



บทที่ ๓

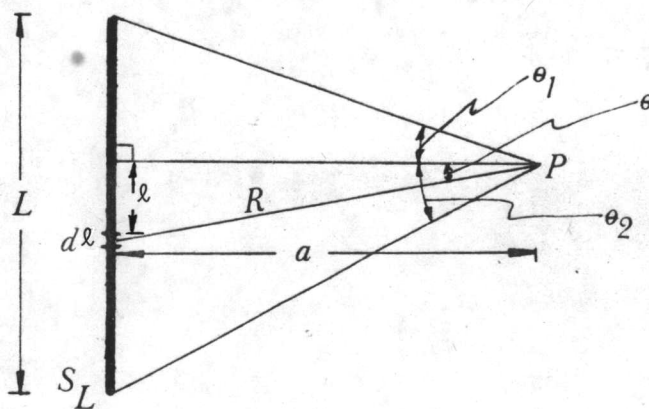
วิธีการคำนวณหา เรดิเอชันฟลักซ์

ในบทนี้จะกล่าวถึง การคำนวณหา เรดิเอชันฟลักซ์ ณ จุดต่าง ๆ ที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี ที่เป็นเส้น ในกรณีที่มีสิ่งขวางกั้น และไม่มีสิ่งขวางกั้นต้นกำเนิดรังสี

๓.๑ ต้นกำเนิดรังสีที่เป็นเส้น เป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีขนาดความยาวมากกว่าพื้นที่หน้าตัดมาก ๆ เช่น ท่อน้ำที่มีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ในน้ำ และเมื่อน้ำไหลไปตามท่อ จะมีรังสีแผ่กระจายออกตามแนวความยาวของท่อนั้น ค่าของความแรงรังสี (Source Strength) ของต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ จะวัดปริมาณรังสีที่แผ่ออกมา ในหนึ่งหน่วยความยาว ต่อ หนึ่งหน่วยเวลา เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ S_L โดยที่มีหน่วยเป็น โฟตอน/เซนติเมตร-วินาที สำหรับแท่ง เชื้อเพลิงแต่ละแท่งของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-๑ ซึ่งมีขนาดโดยประมาณเท่ากับ $๓" \times ๓" \times ๒๔"$ พื้นที่หน้าตัดแบ่งเป็นแผ่นบาง ๆ บรรจุเรเนียมจำนวน ๑๐ แผ่น พื้นที่หน้าตัดจริง ๆ ประมาณ ๑.๕๖ ตารางนิ้ว เมื่อนำเปรียบเทียบกับความยาวมีค่าน้อยกว่ามาก จึงอาจถือได้ว่าแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งเป็น ต้นกำเนิดรังสีที่เป็นเส้น

๓.๒ วิธีการคำนวณหาเรดิเอชันฟลักซ์เมื่อไม่มีสิ่งขวางกั้นต้นกำเนิดรังสี¹

- ให้
- | | |
|--|--------------------------------------|
| S_L = ความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสีที่เป็นเส้น | โฟตอน/เซนติเมตร-วินาที |
| ϕ_P = เรดิเอชันฟลักซ์ที่ปรากฏที่จุด P ใด ๆ | โฟตอน/เซนติเมตร ² -วินาที |
| L = ความยาวของต้นกำเนิดรังสี | เซนติเมตร |
| a = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงจุด P | เซนติเมตร |
| θ = มุมใด ๆ | องศา |
| R = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีชิ้นเล็ก ๆ dL ถึงจุด P ใด ๆ | เซนติเมตร |



รูปที่ ๓.๑

แสดงการแผ่กระจายของรังสีจากต้นกำเนิดรังสีไปปรากฏที่จุด P

¹ Rockwell, T. Reactor Shielding Design Manual D. Van Nostrand Company Inc., 1965, p. 348.

จากรูป ๓.๑

$$l = a \tan \theta$$

7

ดังนั้น

$$dl = a \sec^2 \theta d\theta$$

พิจารณาต้นกำเนิดรังสีชั้นเล็ก ๆ dl มีความแรงแรงรังสีเท่ากับ $S_L dl$ จะแผ่รังสีไปปรากฏที่จุด P ทำให้มีเรดิเอชันฟลักซ์ที่จุด P เท่ากับ $d\phi_P$ จะถือว่าต้นกำเนิดรังสีชั้นเล็ก ๆ dl นี้เป็นต้นกำเนิดรังสีที่เป็นจุด (Point Source) แผ่รังสีออกทุกทิศทุกทางรอบตัว ดังนั้น ที่ระยะ R ใด ๆ ที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีชั้นเล็ก ๆ นี้ ซึ่งมีพื้นที่ผิวทรงกลมเท่ากับ $4\pi R^2$ ตารางหน่วย จะมีรังสีทุกโฟตอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดรังสีชั้นเล็ก ๆ ผ่านพื้นที่ เมื่อพิจารณาพื้นที่ ๑ ตารางหน่วยจะต้องมีรังสีแผ่ออกเท่ากับ $S_L dl / 4\pi R^2$

$$\text{ดังนั้นที่จุด P เรดิเอชันฟลักซ์, } d\phi_P = \frac{S_L dl}{4\pi R^2} \quad \text{โฟตอน/ชม}^2\text{-วินาที}$$

$$\text{แต่ } R = a \sec \theta \quad \text{และ} \quad dl = a \sec^2 \theta d\theta$$

$$\text{ดังนั้น} \quad d\phi_P = \frac{S_L a \sec^2 \theta d\theta}{4\pi (a \sec \theta)^2}$$

$$d\phi_P = \frac{S_L d\theta}{4\pi a} \quad (3.1)$$

ปริมาณเรดิเอชันฟลักซ์ทั้งหมดที่ P เท่ากับ $\phi_P = \int d\phi_P$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \phi_P &= \int_{-\theta_2}^{\theta_1} \frac{S_L d\theta}{4\pi a} \\ &= \frac{S_L}{4\pi a} \int_{-\theta_2}^{\theta_1} d\theta \end{aligned}$$

$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} (\theta_1 + \theta_2) \quad \text{โฟตอน/ชม}^2\text{-วินาที} \quad (3.2)$$

3.3 วิธีการคำนวณหาเรดิเอชันฟลักซ์เมื่อมีสิ่งขวางกั้นต้นกำเนิดรังสี² เมื่อมีสิ่งขวางกั้นรังสีที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดรังสี จะเกิดการชนกับสิ่งที่ขวางกั้นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างรังสีกับอะตอมของสิ่งขวางกั้นนั้น ถ้าในการชนนั้นรังสีถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อะตอมของสิ่งขวางกั้น แล้วตัวเองก็จะหายไป เรียกการชนแบบนี้ว่า แอ็บซอร์ชัน คอลลิชัน (Absorption Collision) แต่ถ้าการชนนั้นรังสีถ่ายเทพลังงานเพียงส่วนหนึ่งแล้วตัวเองจะวิ่งต่อไปในทิศทางใหม่ เรียกการชนแบบนี้ว่า สแกตเตอริง คอลลิชัน (Scattering Collision) ดังนั้นในการหาเรดิเอชันฟลักซ์ ณ จุดต่าง ๆ ที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี จะต้องพิจารณาถึงรังสีที่หายไปเป็นสิ่งขวางกั้น และรังสีที่ทะลุผ่านสิ่งขวางกั้น แต่มีพลังงานลดน้อยลงกว่าเดิม การลดน้อยลงของรังสีถือว่าเป็นไปตาม ฟังก์ชัน (Function) ของ เอกโปเนนเชียล $-\mu t$ (Exponential $-\mu t, e^{-\mu t}$)

