

วิธีการคำนวณและผลการคำนวณ

การศึกษาค้างนี้เป็นการนำเอาทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอน 2 พวก ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ มาใช้คำนวณหาเทอร์มาลพลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ไม่เกิน 19.5 ซม. จากตัวกำเนิดนิวตรอน นำค่าเทอร์มาลพลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีทั้ง 3 นี้มาเปรียบเทียบกัน และนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลพลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ เดียวกันนี้ซึ่งเป็นการทดลองของนายยุทธ และใช้ทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอน 2 พวก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ คำนวณหาเทอร์มาลพลักซ์ที่ระยะไกลจากตัวกำเนิดนิวตรอนมากกว่า 19.5 ซม. คือที่ระยะ 30 ซม. จนถึง 120 ซม. เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลพลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ เดียวกันนี้ ซึ่งคำนวณมาจากค่าโคสของนิวตรอนเร็วที่มีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method นอกจากนี้ยังได้ใช้ทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอน 2 พวกคำนวณหาค่าพลักซ์ของนิวตรอนเร็ว เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่หาได้จากค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method และให้นำเอาค่าเทอร์มาลพลักซ์ซึ่งเป็นผลการทดลองของนายยุทธ ไปใช้คำนวณหาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน ตัวกำเนิดนิวตรอนที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงในการคำนวณ เป็นตัวกำเนิดอันเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์ของนายยุทธ คือเป็นตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุกแบบอเมรีเซียม-เบอริลเลียม มีความแรง 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที วางอยู่ในถังที่มีน้ำอยู่เต็ม ขนาดลึก 50 ซม. รัศมียาว 25 ซม.

3.1 วิธีหาค่าเทอร์มาลพลักซ์จากทฤษฎี

3.1.1 ทฤษฎีการพุ่งของนิวตรอน 2 พวก

จากสมการ (2.7)

$$\phi_s(r) = \frac{ak_f^2}{4\pi D_s(K_s^2 - K_f^2)r} (e^{-K_f r} - e^{-K_s r}) \quad (3.1)$$

ค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการ (3.1) นี้เป็นค่าคงที่สำหรับนิวตรอนในน้ำ มีค่าดังนี้

$$K_s = \frac{1}{L_s} = \frac{1}{2.755} = 0.363 \text{ ข.ม.}^{-1}, \quad \bar{D}_s = 0.144 \text{ ข.ม. (ค่าเฉลี่ย)}$$

ทั้ง L_s และ \bar{D}_s เป็นค่าที่ได้มาจากตารางที่ 6.11 หน้า 105 ของหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 1

K_f หาได้โดยอาศัยค่า $\tau = 54.4 \text{ ข.ม.}^2$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของนิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิดนิวตรอนแบบเรเคียม-เบอริลเลียม จนกลายเป็นนิวตรอนที่มีพลังงาน 1.46 eV นิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิดนี้มีพลังงานโดยเฉลี่ย 5 MeV ค่า τ ค่านี้ได้มาจากตารางที่ 16.1.2 หน้า 347 ของหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 1

$$\text{โดยที่ } \tau = L_f^2 = \frac{1}{K_f^2}$$

$$\text{จะได้ } K_f = \frac{1}{\sqrt{\tau}} = \frac{1}{\sqrt{54.4}} = 0.136 \text{ ข.ม.}^{-1}$$

การที่อาศัยค่า τ ของตัวกำเนิดนิวตรอนแบบเรเคียม-เบอริลเลียมมาใช้หาค่า K_f เนื่องจากค่า τ สำหรับตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียมไม่มีบอกไว้ และนิวตรอนสเปกตรัมของตัวกำเนิดนิวตรอนแบบเรเคียม-เบอริลเลียม กับตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียมมีลักษณะคล้ายกันมาก¹

แทนค่า K_s , D_s , K_f และ $a = 1.3 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาทีลงในสมการ (3.1) หาค่า $\phi_s(r)$ ที่ระยะ r ต่าง ๆ กัน ค่าที่ได้คือ เฮอร์มาลพล็กซ์ที่ระยะห่าง r ข.ม. จากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียมซึ่งมีความ

1

Thompson, M.N. and Taylor, J.M., Nucl. Instrum. Meth.,

แรง 1.3×10^6 นิวตัน/วินาที ในน้ำ

สมการ (3.1) นี้ใช้หาค่า $\phi_s(r)$ เมื่อ $r = 0$ ไม่ได้แต่สามารถใช้วิธีของเคอร์เนลหาค่าออกมาได้ดังนี้

จากสมการ การพุ่งของเทอร์มาลนิวตรอน (2.5)

$$D_s \nabla^2 \phi_s - \Sigma_{as} \phi_s + \Sigma_{af} \phi_f = 0 \quad \text{----- (3.2)}$$

คำตอบของสมการ (3.2) โดยวิธีของเคอร์เนลมีค่าดังนี้

$$\phi_s(r) = \int (\Sigma_{af} \phi_f) \frac{e^{-K_s |\vec{r} - \vec{\rho}|}}{4\pi D_s |\vec{r} - \vec{\rho}|} d\vec{\rho}$$

$$\therefore \phi_s(0) = \int \frac{\Sigma_{af} \phi_f}{4\pi D_s \rho} e^{-K_s \rho} d\vec{\rho} \quad \text{----- (3.3)}$$

เมื่อ $d\vec{\rho} = 4\pi \rho^2 d\rho$ และ $\phi_f(\rho) = \frac{a e^{-K_f \rho}}{4\pi D_f \rho}$ (จากสมการ (2.4))

$$\therefore \phi_s(0) = \int_0^\infty \frac{\Sigma_{af}}{4\pi D_s \rho} \cdot \frac{a e^{-K_f \rho}}{4\pi D_f \rho} \cdot e^{-K_s \rho} \cdot 4\pi \rho^2 d\rho$$

$$\phi_s(0) = \frac{a K_f^2}{4\pi D_s} \int_0^\infty e^{-(K_s + K_f) \rho} d\rho, \quad \text{เมื่อ } K_f^2 = \frac{\Sigma_{af}}{D_f}$$

$$\phi_s(0) = \frac{a K_f^2}{4\pi D_s (K_s + K_f)} \quad \text{----- (3.4)}$$

เมื่อแทนค่า a, K_f, K_s และ D_s ลงในสมการ (3.4) ก็จะได้อาคเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 0$

ผลการคำนวณ อาคเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 0$ ถึง $r = 19.5$ ซม. ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.7 หน้า 43 และรูปที่ 3.4 หน้า 48 และอาคเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 30$ ซม. ถึง $r = 120$ ซม. ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.8 หน้า 44 และรูปที่ 3.6 หน้า 50

3.1.2 ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก

จากสมการ (2.13)

$$\phi_s(r) = \frac{a \Sigma_s}{4\pi D_s K_s r} \left[e^{-K_s r} \int_0^r \frac{\sinh K_s \rho \cdot e^{-\Sigma_s \rho}}{\rho} d\rho + \sinh K_s r \int_r^\infty \frac{e^{-(\Sigma_s + K_s) \rho}}{\rho} d\rho \right] \quad (3.5)$$

K_s และ D_s เป็นค่าเดียวกับค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าเทอร์มาลฟลักซ์ในหัวข้อ 3.1.1

พลังงานของนิวตรอน (Mev)	$4\pi r^2 D(r), \left(\frac{\text{mrep}^2}{\text{hour}} \times \text{cm}^2\right)$					
	r=10ฟ.ม.	r=20ฟ.ม.	r=30ฟ.ม.	r=60ฟ.ม.	r=90ฟ.ม.	r=120ฟ.ม.
2	4.7×10^{-3}	7.4×10^{-4}	9.1×10^{-5}	1.0×10^{-7}	1.35×10^{-10}	1.95×10^{-13}
4	1.1×10^{-2}	3.6×10^{-3}	9.8×10^{-4}	1.1×10^{-5}	7.7×10^{-8}	5.27×10^{-10}
6	1.3×10^{-2}	6.8×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.4×10^{-4}	5.0×10^{-6}	1.6×10^{-7}
8	1.3×10^{-2}	7.5×10^{-3}	3.8×10^{-3}	3.3×10^{-4}	2.2×10^{-5}	1.3×10^{-6}
10	1.2×10^{-2}	7.5×10^{-3}	4.0×10^{-3}	4.5×10^{-4}	4.1×10^{-5}	3.3×10^{-6}

ตารางที่ 3.1³ แสดงค่าโคสของนิวตรอนเร็วที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำ จากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุด ซึ่งมีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที ตัวกำเนิดแต่ละตัวให้นิวตรอนออกมาที่มีพลังงานค่าเดียว

² rep (roentgen equivalent physical) หมายถึงปริมาณรังสี (ชนิดใดก็ได้) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงาน 93 เอร์ก เคาไว้ในเนื้อเยื่ออ่อน (soft tissue) ที่ได้รับรังสีนั้นหนัก 1 กรัม

³ ตารางที่ 3.1 นี้คือตารางที่ E-16 หน้า 393 ของหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 4 เป็นตารางแสดงค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณไว้ในปี 1954 โดยใช้

moments method.

