



บทที่ ๓

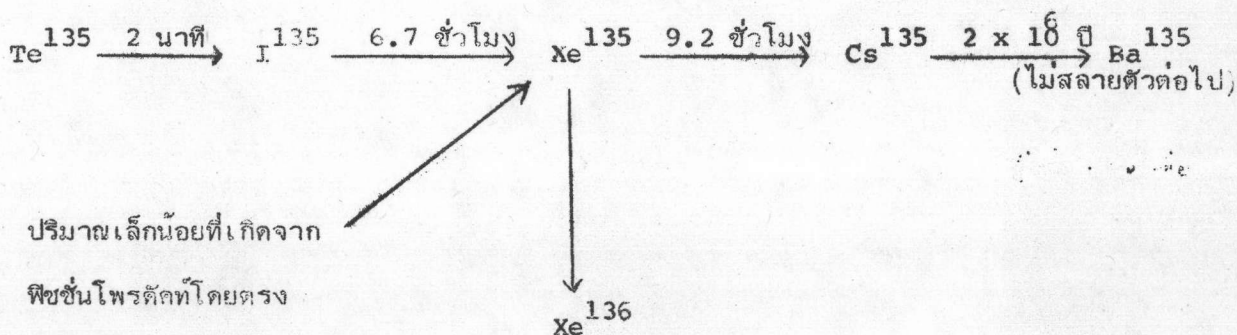
การทดลอง

๓.๑ พิษชิ้นโปรดักต์พอยซันนิ่ง (Fission Product Poisoning)

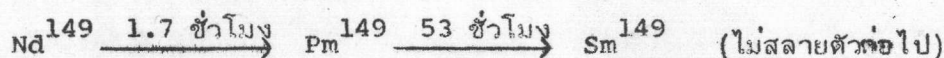
๓.๑.๑ ซีนอนพอยซันนิ่ง (Xenon Poisoning)

เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเริ่มทำงานพิษชิ้นโปรดักต์ก็เริ่มเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพิษชิ้นในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พิษชิ้นโปรดักต์และคอเตอรนิวไคลด์ (daughter nuclide) ที่เกิดขึ้นเหล่านี้บางตัวมีค่าภาคตัดขวางในการจับนิวตรอน (neutron absorption cross-section) สูง นิวไคลด์เหล่านี้ก็จะทำการแย่งนิวตรอนแข่งกับเชื้อเพลิง นิวไคลด์เหล่านี้เรียกว่า พอยซัน (poison)

พอยซันในเครื่องปฏิกรณ์ที่น่าสนใจมีอยู่ ๒ ตัว คือ Xe^{135} และ Sm^{149} ทั้งนี้เนื่องจากนิวไคลด์ทั้งสองนี้มีค่าภาคตัดขวางสูง นิวไคลด์เหล่านี้เกิดขึ้นตามรูปแบบของการสลายตัว (decay scheme) ดังนี้



และ



ในการทดลองนี้จะทำการหาค่าของซีนอนพอยซันนิ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะพิจารณาออกเป็น ๒ ตอน คือ ขณะเริ่มเดินเครื่อง (start-up) จนถึงภาวะสม่ำเสมอ (steady state) และหลังจากที่เครื่อง (after shut-down) เมื่อเครื่องปฏิกรณ์เริ่มเดินเครื่องไปสู่ระดับของกำลัง (power) ค่าหนึ่งซึ่งคงที่. ความเข้มข้นของซีนอนซึ่งตอนต้น

$$\theta(t) = \frac{\sigma x(t)}{\Sigma_u} \quad (3)$$

และ

$$I'(t) = \frac{\sigma I(t)}{\Sigma_u} \quad (4)$$

โดยที่ Σ_u คือภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนแบบมหภาค (macroscopic absorption cross - section) ของเชื้อเพลิง

แทนค่าสมการที่ (๓) และ (๔) ลงในสมการที่ (๑) จะได้

$$\frac{\Sigma_u}{\sigma} \frac{d\theta(t)}{dt} = \gamma_1 \Sigma_F \phi + \lambda_2 \frac{\Sigma_u}{\sigma} I'(t) - (\lambda_1 + \sigma \phi) \frac{\Sigma_u}{\sigma} \theta(t)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \gamma_1 \frac{\sigma \Sigma_F \phi}{\Sigma_u} + \lambda_2 I'(t) - \lambda_1 \theta(t) - \sigma \phi \theta(t)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} + \lambda_1 \theta(t) = \lambda_2 I'(t) + \left(\gamma_1 \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} - \theta(t) \sigma \phi \right) \theta(t) \quad (5)$$

แทนค่าสมการที่ (๓) และ (๔) ลงในสมการที่ (๒) จะได้

$$\frac{\Sigma_u}{\sigma} \frac{dI'(t)}{dt} = \gamma_2 \Sigma_F \phi - \lambda_2 \frac{\Sigma_u}{\sigma} I'(t)$$

$$\frac{dI'(t)}{dt} = \gamma_2 \frac{\sigma \Sigma_F}{\Sigma_u} \phi - \lambda_2 I'(t)$$

$$\frac{dI'(t)}{dt} + \lambda_2 I'(t) = \gamma_2 \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \sigma \phi \quad (6)$$

สมการที่ (๕) และ (๖) อธิบายถึงการเกิด I^{135} และ Xe^{135} สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินเครื่องจนถึงภาวะสม่ำเสมอ ในการที่จะนำสมการที่ (๕) และ (๖) มาแก้ปัญหาก็ทำได้โดยใช้วิธีเวกซ์สร์แอกเตอร์ซึ่งเลเตอร์นั้น จะต้องทำไหมส์เกลและแอมปลิจูดสเกลก่อน

ไหมส์เกล

$$\text{ให้ } t = \tau/n$$

สมการที่ (๕) จะเป็น

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \frac{\lambda_1 \theta(\tau)}{n} = \frac{\lambda_2}{n} I'(\tau) + \left(\frac{\gamma_1 \Sigma_F}{\Sigma_u} - \theta(\tau) \right) \frac{\sigma \phi}{n} \quad (7)$$

สมการที่ (๖) จะเป็น

$$\frac{dI'(\tau)}{d\tau} + \frac{\lambda_2}{n} I'(\tau) = \frac{\gamma_2 \Sigma_F}{\Sigma_u} \frac{\sigma \phi}{n} \quad (8)$$

แอมปลิจูดสเกล

หาค่าสูงสุดของ $I'(\tau)$ และ $\theta(\tau)$

จากสมการที่ (๕) $I'(\tau)$ มีค่าสูงสุดที่ $dI'(\tau)/d\theta = 0$ จะได้

$$I'_m = \frac{\gamma_2 \Sigma_F \sigma \phi}{\lambda_2 \Sigma_u}$$

จากสมการที่ (๖) $\theta(\tau)$ มีค่าสูงสุดที่ $d\theta(\tau)/d\tau = 0$ จะได้

$$\theta_m = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2) \Sigma_F}{(\lambda_1 + \sigma \phi) \Sigma_u} \sigma \phi$$

จากสมการ (๕) เมื่อทำแอมปลิจูดสเกลจะเป็น

$$\int \theta d\tau = \theta = - \int \left[\frac{\lambda_1}{n} \theta - \frac{\lambda_2}{n} I' - \left(\frac{\gamma_1 \Sigma_F}{\Sigma_u} - \theta \right) \frac{\sigma \phi}{n} \right] d\tau$$

$$\left(\frac{\theta}{\theta_m}\right) = - \left[\left\{ \frac{\lambda_1 + \sigma\phi}{n} \right\} \left(\frac{\theta}{\theta_m}\right) - \frac{\lambda_2}{n} \frac{I'm}{\theta_m} \left(\frac{I'}{I'm}\right) - \frac{Y_1}{\theta_m} \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \frac{\sigma\phi}{n} \right] d\tau \quad (9)$$

สมการที่ (๘) เมื่อทำแอมพลิจูดสเกล จะเป็น

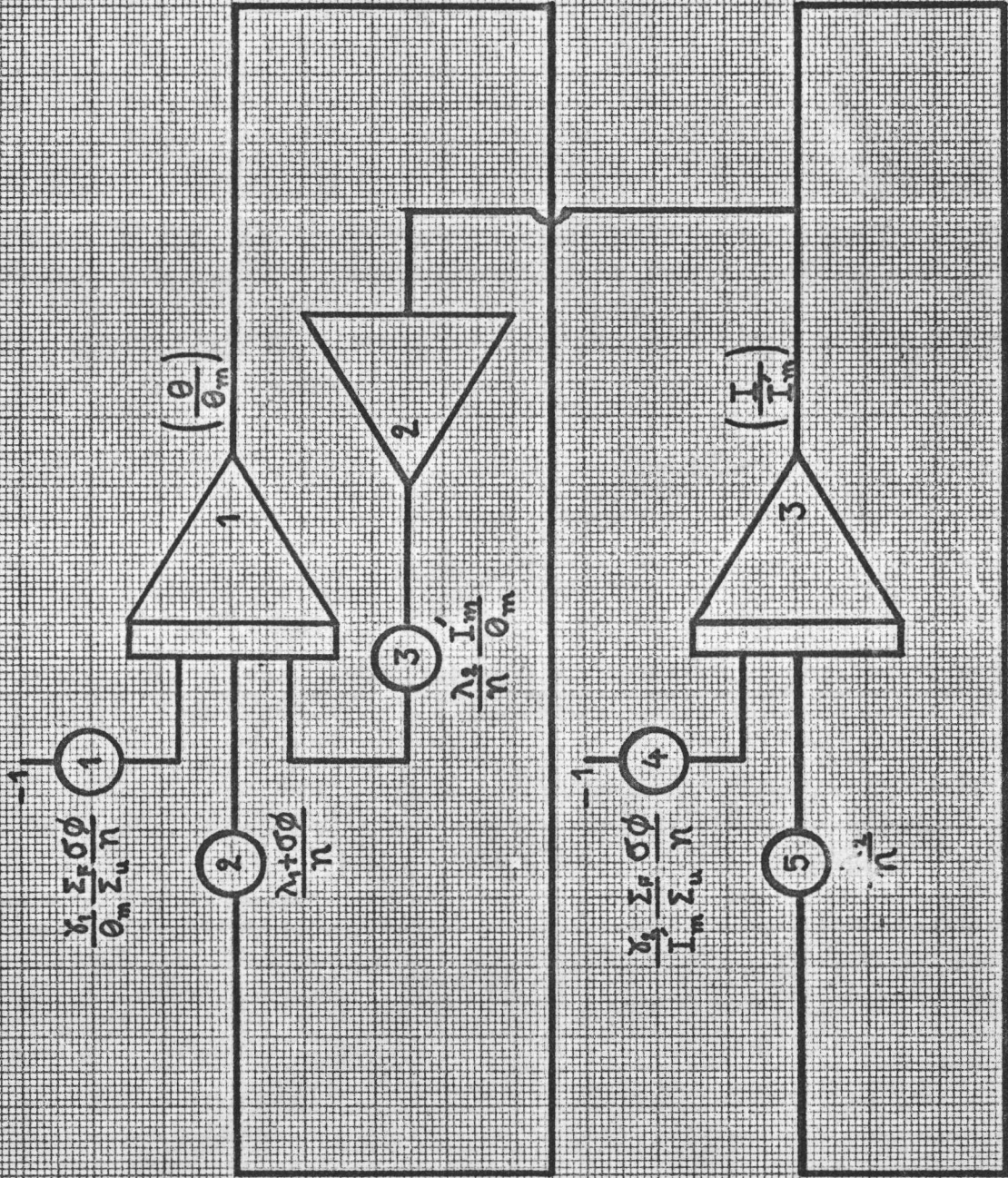
$$\int \dot{I}' d\tau = I' = -\int \left[\frac{\lambda_2}{n} I' - \frac{Y_2 \Sigma_F}{\Sigma_u} \frac{\sigma\phi}{n} \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{I'm}\right) = -\int \left[\frac{\lambda_2}{n} \left(\frac{I'}{I'm}\right) - \frac{Y_2}{I'm} \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \frac{\sigma\phi}{n} \right] d\tau \quad (10)$$

สมการที่ (๙) และ (๑๐) นำมาเขียนเป็นรูปแบบคอมพิวเตอร์ได้ดังรูปที่ ๒๘

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	หน่วย
t	เวลา	วินาที
$I(t)$	ความเข้มข้นของ I^{135}	อะตอม/ซม. ^๓
$X(t)$	ความเข้มข้นของ Xe^{135}	อะตอม/ซม. ^๓
λ_1	ค่าคงที่ในการสลายตัวของ Xe^{135}	(วินาที) ^{-๑}
λ_2	ค่าคงที่ในการสลายตัวของ I^{135}	(วินาที) ^{-๑}
Y_1	Xe^{135} ที่เกิดจากฟิชชันโพรคัทโดยตรง (Direct Fission Product Yield)	-
Y_2	I^{135} ที่เกิดจากฟิชชันโพรคัทโดยตรง	-
σ	ภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนแบบจับภาคของ Xe^{135}	บารัน



รูปที่ 28 รูปแบบคอมพิวเตอร်ของซิมพลอยชันนระหว่งการเดิหเครื่องปฏิกรณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	หน่วย
ϕ	เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	นิวตรอน/ซม. ^๒ -วินาที
$\theta(t)$	อัตราส่วนของการจับนิวตรอนโดยพอยซันต่อการจับนิวตรอนโดยเชื้อเพลิง	-
Σ_F	ภาคตัดขวางในการพิษชั้นข้างเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบมหภาค	บาร์น/ซม. ^๒
Σ_u	ภาคตัดขวางในการจับเทอร์มัลนิวตรอนของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบมหภาค	บาร์น/ซม. ^๒
τ	เวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์	วินาที
I'	อัตราส่วนของการจับนิวตรอนโดยไอโอดีนต่อการจับนิวตรอนโดยเชื้อเพลิง	-
n	ไนมีสเกลแฟคเตอร์	-

(1)
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

λ_1	=	2.09×10^{-5}	(วินาที) ^{-๑}
λ_2	=	2.88×10^{-5}	(วินาที) ^{-๑}
σ	=	3.5×10^{-18}	ตารางเซนติเมตร/นิวตรอน
γ_1	=	0.003	
γ_2	=	0.055	
$\frac{\Sigma_F}{\Sigma_u}$	=	0.84	

เลือก $\phi = 2.5 \times 10^{13}$, 1.0×10^{14} , 2.5×10^{14} นิวตรอน/(ซ.ม.)^๒ - วินาที
และให้ τ วินาทีของคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับเวลาจริง ๒ ชั่วโมง

(1)

A Study of Xenon Poisoning in a nuclear reactor, (New Jersey: Electronic Associates, 1963)

นั่นคือ $n = 1/7200$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แล้ว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ที่ } \phi &= 2.5 \times 10^{13} \\ \theta_m &= \frac{(Y_1 + Y_2)}{(\lambda_1 + \sigma\phi)} \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \cdot \sigma\phi \end{aligned}$$

$$\theta_m = 3.9326 \times 10^{-2}$$

$$I'm = \frac{Y_2}{\lambda_2} \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \cdot \sigma\phi$$

$$I'm = 0.14036$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้ว่า

$$\text{ที่ } \phi = 1.0 \times 10^{14}$$

$$\theta_m = 4.5974 \times 10^{-2}$$

$$I'm = 0.56146$$

$$\text{ที่ } \phi = 2.5 \times 10^{14}$$

$$\theta_m = 4.7583 \times 10^{-2}$$

$$I'm = 1.40365$$

ในที่นี้จะใช้ค่าประมาณของ θ_m และ $I'm$ ที่ฟังก์ชันต่าง ๆ เป็น

$$\text{ที่ } \phi = 2.5 \times 10^{13} \quad \theta_m = 0.05, \quad I'm = 0.15$$

$$\phi = 1.0 \times 10^{14} \quad \theta_m = 0.05, \quad I'm = 0.60$$

$$\phi = 2.5 \times 10^{14} \quad \theta_m = 0.05, \quad I'm = 1.50$$

แทนค่าเหล่านี้และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (๙) และ (๑๐)

$$\text{ที่ } \phi = 2.5 \times 10^{13}$$

$$\left(\frac{\theta}{0.05}\right) = -\int \left[0.781 \left(\frac{\theta}{0.05}\right) - 0.622 \left(\frac{I'}{0.15}\right) - 0.0318 \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{0.15}\right) = -\int \left[0.207 \left(\frac{I'}{0.15}\right) - 0.194 \right] d\tau$$

$$\text{ที่ } \phi = 1.0 \times 10^{14}$$

$$\left(\frac{\theta}{0.05}\right) = -\int \left[2.671 \left(\frac{\theta}{0.05}\right) - 2.488 \left(\frac{I'}{0.60}\right) - 0.127 \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{0.60}\right) = -\int \left[0.207 \left(\frac{I'}{0.60}\right) - 0.194 \right] d\tau$$

$$\text{ที่ } \phi = 2.5 \times 10^{14}$$

$$\left(\frac{\theta}{0.05}\right) = -\int \left[6.451 \left(\frac{\theta}{0.05}\right) - 6.221 \left(\frac{I'}{1.50}\right) - 0.318 \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{1.50}\right) = -\int \left[0.207 \left(\frac{I'}{1.50}\right) - 0.194 \right] d\tau$$

จากรูปแบบคอมพิวเตอร์รูปที่ ๒๘ ค่าของโพเทนเชียลโอมิเตอร์ที่ฟังก์ชันต่าง ๆ จะมีค่าดังนี้

ตารางที่ ๒

โพเทนเชียลโอมิเตอร์	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$
1	0.0318	0.127	0.318
2	0.781	0.267 x 10	0.645 x 10
3	0.622	0.249 x 10	0.622 x 10
4	0.194	0.194	0.194
5	0.207	0.207	0.207

สำหรับการเกิดขึ้นของไอโซโทปหนึ่งภายหลังจากการดับเครื่องปฏิกรณ์นั้น Xe^{135} ที่จับนิวตรอนกลายเป็น Xe^{136} จะเกิดขึ้นได้ไม่นานนักและ I^{135} ที่เกิดจาก Te^{135} ซึ่งเป็นพิษชั้นโพรคัทโดยตรงก็มีไม่มากนัก สภาพที่เคยคงที่ก็จะไม่คงที่เนื่องจากค่าคงที่ในการสลายตัวของ I^{135} มีค่ามากกว่าค่าคงที่ในการสลายตัวของ Xe^{135} ความเข้มข้นของ Xe^{135} ก็จะเพิ่มขึ้นทีละน้อย และในที่สุดของการสลายตัวจะไปสู่ Ba^{135}

ในกรณีที่เครื่องปฏิกรณ์ดับเครื่องในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งอาจจะเป็น ๒ - ๓ ชั่วโมงนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าไม่สามารถจะเดินเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ได้จนกว่าความเข้มข้นของ Xe^{135} ลดลงไปอย่างมากมาย ในกรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อการเพิ่มรีแอกติวิตีของเชื้อเพลิงไม่สามารถเอาชนะผลของการเพิ่มความเข้มข้นของพิษจนได้

สมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของ Xe^{135} และ I^{135} ภายหลังจากการดับเครื่องปฏิกรณ์จะเป็น

$$\frac{dI(t)}{dt} = -\lambda_2 I(t) \quad (11)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = \lambda_2 I(t) - \lambda_1 X(t) \quad (12)$$

คำตอบของสมการที่ (๑๑) จะเป็น

$$I(t) = I_0 e^{-\lambda_2 t}$$

แทนค่า $I(t)$ ลงในสมการที่ (๑๒) จะได้ว่า

$$\frac{dX(t)}{dt} = \lambda_2 I_0 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_1 X(t)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} + \lambda_1 X(t) = \lambda_2 I_0 e^{-\lambda_2 t}$$

คูณตลอดด้วย $e^{\lambda_1 t}$

$$e^{\lambda_1 t} \frac{dX(t)}{dt} + \lambda_1 X(t) e^{\lambda_1 t} = \lambda_2 I_0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [x(t)e^{\lambda_1 t}] &= \lambda_2 I_0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} \\ \int d [x(t)e^{\lambda_1 t}] &= \lambda_2 I_0 \int_0^t e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} dt \\ x(t)e^{\lambda_1 t} &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 [e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1] \\ x(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 [e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}] \end{aligned}$$

$x(t)$ ที่ได้นี้เป็นความเข้มข้นของซินอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของ I^{135} และการสลายตัวของ Xe^{135} ภายหลังการดับเครื่อง แต่เนื่องจากว่าก่อนการดับเครื่องนั้น ความเข้มข้นของซินอนที่สภาพคงที่มีค่าเท่ากับ X_0 ดังนั้นเวลา t ภายหลังการดับเครื่องจะมีค่าเท่ากับ $X_0 e^{-\lambda_1 t}$ จะได้ว่า

$$x(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 [e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}] + X_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (13)$$

โดยที่ $x(t)$ เป็นความเข้มข้นของ Xe^{135} ที่เวลา t ภายหลังการดับเครื่อง I_0 และ X_0 เป็นความเข้มข้นของ I^{135} และ Xe^{135} ที่สภาพคงที่ก่อนการดับเครื่อง I_0 และ X_0 ขึ้นกับฟลักซ์ของนิวตรอนระหว่างการเดินเครื่องซึ่งจะเห็นว่า I_0 และ X_0 นี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของซินอนภายหลังการดับเครื่อง

ในการได้มาซึ่งสมการที่ (๑๓) นั้น ถือว่าฟลักซ์นั้นลดลงสู่ศูนย์ทันทีทันใดเมื่อเครื่องปฏิกรณ์ดับเครื่อง ถึงแม้ว่าสิ่งนี้จะไม่เป็นจริงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แต่ก็เป็นการประมาณที่เพียงพอสำหรับการศึกษาเบื้องต้น

พิจารณาการลดลงอย่างรวดเร็วของฟลักซ์จาก 10^{14} ลดลงสู่ 10^3 นิวตรอน/ (ชม.)^๓ - วินาที เมื่อทำการดับเครื่อง ถ้าหากว่า ช่วงเวลาที่เสถียรที่เป็นลบ (stable negative period) $T_p = -80$ วินาที (เนื่องจากดีเลย์นิวตรอน) จาก $n(t) = n e^{t/T_p}$ จะได้ว่า

$$\frac{10^3}{10^{14}} = e^{-t/80}$$

$$\ln 10^{-11} = -t/80$$

$$t = 23.026 \times 80 \text{ วินาที}$$

$$t = 30.7 \text{ นาที}$$

จะเห็นว่าช่วงเวลาประมาณ ๓๐ นาที นี้มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาหลาย ๆ ชั่วโมงระหว่างที่ความเข้มข้นของซิโนนเพิ่มขึ้น และมีผลผลิตพลาดน้อยมากจากการที่ถือว่านิวตรอนฟลักซ์ลดลง เป็นศูนย์ทันทีทันใดเมื่อดับเครื่องปฏิกรณ์

เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของซิโนนมีความเข้มข้นมากที่สุดภายหลังการดับเครื่อง สามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (๑๓)

$$x(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 \left[e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t} \right] + x_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (13)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 \left[-\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} + \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} \right] - \lambda_1 x_0 e^{-\lambda_1 t}$$

