หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและการหาค่าอัตราการไหลของน้ำ

2.1 การหาค่าปริมาณน้ำโดยอาศัยเทคนิคทางเครื่องมือวัดน้ำ

สำหรับการหาค่าปริมาณน้ำด้วยเทคนิคทางเครื่องมือมีวิธีการดำเนินการดังนี้

การหาค่าปริมาณน้ำ เป็นการหาปริมาณน้ำไหล หรืออัตราน้ำไหลในลำน้ำ ซึ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยที่ใช้เป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ค่าปริมาณน้ำที่ได้จากการหาด้วยเทคนิคเครื่องมือวัดน้ำมีวิธีการหาโดยอาศัยเครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติงานดังนี้

ก. เรือพร้อมเครื่องเรือ

ข. เครื่องวัดน้ำที่เป็นลูกถ้วยหมุนหรือใบพัดหมุน

ค. สัญญาณเสียงหรือสัญญาณไฟที่นับจำนวนรอบของลูกถ้วยหรือใบพัด

ง. นาฬิกาจับเวลามีหน่วยเป็นวินาที

จ. เครื่องกว้านพร้อมสายลวดสำหรับหย่อนเครื่องวัดน้ำขึ้นลง

ฉ. แท่นติดเครื่องกว้านพร้อมรอกแขวนตั้งฉาก เพื่อให้สายลวดที่ติดตั้งเครื่องหย่อนลงไปในแม่น้ำได้โดยไม่ติดขอบเรือ

เมื่อติดตั้งแท่นติดเครื่องกว้านไว้ตรงกลางลำเรือเรียบร้อยแล้ว เจ้าหน้าที่จะนำเครื่องวัดน้ำติดเข้ากับสายลวด โดยให้สายลวดพาดกับรอกที่แขวนตั้งฉากต่อไปยังเครื่องกว้านที่ติดกับแท่นเครื่องกว้านอยู่ เมื่อทุกอย่างพร้อมแล้วเจ้าหน้าที่ขับเรือจะขับเรือออกไปปฏิบัติงานพร้อมด้วยเจ้าหน้าที่ดำเนินการวัดน้ำอีก 4 คน

เครื่องมือวัดน้ำแบบลูกถ้วยหรือแบบใบพัดหมุนนั้น จะหมุนตามความเร็วของกระแสน้ำ จำนวนรอบที่หมุนได้จะทราบได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ต่อจากเครื่องวัดน้ำมาตามสายลวดขั้วสายไฟ

ซึ่งมาต่อเข้ากับเครื่องกำหนดสัญญาณที่ให้ทั้งสัญญาณเสียงและไฟ ทำให้พนักงานทราบจำนวนรอบของเครื่องวัดน้ำที่หมุนได้ในขณะที่รับสัญญาณนั้น พนักงานคนเดียวก็จะจับเวลาด้วยเครื่องมือจับเวลาพร้อมกับจำนวนรอบที่เครื่องมือวัดน้ำแบบลูกถ้วย (หรือเป็นใบพัด) หมุนนำค่าจำนวนรอบและเวลาที่จับได้ไปเปิดตาราง 2.1 ซึ่งเป็นตารางแสดงความเร็วกระแสน้ำได้ โดยมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ตามแนววัดน้ำที่จะดำเนินการวัดน้ำนั้น ทั้งสองฝั่งจะติดตั้งเป้าไว้ ลักษณะของเป้าจะเป็นโครงไม้สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 3 เมตร ตรงกลางเป้าจะตอกด้วยซี่ไม้ขนาดกว้าง 3 นิ้ว หนา 1/2 นิ้ว รอบโครงไม้เต็มทั้งเป้า ตัวเป้าจะทาด้วยสีขาวเพื่อมองเห็นง่าย แผ่นเป้าจะถูกตอกไว้กับเสาตามแนววัดน้ำ โดยจะให้ส่วนล่างของเป้าอยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 2 เมตร พนักงานวัดน้ำจะใช้เป้าที่ติดไว้ทั้งสองฝั่งเป็นที่หมาย เพื่อใช้มองให้เป็นแนวเดียวกันเมื่อเวลาปฏิบัติงานวัดปริมาณน้ำ

เมื่อติดตั้งเครื่องเรือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการวัดปริมาณน้ำเรียบร้อยแล้ว จะดำเนินการวัดปริมาณน้ำตามขั้นตอนดังนี้

ก. พนักงานขับเรือจะขับเรือไปตั้งลำเรือที่จุดกำหนดที่ต้องการจะหาความเร็วของกระแสน้ำ โดยมีพนักงานคนที่ 1 จะเป็นผู้ชี้จุดกำหนดให้

ข. เมื่อหาจุดกำหนดจะหาความเร็วกระแสน้ำได้แล้ว พนักงานคนที่ 2 จะหย่อนเครื่องวัดน้ำลงไปใต้น้ำจนถึงพื้นท้องน้ำ เพื่อหาความลึก ซึ่งจะมีมาตรวัด (meter) ทดเฟืองตัวเลขปรากฏบนคว้านตามความลึกที่ได้

ค. ดึงเครื่องวัดน้ำขึ้นมา จัดให้ตัวเครื่องวัดน้ำอยู่ในระดับผิวน้ำ เป็น .6 ของความลึกนั้น พนักงานคนที่ 3 จะฟังสัญญาณเสียง (หรือดูสัญญาณไฟ) ที่ต่อมาจากเครื่องวัดน้ำตามจำนวนรอบที่ใบพัด (หรือลูกถ้วย) หมุนพร้อมกับจับเวลาไปด้วย จำนวนเวลาและจำนวนรอบของใบพัดที่หมุนจะให้พนักงานวัดน้ำคนที่ 4 บันทึกไว้ แล้วนำค่าไปเปิดตารางหาความเร็วของกระแสน้ำได้ต่อไป

ง. โดยวิธีเดียวกันเราสามารถที่จะวัดน้ำในจุดต่อ ๆ ไปจนถึงจุดสุดท้ายได้

จ. ในการวัดน้ำจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งนั้น เราสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดน้ำไหลได้ อันเป็นพื้นที่ที่ได้จากการคำนวณเป็นผลคูณของความกว้าง และความลึกของลำน้ำที่วัด มีหน่วย

เป็นตารางเมตร

ฉ. นำค่าที่ได้จากการปฏิบัติการวัดน้ำนั้น คือ ความลึก ความเร็ว กระแสน้ำ และความกว้างของแต่ละช่วงมาหาค่าปริมาน้ำ โดยการเอาความลึกคูณกับความกว้างในแต่ละช่วงจะให้กำหนดเป็นพื้นที่หน้าตัดน้ำไหล และเมื่อนำความเร็วกระแสน้ำมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดน้ำไหลแต่ละช่องจะให้ค่าเป็นปริมาณน้ำในช่วงนั้น ๆ มีหน่วยเป็น $ม^3$/วินาที ตามสมการดังนี้

ปริมาณน้ำ($ม^3$/วินาที) = ความลึก (ม) x ความกว้าง (ม) x ความเร็วกระแสน้ำ(ม./วินาที)

ผลรวมของปริมาณน้ำแต่ละช่วงจะนำมาบวกเข้าด้วยกัน จะได้เป็นค่าปริมาณน้ำทั้งหมดของลำน้ำตามแนววัดน้ำนั้น

2.2 อะตอมและนิวเคลียส (atom and nucleus)