ค่า Σ_s ในสมการ (3.5) หาได้โดยอาศัยค่าในตารางที่ 3.1 ดังนี้
 สำหรับตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุกใด ๆ ที่ให้นิวตรอนออกมาที่มีพลังงานค่าเดียว
 และวางอยู่ในตัวกลางใด ๆ นิวตรอนโคสที่ปรากฏที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดนิวตรอน
 มากกว่า 20 ซม. ขึ้นไป มีค่าดังนี้

$$D(r) \propto \frac{e^{-\Sigma_s r}}{r^2} \quad \text{----- (3.6)}$$

เมื่อ Σ_s เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับค่าพลังงานของนิวตรอนและชนิดของวัสดุ
 ที่ใช้เป็นตัวลดความเร็ว

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 3.1 ไปเขียนกราฟระหว่างค่า $4\pi r^2 D(r)$ กับ r
 บนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อก เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งมีความชัน
 (slope) เท่ากับ $-\Sigma_s$ ค่า Σ_s ที่หาได้จากค่าในตารางที่ 3.1 มีดังนี้

พลังงานของนิวตรอน, (MeV)	Σ_s^{-1} , (ซ.ม.)
2	0.178
4	0.116
6	0.069
8	0.060
10	0.053



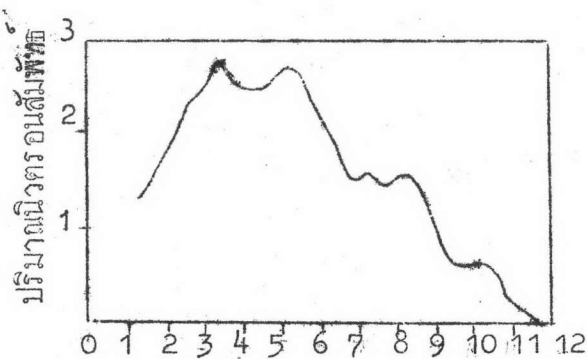
ตารางที่ 3.2 แสดงค่า Σ_s สำหรับนิวตรอนในน้ำ จากตัวกำเนิดนิวตรอน
 ซึ่งให้นิวตรอนออกมาที่มีพลังงานค่าเดียว

Σ_s สำหรับนิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม
หาได้โดยอาศัยค่า Σ_s จากตารางที่ 3.2 และนิวตรอนสเปกตรัมในรูปที่ 3.1
ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\Sigma_s = \frac{\sum_{E_i} f(E_i) \Sigma_s(E_i)}{\sum_{E_i} f(E_i)}$$

เมื่อ $\Sigma_s(E_i)$ เป็นค่า Σ_s ของน้ำสำหรับนิวตรอนที่มีพลังงานเท่ากับ E_i
 $f(E_i)$ เป็นปริมาณนิวตรอนซึ่งมีพลังงานเท่ากับ E_i ออกมา
จากตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม
ใน 1 วินาที

$$E_i = 2, 4, 6, 8, \text{ และ } 10 \text{ MeV}$$



พลังงานนิวตรอน (MeV)

รูปที่ 3.1 เป็นนิวตรอนสเปกตรัมของตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม
แสดงถึงปริมาณนิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิดนิวตรอนที่ค่าพลังงานต่างๆ กัน

สำหรับค่า $f(E_i)$ เมื่อ $E_i = 2 \text{ MeV}$ หาได้โดยการหาพื้นที่ใต้เส้นกราฟ
ของรูปที่ 3.1 จากค่าพลังงาน 1 MeV ถึง 3 MeV โดยมีค่าพลังงาน 2 MeV
เป็นจุดกึ่งกลาง การพื้นที่ที่หาได้นี้ควยพื้นที่ใต้เส้นกราฟทั้งหมด แล้วคูณอัตราส่วนที่ได้
กวยความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน ค่าที่ได้อีกคือค่า $f(E_i)$ เมื่อ $E_i = 2 \text{ MeV}$

สำหรับค่า $f(E_i)$ เมื่อ $E_i = 4, 6, 8,$ และ 10 MeV ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน และมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

$E_i, (\text{MeV})$	$f(E_i), (\text{นิวตรอน/วินาที})$
2	2.56×10^5
4	3.92×10^5
6	3.43×10^5
8	2.19×10^5
10	9.03×10^4

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณนิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ซึ่งมีความแรง 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที ใน 1 วินาทีที่ค่าพลังงานต่าง ๆ

จากค่า Σ_s ในตารางที่ 3.2 และค่า $f(E_i)$ ในตารางที่ 3.3 หากค่า $\bar{\Sigma}_s$ ออกมาได้มีค่าเท่ากับ 0.103 ซม.^{-1}

แทนค่า $\bar{\Sigma}_s, K_s$ และ D_s ลงในสมการ (3.5) เทอมแรกในวงเล็บซึ่งอยู่ทางขวามือของสมการ (3.5) นี้ หากค่าได้โดยการแทนค่า ρ ด้วยค่า r ต่าง ๆ กัน ซึ่งเป็นค่าคงที่ลงในเทอม $\left(\frac{\sinh K_s \rho \cdot e^{-\Sigma_s \rho}}{\rho} \right)$ เขียนกราฟระหว่างค่า $\left(\frac{\sinh K_s \rho \cdot e^{-\Sigma_s \rho}}{\rho} \right)$ กับค่า ρ พื้นที่ใต้เส้นกราฟที่เขียนได้จากค่า $\rho = 0$ ถึง $\rho = r$ ก็คือค่า $\int_0^r \frac{\sinh K_s \rho \cdot e^{-\Sigma_s \rho}}{\rho} d\rho$ สำหรับเทอมที่สองในวงเล็บซึ่งอยู่ทางขวามือของสมการ (3.5) มีค่าเท่ากับ

$$\int_0^r \frac{e^{-(\Sigma_s + K_s)\rho}}{\rho} d\rho = E_1 [(\Sigma_s + K_s)r]$$

ถ้า $E_n[(Z_s+K_s)r]$ ได้จากตารางแสดงค่า $E_n(x)$ -function
 ในหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 4 ตารางที่ c-4 หน้า 358-365 เมื่อ $n = 1$,
 $x = (Z_s+K_s)r$

สมการ (3.5) นี้ใช้หาค่า $\phi_s(r)$ เมื่อ $r = 0$ ไม่ได้ แต่สามารถ
 หาค่าออกมาได้โดยอาศัยสมการ (2.11) ดังนี้

จากสมการ (2.11)

$$\phi_s(r) = \frac{aZ_s}{(4\pi)^2 D_s} \int \frac{e^{-Z_s \rho - K_s |\vec{r} - \vec{\rho}|}}{\rho^2 |\vec{r} - \vec{\rho}|} d\vec{\rho}$$

$$\therefore \phi_s(0) = \frac{aZ_s}{(4\pi)^2 D_s} \int \frac{e^{-(Z_s+K_s)\rho}}{\rho^3} d\vec{\rho} \text{ ----- (3.7)}$$

$\phi_s(0)$ ในสมการ (3.7) อินทิเกรตหาค่าออกมาโดยตรงไม่ได้
 ความหมายของสมการ (3.7) $\frac{aZ_s}{(4\pi)^2 D_s} \cdot \frac{e^{-(Z_s+K_s)\rho}}{\rho^3}$ คือ $-Z_s \rho$
 เทอร์มัลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 0$ ส่งมาจากต้นกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอน $\frac{aZ_s}{4\pi \rho^2} e^{-Z_s \rho}$
 ในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. ซึ่งอยู่รอบ ๆ ตำแหน่ง ρ ถ้าแบ่งปริมาตรวงน้ำซึ่งถือว่าเป็น
 ทรงกลมออกเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนา 1 ซม. โดยมีทรงกลมรัศมี ρ อยู่
 กึ่งกลางระหว่างผิวนอกกับผิวในของทรงกลมทั้งสอง ชั้นของทรงกลมนี้มีปริมาตรเท่ากับ

$$V(\rho) = \frac{4}{3}\pi [(\rho+0.5)^3 - (\rho-0.5)^3]$$

$\therefore \left[\frac{aZ_s}{(4\pi)^2 D_s} \cdot \frac{e^{-(Z_s+K_s)\rho}}{\rho^3} \right] [V(\rho)] =$ เทอร์มัลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r=0$ ส่งมา
 จากต้นกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนซึ่ง
 กระจายอยู่ในน้ำ $V(\rho)$ ลบ.ซ.ม.