ความเข้มข้นของซิโนนมีค่าสูงสุดเมื่อ $\frac{dx(t)}{dt} = 0$ ซึ่งตรงกับเวลา t_m

$$\lambda_1 x_0 e^{-\lambda_1 t_m} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} I_0 \left[\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m} \right]$$

$$1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{I_0}{x_0} \left[1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t_m} \right]$$

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} \frac{x_0}{I_0} = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t_m}$$

$$e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t_m} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left[1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} \frac{x_0}{I_0} \right]$$

$$t_m = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left[1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2} \frac{x_0}{I_0} \right]$$

เมื่อแทนค่า t_m ที่ได้จากสมการที่ (๑๔) ลงในสมการที่ (๑๓) ก็จะสามารถหาค่า
ซินอนพอยซินนิ่งที่มีค่าสูงสุดภายหลังการดับเครื่องที่ฟลักซ์ต่าง ๆ ก่อนการดับเครื่องได้ โดยที่

$$\theta_m = \frac{\sigma x_m}{\Sigma u}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$

จากสมการที่ (๑๔) ได้ $t_m = 3.12 \times 10^4$ วินาที หรือ 8.67 ชั่วโมง

จากสมการที่ (๑๓) และ (๓) ได้ $\theta_m = 0.0787$

ที่ $\phi = 1.0 \times 10^{14}$

$$t_m = 3.78 \times 10^4 \text{ วินาที หรือ } 10.50 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\theta_m = 0.2607$$

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$

$$t_m = 3.94 \times 10^4 \text{ วินาที หรือ } 10.95 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\theta_m = 0.6216$$

แต่จะใช้ค่าประมาณของ θ_m และ $I'm$ ที่ฟลักซ์ต่าง ๆ ดังนี้

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$

$$\theta_m = 1 \quad I'm = 1.5$$

$$\theta(0) = 0.040 \quad I'(0) = 0.14$$

ที่ $\phi = 1.0 \times 10^{14}$

$$\theta_m = 1 \quad I'm = 1.5$$

$$\theta(0) = 0.046 \quad I'(0) = 0.56$$

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$

$$\theta_m = 1 \quad I'm = 1.5$$

$$\theta(0) = 0.048 \quad I'(0) = 1.40$$

แทนสมการที่ (๓) และ (๔) ลงในสมการที่ (๑๑) และ (๑๒)

จากสมการที่ (๑๑) จะเป็น

$$\begin{aligned}\frac{\sum u}{\sigma} \frac{dI'(t)}{dt} &= -\lambda_2 \frac{\sum u}{\sigma} I'(t) \\ \frac{dI'(t)}{dt} &= -\lambda_2 I'(t)\end{aligned}\quad (15)$$

จากสมการที่ (๑๒) จะเป็น

$$\begin{aligned}\frac{\sum u}{\sigma} \frac{d\theta(t)}{dt} &= \lambda_2 \frac{\sum u}{\sigma} I'(t) - \lambda_1 \frac{\sum u}{\sigma} \theta(t) \\ \frac{d\theta(t)}{dt} &= \lambda_2 I'(t) - \lambda_1 \theta(t)\end{aligned}\quad (16)$$

นำสมการที่ (๑๕) และ (๑๖) มาทำไทม์สเกลและแอมพลิจูดสเกลเพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาโดย
แอนาลอกคอมพิวเตอร์

ไทม์สเกล

$$\text{ให้ } t = \tau/n$$

สมการที่ (๑๕) จะเป็น

$$\frac{dI'(\tau)}{d\tau} = -\frac{\lambda_2}{n} I'(\tau)\quad (17)$$

สมการที่ (๑๖) จะเป็น

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda_2}{n} I'(\tau) - \frac{\lambda_1}{n} \theta(\tau)\quad (18)$$

แอมพลิจูดสเกล

สมการที่ (๑๗) จะเป็น

$$\int I' d\tau = I' = -\int \left[\frac{\lambda_2}{n} I' \right] d\tau$$

$$I'_m \left(\frac{I'}{I'_m} \right) = -f \left[\frac{\lambda_2}{n} I'_m \left(\frac{I'}{I'_m} \right) \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{I'_m} \right) = -f \left[\frac{\lambda_2}{n} \left(\frac{I'}{I'_m} \right) \right] d\tau \quad (19)$$

สมการที่ (๑๘) จะเป็น

$$\left(\frac{\theta}{\theta_m} \right) = -f \left[\frac{\lambda_1}{n} \left(\frac{\theta}{\theta_m} \right) - \frac{\lambda_2}{n} \frac{I'_m}{\theta} \left(\frac{I'}{I'_m} \right) \right] d\tau \quad (20)$$

และสภาวะเริ่มต้นของสมการที่ (๑๘) และ (๑๐) จะเป็น

$$\left(\frac{I'(0)}{I'_m} \right) \text{ และ } \left(\frac{\theta(0)}{\theta_m} \right)$$

เช่นที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$

$$I'(0) = 0.14 \quad I_m = 1.5 \quad \text{ดังนั้น}$$

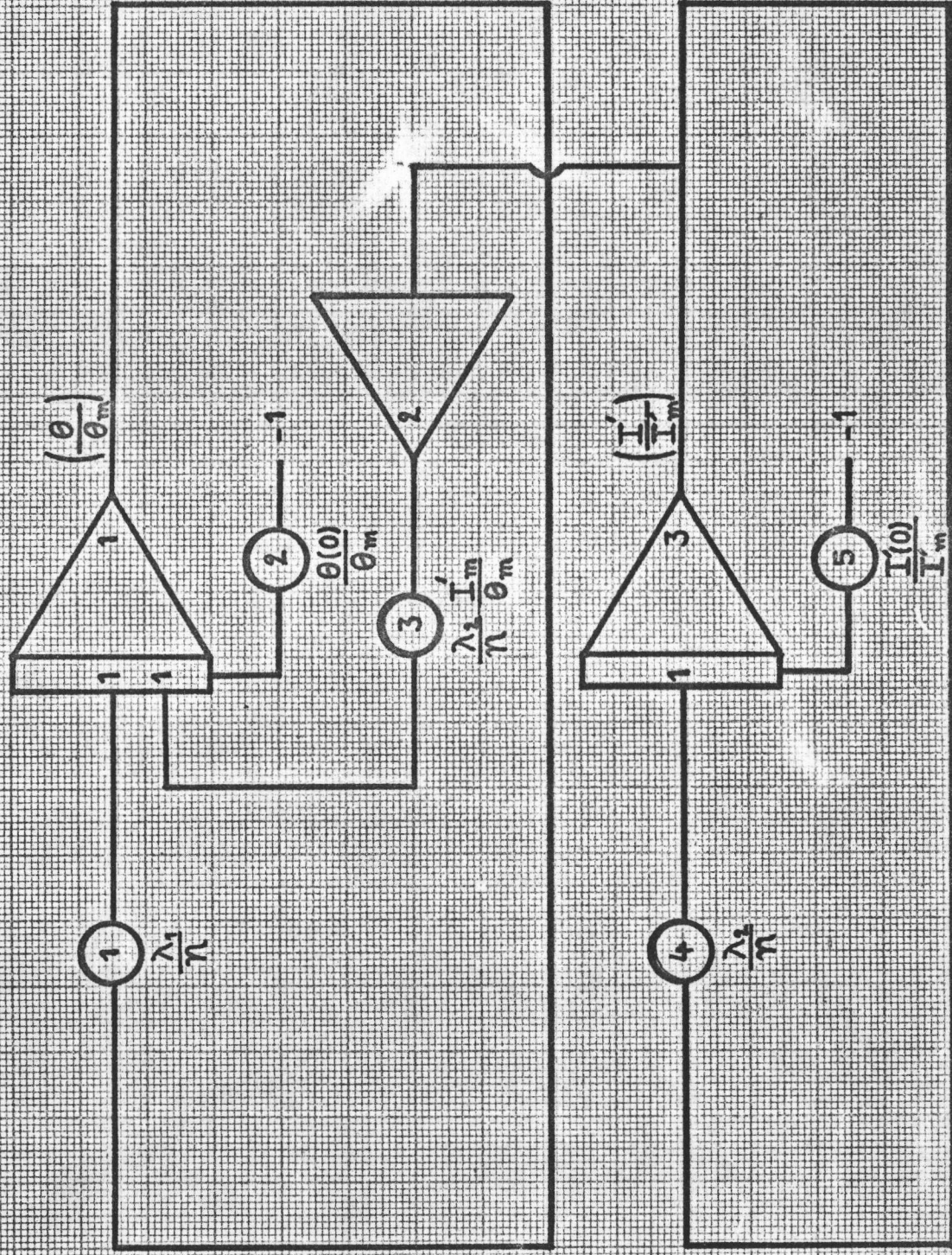
$$\left(\frac{I'(0)}{I'_m} \right) = \left(\frac{I'(0)}{1.5} \right) = \frac{0.14}{1.5} = 0.093$$

$$\text{และ } \left(\frac{\theta(0)}{1} \right) = \frac{0.040}{1} = 0.040$$

เมื่อนำสมการที่ (๑๘) และ (๒๐) มาเขียนเป็นรูปแบบคอมพิวเตอร์จะได้ดังรูปที่ ๒๔

เลือกค่า $n = 1/7200$ แล้วแทนค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะได้ค่าของ

โพเทนชิโอมิเตอร์ที่ปลั๊กซ์ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ ๒๙ รูปแบบคอมพิวเตอร์ของชั้นนอนพอยซ์ในภายหลังการดับเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ ๓

โพเทนซีโอมิเตอร์	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$
1	0.151	0.151	0.151
2	0.040	0.046	0.048
3	0.311	0.311	0.311
4	0.207	0.207	0.207
5	0.093	0.373	0.933

สรุป

จากรูปที่ ๓๐ จะเห็นว่าค่าของ $\theta(t)$ ที่สภาพคงที่กับฟลักซ์ของเครื่องปฏิกรณ์นั้นเป็นฟังก์ชันแบบเชิงโค้ง ในขณะที่ฟลักซ์เพิ่มขึ้น ๔ เท่า จะทำให้ $\theta(t)$ เพิ่มขึ้น 0.008 และขณะที่ฟลักซ์เพิ่มขึ้นเป็น ๑๐ เท่า ค่าของ $\theta(t)$ เพิ่มขึ้นไปเพียง 0.0095 จากรูปที่ ๓๑ สามารถจะบอกให้ทราบว่าจะต้องใช้เวลาานเท่าไรภายหลังจากการดับเครื่องปฏิกรณ์ จึงจะสามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าเครื่องปฏิกรณ์นั้นได้รับการออกแบบให้เชื้อเพลิงสามารถผลิตนิวตรอนเพิ่มขึ้น ๑๐% สำหรับขดเคเยกการเกิดพอยซอนในเครื่องปฏิกรณ์ แสดงว่าค่าสูงสุดของ $\theta(t)$ จะเป็น 0.10 เมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในภาวะวิกฤต จากรูปที่ ๓๑ นี้ จะแสดงให้เห็นว่าจะต้องดับเครื่องเป็นเวลานานถึง ๓๗.๖ ชั่วโมง และ ๕๔.๔ ชั่วโมง สำหรับฟลักซ์ 1.0×10^{14} และ 2.5×10^{14} ตามลำดับจึงจะเริ่มเดินเครื่องปฏิกรณ์ใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าเครื่องปฏิกรณ์ออกแบบมาสำหรับฟลักซ์ 2.5×10^{13} ก็ไม่จำเป็นต้องรอกคอย ส่วนรูปที่ ๓๒ แสดงถึงขัณพอยซอนนิ่งที่ฟลักซ์ 2.5×10^{13} ที่ได้จากสมการ

$$\left(\frac{\theta}{0.10} \right) = -f \left[0.150 \left(\frac{\theta}{0.10} \right) - 0.290 \left(\frac{I'}{0.14} \right) \right] dt$$

$\theta(t)$

.05

.04

.03

.02

.01

8

16

24

32

40

48

56

64

72

ชั่วโมง

$\phi = 2.5 \times 10^{14}$ นิวทอน/ซม²-วินาที

$\phi = 1.0 \times 10^{14}$ นิวทอน/ซม²-วินาที

$\phi = 2.5 \times 10^{13}$ นิวทอน/ซม²-วินาที

แกนนอน

แกนตั้ง

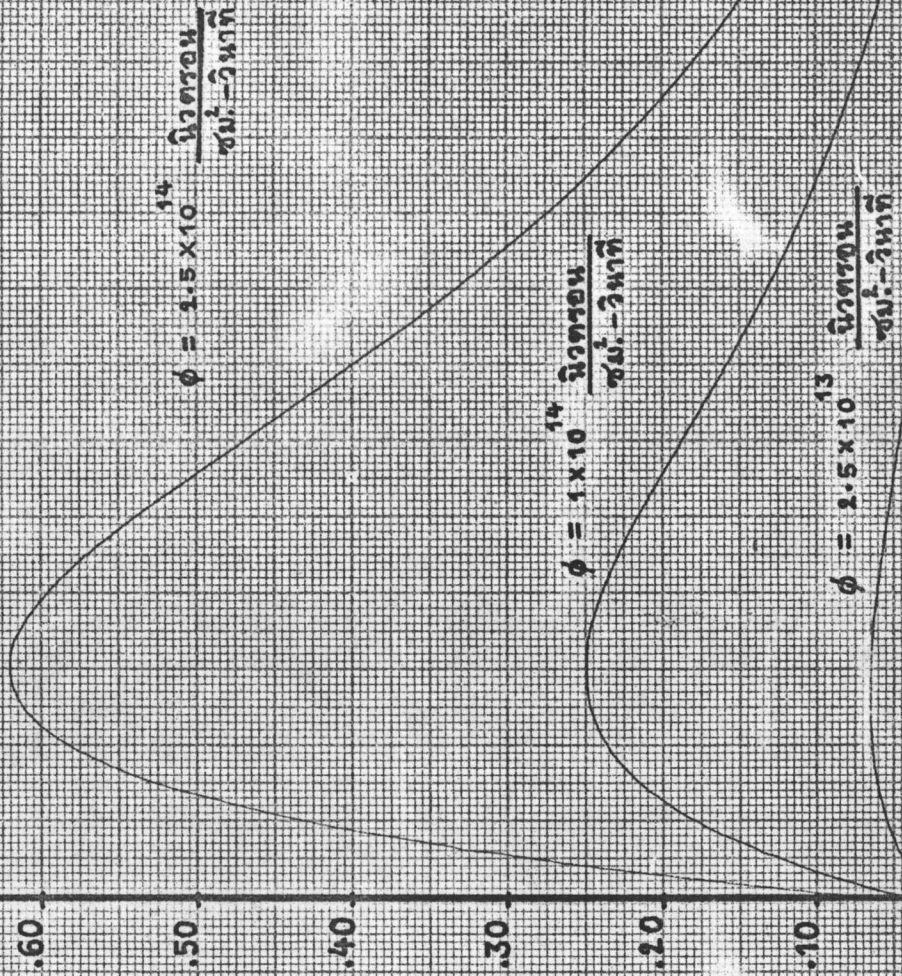
สเกล 2วินาที/ซม.
 และ 2 ชั่วโมง : 1วินาที

สเกล 1วินาที/ซม.
 และ .05 : 10วินาที

รูปที่ 30 สัณทอทยชันนระหว่บการเค้นเค้นพร้อมปฏิกรณ์

รูปที่ 31 ซ่อนพอยซ์นิ่งภายใต้การดันเครื่องปฏิกรณ์

$\theta(t)$



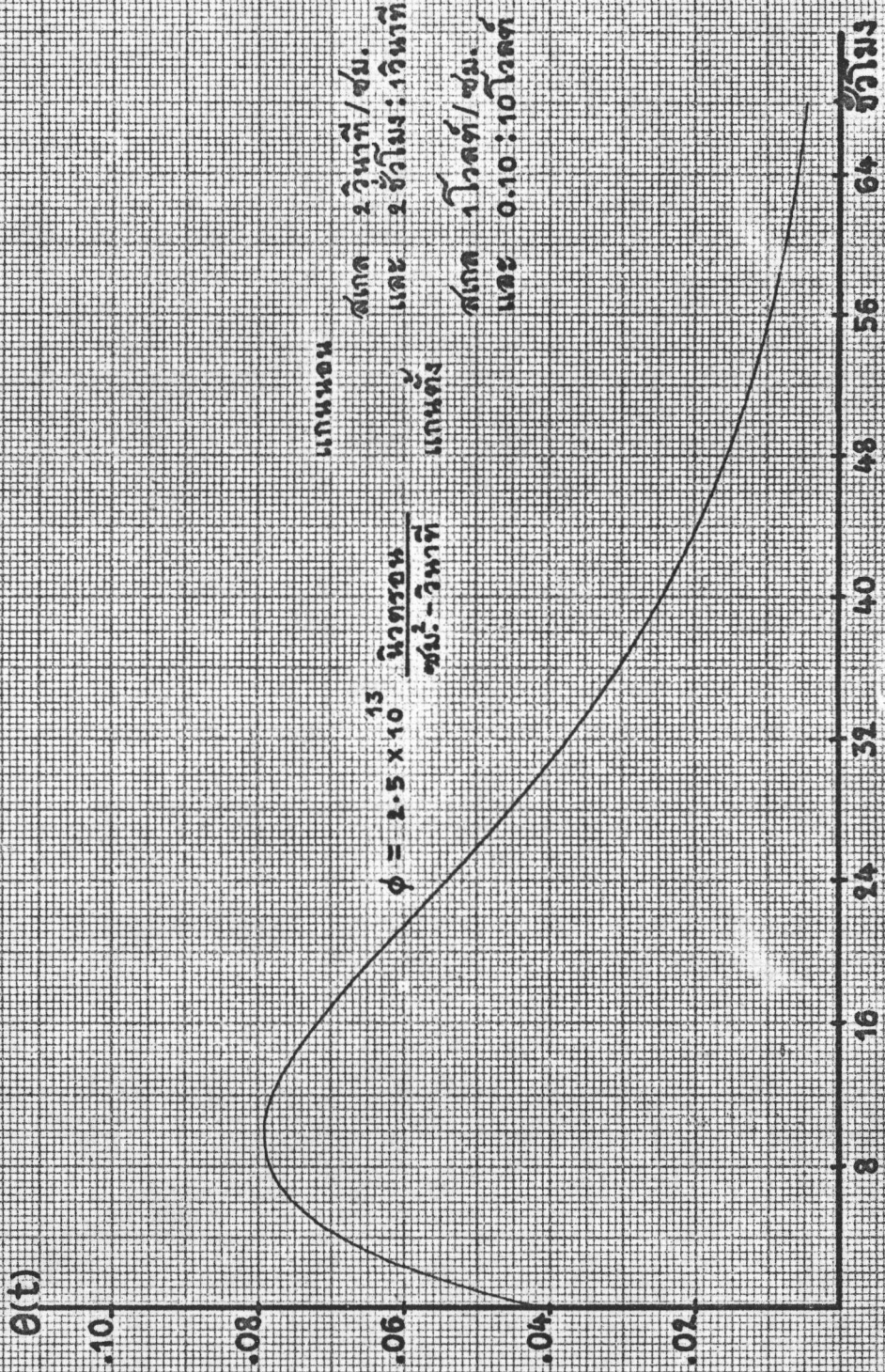
แกนออก

สเกล 1 วินาที/ซม.
และ 2 ชั่วโมง/1 วินาที

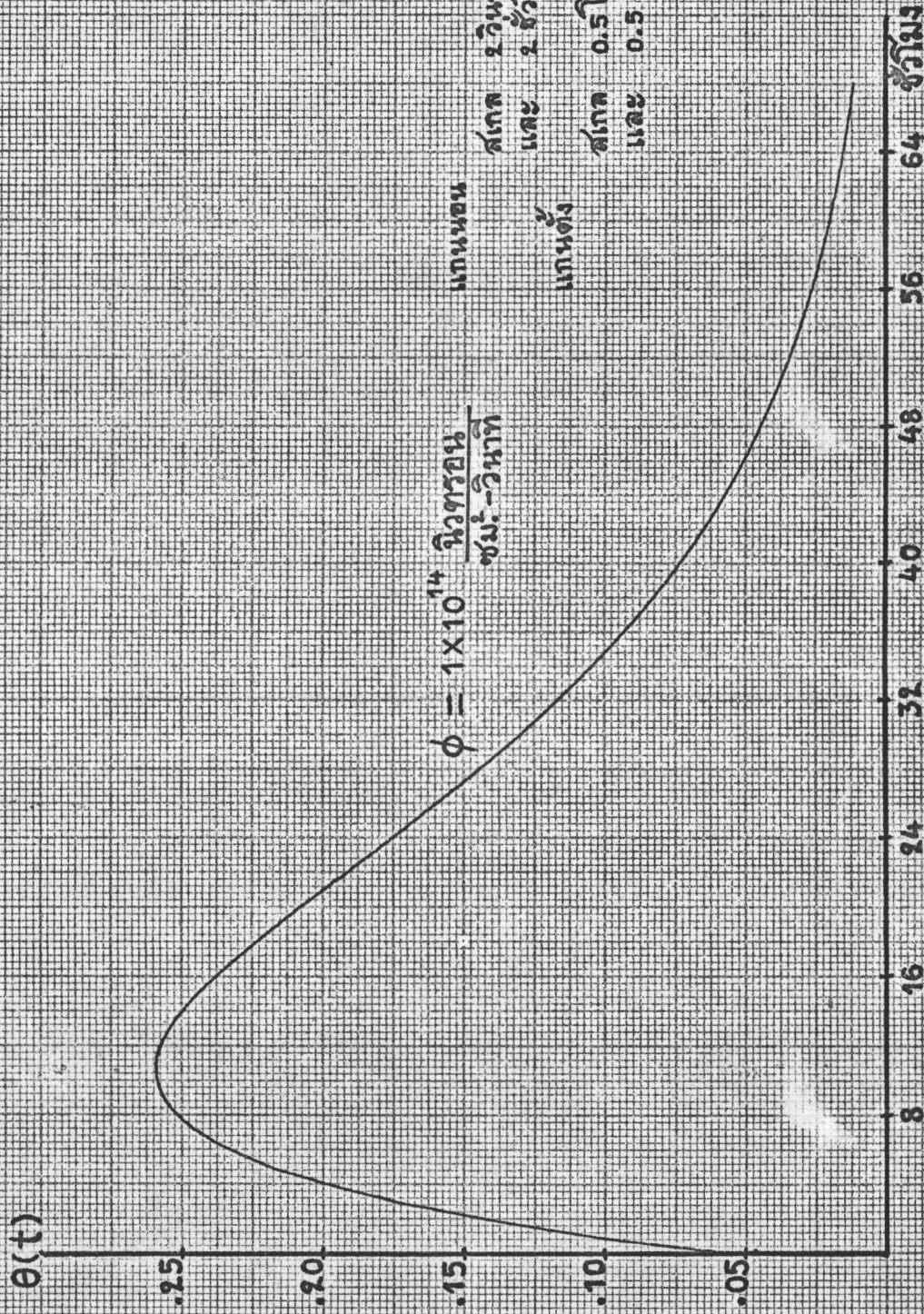
แกนตั้ง

สเกล 0.5 วัตต์/ซม.
และ 1 : 10 วัตต์

ชั่วโมง



รูปที่ 32 ซีนฮอนพอยชันในภายหลังการจับเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 33 ซึ่มอนพอยชันนิ่งภายหลังการดับเครื่องปฏิกรณ์

$$\left(\frac{I'}{0.14}\right) = -\int \left[0.207 \left(\frac{I'}{0.14}\right) \right] d\tau$$