2.2.1 องค์ประกอบของอะตอมและนิวเคลียส

อะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสและมีอิเลคตรอนล้อมรอบ เส้นผ่าศูนย์กลางของนิวเคลียสมีขนาดประมาณ 10^{-13} เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของอะตอมประมาณ 10^{-8} เซนติเมตร

ในนิวเคลียสประกอบด้วยนิวคลีออน ซึ่งได้แก่ โปรตอนและนิวตรอน เกาะกันอยู่ความหนาแน่นของนิวเคลียสมีค่าประมาณ 10^{14} กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ในอะตอมที่เป็นกลาง (neutral atom) ประจุของนิวเคลียสจะเท่ากับประจุของอิเลคตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียสอยู่ นั่นคือโปรตอนมีจำนวนเท่ากับอิเลคตรอนนั่นเอง จำนวนโปรตอนเรียกว่า เลขอะตอม (atomic number) ใช้สัญญลักษณ์แทนเป็น Z จำนวนนิวตรอนเรียกว่า เลขนิวตรอน (neutron number) ใช้สัญญลักษณ์แทนเป็น N ถ้า Z รวมกับ N เรียกว่าเลขมวล (mass number) ของอะตอม ซึ่งใช้สัญญลักษณ์แทนเป็น A

2.2.2 ไอโซโทป (isotopes)

นิวไคลด์ (nuclide) ที่มีเลขอะตอมเดียวกันมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน แต่มีจำนวนนิวตรอนไม่เท่ากัน เรียกว่า ไอโซโทป เช่น

nuclide	Z	N	A	Symbol
Hydrogen	1	0	1	$^{1}_{1}H$
	1	1	2	$^{2}_{1}H$
	1	2	3	$^{3}_{1}H$
Helium	2	1	3	$^{3}_{2}He$
	2	2	4	$^{4}_{2}He$
Phosphorus	15	14	29	$^{29}_{15}P$
	15	15	30	$^{30}_{15}P$
	15	16	31	$^{31}_{15}P$
	15	17	32	$^{32}_{15}P$

2.3 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

นิวเคลียสของอะตอมมีระดับพลังงานเป็นขั้น ๆ หลายระดับ ถ้านิวเคลียสมีระดับพลังงานสูงกว่าระดับพื้นฐานปกติ (ground state) คืออยู่ในสภาวะโลด (excited state) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสหรือปฏิกริยานิวเคลียร์ การกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจะมีพลังงานส่วนเกินปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า รังสีแกมมา ในกรณีที่นิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนหรือจำนวนนิวตรอนมากเกินไปเมื่อเทียบกับไอโซโทปที่เสถียร นิวเคลียสจะมีการปรับตัวสู่ความเสถียรโดยการปล่อยรังสีชนิดต่าง ๆ ออกมา เช่น รังสีอัลฟา รังสีเบตาแล้วได้ธาตุใหม่เกิดขึ้น เช่น

$$^{13}_{7}N \longrightarrow {}^{13}_{6}C + {}^{0}_{+1}e$$

$$^{20}_{9}F \longrightarrow {}^{20}_{10}Ne + {}^{0}_{-1}e$$

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

อัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี มีชื่อเรียกเฉพาะว่า "กัมมันตภาพ (activity)" ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าในช่วง 1 หน่วยเวลาธาตุกัมมันตรังสีนั้น ๆ มีการสลายตัวในอัตราที่มากน้อยเพียงใด ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี และค่าคงที่การสลายตัว ตามสมการต่อไปนี้

$$-\frac{dN}{dt}(t) \quad \alpha \quad N(t) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.1)$$

$$-\frac{dN}{dt}(t) \quad = \quad \lambda N(t) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.2)$$

ถ้าอินทิเกรต (integrate) สมการที่ (2.2) และถือว่าที่เวลา $t = 0$, $N(t) = N_0$ จะได้

$$N(t) \quad = \quad N_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.3)$$

เมื่อ $N(t)$ คือจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสี

λ คือค่าคงที่การสลายตัว

t คือเวลา

ผลคูณของ $\lambda N(t)$ เรียกว่า กัมมันตภาพ

$$A(t) \quad = \quad \lambda N(t) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.4)$$

2.3.1 ครึ่งชีวิต (half-life $t_{\frac{1}{2}}$) ของธาตุกัมมันตรังสี

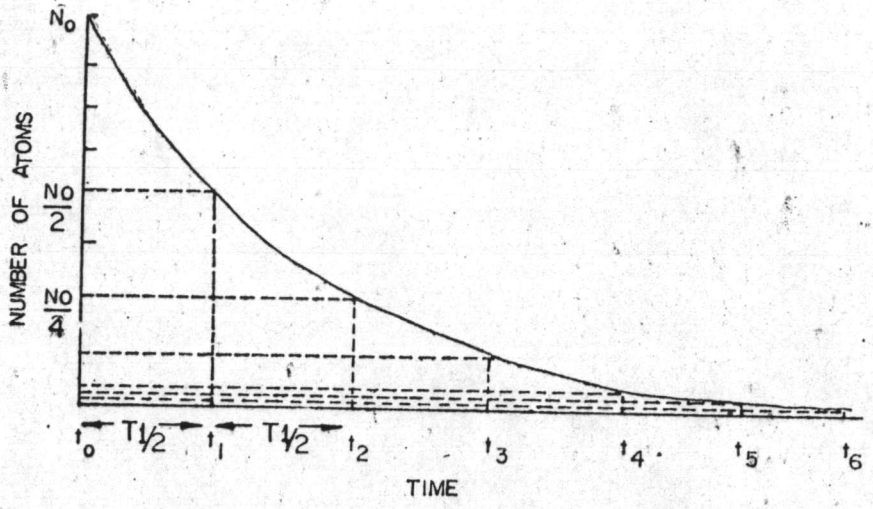
ครึ่งชีวิต หมายถึง ระยะเวลาที่ทำให้ธาตุกัมมันตรังสีลดจำนวนอะตอมหรือกัมมันตภาพลงเหลือครึ่งหนึ่งของจำนวนเดิม

จากสมการที่ 2.3 ที่เวลาผ่านไป $t = t_{\frac{1}{2}}$ จะทำให้ $N(t) = \frac{No}{2}$ จะได้ว่า

$$\frac{N(t)}{N_0} \quad = \quad \frac{1}{2} \quad = \quad e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}}$$

$$-t_{\frac{1}{2}} \quad = \quad \ln\frac{1}{2}$$

$$t_{\frac{1}{2}} \quad = \quad \frac{0.693}{\lambda} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.5)$$



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

2.3.2 หน่วยของกัมมันตภาพ

กัมมันตภาพมีหน่วยเป็นครั้งต่อวินาทีหรือวินาที$^{-1}$ ซึ่งเรียกว่า "เบคเคอเรล(becquerel)" ใช้ตัวย่อว่า Bq. แต่เดิมนิยมใช้หน่วยของกัมมันตภาพเป็นคูรี (Curie "Ci") โดยที่

$$1\ Ci = 3.7 \times 10^{10} \text{ ครั้ง/วินาที}$$
$$= 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

เนื่องจากหน่วย Ci เป็นหน่วยใหญ่หน่วยย่อยของคูรี่ คือ

1 มิลลิคูรี่ (mCi) = 10^{-3} Ci = 3.7×10^{7} ครั้ง/วินาที

1 ไมโครคูรี่ (μCi) = 10^{-6} Ci = 3.7×10^{4} ครั้ง/วินาที

นอกจากนั้นยังมีหน่วยเรียกว่า specific activity เป็นอัตราส่วนของกัมมันตภาพต่อปริมาตรหรือน้ำหนัก มีหน่วยเป็น mCi/g หรือ Ci/ml เป็นต้น