เมื่อรวมค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r=0$ ซึ่งส่งมาจากต้นกำเนิด เทอร์มาลนิวตรอนซึ่งกระจายอยู่ในน้ำจากชั้นของทรงกลมอันในสุดจนถึงอันนอกสุด เข้าด้วยกัน ก็จะได้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r=0$ (เกิดจากต้นกำเนิด เทอร์มาลนิวตรอนทั้งหมดที่กระจายอยู่ในน้ำที่เป็นทรงกลมมีรัศมียาวอนันต์) มีค่าดังนี้

$$\phi_s(0) = \sum_{\rho_i} \frac{a \Sigma_s e^{-(\Sigma_s + K_s) \rho_i}}{(4\pi r^2 D_s \rho_i^3)} \cdot V(\rho_i)$$

หรือ

$$\phi_s(0) = \frac{a \Sigma_s}{12\pi D_s} \sum_{\rho_i} \frac{e^{-(\Sigma_s + K_s) \rho_i}}{\rho_i^3} \left[(\rho_i + 0.5)^3 - (\rho_i - 0.5)^3 \right] \quad (3.8)$$

ในการหาค่า $\phi_s(0)$ จากสมการ (3.8) นี้ เวลาคำนวณจริง ๆ ใช้ $\rho_i = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, \dots, 19.5$ ซม. เท่านั้น เนื่องจาก เทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r=0$ ซึ่งส่งมาจากต้นกำเนิดเทอร์มาลนิวตรอนที่กระจายอยู่ในชั้นของทรงกลมที่มีรัศมี $\rho_i > 19.5$ ซม. มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า เทอร์มาลฟลักซ์ที่ $r=0$ ซึ่งส่งมาจากต้นกำเนิดเทอร์มาลนิวตรอนที่กระจายอยู่ในชั้นของทรงกลมที่มีรัศมี $\rho_i < 19.5$ ซม.

ผลการคำนวณ ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r=0$ ถึง $r=19.5$ ซม. ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.7 หน้า 43 และรูปที่ 3.4 หน้า 48

3.1.3 ทฤษฎีเฟอร์มิเอจ

จากสมการ (2.33)

$$\phi_{pt}(r, \tau) = \frac{a}{8\pi D_s} \frac{e^{K_s \tau - K_s r}}{r} \left\{ e^{K_s r} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\tau}} - K_s \sqrt{\tau} \right) \right] - e^{-K_s r} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\tau}} + K_s \sqrt{\tau} \right) \right] \right\} \quad (3.9)$$

D_s , K_s , และ τ เป็นค่าเดียวกันกับที่ใช้ในหัวข้อ 3.1.1 สมการ (3.9) นี้ให้ค่า $\phi_{pt}(0, \tau)$ ออกมาโดยตรงไม่ได้ เพราะว่าเมื่อแทนค่า $r=0$

ลงไปจะได้

$$\phi_{pt}(0, \tau) = \frac{0}{0}$$

ซึ่งอยู่ในลักษณะที่เรียกว่า indeterminate form สามารถนำ L'Hospital Rule มาใช้หาค่าได้ ผลที่ได้มีค่าดังนี้

$$\phi_{pt}(0, \tau) = \frac{a}{4\pi D_s} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} - e^{-K_s^2\tau} K_s (1 - \text{erf}(K_s\sqrt{\tau})) \right\} \text{-----} (3.10)$$

ผลการคำนวณ ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 0$ ถึง $r = 19.5$ ซม. ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.7 หน้า 43 และรูปที่ 3.4 หน้า 48 สำหรับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 30$ ซม. ถึง $r = 120$ ซม. ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.8 หน้า 44 และรูปที่ 3.6 หน้า 50

นำค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีทั้ง 3 ที่ตำแหน่ง $r = 0$ ถึง $r = 19.5$ ซม. ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 หน้า 43 มาเปรียบเทียบกัน และนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ จากผลการทดลองของนายยุทธ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 เช่นกัน เขียนกราฟระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์เหล่านี้กับระยะทางลงบนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อกแน่นอนเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.4 หน้า 48

3.2 วิธีหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้แล้วโดยใช้ moments method

ในการหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากค่าโคสของนิวตรอนเร็ว ต้องเปลี่ยนค่าโคสของนิวตรอนเร็วให้เป็นค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วเสียก่อน จากนั้นจึงค่อยเปลี่ยนค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มาลฟลักซ์

3.2.1 วิธีเปลี่ยนค่าโดสของนิวตรอนเร็วให้เป็นค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว

ตารางที่ 3.1 เป็นค่านิวตรอนโดสต่อชั่วโมงที่ตำแหน่ง r ใด ๆ ควบคู่กับพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มี r เป็นรัศมี ($4\pi r^2 D(r)$) เมื่อหารค่าที่มีอยู่ในตารางที่ 3.1 แต่ละค่าด้วยพื้นที่ผิวของทรงกลม ก็จะได้ค่านิวตรอนโดส ($D(r)$) จากค่าโดสของนิวตรอนเร็วที่สามารถเปลี่ยนเป็นค่าฟลักซ์ได้ดังนี้

$$\frac{\text{ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว}}{7} = \frac{\text{mrem}}{\text{hour}} \text{-----} (3.11)^4$$

ความสัมพันธ์ระหว่างโดสซึ่งมีหน่วยเป็น rem^5 กับ rad^6 สำหรับนิวตรอนเร็วมีค่าดังนี้

$$1 \text{ mrem} = 10 \text{ mrad} \text{-----} (3.12)$$

และ

$$1 \text{ mrep} = \frac{93}{100} \text{ mrad} \text{-----} (3.13)$$

จากสมการ (3.11), (3.12), และ (3.13) จะได้

$$\text{ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว} = \frac{7000}{93} \frac{\text{mreps}}{\text{hour}} \text{-----} (3.14)$$

⁴ Samuel Glasstone, and Alexander Sesonke, Nuclear Reactor Engeneering (New York:D. Van Nostrand Co. Inc., 1967), pp.527-528.

⁵ rem (roentgen equivalent man) หมายถึงปริมาณรังสี (ชนิดใดก็ได้) ที่ทำให้เกิดผลเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตเท่ากับเมื่อได้รับรังสีเอกซ์ซึ่งมีพลังงาน 200-KeV 1 rad

⁶ rad หมายถึง ปริมาณรังสี (ชนิดใดก็ได้) ที่ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงาน 100 เอร็ก ต่อหน้าหนัก 1 กรัม ของสารที่ได้รับรังสีนั้น

เปลี่ยนค่าโคสของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.1 เป็นฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว โดยใช้สมการ (3.14) ผลที่ได้ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.4

พลังงานของ นิวตรอน (MeV)	ϕ_f , (นิวตรอน/ตร.ซ.ม. วินาที)					
	r=10ซ.ม.	r=20ซ.ม.	r=30ซ.ม.	r=60ซ.ม.	r=90ซ.ม.	r=120ซ.ม.
2	2.82×10^{-4}	1.1×10^{-5}	6.06×10^{-7}	1.66×10^{-10}	9.97×10^{-14}	8.11×10^{-17}
4	6.59×10^{-4}	5.40×10^{-5}	6.52×10^{-6}	1.83×10^{-8}	5.68×10^{-11}	2.19×10^{-13}
6	7.78×10^{-4}	1.02×10^{-4}	1.93×10^{-5}	2.33×10^{-7}	3.69×10^{-9}	6.65×10^{-11}
8	7.78×10^{-4}	1.12×10^{-4}	2.53×10^{-5}	5.49×10^{-7}	1.62×10^{-8}	5.41×10^{-10}
10	7.19×10^{-4}	1.12×10^{-4}	2.66×10^{-5}	7.48×10^{-7}	3.03×10^{-8}	1.37×10^{-9}

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำ ค่าเหล่านี้ หามาจากค่าโคสของนิวตรอนในตารางที่ 3.1

จากค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.4 กับปริมาณนิวตรอนในตารางที่ 3.3 ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะห่างต่าง ๆ ในน้ำจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเดี่ยวที่มีความแรง 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที มีค่าเป็น

$$\phi_f(r) = \sum_{E_i} \phi_f(r, E_i) f(E_i) \quad (3.5)$$

เมื่อ $\phi_f(r, E_i)$ คือค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่มีพลังงาน E_i ที่ระยะห่าง r จากตัวกำเนิด คือค่า ϕ_f ในตารางที่ 3.4

และ $f(E_i)$ คือปริมาณนิวตรอนที่มีพลังงานเท่ากับ E_i ในตารางที่ 3.3

ผลการคำนวณ ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว (เกิดจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเดี่ยว) ปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.5

จากค่าพลังของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.9 ให้นำไปใช้หาสูตรสำหรับ
 ใช้อหาค่าพลังของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่ง r ใด ๆ ในน้ำจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาด
 จุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเดี่ยวที่มีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที ดังนี้

จากความโค้งของเส้นกราฟในรูปที่ 3.5 เราประมาณว่า สมการของเส้น
 กราฟควรมีลักษณะดังนี้

$$\phi_f(r) = \frac{1}{r^2} (P_1 e^{-\Sigma_1 r} + P_2 e^{-\Sigma_2 r}) \text{ ----- (3.16)}$$

