



2.1 การหาสมการมาตรฐานสำหรับการสลายตัวของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน

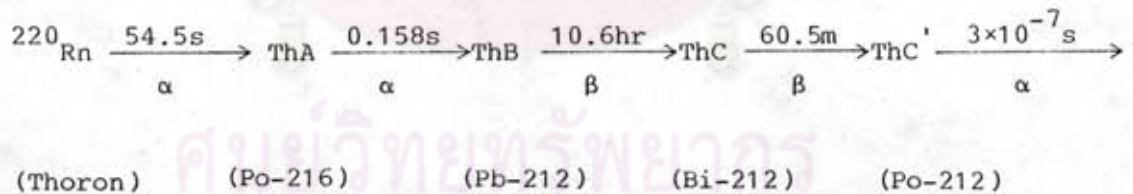
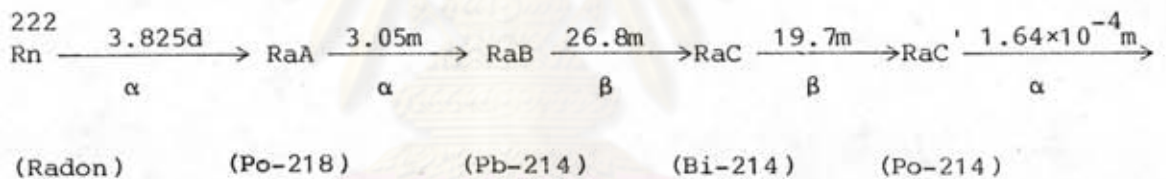
การหาสมการมาตรฐานนี้ ใช้หลักเบื้องต้น ดังนี้ :-

จำนวนที่อยู่ในเวลาใดขณะใดอากาศ = (อัตราการเพิ่มจำนวนบนกระดานกรอง)  
 - (อัตราการลดลงเพราะการสลายตัว)

$$\frac{dN}{dT} = P - \lambda N$$

เมื่อ T คือระยะเวลาการดูดอากาศ

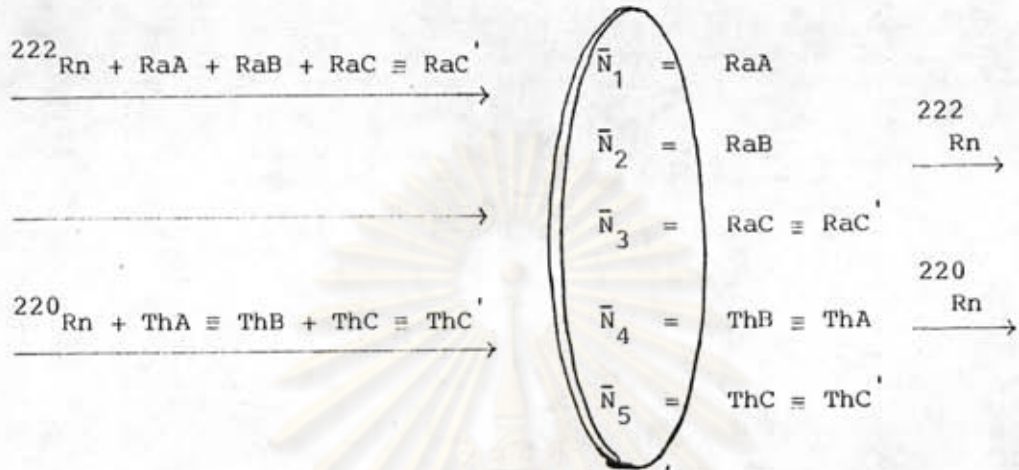
สมการ การสลายตัวของแก๊สเรดอน และแก๊สทอรอน



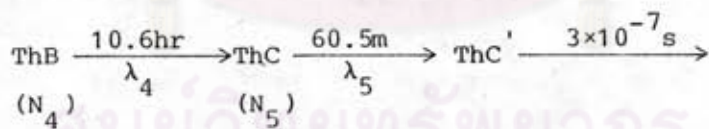
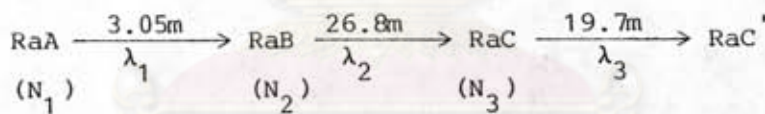
การหาสมการมาตรฐานของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนในอากาศโดยวิธี "T Sivoglou method"<sup>(12)</sup> ทำโดยดูดอากาศผ่านกระดานกรองซึ่งในอากาศจะมีแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน และผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน เมื่อผ่านกระดานกรอง ผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนก็จะติดอยู่บนแผ่นกระดานกรองเพราะเป็นอนุภาค ส่วนแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนก็จะผ่านกระดานกรองไป เพราะฉะนั้นบนแผ่นกระดานกรองก็จะมี RaA, RaB,