เมื่อ $\mu =$ โททอล แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน (Total Attenuation Coefficient) หาได้จากกราฟรูปที่ 3.1³ เซนติเมตร⁻¹

$$\mu = \mu_a + \mu_s$$

$\mu_a =$ แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน ออฟ แอ็บซอร์ชัน (Attenuation Coefficient of Absorption) เซนติเมตร⁻¹

$\mu_s =$ แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน ออฟ สแกตเตอริง (Attenuation Coefficient of Scattering) เซนติเมตร⁻¹

$t =$ ความหนาของสิ่งขวางกั้น เซนติเมตร

การที่ถือว่าการลดของรังสีเป็นไปตามฟังก์ชันของเอกโปเนนเชียลนั้น พบว่าปริมาณการลดมากเกินไป เพราะจากการวัดรังสีเมื่อทะลุสิ่งขวางกั้นออกมา จะมีค่ามากกว่าที่ถือว่าลดลงตามเอกโปเนนเชียล ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ค่าที่ถือว่าลดลงตามเอกโปเนนเชียล จะต้องมิตัวเลขที่มากกว่าหนึ่ง มาคูณ ซึ่งค่าตัวเลขนี้เรียกว่า บิลท์อัพ แฟคเตอร์ (Buildup Factor)⁴ แทนด้วยตัวอักษร B ดังนั้นบิลท์อัพแฟคเตอร์ก็คือ เรดิเอชันฟลักซ์จริง ๆ ต่อ เรดิเอชันฟลักซ์ที่ถือว่าลดลงตาม เอกโปเนนเชียล ค่าของบิลท์อัพแฟคเตอร์ หาได้จากสมการ

$$B_{mst}(\mu_0 x, E) = \sum_{n=1}^N A_n(E_0) \exp \{-\alpha_n(E_0) \mu_0 x\}$$

เมื่อ

$B_{mst}(\mu_0 x, E) =$ บิลท์อัพแฟคเตอร์
 $m =$ แอทเทนูเอติงมีเดีย (Attenuating Medium)
 $s =$ รูปร่างลักษณะต้นกำเนิดรังสี (Source Geometry)
 $t =$ ชนิดของบิลท์อัพแฟคเตอร์ เป็นแบบ เอนเนยีฟลักซ์ (Energy Flux) จำนวนฟลักซ์ (Flux) หรือโดสเรท (Doserate)

$A_i, \alpha_i =$ ค่าคงที่ที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานของรังสี หาจากกราฟรูปที่ 9.2-3.3⁵

² T. Rockwell, Reactor shielding Design Manual D. Van Nostrand Company Inc. 1965 pp. 348, 412.

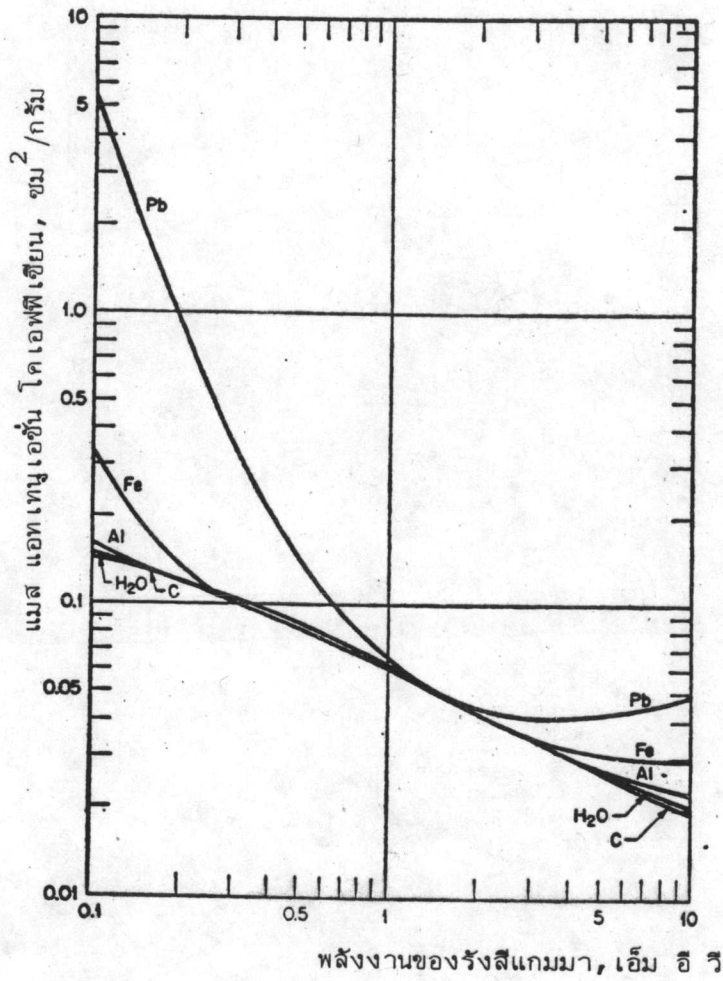
³ Glasstone, S., Sesonske, A., Nuclear Reactor Engineering D. Van Nostrand Company Inc. 1967 p. 55.

ในกรณีที่มีวัสดุขวางกั้นต่าง ๆ กันหลายชนิด ค่าของ บิลท์อับแฟคเตอร์ หาได้ดังนี้

๑. เมื่อมีวัสดุขวางกั้น เป็นวัสดุเบา (Light Material) กับวัสดุหนัก (Heavy Material) ค่าของ บิลท์อับแฟคเตอร์ หาได้จาก
 - ก. เมื่อการขวางกั้นต้นกำเนิดรังสี เป็นวัสดุเบาก่อน แล้วตามด้วยวัสดุหนัก ให้ใช้ค่าของ โคลบิลท์อับ แฟคเตอร์ ของวัสดุหนักเพียงอย่างเดียว
 - ข. เมื่อการขวางกั้นต้นกำเนิดรังสี เป็นวัสดุหนักก่อน แล้วตามด้วยวัสดุเบา ให้ใช้ค่าของ โคลบิลท์อับแฟคเตอร์ ของวัสดุแต่ละชนิดมาคูณกัน
๒. เมื่อมีวัสดุขวางกั้นหลายชนิดต่าง ๆ กัน ให้ใช้ผลคูณของ บิลท์อับแฟคเตอร์ ของแต่ละชนิด คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ คอนเซอร์เวทิฟ (Conservative Answer)
๓. เมื่อมีวัสดุขวางกั้นหลายชนิดต่าง ๆ กัน ให้เปลี่ยนค่าความหนาของวัสดุแต่ละชนิดให้เป็นวัสดุชนิดเดียว โดยใช้ค่าความหนา อีควิวาเลนท์ ที่ผลของโคลส ไม่เปลี่ยนแปลง