เมื่อ P_1, P_2, Σ_1 และ Σ_2 เป็นค่าคงที่ ที่จะต้องหาค่าออกมา
 ค่าพลังในตารางที่ 3.9 เป็นพลังของนิวตรอนเร็วที่เกิดจากตัวกำเนิด
 นิวตรอนที่มีความแรง 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที เมื่อหารค่าพลังเหล่านี้ด้วย
 1.3×10^6 ค่าที่ได้จะเป็นค่าพลังของนิวตรอนเร็วที่เกิดจากตัวกำเนิดนิวตรอนที่มี
 ความแรง 1 นิวตรอน/วินาที

$r, (\text{ซ.ม.})$	$r^2 \phi_f(r), (\text{นิวตรอน/วินาที})$
10	6.40×10^{-2}
20	2.88×10^{-2}
30	1.20×10^{-2}
60	7.62×10^{-4}
90	4.72×10^{-5}
120	2.94×10^{-6}

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าพลังของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่งห่าง r ซ.ม. จากตัว
 กำเนิดนิวตรอนขนาดจุดที่มีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที คูณด้วย r^2

นำค่าในตารางที่ 3.5 ไปเขียนกราฟระหว่างค่า $r^2\phi_f(r)$ กับ r บนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อก ดังแสดงในรูปที่ 3.2

กราฟในรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าสมการของเส้นกราฟควรเป็นเทอมเอกโพเนนเชียล (exponential) 2 เทอมลงกัน เพราะว่าการกราฟเกือบเป็นเส้นตรงและโค้งลงเล็กน้อย (คือค่า P_2 ในสมการ (3.16) มีค่าเป็นลบ)

$$r^2\phi_f(r) = P_1 e^{-\Sigma_1 r} - P_2 e^{-\Sigma_2 r} \quad (3.17)$$

ค่า $P_2 e^{-\Sigma_2 r}$ ในสมการ (3.17) จะต้องมีค่าลดลงเร็วมากเมื่อ r มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะวาระยะที่ไกลพอสมควรกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่า Σ_1 ในสมการ (3.17) นี้หาได้จากความชันของเส้นกราฟตอนปลาย ๆ (คือบริเวณที่ r มีค่ามาก) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อต่อส่วนของกราฟซึ่งเป็นเส้นตรงนี้ย้อนกลับไปจนถึงตำแหน่ง $r = 0$ (คือเส้นประในรูปที่ 3.2) จุดตัดของเส้นประบนแกนตั้งคือค่า P_1

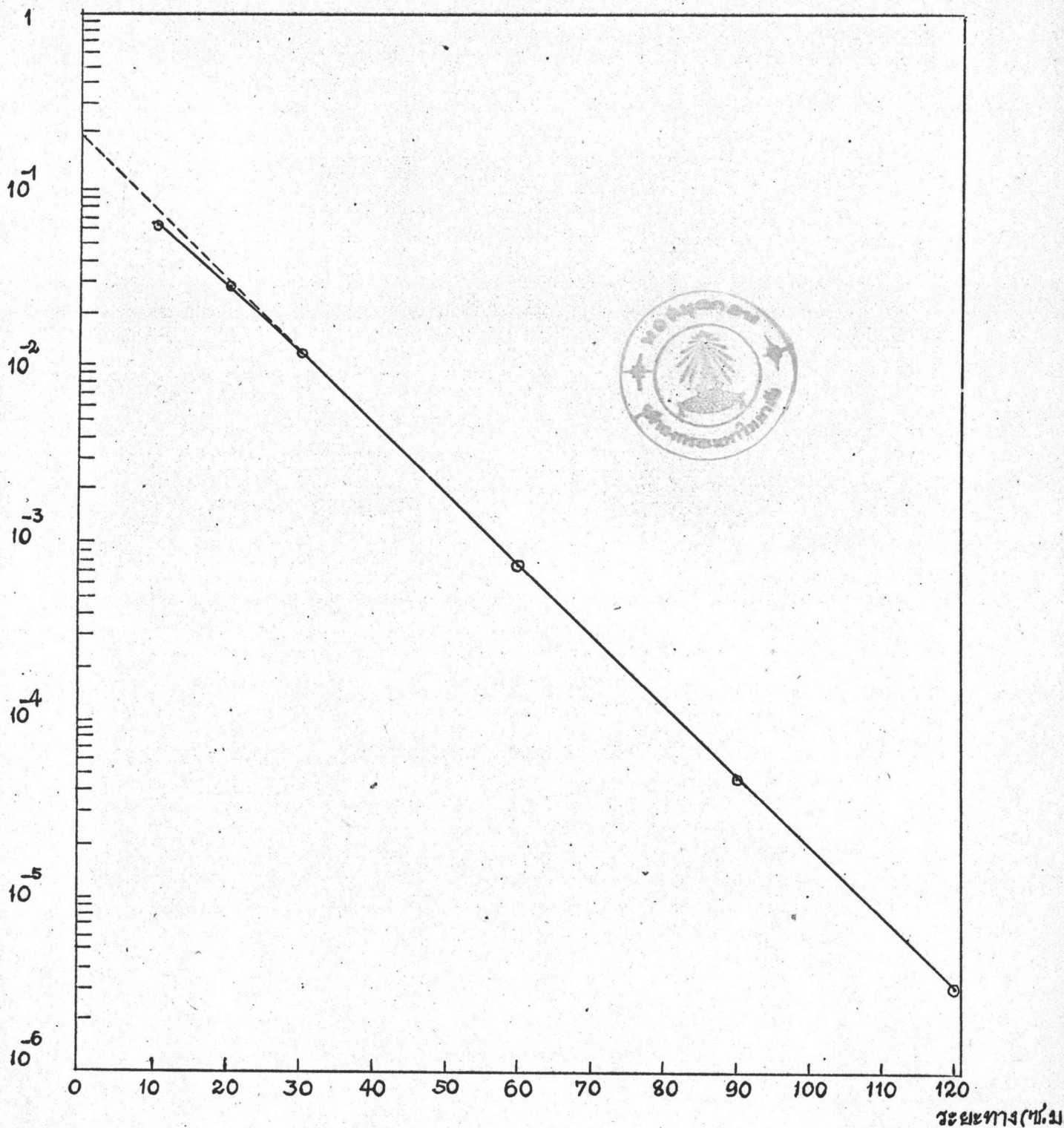
สมการของกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรง (รวมทั้งเส้นประที่ต่อออกไปด้วย) ในรูปที่ 3.2 คือ

$$r^2\phi_f(r) = P_1 e^{-\Sigma_1 r} \quad (3.18)$$

เมื่อนำค่า $r^2\phi_f(r)$ ที่มีอยู่ในระยะใกล้ ๆ (คือเมื่อ $r = 10, 20,$ และ 30 ข.ม.) ในตารางที่ 3.5 หักออกจากค่า $r^2\phi_f(r)$ ที่หาได้จากสูตรในสมการ (3.18) ผลต่างที่ได้ก็คือค่าของ $P_2 e^{-\Sigma_2 r}$ นำผลต่างที่ได้ขึ้นไปเขียนกราฟบนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อกอีกแผ่นหนึ่ง กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 3.3 Σ_2 หาได้จากความชันของเส้นกราฟ จุดตัดของเส้นกราฟบนแกนตั้งคือค่า P_2