$RaC = RaC'$  และ  $ThA = ThB$  และ  $ThC = ThC'$

กระดาศกรอง



เพราะฉะนั้นสามารถเขียนสมการการสลายตัวของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนบนแผ่นกระดาศกรอง ซึ่งจะใช้คำนวณหาสมการมาตรฐานได้ดังนี้



ถ้าให้  $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \bar{Q}_3, \bar{Q}_4$  และ  $\bar{Q}_5$  เป็นความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสี RaA, RaB, RaC, ThB และ ThC ที่นับได้มีหน่วยเป็นอะตอมต่อลิตร  $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3, \bar{N}_4$  และ  $\bar{N}_5$  เป็นจำนวนอะตอมของ RaA, RaB, RaC, ThB และ ThC บนกระดาศกรอง เมื่อหยุดดูอากาศผ่านกระดาศกรองที่ เวลา T นาที  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  และ  $\lambda_5$  เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของ RaA, RaB, RaC, ThB และ ThC ในหน่วยต่อนาที T เป็นเวลาที่ดูอากาศผ่านกระดาศกรองมีหน่วยเป็นนาที และ  $\bar{v}$  เป็นอัตราการไหลของอากาศผ่านแผ่นกระดาศกรองมีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จะแยกออกเป็นสองขั้นตอนคือ :

ขั้นตอนที่ 1 กูดอากาศ ผ่านแผ่นกระดาษกรองเป็นเวลา  $T$  นาที จะได้จำนวนอะตอมของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน บนแผ่นกระดาษกรอง โดยใช้ขอบเขตเงื่อนไขเมื่อ  $t = 0, N = 0$  และ  $t = T, N_i = \bar{N}_i$  จากสมการ (2-1)

$$\frac{dN_1}{dt} = (\bar{Q}_1 \bar{V}) - (\lambda_1 N_1)$$

$$\bar{N}_1 = \frac{\bar{V}\bar{Q}_1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 T}) \quad (2-2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (\bar{V}\bar{Q}_2 + \lambda_1 N_1) - (\lambda_2 N_2)$$

$$\bar{N}_2 = \frac{\bar{V}\bar{Q}_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 T}) \left[ 1 + \frac{\lambda_2 (e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T})}{(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_2 T})} \right] + \frac{\bar{V}\bar{Q}_2}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 T}) \quad (2-3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (\bar{V}\bar{Q}_3 + \lambda_2 N_2) - (\lambda_3 N_3)$$

$$\bar{N}_3 = \frac{\bar{V}\bar{Q}_1}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T}) \left[ 1 + \frac{\lambda_3 (e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(1 - e^{-\lambda_3 T})} + \frac{\lambda_2 \lambda_3 (e^{-\lambda_2 T} - e^{-\lambda_1 T})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_3 T})} + \frac{\lambda_2 \lambda_3 (e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_1 T})}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)(1 - e^{-\lambda_3 T})} \right] + \frac{\bar{V}\bar{Q}_2}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T})$$

$$\left[ 1 + \frac{\lambda_3 (e^{-\lambda_3 T} - e^{-\lambda_2 T})}{(\lambda_3 - \lambda_2)(1 - e^{-\lambda_3 T})} \right] + \frac{\bar{V}\bar{Q}_3}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_3 T}) \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_4}{dt} &= (\bar{Q}_4 \bar{V}) - (\lambda_4 N_4) \\ \bar{N}_4 &= \frac{\bar{V}\bar{Q}_4}{\lambda_4} (1 - e^{-\lambda_4 T}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_5}{dt} &= (\bar{Q}_5 \bar{V} + \lambda_4 N_4) - (\lambda_5 N_5) \\ \bar{N}_5 &= \frac{\bar{V}\bar{Q}_4}{\lambda_5} (1 - e^{-\lambda_5 T}) \left[ \frac{1 + \frac{\lambda_4}{\lambda_5} (e^{-\lambda_5 T} - e^{-\lambda_4 T})}{(\lambda_5 - \lambda_4)(1 - e^{-\lambda_5 T})} \right] + \frac{\bar{V}\bar{Q}_5}{\lambda_5} (1 - e^{-\lambda_5 T}) \end{aligned} \quad (2-6)$$