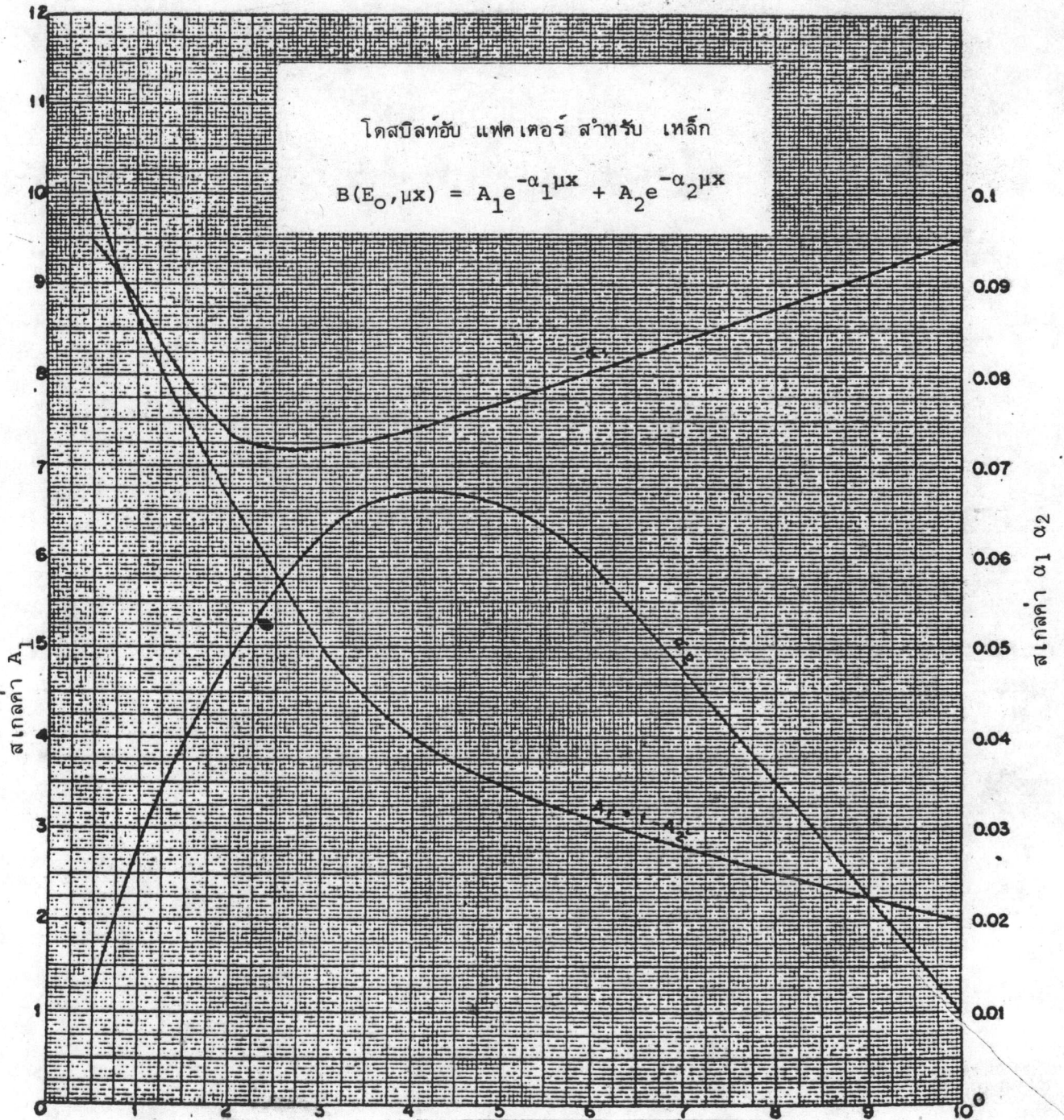
⁴ Rockwell, T., Reactor Shielding Design Manual D. Van Nostrand Company Inc., 1965 pp. 8-9.

⁵ Ibid., pp. 417 , 422.



กราฟรูปที่ 3.1

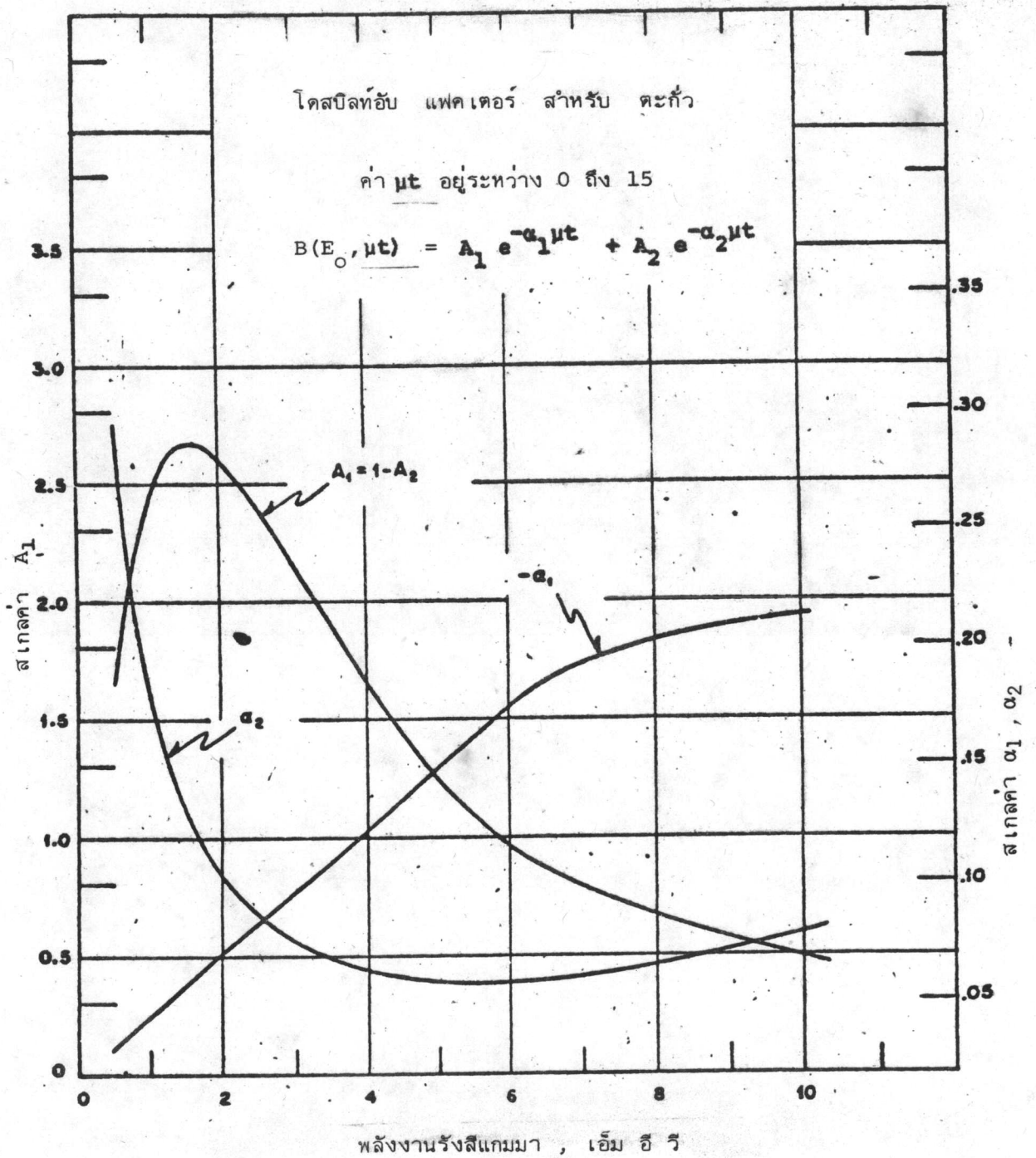
แสดงค่า มวล แอทเทนูเอชัน โคเอฟฟิเชียน ของวัสดุต่าง ๆ กัน