2.3.3 ชนิดของรังสีและอันตรกริยา (interaction) ของรังสีกับสสาร

รังสีหมายถึงพลังงานที่แผ่กระจายออกไปในตัวกลางใด ๆ ในรูปของอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารรังสีจะให้รังสีออกมาอย่างไรอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างแล้วแต่ชนิดของสารรังสีนั้น ๆ รังสีที่ได้ มีชนิดต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ รังสีอัลฟา รังสีเบตา รังสีแกมมา และนิวตรอน

2.3.3.1 รังสีอัลฟา (Alpha Rays, α หรือ $^{4}_{2}He$) รังสีอัลฟา คือ กระแสอนุภาคอัลฟา อนุภาคอัลฟาคือ นิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม ประกอบด้วย โปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 อนุภาค มีประจุ +2 เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีบางชนิด มีพลังงานอยู่ในช่วง 4 - 9 เมกกะอิเลคตรอนโวลท์ (MeV) มีความเร็วประมาณ 2×10^{8} เซนติเมตรต่อวินาที มีคุณสมบัติในการก่อให้เกิดไอออนไนเซชันหรือเอกซ์ไซเทชัน (ionization or excitation) ต่อระยะทางได้สูง แต่มีอำนาจการทะลุทะลวงผ่านวัตถุได้น้อย เนื่องจากเสียพลังงานมากในการชนแต่ละครั้ง อำนาจการทะลุทะลวงนี้จะมากขึ้นตามค่าของพลังงาน และในแต่ละค่าของพลังงานจะลดลงเมื่อวัตถุที่ชนมีเลขอะตอมของธาตุ (atomic number) สูงขึ้น เช่นรังสีอัลฟาที่มีพลังงาน 5 MeV. จะถูกกั้นหมดด้วยอากาศในระยะ 3.5 ซม. ในน้ำเพียง 0.003 ซม.เท่านั้น ดังนั้น กระดาษแผ่นบาง ๆ ก็สามารถกั้นรังสีอัลฟาได้

รังสีอัลฟาส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสของธาตุหนัก ๆ ที่มีเลขอะตอมสูงกว่า 82 เช่น โพโลเนียม -40, เรเดียม -226, พลูโตเนียม -239, อะเมอริเซียม -241 เป็นต้น

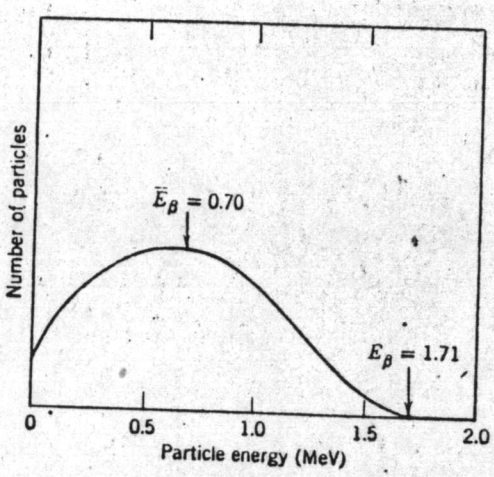
เช่น $^{226}_{88}Ra \longrightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He$

นอกจากนี้อนุภาคอัลฟายังเกิดได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น

$^{1}_{0}n + ^{10}_{5}B \longrightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$ เขียนย่อเป็น $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

$^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \longrightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$ เขียนย่อเป็น $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$

2.3.3.2 รังสีเบตา (Beta Rays,β) รังสีเบตา คือกระแสอนุภาคเบตา (อิเลคตรอนหรือโปสิตรอน) ที่พุ่งออกจากนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสีบางชนิด ซึ่งมีค่าพลังงานตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุดของการสลายตัวของแต่ละนิวเคลียส และค่าพลังงานสูงสุดจะอยู่ในช่วง 0.018 - 4.810 MeV



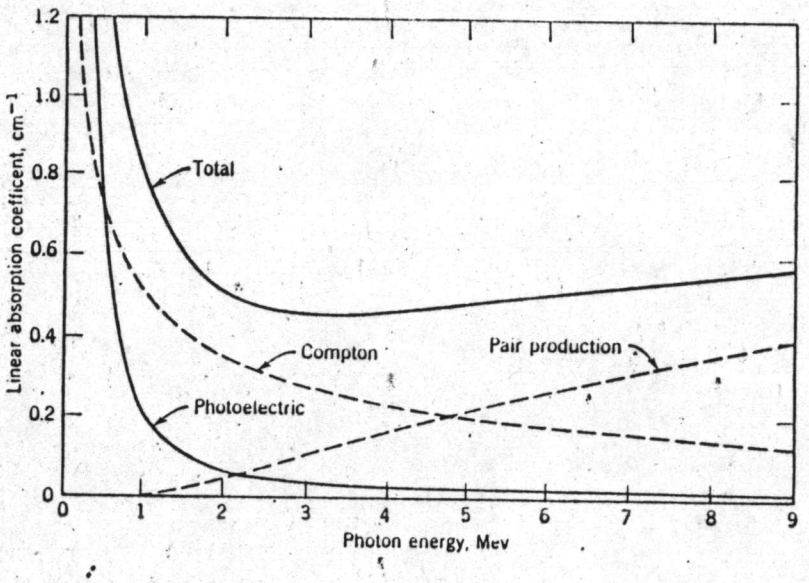
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงการกระจายค่าพลังงานของรังสีเบตา

เนื่องจากรังสีเบตามีมวลน้อยจึงอาจจะวิ่งได้เร็วถึง 90-98 % ของความเร็วแสง ดังนั้น อำนาจการทะลุทะลวงในวัตถุจึงสูงกว่ารังสีอัลฟามาก และอำนาจการทะลุทะลวงจะขึ้นกับค่าของพลังงานและเลขอะตอมของวัตถุที่ขวาง เช่นเดียวกับรังสีอัลฟา เช่น รังสีเบตาที่มีพลังงาน 0.5 MeV. จะถูกกั้นหมดในอากาศระยะ 175 ซม. ในน้ำ 1.8 ซม. และแผ่นอลูมิเนียมหนาเพียง 0.1 ซม. ก็กั้นได้หมด

อันตรกริยาของรังสีเบตากับสสาร นอกจากจะก่อให้เกิดไอออนไนเซชันหรือเอกซ์ไซเทชันเหมือนรังสีอัลฟาแล้ว ในบางครั้งทำให้เกิดรังสีเอกซ์ได้ ที่เรียกว่า เบรมสตราลุง (brems-

strahlung) เนื่องจากอนุภาคเบตาที่มีพลังงานสูงวิ่งผ่านอะตอมของวัตถุเข้าใกล้นิวเคลียสจะแรงดูดซึ่งกันและกัน (เพราะมีประจุต่างกัน) แต่อนุภาคเบตาวิ่งเร็วมากจึงเพียงแต่วิ่งอ้อมนิวเคลียสแล้วเลยไป การเปลี่ยนทิศทางนี้ทำให้สูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่ง ซึ่งจะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนอนุภาคที่เป็นโปสิตรอนจะเกิดอันตรกริยากับอิเลคตรอนอื่น ๆ (annihilation) ได้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.511 MeV 2 ตัว เกิดในทิศตรงกันข้าม ดังนั้น การป้องกันรังสีเบตาที่มีพลังงานสูง ๆ จะต้องคำนึงถึงรังสีแกมมาด้วย จึงต้องใช้วัตถุที่ประกอบด้วยธาตุหนัก เช่น เหล็ก ทองเหลือง หรือตะกั่ว

สารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเบตาที่ใช้มากคือ สตรอนเทียม -90, ธัลเลียม -204, คริปตอน-85, โพรมีเธียม -147, ฟอสฟอรัส -32 เป็นต้น



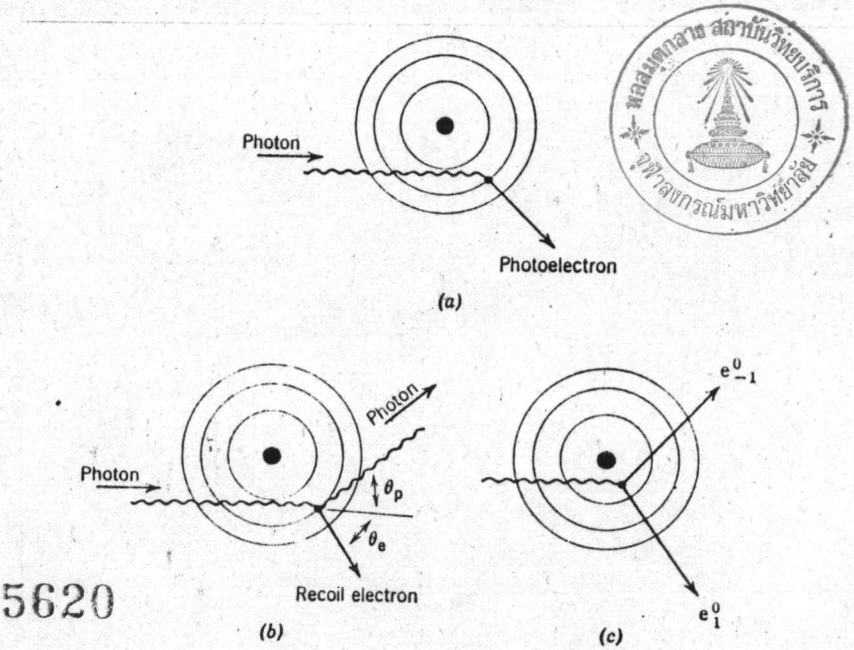
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแกมมาของตะกั่ว

2.3.3.3 รังสีแกมมา (Gamma Rays, γ) รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากนิวเคลียสซึ่งอยู่ในสภาวะโลด (excited state) และคายพลังงานส่วนที่เกินนั้นออกมาเป็นรังสีแกมมา มีพลังงานตั้งแต่ 0.002-2.76 MeV การปลดปล่อยรังสีแกมมาส่วนใหญ่จะเกิดภายหลังจากการแผ่รังสีอัลฟา หรือเบตา หรือถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน

เนื่องจากรังสีแกมมาไม่ใช่อนุภาคที่มีประจุ จึงทำให้เกิดไอออนไนเซชันได้น้อย อันตรกริยากับสสารที่สำคัญมี 3 แบบ คือ

ก. โฟโตอิเลคตริกเอฟเฟคท์ (Photoelectric Effect) เป็นอันตรกริยาที่รังสีแกมมาวิ่งชนอิเลคตรอนที่โคจรล้อมรอบนิวเคลียส แล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเลคตรอนนั้น ทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจากวงโคจร เกิดไอออนไนเซชันและเกิดรังสีเอกซ์ เนื่องจากการแทนของอิเลคตรอนในวงโคจรรอบนอก อิเลคตรอนที่หลุดออกมานี้เรียก โฟโตอิเลคตรอน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดไอออนไนเซชัน หรือเอกซ์ไซเทชันต่อได้อีก

อันตรกริยานี้จะไม่เกิดขึ้น ถ้าค่าของพลังงานของรังสีแกมมาน้อยกว่าพลังงานที่ใช้ยึดเหนี่ยวของอิเลคตรอนในวงโคจรนั้น ๆ และโอกาสที่จะเกิดนั้นได้สมมติให้อะตอมเสมือนหนึ่งว่าเป็นเป้าที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross section,σ) ขนาดต่างกัน ซึ่งจะโตหรือเล็กขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของธาตุที่รังสีผ่าน ($\sigma_p \propto z^4/E^3$) สำหรับอันตรกริยานี้จะมีโอกาสเกิดมากในธาตุหนักและรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่าง ๆ



005620

รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงอันตรกิริยาของรังสีแกมมาแบบต่าง ๆ

(a) photoelectric effect

(b) Compton effect

(c) pair production

ข. คอมพ์ตันเอฟเฟคท์ (Compton Effect) เป็นอันตรกริยาที่รังสีแกมมาวิ่งชนอิเลคตรอนในวงโคจรนอก ๆ ของอะตอมแล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเลคตรอน อิเลคตรอนก็จะหลุดออกจากวงโคจร เกิดไอออนไนเซชันและอิเลคตรอนนั้นก็ไปก่อให้เกิดไอออนไนเซชันหรือเอกซ์ไซเทชันได้อีก ส่วนรังสีแกมมาจะมีพลังงานลดลงจะมากหรือน้อยขึ้นกับมุมที่รังสีแกมมาเปลี่ยนไป และโอกาสจะเกิดอันตรกริยานี้มีมาก เมื่อรังสีแกมมามีค่าพลังงานอยู่ในช่วงกลาง ๆ ($\sigma_c \propto Z/E$) เช่นในตะกั่วจะเกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานตั้งแต่ 0.5-5 MeV

ค. แพร์โพรดัคชัน (Pair Production) อันตรกริยานี้จะเกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงกว่า 10.2 MeV. วิ่งผ่านเข้าไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสแล้วหายไปกลายเป็นอนุภาคอิเลคตรอน กับอนุภาคโพสิตรอน 1 คู่ และอนุภาคทั้งสองจะไปก่อให้เกิดอันตรกริยาต่อไปอีกดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โอกาสที่จะเกิดจะมากตามเลขอะตอมของธาตุที่เข้าทำอันตรกริยา $[\sigma_{pp} \propto Z^2(E - 1.02)]$

อันตรกริยาทั้ง 3 แบบ จะเกิดขึ้นกับอะตอมใดอะตอมหนึ่งก็ได้ และโอกาสที่จะเกิดขึ้นรวมกัน ขึ้นกับพื้นที่ภาคตัดขวางของอะตอมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่รังสีตกกระทบ ($=N\delta x$) และขึ้นกับปริมาณรังสีที่ตกกระทบด้วย (I_o) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_o \exp(-N\sigma x) \text{ หรือ } I = I_o \exp(-\mu x) \quad .....(2.6)$$

เมื่อ I = ปริมาณรังสีที่เหลือจากการเกิดอันตรกริยา

N = จำนวนอะตอมในหนึ่งหน่วยลูกบาศก์

x = ความหนาของวัตถุที่รังสีผ่าน

σ = พื้นที่ภาคตัดขวาง รวมทั้ง 3 แบบในหน่วยบาร์น (barn) ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{cm}^2$)

$\mu = N\sigma$ = สัมประสิทธิ์ของการลดความเข้มรังสี (attenuation coefficiency)

ค่าของ μ หรือ μ/ρ หาได้จากตาราง ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานของรังสีแกมมา

นั่นคือ μ และ μ/ρ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุและพลังงานของรังสี

สมการ 2.6 ใช้กับเฉพาะค่าของพลังงานเพียงค่าเดียว และลำของรังสีเป็นลำแคบ (narrow beam) ถ้าเป็นลำกว้าง (broad beam) จะมีรังสีที่สะท้อนมาจากที่อื่นรวมอยู่ด้วย ทำให้ปริมาณรังสีสูงกว่าปกติ จึงต้องแก้ด้วยค่าบิลด์อัพแฟคเตอร์ (build up factor, B) ฉะนั้น สมการทั่ว ๆ ไปจึงใช้

$$I = BI_o \exp(-\mu x) \quad \text{.....} \quad (2.7)$$

สารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมาที่ใช้กันมากคือ โคบอลท์ -60, ซีเซียม -137, โซเดียม -22, ทอง -198 เป็นต้น

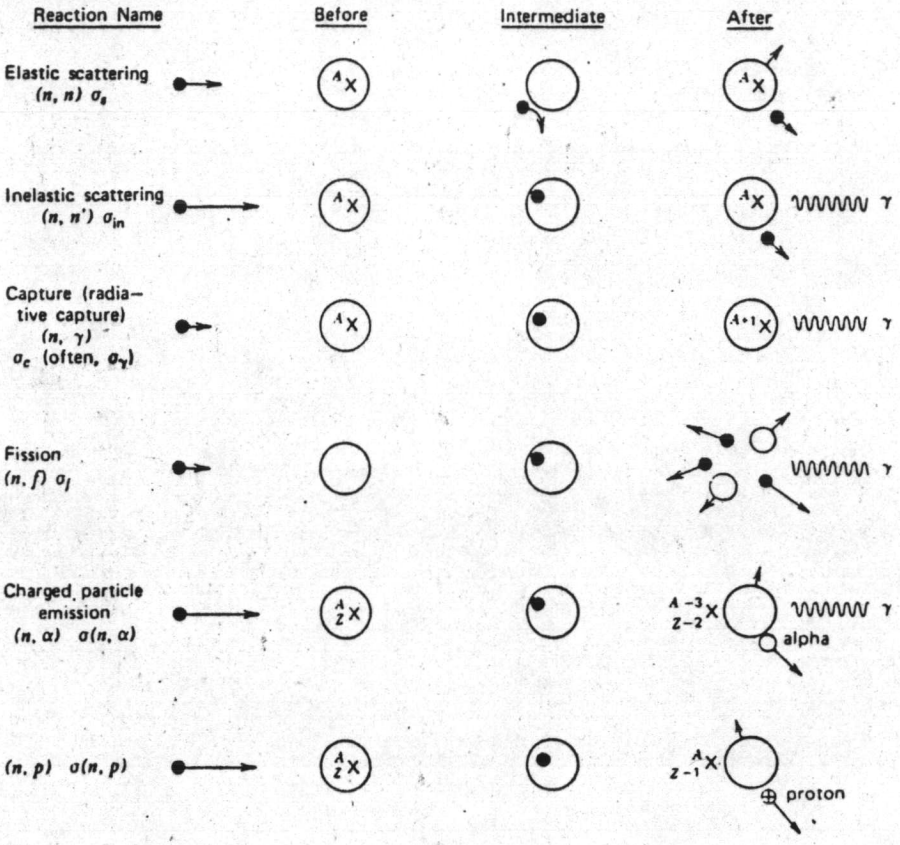
2.3.3.4 นิวตรอน (Neutron)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส เมื่อเกิดปฏิกริยาแตกตัว (fission) หรือถูกยิงด้วยรังสีอัลฟาในธาตุบางชนิด เช่น เบอริลเลี่ยม อนุภาคนิวตรอนนี้ไม่คงตัว จะสลายตัวให้โปรตรอน เนกกาตรอน และนิวตริโน มีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที อันตรกริยาของนิวตรอนกับสสารมีดังนี้

ก. อิแลสติค สแคตเทอริง (elastic scattering) อนุภาคนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุ ซึ่งการชนนี้เป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น แล้วตัวเองกระดอนไปโดยไม่ทำให้นิวเคลียสนั้นเปลี่ยนแปลงสภาวะ อันตรกริยานี้อนุภาคนิวตรอนจะเสียพลังงานมากถ้าชนกับอะตอมของไฮโดรเจน จะเสียพลังงานครึ่งหนึ่งต่อการชนครั้งหนึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับนิวตรอนเร็ว

ข. อินอิแลสติค สแคตเทอริง (inelastic scattering) อนุภาคนิวตรอนชนกับนิวเคลียสแล้วพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปทำให้นิวเคลียสเปลี่ยนสภาวะเป็นสภาวะโลด และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา เช่น นิวตรอนเกิดอันตรกริยากับคาร์บอน

ค. ปฏิกริยานิวตรอน-แกมมา [(n,γ) reaction] อนุภาคนิวตรอนจะถูกนิวเคลียสจับไว้ แล้วทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะโลด จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ผลของปฏิกริยานี้จะทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ซึ่งมีจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสเพิ่มขึ้นหนึ่งตัว นั่นก็หมายถึงมีเลขมวลเพิ่มขึ้นเท่ากับหนึ่ง ปฏิกริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุโดยเทคนิคนิวเคลียร์คือ เทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน (neutron activation) นั่นเอง



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงอันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ

ตัวอย่างปฏิกริยา เช่น

$$^{23}_{11}Na + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{24}_{11}Na + \gamma \quad \text{เขียนย่อเป็น} \quad ^{23}Na(n,\gamma)^{24}Na$$

$$^{31}_{16}P + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{32}_{16}P + \gamma \quad \text{เขียนย่อเป็น} \quad ^{31}P(n,\gamma)^{32}P$$

กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยา (n,γ) จะเป็นไปตามสมการ

$$A(t) = N\sigma\phi(1-e^{-\lambda t}) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (2.8)$$

เมื่อ $A(t)$ = กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

N = จำนวนอะตอมของธาตุที่นำไปอาบรังสีนิวตรอน

σ = ค่านิวตรอนครอสเซคชัน

ϕ = ค่านิวตรอนฟลักซ์

λ = ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

t = ช่วงระยะเวลาในการอาบรังสีนิวตรอน

ง. ปฏิกริยานิวเคลียร์อื่น ๆ ได้แก่ ปฏิกริยาการเกิดอนุภาคมีประจุ เช่น ปฏิกริยานิวตรอน-โปรตอน (n,p) reaction ปฏิกริยานิวตรอน-อนุภาคอัลฟา (n,α) reaction และปฏิกริยาแตกตัว

ตัวอย่างปฏิกริยา เช่น

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$ เขียนย่อเป็น $^{14}N(n,p)^{14}C$