และ $\left(\frac{\theta(0)}{0.10}\right) = 0.39 ; \left(\frac{I'(0)}{0.14}\right) = 1.00$

รูปที่ ๓๓ เป็นกราฟของซินอนพอยชันนิ่งที่ฟลักซ์ 1.0×10^{14} ที่ได้จากสมการ

$$\left(\frac{\theta}{0.50}\right) = -\int \left[0.151 \frac{\theta}{0.50} - 0.232 \left(\frac{I'}{0.56}\right) \right] d\tau$$

$$\left(\frac{I'}{0.56}\right) = -\int \left[0.207 \left(\frac{I'}{0.56}\right) \right] d\tau$$

และ $\left[\frac{\theta(0)}{0.50}\right] = 0.092 ; \left[\frac{I'(0)}{0.56}\right] = 1.00$

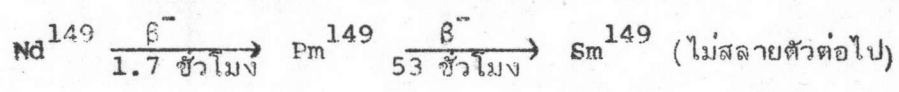
ซึ่งกราฟทั้งสองนี้จะให้ค่าของซินอนพอยชันนิ่งที่ฟลักซ์ 2.5×10^{13} และ 1.0×10^{14} ได้ถูกต้องดีกว่ารูปที่ ๓๑

จะสังเกตเห็นว่าสมการที่ใช้ในการศึกษาซินอนพอยชันนิ่งนี้ ถือว่า การกระจายของ นิวตรอนฟลักซ์และการเกิดขึ้นของ I^{135} และ Xe^{135} เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ ถ้า ϕ เป็นค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ ความผิดพลาดของผลลัพธ์ของค่าซินอนพอยชันนิ่ง จะไม่มากกว่า 2 - 3 %

๓.๑.๒ ขามา เรียมพอยชันนิ่ง

นอกจาก Xe^{135} แล้วพิษชั้นโพรคัทท์พอยชันที่รองลงมาก็คือ Sm^{149} Sm^{149}

นี้ไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงจากพิษชั้นแต่เกิดจากการสลายตัวของ Nd^{149}



เนื่องจาก Nd^{149} สลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ Pm^{149} ดังนั้น
 อาจจะถือว่า Pm^{149} เป็นตัวที่เกิดจากพิษชั้นโดยตรง เนื่องจากภาคตัดขวางในการจับเทอร์มัล
 นิวตรอนของ Pm^{149} มีค่าน้อย ดังนั้น $\sigma\phi$ สามารถตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับ λ ของ Pm^{149}
 ส่วน Sm^{149} นั้นเป็นสารที่คงตัวจึงไม่มีการสูญหายไปเนื่องจากการสลายตัว มีแต่การจับนิวตรอน
 ของ Sm^{149}
 สมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของ Pm^{149} และ Sm^{149} คือ

$$\frac{dp(t)}{dt} = \gamma \frac{\Sigma \phi}{F} - \lambda p(t) \tag{1}$$

อัตราการสะสมของ Pm^{149} อัตราการเกิดของ Pm^{149} อัตราการสลายตัวของ Pm^{149}

และ

$$\frac{ds(t)}{dt} = \lambda p(t) - \sigma \phi s(t) \tag{2}$$

อัตราการสะสมของ Sm^{149} อัตราการเกิดของ Sm^{149} อัตราการจับนิวตรอนของ Sm^{149}

กำหนดให้

$$\psi(t) = \frac{\sigma s(t)}{\Sigma_u} \tag{3}$$

และ
$$p'(t) = \frac{\sigma p(t)}{\Sigma_u} \tag{4}$$

แทนสมการที่ (๔) ลงในสมการที่ (๑) จะได้

$$\frac{dp'(t)}{dt} = \gamma \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \phi - \lambda p'(t) \tag{5}$$

แทนสมการที่ (๓) และ (๔) ลงในสมการที่ (๒) จะได้

$$\frac{d\Psi(t)}{dt} = \lambda P'(t) - \sigma\phi\Psi(t) \quad (6)$$

สมการที่ (๕) และ (๖) อธิบายถึงการเกิดของ Pm^{149} และ Sm^{149} สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ที่เริ่มเดินเครื่องจนถึงภาวะสม่ำเสมอ

โหม่งสเกล

$$\text{ให้ } t = \tau/n$$

สมการที่ (๕) จะเป็น

$$\frac{dP'(\tau)}{d\tau} = \frac{\gamma\sigma\Sigma_F}{\Sigma_u} \frac{\phi}{n} - \frac{\lambda}{n} P'(\tau) \quad (7)$$

สมการที่ (๖) จะเป็น

$$\frac{d\Psi(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda}{n} P'(\tau) - \frac{\sigma\phi}{n} \Psi(\tau) \quad (8)$$

แอมพลิจูดสเกล

เนื่องจากภาคตัดขวางของ Sm^{149} น้อยกว่าของ Xe^{135} และครึ่งชีวิตของ Pm^{149} ยาวกว่า I^{135} และ Xe^{135} ทำให้ความเข้มข้นของ Pm^{149} และ Sm^{149} เข้าสู่สภาพคงที่ได้ช้ากว่ากรณีของซินอน

ความเข้มข้นที่สภาพคงที่หรือค่าสูงสุดของ P' และ θ หาได้จาก

$$P'_{m} = \frac{\gamma\sigma}{\lambda} \cdot \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \phi$$

และ
$$\Psi_m = \gamma \cdot \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u}$$

จากสมการที่ (๗)

$$\int P' d\tau = P' = - \int \left[\frac{\lambda}{n} P' - \gamma\sigma \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \cdot \frac{\phi}{n} \right] d\tau$$

$$\left(\frac{P'}{P'm} \right) = - \int \left[\frac{\lambda}{n} \left(\frac{P'}{P'm} \right) - \frac{\gamma \sigma}{P'm} \cdot \frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} \cdot \frac{\phi}{n} \right] d\tau \quad (9)$$

และสมการที่ (๘) จะเป็น

$$\left(\frac{\Psi}{\Psi_m} \right) = - \int \left[\frac{\sigma \phi}{n} \left(\frac{\Psi}{\Psi_m} \right) - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{P'm}{\Psi_m} \left(\frac{P'}{P'm} \right) \right] d\tau \quad (10)$$

สมการที่ (๘) และ (๑๐) เมื่อนำมาเขียนเป็นรูปแบบคอมพิวเตอร์ จะได้ดังรูปที่ ๓๔

(2)
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

- λ = 3.63 x 10⁻⁶ (วินาที)⁻¹
- σ = 5.87 x 10⁻²⁰ ซม.²/นิวตรอน
- γ = 0.01071
- $\frac{\Sigma_F}{\Sigma_u} = 0.84$ (3)

ให้ n = 1/1.08 x 10⁵ = 9.2593 x 10⁻⁶

(๑ วินาทีของคอมพิวเตอร์ = เวลาจริง ๓๐ ชั่วโมง)

(2)

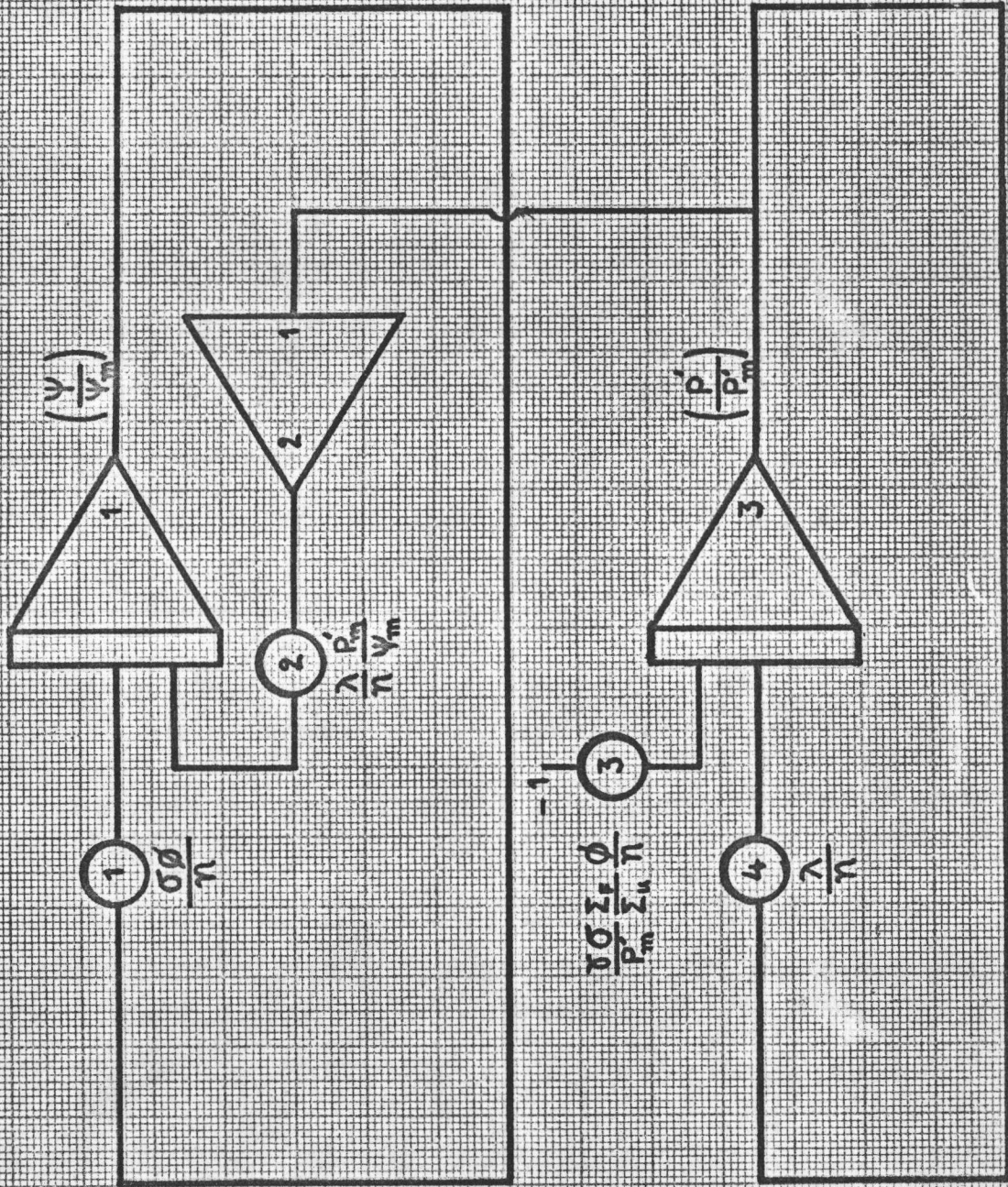
John R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, 1 st ed.

(New York: Addison-Wesley Publishing Co., 1975), p.285.

(3)

A Study of Xenon Poisoning in a nuclear reactor, (New Jersey:

Electronic Associates, 1963)



รูปที่ 34 รูปแบบคอมพิวเทอร์ของซามาเรียบทยชั้นนิระหว่างการเดินเครื่องปฏิบัติการ

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	หน่วย
t	เวลา	วินาที
$P(t)$	ความเข้มข้นของ Pm^{149}	อะตอม / ซม. ^๓
$S(t)$	ความเข้มข้นของ Sm^{149}	อะตอม / ซม. ^๓
λ	ค่าคงที่ในการสลายตัวของ Pm^{149}	(วินาที) ^{-๑}
γ	Pm^{149} ที่เกิดจากฟิชชันโปรดักต์โดยตรง	-
σ	ภาคตัดขวางในการจับนิวตรอนแบบจุลภาคของ Sm^{149}	บาร์น
ϕ	เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์	นิวตรอน / ซม. ^๒ - วินาที
$\Psi(t)$	อัตราส่วนของการจับนิวตรอนโดยพอยซอนต่อการจับนิวตรอนโดยเชื้อเพลิง	-
$P'(t)$	อัตราส่วนของการจับนิวตรอนโดยโพรมีเทียมต่อการจับนิวตรอนโดยเชื้อเพลิง	-
Σ_F	ภาคตัดขวางในการฟิชชันของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบมหภาค	บาร์น / ซม. ^๓
Σ_u	ภาคตัดขวางในการจับเทอร์มัลนิวตรอนของเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบมหภาค	บาร์น / ซม. ^๓
τ	เวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์	วินาที
n	ไมล์ส เกลแฟกเตอร์	-

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วจะได้ว่า

ที่	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	
	$P'm = 3.637 \times 10^{-3}$	$\Psi_m = 0.009$
ที่	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	
	$P'm = 1.455 \times 10^{-2}$	$\Psi_m = 0.009$
ที่	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$	
	$P'm = 3.637 \times 10^{-2}$	$\Psi_m = 0.009$

ในที่นี้จะใช้ค่าประมาณของ $P'm$ และ Ψ_m ที่พลักซ์ต่าง ๆ เป็น

ที่	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	
	$P'm = 0.004$	$\Psi_m = 0.01$
ที่	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	
	$P'm = 0.02$	$\Psi_m = 0.01$
ที่	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$	
	$P'm = 0.04$	$\Psi_m = 0.01$

จากสมการที่ (๙) และ (๑๐)

ที่	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	
	$\left(\frac{P'}{P'm}\right) = - \int \left[0.3920 \left(\frac{P'}{P'm}\right) - 0.3565 \right] d\tau$	
	$\left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) = - \int \left[0.1568 \left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) - 0.1585 \right] d\tau$	
ที่	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	
	$\left(\frac{P'}{P'm}\right) = - \int \left[0.3920 \left(\frac{P'}{P'm}\right) - 0.2852 \right] d\tau$	
	$\left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) = - \int \left[0.7840 \left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) - 0.6340 \right] d\tau$	

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$

$$\left(\frac{P'}{P'_m}\right) = - \int \left[0.3920 \left(\frac{P'}{P'_m}\right) - 0.3565 \right] d\tau$$

$$\left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) = - \int \left[1.5680 \left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) - 1.5850 \left(\frac{P'}{P'_m}\right) \right] d\tau$$

ค่าของโพเทนชิโอมิเตอร์ที่ใช้กับรูปแบบคอมพิวเตอร์รูปที่ ๓๔ เป็น

ตารางที่ ๔

โพเทนชิโอมิเตอร์	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$
1	0.159	0.634	1.585
2	0.157	0.784	1.568
3	0.357	0.285	0.357
4	0.392	0.392	0.392

ขามา เรียบภายหลังการดับเครื่องปฏิกรณ์

สมการที่ (๗) และ (๘) จะเป็น

$$\frac{dP'(\tau)}{d\tau} = - \frac{\lambda}{n} P'(\tau) \tag{11}$$

$$\frac{d\Psi(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda}{n} P'(\tau) \tag{12}$$

$$P'_m = P'_0$$

$$\Psi_m = \Psi_0 + P'_0$$

P'_0 และ Ψ_0 เป็นความเข้มข้นของ $P'(\tau)$ และ $\Psi(\tau)$ ที่สภาพคงที่

สมการที่ (๘) และ (๑๐) จะเป็น

$$\left(\frac{P'}{P'm}\right) = - \int \left[\frac{\lambda}{n} \left(\frac{P'}{P'm}\right) \right] d\tau \quad (13)$$

$$\left(\frac{\Psi}{\Psi_m}\right) = - \int \left[- \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{P'm}{\Psi_m} \left(\frac{P'}{P'm}\right) \right] d\tau \quad (14)$$

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$

$$P'm = 0.004$$

$$\Psi_m = 0.014$$

$$P'(0) = 0.004$$

$$\Psi(0) = 0.010$$

ที่ $\phi = 1.0 \times 10^{14}$

$$P'm = 0.02$$

$$\Psi_m = 0.03$$

$$P'(0) = 0.02$$

$$\Psi(0) = 0.01$$

ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$

$$P'm = 0.04$$

$$\Psi_m = 0.05$$

$$P'(0) = 0.04$$

$$\Psi(0) = 0.01$$

ใช้ค่าประมาณของ Ψ_m และ $P'm$ ที่พลักซ์ต่าง ๆ เป็น

$$\Psi_m = 0.05$$

$$\Psi(0) = 0.01$$

$$P'm = 0.04$$

สำหรับ $P'(0)$ ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$, $\phi = 1.0 \times 10^{14}$ และ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$

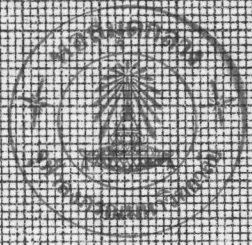
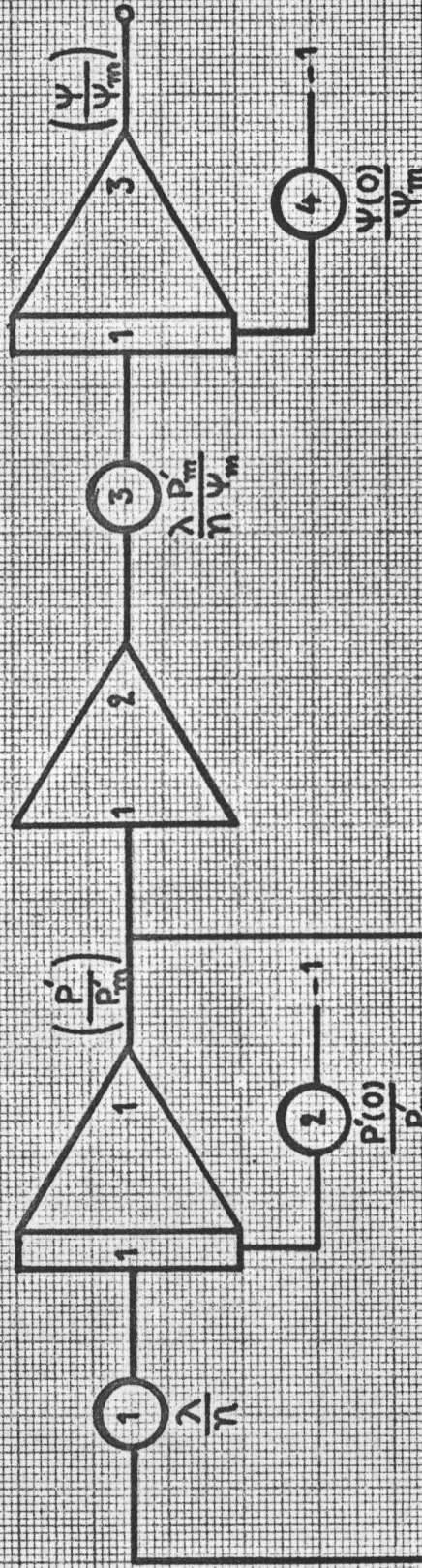
$$P'(0) = 0.004, 0.02 \text{ และ } 0.04 \text{ ตามลำดับ}$$