พลังงานรังสีแกมมา , เอ็ม ฮี วี

กราฟรูปที่ 3.2

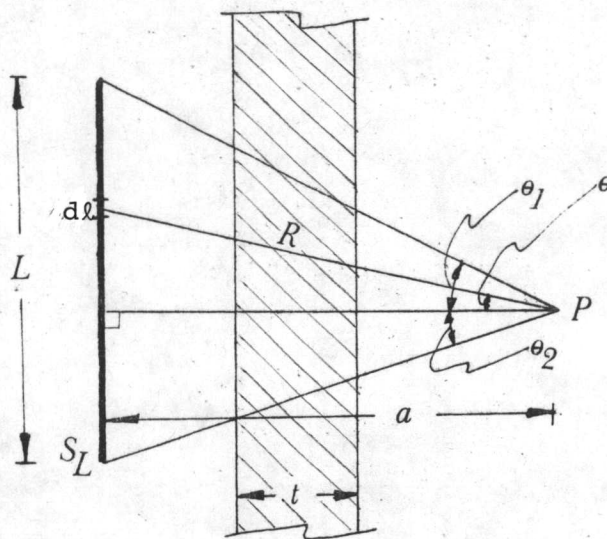
แสดงค่า A_1 , α_1 และ α_2 สำหรับ โดสบิลท์อับแพคเตอร์ ของ เหล็ก ที่รังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ



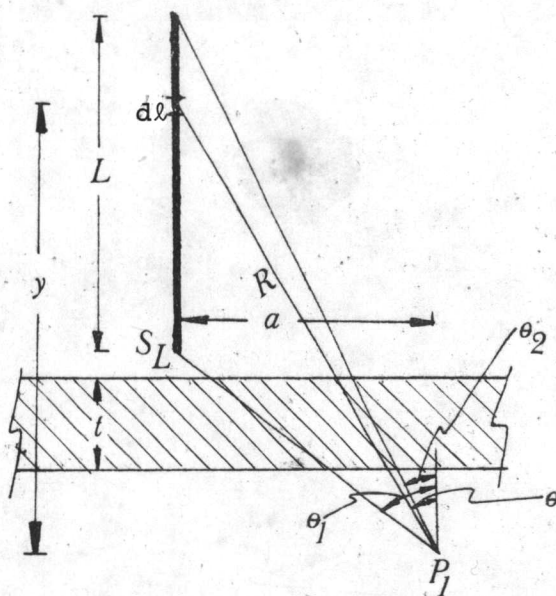
กราฟรูปที่ 3.3

แสดงค่า A_1, α_1 และ α_2 สำหรับ โศลบัลท์อับแพคเตอร์ ของ ตะกั่ว ที่รังสีแกมมาต่าง ๆ กัน

3.3.1 วิธีการคำนวณหาเรดิเอชันฟลักซ์เมื่อไม่คิด บิลท์อับแพคเตอร์



รูปที่ ๓.๒ ก.



รูปที่ ๓.๒ ข.

รูปที่ ๓.๒

แสดงการแผ่กระจายของรังสีที่ละลิ่งขวางกัน

จากรูป ๓.๒

z = ระยะห่างจากผิวนอกสิ่งขวางกั้นถึงจุด P ใด ๆ

t = ความหนาของสิ่งขวางกั้น

a = ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีถึงจุด P ใด ๆ

จากสมการ (๓.๑) เบริเอชันฟลักซ์จากต้นกำเนิดรังสีชั้นเล็ก ๆ $d\ell$ มีค่าเท่ากับ $d\phi_P$

$$d\phi_P = \frac{S_L d\theta}{4\pi a}$$

เมื่อสิ่งขวางกั้นหนา t ความหนาในแนว $d\ell$ ถึง P เท่ากับ $t \sec\theta$ เบริเอชันฟลักซ์ ลดลงตาม $\exp(-\mu t \sec\theta)$

$$d\phi_P = \frac{S_L d\theta}{4\pi a} e^{-\mu t \sec\theta} \quad (3.2.1)$$

เบริเอชันฟลักซ์ที่ P $\phi_P = \int d\phi_P$

$$\begin{aligned} \phi_P &= \int_{-\theta_2}^{\theta_1} \frac{S_L}{4\pi a} e^{-\mu t \sec\theta} d\theta \\ &= \frac{S_L}{4\pi a} \left\{ \int_0^{\theta_1} e^{-\mu t \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_2} e^{-\mu t \sec\theta} d\theta \right\} \end{aligned}$$

ให้ $F(\theta, \mu t) = \int_0^\theta e^{-\mu t \sec\theta} d\theta$ หาได้จากกราฟรูปที่ 3.4⁶

$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \{F(\theta_1, \mu t) + F(\theta_2, \mu t)\} \quad (3.3)$$

ในกรณีที่จุด P อยู่แนวกึ่งกลางของต้นกำเนิดรังสี คือ มุม θ_1 เท่ากับ θ_2

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \phi_P &= \frac{S_L}{4\pi a} \left\{ 2 \int_0^\theta e^{-\mu t \sec\theta} d\theta \right\} \\ &= \frac{S_L}{4\pi a} 2 F(\theta, \mu t) \\ &= \frac{S_L}{2\pi a} F(\theta, \mu t) \quad (3.4) \end{aligned}$$

จากรูป ๓.๒ ข.