สมการ (2-2) ถึง (2-6) สามารถเขียนได้ในรูป :

$$\bar{N}_i = \sum_{j=1}^5 a_{ij} \bar{V}\bar{Q}_j \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2-7)$$

ค่า  $a_{ij} = 0$  เมื่อ  $j > i$  และ  $i = 4, 5$   $j = 1, 2, 3$

เขียนในรูปของ Matrix ได้ดังนี้ :

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_1 \\ \bar{N}_2 \\ \bar{N}_3 \\ \bar{N}_4 \\ \bar{N}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}\bar{Q}_1 \\ \bar{V}\bar{Q}_2 \\ \bar{V}\bar{Q}_3 \\ \bar{V}\bar{Q}_4 \\ \bar{V}\bar{Q}_5 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$



ขั้นตอนที่ 2 หลังจากหยุดการเกิดอนุภาคที่ระดับพลังงานของผลผลิตครั้งแรก  
ชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอน ที่อยู่บนกระดาศกรอง จะสลาย  
ตัวตามกฎการสลายตัว โดยใช้ขอบเขตเงื่อนไข เมื่อ  $t = 0, N_i = \bar{N}_i$  เพราะฉะนั้นที่  
เวลาใดๆจะมีจำนวนอะตอมดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ N_1 &= \bar{N}_1 e^{-\lambda_1 t} \end{aligned} \tag{2-9}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ N_2 &= \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \bar{N}_2 e^{-\lambda_2 t} - \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \end{aligned} \tag{2-10}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \\ N_3 &= \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\bar{N}_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)} - \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \bar{N}_3 e^{-\lambda_3 t} \\ &\quad - \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\bar{N}_2 \lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_2 - \lambda_3)} + \frac{\bar{N}_1 \lambda_1 \lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \end{aligned} \tag{2-11}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_4}{dt} &= -\lambda_4 N_4 \\ N_4 &= \bar{N}_4 e^{-\lambda_4 t} \end{aligned} \tag{2-12}$$

$$\frac{dN_5}{dt} = \lambda_4 N_4 - \lambda_5 N_5$$

$$N_5 = \frac{\bar{N}_4 \lambda_4 e^{-\lambda_4 t}}{(\lambda_5 - \lambda_4)} + \bar{N}_5 e^{-\lambda_5 t} - \frac{\bar{N}_4 \lambda_4 e^{-\lambda_5 t}}{(\lambda_5 - \lambda_4)} \quad (2-13)$$

การนับผลผลิตครั้งชีวิตสั้นจากการสลายตัวของแท่งเรคอนและแท่งทอรอนัม นับเฉพาะกัมมันตภาพรังสีแอลฟา ถ้าให้  $I(t_1, t_2)$  คือจำนวนการนับอนุภาคแอลฟาในช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$

$$I(t_1, t_2) = \lambda_1 N_1 + \lambda_3 N_3 + \lambda_5 N_5 \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} I(t_1, t_2) = & \left[ \bar{N}_1 + \frac{\lambda_2 \lambda_3 \bar{N}_1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] (e^{-\lambda_1 t_1} - e^{-\lambda_1 t_2}) \\ & + \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_3 \bar{N}_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{\lambda_3 \bar{N}_2}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] (e^{-\lambda_2 t_1} - e^{-\lambda_2 t_2}) \\ & + \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2 \bar{N}_1}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} + \frac{\lambda_2 \bar{N}_2}{(\lambda_2 - \lambda_3)} + \bar{N}_3 \right] (e^{-\lambda_3 t_1} - e^{-\lambda_3 t_2}) \\ & + \frac{\lambda_5 \bar{N}_4}{(\lambda_5 - \lambda_4)} (e^{-\lambda_4 t_1} - e^{-\lambda_4 t_2}) \\ & + \left[ \frac{\lambda_4 \bar{N}_4}{(\lambda_4 - \lambda_5)} + \bar{N}_5 \right] (e^{-\lambda_5 t_1} - e^{-\lambda_5 t_2}) \end{aligned} \quad (2-15)$$

ถ้าให้  $I_1, I_2, I_3, I_4$  และ  $I_5$  คือ จำนวนการนับอนุภาคแอลฟา ในช่วงเวลาการนับกัมมันตภาพรังสี ต่างกัน 5 ครั้ง คือ

$I_1$	นับตั้งแต่	$t_1$	จนถึง	$t_2$
$I_2$	นับตั้งแต่	$t_3$	จนถึง	$t_4$
$I_3$	นับตั้งแต่	$t_5$	จนถึง	$t_6$
$I_4$	นับตั้งแต่	$t_7$	จนถึง	$t_8$
$I_5$	นับตั้งแต่	$t_9$	จนถึง	$t_{10}$