สมการที่ (๑๓) และ (๑๔) นำมาเขียนเป็นรูปแบบคอมพิวเตอร์จะได้ดังรูปที่ ๓๕ และค่า

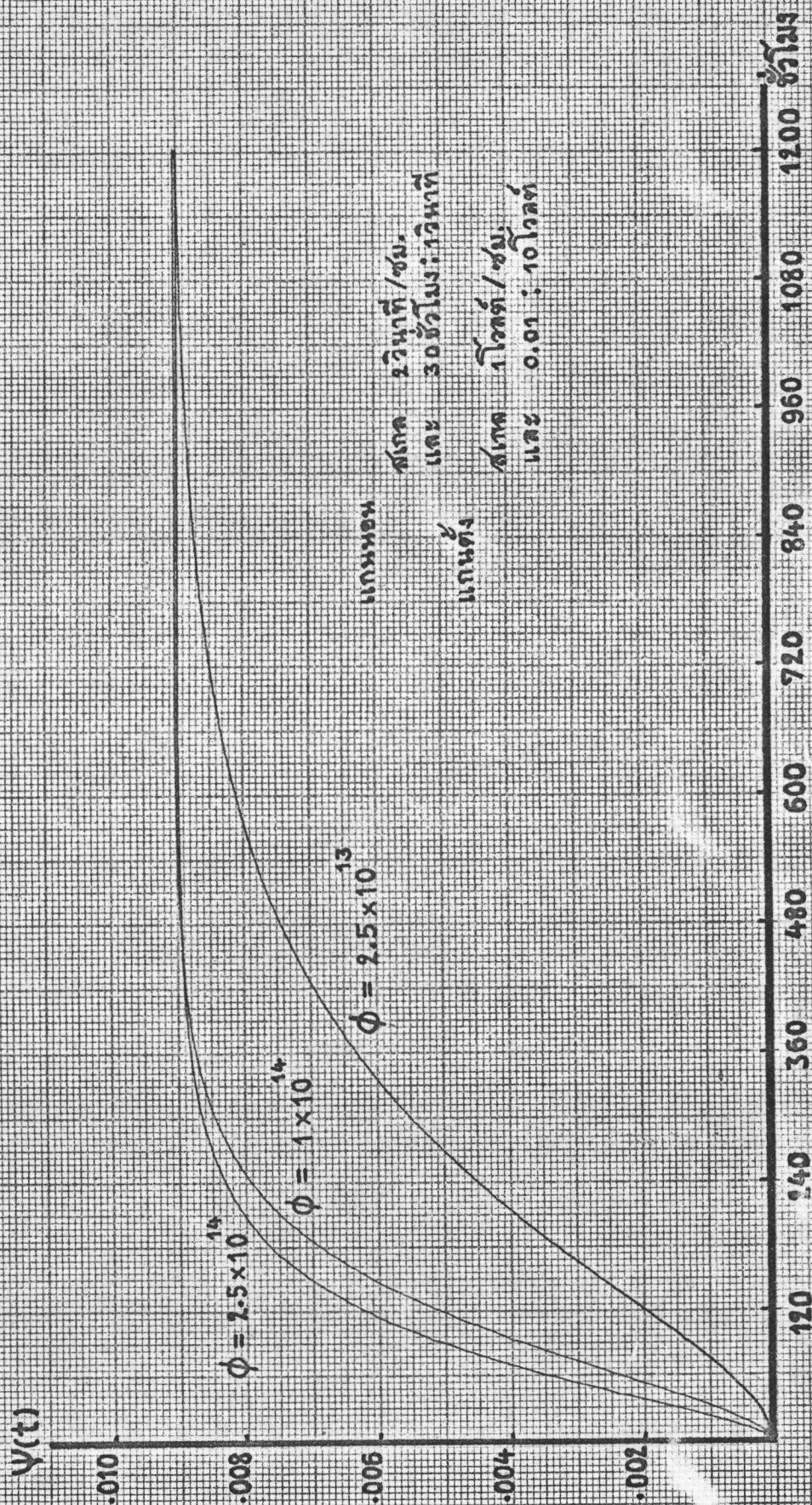
โพเทนชิโอเมเตอร์ที่ใช้เป็น

ตารางที่ ๕

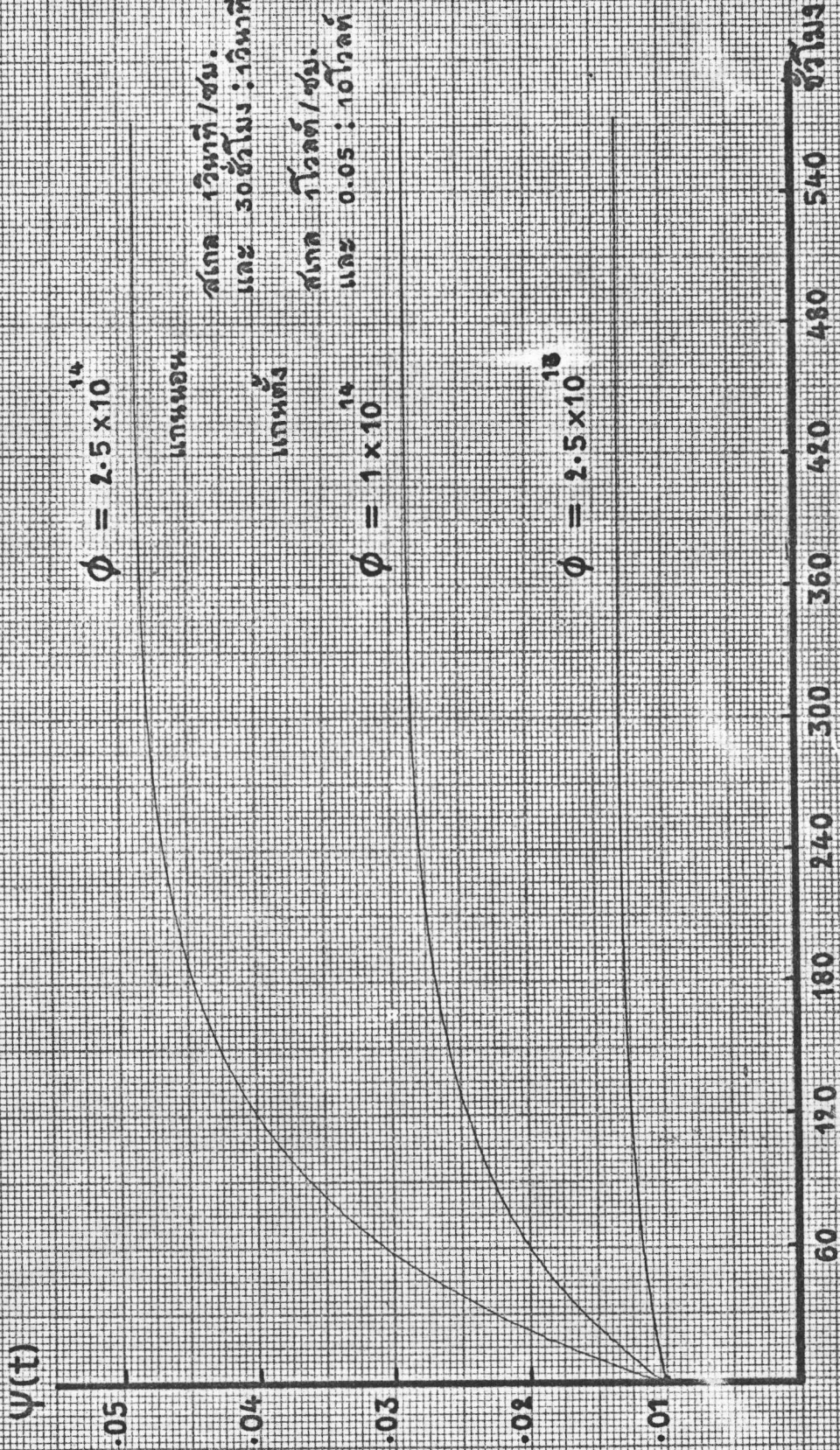
โพเทนชิโอเมเตอร์	$\phi = 2.5 \times 10^{13}$	$\phi = 1.0 \times 10^{14}$	$\phi = 2.5 \times 10^{14}$
1	0.392	0.392	0.392
2	0.100	0.500	1
3	0.314	0.314	0.314
4	0.200	0.200	0.200



รูปที่ 35 รูปแบบตัวเวกเตอร์ของซามารีมพอยชันนิงภายใต้การปฏิบัติการ



รูปที่ 36 ซ้ำมาเรียงพอยชันระหว่างการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 37 สามารถเปรียบเทียบชั้นในภายหลังการดับเครื่องปฏิกรณ์

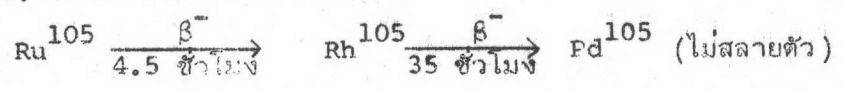
สรุป

จากรูปที่ ๓๖ จะเห็นว่าค่าของ $\Psi(t)$ ที่สภาพคงที่ในระหว่างการเดินเครื่องนั้น ไม่ขึ้นกับฟลักซ์ของนิวตรอน แต่ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนกระทั่ง $\Psi(t)$ มีค่าคงที่ นั้นที่ฟลักซ์ต่าง ๆ มีค่าต่างกัน ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$ จะต้องใช้เวลาประมาณ 1200 ชั่วโมง ส่วนที่ $\phi = 1.0 \times 10^{14}$ และ 2.5×10^{14} จะใช้เวลาประมาณ 540 ชั่วโมง $\Psi(t)$ ที่สภาพคงที่มีค่าประมาณ 0.009

จากรูปที่ ๓๗ จะเห็นว่าค่าของ $\Psi(t)$ จะไม่พุ่งไปสู่ค่าสูงสุดเหมือนกันค่า $\theta(t)$ ของซินอน แต่ค่าของ $\Psi(t)$ ของซามาเรียมจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงสภาพคงที่ ค่าของ $\Psi(t)$ ที่สภาพคงที่ภายหลังจากการดับเครื่องปฏิกรณ์ ที่ $\phi = 2.5 \times 10^{13}$ มีค่าประมาณ 0.013 ที่ $\phi = 1.0 \times 10^{14}$ มีค่าประมาณ 0.029 และที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$ มีค่าประมาณ 0.049 จะเห็นว่าที่ $\phi = 2.5 \times 10^{14}$ การมีซามาเรียมภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นทำให้ต้องเพิ่มรีแอกทีวิตี ประมาณ 0.05 ดังนั้นซามาเรียมพอยซันนิ่ง จึงเป็นปัญหาเล็กน้อยเมื่อเทียบกับซินอนพอยซันนิ่ง

๓.๒ การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การทดลองนี้เป็นตัวอย่างอันหนึ่ง ในการศึกษาเกี่ยวกับการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่สามารถแก้ปัญหาโดยใช้แอนาไลเซอร์คอมพิวเตอร์



สมการที่ใช้อธิบายถึงการเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีคือ

$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$ (1)

$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ (2)

$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$ (3)

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	หน่วย
t	เวลา	วินาที
N ₁	จำนวนอะตอมของ Ru ¹⁰⁵	อะตอม
N ₂	จำนวนอะตอมของ Rh ¹⁰⁵	อะตอม
N ₃	จำนวนอะตอมของ Pd ¹⁰⁵	อะตอม
λ ₁	ค่าคงที่ในการสลายตัวของ Ru ¹⁰⁵	(วินาที) ^{-๑}
λ ₂	ค่าคงที่ในการสลายตัวของ Rh ¹⁰⁵	(วินาที) ^{-๑}
τ	เวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์	วินาที
n	ไมโครสเกสแฟคเตอร์	-

$$\lambda_1 = 4.28 \times 10^{-5} \quad (\text{วินาที})^{-1}$$

$$\lambda_2 = 5.50 \times 10^{-6} \quad (\text{วินาที})^{-1}$$

แทนค่า λ_1 และ λ_2 ลงในสมการที่ (๑) , (๒) และ (๓)

$$\frac{dN_1}{dt} = -4.28 \times 10^{-5} N_1 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 4.38 \times 10^{-5} N_1 - 5.50 \times 10^{-6} N_2 \quad (5)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = 5.50 \times 10^{-6} N_2 \quad (6)$$

ไทม์สเกล

$$\text{ให้ } \tau = nt$$

$$\text{เลือก } n = 1/18000$$

(๑ วินาทีของคอมพิวเตอร์ = เวลาจริง ๔ ชั่วโมง)

$$\frac{dN_1}{d\tau} = -0.770 N_1 \quad (7)$$

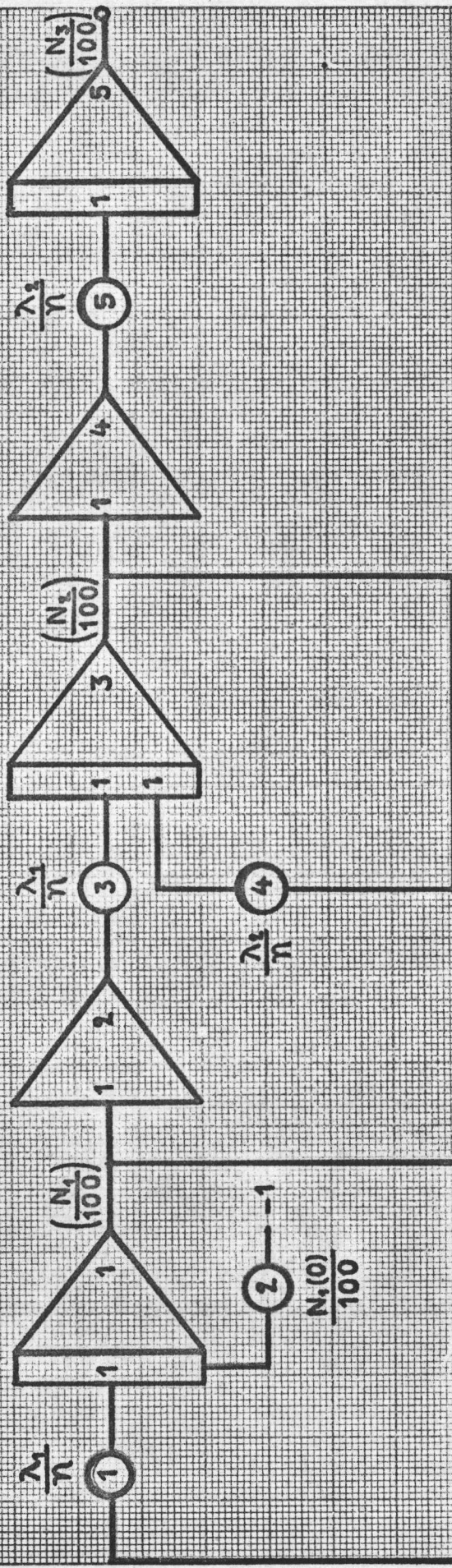
$$\frac{dN_2}{d\tau} = 0.770 N_1 - 0.099 N_2 \quad (8)$$

$$\frac{dN_3}{d\tau} = 0.099 N_2 \quad (9)$$

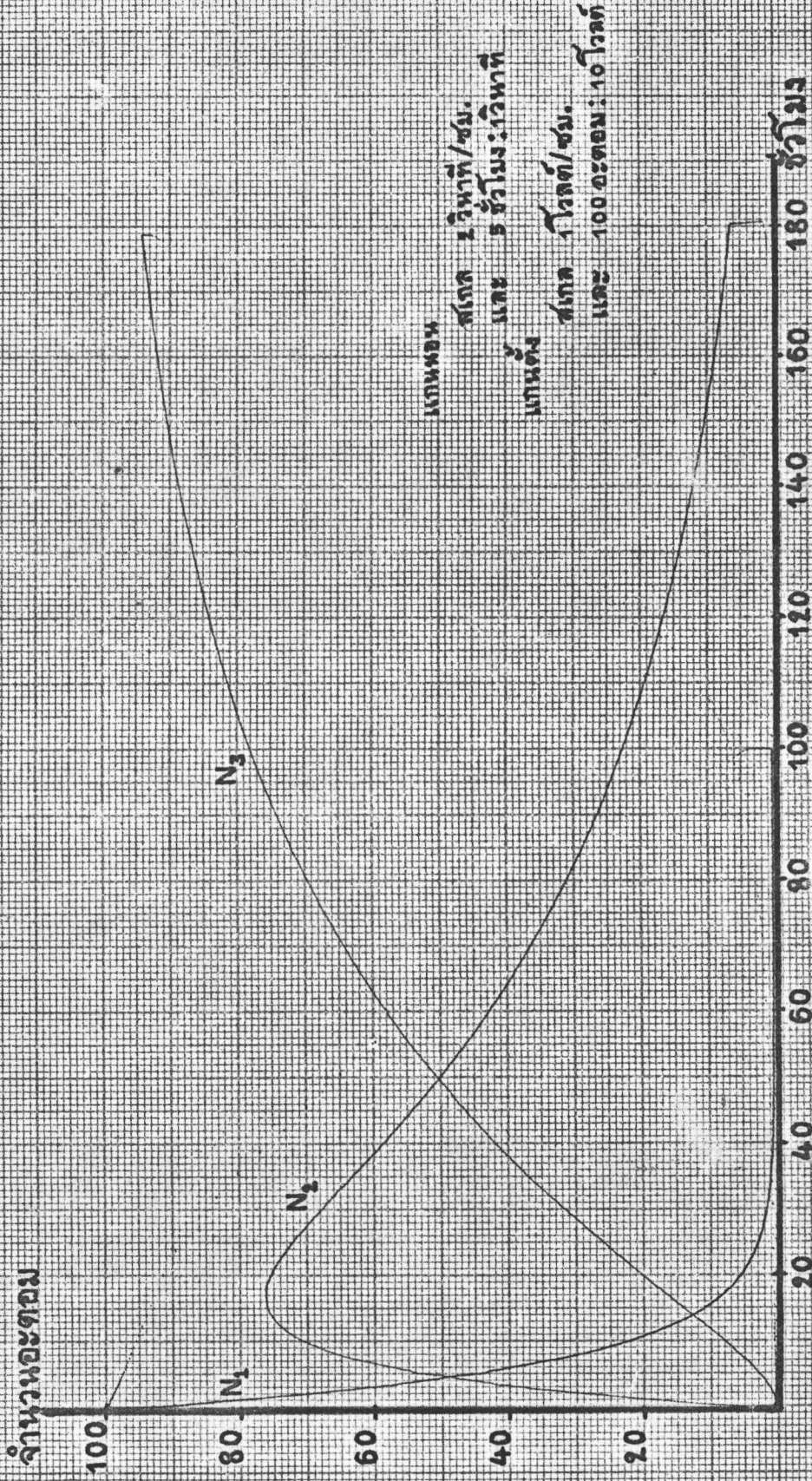
แอมบลิจูดสเกล

$$\text{ให้ } N_{1m} = N_{2m} = N_{3m} = 100$$

$$\int \dot{N}_1 d\tau = \left(\frac{N_1}{100}\right) = - \int \left[0.770 \left(\frac{N_1}{100}\right)\right] d\tau \quad (10)$$



รูปที่ 38 รูปแบบคอมพิวเตอร์ของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี



แกนพหุน
 สเกล 1 วิชาที่/ชม.
 แกน 5 ชั่วโมง: วิชาที่
 แกนต้น
 สเกล 1 วิชาที่/ชม.
 แกน 100 อะตอม: 10 วิชาที่

รูปที่ 39 การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

$$\int \dot{N}_2 dt = \left(\frac{N_2}{100}\right) = - \int \left[0.099 \left(\frac{N_2}{100}\right) - 0.770 \left(\frac{N_1}{100}\right) \right] dt \quad (11)$$

$$\int \dot{N}_3 dt = \left(\frac{N_3}{100}\right) = - \int \left[-0.099 \left(\frac{N_2}{100}\right) \right] dt \quad (12)$$

จากสมการที่ (๑๐) , (๑๑) และ (๑๒) นำมาเขียนรูปแบบคอมพิวเตอรฺจะได้ดังรูปที่ ๓๔

ตารางที่ ๖

โพเทนชิโอมิเตอรฺ	ค่าที่ได้
1	0.770
2	1.000
3	0.770
4.	0.099
5	0.099

รูปที่ ๓๔ เป็นผลลัพ์ที่ได้จากการแก้ปัญหโดยแอนาลอกคอมพิวเตอรฺ ตามแผนภาพคอมพิวเตอรฺรูปที่๓๔

๓.๓ การก่อกัมมันต์ (Activation)

(4)

การทดลองนี้เป็นตัวอย่างอันหนึ่ง ในการศึกษาเกี่ยวกับการก่อกัมมันต์ ที่สามารถแก้ได้หาโดยใช้แอนาล็อกคอมพิวเตอร์

นำแผ่นโลหะ In^{115} หนัก 0.050 กรัมไปอบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ ในที่ซึ่งมีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ 5×10^{12} นิวตรอนต่อ cm^2 ต่อวินาที เป็นเวลา ๑ ชั่วโมง. ภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกิริยา (n, γ) ของ In^{115} มีค่าเท่ากับ $= 190$ บาร์น (๑ บาร์น = 10^{-24} cm^2) In^{116} มีครึ่งชีวิต $T_{1/2} = 54$ นาที ภาคตัดขวางในการจับเทอร์มัลนิวตรอนของ In^{116} มีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ ต้องการหาค่ากัมมันตภาพ (Activity) ของแผ่นอินเดียมในหน่วยครั้งต่อวินาที (dps) หลังจากนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง

ให้ $X =$ จำนวนอะตอมของ In^{115} ในแผ่นโลหะ

$Y =$ จำนวนอะตอมของ In^{116} ในแผ่นโลหะ

จำนวนอะตอมของ In^{115} ในแผ่นโลหะแรกเริ่ม $= X_0$

$$X_0 = \frac{wN_a}{W}$$

$$w = \text{น้ำหนักของแผ่นโลหะ } \text{In}^{115} = 0.050 \text{ กรัม}$$

$$N_a = \text{อาโวกาโดรน์เบอร์} = 6.02 \times 10^{23} \text{ อะตอม/กรัมอะตอม}$$

$$W = \text{น้ำหนักอะตอมของ } \text{In}^{115} = 115 \text{ กรัม/กรัมอะตอม}$$

$$X_0 = \frac{0.050 \times 6.02 \times 10^{23}}{115} = 2.617 \times 10^{20} \text{ อะตอม}$$

$$\frac{dX}{dt} = -X\sigma_x\phi \quad (1)$$

$$\text{ดังนั้น } \left. \frac{dX}{dt} \right|_0 = -X_0\sigma_x\phi \quad (2)$$

$$= 2.617 \times 10^{20} \times 190 \times 10^{-24} \times 5 \times 10^{12}$$

$$= 2.486 \times 10^{11} \text{ อะตอม/วินาที}$$

(4)

Harry D. Husky and Granino A. Korn, Computer Handbook,

(New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1962)

ที่อัตรานี้การลดลงของ X เนื่องจากการอาบรังสีภายในเวลา ๑ ชั่วโมง ไม่มีความสำคัญนักเมื่อเทียบกับจำนวนอะตอมของ X ที่มีอยู่เริ่มต้น ดังนั้น $X\sigma_x\phi \approx X_0\sigma_x\phi = 2.486 \times 10^{11}$ อะตอม/วินาที

$$\frac{dY}{dt} = X\sigma_x\phi - Y\sigma_y\phi - \lambda Y \quad (3)$$

แต่เนื่องจาก $\alpha_y \approx 0$ และ $X\sigma_x \approx 2.496 \times 10^{11}$ อะตอม/วินาที

$$\frac{dY}{dt} \approx 2.486 \times 10^{11} - \frac{0.693}{54 \times 60} Y \quad (4)$$

ไมล์สเกล

$$\text{ให้ } \tau = nt$$

$$\text{เลือก } n = 1/360$$

(๑ วินาทีของคอมพิวเตอร์ = เวลาจริง ๒ นาที)

$$\frac{dY}{d\tau} = 8.950 \times 10^{13} - 0.077Y \quad (5)$$

$$0 \leq \tau \leq 10 \quad Y = 0 \text{ ที่ } \tau = 0$$

แอมพลิจูดสเกล

$$Y_m = \frac{8.950 \times 10^{13}}{0.077} = 1.162 \times 10^{15} \text{ อะตอม}$$

จากสมการที่ (๕)

$$\int \frac{dY}{Y} = \left(\frac{Y}{1.162 \times 10^{15}} \right) = - \int \left[0.077 \left(\frac{Y}{1.162 \times 10^{15}} \right) - 0.077 \right] d\tau \quad (6)$$

กัมมันตภาพของ In^{116} คือ

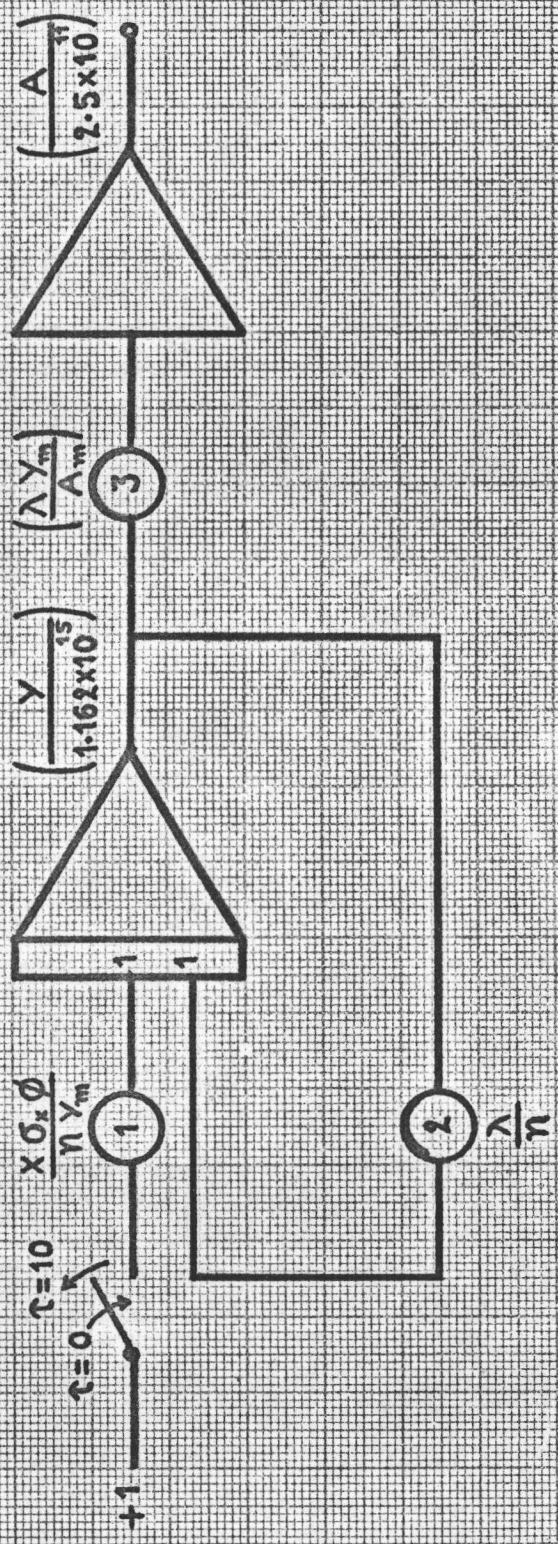
$$A = \lambda Y = 2.139 \times 10^{-4} Y \quad (7)$$

$$A_m = 2.139 \times 10^{-4} \times 1.162 \times 10^{15} = 2.486 \times 10^{11} \text{ ครั้งต่อวินาที}$$