เมื่อ	t = ความหนาของสิ่งขวางกัน	เซนติเมตร
	a = ระยะห่างในแนวนอนจากต้นกำเนิดรังสีถึงจุด P.	เซนติเมตร
	y = ระยะห่างใด ๆ จาก dL ในแนวตั้งถึงแนวจุด P.	เซนติเมตร
	R = ระยะห่างใด ๆ จาก dL ในแนวใด ๆ ถึงจุด P.	เซนติเมตร

$$y = a \cot \theta$$

$$dy = -a \operatorname{Cosec}^2 \theta d\theta \quad \text{ดังนั้น} \quad dL = a \operatorname{Cosec}^2 \theta d\theta \quad (\text{ความยาว})$$

$$R = a \operatorname{Cosec} \theta$$

ในทำนองเดียวกันที่จุด P_1

$$\begin{aligned} d\phi_{P_1} &= \frac{S_L dL}{4\pi R^2} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} \\ &= \frac{S_L (a \operatorname{Cosec}^2 \theta) d\theta}{4\pi (a \operatorname{Cosec} \theta)^2} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} \end{aligned}$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} d\theta$$

$$\phi_{P_1} = \int d\phi_{P_1}$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \int_{\theta_2}^{\theta_1} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} d\theta$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \left\{ \int_0^{\theta_1} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} d\theta - \int_0^{\theta_2} e^{-\mu t \operatorname{Sec} \theta} d\theta \right\}$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \{ F(\theta_1, \mu t) - F(\theta_2, \mu t) \}$$

$$\phi_{P_1} = \frac{S_L}{4\pi a} \{ F(\theta_1, \mu t) - F(\theta_2, \mu t) \} \quad (3.5)$$

3.3.2 วิธีการคำนวณหา เรดิเอชันฟลักซ์ เมื่อคิดบิลท์อับแพคเตอร์ด้วย⁷ ในกรณีที่มีวัสดุวางกันชนิดเดียวหนา t เทอมของบิลท์อับแพคเตอร์หาจาก

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha_n \mu t}$$

$$B = A_1 e^{-\alpha_1 \mu t} + A_2 e^{-\alpha_2 \mu t}$$

จากสมการที่ (3.3) เมื่อคิด บิลท์อับแพคเตอร์

$$\phi_P = B \frac{S_L}{4\pi a} \{ F(\theta_1, \mu t) + F(\theta_2, \mu t) \} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.5)

$$\phi_{P_1} = B \frac{S_L}{4\pi a} \{ F(\theta_1, \mu t) - F(\theta_2, \mu t) \} \quad (3.7)$$

ในกรณีที่รวมเทอมของ บิลท์อับแพคเตอร์เข้าในสมการเลย หาได้จากสมการ(3.2.1) คูณ B

$$\begin{aligned} d\phi_P &= B \frac{S_L d\theta}{4\pi a} e^{-\mu t \sec\theta} \\ &= \{ A_1 e^{-\alpha_1 \mu t \sec\theta} + A_2 e^{-\alpha_2 \mu t \sec\theta} \} \frac{S_L}{4\pi a} e^{-\mu t \sec\theta} d\theta \end{aligned}$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \{ A_1 e^{-\mu t(1 + \alpha_1)\sec\theta} + A_2 e^{-\mu t(1 + \alpha_2)\sec\theta} \} d\theta$$

$$\phi_P = \int_{-\theta_2}^{\theta_1} d\phi_P$$

⁷ Ibid., pp.392-393 , 414.

$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \left\{ \int_0^{\theta_1} A_1 e^{-(1+\alpha_1)\mu t \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_2} A_2 e^{-(1+\alpha_2)\mu t \sec\theta} d\theta \right. \\ \left. + \int_0^{\theta_2} A_1 e^{-(1+\alpha_1)\mu t \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_1} A_2 e^{-(1+\alpha_2)\mu t \sec\theta} d\theta \right\}$$

ให้ $b_{11} = (1 + \alpha_1)\mu t :$
 และ $b_{12} = (1 + \alpha_2)\mu t :$

$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \left\{ \int_0^{\theta_1} A_1 e^{-b_{11} \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_1} A_2 e^{-b_{12} \sec\theta} d\theta \right. \\ \left. + \int_0^{\theta_2} A_1 e^{-b_{11} \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_2} A_2 e^{-b_{12} \sec\theta} d\theta \right\}$$

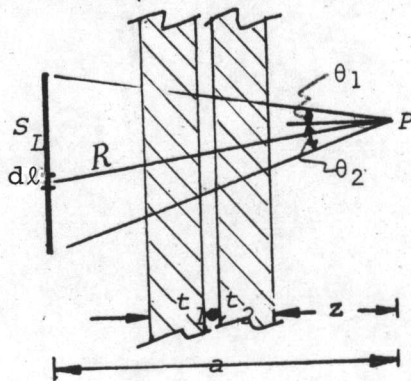
$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \{ A_1 F(\theta_1, b_{11}) + A_2 F(\theta_2, b_{12}) + A_1 F(\theta_2, b_{11}) + A_2 F(\theta_1, b_{12}) \} \quad (3.8)$$

ในกรณีที่มุม θ_1 เท่ากับมุม θ_2 เท่ากับ θ สมการ(๓.๘) จะลดเป็น

$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \{ 2A_1 F(\theta, b_{11}) + 2A_2 F(\theta, b_{12}) \}$$

$$\phi_P = \frac{S_L}{2\pi a} \{ A_1 F(\theta, b_{11}) + A_2 F(\theta, b_{12}) \} \quad (3.9)$$

พิจารณาเมื่อมีวัสดุขวางกันหลาย ๆ ชนิด มีความหนาเท่ากับ t_1, t_2, \dots ตามลำดับ



รูปที่ ๓.๓

แสดงการแผ่กระจายรังสีของต้นกำเนิดทะลุสิ่งขวางกัน

กรณีวัสดุขวางกัน ๒ ชนิด ค่าของปัลท้อบแพคเตอร์แต่ละชนิด หาได้ จาก

$$B_1 = \sum_{n=1}^2 A_{1n} e^{-\alpha_{1n} \mu_{1n} \rho_1}$$

$$B_2 = \sum_{m=1}^2 A_{2m} e^{-\alpha_{2m} \mu_{2m} \rho_2}$$

โดยที่ ρ เป็นความหนาของวัสดุขวางกันในแนวที่พิจารณา

$$\rho_1 = t_1 \sec \theta$$

$$\rho_2 = t_2 \sec \theta$$

เรดิเอชันฟลักซ์จาก ดันกำเนิดรังสีขึ้นเล็ก ๆ dL มีค่า เท่ากับ $d\phi_p$

$$d\phi_p = B_1 B_2 \frac{S_L}{4\pi a} e^{-(\mu_1 \rho_1 + \mu_2 \rho_2)} d\theta$$