สมการ (2-15) สามารถเขียนได้ในรูป

$$I_k = \sum_{i=1}^5 b_{ki} \bar{N}_i \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2-16)$$

สัมประสิทธิ์  $b_{ki}$  คำนวณได้จาก (2-15) จากสมการ (2-16) จะ  
คำนวณหา  $\bar{N}_i$  ได้ดังนี้

$$\bar{N}_i = \sum_{k=1}^5 d_{ik} I_k \quad (2-17)$$

และจาก (2-17) และ (2-7) จะเขียนสมการในค่าระดับความเข้มข้น  
 $\bar{Q}_j$  ได้ดังนี้

$$\bar{Q}_j = \sum_{k=1}^5 f_{jk} I_k \quad (2-18)$$

ถ้าให้  $E$  คือ ค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับอนุภาคแอลฟา  
 $\bar{C}_m$  คือ ค่าความเข้มข้นของแก๊สมันดากาฟรังส์ ของ  $RaA, RaB,$   
 $RaC, ThB$  และ  $ThC$  ที่มีอยู่ในอากาศในธรรมชาติ  
ในหน่วยพิโคคูรีต่อลิตร

$$2.22 \bar{C}_m \text{ VE} = \sum_j \lambda_j \bar{Q}_j \quad (2-19)$$

จากสมการ (2-19) และ (2-18) เขียนได้ในรูป

$$\bar{C}_m \text{ VE} = \sum_{k=1}^5 l_{mk} I_k \quad (2-20)$$

สมการ (2-20) คือสมการที่ใช้คำนวณระดับความเข้มข้นของผลผลิตครึ่งชีวิต  
สั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนและแก๊สทอรอนที่มีอยู่ในอากาศในธรรมชาติ

2.2 การประเมินปริมาณรังสี และคาดคะเนโอกาสตายด้วยโรคมะเร็งที่ปอดสำหรับประชาชน  
เมื่อได้รับ ผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนในระดับธรรมชาติ

การคำนวณ Working Level Months ต่อปี ตามสมการ (1-3)  
สำหรับประชาชนทั่วไป ใช้ขอบเขตเงื่อนไขว่า ใช้เวลาอยู่ภายในอาคาร 20 ชั่วโมงต่อวัน  
และอยู่ภายนอกอาคาร 4 ชั่วโมงต่อวัน ดังสมการ

$$WLM \text{ ต่อปี} = \frac{(WL)_{in} (20 \times 365)}{170} + \frac{(WL)_{out} (4 \times 365)}{170} \quad (2-21)$$

ซึ่งค่า WL สำหรับแก๊สเรดอนหาได้จากสมการ (1-1)

การประเมิน bronchial dose อันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้น  
ของผลผลิตครึ่งชีวิตสั้น ในอากาศในธรรมชาติ ทำให้โดยใช้ Conversion factor 0.7  
rad/WLM Harley and Pasternack<sup>(13)</sup> สำหรับทุกเพศทุกวัย

NCRP Report No 78<sup>(6)</sup> ได้ประเมิน Lifetime lung cancer  
risk สำหรับการหายใจรับเอาผลผลิตครึ่งชีวิตสั้นที่เกิดจากการสลายตัวของแก๊สเรดอนในระดับ  
ธรรมชาติ ดังปรากฏในตาราง 2.2.1 ซึ่งมีค่า Lifetime risk factor 9100 Lung  
cancer deaths ในล้านคนต่อระดับความเข้มข้น 1 WLM ต่อปี annual risk  
ได้จาก Lifetime risk ÷ 45 ซึ่งคือ จากอายุ 40 ถึง 85 ปี ตามสมมุติฐานที่ว่าโรคมะ  
เร็งที่ปอดจะไม่เกิดขึ้นก่อนอายุ 40 ปี

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2. 1 Lifetime lung cancer risk under environmental conditions per WLM per year.\* Lifetime risk as a function of age and duration of exposure

Exposure Duration	Lifetime Lung Cancer Risk										Lung Cancers in a Population of 10 <sup>6</sup> Persons <sup>b</sup>	
	Age at First Exposure											
	1	10	20	30	40	50	60	70				
1 Year	$6.4 \times 10^{-5}$	$9.1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$7.0 \times 10^{-5}$				13
5 Years	$3.4 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$	$6.9 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-4}$				66
10 Years	$7.7 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$				130
30 Years	$3.4 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-4}$				380
Life	$9.1 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-4}$				560

\* For radon daughters measured under environmental rather than underground mining conditions.

<sup>b</sup> For a population with age characteristics equal to that in the whole United States in 1975.