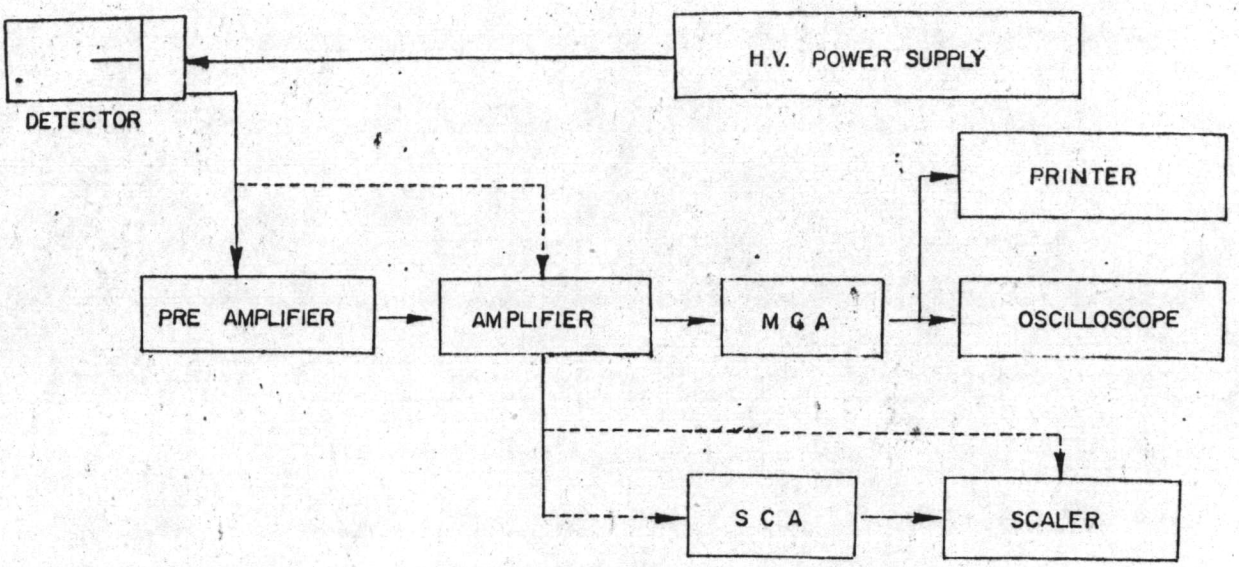
$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{6}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$ เขียนย่อเป็น $^{10}B(n,\alpha)^{5}Li$

2.4 การวัดรังสี

การวัดรังสีอาศัยคุณสมบัติของรังสีในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ขึ้นเป็นต้นว่า การเกิดไอออนไนเซชัน การเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางฟิสิกส์อื่น ๆ เช่น การเกิดแสง แล้วตรวจวัดผลที่เกิดขึ้น หัววัดรังสี (radiation detector) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งสัญญาณเข้าเครื่องบันทึกที่เหมาะสมต่อไป หัววัดรังสีแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ชนิดกาซ ((gaseous detectors) ชนิดเรืองแสง (scintillation detectors) และชนิดกึ่งตัวนำ (semiconductor detectors)

สำหรับการวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องวัดรังสี Geiger-Müller อันเป็นหัววัดชนิดกาซ ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งมีความต่างศักดาไฟฟ้า 2 ขั้ว ส่วนใหญ่จะทำขั้วลบหรือแคโทด (cathode) เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กไร้สนิม, นิคเกิล หรือโลหะอื่น ๆ ที่มี work function สูงและขั้วบวกหรืออะโนด (anode) เป็นแกนกลางทำด้วยทังสะเตน ภายในบรรจุกาซ เช่น ไฮโดรเจน อาร์กอน ขณะใช้งานต้องให้ความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีค่าต่าง ๆ กัน ขึ้นกับขนาดของหัววัดและชนิดของการใช้งาน

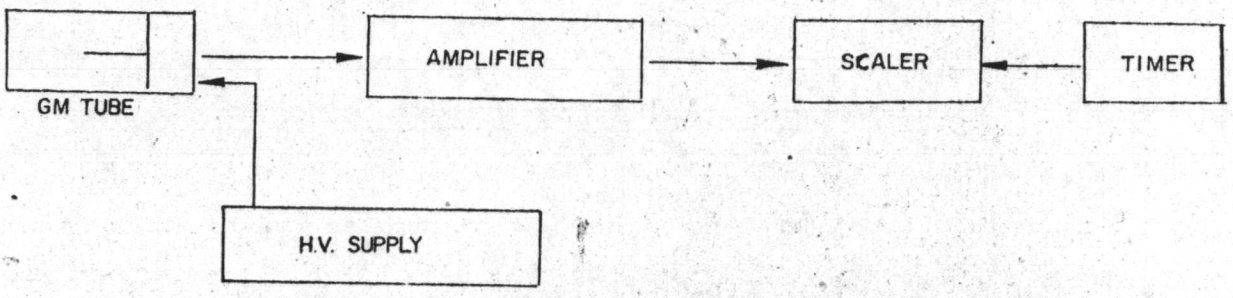
เมื่อรังสีเข้ามาจะเกิดอันตรกริยากับอะตอมของกาซ ได้อิออนบวกและลบ ด้วยความดันของกาซ และความต่างศักย์ที่เหมาะสม อิออนจะไม่รวมตัวกันอีก แต่จะวิ่งไปสู่ขั้วลบและขั้วบวกตามลำดับ เกิดกระแสไหลในวงจรซึ่งเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องนับ อุปกรณ์ที่ใช้กับหัววัดชนิดกาซโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามแผนภูมิในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 แสดงอุปกรณ์ และวงจรของหัววัดรังสี

หัววัดชนิดนี้เหมาะสำหรับวัดอนุภาคอัลฟาและเบตา เพราะก่อให้เกิดไอออนไนเซชันได้มาก ถ้าจะใช้วัดรังสีอื่น ๆ จะต้องดัดแปลงเล็กน้อย เช่น วัดรังสีเอกซ์ หรือแกมมาต้องทำหลอดวัดด้วยธาตุหนัก ๆ เช่น เหล็ก โครเมี่ยม เพื่อให้เกิดโฟโตอีเลคตริกเอฟเฟคท์ ถ้าวัดเทอร์มัลนิวตรอนต้องฉาบผิวภายในด้วยยูเรเนียมหรือโบรอน หรือใช้กาซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3) เพื่อให้เกิดอันตรกริยากับนิวตรอนได้อนุภาคอัลฟา ซึ่งผลทั้งหมดจะไปก่อให้เกิดไอออนไนเซชันกับกาซภายในหลอดต่อไป

หัววัดชนิดกาซแบบที่เรียกว่า หัววัดไกเกอร์ (Geiger Detector) ใช้งานในช่วงที่จำนวนอิออนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า ช่วงนี้กาซมัลติพลิเคชัน (gas multiplication) สูงมาก แม้แต่อิออนตัวเดียวก็ทำให้เกิดกระแสไหลในหัววัดได้ หัววัดแบบนี้ไม่สามารถแยกพลังงานของรังสี และให้สัญญาณไฟฟ้าสูง จึงไม่ต้องใช้พรีแอมปลิไฟเออร์ (pre-amplifier) ในการวัด อุปกรณ์จึงเปลี่ยนไปจากรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.7 แสดงอุปกรณ์และวงจรของหัววัดไกเกอร์

ในหัววัดไกเกอร์ อิออน 1 คู่จะเพิ่มเป็น 10^8 คู่ ก่อนที่จะเข้าขั้ว และจะกลับสู่สภาพปกติเมื่ออิออนบวกเข้าแคโทดหมด เนื่องจากอิออนเกิดขึ้นมากและอิออนบวกวิ่งช้า จึงทำให้รีซอลวิงทาม (resolving time) ของหัววัดแบบนี้สูงกว่าชนิดอื่น ซึ่งทำให้มีขีดจำกัดในการวัดไม่เกิน 20,000 ครั้งต่อนาที หัววัดนี้ใช้กันแพร่หลายที่สุด สามารถวัดได้ทั้งรังสีอัลฟา, รังสีเบตา และรังสีแกมมา และอุปกรณ์การวัดเป็นแบบง่าย ๆ ราคาถูกกว่าชนิดอื่น

