลนี้เขียนเป็นสมการได้

$$\frac{W_x + W_o}{W_r} = \frac{A_x}{A_r} \quad \dots(16.31)$$

จัดสมการใหม่ได้

$$W_x = \frac{A_x}{A_r} W_r - W_o \quad \dots\dots(16.32)$$

ข้อดีของวิธีนี้คือ การหาปริมาณธาตุที่มีรังสีในสารตัวอย่างได้โดยไม่ต้องเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่มีรังสี วิธีนี้ไม่ต้องเตรียมสารมาตรฐานที่มีเมทริกซ์คล้ายกับสารตัวอย่าง แต่วิธีนี้ก็ใช้ไม่ได้ถ้ามีการรบกวนของสเปกตร้าทำให้นับค่า  $A_x$  ไม่ได้

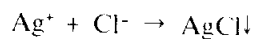
### การประยุกต์วิธีการเจือจางไอโซโทป (Application of the Isotopic Dilution Method)

เทคนิคการเจือจางไอโซโทปใช้วิเคราะห์ธาตุได้ถึง 30 ธาตุ ไม่ว่าธาตุนั้นจะอยู่ในเมทริกซ์แบบใด วิธีนับสโตยชิโอเมตริกใช้วิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ ในตัวอย่างโลหะ เช่น การวิเคราะห์ปริมาณเป็นไมโครกรัม ของ แคดเมียม ทองแดง พรอท หรือสังกะสีที่แยกออกมาจากการสกัดธาตุเหล่านี้ด้วยไดโทโซนในคาร์บอนเตทราคลอไรด์

เทคนิคนี้ยังใช้วิเคราะห์สารประกอบที่อยู่ในตัวอย่างอินทรีย์เคมีและชีวเคมี เช่น วิเคราะห์ปริมาณ วิตามิน D วิตามิน B<sub>12</sub> ซูโครส อินซูลิน คอร์ติโคสเตอโรน แอลกอฮอล์ และไพรอกซัน

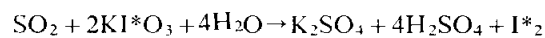
### การไทเทรตโดยการนับรังสี (Radiometric Titrations)

การไทเทรตโดยวิธีนี้หาจุดสมมูลโดยนับรังสีของไทแทรนด์หรือสารที่ต้องการวิเคราะห์ การไทเทรตโดยวิธีนี้ต้องมีการแยกเฟส เช่นการไทเทรตสารละลายคลอไรด์ 0.001 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยสารละลาย  $^{110}_{47}\text{Ag}^+$  0.001 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพ  $1 \times 10^9$  ดิสอินทิเกรชันต่อวินาทีต่อโมล ดังปฏิกิริยา

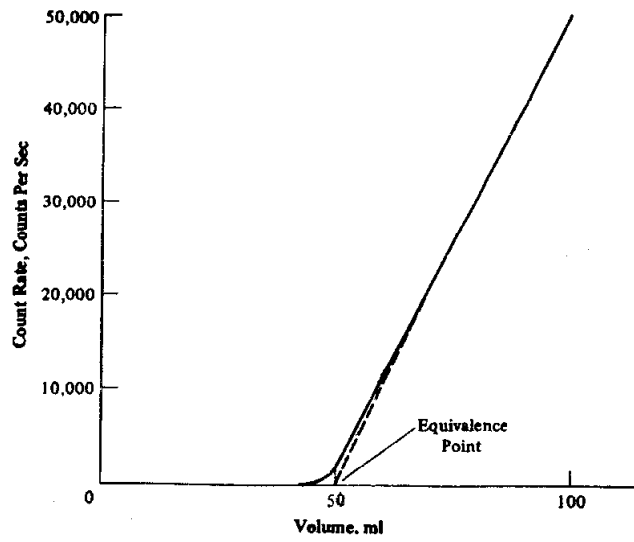


$K_{sp} = 1.82 \times 10^{-10}$  นับกัมมันตภาพของน้ำใสหลังจากถึงจุดสมมูล ก่อนถึงจุดยุติ น้ำใสมีค่ากัมมันตภาพน้อยเพราะ  $^{110}_{47}\text{Ag}$  จะเกิดเป็นตะกอนกับ  $\text{AgCl}$  เมื่อเกินจุดยุติกัมมันตภาพของน้ำใสมีค่ามากเนื่องจากมี  $^{110}_{47}\text{Ag}$  อยู่ในน้ำใส ดังรูป 16-9

วิธีการวิเคราะห์โดยการนับการเปล่งรังสี (Radio release Methods of Analysis) วิธีนี้ให้สารที่สนใจทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่มีรังสี แล้วนับสารที่สนใจจากปริมาณรังสีที่เปล่งออกมา เช่น การหา  $\text{SO}_2$  ในอากาศทำโดยผ่านอากาศไปในสารละลายเบส  $\text{KI} \cdot \text{O}_3$  จะเกิดปฏิกิริยา