ในที่นี้จะใช้ $A_m = 2.5 \times 10^{11}$ ครั้งต่อวินาที

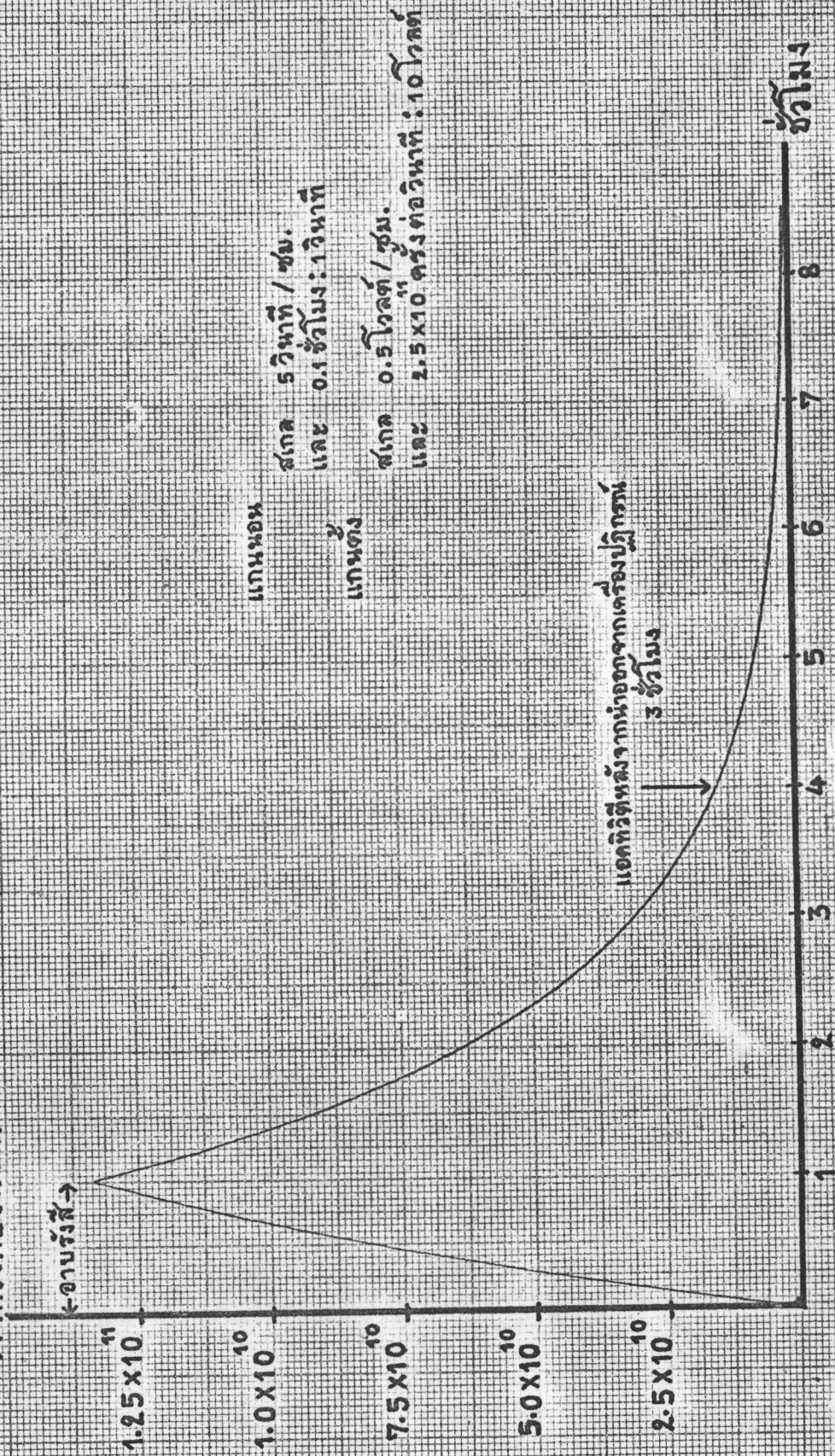
จากสมการที่ (๗)

$$\left(\frac{A}{2.5 \times 10^{11}} \right) = 0.994 \left(\frac{Y}{1.162 \times 10^{15}} \right) \quad (8)$$



รูปที่ 10 รูปแบบคอมพิวเตอร์ของภาวการณ์

A (ครึ่งต่อวินาที)



แกนออก

สเกล 5 วินาที / ซม.
 และ 0.1 ชั่วโมง : 1 วินาที

แกนตั้ง

สเกล 0.5 โวลต์ / ซม.
 และ 2.5 x 10¹⁰ ครึ่งต่อวินาที : 10 โวลต์

แยกวิธีหาค่านอกจากเครื่องปฏิกรณ์
 3 ชั่วโมง

รูปที่ 41 การกักกัมมันต์ (ACTIVATION)

จากสมการที่ (๖) และ (๘) นำไปเขียนเป็นรูปแบบคอมพิวเตอร์จะได้ดังรูปที่ ๔๐

ตารางที่ ๗

โพเทนชิโอมิเตอร์	ค่าที่ตั้งไว้
1	0.077
2	0.077
3	0.994

รูปที่ ๔๑ เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยแอนาล็อกคอมพิวเตอร์ตามแผนภาพ

รูปที่ ๔๐ ก็มึนตภาพของ In^{116} ภายหลังจากนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา ๓ ชั่วโมง
มีค่าประมาณ 1.4×10^{10} ครั้งต่อวินาที

๓.๔ การแอดเทนนูเอตของรังสีแกมมา (gamma attenuation)

(5)

การทดลองนี้เป็นตัวอย่างอันหนึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับการแอดเทนนูเอตของรังสีแกมมาที่สามารถแก้ปัญหาโดยใช้แอนาลอกคอมพิวเตอร์

จะศึกษาว่ารังสีแกมมาแบบลำแสงทิศทางเดียว (monodirection beam) ที่มีพลังงานเดียว (monoenergetic) 1 Mev. เมื่อผ่านน้ำซึ่งหนา ๓๕ ซม. แล้วผ่านตะกั่วหนา ๓ ซม. จะมีฟลักซ์เทียบเป็นร้อยละเท่าไรกับฟลักซ์แรกเริ่ม

ลัมประสิทธิ์แบบแมสแอบซอพชั่น (ลัมประสิทธิ์แบบลิเนียร์แอบซอพชั่นหารด้วยความหนาแน่น) สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1 Mev. สำหรับตะกั่วมีค่าประมาณ 0.068 ต่อเซนติเมตร และสำหรับน้ำมีค่าเป็น 0.067 ต่อเซนติเมตร ตะกั่วมีความหนาแน่น ๑๑.๓ กรัม/ซม.^๓ น้ำมีความหนาแน่น ๑ กรัม/ซม.^๓

$$\frac{d\phi}{dx} = - \left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho\phi \tag{1}$$

ϕ คือ ฟลักซ์ที่รอดพ้นจากการชน (uncollided flux) สำหรับน้ำซึ่งหนา ๓๕ ซม.

$$\frac{d\phi}{dx} = - 0.067 \phi \tag{2}$$

$$0 < X < 35 \text{ ซม. ; } \phi = \phi_0 \text{ ที่ } X = 0$$

สำหรับตะกั่วซึ่งหนา ๓ ซม.

$$\frac{d\phi}{dx} = - 0.068 (11.3) \phi$$

$$\frac{d\phi}{dx} = - 0.768 \phi \tag{3}$$

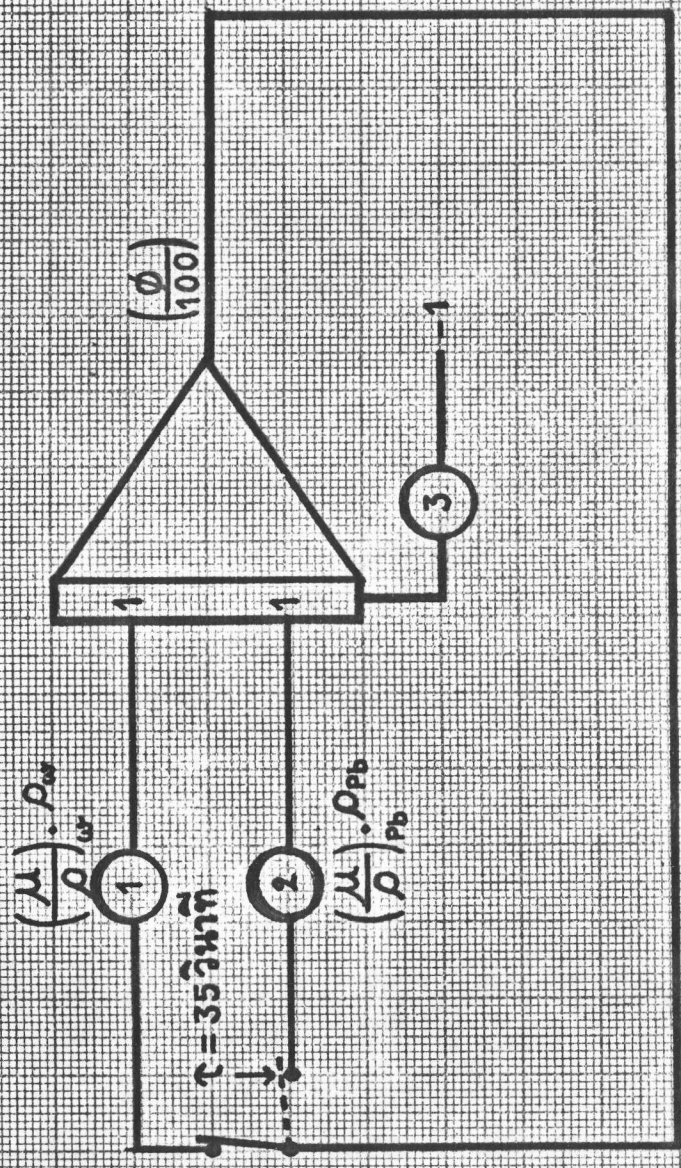
$$35 < X < 38$$

สมการที่ (๒) และ (๓) นั้นไม่ต้องทำไทม์สเกล เพียงแต่เปลี่ยนตัวแปร X มาเป็น τ สมการที่ (๒) และ (๓) จะเป็น

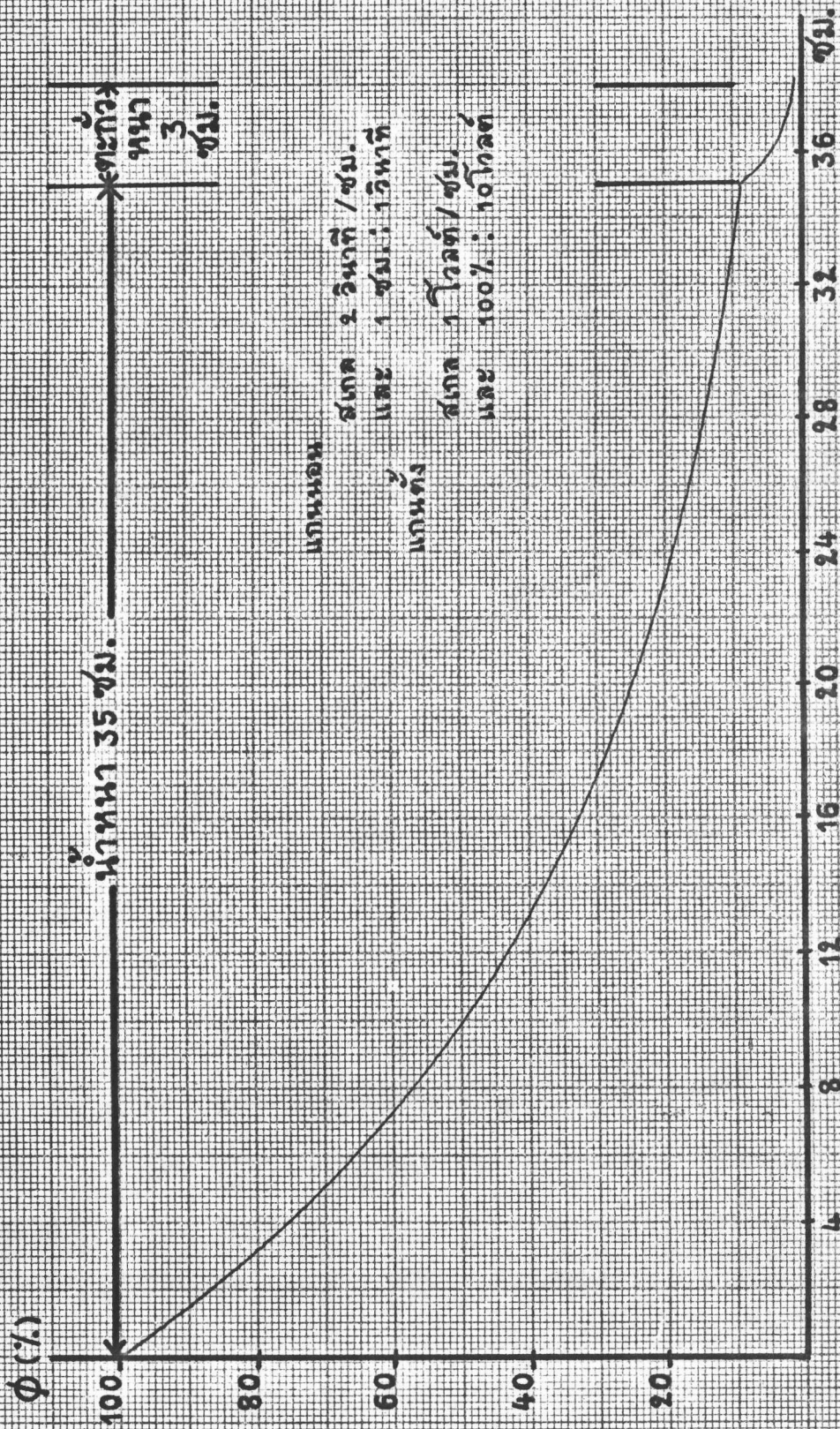
$$\frac{d\phi}{d\tau} = - 0.067 \phi \tag{4}$$

(5)

Harry D.Husky and Granino A.Korn, Computer Handbook, (New York : Mc Graw-Hill Book Co., 1962)



รูปที่ 42 รูปแบบขอมพิวเทรร์ของการเวตแทนหุญเอทของร้ดีแกมม่ว



รูปที่ 43 การแสดงหน้าหนาของรังสีแกมมา

Copyright © 1950 by McGraw-Hill Book Co.

$$0 \leq \tau \leq 35 \text{ วินาที} \quad \text{ที่ } \tau = 0 \quad \phi_0 = 100$$

$$\frac{d\phi}{d\tau} = -0.768\phi \quad (5)$$

$$35 \leq \tau \leq 38 \text{ วินาที}$$

จากสมการที่ (๖) และ (๗) นำไปเขียนรูปแบบคอมพิวเตอรืจะได้ดังรูปที่ ๔๒

ตารางที่ ๔

โพเทนชิโอมิเตอร์	ค่าที่ตั้งไว้
1	0.067
2	0.768
3	1.00

รูปที่ ๔๓ เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดยแอนาลอกคอมพิวเตอรืตามแผนภาพ

รูปที่ ๔๒ ฟลักซ์ที่ผ่านตะกั่วมาแล้วมีค่าประมาณร้อยละ ๑ ของฟลักซ์แรกเริ่ม

๓.๕ สมการคิเนติก (Kinetic Equations) (6)

สมการคิเนติกที่ใช้ศึกษานี้ เป็นสมการที่ใช้กับ เครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีตัวสะท้อน (bare reactor) และถือว่าการเกิดขึ้น, การฟุ้งกระจาย (diffusion) และการถูกจับของนิวตรอน นั้นเกิดขึ้นที่พลังงานเดียว (one group model) ดังนั้นจะไม่คิดถึงระยะเวลาที่ทำให้นิวตรอน ที่เกิดจากฟิชชันนั้นช้าลง (slowing down time) การรั่วไหล (leakage) และการถูกจับ ของนิวตรอนที่รีโซแนนซ์ระหว่างที่นิวตรอนถูกทำให้ช้าลง การทำเช่นนี้ก็เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา ซึ่งผลลัพธ์ในตอนสุดท้ายนั้นก็จะได้ เช่นเดียวกับวิธีการที่ยุ่งยากกว่า

ในกรณีที่ไม่มีต้นกำเนิดนิวตรอนเริ่มแรก (primary source) อยู่ในระบบที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะวิกฤต (critical) ระบบนั้นจะไม่อยู่ในภาวะสม่ำเสมอและความหนาแน่น ของนิวตรอนก็จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา [ระบบที่อยู่ในสภาวะใต้วิกฤต (subcritical) สามารถ มีภาวะสม่ำเสมอได้ ถ้ามีต้นกำเนิดนิวตรอนเริ่มแรก] ดังนั้น สมการของการฟุ้งกระจายในรูป ทั่ว ๆ ไปจะเป็น

$$\frac{dn}{dt} = S - \Sigma_a \phi + D \nabla^2 \phi \quad (1)$$

อัตราความหนาแน่น = อัตราการเกิดของ - อัตราการถูกจับ - อัตราการรั่วไหล
ของนิวตรอน นิวตรอน ของนิวตรอน ของนิวตรอน

ในสมการนี้ถือว่าเทอมต่าง ๆ นั้น อ้างอิงถึงนิวตรอนที่มีพลังงานเดียว. D เป็น สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจายของนิวตรอน. เทอมต้นกำเนิด S มีค่าเท่ากับ $k_{\infty} \Sigma_a \phi$ โดยที่ k_{∞} คืออินฟินิตีมัลติพลีเคชันแฟกเตอร์ (infinite multiplication factor) เนื่องจากปริมาณต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องชี้ให้เห็นถึงความแตกต่าง ระหว่างการมีส่วนสนับสนุนของพรอมต์นิวตรอน (prompt neutrons) และดีเลย์นิวตรอน (delayed neutrons) ที่เกิดขึ้นจากฟิชชัน

(6)

Samuel Glasstone and Alexander Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, (New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1967)

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= k_{\infty} \Sigma_a \phi (1-\beta) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i - \Sigma_a \phi - L^2 \Sigma_a B^2 \phi \\ \frac{dn}{dt} &= k_{\infty} \Sigma_a \phi \left[(1-\beta) - \frac{1+L^2 B^2}{k_{\infty}} \right] + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dn}{dt} &= k_{\infty} \Sigma_a v \left[(1-\beta) - \frac{1+L^2 B^2}{k_{\infty}} \right] n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (5)$$

ในกรณีที่ถือว่านิวตรอนมีพลังงานเดียว

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} / (1+L^2 B^2)$$

เมื่อแทนลงในสมการที่ (๕) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= k_{\infty} \Sigma_a v \left[(1-\beta) - \frac{1}{k_{\text{eff}}} \right] n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dn}{dt} &= k_{\infty} \Sigma_a v \left[1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}} - \beta \right] n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (6)$$

จาก $l = \lambda_a / v = 1 / v \Sigma_a$ ดังนั้น

$$\frac{l}{k_{\infty} \Sigma_a v} = \frac{1}{k_{\infty}} = l^* \quad (7)$$

l คือ ช่วงชีวิตของนิวตรอน (neutron lifetime) ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเป็นอนันต์ ส่วน l^* คือ ช่วงชีวิตของนิวตรอน (neutron generation time) ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดจำกัด และเนื่องจาก

$$\delta k = \frac{k_{\text{eff}}^{-1}}{k_{\text{eff}}} = 1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}} \quad (8)$$

แทนสมการที่ (๗) และ (๘) ลงในสมการที่ (๖)

ให้ β แทนส่วนของดีเลย์นิวตรอนที่เกิดจากพิษขึ้นแล้ว $(1 - \beta)$ ก็จะเป็นส่วนของพรอมทีนิวตรอน ดังนั้นอัตราการเกิดของพรอมทีนิวตรอนคือ $k_\infty \Sigma_a \phi (1 - \beta)$ ในขณะที่ดีเลย์นิวตรอนมี ๖ กลุ่ม ซึ่งอัตราของการเกิดในแต่ละกลุ่มซึ่ง แทนด้วยสัญลักษณ์ i นั้น จะเท่ากับอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อน (precursor) ซึ่งจะเท่ากับ $\lambda_i C_i$ นิวตรอน/ชม.^๓-วินาที โดยที่ C_i เป็นความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อนที่เวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นนิวเคลียส/ชม.^๓ และ λ_i เป็นค่าคงที่ในการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีมีหน่วยเป็น (วินาที)^{-๑} ดังนั้นสำหรับดีเลย์นิวตรอน ๖ กลุ่ม

$$\text{อัตราการเกิดของดีเลย์นิวตรอนทั้งหมด} = \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad \frac{\text{นิวตรอน}}{\text{ชม.}^3 \cdot \text{วินาที}} \quad (2)$$

ในตอนนี้จะได้ว่า

$$S = k_\infty \Sigma_a \phi (1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (3)$$

แทนสมการที่ (๓) ลงในสมการที่ (๑)

$$\frac{dn}{dt} = k_\infty \Sigma_a \phi (1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i - \Sigma_a \phi + D \nabla^2 \phi \quad (4)$$

ϕ , n และ C_i เป็นฟังก์ชันของเวลาและตำแหน่งในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดจำกัด แต่ตัวแปรเหล่านี้สามารถแยกให้อยู่ในฟังก์ชันของเวลาหรือฟังก์ชันของตำแหน่งได้ สำหรับระบบที่มีสถานะไม่ต่างจากสถานะวิกฤตมากนัก $\nabla^2 \phi$ สามารถแทนด้วย $-B^2 \phi$ B^2 คือ บัคคลิง (buckling) ของระบบ จาก $D/\Sigma_a = L^2$ จะได้ $D = L^2 \Sigma_a$ โดยที่ L เป็นความยาวในการฟุ้งกระจาย (diffusion length) และ $\phi = nV$

ดังนั้นสมการที่ (๔) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\delta k - \beta)n}{l^*} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i \quad (9)$$

ในการแก้ปัญหามสมการนี้ จำเป็นต้องแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น C_i ของดีเลย์นิวตรอนจากสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อนที่เป็นฟังก์ชันของเวลา อัตราการเกิดของดีเลย์นิวตรอนจากสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อนในกลุ่มที่ i จะมีค่าเท่ากับ $\beta_i k_{\infty} \Sigma_a \phi$ โดยที่ $k_{\infty} \Sigma_a \phi$ เป็นอัตราของการเกิดฟิชชันนิวตรอนทั้งหมด และ β_i เป็นส่วนของดีเลย์นิวตรอนกลุ่มที่ i ในเวลาเดียวกันสารกัมมันตรังสีเหล่านี้ก็สลายตัวด้วยอัตรา $\lambda_i c_i$ ดังนั้น อัตราของการเกิดดีเลย์นิวตรอนจากสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อนของกลุ่มที่ i จะเป็น

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta_i k_{\infty} \Sigma_a \phi - \lambda_i c_i$$

ในเมื่อ $\phi = nv$ และ $k_{\infty} v \Sigma_a = 1/l^*$ จะได้ว่า

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} n - \lambda_i c_i \quad (10)$$

สมการที่ (๙) และ (๑๐) เป็นสมการพื้นฐานในการศึกษาเกี่ยวกับสมการคิเนติกของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนสมการคิเนติกที่ใช้กับคิเนติกซีบูเลเตอร์นั้นเป็น

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\delta k - \beta)n}{l^*} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i - \{-s - \text{EXT.} - Q\} \quad (11)$$

$$\text{และ} \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} n - \lambda_i c_i \quad (12)$$

s ในสมการที่ (๑๑) เป็นเทอมของต้นกำเนิดนิวตรอนเริ่มแรก

Q เป็นเทอมของเฟอเทอเบชัน

EXT. เป็นเทอมของสิ่งที่ต้องการศึกษาซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของนิวตรอน

การใช้เครื่องยูนิเวอซลรีแอกเตอร์ซิมูเลเตอร์เพื่อศึกษาสมการคิเนติก

เครื่องยูนิเวอซลรีแอกเตอร์ซิมูเลเตอร์ เป็นแอนาลอกคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ศึกษาปัญหาพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ แอนาลอกคอมพิวเตอร์นี้ประกอบด้วยแอมป์ลิไฟเออร์ ๔๐ ชุด ในจำนวนนี้ ๑๖ ชุดทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์และอีก ๒๔ ชุด ทำหน้าที่เป็นอินเวอเตอร์ นอกจากนี้ยังมีโพเทนชิโอมิเตอร์อีก ๔๐ ชุด ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถใช้แก้ปัญหามสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน (simultaneous differential equation) ได้

นอกจากส่วนประกอบเหล่านี้แล้วยังมีวงจรถิเนติกซิมูเลเตอร์ (Kinetic Simulator) ซึ่งใช้ศึกษาเกี่ยวกับสมการคิเนติก (Kinetic Equations) ของเครื่องปฏิกรณ์ ขอสถูนิต (Source Unit) ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้กับคิเนติก ซิมูเลเตอร์ เพอเทอเบชันยูนิต (Perturbation Unit) สำหรับใช้ศึกษาเกี่ยวกับการรบกวน (perturbation) และนอกจากนี้ยังมีออสซิลเลเตอร์ และกัลวานอิมิเตอร์ ส่วนประกอบที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนี้รวมอยู่เป็นเครื่องเดียวกัน รูปที่ ๔๔

ก่อนที่จะใช้เครื่องยูนิเวอซลรีแอกเตอร์ซิมูเลเตอร์ศึกษาปัญหาต่าง ๆ นั้น ควรทำความเข้าใจวิธีใช้ส่วนประกอบต่าง ๆ เสียก่อน

เนื่องจากค่าของการคำนวณต่าง ๆ ที่ใช้นั้น ออกมาในรูปของหน่วยคอมพิวเตอร์ (C.U.) หรือ มาซินยูนิต (M.U.) ซึ่ง

$$+ 1 \text{ มาซินยูนิต} = + 10 \text{ โวลต์}$$

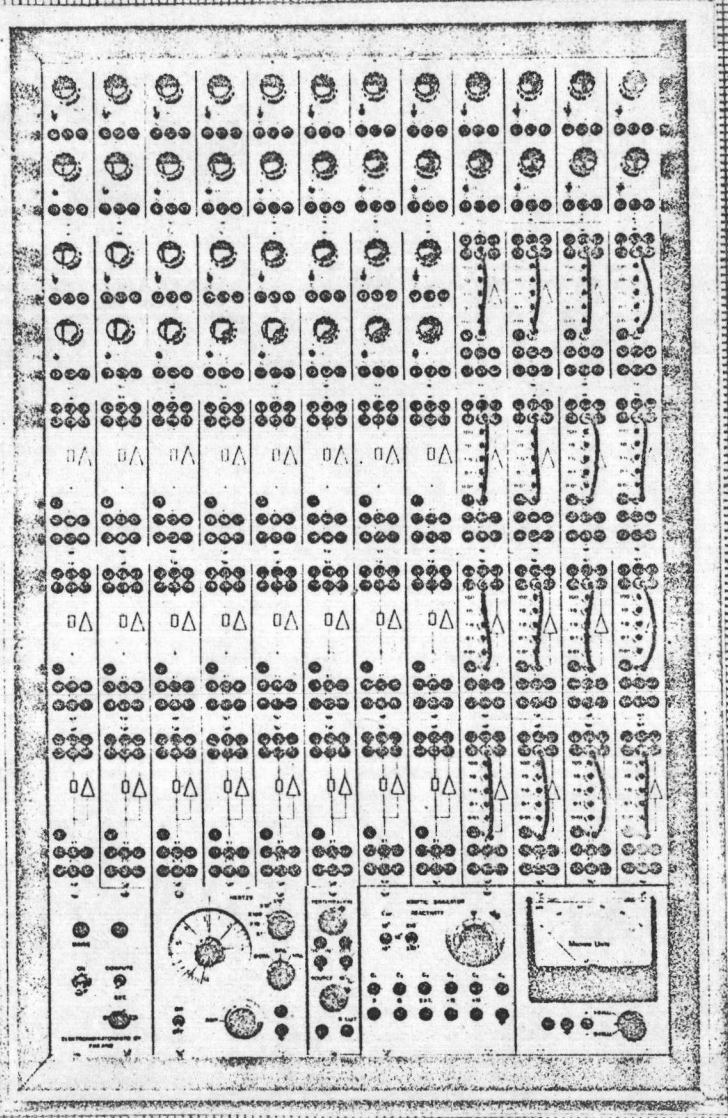
$$- 1 \text{ มาซินยูนิต} = - 10 \text{ โวลต์}$$

ช่องสำหรับเสียบ (socket) ที่ใช้บนแผงของเครื่องยูนิเวอซลรีแอกเตอร์ซิมูเลเตอร์

นั้นมีอยู่ ๔ สี่

สี่ดำ	หมายถึง	อินพุท
สีแดง	"	เอาพุท
สีเขียว	"	จุดต่อลงดิน
สีเหลือง	"	ไทม์คอนสแตนท์ (time constant)

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
10 X 25 CM. KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 44 เครื่องวิทยุหลอดสุญญากาศรีโมตคอนโทรล

วิธีใช้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์

แผงควบคุม

บนแผงควบคุมมีสวิตช์อยู่ ๒ อัน คือ สวิตช์ใหญ่ (Main Switch) ก่อนที่จะใช้เครื่องรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์ จะต้องเปิดสวิตช์ใหญ่ทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๑๐ นาที เพื่อเป็นการอุ่นเครื่อง เมื่อเปิดสวิตช์ใหญ่ ดวงไฟสีแดงเหนือสวิตช์ใหญ่ก็จะติด พร้อมกันนี้ ก็จะมีกำลังไฟจ่ายไปยังแอมป์ไฟเออทั้งหมดรวมทั้งคิเนติกซีมูเลเตอร์ โกลด์กับสวิตช์ใหญ่มีสวิตช์อีกอันหนึ่ง คือสวิตช์คำนวณ (Compute Switch) เมื่อเปิดสวิตช์คำนวณดวงไฟสีแดงเหนือสวิตช์คำนวณก็จะติด นอกจากนี้สวิตช์นี้ยังทำหน้าที่ป้อนไฟไปยังโพเทนชิโอมิเตอร์และกัลวานอิมิเตอร์อีกด้วย ถัดจากสวิตช์ ๒ อันนี้ลงมาจะมีปลั๊กอันหนึ่งใช้สำหรับต่อไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเอ็กซ์วาย (X - Y recorder) รูปที่ ๔๔

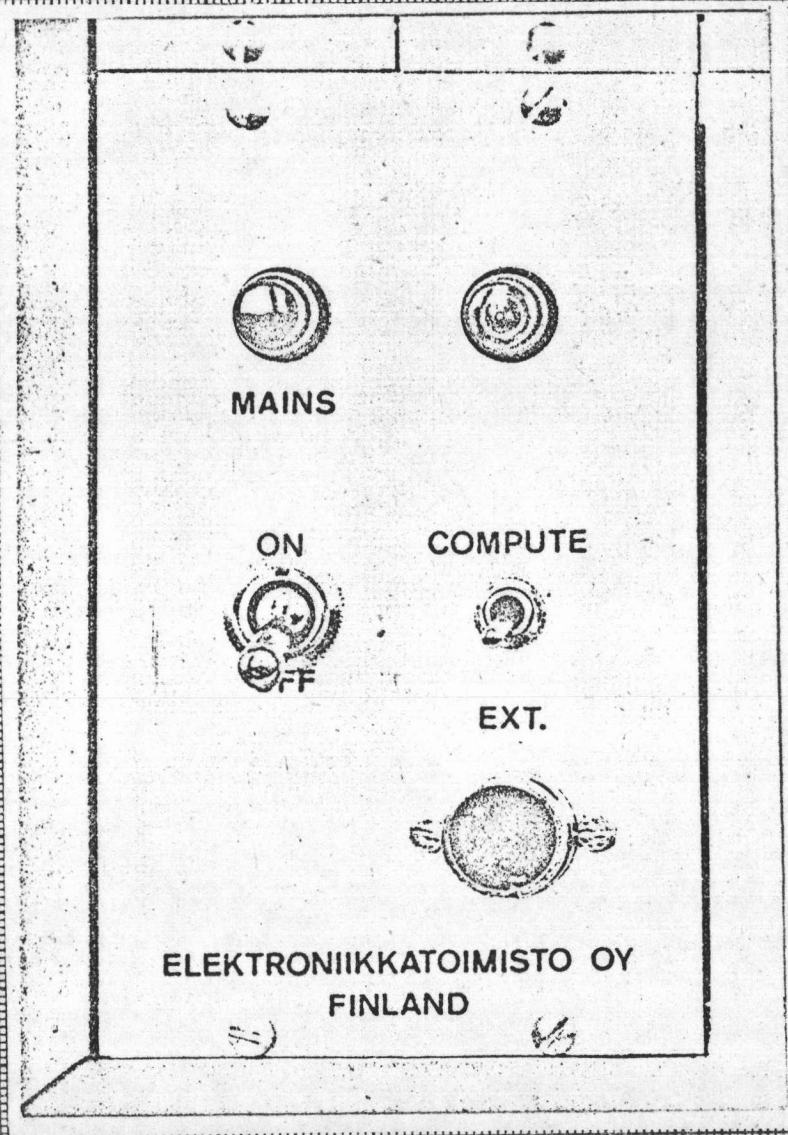
กัลวานอิมิเตอร์

บนแผงของกัลวานอิมิเตอร์มีกัลวานอิมิเตอร์ที่มีสเกล ๐ ถึง ๑.๐ ในหน่วยของมาซินยูนิต ด้านล่างของกัลวานอิมิเตอร์มีที่สำหรับเสียบ ๒ ช่อง คือ อินพุตและจุดต่อลงดิน ถัดมามีสวิตช์ ๑ อัน สวิตช์นี้ใช้เลือกวัดโวลเตจที่เป็นบวกหรือเป็นลบ ถัดมามีปุ่มอันหนึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่กำหนดว่าเต็มสเกลของกัลวานอิมิเตอร์นั้นต้องการให้มีค่าเป็น ๑ มาซินยูนิต หรือ ๐.๑ มาซินยูนิต แต่ถ้าต้องการให้เต็มสเกลอ่านได้ ๐.๑๑ ก็สามารถทำได้โดยการผ่านอินเวตเตอร์ที่คูณด้วย ๑๐ แล้วจึงเข้าอินพุตของกัลวานอิมิเตอร์ โดยใช้เต็มสเกลที่ ๐.๑ มาซินยูนิต ในการใช้กัลวานอิมิเตอร์ควรจะใช้เต็มสเกลเป็น ๑ มาซินยูนิต ก่อนในกรณีที่ไม่ทราบค่าโวลเตจนั้น รูปที่ ๔๖

โพเทนชิโอมิเตอร์

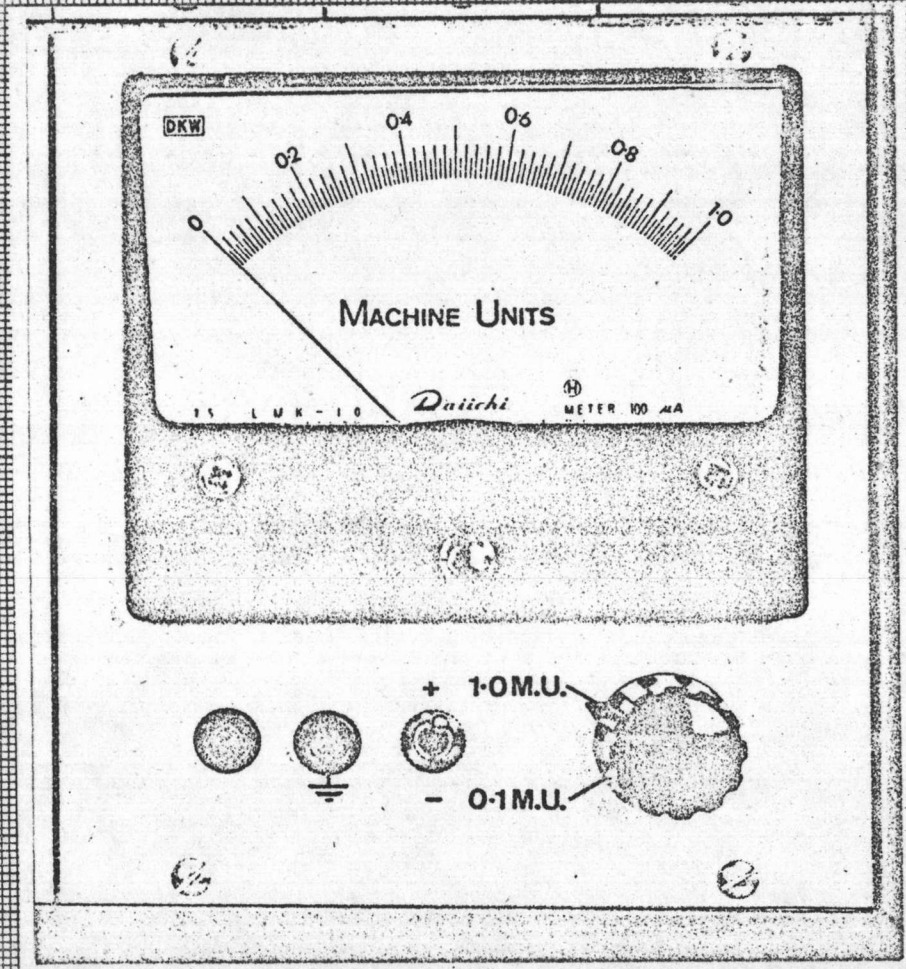
บนแผงของโพเทนชิโอมิเตอร์มีโพเทนชิโอมิเตอร์ ๒ อัน ปุ่มของโพเทนชิโอมิเตอร์แต่ละอันจะหมุนได้ถึง ๑๐ รอบ เมื่อหมุนจนเต็มที่จะมีค่าสูงสุด ๑ มาซินยูนิต ถัดจากปุ่มของโพเทนชิโอมิเตอร์จะมีสวิตช์อันหนึ่งใช้ในการเลือกว่าจะใช้เป็นค่าลบหรือบวกหรือใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในวงจร ถัดจากสวิตช์ลงมามีที่สำหรับเสียบอยู่ ๓ ช่อง คือ อินพุต เอาพุต และจุดต่อลงดิน

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
10 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



11745 HWSJQVQJ

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 46 กัลวานโอมมิเตอร์

ในการปรับค่าโพเทนชิโอมิเตอร์นั้น ทำได้โดยการต่อเอาพุทของโพเทนชิโอมิเตอร์เข้ากับอินพุทของกัลวานโอมิเตอร์ ต่อจุดต่อลงดินของโพเทนชิโอมิเตอร์เข้ากับจุดต่อลงดินของกัลวานโอมิเตอร์ เลือกสวิตช์ของกัลวานโอมิเตอร์ว่าจะใช้เต็มสเกลที่มีค่า ๑.๐ มาซินยูนิต หรือ ๐.๑ มาซินยูนิต แล้วเลือกสวิตช์ที่แสดงค่าเป็นบวกหรือลบให้สอดคล้องกับสวิตช์ของโพเทนชิโอมิเตอร์ + ๑ หรือ - ๑ จากนั้นจึงเปิดสวิตช์ค่านานแล้วทำการปรับปุ่ม โพเทนชิโอมิเตอร์ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ สวิตช์ + ๑ หรือ - ๑ ใช้กับโพเทนชิโอมิเตอร์ ในกรณีที่เป็นค่าคงที่อันหนึ่งในสมการที่มีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ แต่ในกรณีที่จะใช้โพเทนชิโอมิเตอร์เป็นสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในวงจรถูกัดสวิตช์ที่เป็น + ๑ หรือ - ๑ มาอยู่ที่ตำแหน่ง IN รูปที่ ๔๗

อินเวตเตอร์

บนแผงของอินเวตเตอร์แต่ละแผงจะประกอบด้วยที่สำหรับเสียบ ๑๓ ช่อง เป็นอินพุทชนิด X ๑ ๓ ช่อง และชนิด X ๑๐ อีก ๓ ช่อง เป็นเอาพุท ๖ ช่อง และจุดต่อลงดิน ๑ ช่อง รูปที่ ๔๘

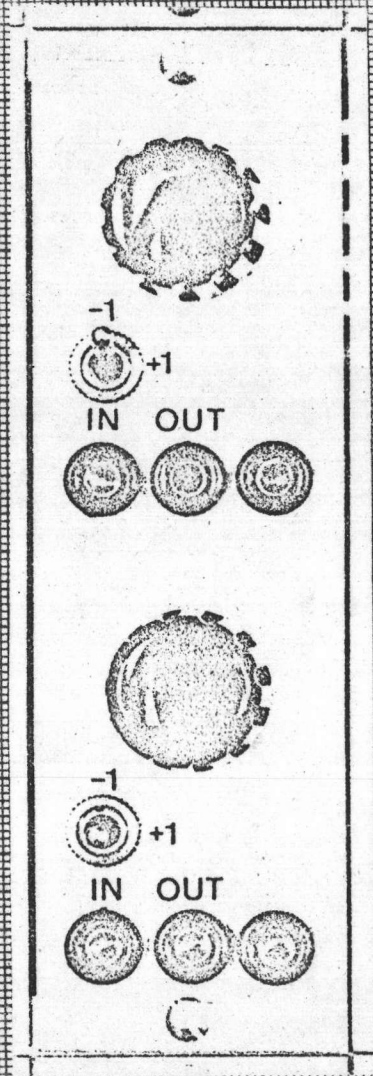
อินทิเกรเตอร์

บนแผงของอินทิเกรเตอร์มีช่องสำหรับเสียบอินพุทชนิด X ๑ อยู่ ๓ ช่อง และชนิด X ๑๐ อีก ๓ ช่อง มีเอาพุท ๖ ช่อง และจุดต่อลงดิน ๑ ช่อง ส่วนช่องสำหรับเสียบสี่เหลี่ยมมีอยู่ ๖ ช่อง แต่ละช่องมีเลขกำกับไว้คือ ๑๐๐, ๑๐, ๑.๐, ๐.๑ และ ๐.๐๑ ส่วนช่องล่างสุดไม่มีเลขกำกับ เลขที่กำกับนี้เป็นค่าของไทม์คอนสแตนท์ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของความต้านทานกับค่าของคาปาซิเตอร์ (ไทม์คอนสแตนท์ = $R \times C$)

$$e_o(t) = \frac{-1}{RC} \int e_i(t) dt$$

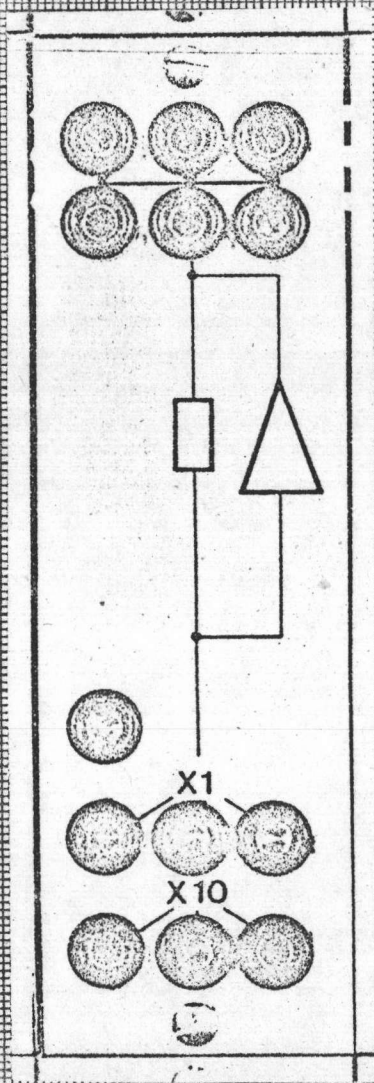
ในการเลือกใช้ค่าไทม์คอนสแตนท์ ทำได้โดยการเชื่อมต่อระหว่างช่องสำหรับเสียบสี่เหลี่ยมอันล่างสุดกับค่าไทม์คอนสแตนท์ที่ต้องการอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในรีแอกเตอร์ชิมูเลเตอร์นี้ไม่มีช่องสำหรับใส่สภาวะเริ่มต้น รูปที่ ๔๙

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
18 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



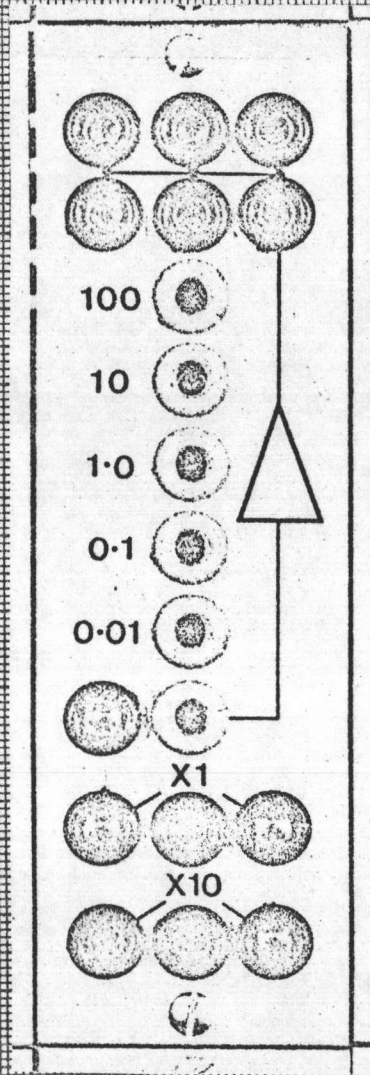
รูปที่ 47 ไมโครมิเตอร์

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
16 X 20 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 48 อินเวอร์เตอร์

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
16 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 49 อินทิเกรเตอร์