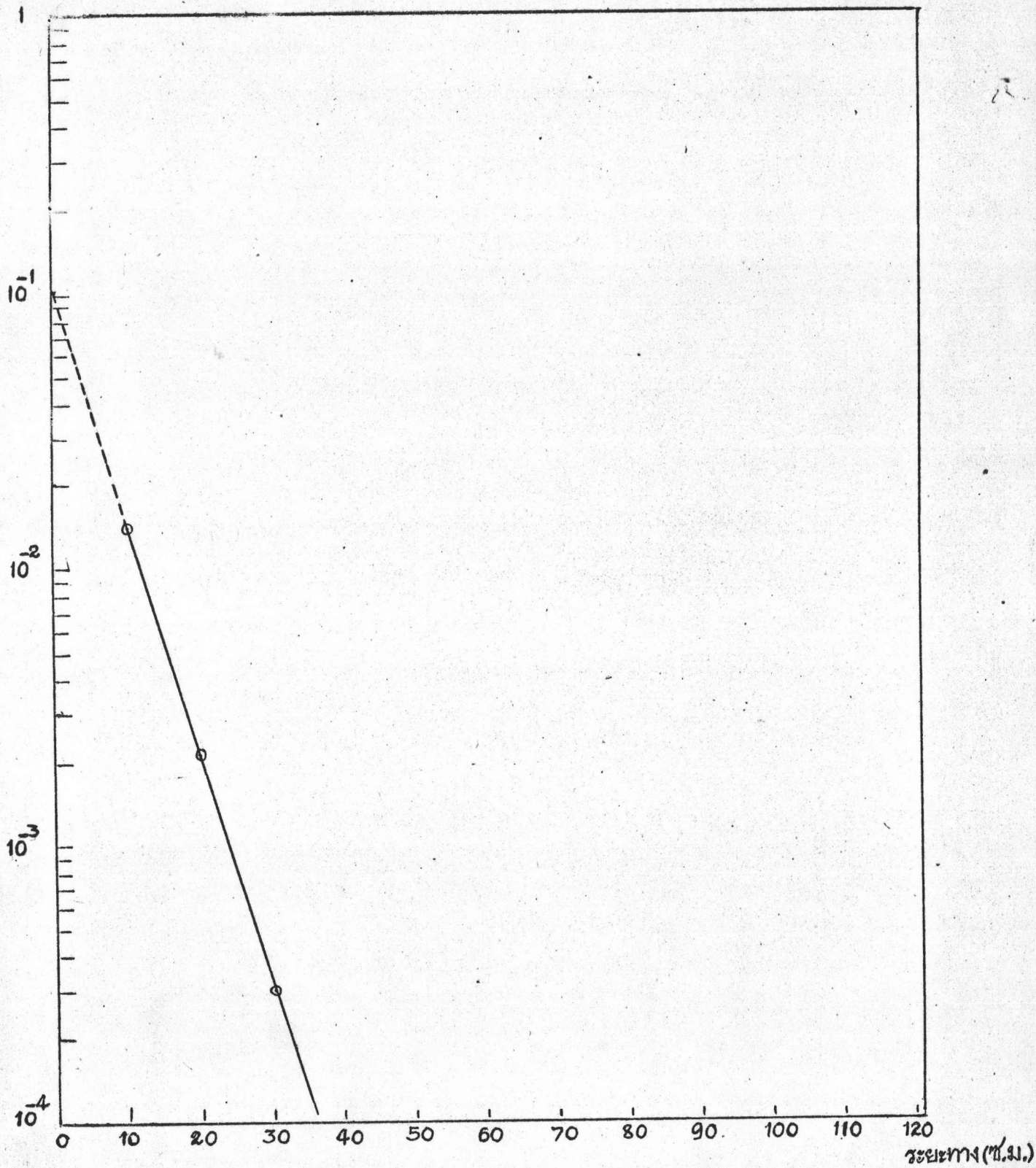
สมการแสดงค่า $r^2\phi_f(r)$ ในตารางที่ 3.5 ที่หาได้คือ

$$r^2\phi_f(r) = \begin{pmatrix} 0.197e^{-0.0926 r} - 0.107e^{-0.195 r} \end{pmatrix}$$



รูปที่ 3.2 กราฟระหว่างค่า $r^2\phi(r)$ กับระยะทาง (r) ในตารางที่ 3.5

116504823



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่างค่า $r^2\phi(r)$ ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่า $r^2\phi(r)$ ในตารางที่ 3.5 กับค่า $r^2\phi(r)$ ที่หาได้จากสูตรในสมการ (3.18) กับระยะทาง (r)

หรือ

$$\phi_f(r) = \frac{1}{r^2} \begin{pmatrix} -0.0926 r & -0.195 r \\ 0.197 e & -0.107 e \end{pmatrix} \dots (3.19)$$

สมการ (3.19) นี้เป็นสูตรสำหรับใช้หาค่าฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วที่ปรากฏในน้ำ ที่ระยะห่าง r ซม. จากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ซึ่งมีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที

3.2.2 วิธีเปลี่ยนค่าฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มอลฟังก์ชัน

การเปลี่ยนค่าฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วให้เป็นเทอร์มอลฟังก์ชันมีอยู่ด้วยกัน

3 วิธีคือ

3.2.2.1 วิธีที่ 1 จากสมการที่ (2.34)

$$\phi_s(r) = \frac{\phi_f(r) e^{r/\lambda}}{\sum a_s \lambda} \dots (3.20)$$

ค่า λ ในสมการที่ (3.20) หาได้โดยอาศัยสมการที่ (2.35) ค่า λ นี้มีค่าเปลี่ยนไปเมื่อตำแหน่งที่ต้องการหาค่าฟังก์ชันเปลี่ยนไป และมีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{r'_2 - r'_1}{\ln \frac{\phi_f(r'_1)}{\phi_f(r'_2)}} \dots (3.21)$$

เมื่อ $\phi_f(r'_1)$ เป็นฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่ง r'_1

$\phi_f(r'_2)$ เป็นฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่ง r'_2 ซึ่งอยู่ใกล้กับ r'_1

หาค่า λ ที่ตำแหน่ง $r = 10, 20, 30, 60, 90,$ และ 120 ซม.

เพื่อที่จะนำไปใช้หาค่าเทอร์มอลฟังก์ชันที่ตำแหน่งดังกล่าว ค่า $\phi_f(r'_1)$ และ

$\phi_f(r'_2)$ ที่ใช้หาค่า λ ที่แต่ละตำแหน่งเป็นค่าฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างกันเพียง 5 ซม. $\phi_f(r'_1)$ ที่ใช้คือค่า ϕ_f ในตารางที่ 3.9

และ $\phi_f(r'_2)$ คือ $\phi_f(15), \phi_f(25), \phi_f(35), \phi_f(65), \phi_f(95),$ และ $\phi_f(125)$ ซึ่งคำนวณหาได้โดยใช้สมการที่ (3.19) ค่า λ ที่หาได้มีดังนี้

r , (ซ.ม.)	λ , (ซ.ม.)
10	4.17
20	5.68
30	6.58
60	8.01
90	8.77
120	9.21

ตารางที่ 3.6 แสดงค่า λ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อตำแหน่งที่ต้องการหาค่าฟังก์ชันเปลี่ยนไป

แทนค่า $\Sigma_{as} = 0.0189$ ซ.ม.⁻¹, $\tau = 54.4$ ซ.ม.²,

λ จากตารางที่ 3.6 และ $\phi_f(r)$ จากตารางที่ 3.9 ลงในสมการที่ (3.20) ก็หาค่าเทอร์มาลฟังก์ชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ ผลการคำนวณปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.10

3.2.2.2 วิธีที่ 2 โดยการประมาณอย่างหยาบ ๆ ว่าจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการวิ่งช้าลงของนิวตรอนเร็วในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. ณ ที่ตำแหน่งใด ๆ ถูกดูดกลืนไว้ในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. อันนั้นทั้งหมด ไม่มีเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดขึ้นตัวไหนออกไปจากน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. อันนั้นได้เลย นั่นคือ

$$\Sigma_{as} \phi_s(r) = \Sigma_{af} \phi_f(r) \text{ ----- (3.22)}$$

เมื่อ $\sum_{af} \phi_f(r)$ จำนวนนิวตรอนเร็วที่กลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน
 ในน้ำ 1 ลบ.ช.ม. ที่ตำแหน่ง r
 $\sum_{as} \phi_s(r)$ จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกกูดกลืนอยู่ในน้ำ
 1 ลบ.ช.ม. ที่ตำแหน่ง r เดียวกัน

สมการ (3.22) เขียนได้เป็น

$$\phi_s(r) = \frac{\phi_f(r)}{\sum_{as} \lambda} \quad (3.23)$$

เนื่องจาก $\sum_{af} = \frac{1}{\lambda}$

แทนค่า $\sum_{as} = 0.0189$ ช.ม.⁻¹, λ จากตารางที่ 3.6, และ

$\phi_f(r)$ จากตารางที่ 3.9 ลงในสมการที่ (3.23) ก็จะได้อาคาเทอร์มาลฟลักซ์
 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.10

3.2.2.3 วิธีที่ 3 โดยการประมาณว่าสูตรสำหรับหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอน
 เร็วในตารางที่ 3.9 อยู่ในลักษณะ

$$\phi_f(r) = \frac{1}{r} (P_1 e^{-\Sigma_1 r} + P_2 e^{-\Sigma_2 r}) \quad (3.24)$$

หาค่า P_1 , P_2 , Σ_1 และ Σ_2 โดยวิธีเดียวกันกับที่เกยทำมาแล้วในหัวข้อ

3.2.1 ผลที่ได้คือ

$$\phi_f(r) = \frac{1}{r} (8.5 \times 10^{-3} e^{-0.104 r} + 3.43 \times 10^{-4} e^{-0.187 r}) \quad (3.25)$$

$\phi_f(r)$ ในสมการที่ (3.25) นี้คือค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะห่าง
 r ช.ม. จากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุกแบบอเมอริเซียม-เบอริลเดี่ยวที่มีความแรง
 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที

โดยการนำค่า $\phi_f(r)$ จากสมการ (3.25) แทนลงในเทอม ϕ_f ในสมการการพัง (2.5) แล้วแก้สมการหาค่า ϕ_s ออกมา เมื่อแทนค่าคงที่ $K_s = 0.363$ ช.ม.⁻¹, $D_s = 0.144$ ช.ม., และ $\Sigma a_f = \frac{D_f}{\tau} = \frac{4.1}{54.4} = 0.075$ ช.ม.⁻¹ ลงไปในค่า ϕ_s ที่หาได้ผลสุดท้ายจะได้คำตอบเป็น

$$\phi_s(r) = \frac{1}{r} (3.66 \times 10^4 e^{-0.104 r} + 1.84 \times 10^5 e^{-0.187 r} - 3.58 \times 10^5 e^{-0.363 r}) \quad (3.26)$$

ค่า $\phi_s(r)$ ในสมการ (3.26) นี้คือค่าเทอร์มาลฟลักซ์ซึ่งหามาจากค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.9 ใช้สมการ (3.26) คำนวณหาค่า $\phi_s(r)$ เมื่อ $r = 10, 20, 30, 60, 90,$ และ 120 ช.ม. ผลการคำนวณปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.10 เช่นกัน

นำค่าเทอร์มาลฟลักซ์ ที่ได้มาจากการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.9 ให้เป็นเทอร์มาลฟลักซ์โดยวิธีต่าง ๆ 3 วิธี ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.10 มาเปรียบเทียบกัน และนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีการพังของนิวตรอน 2 พวก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.8 นำค่าเหล่านี้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์กับระยะทาง (r) บนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อกแผนเดียวกันดังในรูปที่ 3.6

3.3 วิธีหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วจากทฤษฎีการพังของนิวตรอน 2 พวก
จากสมการที่ (2.4)

$$\phi_f(r) = \frac{a}{4\pi D_f} \frac{e^{-K_f r}}{r} \quad (3.27)$$

7
Duncan, D.S., and Whittum, H.O., Application of Fast Neutron Removal Theory to the Calculation of Thermal Neutron Distributions in Reactor Shields : USAEC Report NAA-SR-2380, 1958.

เมื่อ $a = 1.3 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที $K_f = 0.136$ ช.ม.⁻¹

$D_f = 4.1$ ช.ม. แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (3.27) คำนวณหาค่า $\phi_f(r)$ ที่ตำแหน่ง $r = 10, 20, 30, 60, 90,$ และ 120 ช.ม. ผลการคำนวณปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.11 นำค่าเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.9 เขียนกราฟระหว่างค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วกับระยะทางของผลทั้งสองนั้นบนกระดาษกราฟกึ่งสเกลล็อกแผนเดียวกันดังรูปที่ 3.7

3.4 วิธีหาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนจากค่าเทอร์มาลฟลักซ์

สำหรับตัวกำเนิดนิวตรอนที่วางอยู่ในตัวกลางที่มีขอบเขตอนันต์ จำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากตัวกำเนิดจะถูกดูดกลืนเอาไว้ในตัวกลางทั้งหมด ดังนั้นถ้าคำนวณหาจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนเอาไว้ในตัวกลางที่มีขอบเขตอนันต์ใน 1 วินาทีได้ ค่าที่ได้ก็จะเป็นค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน แต่ในการหาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนในที่นี้คำนวณหาจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนเอาไว้ในตัวกลางที่เป็นทรงกลมรัศมี r เมื่อทรงกลมรัศมี r นั้นใหญ่พอที่จะทำให้การดูดกลืนนิวตรอนภายนอกทรงกลมมีจำนวนน้อยมาก

ในการหาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนนี้ ได้นำค่าเทอร์มาลฟลักซ์ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองของนายยุทธซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 มาใช้คำนวณหาจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนเอาไว้ในน้ำซึ่งเป็นทรงกลมรัศมี $r=20$ ช.ม. (เนื่องจากค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากการทดลองของนายยุทธมีอยู่ที่ระยะไกลสุดจากตัวกำเนิดเท่ากับ 19.5 ช.ม.) โดยการแบ่งทรงกลมออกเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นหนา 1 ช.ม. ปริมาตรของแต่ละชั้นของทรงกลมจะมีค่าเท่ากับ

$$V(r) = \frac{4\pi}{3} [(r+0.5)^3 - (r-0.5)^3]$$

เมื่อ $r+0.5 =$ รัศมีของทรงกลมอันนอก

$r-0.5 =$ รัศมีของทรงกลมอันใน

เมื่อคูณ $v(r)$ ทั่ว $\sum_{as} \phi_s(r)$ ซึ่งเป็นจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูก
 คุกกีดอยู่ในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. ต่อวินาทีที่ตำแหน่ง r ค่าที่ได้จะเป็นจำนวนเทอร์มาล
 นิวตรอนที่ถูกคุกกีดอยู่ในน้ำ $v(r)$ ลบ.ซ.ม. ต่อวินาที

$$\text{จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกคุกกีดอยู่ในน้ำที่เป็นทรงกลมรัศมียาว 20 ซม.} = \sum_{r_i} \sum_{as} \phi_s(r) V(r)$$

$$\text{เมื่อ } r_i = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, \dots, 19.5 \text{ ซม.}$$

ผลการคำนวณจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกคุกกีดอยู่ในน้ำที่เป็นทรงกลม
 รัศมี 20 ซม. มีค่าเท่ากับ 0.783×10^6 นิวตรอน/วินาที ค่า 0.783×10^6
 นิวตรอน/วินาทีที่ได้นี้ก็คือความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนนั่นเอง ถ้าน้ำที่เป็นทรงกลม
 รัศมี 20 ซม. มีขนาดใหญ่พอจนทำให้นิวตรอนที่เกิดขึ้นแล้วหนีออกนอกทรงกลมมี
 จำนวนน้อยมาก



3.5 ผลการคำนวณ

ระยะทาง r (ซ.ม.)	$\phi_s \times 10^3$, (นิวตรอน/ตร.ซ.ม.วินาที)			
	การฟุ้งของ นิวตรอน2พวก	การกระเจิง ครั้งแรก	เฟอรัมมีเอจ	ผลการทดลอง ของนายยุทธ
0	26.2	200.0	3.08	7.00
0.5	23.3	143.0	3.50	6.90
1.5	18.3	69.6	3.45	6.70
2.5	14.3	41.8	3.34	6.20
3.5	11.3	26.9	3.12	5.74
4.5	8.94	18.0	2.94	5.30
5.5	7.13	12.4	2.88	4.85
6.5	5.69	8.82	2.75	4.30
7.5	4.58	6.24	2.51	3.81
8.5	3.70	4.56	2.43	3.30
9.5	2.98	3.36	2.29	2.74
10.5	2.44	2.47	2.05	2.30
11.5	1.96	1.86	1.89	1.91
12.5	1.61	1.42	1.67	1.50
13.5	1.31	1.08	1.51	1.19
14.5	1.08	0.843	1.36	1.00
15.5	0.886	0.653	1.18	0.838
16.5	0.736	0.512	1.05	0.680
17.5	0.603	0.405	0.906	0.556
18.5	0.502	0.324	0.783	0.460
19.5	0.418	0.258	0.672	0.393

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะทางต่าง ๆ ในน้ำ ซึ่งเกิดจาก
ตัวกำเนิดขนาดจุดแบบเมอริเซียม-เบอริลเลียม ที่มีความแรง
 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที

หมายเหตุ ค่าเทอร์มัลฟลักซ์ในของสุดท้ายของตารางที่ 3.7 เป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองของนาย ยุกท ซึ่งได้ทำการวัดค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่ปรากฏในดิ่งน้ำรัศมี 25 ซม. ที่ระยะ 2.5, 3.5, 5.5, 7.5, 9.5,19.5 ซม. เอาไว้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่มีอยู่ไปเขียนกราฟ แล้วขยาย (extrapolate) เส้นกราฟที่เขียนได้ออกไปจนถึงตำแหน่ง $r = 0$ หากค่าเทอร์มัลฟลักซ์จากกราฟ ณ ตำแหน่งที่นาย ยุกท ไม่ได้หาไว้ เพื่อให้มีค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดทุก ๆ ระยะ 1 ซม. เพื่อนำค่าเทอร์มัลฟลักซ์เหล่านี้ไปใช้หาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน

ระยะทาง r (ซ.ม.)	ϕ_s , (นิวตรอน/ตร.ซ.ม.วินาที)	
	การฟุ้งของนิวตรอน 2 พาก	เฟอร์มิเอจ
30	66.4	105.0
60	0.564	5.17×10^{-3}
90	6.44×10^{-3}	6.46×10^{-8}
120	8.15×10^{-5}	9.09×10^{-13}

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่ปรากฏในน้ำที่ระยะไกล จากตัวกำเนิดขนาดจุกแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ที่มีความแรง 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที

ระยะทาง r (ซ.ม.)	ϕ_f (นิวตรอน/ตร.ซ.ม.วินาที)
10	833.0
20	93.6
30	17.3
60	0.275
90	7.58×10^{-3}
120	2.65×10^{-4}