ทำสารละลายนี้ให้เป็นกรดเก็บ  $\text{I}_2$  ที่คายออกจาก  $\text{KI} \cdot \text{O}_3$  ในสารละลาย นับปริมาณรังสี  $\text{I}_2$  ที่อยู่ในชั้น  $\text{CHCl}_3$  คำนวณหาปริมาณ  $\text{SO}_2$  ในอากาศ



รูป 16-9 เคอร์ฟการไทเทรตโดยวิธีการนับรังสีของสารละลายคลอไรด์ 0.001 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร กับสารละลายเงิน 0.001 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ในสารละลายนี้มี  $^{110}\text{Ag}$  ปนอยู่ด้วย



## แบบฝึกหัด

- 16-1. โพลีเอทิลีน-42 ให้อนุภาคบีตาโดยมีครึ่งชีวิต 12.36 ชั่วโมง จงคำนวณปริมาณไอโซโทปโพลีเอทิลีน-42 ที่เหลืออยู่ในสารตัวอย่างเป็นเศษส่วนหลังจากเวลาผ่านไป
- ก) 1 ชั่วโมง      ข) 10 ชั่วโมง      ค) 20 ชั่วโมง      ง) 75 ชั่วโมง
- 16-2 จงคำนวณเศษส่วนของไอโซโทปต่อไปนี้ที่เหลืออยู่หลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (ในวงเล็บคือครึ่งชีวิต)
- ก. เหล็ก-59 (44.6 วัน)  
ข. โทเทเนียม-45 (3.09 ชั่วโมง)  
ค. แคลเซียม-47 (4.54 วัน)  
ง. ฟอสฟอรัส-33 (25.3 วัน)
- 16-3 สารตัวอย่างตะกั่วซัลเฟตมี Pb-200 1 ไมโครคูรี (ครึ่งชีวิต-21.5 ชั่วโมง) จงหาเวลาที่ต้องใช้เมื่อต้องการให้กัมมันตภาพ Pb-200 น้อยกว่า 0.01 ไมโครคูรี
- 16-4 จงคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ได้จากการนับ (ก) 100.0 (ข) 250 (ค)  $7.00 \times 10^3$  (ง)  $2.00 \times 10^4$
- 16-5 จงคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (สัมบูรณ์และสัมพัทธ์) ที่ได้จากการนับ 200 เคานต์ต่อนาที ถ้าทำการนับในช่วง (ก) 40 วินาที (ข) 80 วินาที (ค) 4.0 นาที (ง) 12.0 นาที
- 16-6 จงคำนวณความไม่แน่นอนสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ที่ได้จากการนับ 800 เคานต์ที่ระดับความเชื่อมั่น
- (ก) ระดับความเชื่อมั่น 50 เปอร์เซ็นต์  
(ข) ระดับความเชื่อมั่น 90 เปอร์เซ็นต์  
(ค) ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์
- 16-7 จงคำนวณความไม่แน่นอนสัมบูรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเครื่องนับที่นับโดยไม่แก้ค่าภูมิหลัง
- (ก) 60  
(ข) 300  
(ค) 520  
(ง) 1200

16-8 จงคำนวณความไม่แน่นอนสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากการนับเฉพาะสารตัวอย่าง ถ้าค่าที่ได้จากการนับสารตัวอย่างกับค่าการนับสารภูมิหลังนาน 14 นาทีนับได้ 300 เคานต์ต่อนาที และเครื่องนับนับค่าภูมิหลังดังนี้

- (ก) 9 เคานต์ต่อนาที นับนาน 2 นาที
- (ข) 9 เคานต์ต่อนาที นับนาน 10 นาที
- (ค) 18 เคานต์ต่อนาที นับนาน 2 นาที
- (ง) 40 เคานต์ต่อนาที นับนาน 2 นาที

16-9 ห้องปฏิบัติการมีค่ากัมมันตภาพภูมิหลังประมาณ 9 เคานต์ต่อนาทีเมื่อทำการนับนาน 3 นาที จงหาค่าการนับรวมเมื่อต้องการให้ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ในการนับที่ระดับความเชื่อมั่น 90 เปอร์เซ็นต์มีค่าน้อยกว่า 5.0 เปอร์เซ็นต์ กำหนดให้ค่าการนับรวมมีค่าประมาณ (ก) 90 เคานต์ต่อนาที (ข) 300 เคานต์ต่อนาที (ค) 600 เคานต์ต่อนาที

16-10 ถ้าเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์นาน 25 นาที จงคำนวณว่าจะต้องแบ่งเวลาเพื่อใช้นับสารตัวอย่างและภูมิหลังอย่างไรเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ในโจทย์ 16-9 ให้ผลดีที่สุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สำหรับการวิเคราะห์นี้มีค่าเท่าไร

16-11 สารละลาย 2.00 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีทริเทรียมอยู่ 0.120 ไมโครคูรีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อนำสารละลายนี้ฉีดเข้าไปในเลือดสุนัข ทั้งไว้สักครู่จนสารละลายแพร่เป็นเนื้อเดียวกันในเลือดตลอด ดูดเลือดสุนัขมา 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปวัดรังสีได้ 15.8 เคานต์ต่อวินาที จงคำนวณปริมาณเลือดในสุนัข