$$= \left\{ \sum_{n=1}^2 A_{1n} e^{-\alpha_{1n} \mu_{1n} \rho_1} \right\} \left\{ \sum_{m=1}^2 A_{2m} e^{-\alpha_{2m} \mu_{2m} \rho_2} \right\} \frac{S_L}{4\pi a} e^{-(\mu_1 \rho_1 + \mu_2 \rho_2)} d\theta$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} e^{-(\alpha_{1n} \mu_{1n} \rho_1 + \alpha_{2m} \mu_{2m} \rho_2)} e^{-(\mu_1 \rho_1 + \mu_2 \rho_2)} d\theta$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} e^{-(\alpha_{1n} \mu_{1n} \rho_1 + \alpha_{2m} \mu_{2m} \rho_2 + \mu_1 \rho_1 + \mu_2 \rho_2)} d\theta$$

$$\text{ให้ } \mu_{1n} = (1 + \alpha_{1n}) \mu_1$$

$$\text{และ } \mu_{2m} = (1 + \alpha_{2m}) \mu_2$$

$$\text{ดังนั้น } d\phi_p = \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} e^{-(\mu_{1n} \rho_1 + \mu_{2m} \rho_2)} d\theta$$

$$d\phi_p = \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} e^{-(\mu_{1n} t_1 + \mu_{2m} t_2) \sec \theta} d\theta$$

$$= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} e^{-b_{nm} \sec \theta} d\theta$$

โดยที่ $b_{nm} = \mu_{1n}t_1 + \mu_{2m}t_2$

ดังนั้นเรดิเอชันฟลักซ์ทั้งหมด $\phi_P = \int_{-\theta_2}^{\theta_1} d\phi_P$

$$\begin{aligned}\phi_P &= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} \int_{-\theta_2}^{\theta_1} e^{-b_{nm} \sec\theta} d\theta \\ &= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} \left\{ \int_0^{\theta_1} e^{-b_{nm} \sec\theta} d\theta + \int_0^{\theta_2} e^{-b_{nm} \sec\theta} d\theta \right\} \\ \phi_P &= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} \{F(\theta_1, b_{nm}) + F(\theta_2, b_{nm})\} \quad (3.10)\end{aligned}$$

เมื่อ $\theta_1 = \theta_2$ จะหาเรดิเอชันฟลักซ์ได้จาก

$$\begin{aligned}\phi_P &= \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} 2F(\theta, b_{nm}) \\ \phi_P &= \frac{S_L}{2\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} F(\theta, b_{nm}) \\ \phi_P &= \frac{S_L}{2\pi a} \{A_{11} A_{21} F(\theta, b_{11}) + A_{12} A_{22} F(\theta, b_{22})\} \quad (3.11)\end{aligned}$$

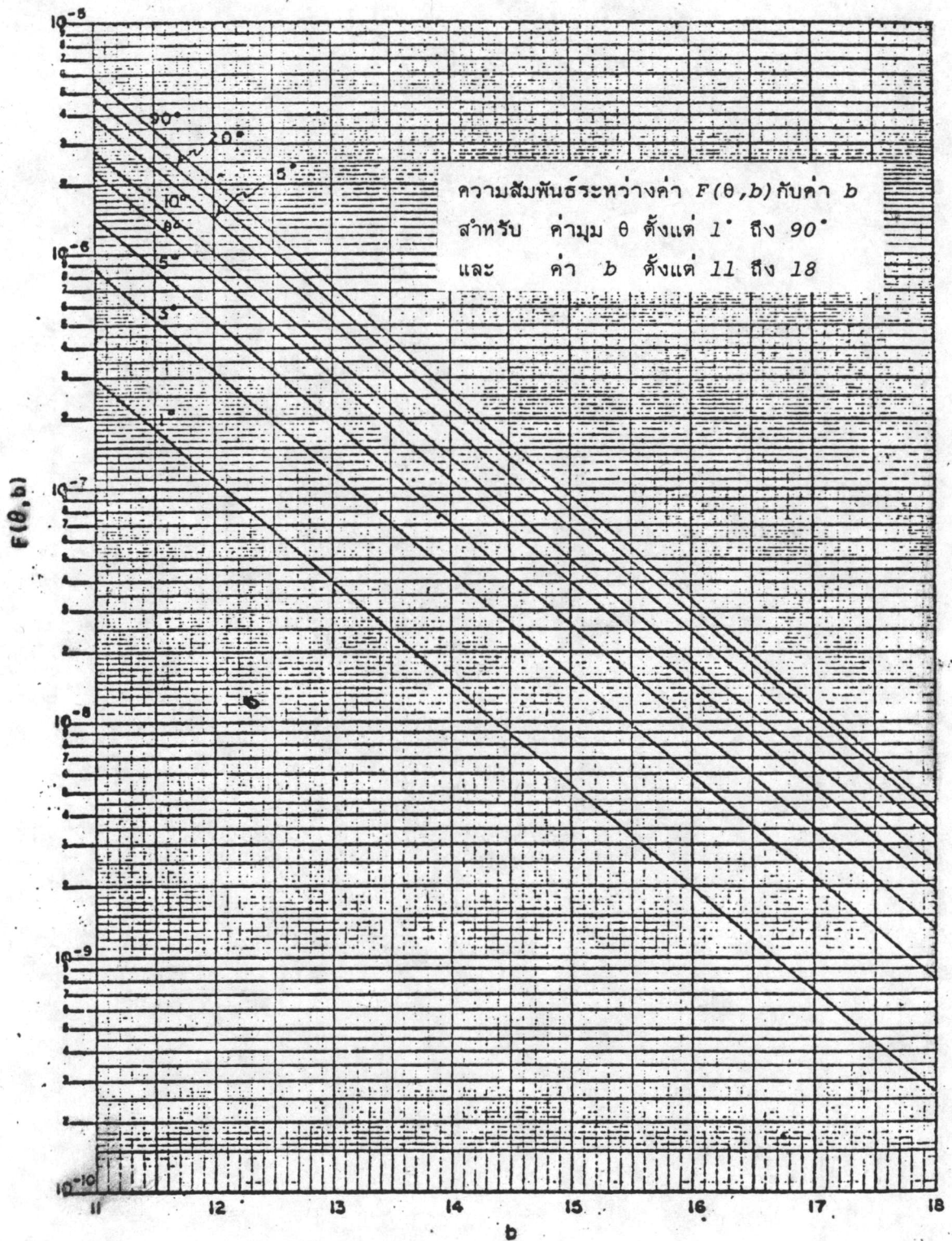
ในทำนองเดียวกันเรดิเอชันฟลักซ์ที่จุด P_1

$$\phi_{P_1} = \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m=1}^2 A_{1n} A_{2m} \{F(\theta_1, b_{nm}) - F(\theta_2, b_{nm})\} \quad (3.12)$$

ในกรณีที่มีวัสดุวางกันหลาย ๆ ชนิด มีความหนา t_1, t_2, t_3, \dots

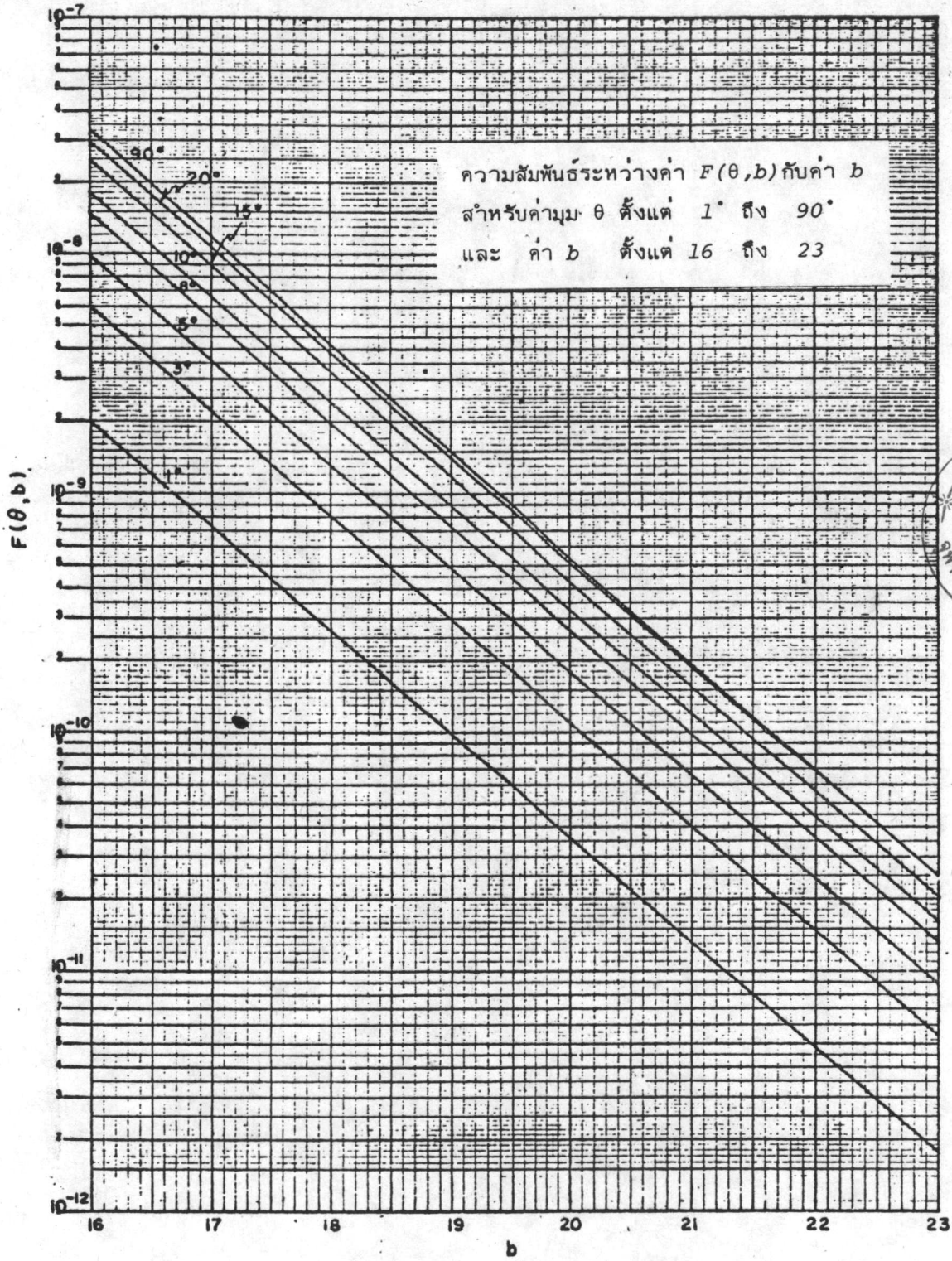
$$\phi_P = \frac{S_L}{4\pi a} \sum_{n,m,p=1}^2 A_{1n} A_{2m} A_{3p} \{F(\theta_1, b_{nmp}) + F(\theta_2, b_{nmp})\} \quad (3.13)$$

โดยที่ $b_{nmp} = \mu_{1n}t_1 + \mu_{2m}t_2 + \mu_{3p}t_3$



กราฟรูปที่ ค.๔

แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $F(\theta, b)$ กับค่า b



กราฟรูปที่ ๓.๔ ต่อ
แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $F(\theta, b)$ กับค่า b

3.4 ค่าอิควิวาเลนต์ (Equivalent) ระหว่างโดสเรท กับ เรติเอชันฟลักซ์ หรือ โดสเรท กับ เอนิยฟลักซ์ จากข้อที่ 3.3 สามารถจะหาค่าของ เรติเอชันฟลักซ์ ณ ผิวนอก และที่ระยะต่าง ๆ จากผิวนอกของสิ่งขวางกันได้ ในการที่ต้องการที่จะหาว่าเทอมของ โดสเรท ที่ปรากฏ ณ จุดนั้น ๆ มีค่าเท่าใด จะต้องพิจารณาว่าอากาศ ณ จุดนั้น ๆ ได้แอบซอบ (Absorbed) พลังงานจากรังสีเป็นจำนวนเท่าใด จากค่าจำกัดความของ ๑ เรินเกน (Roentgen, R)

๑ เรินเกน จะมีค่า อิควิวาเลนต์ กับพลังงานที่ แอบซอบ ในอากาศ ๑ ลูกบาศก์ เซนติเมตร ตามตารางที่ ๓.๑⁸ เท่ากับ 7.1×10^4 เอ็ม อี วี ดังนั้น เอนิยฟลักซ์ $\phi(E)$ เอ็ม อี วี/ซม.^๒ - วินาที จะมีค่า อิควิวาเลนต์ กับ โดสเรท เท่ากับ

$$\frac{\phi(E) \mu_e}{7.1 \times 10^4} \quad \text{เรินเกน/วินาที}^9$$

หรือ $1 \quad \text{เรินเกน/วินาที} = \frac{7.1 \times 10^4}{E_\gamma \mu_e} \quad \text{โฟตอน/ซม.}^๒ - \text{วินาที}$

หรือ $1 \quad \text{เรินเกน/ชั่วโมง} = \frac{20}{E_\gamma \mu_e} \quad \text{โฟตอน/ซม.}^๒ - \text{วินาที}$

เมื่อ $E_\gamma =$ พลังงานของรังสีแกมมา เอ็ม อี วี

$\mu_e =$ เอนิย แอบซอบชัน โคเอฟิเชียน ของอากาศ
(Energy Absorption Coefficient of Air) , ซม.^{-๑}

หาได้จากกราฟรูปที่ ๓.๔

ในทางปฏิบัติ ถือว่า ๑ เรินเกน เท่ากับ ๑ เรม (Rem) เท่ากับ ๑ แรด (Rad)