2.5 ในการหาปริมาณน้ำโดยอาศัยเทคนิคทางนิวเคลียร์ เนื่องจากข้อมูลทางปริมาณน้ำเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางอุทกวิทยาซึ่งจะพบโดยปกติทั่วไป เราใช้เครื่องวัดน้ำในการหาค่าปริมาณน้ำ แต่ในบางครั้งใช้เครื่องวัดน้ำมักจะมีอุปสรรค เช่น

1. ความเร็วกระแสน้ำน้อยเกินไป ทำให้เครื่องวัดน้ำไม่หมุน หรือความเร็วของกระแสน้ำมากเกินไป คือมากกว่าประมาณ 5 ถึง 10 เมตรต่อวินาที

2. ระดับน้ำต่ำเกินไป จนเครื่องวัดน้ำลอยเหนือผิวน้ำ

3. กรณีน้ำไหลวน ซึ่งไม่เป็นในทิศทางเดียวกัน หรือบริเวณที่ยากต่อการหาพื้นที่หน้าตัด เช่น ลำน้ำตามหุบเขา

ดังนั้นการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าปริมาณน้ำ

การหาปริมาณน้ำโดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ เป็นการหาปริมาณน้ำที่เรียกว่า Tracer Method ซึ่งหลักการก็โดยการใช้สารเรดิโอไอโซโทปปล่อยลงไปในน้ำ ระหว่างจุดปล่อยและแนว

วัดน้ำ น้ำในลำน้ำจะผสมกับสารเรดิโอไอโซโทปให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างที่เราเก็บจากแนววัดน้ำจะนำไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณน้ำได้ เป็นวิธีการที่แพร่หลายมาก เรียกว่า "the constant rate injection method" ซึ่งเป็นวิธีที่ tracer ถูกปล่อยลงไปในลำน้ำด้วยอัตราคงที่ ที่ต่อเนื่องกันไปเหนือแนววัดน้ำด้วยระยะทางที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้สารรังสีจะผสมกับน้ำในลำน้ำจะอยู่ในอัตราคงที่ได้ เมื่อการวัดน้ำขณะน้ำมีคุณสมบัติดังนี้

1. ปริมาณน้ำคงที่ในขณะที่ทำการวัดน้ำ

2. ปริมาณสารเรดิโอไอโซโทปจะไม่สูญหายไประหว่างช่วงที่ปล่อยสารเรดิโอไอโซโทปกับแนววัดน้ำ

3. ส่วนผสมของสารเรดิโอไอโซโทปกับน้ำผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน

ดังนั้นสมการ law of conservation ของสารรังสีเขียนได้ดังนี้

$$QC_o + qC_i = (Q + q)C_s \quad \text{..... (2.9)}$$

Q = ปริมาณน้ำ m^3/วินาที

q = อัตราการปล่อยสารเรดิโอไอโซโทป m^3/วินาที

C_s = ความเข้มข้นของสารเรดิโอไอโซโทปที่จุดวัดน้ำ

C_i = ความเข้มข้นของสารเรดิโอไอโซโทปก่อนปล่อยลงน้ำ

C_o = แบคกราวด์ (background) ความเข้มข้นของสารเรดิโอไอโซโทปในน้ำ

ดังนั้น ค่าปริมาณน้ำ $Q = q \dfrac{C_i - C_s}{C_s - C_o}$ (1)

ถ้า C_o น้อยมากเมื่อเทียบกับ C_s และ q น้อยมากเมื่อเทียบกับ Q จะทำให้ค่า $C_s << C_i$ จะได้

$$Q = \frac{q_i \ C_i}{C_s} \quad \text{(2)} \qquad \text{..... (2.10)}$$

จากสมการ (2.10) จะเห็นว่าค่าปริมาณน้ำสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารเรดิโอไอโซโทปที่ปล่อยลงไปกับความเข้มข้นของสารในน้ำตัวอย่างที่ได้จากแนววัด

วิธีการนี้ต่างเป็นอิสระกัน จากความเร็วของกระแสน้ำและขนาดของลำน้ำ

2.6 Mixing Length

เป็นช่วงระยะที่ปล่อยสารเรดิโอไอโซโทปกับแนววัดน้ำ ช่วงผสมของสารเรดิโอไอโซโทปกับน้ำที่สมบูรณ์มีความสำคัญมากกับวิธีการวัดน้ำด้วยเทคนิควิเคลียร์ ซึ่ง Hull ตั้งสูตรการหาขึ้น คือ

$$L_{min} = 200\, Q^{1/3} \qquad (3)$$

ต่อมาได้ปรับปรุงเป็น $L_{min} = 10 \frac{b^2 V^{\frac{1}{2}}}{Q^{\frac{1}{2}}}$

และ $L_{min} = 10 \frac{b^3}{d}$

โดยที่ L_{min} = minimum mixing Length

Q = flowrate

b = average river width

d = average river depth

V = velocity ของน้ำ

ต่อมา Rimmar ได้ทดลองใหม่ และได้ตั้งสูตร mixing length เป็นดังนี้

$$L_{min} = 0.13\, K \frac{b^2}{d} \qquad (2) \qquad \text{..... (2.11)}$$

$$K = \frac{C(0.7C + 6)}{g} \qquad (2)$$

แทนค่า K ใน 2.11 จะได้

$$L_{min} = 0.13C\left(\frac{0.7C + 6}{g}\right)\frac{b^2}{d} \qquad \text{..... (2.12)}$$

เมื่อ L_{min} = minimum mixing length

C = Chezy Coeffieient

g = gravitational acceleration

b = average river width

d = average river depth

สำหรับ Chezy equation มีสูตร เป็นดังนี้

$$V = C\sqrt{RS} \qquad \text{..... (2.13)}$$

เมื่อ V = Chezy coefficient

R = hydranlic radius

S = slope of the channel

สำหรับ Manning equation มีสูตรเป็นดังนี้

$$V = \frac{1.486R^{2/3}S^{1/2}}{n} \qquad \text{..... (2.14)}$$

เมื่อ n = Manning roughness coefficient

จากสมการ 2.13 และ 2.14 เราสามารถหาความสัมพันธ์กันได้ คือ

$$C = 1.486\frac{R}{n}^{1/6} \qquad \text{..... (2.15)}$$

โดยปกติค่า C จะอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 50 ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของท้องน้ำ C หาได้จากสมการดังนี้

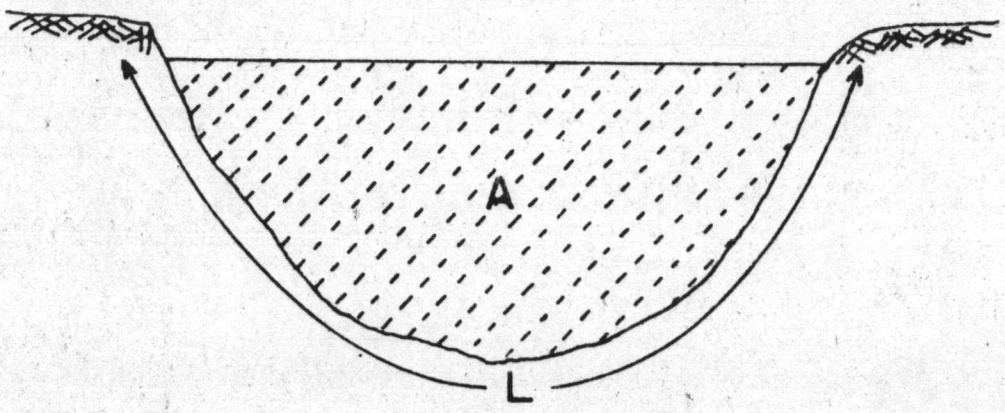
$$C = 1.486\frac{R}{n}^{1/6}$$

R = hydrunlic radius = $\frac{A}{L} = \frac{\text{cross section area}}{\text{wetted length}}$