16-12 การวิเคราะห์ปริมาณเพนนิซิลินในของผสมทำโดยการเติมเพนนิซิลินบริสุทธิ์หนัก 0.981 มิลลิกรัม มีกัมมันตภาพจำเพาะ  $5.42 \times 10^3$  เคานต์ต่อนาทีต่อมิลลิกรัมรอนจนถึงสมดุล แยกเพนนิซิลินบริสุทธิ์หนัก 0.406 มิลลิกรัม นับกัมมันตภาพรวมได้ 343 เคานต์ต่อนาที จงคำนวณเพนนิซิลินในสารตัวอย่างเป็นมิลลิกรัม

16-13 การวิเคราะห์ปริมาณสเตรบโทไมซินในยาน้ำวิเคราะห์โดยการเติมยาปฏิชีวนะบริสุทธิ์ที่มี C-14, 13.4 มิลลิกรัม กัมมันตภาพจำเพาะของยาปฏิชีวนะ มีค่า 223 เคานต์ต่อนาทีต่อมิลลิกรัม เมื่อทำการนับ 30 นาที แยกสเตรบโทไมซินบริสุทธิ์ได้หนัก 0.112 มิลลิกรัม นับกัมมันตภาพได้ 654 เคานต์ใน 60.0 นาที

- (ก) จงคำนวณสเตรบโทไมซินในสารตัวอย่างเป็นส่วนในล้านส่วน
- (ข) จงคำนวณขีดจำกัดความเชื่อมั่นที่ระดับ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแหล่งกำเนิดความไม่แน่นอนเกิดจากกระบวนการสลาย

16-14 การหาปริมาณปรอทในเนื้อเยื่อสัตว์ ทำโดยนำเนื้อเยื่อ 0.652 กรัม และ สารละลายมาตรฐานที่มีปรอท Hg ในรูป  $HgCl_2$  0.213 ไมโครกรัม ไปอาบด้วยเทอร์มาล นิวตรอนที่มีความแรง  $10^{12}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรวินาที นาน 3 วัน หลังจากอาบ รังสีแล้ว ใส่ Hg ในรูป  $Hg_2Cl_2$  25.0 มิลลิกรัมลงในตัวอย่างและสารละลายปรอทนำสารทั้งสองไปย่อยด้วยของผสมกรดไนตริก/ซัลฟูริกเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ ขั้นตอนนี้ระวังไม่ให้สารระเหย (ปรอทอาจกลายเป็นไอ) ใส่กรดไฮโดรคลอริก นำ  $HgCl_2$  ที่เกิดขึ้นไปกลั่น ปรอทที่ได้จากการกลั่นแต่ละชุดนำไปเกาะบนขั้วไฟฟ้าแผ่นทองด้วยวิธีไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าสำหรับสารตัวอย่างหนักเพิ่มขึ้น 13.5 มิลลิกรัม ขั้วไฟฟ้าสำหรับสารมาตรฐานหนักเพิ่มขึ้น 14.6 มิลลิกรัม วัดกัมมันตภาพของ  $^{197}Hg$  ในสารตัวอย่างได้ 860 เคานต์ต่อนาที ในสารมาตรฐานได้ 1112 เคานต์ต่อนาที ใช้เวลาในการนับ 10.0 นาที

(ก) จงคำนวณปริมาณปรอทในสารตัวอย่างเป็นส่วนในล้านส่วน

(ข) จงคำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแหล่งกำเนิดความไม่แน่นอนเกิดจากกระบวนการการสลาย

16-15 เซลล์ไฟฟ้าเหมือนกันนำไปประกอบกับขั้วแอโนดเงินและแคโทดแพลทินัม โดยต่อแบบอนุกรม สารละลายปริมาตร 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตร มี KI ที่ติดฉลากอยู่  $4.12 \times 10^{-2}$  มิลลิกรัม ฉลากคือ  $^{131}I$  (ให้รังสี  $\beta$  ที่มีครึ่งชีวิต 8 วัน) ใส่สารละลายบัพเฟอร์กรดแอสซิติค-แอสซิติค 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในเซลล์หนึ่ง ใส่สารละลาย 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่มีไอโอดีนอยู่ในสารตัวอย่างลงในสารละลายแอสซิติคบัพเฟอร์ในเซลล์สอง หลังจากผ่านปริมาณไฟฟ้าที่เหมาะสมลงไป นำแอโนดไปวัดรังสี  $\beta$

(ก) จงคำนวณน้ำหนักไอโอดีนในแต่ละลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้ากัมมันตภาพที่หาได้จากเซลล์ที่มีสารมาตรฐาน 4130 เคานต์ต่อนาที เซลล์ที่มีสารตัวอย่าง 3550 เคานต์ต่อนาที การนับใช้เวลา 4.00 นาที

(ข) จงคำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อแหล่งกำเนิดความไม่แน่นอนเกิดจากกระบวนการการสลาย