ดังนั้น $๑ \quad \text{เรม/ชั่วโมง} = \frac{20}{E_\gamma \mu_e} \quad \text{โฟตอน/ซม.}^๒ - \text{วินาที}$

หรือ $๑ \quad \text{มิลลิเรม/ชั่วโมง} = \frac{0.02}{E_\gamma \mu_e} \quad \text{โฟตอน/ซม.}^๒ - \text{วินาที}$

ความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่า โดสเรท ๑ มิลลิเรม/ชั่วโมง กับ เรติเอชันฟลักซ์ ณ พลังงานของรังสีแกมมา ต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในกราฟรูปที่ ๓.๖¹⁰

ตารางที่ ๓.๑

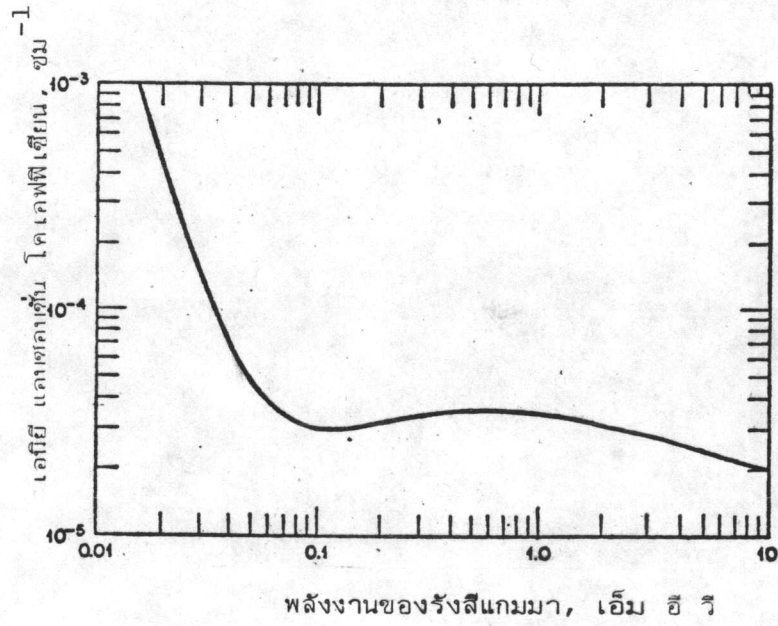
แสดงค่า อิควิวาเลนต์ ๑ เรินเกน ของรังสีเอกซ์ หรือ แกมมา

เท่ากับ พลังงาน แอบซอบ ในอากาศ ๑ ลูกบาศก์ เซนติเมตร ที่ NTP 7.1×10^4 เอ็ม อี วี
เท่ากับ พลังงาน แอบซอบ ในอากาศ หนัก ๑ กรัม 88 เอิก (Erg)
เท่ากับ ไอออนแพร์ (Ion pair) ที่เกิดในอากาศ ๑ ลบ.ซม. 2.08×10^9 ไอออนแพร์

⁸Glasstone, S., *Nuclear Reactor Engineering* 3rd Ed., D. Van Nostrand Company Inc. p. 522.

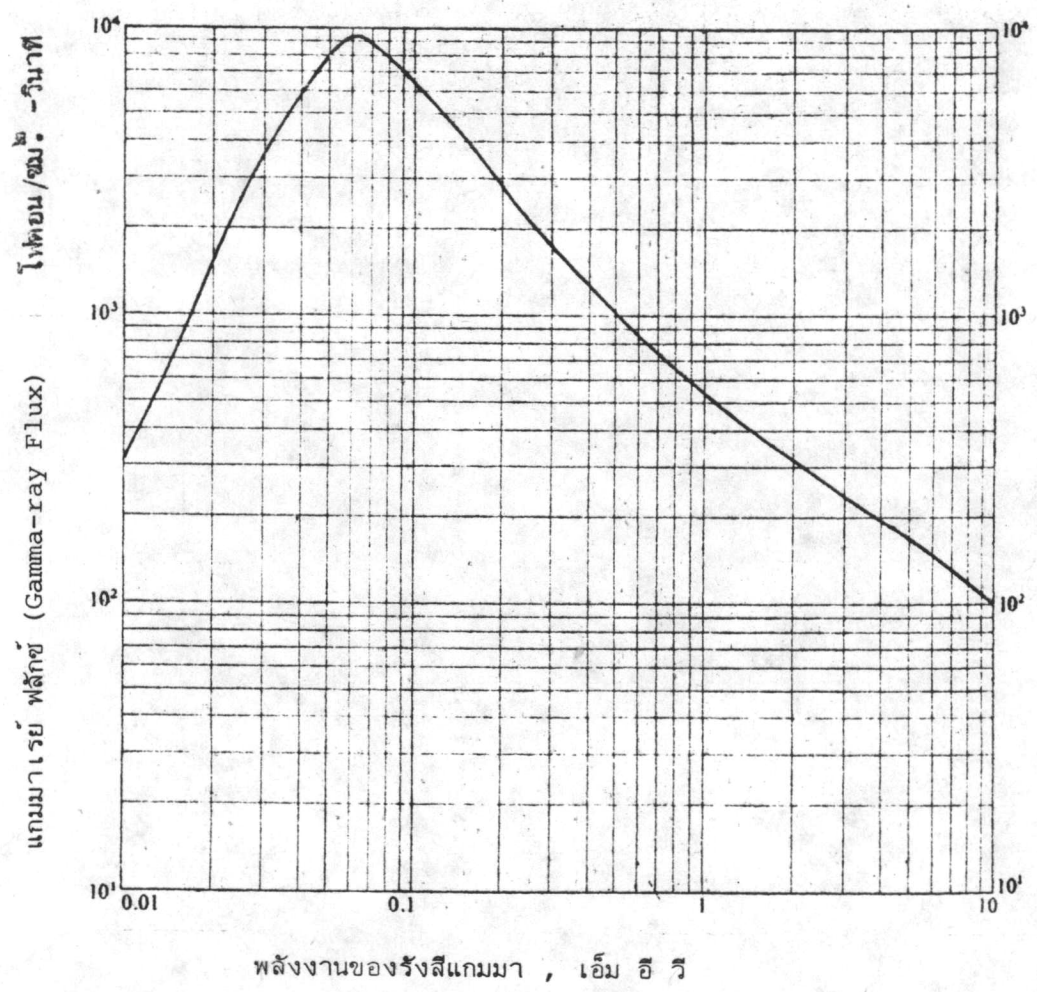
⁹Ibid., p. 522.

¹⁰Ibid., p. 523.



กราฟรูปที่ 3.5

แสดงค่า เอนิย แอบซอร์บชั่น โคเอพทิเชียน ของอากาศ



กราฟรูปที่ 3.6

แสดงค่าอีควิวาเลนต์ ระหว่าง โดสเรท ๑. มิลลิเรม/ชั่วโมง กับ เรดิเอชันฟลักซ์