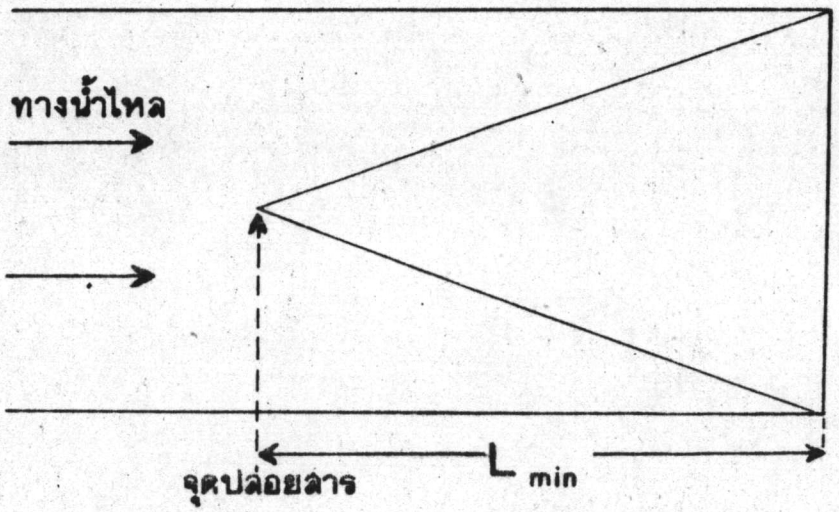
n = Manning roughness coefficient

ตารางที่ 2.1 Manning Roughness Coefficients for Various Boundaries (4)

Boundary	manning roughness n,ft $^{1/6}$
Very smooth surfaces such as glass, plastic, brass	0.010
Very smooth concrete and planed timber	0.011
Smooth concrete	0.012
Ordinary concrete lining	0.013
Good wood	0.014
Vitrified clay	0.015
Shot concrete, untroweled, and earth channels in best condition	0.017
Straight unlined earth canals in good condition	0.020
Rivers and earth canals in fair condition some growth	0.025
Winding natural streams and canals in poor condition considerable moss growth	0.035
Vegetation along banks	0.040 - 0.050
Alluvial channels, sand bed, no vegetation	
1. Lower regime	
Ripples	0.017 - 0.028
Dunes	0.018 - 0.035
2. Washed - out dunes or transition	0.014 - 0.024
3. Upper regime	
Plane bed	0.011 - 0.015
Standing waves	0.012 - 0.016
Antidunes	0.012 - 0.020



รูปที่ 2.8 แสดง wetted length และ cross section area ของลำน้ำ



รูปที่ 2.9 แสดงช่วงผสม mixing length

2.7 เวลาใช้ในการเก็บตัวอย่าง (measurement time) เพื่อให้สารเรดิโอไอโซโทปที่ปล่อยลงไปในน้ำสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำที่ไหลมาตลอดเวลา เวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างควรจะกำหนดให้ถูกต้อง กล่าวคือในขณะที่เก็บตัวอย่างที่แนววัดน้ำ สารเรดิโอไอโซโทปที่ปล่อยลงไปนั้นควรจะกำลังปล่อยอยู่ตลอดเวลา และควรให้สารที่ปล่อยนั้นไหลผ่านแนววัดน้ำไปแล้วสักครู่หนึ่ง แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างนั้นจะได้ผลสมบูรณ์ที่สุดเมื่อมีสารเรดิโอไอโซโทปกำลังถูกปล่อยอยู่ในช่วงเวลาเก็บเท่านั้น

2.8 คุณสมบัติของสารเรดิโอไอโซโทปที่ใช้เป็น tracer

สารที่ใช้ปล่อยลงไปในน้ำนิยมใช้พวกสารเรดิโอไอโซโทปที่มีธาตุเดียวอยู่ในรูปสารประกอบเคมีที่ละลายได้ง่าย และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ดังนี้ คือ

1. ไม่มีการดูดซึมสารรังสีเมื่อปล่อยลงน้ำ

2. สามารถทำการวัดปริมาณรังสีได้ง่าย

3. ความแรงรังสีมีมากกว่า แม้จะมีสารเพียงเล็กน้อย ส่วนผลเสียก็มีเพียงต่อลุยภาพของผู้ที่เสพเข้าไปเท่านั้น ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการหาสารที่ครึ่งชีวิตสั้น ๆ

การวิจัยนี้ได้เลือกใช้โซเดียม -24 ในรูปของโซเดียมคาร์บอเนต (sodium cabonate) และฟอสฟอรัส -32 ในรูปของกรดออโธฟอสฟอริค (orthophosphoric acid) และแอมโมเนียมฟอสเฟต (ammonium phosphate) ซึ่งผลิตขึ้นที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ การที่เลือกสารกัมมันตรังสีทั้งสามชนิดนี้เป็น radiotracer เพราะมีคุณสมบัติที่ต้องการ คือ

1. เป็นสารเคมีที่หาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพงและมีความบริสุทธิ์สูง

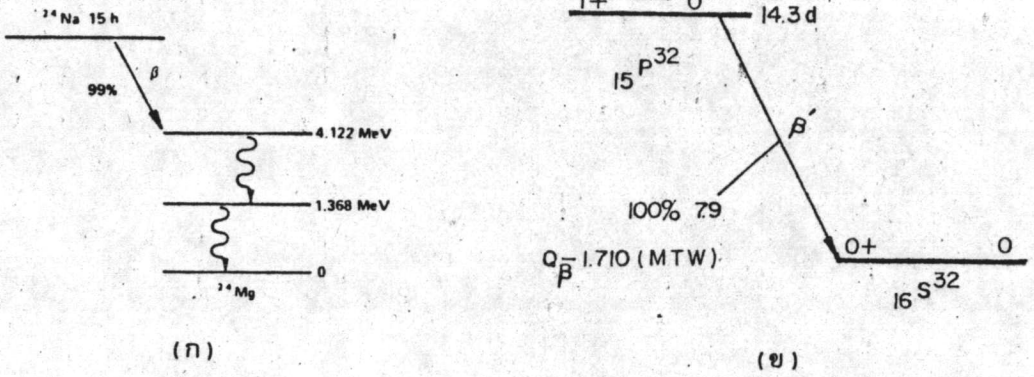
2. อยู่ในรูปซึ่งละลายน้ำได้ดี

3. ผลิตได้ง่ายจากเตาปฏิกรณ์

4. ให้รังสีเบตาซึ่งวัดได้ง่าย

5. มีครึ่งชีวิตไม่สั้นหรือยาวเกินไป

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข)

รูปที่ 2.10 แผนผังการสลายตัวของ ก. ^{24}Na ข. ^{32}P

ตารางที่ 2.2 Radiotracer ที่นิยมใช้ทั่ว ๆ ไป

Tracer	Half Life	Form Used
^{82}Br	35.7 h	Ammonium bromide
^{24}Na	15 h	Sodium bicarbonate
^{131}I	8 d	Iodide
^{198}Au	64.8 h	Gold Chloride
^{51}Cr	27.8 d	51 Cr - EDTA
^{3}H	12.3 y	Tritiated Water
^{32}P	14.3 d	Ammonium phosphate and Orthophosphoric acid