ออสซิลเลเตอร์

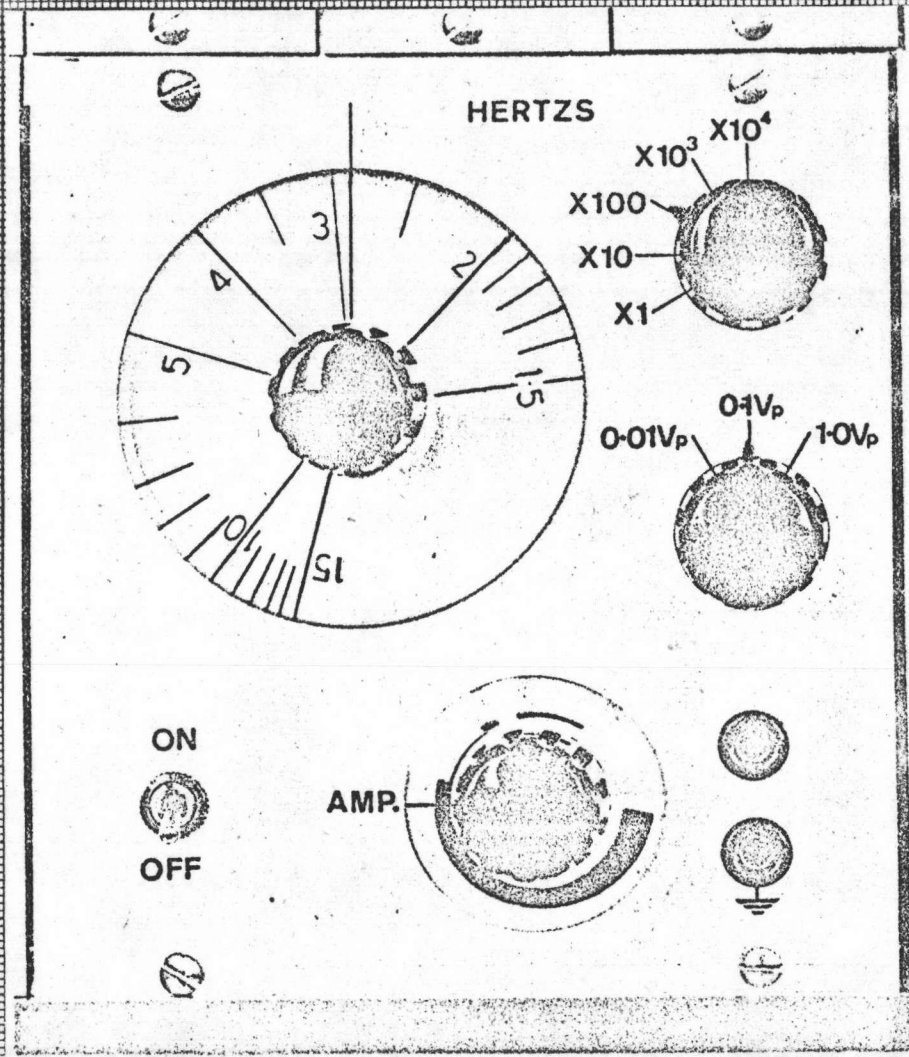
บนแผงของออสซิลเลเตอร์นี้มีสวิตช์เปิดเปิดอยู่ ๑ อัน และปุ่มอีก ๔ ปุ่ม ปุ่มแรก เป็นปุ่มที่ใช้หมุนปรับความถี่ซึ่งบนหน้าปัทม์จะมีค่าตั้งแต่ ๑.๕ เฮอตซ์ ถึง ๑๕ เฮอตซ์ ปุ่มที่สองเป็น สวิตช์ที่ใช้เลือกค่าของผลคูณของปุ่มแรกซึ่งมีค่าให้เลือก ๕ ค่าคือ $\times ๑$, $\times ๑๐$, $\times ๑๐๐$, $\times ๑๐^๓$ และ $\times ๑๐^๔$ ปุ่มที่สาม เป็นสวิตช์ที่ใช้เลือกค่าของแอมป์ลิจูดของเอาพุท ซึ่งมีอยู่ ๓ ค่า คือ $0.01V_p$, $0.1V_p$ และ $1.0V_p$ ซึ่งสอดคล้องกับ 0.01 โวลต์, 0.1 โวลต์ และ 1.0 โวลต์ ปุ่มที่สี่เป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ ซึ่งเป็นผลคูณของปุ่มที่สาม เมื่อหมุนปุ่มที่สี่จนมีค่าสูงสุดเท่ากับ ๑ ก็จะได้เอาพุทที่มีแอมป์ลิจูดตามที่ตั้งไว้ตามปุ่มที่สาม ข้าง ๆ ปุ่มที่สี่ มีช่องสำหรับเสียบเอาพุทและ จุดต่อลงดิน โดยการต่อเอาพุทไปยังเพอเทอเบชันยูนิตของออสซิลเลเตอร์ก็จะป้อนเพอเทอเบชันโวลเตจ ตามต้องการ ดูรูปที่ ๕๐

เพอเทอเบชันยูนิตและซอสยูนิต

สำหรับ เซอเทอเบชันยูนิตนั้น มีปุ่มอันหนึ่งเป็นโพเทนชิโอมิเตอร์หมุนได้ ๑๐ รอบ บนหน้าปัทม์ของปุ่มนี้จะมีค่าตั้งแต่ ๐.๐๐ ถึง ๑๐.๐๐ ถัดลงไปมีที่สำหรับเสียบอยู่ ๔ ช่อง ๒ ช่อง ล่างเป็นที่สำหรับเสียบจุดต่อลงดิน ส่วนที่เหลืออีก ๒ ช่อง เป็นที่สำหรับเสียบอินพุทจากออสซิลเลเตอร์และที่สำหรับเสียบเอาพุทเพื่อต่อไปยังคิเนติกซีมูลเลเตอร์ หรือระบบอื่น ๆ ที่ต้องการศึกษา การรบกวน

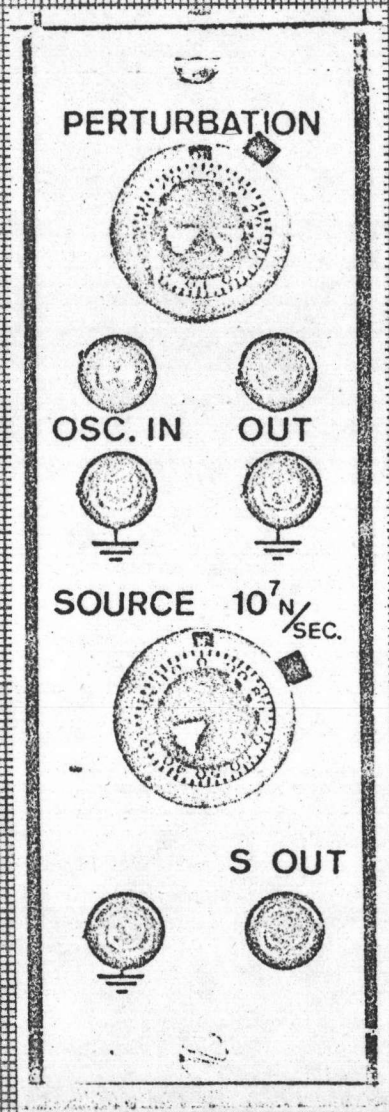
ซอสยูนิตก็มีปุ่มเป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ที่สามารถหมุนได้ ๑๐ รอบ หน้าปัทม์ของปุ่มนี้ สามารถปรับได้ตั้งแต่ค่า ๐.๐๐ ถึง ๑๐.๐๐ เมื่อปรับหน้าปัทม์ให้มีค่าเป็น ๑๐.๐๐ ก็จะมีค่าเทียบเท่ากับ $๑๐^{๓}$ นิวตรอน/วินาที และเมื่อปรับหน้าปัทม์ให้มีค่าเป็น ๐.๐๐ ก็จะมีค่าเทียบเท่ากับ $๑๐^๔$ นิวตรอน/วินาที

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
10 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 50 ขดลวดทดสอบ

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
16 X 25 CM.
MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 51 เพอเทอเบชันและซอสยูนิท

ค่าบนหน้าปัทม์	นิวตรอน/วินาที
10.00	10^7
9.00	9×10^6
8.00	8×10^6
7.00	7×10^6
6.00	6×10^6
5.00	5×10^6
4.00	4×10^6
3.00	3×10^6
2.00	2×10^6
1.00	10^6
0.00	10^4

ที่จำนวนนิวตรอน/วินาทีน้อยกว่า 10^5 นั้น สัญญาณรบกวนจะมีผลทำให้ความถูกต้องนั้นลดลง รูปที่ ๔๑

คิเนติกซิมูเลเตอร์

แผงคิเนติกซิมูเลเตอร์นี้เป็นแผงที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ศึกษาสมการคิเนติกของเครื่องปฏิกรณ์โดยเฉพาะ เหนือสวิตช์ขั้นแรกมีสัญลักษณ์ L sec. สวิตช์นี้แสดงถึงค่าของช่วงชีวิตเฉลี่ยของนิวตรอน (mean neutron lifetime) ซึ่งสามารถเลือกได้ ๓ ค่า คือ 10^{-3} , 10^{-4} และ 10^{-5} วินาที สวิตช์ขั้นที่สองใช้คู่กับโพเทนชิโอมิเตอร์ที่อยู่ข้าง ๆ สวิตช์นี้แสดงถึงค่าของรีแอกติวิตี (แทนด้วยสัญลักษณ์ δK ซึ่งสามารถเลือกได้ ๒ สเกล คือ $\times 10^{-1}$ และ $\times 10^{-2}$ ซึ่งจะได้ δK ที่มีค่าสูงสุดเป็น ± 0.1 และ ± 0.01)

ค่าบนหน้าปัทม์	สวิตช์	δK
10.00	x 10 ⁻¹	+ 0.1
5.00	x 10 ⁻¹	0.00
0.00	x 10 ⁻¹	- 0.1
10.00	x 10 ⁻²	+ 0.01
5.00	x 10 ⁻²	0.00
0.00	x 10 ⁻²	- 0.01

๑ รอบบนหน้าปัทม์สำหรับสเกล x 10⁻¹ มีค่าเท่ากับ 0.02

๑ รอบบนหน้าปัทม์ สำหรับสเกล x 10⁻² มีค่าเท่ากับ 0.002

ตัวอย่างเช่น δK = + 0.003 จะเห็นว่าต้องใช้สเกล x 10⁻² เนื่องจากที่ 5 x 10⁻² มีค่า δK = 0.00 และ ๑ รอบสำหรับสเกลนี้มีค่าเท่ากับ ๐.๐๐๒ ดังนั้น ๐.๐๐๓/๐.๐๐๒ = ๑.๕ เพราะฉะนั้นจะต้องตั้งค่า δK = +0.003 ที่ (5+1.5) x 10⁻² = 6.5 x 10⁻² ถ้า δK = -0.099 จะต้องใช้สเกล x 10⁻¹ ที่ 5.00 x 10⁻¹ มีค่าของ δK = 0.000 และ ๑ รอบสำหรับสเกลนี้มีค่าเท่ากับ 0.02 ดังนั้น 0.099/0.02 = 4.95 เพราะฉะนั้นจะต้องตั้งค่า δK = -0.099 ที่ (5-4.95) x 10⁻¹ = 0.05 x 10⁻¹

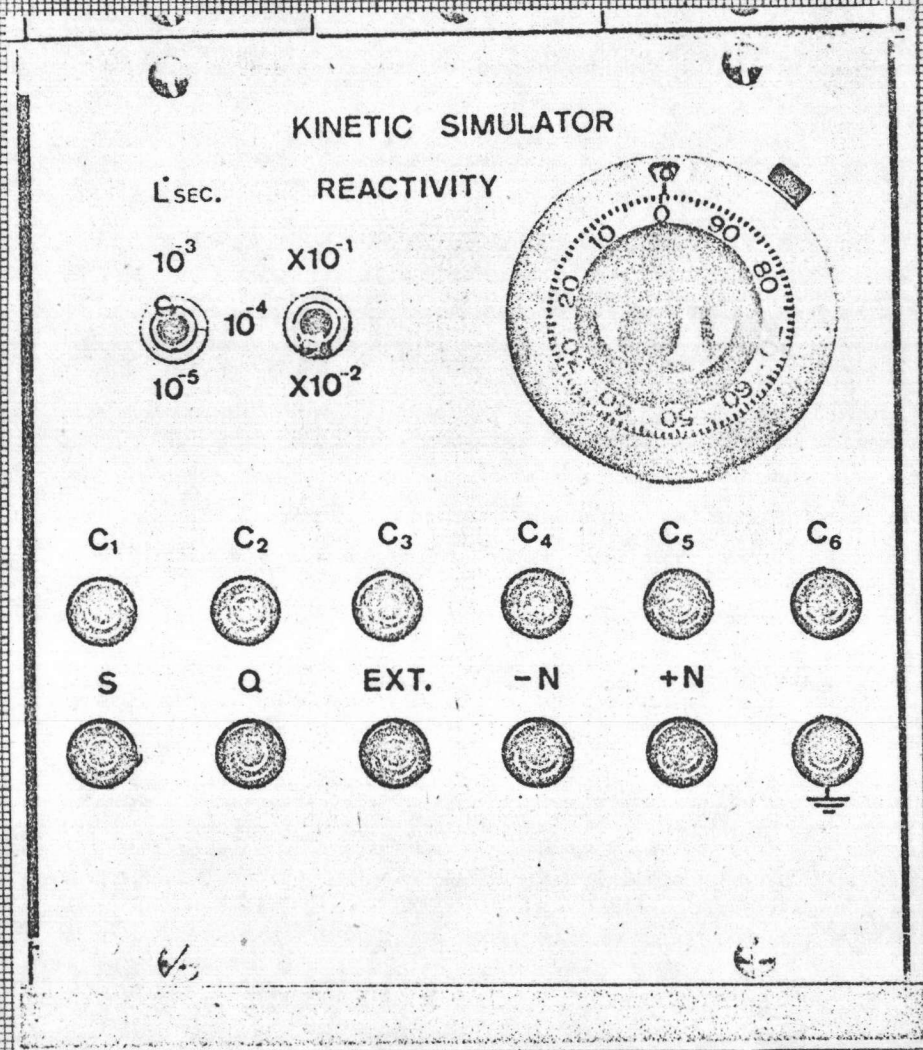
ถัดลงมามีที่สำหรับเสียบอินพุต ๓ ช่อง คือ S, Q และ EXT. S ต่อมาจากเอาพุทของซอสยูนิต Q ต่อมาจากเอาพุทของเพอเทอเบชันยูนิต เมื่อต้องการศึกษาเกี่ยวกับการรบกวน ส่วน EXT. นี้อาจจะต่อจากเอาพุทใด ๆ ที่ต้องการศึกษา อินพุททั้งสามอันนี้อันใดที่ไม่ต้องการใช้ก็ให้เชื่อมต่อกับจุดต่อลงดิน

สมการดิฟเฟอเรนเชียลทั้งหมดจะเป็น

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\delta K - \beta)}{L^*} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i - \{-S - EXT. - Q\}$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta_i n - \lambda_i C_i$$

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
18 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 52 คิเนติกซิมูเลเตอร์

เอาพุทของคิเนติกซีมูเลเตอร์มีอยู่ ๘ ช่อง เป็นระดับของนิวตรอน $\pm n$

๒ ช่องและความเข้มข้นของดีเลย์นิวตรอน (Delayed Neutron Concentration) C_1-C_6 อีก

๖ ช่อง สเกลของ C_1-C_6 ขึ้นกับสเกลของ n

ถ้าเราให้ $Pm = 1$ M.U.

C_1	$= 3.1 \times 10^7$ Pm	Atomic Nuclei/cm ³ /M.U.
C_2	$= 3.1 \times 10^8$ Pm	" " "
C_3	$= 3.1 \times 10^9$ Pm	" " "
C_4	$= 3.1 \times 10^9$ Pm	" " "
C_5	$= 3.1 \times 10^9$ Pm	" " "
C_6	$= 3.1 \times 10^9$ Pm	" " "
n	$= 3.1 \times 10^{10} \lambda^*$ Pm	Neutrons/cm ³ /M.U.

รูปที่ ๕๒

เมื่อเข้าใจถึงวิธีใช้ส่วนประกอบต่าง ๆ บนแผงของรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์แล้ว จากนี้ก็สมารถนำรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์มาใช้ศึกษาปัญหาต่าง ๆ ได้ สำหรับขั้นตอนในการใช้รีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์พอสรุปได้ดังนี้

๑. เปิดสวิตช์ใหญ่ทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๑๐ นาที เพื่อเป็นการอุ่นเครื่อง
๒. ทำการปรับค่าโพเทนชิโอมิเตอร์ โดยการเปิดสวิตช์ค่านวณและเลือกสวิตช์ของโพเทนชิโอมิเตอร์ +1 หรือ -1 มาชียนูนิต เมื่อปรับโพเทนชิโอมิเตอร์เรียบร้อยแล้วก็ปิดสวิตช์ค่านวณ
๓. ทำการต่อวงจรบนแผงของเครื่องรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์ตามแผนภาพของคอมพิวเตอร์
๔. เปิดสวิตช์ค่านวณ จากนั้นเครื่องรีแอกเตอร์ซีมูเลเตอร์ก็จะเริ่มค่านวณ เอาพุทก็จะถูกบันทึกบนเครื่องบันทึกเอ็กซวาย (X - Y recorder)

เครื่องบันทึกอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ ๕๓ เป็นรูปของเครื่องบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ แผงควบคุมทางด้านแกนนอนอยู่ทางซ้ายมือ บนแผงควบคุมมีที่สำหรับเสียบช่องบวก ลบ และจุดต่อลงดิน ถัดมามีสวิตช์อยู่ ๓ อัน อันแรกเป็นสวิตช์ของตัวคูณซึ่งมีอยู่ ๒ ค่า คือ X1 และ X 10 สวิตช์อันที่สองเป็นสวิตช์ที่ใช้เลือกสเกลเป็นนิ้วหรือเซนติเมตร สวิตช์ที่สามเป็นสวิตช์ที่ใช้สำหรับรีเซ็ต (reset) และสวิตช์ (sweep) (ในการทดลองไม่ได้ใช้สวิตช์นี้เนื่องจากใช้สวิตช์คำนวณบนแผงควบคุมของเครื่องรีแอกเตอร์ ชิมู เลเตอร์ทำหน้าที่แทน) ถัดมามีปุ่มสำหรับเลือกค่าต่าง ๆ ทั้งในสเกลที่เป็นนิ้วและ เซนติเมตร ซึ่งมีให้เลือกถึง ๑๒ ค่า สเกลที่เป็น เซนติเมตรค่าของตัวเลขอยู่รอบนอกได้แก่ .๕, ๑, ๒.๕, ๕, ๑๐, ๒๕, ๕๐, ๑๐๐, ๒๕๐, ๕๐๐ และ 1 K สำหรับสเกลที่เป็นนิ้วค่าของตัวเลขอยู่รอบในได้แก่ ๑, ๒, ๕, ๑๐, ๒๐, ๕๐, ๑๐๐, ๒๐๐, ๕๐๐, 1 K และ 2 K ปุ่มถัดมามีให้เลือก ๒ อย่างคือ CAL. และ VAR. และแต่ละอันก็มีให้เลือก ๒ อย่าง คือ .1 SEC. และ MV. ในการทดลองใช้แกนนอนเป็นเวลา จึงหมุนปุ่มนี้ไปทางด้าน CAL ที่ 0.1 SEC. ถัดมาเป็นปุ่มปรับศูนย์ได้ปุ่มมีคำว่า ZERO เป็นปุ่มที่ใช้ปรับเลื่อนไปมาตามแกนนอน

วิธีใช้เช่นกดสวิตช์อันแรกไปที่ X 1 กดสวิตช์อันที่สองไปที่ CM และตั้งปุ่มของสเกลเซนติเมตรเป็น ๕๐๐ ปุ่มถัดไปตั้งที่ CAL .1 SEC จะได้ว่าค่าที่อ่านได้ในแกนนอนจะเป็น $๕๐๐ \times ๑ \times ๐.๑$ วินาที/ชม. = ๕๐ วินาที/ชม. บนกระดาษกราฟที่บันทึก

สำหรับแกนตั้งก็เช่นเดียวกับแกนนอนเช่น กดสวิตช์อันแรกไปที่ X 1 กดสวิตช์อันที่สองไปที่ CM และตั้งปุ่มของสเกลเซนติเมตรเป็น 1 K ปุ่มถัดไปตั้งที่ CAL ค่าที่อ่านได้ในแกนตั้งจะเป็น $1 K \times 1 MV/CM = 1$ โวลต์/ชม. บนกระดาษกราฟที่บันทึก

เอาหูจากเครื่องรีแอกเตอร์ชิมู เลเตอร์ที่ต้องการศึกษา นำมาเสียบเข้าที่ปุ่มสำหรับเสียบบวกทางด้านแกนตั้ง ต่อจุดลงดินจากเครื่องรีแอกเตอร์ชิมู เลเตอร์เข้าที่ปุ่มสำหรับเสียบลบ เมื่อเปิดสวิตช์คำนวณปากกา (Pen) ของเครื่องบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ก็จะเริ่มทำการบันทึกเอาหู

รูปที่ ๕๔ แสดงถึงระดับกำลัง (power) ที่รีแอกทีวิตีต่าง ๆ จากแผงของคิเนติกซีมิเลเตอร์ กตสวิตซ์ ℓ^* ให้อยู่ที่ค่า 10^{-3} กตสวิตซ์ของรีแอกทีวิตีให้อยู่ที่ $\times 10^{-1}$ จากช่องสำหรับเสียบ + N ต่อไปยังขั้วบวก (ปุ่มแดง) ทางด้านแกน Y ของเครื่องบันทึกเอ็กซ์วาย จากจุดต่อลงดินของ คิเนติกซีมิเลเตอร์ต่อไปยังจุดต่อลงดินของเครื่องบันทึกเอ็กซ์วายทางด้านแกน Y ตั้งสเกลทางด้าน แกน X ให้เท่ากับ ๒.๕ วินาทีต่อเซ็นติเมตร และสเกลทางด้านแกน Y เท่ากับ ๒๕ มิลลิโวลต์ต่อ เซ็นติเมตร

ในการทดลองนั้นทำการปรับค่าบนหน้าปัทม์ของรีแอกทีวิตีตามที่ต้องการ ในรูปจะเห็นคำว่า ZERO เส้นนี้หมายถึงระดับที่มีค่าเป็นศูนย์ (เมื่อสเกลทางด้านแกน Y อยู่ที่ ZERO) สวิตซ์ S_3 และ S_4 ทางด้านหลังของคิเนติกซีมิเลเตอร์อยู่ในตำแหน่งวงจรปิดทั้งคู่ ในการทดลองนี้ให้เปิด สวิตซ์คำนวณตลอดเวลา ถอดปลั๊กที่ต่อไปยังเครื่องบันทึกเอ็กซ์วายออกโดยใช้สวิตซ์ทางด้านแกน X รีเซ็ทและสวิตช์แทน ส่วนตัวเลขที่อยู่ทางขวามือของเส้นกราฟต่าง ๆ นั้น แสดงถึงค่าบนหน้าปัทม์ของรีแอกทีวิตี ทางด้านแกน X เป็นแกนของเวลาหน่วยเป็นวินาที ส่วนทางด้านแกน Y เป็นระดับกำลังสัมพันธ์ (+ N) ซึ่งในรูปที่ ๕๔ นี้ แสดงอยู่ในหน่วยมิลลิโวลต์

จากหัวข้อการใช้คิเนติกซีมิเลเตอร์

$$n = 3.1 \times 10^{10} \ell^* P_{\max} \quad \text{นิวตรอน/ชม.}^3 / \text{มาซินยูนิต}$$

ถ้าให้ $P_{\max} = 10$ วัตต์ = 1 มาซินยูนิต = 10 โวลต์

เลือกค่า $\ell^* = 10^{-3}$ วินาที จะได้ว่า

$$\begin{aligned} n &= 3.1 \times 10^{10} \times 10^{-3} \times 10 && \text{นิวตรอน/ชม.}^3 / 10 \text{ โวลต์} \\ &= 3.1 \times 10^8 && \text{นิวตรอน/ชม.}^3 / 10 \text{ โวลต์} \\ &= 3.1 \times 10^4 && \text{นิวตรอน/ชม.}^3 / \text{มิลลิโวลต์} \\ &= 3.1 \times 10^4 && \text{นิวตรอน/ชม.}^3 / \text{มิลลิวัตต์} \end{aligned}$$

มิลลิวัตต์

ระดับกำลังสัมพันธ์ (+N)

500
450
400
350
300
250
200
150
100
50

4.75
4.5
4.25
4.0
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0

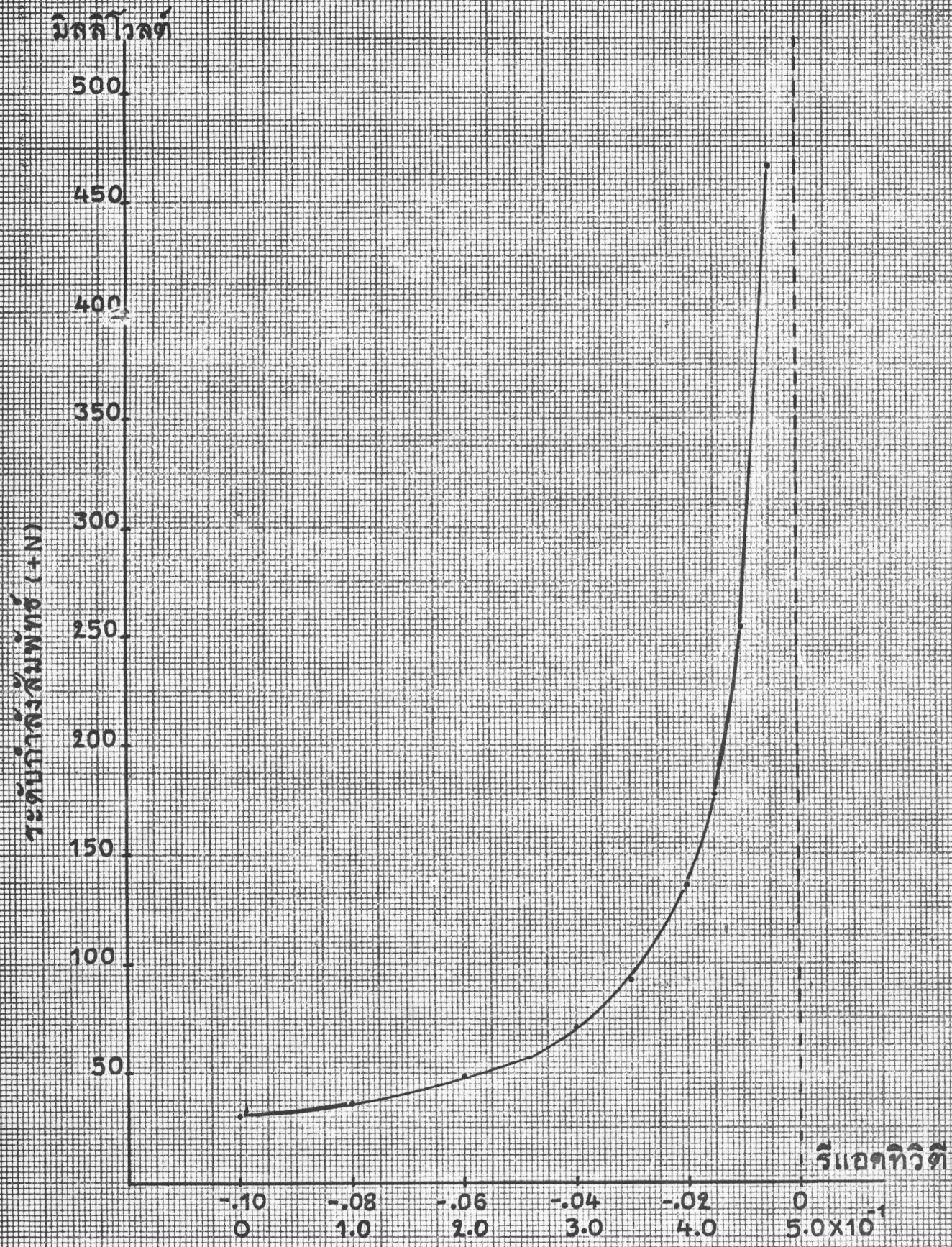
ZERO

0 5 10 15 20 25 30 วินาที

รูปที่ 54 ระดับกำลังที่รีแอกทีวิตีต่างๆ

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
10 X 25 CM. KEUFFEL & ESSER CO. U.S.A.

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
10 X 25 CM. MADE IN U.S.A.
KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 55 ระดับกำลังเมื่อเปลี่ยนรีแอกทิวิตีทีละน้อย

10 X 10 TO THE CENTIMETER 46 1513
16 X 25 CM. KEUFFEL & ESSER CO.

มิลลิวัตต์

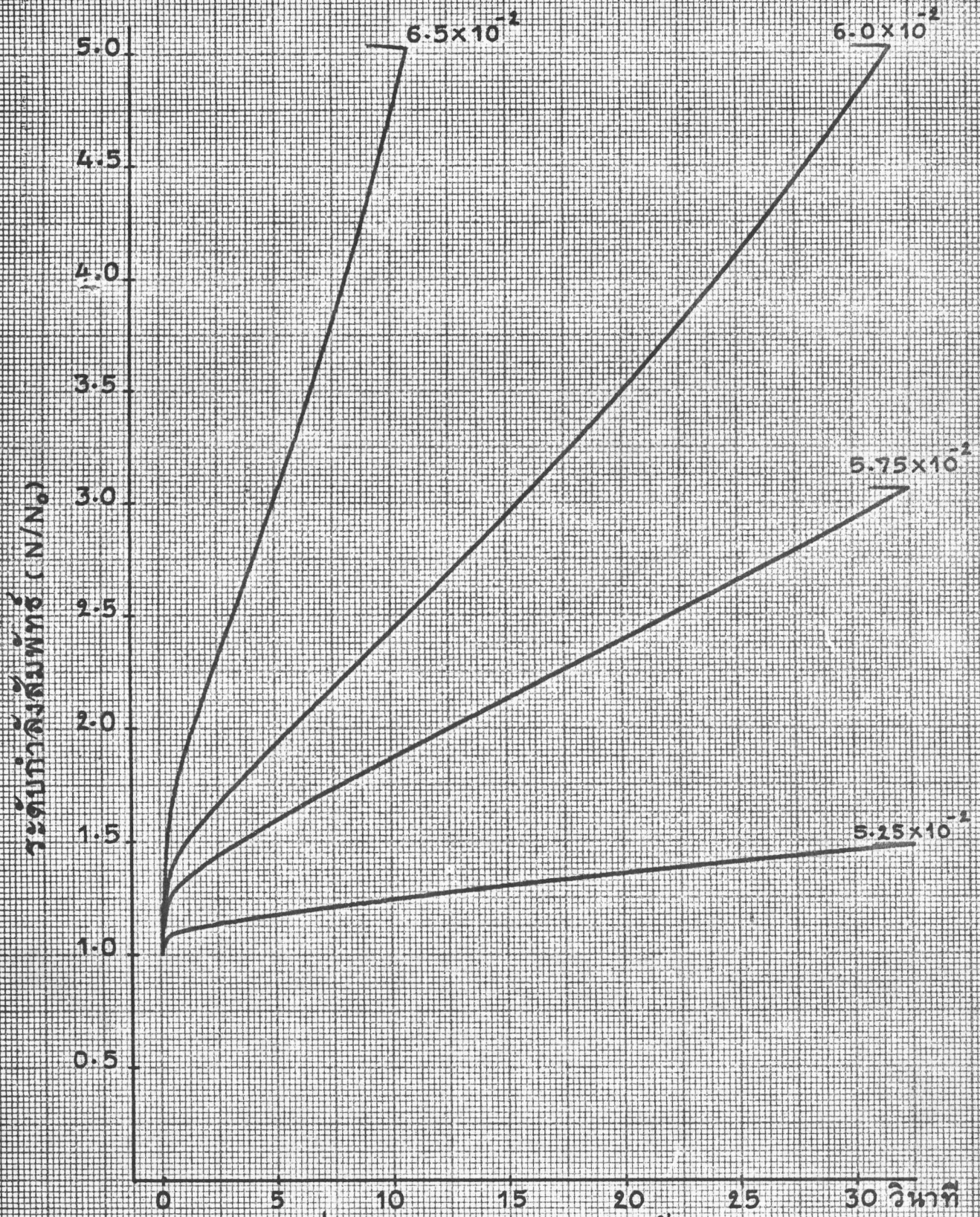
ระดับกำลังสัมพัทธ์ (+N)

900
800
700
600
500
400
300
200
100
ZERO

0 5 10 15 20 25 30 วินาที

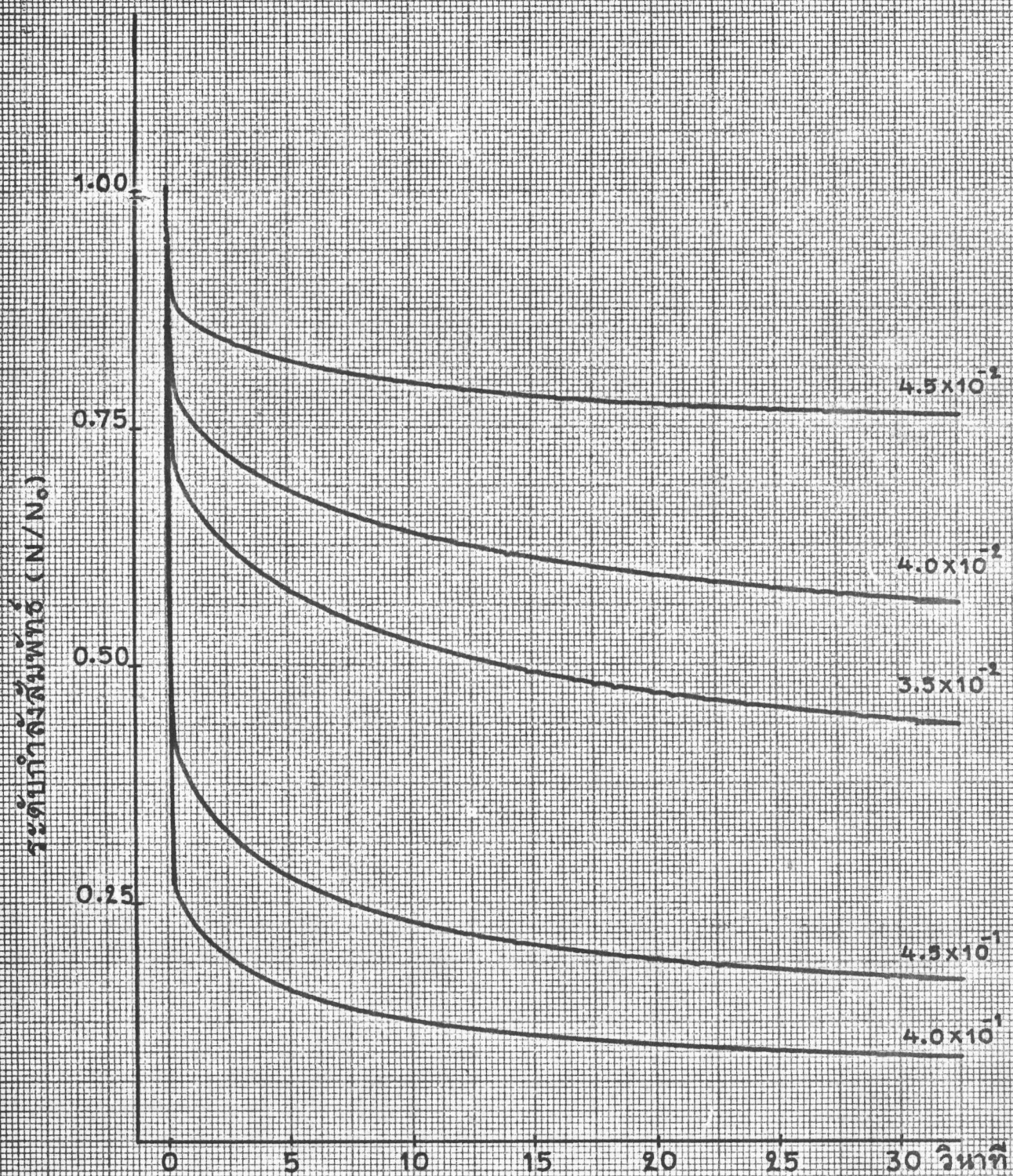
4.85
4.75
4.5
4.25
4
3.75
3.5
3

รูปที่ 56 ระดับกำลังที่รีแอกทีวิตีต่างๆ



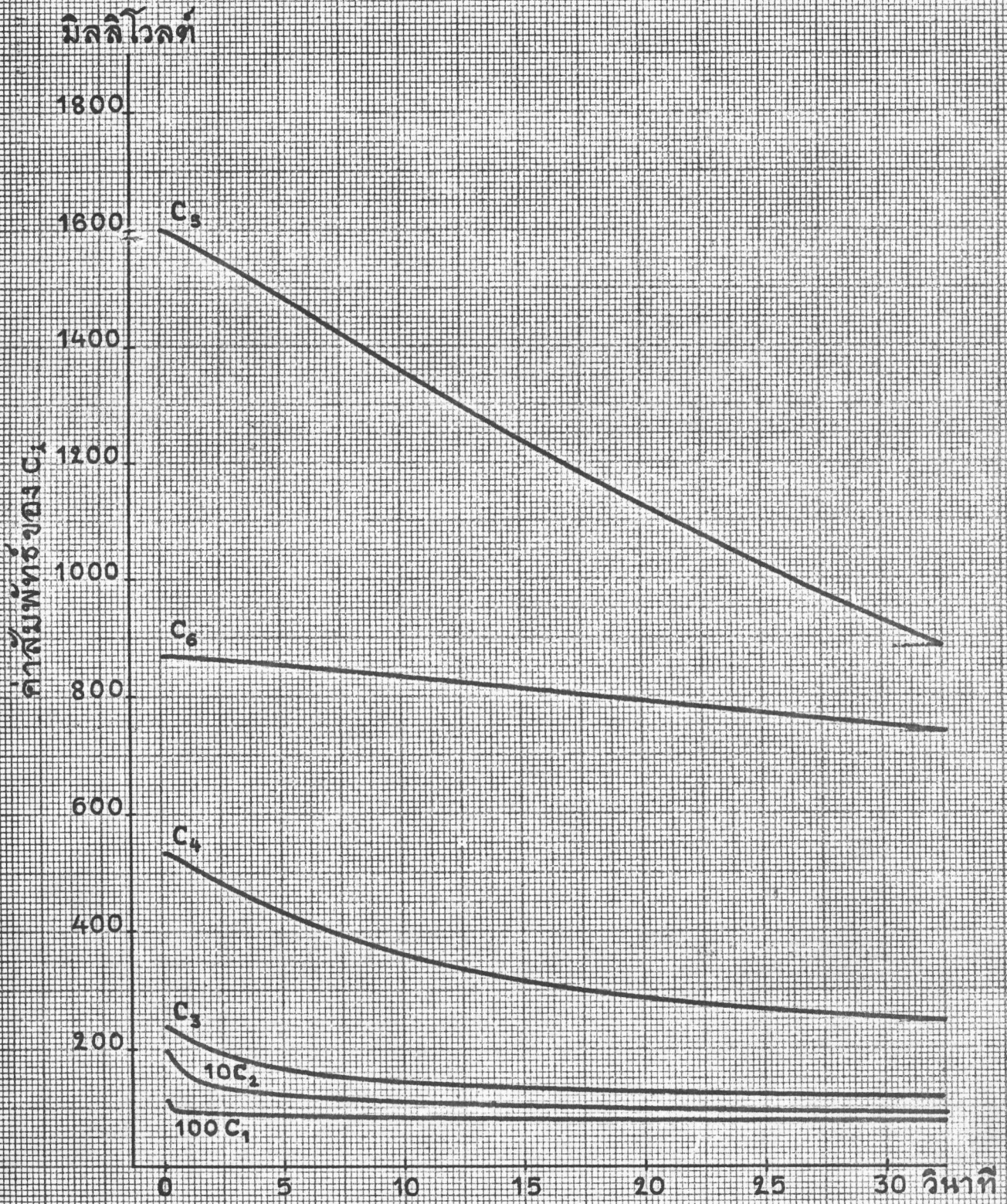
รูปที่ 57 การเพิ่มรีแอกติวิตีขึ้นอย่างรวดเร็ว
(POSITIVE STEP FUNCTION)

10 X 10 TO THE CENTIMETER 40 1013
18 X 25 CM.
Kruppel & Esser Co.



รูปที่ 58 การลดรีแอกทีวิตีลงอย่างรวดเร็ว
(NEGATIVE STEP FUNCTION)

10 X 10 TO THE CENTIMETER 40 1013
10 X 25 CM. KEUFFEL & ESSER CO.



รูปที่ 59 ระดับของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นก่อน

จากรูปที่ ๔๔ นำระดับกำลังสัมพัทธ์มาพล็อตเทียบกับรีแอกทิวิตี จะได้ดังรูปที่ ๔๕ ส่วนรูปที่ ๔๖ ซึ่งแสดงถึงระดับกำลังที่รีแอกทิวิตีต่าง ๆ นั้นก็คล้ายกับรูปที่ ๔๔ โดยตั้งค่าต่าง ๆ ไว้ดังนี้ $\lambda^* = 10^{-3}$ วินาที $S = 10.00$ ซึ่งเทียบเท่ากับ 10^7 นิวตรอน/วินาที $\delta K \times 10^{-4}$ สเกลทางด้านแกน $X = 2.5$ วินาที/ชม. และสเกลทางด้านแกน $Y = 50$ มิลลิโวลต์/ชม.

รูปที่ ๔๗ แสดงถึงระดับของกำลังเมื่อเพิ่มรีแอกทิวิตีอย่างรวดเร็ว โดยใช้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $\lambda^* = 10^{-3}$ วินาที $\delta K \times 10^{-2}$ สเกลทางด้านแกน $X = 2.5$ วินาที/ชม. และสเกลทางด้านแกน $Y = 500$ มิลลิโวลต์/ชม. ในการทดลองนั้นเริ่มจากระดับวิกฤตซึ่งตรงกับ 5.00 บนหน้าปัทม์ของรีแอกทิวิตี ที่จุดเริ่มต้นนี้ค่าของ n/n_0 ซึ่งเป็นค่าสัมพัทธ์จะมีค่าเท่ากับ 1 ให้สวิตช์ S_4 อยู่ที่ตำแหน่งวงจรเปิด (ทางด้านเครื่องยูนิเวอซัลรีแอกเตอร์ซิมูเลเตอร์ สวิตช์คำนวณจะต้องเปิดตลอดเวลา) หมุนปุ่มรีแอกทิวิตีให้อยู่ที่ 5.25 (หรือ 5.75 หรือ 6.00 หรือ 6.50) จากนั้นให้กดสวิตช์ S_4 ไปยังตำแหน่งวงจรปิดพร้อมกับการกดสวิตช์ทางด้านแกน X จากตำแหน่งรีเซ็ตไปยังสวิตช์

รูปที่ ๔๘ แสดงถึงระดับของกำลังเมื่อลดรีแอกทิวิตีลงอย่างรวดเร็ว โดยใช้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $\lambda^* = 10^{-3}$ วินาที สเกลทางด้านแกน $X = 2.5$ วินาที/ชม. และสเกลทางด้านแกน Y ปรับให้มีค่าเป็น 125 มิลลิโวลต์/ชม. $\delta K \times 10^{-2}$ ทำเหมือนการทดลองของรูปที่ ๔๗ โดยที่จุดเริ่มต้นค่าสัมพัทธ์ของ n/n_0 มีค่าเท่ากับ 1 ให้สวิตช์ S_4 อยู่ที่ตำแหน่งวงจรเปิด หมุนปุ่มรีแอกทิวิตีให้อยู่ที่ 4.50 (หรือ 4.00 หรือ 3.50) จากนั้นให้กดสวิตช์ S_4 ไปยังตำแหน่งวงจรปิดพร้อมกับการกดสวิตช์ทางด้านแกน X จากตำแหน่งรีเซ็ตไปยังสวิตช์

รูปที่ ๔๙ แสดงถึงระดับของดีเลย์นิวตรอนเมื่อลดรีแอกทิวิตีลงอย่างรวดเร็วจาก 5×10^{-2} ไปยัง 3.0×10^{-2} โดยใช้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $\lambda^* = 10^{-3}$ วินาที สเกลในแกน $X = 2.5$ วินาที/ชม. และสเกลในแกน $Y = 100$ มิลลิโวลต์/ชม. ให้สวิตช์ S_4 อยู่ที่ตำแหน่งวงจรเปิด หมุนปุ่มรีแอกทิวิตีให้อยู่ที่ 3.00×10^{-2} จากนั้นกดสวิตช์ S_4 ไปยังตำแหน่งวงจรปิดพร้อมกับการกดสวิตช์ทางด้านแกน X

P = 9.0



P = 7.0



P = 5.0



P = 3.0



P = 1.0



รูปที่ 60 ลักษณะของการเพอเทอเบชัน

จากตำแหน่งรีเซ็ทไปยังสรีพ เนื่องจากค่าของ $C_1 - C_6$ มีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงต้องต่อไปยัง
อินเวตเตอร์ก่อน จากอินเวตเตอร์ต่อไปยังเครื่องบันทึกอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ ๖๐ แสดงถึงลักษณะของการรบกวน โดยใช้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $\lambda^* = 10^{-3}$ วินาที
รีแอกทิวิตีตั้งไว้ที่ค่า 5×10^{-2} ออสซิลเลเตอร์ตั้งที่ 1.5 เฮตซ์ $1.0 V_p$ เพอเทอเบชันยูนิตตั้ง
ที่ 1.00 (หรือ 3.00 หรือ 5.00 หรือ 7.00 หรือ 9.00) สเกลในแกน $X = 2.5$ วินาที/ชม.
สเกลในแกน $Y = 100$ มิลลิโวลต์/ชม. ในการทดลองนั้นสายที่เชื่อมต่อระหว่างออสซิลเลเตอร์กับ
เพอเทอเบชันยูนิตจะมีสวิทช์ปิด-เปิด อยู่อันหนึ่ง เพื่อทำการรบกวนตามที่ต้องการ ทั้งนี้สวิทช์ของออสซิลเลเตอร์
จะต้องเปิดตลอดเวลา