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะทางต่าง ๆ ในน้ำจาก
 คิวกำเนิคขนาดจุกแบบอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ที่มีความแรง
 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที ค่าฟลักซ์เหล่านี้ได้มาจากการ
 คำนวณโดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.1
 ซึ่งได้จาก moments method

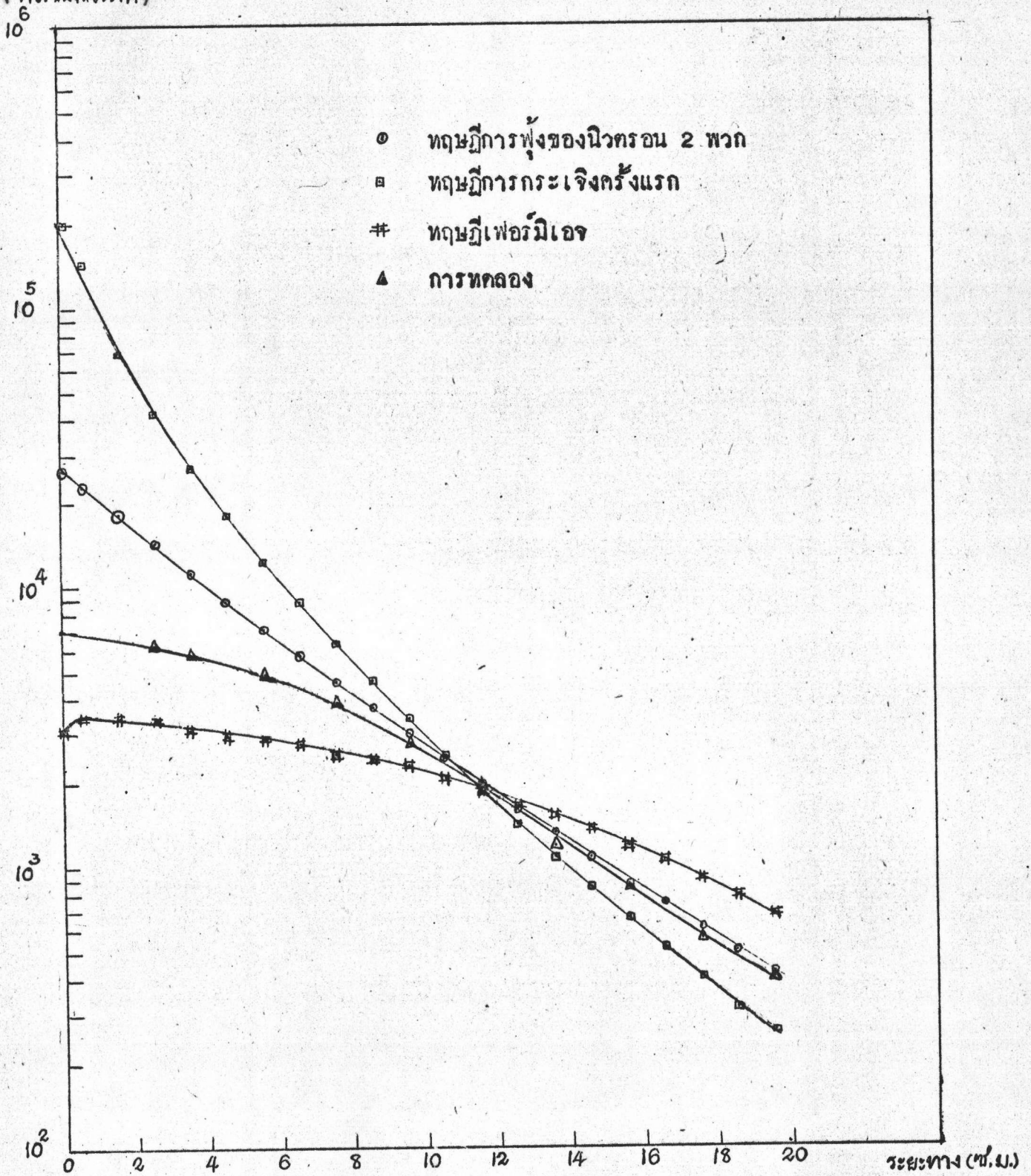
ระยะทาง r (ซ.ม.)	ϕ_s , (นิวตรอน/ตร.ซ. ม.วินาที)		
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3
10	2.4×10^5	1.06×10^4	3.18×10^3
20	4.68×10^3	8.67×10^2	4.37×10^2
30	4.88×10^2	1.39×10^2	7.55×10^1
60	4.24	1.82	1.21
90	9.27×10^{-2}	4.57×10^{-2}	3.43×10^{-2}
120	2.89×10^{-3}	1.52×10^{-3}	1.13×10^{-3}

ตารางที่ 3.10 แสดงค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่หาได้โดยอาศัยค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว
ในตารางที่ 3.9 โดยวิธีต่าง ๆ 3 วิธี (ในหัวข้อ 3.2.2)

ระยะทาง r (ซ.ม.)	ϕ_f (นิวตรอน/ตร.ซ.ม.วินาที)
10	655.0
20	84.4
30	14.5
60	0.123
90	1.40×10^{-3}
120	1.77×10^{-5}

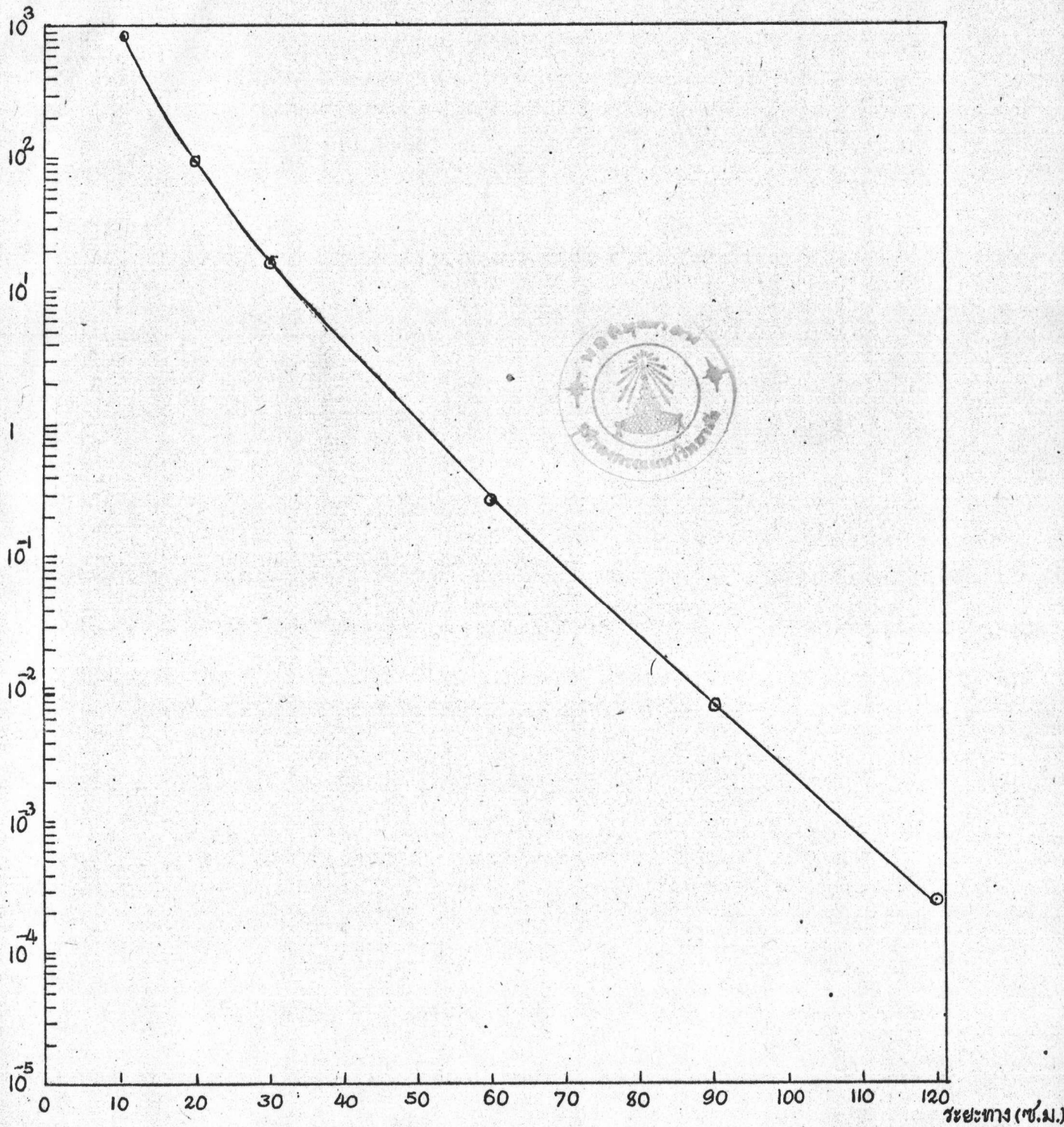


ตารางที่ 3.11 แสดงค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำจากตัวกำเนิด
ขนาดจุดแบบอเมอริเซียม-เบอริลเดี่ยว ที่มี ความแรง
 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที ค่าฟลักซ์เหล่านี้ได้มาจากการ
คำนวณโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก

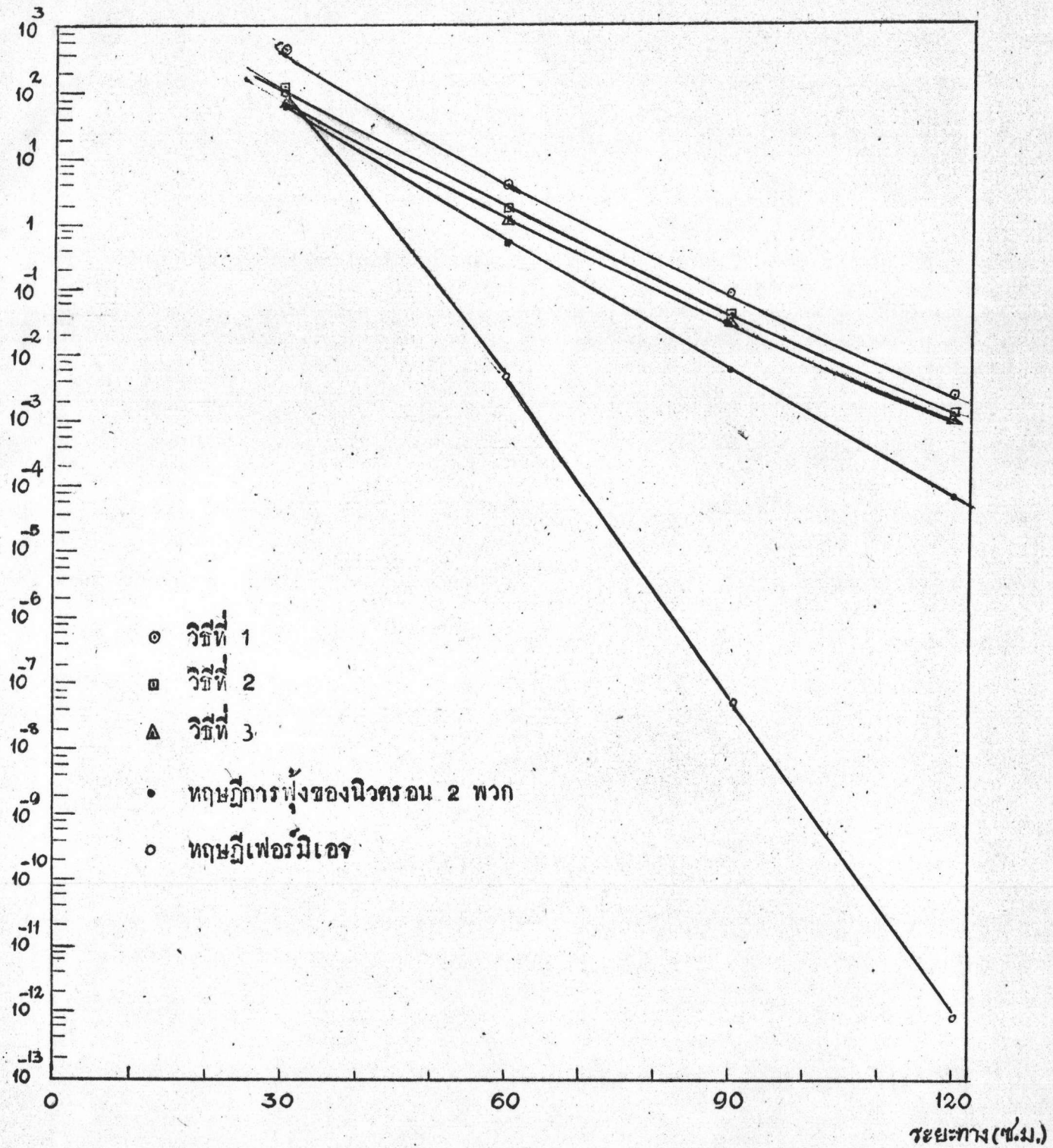


รูปที่ 3.4 กราฟระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์กับระยะทาง จากตารางที่ 3.7

(นิวตรอน / ตร.ซ.ม.วินาที)



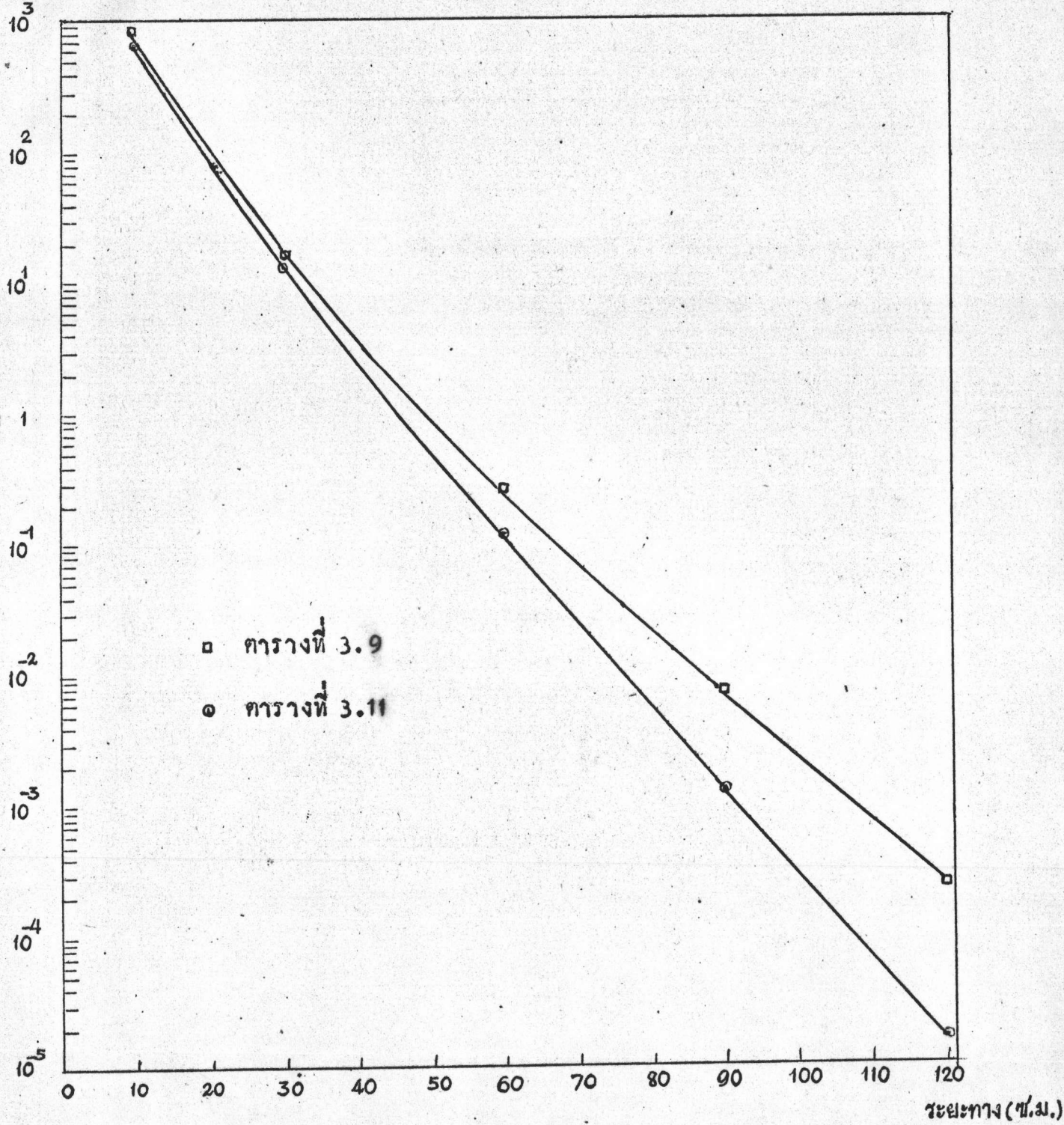
รูปที่ 3.5 กราฟระหว่างค่าพลักร์ของนิวตรอนเร็วกับระยะทางในตารางที่ 3.9 ซึ่งคำนวณมาจากค่าโคสที่ไดควยวิธี moments method



รูปที่ 3.6 กราฟระหว่างค่าเทอร์มอลฟลักซ์กับระยะทางจากตารางที่ 3.8 และตารางที่ 3.10

พลั๊กซ์ของนิวตรอนเร็ว

($\frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ตาราง.ม.วินาที}}$)



รูปที่ 3.7 กราฟระหว่างค่าพลั๊กซ์ของนิวตรอนเร็วกับระยะทางจากตารางที่ 3.9 และตารางที่ 3.11 ซึ่งคำนวณมาจาก moments method และทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกตามลำดับ