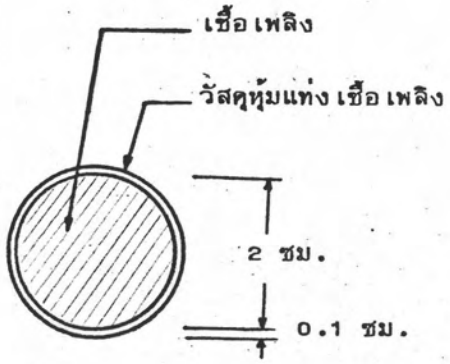
บทที่ 6

วิธีการและผลการคำนวณ

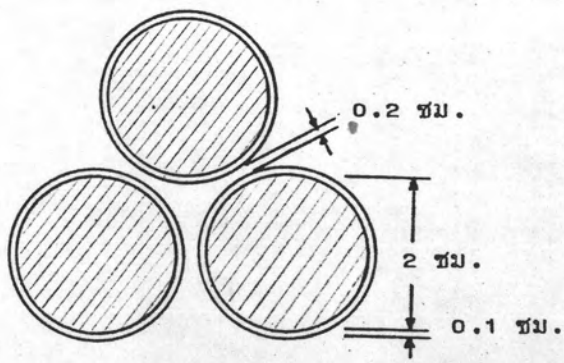
ในการวิเคราะห์และการคำนวณของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดเงื่อนไข และออกแบบรูปร่างลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ ตามความเหมาะสม โดยกำหนดให้ดังต่อไปนี้

1. ชนิดของเชื้อเพลิงเป็น
   - 1.1 โลหะยูเรเนียม
   - 1.2 ยูเรเนียมไดออกไซด์
2. ตัวหน่วงนิวตรอน เป็น น้ำชนิดหนัก
3. วัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเป็น
   - 3.1 อะลูมินัม
   - 3.2 เซอร์โคเนียม
4. ตัวสะท้อนนิวตรอน เป็น น้ำชนิดหนัก
5. การจัดเรียงมัดเชื้อเพลิงเป็นแบบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

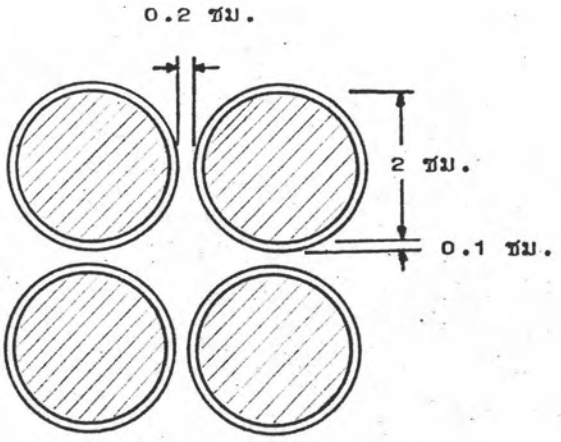
เครื่องปฏิกรณ์ ที่ออกแบบนี้เป็นชนิดวิวิธพันธุ์รูปทรงกระบอก และแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแท่งทรงกระบอกซึ่งอาจจะเป็นแท่งเดียวหรือหลายแท่งในหนึ่งมัดก็ได้ สำหรับการคำนวณต่อไปนี้จะมีแท่งเชื้อเพลิง 1, 3, 4, 6, 7 และ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด โดยกำหนดให้แท่งเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และมีวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงหนา 0.1 เซนติเมตร บางทีอาจมีชั้นของวัสดุหุ้มมัดเชื้อเพลิงอีกชั้นหนึ่งกำหนดให้หนา 0.15 เซนติเมตร โดยชั้นนี้จะเรียกว่าท่อความดัน (pressure tube) ถ้าในหนึ่งมัดมีแท่งเชื้อเพลิงมากกว่าหนึ่งแท่ง กำหนดให้แต่ละแท่งห่างกัน 0.2 เซนติเมตร ส่วนระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงกับท่อความดัน กำหนดให้ 0.4 เซนติเมตร ระบบการถ่ายเทความร้อนจะใช้น้ำชนิดหนักเป็นตัวถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2



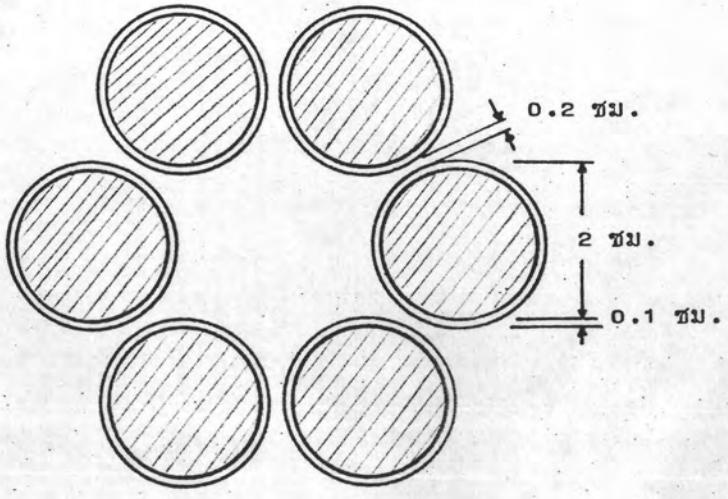
รูปที่ 6.1 (ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 1 แท่ง
ไม่มีท่อความดัน



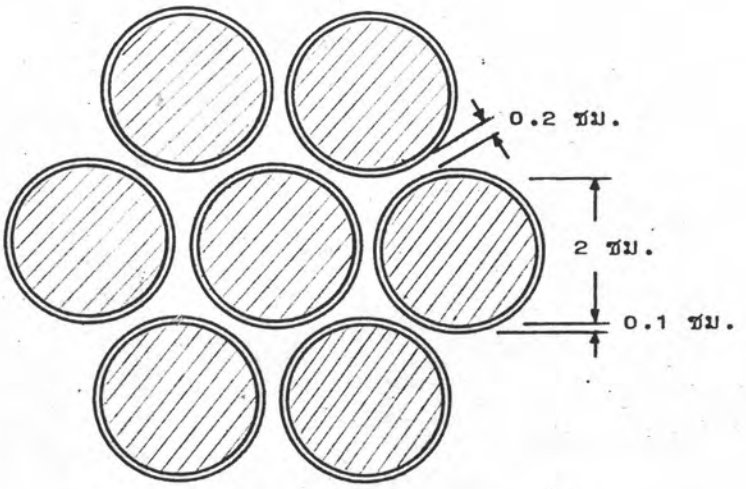
รูปที่ 6.1 (ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 3 แท่งต่อหนึ่งมัด
ไม่มีท่อความดัน



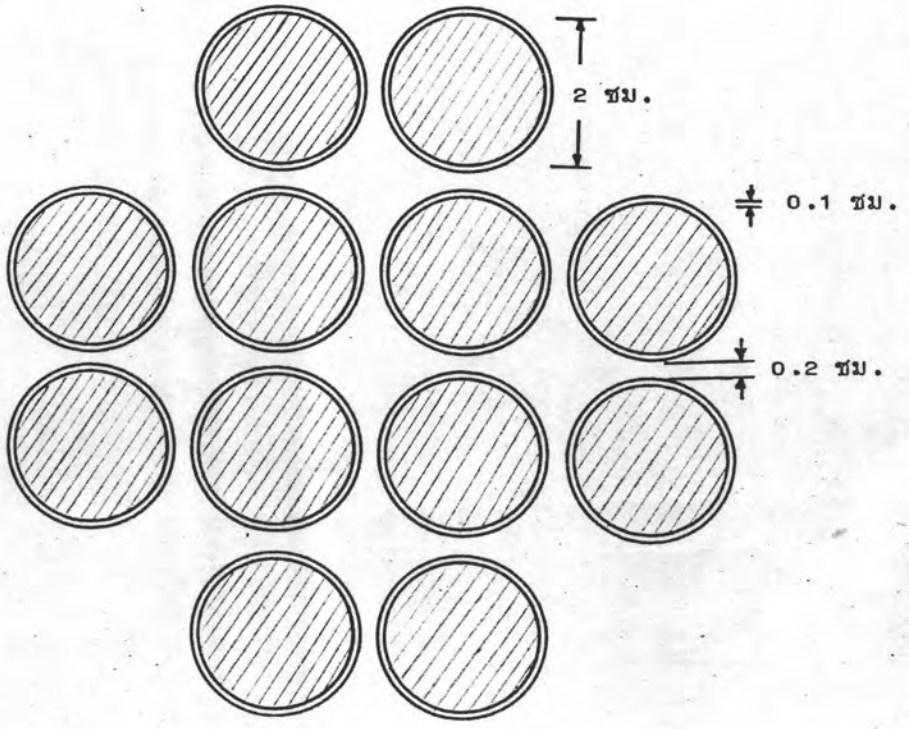
รูปที่ 6.1 (ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน



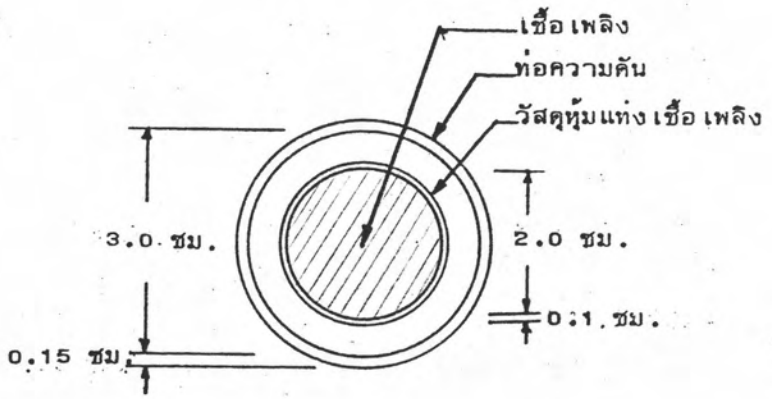
รูปที่ 6.1 (ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 6 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน



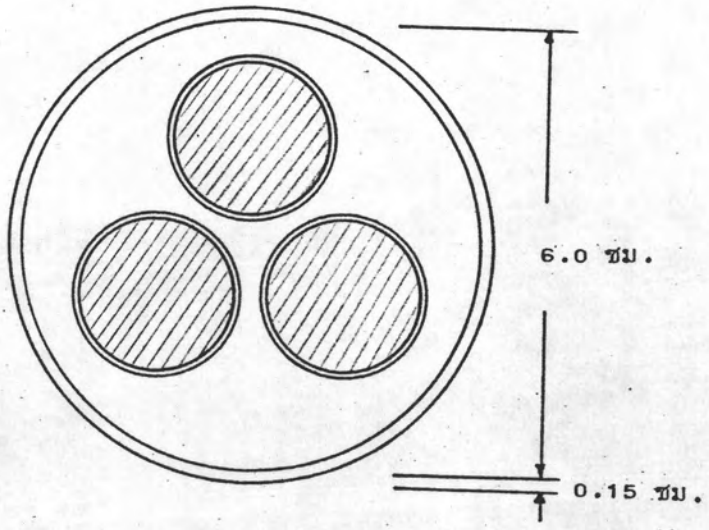
รูปที่ 6.1 (จ) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 7 แท่งต่อหนึ่งมัด
ไม่มีท่อความดัน



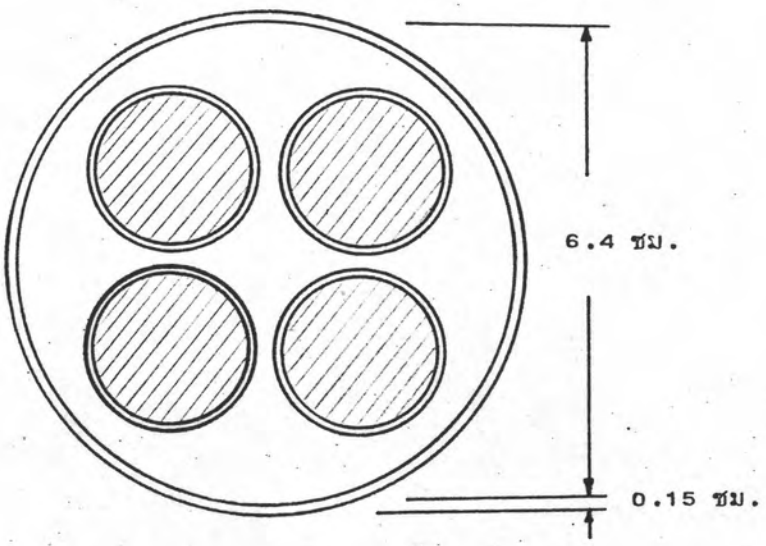
รูปที่ 6.1 (ฉ) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 12 แท่งต่อหนึ่งมัด
ไม่มีท่อความดัน



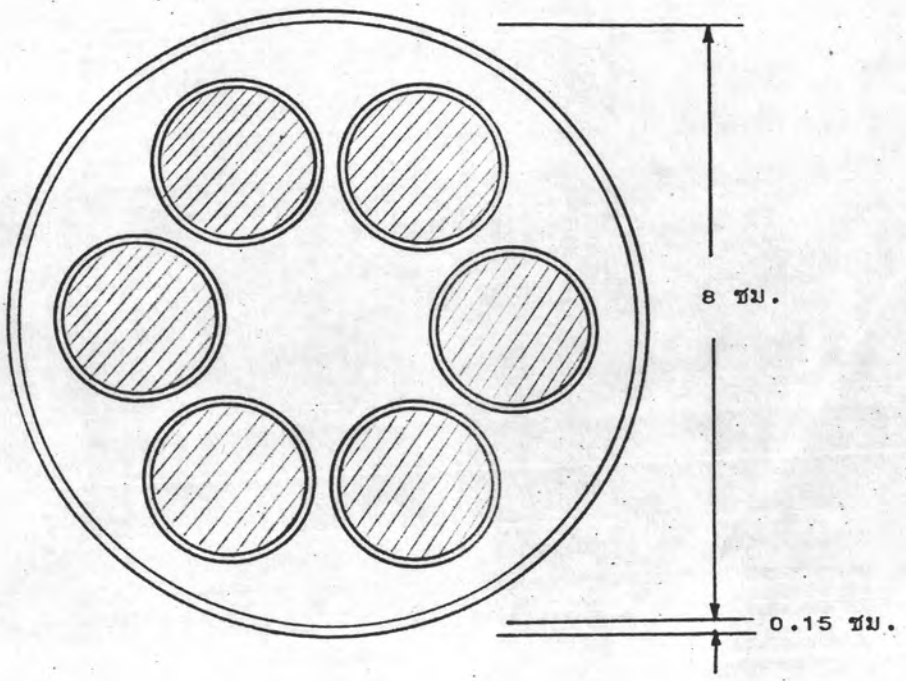
รูปที่ 6.2 (ก) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 1 แท่ง
มีท่อความดัน



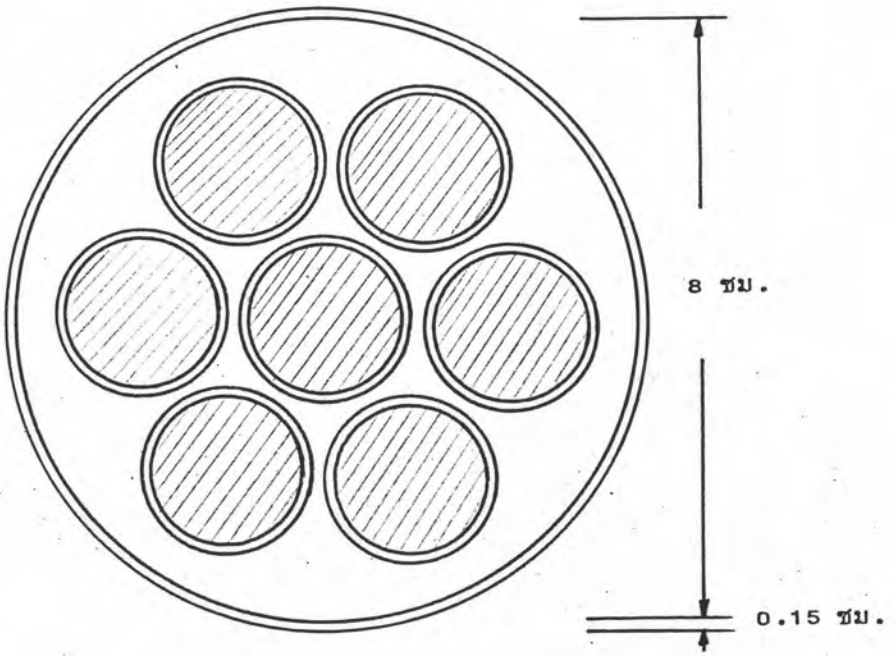
รูปที่ 6.2 (ข) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 3 แท่งต่อหนึ่งมัด
มีท่อความดัน



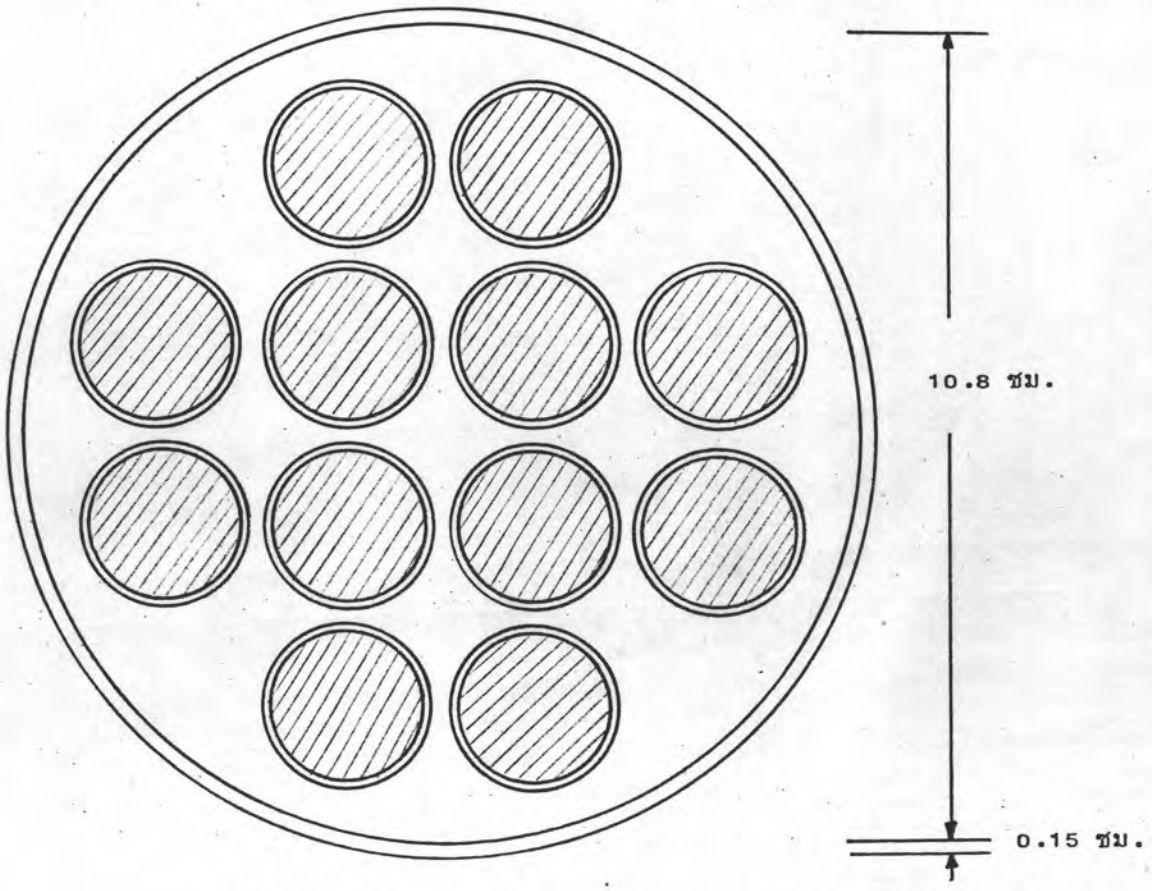
รูปที่ 6.2 (ค) จำนวนเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด
มีท่อความดัน



รูปที่ 6.2 (ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 6 แท่งต่อหนึ่งมัด
มีท่อความดัน



รูปที่ 6.2 (จ) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 7 แท่งต่อหนึ่งมัด
มีท่อความดัน



รูปที่ 6.2 (ฉ) จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิง 12 แท่งต่อหนึ่งมัด
มีท่อความดัน

6.1 การคำนวณโดยใช้โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

เนื่องจากรัศมีของแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.0 ซม. ค่า ε = 1.022 (ดังรูปที่ 4.5) และจากหัวข้อที่ 4.4 ค่า η = 1.32 สำหรับการคำนวณในกรณีนี้ยังไม่ได้หุ้มด้วยชั้นของท่อความดัน ดังนั้น การคำนวณจึงตรงไปตรงมาไม่ยุ่งยากเท่าใด

6.1.1 จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่งต่อหนึ่งมัด

ดังรูปที่ 6.1 (ก) R_o คือ รัศมีของแท่งเชื้อเพลิง (ซม.)

R_1 คือ รัศมีของพื้นที่วงกลมซึ่งมีพื้นที่เท่ากับสี่เหลี่ยมจัตุรัสในหนึ่งเซล ดังรูปที่ 4.2 และกำหนดให้

V_o คือ ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยความยาว (ซม.^{3})

V_1 คือ ปริมาตรของตัวหน่วงนิวตรอนต่อหนึ่งหน่วยความยาว (ซม.^{3})

V_2 คือ ปริมาตรของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยความยาว (ซม.^{3})

$$R_o = 1.0 \quad \text{ซม.}$$

$$R_1 = \frac{\text{(ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิง)}}{\sqrt{\pi}}$$

คำนวณค่า f ที่ระยะระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 11 ซม.

ดังนั้น $R_1 = \frac{(11)}{\sqrt{\pi}} = 6.20483$ ซม.

และ $V_o = \pi R_o^2$

$= 3.14285$ ซม.^{3}

$V_2 = \pi \left[(R_o + 0.1)^2 - R_o^2 \right]$

$= 0.66$ ซม.^{3}

$V_1 = (11)^2 - V_o - V_2$

$= 117.197143$ ซม.^{3}

จากสมการที่ (4.20)

$$\frac{1}{f} = 1 + \left(\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} \right) F + (E - 1)$$

โดย Σ_{ao}, Σ_{a_1}, Σ_{a_2} คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการจับนิวตรอนของโลหะยูเรเนียม น้ำชนิดหนัก และอะลูมินัม ตามลำดับ (ซม.$^{-1}$)

จากภาคผนวก ก.

$$\Sigma_{ao} = 0.314 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_1} = 8.5 \times 10^{-5} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = 0.015 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

และจากสมการที่ (4.23)

$$F = 1 + \frac{(k_o R_o)^2}{8} - \frac{(k_o R_o)^4}{192}$$

ซึ่ง $k_o = 1/L_o$

โดย L_o คือ ระยะการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในโลหะยูเรเนียม[1] มีค่าเท่ากับ 1.55 ซม.

ดังนั้น $k_o = 1/1.55 = 0.65$ ซม.$^{-1}$

เพราะฉะนั้น $F = 1 + \frac{[(0.65)(1)]^2}{8} - \frac{[(0.65)(1)]^4}{192} = 1.05188$

จากสมการที่ (4.24)

$$E = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2} \left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o^2} \ln \frac{R_1}{R_o} + \frac{1}{4} \left(\frac{R_o}{R_1} \right)^2 - 0.75 \right]$$

ซึ่ง $k_1 = 1/L_1$

โดย L_1 คือ ระยะการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในน้ำชนิดหนัก[1] มีค่าเท่ากับ 100 ซม.

ดังนั้น $k = 1/100 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

เพราะฉะนั้น $$E = 1 + \frac{\left[(0.01)(6.20483)\right]^2}{2} + \left[\frac{(6.20483)^2}{(6.20483)^2 - 1^2} \ln \frac{6.20483}{1} + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{6.20483}\right)^2 - 0.75\right]$$

$$E = 1.00217$$

และ $$V_o\Sigma_{ao} = (3.14285)(0.314)$$

$$= 0.98685 \text{ ซม.}^2$$

$$V_1\Sigma_{a_1} = (117.197143)(8.5 \times 10^{-5})$$

$$= 9.96175 \times 10^{-3} \text{ ซม.}^2$$

$$V_2\Sigma_{a_2} = (0.66)(0.015)$$

$$= 9.9 \times 10^{-3} \text{ ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 0.02012$$

$$\frac{1}{f} = 1 + (0.02012)(1.05188) + (1.00217 - 1)$$

$$= 1.02334$$

ดังนั้น $f = 0.97718$

การคำนวณหาค่า p ที่ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 11 ซม.

สำหรับการคำนวณค่า p นี้ เป็นค่าที่อยู่ในช่วงกำธร ดังนั้นค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะต้องคิดที่พลังงานกำธรทั้งหมด

จากสมการที่ (4.53)

$$p = \exp\left[-\frac{f_r}{1 - f_r}\right]$$

และค่า f_r จากสมการที่ (4.47)

$$\frac{1}{f_r} = 1 + \left(\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{a_2}} \right) F_r + (E_r - 1)$$

โดย Σ_{ao}, Σ_{a_1}, Σ_{a_2} คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการจับรีโซแนนซ์นิวตรอนของโลหะยูเรเนียม น้ำชนิดหนัก และอะลูมินัม ตามลำดับ

จากสมการที่ (4.48) และสมการที่ (4.49)

$$\Sigma_{a_1} = \frac{\xi_1 \Sigma_{s_1}}{\ln(E_1/E_2)}$$

$$\Sigma_{a_2} = \frac{\xi_2 \Sigma_{s_2}}{\ln(E_1/E_2)}$$

ดูภาคผนวก ข.

$$\xi_1 \Sigma_{s_1} = 0.18 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

ดูภาคผนวก ก

$$\xi_2 \Sigma_{s_2} = (0.0723)(0.084)$$

$$= 0.006 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

ดังนั้น

$$\Sigma_{a_1} = \frac{0.18}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = \frac{0.006}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

จากสมการที่ (4.50)

$$\Sigma_{ao} = \frac{N_o(a + b\ S/M)}{\ln(E_1/E_2)}$$

เมื่อ N_o คือ จำนวนอะตอมโลหะยูเรเนียม

$$N_o = \frac{\rho_o N_A}{W} \qquad (1)$$

ρ_o คือ ความหนาแน่นของโลหะยูเรเนียม (18.9 กรัม/ซม.^{3})

N_A คือ อาโวกาโดร นัมเบอร์ (avogadro's number)

เท่ากับ 6.02×10^{23} (กรัม-โมล)$^{-1}$

W คือ น้ำหนักโมเลกุลของโลหะยูเรเนียม

เนื่องจากยูเรเนียมธรรมชาติมียูเรเนียม-235 อยู่ 0.71 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก และมียูเรเนียม-238 อยู่ 99.29 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ดังนั้น

$$W = \frac{0.71}{100} \times 235 + \frac{99.29}{100} \times 238$$

$$= 237.9787$$

ดังนั้น $$N_o' = \frac{(18.9)(6.02 \times 10^{23})}{237.9787}$$

$$= 4.68760 \times 10^{22} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3$$

จากตารางที่ 4.1 สำหรับโลหะยูเรเนียม

a = 8 b = 27.5

S คือ พื้นที่ผิวด้านข้างของแท่งเชื้อเพลิง (ซม.^{2})

M คือ มวลของแท่งเชื้อเพลิง (กรัม)

$$\frac{S}{M} = \frac{2}{\rho_o R_o}$$

$$= \frac{2}{(18.9)(1)}$$

$$= 0.10582 \quad \text{ซม.}^2\text{/กรัม}$$

$$\Sigma_{ao} = \frac{(4.68760 \times 10^{22})\left[8 + 27.5(0.10582) \right] \times 10^{-24}}{\ln(E_1/E_2)}$$

$$= \frac{0.51436}{\ln(E_1 / E_2)}$$

ส่วนค่า F_r ก็หาในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (4.23) แต่ k_o ที่ปรากฏอยู่ก็ต้องคิดที่รีโซแนนซ์ นิวตรอน ซึ่งมีในตารางที่ 4.2 สำหรับโลหะยูเรเนียม k_o = 0.44 ซม.$^{-1}$

$$F_r = 1 + \frac{(k_o R_o)^2}{8} - \frac{(k_o R_o)^4}{192}$$

$$F_r = 1 + \frac{[(0.44)(1)]^2}{8} - \frac{[(0.44)(1)]^4}{192}$$

$$F_r = 1.024$$

และสำหรับค่า E_r ก็เช่นกัน ค่า k_1 ของน้ำชนิดหนักทราบได้จากตารางที่ 4.3

$k_1 = 0.22$ ซม.$^{-1}$

$$E_r = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o^2}\ln\frac{R_1}{R_o} + \frac{1}{4}\left(\frac{R_o}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

$$E_r = 1 + \frac{[(0.22)(6.20483)]^2}{2}\left[\frac{(6.20483)^2}{(6.20483)^2 - 1^2}\ln\frac{6.20483}{1} + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{6.20483}\right)^2 - 0.75\right]$$

$$E_r = 2.05328$$

$$V_o\Sigma_{ao} = (3.14285)(0.51436)$$

$$= 1.61659 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_1\Sigma_{a_1} = (117.197143)(0.18)$$

$$= 21.09548 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_o\Sigma_{a_2} = (0.66)(0.006)$$

$$= 3.96 \times 10^{-3} \quad \text{ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 13.05182$$

ดังนั้น $$\frac{1}{f_r} = 1 + (13.05182)(1.024) + (2.05328 - 1)$$

$$\frac{1}{f_r} = 15.41841$$

$$f_r = 0.064857$$

เพราะฉะนั้น $p = \exp\left[- \frac{0.064857}{1 - 0.064857} \right]$

$p = 0.93299$

ส่วนการคำนวณค่า k_∞ สามารถคำนวณได้ โดยใช้สูตรสี่แฟค เตอร์

จากสมการที่ (3.6)

$$k_\infty = \eta\varepsilon pf$$
$$= (1.32)(1.022)(0.93299)(0.97718)$$
$$= 1.22993$$

การคำนวณหาขนาดวิกฤตของ เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์นั้น จะต้อง เริ่ม-

จากการกำหนดค่า k_{eff} ซึ่งถ้าแกน เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะวิกฤตพอดี ค่า k_{eff} จะ เท่ากับ 1.00 ดังนั้น จากสมการการฟุ้งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวก สมการที่ (3.43)

$$B_m^2 = \frac{k_\infty - 1}{L^2 + \tau}$$

ค่า L หมายถึง ระยะการฟุ้งกระจายของ เทอร์มัลนิวตรอนในแกน เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถ คำนวณได้จากสมการที่ (3.45.2)

$$L^2 = L_m^2(1 - f)\frac{V}{V_l}$$

เมื่อ L_m คือ ระยะการฟุ้งกระจายของ เทอร์มัลนิวตรอนในน้ำชนิดหนัก

V คือ ปริมาตรทั้งหมดในหนึ่ง เซล

V_l คือ ปริมาตรของน้ำชนิดหนักในหนึ่ง เซล

$L_m = 100$ ซม. (ดูภาคผนวก ข.)

$V = (11)^2 = 121$ ซม.^{3}

$V_l = 117.197143$ ซม.^{3}

ดังนั้น $L^2 = (100)^2(1 - 0.97718)\frac{(121)}{(117.197143)}$

$= 235.543364$ ซม.^{2}

และ τ คือ เอจ สำหรับน้ำชนิดหนักมีค่าเท่ากับ 120 ซม.^{2} (ดูภาคผนวก ข.)

$$B_m^2 = \frac{1.22993 - 1}{235.543364 + 120}$$

$$= 6.46706 \times 10^{-4}$$

ค่าบัคคลิงที่คำนวณได้นี้เป็นค่าที่ไม่ถูกต้องนัก เพราะคำนวณจากสมการการพุ่งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวก จึงเริ่มต้นที่ค่านี้ ($B_m^2 = 6.46706 \times 10^{-4}$ ซม.^{2}) แล้วลองแทนค่า B_m^2 ในสมการเอจดิฟฟิวชันของนิวตรอนสองพวก จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม โดยทำให้ค่า k_{eff} เท่ากับ 1.00 พอดี ดังสมการที่ (3.45.1)

$$k_{eff} = \frac{k_\infty \exp(-B_m^2 \tau)}{1 + L^2 B_m^2}$$

ดังนั้น $B_m^2 = 6.08406 \times 10^{-4}$ ซม.^{2}

แต่เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในกรณีวิกฤต ดังนั้น

$$B_m^2 = B_g^2 = B_c^2$$

จากสมการที่ (3.62)

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2.405}{R}\right)^2$$

กำหนดให้ $D/H = 1.2$

ดังนั้น $R^2 = 9.33711/B_g^2$

แทนค่า $R^2 = \frac{9.33711}{6.084068 \times 10^{-4}}$

$= 15346.82236$ ซม.^{2}

$R = 123.882292$ ซม.

$D = 247.764583$ ซม.

$H = 206.470486$ ซม.

เมื่อ R คือ รัศมีของแกนเครื่องปฏิกรณ์

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเครื่องปฏิกรณ์

H คือ ความสูงของแกนเครื่องปฏิกรณ์

กำหนดให้ n คือ จำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด

$$\text{จำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด} = n \times \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเครื่องปฏิกรณ์}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของหนึ่งเซล}}$$

$$= (1)\frac{\pi\,(123.88229)^2}{(11)^2}$$

$$= 399 \quad \text{แท่ง}$$

$$\text{มวลวิกฤตของโลหะยูเรเนียม} = \rho_o V_o$$

$$= \rho_o \pi R_o^2 Hn$$

$$= (18.9 \times 10^{-6})\,\pi(1)^2\,(206.470486)(399)$$

$$= 4.88879 \quad \text{ตัน}$$

$$\text{มวลของน้ำชนิดหนัก} = \rho_1 V_1$$

$$= (1.1 \times 10^{-6})(117.197143)(206.47048)(399)$$

$$= 10.61024 \quad \text{ตัน}$$

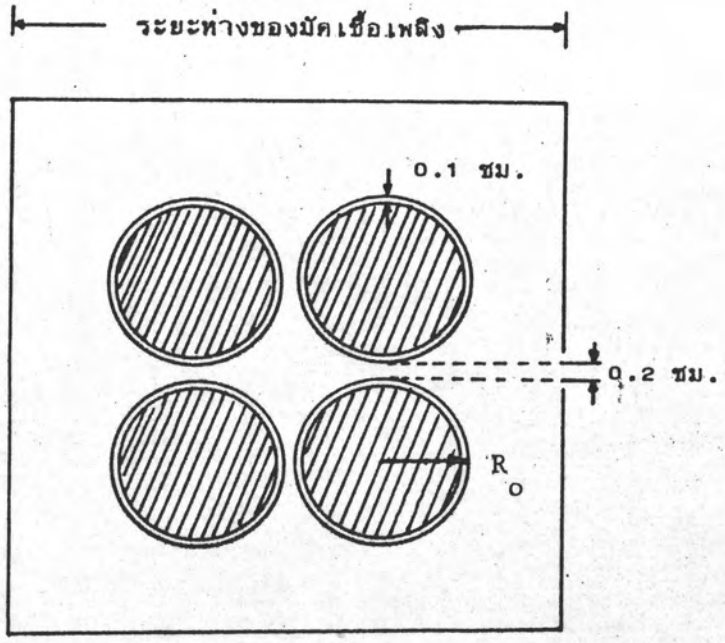
$$\text{มวลของอะลูมิเนียม} = \rho_2 V_2$$

$$= (2.699 \times 10^{-6})(0.66)(206.47048)(399)$$

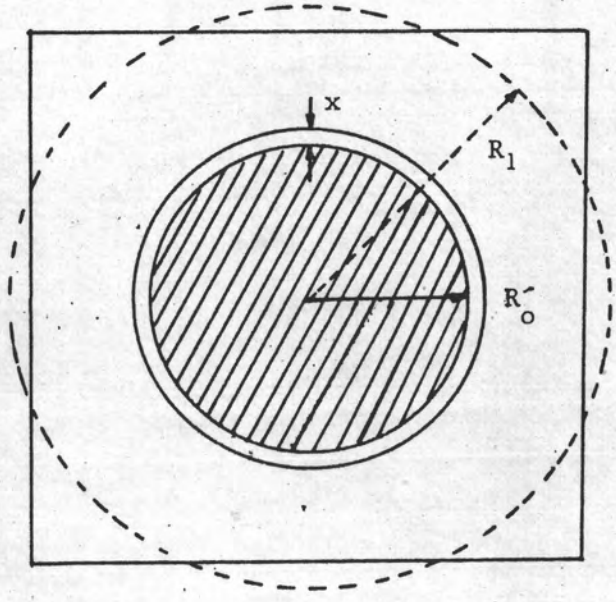
$$= 0.14674 \quad \text{ตัน}$$

6.1.2 จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด

ดังรูปที่ 6.1 (ค) สำหรับการคิดคำนวณกรณีที่มีแท่งเชื้อเพลิงมากกว่าหนึ่งแท่งต่อหนึ่งมัดขึ้นไป เช่น 4 แท่งต่อหนึ่งมัด เป็นต้น จะต้องคิดให้เสมือนรวมเอาสี่ แท่งมาเป็นแท่งเดียว โดยพื้นที่หน้าตัดของทั้งสี่ แท่งที่สร้างขึ้นจริงเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของแท่งเดียวที่คิดตามจินตภาพ (imagin) ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 (ก) แสดงจำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่ง ต่อหนึ่งมัด โดยไม่มีท่อความดัน ซึ่งเรียงมัดเชื้อเพลิงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 6.3 (ข) แสดงแนวคิดคำนวณ โดยรวม 4 แท่ง เป็นแท่งเดียว

จากรูปที่ 6.3 (ก) กำหนดให้แท่งเชื้อเพลิงที่สร้างจริงแต่ละแท่ง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 2 ซม. ความหนาของอะลูมินัม เป็น 0.1 ซม. แต่ละแท่งห่างกัน 0.2 ซม.

ส่วนรูปที่ 6.3 (ข) เป็นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างจากการจินตนาการ เพื่อความสะดวกในการคิดคำนวณ ซึ่งรัศมีของแท่งเชื้อเพลิงที่จะนำมาคิดคำนวณจะต้องเปลี่ยนไปกำหนดให้เป็น R'_o (ซม.) รวมทั้งความหนาของแผ่นอะลูมินัมก็เปลี่ยนไปกำหนดให้เป็น x (ซม.)

$$\pi R'^{2}_{o} = n\pi R^{2}_{o}$$

$$R'_o = \sqrt{n}\, R_o$$

แทนค่า $n = 4$

$R_o = 1$ ซม.

ดังนั้น $R'_o = \sqrt{4}\,(1) = 2.00$ ซม.

และ $\pi\left[(R'_o + x)^2 - R'^{2}_{o}\right] = n\,\pi\left[(R_o + 0.1)^2 - R^2_o\right]$

ดังนั้น $x = 0.2$ ซม.

การคำนวณค่า f ที่ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 18 ซม.

$$R_1 = \frac{18}{\sqrt{\pi}} = 10.15336 \text{ ซม.}$$

$$V_o = n\pi R^2_o$$

$$= 4\pi(1)^2$$

$$= 12.57142 \text{ ซม.}^3$$

$$V_2 = n\pi\left[(R_o + 0.1)^2 - R^2_o\right]$$

$$= 4\pi\left[(1 + 0.1)^2 - 1^2\right]$$

$$= 2.64 \text{ ซม.}^3$$

$$V_1 = (18)^2 - V_o - V_2$$

$$= 308.78857 \text{ ซม.}^3$$

และในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 6.1.1

$$F = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$$

$$= 1 + \frac{[(0.65)(2.00)]^2}{8} - \frac{[(0.65)(2.00)]^4}{192}$$

$$= 1.19637$$

$$E = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2} \ln \frac{R_1}{R'_o} + \frac{1}{4}\left(\frac{R'_o}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

แทนค่า $k_1 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

$R_1 = 10.15336$ ซม.

$R'_o = 2.00$ ซม.

ดังนั้น $E = 1.00489$ ซม.

$$V_o \Sigma_{ao} = (12.57142)(0.314)$$

$$= 3.94742 \text{ ซม.}^2$$

$$V_1 \Sigma_{a_1} = (308.79469)\ (8.5 \times 10^{-5})$$

$$= 0.02624 \text{ ซม.}^2$$

$$V_2 \Sigma_{a_2} = (2.64)(0.015)$$

$$= 0.0396 \text{ ซม.}^2$$

$$\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} = 0.01668$$

$$\frac{1}{f} = 1 + (0.01668)(1.19637) + (1.00489 - 1)$$

$$f = 0.97574$$

การคำนวณค่า p ก็เช่นเดียวกับหัวข้อ 6.1.1 โดยค่าคงที่ต่าง ๆ ก็ใช้กับรีโซแนนซ์ นิวตรอน

$$\Sigma_{a_1} = \frac{0.18}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = \frac{0.006}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{ao} = \frac{N_o\left[a + b\,\frac{S}{M}\right]}{\ln(E_1/E_2)}$$

$$\frac{S}{M} = \frac{2}{\rho_o R'_o}$$

$$= \frac{2}{(18.9)(2.00)} = 0.05291 \quad \text{ซม.}^2/\text{กรัม}$$

$$N_o = 4.6876 \times 10^{22} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3$$

$a = 8 \qquad b = 27.5$ (ตารางที่ 4.1)

ดังนั้น $$\Sigma_{ao} = \frac{0.44468}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$V_o\Sigma_{ao} = (12.571428)(0.44468)$$

$$= 5.59037 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_1\Sigma_{a1} = (308.79469)(0.18)$$

$$= 55.58304 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_2\Sigma_{a2} = (2.64)(0.006)$$

$$= 0.01584 \quad \text{ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a1} + V_2\Sigma_{a2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 9.94546$$

$$F_r = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)}{192}$$

แทนค่า $k_o = 0.44$ ซม.$^{-1}$ $R'_o = 2.00$ ซม.

ฉะนั้น $E_r = 3.36991$

$$\frac{1}{f_r} = 1 + (9.94546)(1.09467) + (3.36991 - 1)$$

$$f_r = 0.07019$$

$$p = \exp\left[-\frac{0.07019}{1 - 0.07019}\right]$$

$$= 0.92728$$

การคำนวณค่า k_∞ คำนวณได้จากสูตรสี่แฟกเตอร์ ดังสมการที่ (3.6)

$$k_\infty = \eta\varepsilon fp$$

ซึ่ง ε ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1.022 ถึงแม้ว่าในการคิดคำนวณ ถือว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้งสี่แท่งนี้เป็นแท่งเดียวก็ตาม ในความเป็นจริงจะต้องคำนวณจากรัศมีที่แท้จริงของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลโดยตรงจากปฏิกริยาฟิชชัน ส่วนค่า η ก็ยังคงเท่ากับ 1.32 ดังนั้น

$$k_\infty = (1.32)(1.022)(0.97574)(0.92728)$$

$$= 1.22061$$

การคำนวณขนาดวิกฤตของแกนเครื่องปฏิกรณ์ก็จะกำหนดค่า k_{eff} เท่ากับ 1.00 พอดี ซึ่งจะทำให้ค่าบัคคลิงที่คำนวณได้เป็นค่าวิกฤต (B_c^2) ดังนั้น จากสมการการฟุ้งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวก

$$B_m^2 = (k_\infty - 1)/(L^2 + \tau)$$

เมื่อ $L^2 = L_m^2(1 - f)(V/V_1)$

$L_m = 100$ ซม.

$f = 0.97574$

$V = (18)^2 = 324$ ซม.^{3}

$V_1 = 308.79469$ ซม.^{3}

ดังนั้น $L^2 = (100)^2(1 - 0.97574)(324)/(308.79469)$

$L^2 = 254.44642$ ซม.^{2}

แทนค่าในสมการข้างบน

$$B_m^2 = (1.22061 - 1)/(254.44642 + 120)$$

$$B_m^2 = 5.89173 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

เริ่มต้นที่ค่า $B_m^2 = 5.89173 \times 10^{-4}$ ซม. แล้วทดลองแทนค่าไป เรื่อย ๆ ใน สมการที่ (3.45.1) จนกระทั่งทำให้ค่า $k_{eff} = 1.00$

$$k_{eff} = k_\infty \exp(-B_m^2 \tau)/(1 + L^2 B_m^2)$$

ดังนั้น $B_m^2 = 5.56865 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

กำหนดให้ $D/H = 1.2$

$$R^2 = 9.33711/B_m^2$$

เพราะฉะนั้น

R	=	129.48844	ซม.
D	=	258.97688	ซม.
H	=	215.81406	ซม.

จำนวนแท่งเชื้อเพลิง $= n\pi R^2/(18)^2$

$= 4\pi(129.48844)^2/(324)$

$= 650$ แท่ง

มวลของโลหะยูเรเนียม	=	8.34	ตัน
มวลของน้ำชนิดหนัก	=	11.92	ตัน
มวลของอะลูมินัม	=	0.999	ตัน

นอกจากที่ได้แสดงขั้นตอนและวิธีการคำนวณโดยใช้โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง มีน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง โดยในที่นี้แต่ละมัดเชื้อเพลิงยังไม่มีชั้นของท่อความดัน ยังได้แสดงการคำนวณโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณค่าต่าง ๆ โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงออกไปทีละหนึ่งเซนติเมตร ทั้งแท่งเชื้อเพลิง 1, 3, 4, 6, 7 และ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด ดังตารางที่ 6.1 (ก) ถึง (ฉ)

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณโดยมีโลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง เมื่อ

(ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่ง

ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

L.	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
6	.986370895	.770835354	1.02571499	9.23055112E-05	278.05	165.78
7	.985009124	.831873196	1.105407	3.60493107E-04	26.46	22.15
8	.983411222	.871711164	1.15646527	5.02943443E-04	12.29	13.7
9	.981575265	.89904844	1.19050583	5.74816034E-04	7.95	11.36
10	.979500242	.918578114	1.21379535	6.04532356E-04	5.97	10.63
11	.977185943	.932994701	1.22993232	6.08406803E-04	4.88	10.61
12	.974632873	.943928973	1.2410955	5.96341304E-04	4.23	10.99
13	.971842192	.952412593	1.24866433	5.74381697E-04	3.81	11.67
14	.968815658	.959123113	1.25354617	5.4685449E-04	3.54	12.6
15	.965555588	.964519952	1.25635775	5.1621775E-04	3.36	13.77
16	.96206482	.968923318	1.25753062	4.84288899E-04	3.25	15.19
17	.958346676	.972561789	1.25737456	4.52284313E-04	3.19	16.86
18	.954404934	.975601994	1.25611726	4.20944071E-04	3.17	18.81
19	.950243794	.978167672	1.25392966	3.90683828E-04	3.18	21.06
20	.94586785	.980352244	1.25094276	3.61798493E-04	3.22	23.66
21	.941282065	.982227287	1.24725888	3.34533889E-04	3.28	26.63
22	.936491736	.983848378	1.24295942	3.08836308E-04	3.37	30.05
23	.931502475	.985259191	1.23811029	2.84786908E-04	3.49	33.96
24	.926320175	.986494426	1.23276582	2.62225518E-04	3.62	38.45
25	.920950987	.987581929	1.22697151	2.41267036E-04	3.79	43.6
26	.915401292	.988544251	1.22076611	2.21712668E-04	3.97	49.51
27	.909677676	.989399812	1.21418311	2.03557509E-04	4.19	56.3
28	.903786902	.990163771	1.20725191	1.86695601E-04	4.43	64.13
29	.897735886	.990848698	1.19999865	1.70923214E-04	4.72	73.23
30	.891531671	.991465084	1.19244684	1.56240888E-04	5.05	83.82
31	.885181408	.992021738	1.18461792	1.42654627E-04	5.42	96.1
32	.878692323	.992526104	1.1765316	1.29876516E-04	5.85	110.65
33	.872071702	.992984504	1.16820616	1.17724932E-04	6.38	129.25
34	.865326867	.993402335	1.1596587	1.06424524E-04	6.99	149.24
35	.858465151	.993784226	1.15090531	9.59059961E-05	7.71	174.48

(number of rod = 1 rod / cluster)

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง เท่ากับ 3 แท่งต่อหนึ่งมัด

ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
10	.984852165	.79767678	1.05979733	2.01499468E-04	93.1	50.91
11	.983851427	.834592226	1.10771665	3.49105916E-04	33.74	22.82
12	.982727496	.862454633	1.14338949	4.46375644E-04	19.61	16.05
13	.981478455	.883958699	1.17040878	5.08827483E-04	13.72	13.35
14	.980102734	.900878299	1.1911393	5.46689336E-04	10.62	12.11
15	.978599083	.914415296	1.20718301	5.66865413E-04	8.76	11.56
16	.97696654	.925405383	1.2196537	5.74227228E-04	7.56	11.41
17	.975204414	.934443221	1.2@934394	5.72294975E-04	6.73	11.53
18	.973312265	.941960759	1.2368295	5.63623124E-04	6.14	11.85
19	.971289887	.948277564	1.24253654	5.50262004E-04	5.71	12.33
20	.969137301	.953633984	1.24678582	5.33439696E-04	5.4	12.96
21	.966854737	.958213481	1.24982248	5.14291498E-04	5.17	13.73
22	.964442628	.962157975	1.2518365	4.93754133E-04	5.01	14.63
23	.9619016	.965578595	1.25297702	4.72335642E-04	4.9	15.66
24	.959232463	.968563325	1.25336255	4.50467916E-04	4.83	16.85
25	.9564362	.97118253	1.25308835	4.2864688E-04	4.8	18.18
26	.953513965	.973493012	1.25223179	4.0706331E-04	4.79	19.67
27	.950467071	.975541015	1.25085634	3.85926701E-04	4.81	21.34
28	.947296986	.977364488	1.24901467	3.65383865E-04	4.86	23.19
29	.944005322	.978994798	1.2467508	3.45433428E-04	4.93	25.25
30	.94059383	.980458054	1.24410195	3.26237127E-04	5.02	27.54
31	.937064396	.981776119	1.24109986	3.07828704E-04	5.13	30.07
32	.933419029	.982967416	1.23777184	2.90120773E-04	5.26	32.89
33	.929659855	.984047551	1.23414159	2.73310239E-04	5.41	36
34	.925789116	.985029814	1.23022989	2.57182488E-04	5.58	39.46
35	.921809154	.985925577	1.22605507	2.41914626E-04	5.77	43.28
36	.917722412	.986744616	1.22163349	2.27378023E-04	5.99	47.52
37	.913531424	.987495373	1.21697985	2.13440231E-04	6.23	52.28
38	.909238808	.988185166	1.21210745	2.00366467E-04	6.5	57.5
39	.904847259	.988820363	1.20702844	1.87820735E-04	6.8	63.38
40	.900359546	.989406526	1.20175399	1.75966676E-04	7.13	69.92

(number of rods = 3 rods / cluster)

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง เท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด

ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
11	.984479181	.789502041	1.04853908	1.60642467E-04	144.13	70.59
12	.98356301	.825420204	1.09522188	3.04352681E-04	46.44	27.69
13	.982539196	.853085993	1.13075241	4.0304118E-04	25.96	18.48
14	.981405862	.874806053	1.15820452	4.69750331E-04	17.79	14.89
15	.980161423	.892145415	1.17966333	5.13201762E-04	13.57	13.18
16	.978804559	.906192123	1.19657822	5.39423871E-04	11.07	12.34
17	.977334193	.917719679	1.20997937	5.52892113E-04	9.45	11.97
18	.975749474	.927289176	1.22061399	5.56865761E-04	8.34	11.92
19	.974049765	.935315085	1.22903404	5.53687655E-04	7.54	12.08
20	.972234625	.942108624	1.23565403	5.45192998E-04	6.97	12.42
21	.970303807	.947906953	1.24078996	5.32857836E-04	6.54	12.9
22	.96825724	.952893237	1.24468606	5.17706493E-04	6.22	13.51
23	.966095027	.957210667	1.24753346	5.00691122E-04	5.99	14.25
24	.963817436	.960972433	1.24948353	4.82251447E-04	5.82	15.11
25	.961424891	.964268926	1.25065741	4.62960401E-04	5.7	16.1
26	.95891797	.967173004	1.25115308	4.43259476E-04	5.62	17.21
27	.956297391	.9697439	1.25105054	4.23486316E-04	5.58	18.47
28	.953564016	.972030156	1.2504157	4.03796468E-04	5.58	19.86
29	.950718839	.974071844	1.24930339	3.84480559E-04	5.6	21.41
30	.947762982	.975902273	1.24775954	3.65478009E-04	5.64	23.13
31	.944697689	.977549306	1.24582302	3.46987892E-04	5.71	25.03
32	.941524325	.979036391	1.24352696	3.29077684E-04	5.8	27.12
33	.938244361	.980383368	1.24089983	3.11790155E-04	5.92	29.44
34	.934859382	.981607117	1.23796628	2.95148951E-04	6.05	31.99
35	.931371069	.982722065	1.23474785	2.79162993E-04	6.21	34.8
36	.927781203	.983740601	1.23126346	2.6392998E-04	6.38	37.88
37	.924091655	.984673415	1.22752992	2.49239208E-04	6.59	41.31
38	.920304383	.985529761	1.22356223	2.35273755E-04	6.81	45.07
39	.916421426	.986317687	1.21937387	2.21812245E-04	7.06	49.26
40	.912444898	.987044218	1.21497707	2.09130208E-04	7.33	53.84
41	.908376985	.987715502	1.21038301	1.96901152E-04	7.64	58.96
42	.904219938	.988336945	1.20560194	1.85297404E-04	7.98	64.61
43	.899976071	.988913311	1.20064333	1.74290751E-04	8.34	70.85
44	.895647748	.98944881	1.19551601	1.6375292E-04	8.75	77.83
45	.89123739	.989947177	1.19022823	1.53655961E-04	9.2	85.66

(number of rods = 4 rods / cluster)

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 6 แท่งต่อหนึ่งมัด

ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
13	.983337308	.794495489	1.05394702	1.69655859E-04	142.62	84.34
14	.982472006	.825625829	1.09427955	2.87828879E-04	55.65	29.74
15	.981514795	.850381463	1.12599241	3.72919924E-04	32.87	20.51
16	.980464016	.870358466	1.15121024	4.3308103E-04	23.08	16.61
17	.979318225	.886691045	1.17144253	4.74589479E-04	17.82	14.64
18	.978076186	.90020047	1.18778202	5.01803952E-04	14.62	13.59
19	.976736844	.911491882	1.20103372	5.18002014E-04	12.51	13.06
20	.975299321	.921018373	1.21180026	5.25624792E-04	11.04	12.86
21	.973762907	.92912419	1.22053945	5.26753885E-04	9.99	12.89
22	.972127046	.936074402	1.22760379	5.22840329E-04	9.2	13.1
23	.970391335	.942075611	1.2332681	5.14999795E-04	8.61	13.45
24	.968555511	.947290661	1.23774904	5.04183924E-04	8.16	13.94
25	.96661945	.951849228	1.2412193	4.91134551E-04	7.82	14.55
26	.96458316	.955855549	1.2438178	4.76525606E-04	7.57	15.27
27	.962446775	.959394149	1.24565741	4.60795829E-04	7.38	16.09
28	.960210552	.962534121	1.24683055	4.44274734E-04	7.25	17.04
29	.957874866	.965332364	1.24741359	4.27303317E-04	7.17	18.1
30	.955440205	.967836065	1.24747009	4.10150704E-04	7.12	19.28
31	.952907167	.970084607	1.24705335	3.93027675E-04	7.11	20.59
32	.950276457	.972111061	1.24620842	3.75997652E-04	7.13	22.04
33	.947548879	.973943352	1.24497361	3.59185648E-04	7.18	23.64
34	.944725339	.975605189	1.24338176	3.42685597E-04	7.26	25.4
35	.941806835	.9771168	1.24146118	3.26666368E-04	7.36	27.32
36	.938794457	.978495522	1.23923647	3.11076651E-04	7.49	29.43
37	.93568938	.979756284	1.23672912	2.95948991E-04	7.64	31.75
38	.932492867	.980911992	1.23395803	2.81303064E-04	7.81	34.29
39	.929206254	.981973851	1.23093997	2.67248362E-04	8.01	37.06
40	.925830961	.982951622	1.22768986	2.53686393E-04	8.23	40.1
41	.922368472	.983853837	1.2242211	2.40612441E-04	8.48	43.44
42	.918820347	.984687987	1.22054577	2.28017049E-04	8.76	47.12
43	.915188207	.98546066	1.21667486	2.1598715E-04	9.07	51.15
44	.911473735	.986177674	1.2126184	2.04507045E-04	9.4	55.54
45	.907678673	.986844182	1.20838561	1.93459149E-04	9.77	60.4

(number of rods = 6 rods / cluster)

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง เท่ากับ 7 แท่งต่อหนึ่งมัด

ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
14	.982672529	.801962045	1.06313265	1.93277571E-04	117.99	52.87
15	.981806335	.830392104	1.09985103	2.9716287E-04	53.91	28.29
16	.980852718	.853293901	1.12908664	3.72841795E-04	33.71	20.46
17	.979810135	.871985128	1.15259261	4.27178834E-04	24.35	16.9
18	.978677239	.887419531	1.17163759	4.64971262E-04	19.12	15.04
19	.97745286	.900299201	1.18715524	4.9018162E-04	15.86	14.03
20	.976135995	.911149171	1.1998436	5.05388734E-04	13.67	13.5
21	.974725804	.920367812	1.21023222	5.12972945E-04	12.12	13.29
22	.973221594	.928261433	1.21872823	5.14352912E-04	11	13.31
23	.971622815	.935068452	1.22564849	5.1108705E-04	10.16	13.51
24	.969929053	.94097653	1.23124247	5.04149615E-04	9.53	13.85
25	.968140027	.946134901	1.23570859	4.94388632E-04	9.04	14.31
26	.966255581	.950663377	1.23920628	4.82470416E-04	8.67	14.9
27	.964275679	.954658987	1.24186476	4.68914441E-04	8.39	15.59
28	.962200402	.958200949	1.2437897	4.54320823E-04	8.18	16.39
29	.960029944	.96135443	1.24506819	4.388924E-04	8.03	17.31
30	.957764608	.964173411	1.24577257	4.22952438E-04	7.93	18.34
31	.955404803	.9667029	1.24596335	4.06759046E-04	7.88	19.48
32	.952951037	.968980651	1.24569155	3.90516949E-04	7.86	20.74
33	.950403917	.971038514	1.24500043	3.74287131E-04	7.88	22.14
34	.947764148	.972903506	1.24392693	3.5829483E-04	7.92	23.68
35	.94503252	.974598653	1.24250283	3.42536024E-04	8	25.36
36	.942209918	.976143678	1.2407556	3.27082892E-04	8.1	27.21
37	.939297307	.977555546	1.23870916	3.11988244E-04	8.23	29.25
38	.936295736	.978848915	1.23638446	2.97389205E-04	8.39	31.46
39	.93320633	.980036498	1.23379996	2.83210271E-04	8.57	33.88
40	.930030292	.981129362	1.23097206	2.69465806E-04	8.78	36.54
41	.926768896	.982137176	1.22791535	2.562621E-04	9.01	39.43
42	.923423483	.98306842	1.22464295	2.43499063E-04	9.27	42.61
43	.919995459	.98393055	1.22116671	2.31271619E-04	9.55	46.06
44	.916486294	.984730144	1.21749738	2.19470842E-04	9.87	49.86
45	.912897517	.985473024	1.21364478	2.08084886E-04	10.22	54.04
46	.909230709	.986164354	1.20961795	1.97199726E-04	10.6	58.61
47	.905487506	.986808731	1.20542522	1.86799787E-04	11.01	63.61
48	.901669592	.987410253	1.20107433	1.76768428E-04	11.47	69.14
49	.897778698	.987972585	1.1965725	1.6708834E-04	11.98	75.27
50	.893816593	.988499012	1.19192651	1.57941864E-04	12.52	81.93

(number of rods = 7 rods / cluster)

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด

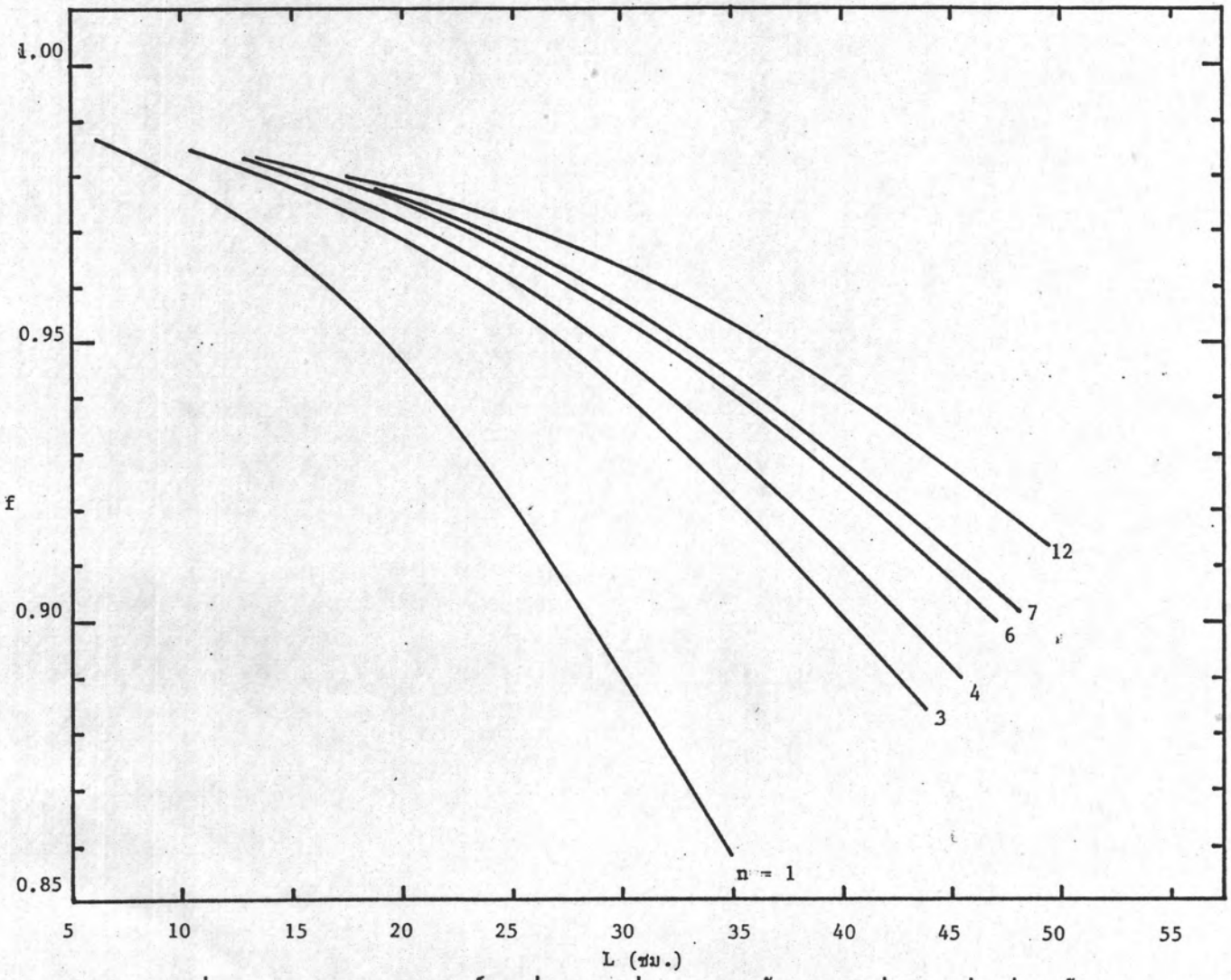
ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.1 CM.

U-metal + D-2 O + AL-(cladding) SQUARE LATTICE

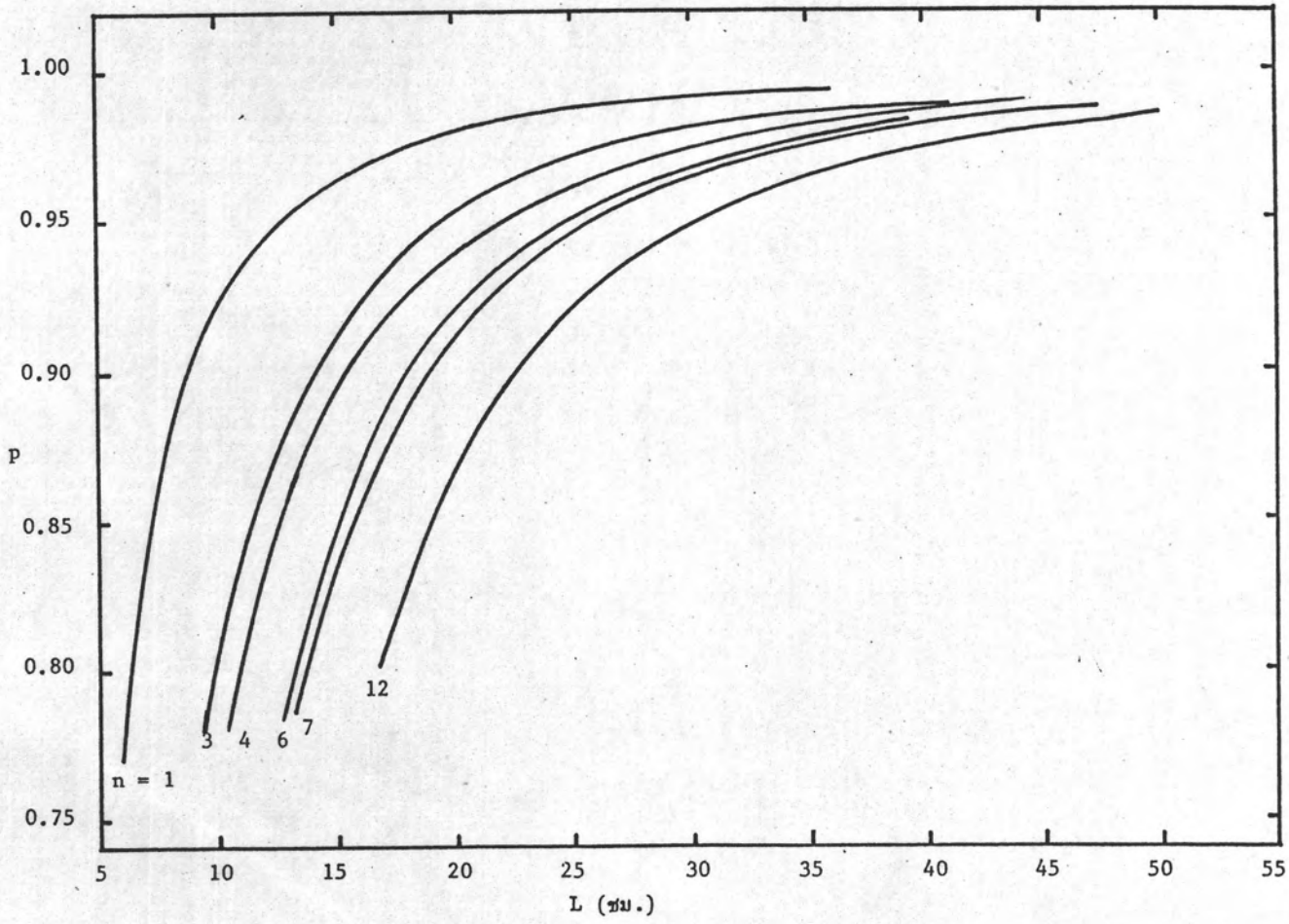
L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
17	.980630461	.802470793	1.06159641	1.72881778E-04	162.15	60.9
18	.979815326	.827468187	1.09375578	2.57347829E-04	79.64	34.21
19	.978926317	.848176718	1.1201113	3.2190549E-04	51.09	24.86
20	.977962118	.865501208	1.14186441	3.70608059E-04	37.32	20.41
21	.97692155	.880124521	1.15992161	4.06620581E-04	29.46	17.97
22	.975803567	.892568558	1.1749755	4.32454354E-04	24.47	16.55
23	.974607244	.903236982	1.18756167	4.50178085E-04	21.08	15.72
24	.973331776	.91244552	1.19809891	4.61206394E-04	18.67	15.28
25	.971976469	.920443697	1.20691812	4.66869333E-04	16.89	15.1
26	.970540738	.927430632	1.21428333	4.6816667E-04	15.55	15.13
27	.969024101	.933566654	1.22040713	4.66010523E-04	14.52	15.31
28	.967426177	.938981931	1.22546214	4.61059034E-04	13.72	15.63
29	.965746682	.943782975	1.22958963	4.53943191E-04	13.1	16.08
30	.963985423	.948057562	1.2329061	4.44888417E-04	12.61	16.63
31	.962142302	.951878525	1.23550829	4.34532111E-04	12.23	17.28
32	.960217306	.955306672	1.23747709	4.23137972E-04	11.95	18.04
33	.958210509	.958393076	1.23888052	4.10907875E-04	11.74	18.9
34	.956122066	.96119087	1.23977618	3.98191731E-04	11.59	19.87
35	.953952216	.96370667	1.2402131	3.85095721E-04	11.5	20.94
36	.951701272	.966001712	1.24023326	3.71689193E-04	11.47	22.13
37	.949369628	.968092768	1.23987281	3.58310528E-04	11.47	23.42
38	.946957748	.970002879	1.23916304	3.44872026E-04	11.51	24.85
39	.944466168	.971751964	1.23813118	3.31564097E-04	11.6	26.41
40	.941895495	.973357303	1.23680103	3.18358771E-04	11.72	28.11
41	.939246403	.974833947	1.23519354	3.05412699E-04	11.87	29.96
42	.936519629	.976195048	1.23332721	2.92669676E-04	12.06	31.98
43	.933715974	.977452142	1.23121846	2.80262786E-04	12.27	34.17
44	.930836299	.978615374	1.22888197	2.68116229E-04	12.53	36.56
45	.927881526	.979693698	1.22633089	2.5634684E-04	12.81	39.15
46	.924852629	.980695034	1.2235771	2.44865396E-04	13.13	41.97
47	.921750637	.981626414	1.22063132	2.33777701E-04	13.49	45.04
48	.918576634	.982494091	1.21750336	2.23085528E-04	13.87	48.36
49	.915331749	.983303644	1.21420216	2.12687365E-04	14.3	51.99
50	.91201716	.98406006	1.21073596	2.026790B5E-04	14.76	55.93

(number of rods = 12 rods / cluster)

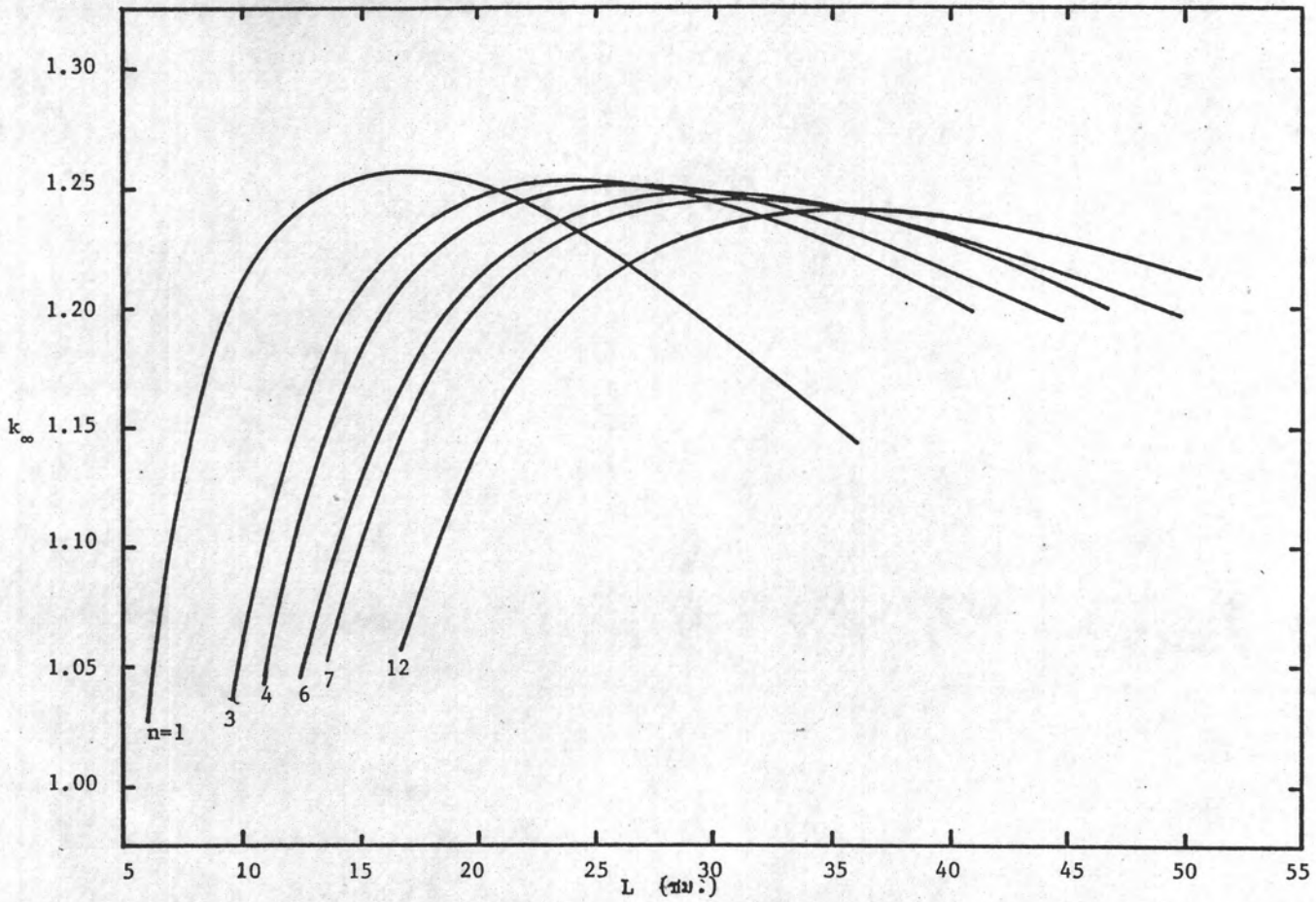
ในตารางที่ 6.1 (ก) ถึง (ฉ) L หมายถึง ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ค่าบัคคลิง (B^2) ก็มีหน่วยเป็น ซม.$^{-2}$ มวลของโลหะยูเรเนียม และน้ำชนิดหนักมีหน่วยเป็นต้น และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงกับค่าต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.7



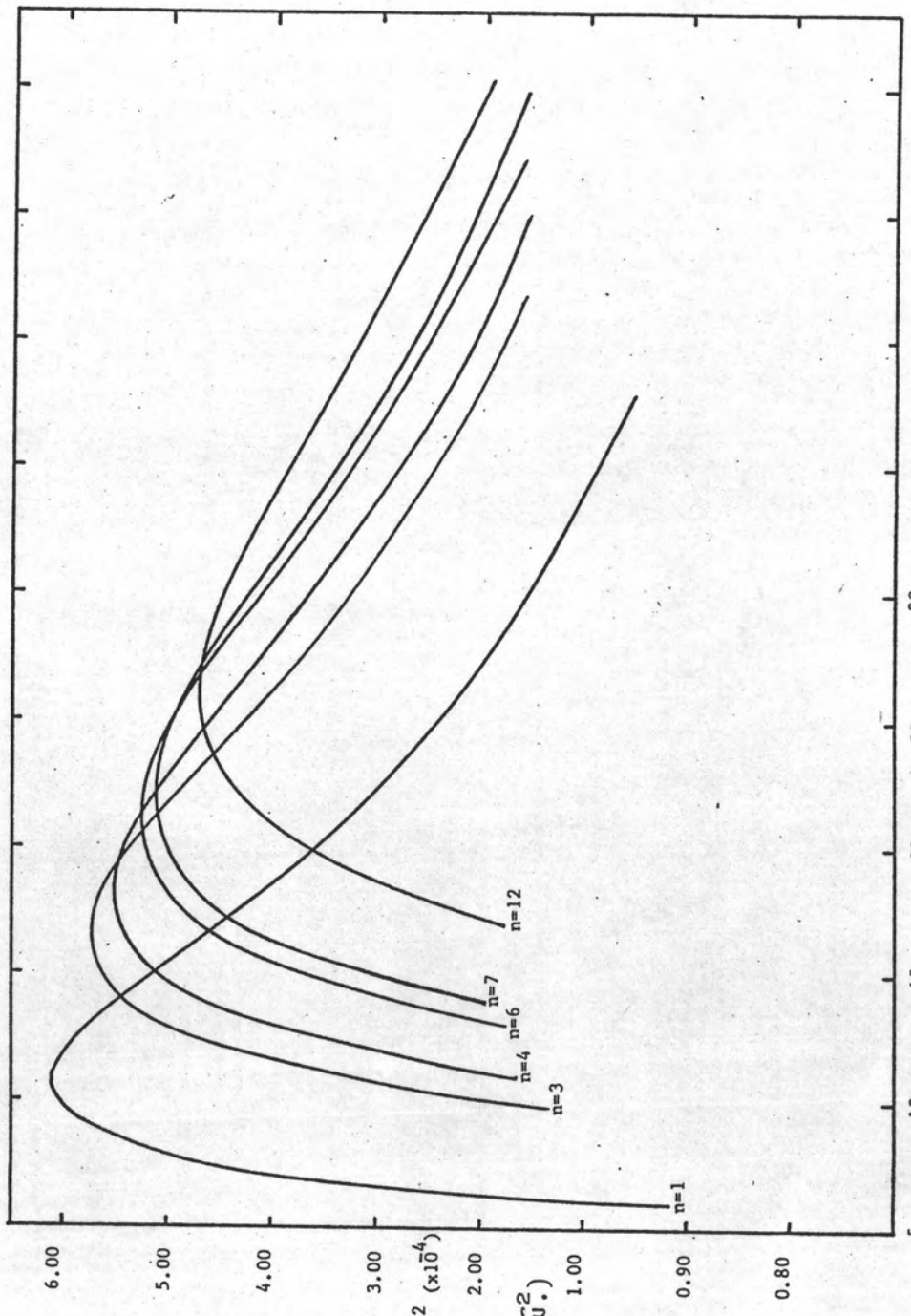
รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า f ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า p ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า k_∞ ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด



รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า B^2 ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าที่จุดสูงสุดของค่า B^2 นั้น จะทำให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กที่สุด ดังนั้น การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์จึงมักเลือกที่จุดสูงสุดของบัคคลิง (B^2)

6.2 การคำนวณโดยใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

กำหนดให้จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด การคิดคำนวณก็เช่นเดียวกับหัวข้อ 6.1.2 ซึ่งจะต้องคิดรวมสี่แท่งให้มีพื้นที่เท่ากับแท่งใหม่แท่งหนึ่ง ความหนาของอะลูมินัมก็เช่นเดียวกัน ซึ่ง

$R_o' = 2.0$ ซม. และ $x = 0.2$ ซม.

คำนวณค่า f ที่ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 17 ซม.

$$R_1 = \frac{17}{\sqrt{\pi}} \quad \text{ซม.}$$

$$V_o = 12.57142 \quad \text{ซม.}^3$$

$$V_1 = 273.7885 \quad \text{ซม.}^3$$

$$V_2 = 2.64 \quad \text{ซม.}^3$$

จากสมการที่ (4.20)

$$\frac{1}{f} = 1 + \left(\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} \right) F + (E - 1)$$

เมื่อ Σ_{ao}, Σ_{a_1} และ Σ_{a_2} คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการจับนิวตรอนของยูเรเนียมไดออกไซด์ น้ำชนิดหนัก และอะลูมินัม ตามลำดับ มีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$ (ดูภาคผนวก ก.)

$\Sigma_{ao} = 0.17$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{a_1} = 8.5 \times 10^{-5}$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{a_2} = 0.015$ ซม.$^{-1}$

จากสมการที่ (4.23)

$$F = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$$

ซึ่ง $k_o = 1/L_o$

เมื่อ L_o คือ ระยะการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในยูเรเนียมไดออกไซด์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$L_o = \sqrt{\frac{D_o}{\Sigma_{ao}}}$$

เมื่อ D_o คือ สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในยูเรเนียมไดออกไซด์ โดยหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$D_o = \frac{1}{3}\left\{\frac{1}{\left[1 - \bar{\mu}_o(U)\right]\Sigma_s(U) + \left[1 - \bar{\mu}_o(O)\right]\Sigma_s(O)}\right\}$$

ซึ่ง $\bar{\mu}_o = \frac{2}{3A}$

$$\bar{\mu}_o(U) = \frac{2}{3(237.9787)} = 2.80137 \times 10^{-3}$$

$$\bar{\mu}_o(O) = \frac{2}{3(18)} = 0.03703$$

ดูภาคผนวก ก.

$$\Sigma_s(U) = 0.397 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_s(O) = 21 \times 10^{-5} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

ดังนั้น

$$1 - \bar{\mu}_o(U) = 0.99719$$

$$1 - \bar{\mu}_o(O) = 0.96296$$

$$D_o = \frac{1}{3}\left\{\frac{1}{(0.99719)(0.397) + (0.96296)(21 \times 10^{-5})(2)}\right\}$$

$$= 0.841129$$

ดังนั้น $L_o = \sqrt{0.84112/0.17}$

$$= 2.22494$$

$$k_o = 1/(2.22494)$$

$$= 0.44945$$

แทนค่าในสมการที่ (4.23)

$$F = 1.09760$$

จากสมการที่ (4.24)

$$E = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2}\ln\frac{R_1}{R_o'} + \frac{1}{4}\left(\frac{R_o'}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

ซึ่ง $k_1 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

$R_1 = 9.58929$ ซม.

$R_o' = 2.0$ ซม.

ดังนั้น $E = 1.00413$

$V_o\Sigma_{ao} = (12.57142)(0.17)$

$= 2.13714$ ซม.^{2}

$V_1\Sigma_{a_1} = (273.78857)(8.5 \times 10^{-5})$

$= 0.02327$ ซม.^{2}

$V_2\Sigma_{a_2} = (2.64)(0.015)$

$= 0.0396$ ซม.^{2}

$$\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} = 0.02941$$

$$\frac{1}{f} = 1 + (0.02941)(1.09670) + (1.00413 - 1)$$

ดังนั้น $f = 0.96326$

การคำนวณหาค่า p ก็ต้องคำนวณโดยใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ ในช่วงพลังงานกำธร โดยจากภาคผนวก ก.

$$\Sigma_{a_1} = \frac{0.18}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = \frac{0.006}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{ao} = \frac{N_o \left[a + b\ S/M \right]}{\ln(E_1/E_2)}$$

เมื่อ N_o คือ จำนวนอะตอมของยูเรเนียมไดออกไซด์ในหนึ่งหน่วยปริมาตร

S คือ พื้นที่ผิวด้านข้างของแท่งเชื้อเพลิง (ซม.^{2})

M คือ มวลของแท่งเชื้อเพลิง (กรัม)

$$\frac{S}{M} = \frac{2}{\rho_o R_o'} \quad (4)$$

ρ_o คือ ความหนาแน่นของยูเรเนียมไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 10.38 กรัม/ซม.^{3}

ดังนั้น $\frac{S}{M} = \frac{2}{(10.38)(2)} = 0.09633$ ซม.^{2}/กรัม

จากตารางที่ 4.1 สำหรับยูเรเนียมไดออกไซด์

$a = 11.0$ $b = 24.5$

$$N_o = \rho_o N_A / W$$

W คือ เลขมวลของยูเรเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 269.9787

N_A คือ อาโวกาโดร นัมเบอร์ $\left[6.02 \times 10^{23} \quad (\text{กรัม-โมล})^{-1} \right]$

$$N_o = \frac{(10.38)(6.02 \times 10^{23})}{269.9787}$$

$$= 2.31453 \times 10^{22} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3$$

เพราะฉะนั้น $\Sigma_{ao} = \frac{0.30974}{\ln(E_1/E_2)}$ ซม.$^{-1}$

$$V_o\Sigma_{ao} = (12.57142)(0.30974)$$

$$= 3.89391 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_1\Sigma_{a_1} = (273.78857)(0.18)$$

$$= 49.28194 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_2\Sigma_{a_2} = (2.64)(0.006)$$

$$= 0.01584 \quad \text{ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 12.66021$$

จากสมการที่ (4.53)

$$p = \exp(-f_r/1 - f_r)$$

และค่า f_r ก็ได้จากสมการที่ (4.47)

$$\frac{1}{f_r} = 1 + \left(\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}}\right) F_r + (E_r - 1)$$

โดย $F_r = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$

และจากตารางที่ 4.2 สำหรับยูเรเนียมไดออกไซด์ $k_o = 0.31$ ซม.$^{-1}$

และ $R'_o = 2.0$ ซม.

ดังนั้น $F_r = 1.04728$

และ $$E_r = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2}\ln\frac{R_1}{R_o'} + \frac{1}{4}\left(\frac{R_o'}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

ในตารางที่ 4.3 สำหรับน้ำชนิดหนัก $k_1 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

ดังนั้น $E_r = 3.00201$

$$\frac{1}{f_r} = 1 + (12.66021)(1.04728) + (3.00201 - 1)$$

ดังนั้น $p = 0.93657$

สำหรับค่า k_∞ ก็คำนวณได้จากสูตรสี่แฟกเตอร์ในสมการที่ (3.6) โดยในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1.022 เท่ากับของโลหะยูเรเนียม ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงยังมีค่าน้อย ดังนั้นจึงทำให้เส้นกราฟ k/Σ_t ของทั้งยูเรเนียมไดออกไซด์กับโลหะยูเรเนียมทับกัน ดังรูปที่ 4.4 ส่วน $\eta = 1.32$ เช่นกัน

$$k_\infty = \eta\epsilon f p$$
$$= (1.32)(1.022)(0.96485)(0.93657)$$
$$= 1.21906$$

คำนวณขนาดวิกฤตของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ก็กำหนดให้ $D/H = 1.2$ และ $k_{eff} = 1.00$ จากสมการการฟุ้งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวก ดังสมการที่ (3.43)

$$B_m^2 = (k_\infty - 1)/(L^2 + \tau)$$

และ $$L^2 = L_m^2(1 - f)(V/V_1)$$
$$= (100)^2(1 - 0.96485)(289)/(273.788572)$$
$$= 370.989$$

แทนค่า $$B_m^2 = (1.21906 - 1)/(370.989 + 120)$$
$$= 4.46178 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

เริ่มต้นจากค่า $B_m^2 = 4.46178 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$ ลองแทนค่าในสมการที่ (3.45.1)

จนทำให้ $k_{eff} = 1.00$

ดังนั้น $B_m^2 = 4.26478 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

แต่เนื่องจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ อยู่ในกรณีวิกฤต ดังนั้น

$$B_m^2 = B_g^2 = B_c^2$$

โดย $$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2.405}{R}\right)^2$$

แต่ $D/H = 1.2$ $\therefore R^2 = 9.33711/B_g^2$

$\therefore R = 147.96456$ ซม.

$D = 295.92912$ ซม.

$H = 246.60760$ ซม.

จำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด $= n\pi R^2/(17)^2$

$= 4\pi(147.96456)^2/(289)$

$= 952$ แท่ง

มวลวิกฤตของยูเรเนียมไดออกไซด์ = 7.66179 ตัน

มวลของน้ำชนิดหนัก = 17.68302 ตัน

มวลของอะลูมินัมทั้งหมด = 1.67346 ตัน

สำหรับผลการคำนวณของจำนวนแท่งเชื้อเพลิง 1, 3, 6, 7 และ 12 แท่งต่อหนึ่งมัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6. 4 ซึ่งในที่นี้ได้แสดงเฉพาะที่ค่าสูงสุดของค่าบัคคลิงเท่านั้น และนอกจากนี้ก็ยังได้แสดงผลการคำนวณโดยการเปลี่ยนวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเป็นเซอร์โคเนียม ดังตารางที่ 6. 5 และตารางที่ 6. 6

6.3 การคำนวณโดยใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วยนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง โดยมีชั้นของท่อความดันเป็นอะลูมินัม

กำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงเป็น 2 ซม. ความหนาของชั้นอะลูมินัมที่หุ้มแท่งเชื้อเพลิงเป็น 0.1 ซม. ส่วนความหนาของชั้นท่อความดันเป็น 0.15 ซม. โดยกำหนดระยะห่างระหว่างแท่งเชื้อเพลิงกับท่อความดันเป็น 0.4 ซม.

ในการคำนวณลักษณะนี้จะยุ่งยากขึ้นอีก เพราะว่า นอกจากจะมีชั้นของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีชั้นของท่อความดัน อีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นการกระจายของฟลักซ์จึงเปลี่ยนไปอีกเล็กน้อย แต่เนื่องจากเรากำหนดให้ชั้นท่อความดันบางมาก การเปลี่ยนแปลงจึงถือว่าน้อยมากไม่มีผลต่อการคำนวณ สูตรและขั้นตอนการคำนวณจึงสามารถใช้ได้ เหตุที่มีชั้นท่อความดันก็เพราะว่าในการสร้างจริงนั้นจะต้องมีการระบายความร้อน เพื่อนำประโยชน์จากความร้อนนี้ไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า และเพื่อรักษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ให้คงเดิมทั้งนี้ก็เพราะว่า ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นโดยไม่มีการระบายออก ความร้อนก็จะทำให้ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณไว้ตอนเริ่มต้นตามที่ออกแบบไว้ลดลงและทำให้เครื่องปฏิกรณ์ดับ สำหรับการระบายความร้อนนั้น เราใช้น้ำชนิดหนักเป็นตัวระบายความร้อน ซึ่งสะดวกและง่ายในการคิดคำนวณ

กำหนดให้จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด ดังรูปที่ 6.8 และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นท่อความดันเท่ากับ 6.4 ซม.

คำนวณค่า f ที่ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 19 ซม.

$R_1 = 10.71960$ ซม.

ปริมาตรของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง $= 4\pi\left[(1 + 0.1)^2 - 1^2\right]$

$= 2.64$ ซม.^{3}

ปริมาตรของท่อความดัน $= \pi\left[(3.2 + 0.15)^2 - (3.2)^2\right]$

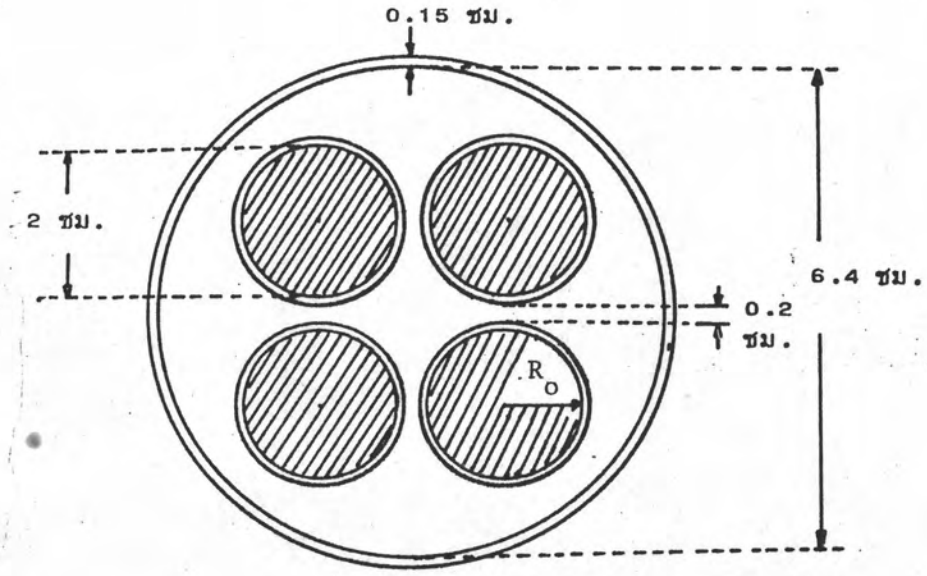
$= 3.08785$ ซม.^{3}

ดังนั้น $V_2 = 2.64 + 3.08785$

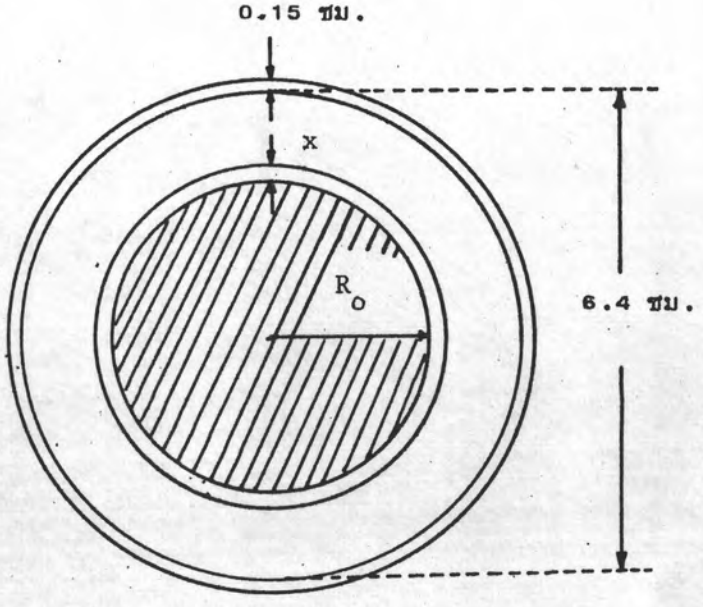
$= 5.72785$ ซม.^{3}

และ $V_o = 4\pi(1)^2$

$= 12.57142$ ซม.^{3}



รูปที่ 6.8 (ก) แสดงจำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่ง ต่อหนึ่งมัด โดยมีท่อความดัน



รูปที่ 6.8 (ข) แสดงแนวการคิดคำนวณโดยรวมเอา 4 แท่ง เป็นแท่งเดียว

$$V_1 = (19)^2 - V_o - V_1$$

$$= 342.70071 \quad \text{ซม.}^3$$

และในทำนองเดียวกัน

$$R_o' = \sqrt{n}\,(R_o)$$

$$= \sqrt{4}\,(1)$$

$$= 2.0 \quad \text{ซม.}$$

และ $X = 0.2$ ซม.

จากสมการที่ (4.20)

$$\frac{1}{f} = 1 + \left(\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}}\right)F + (E - 1)$$

โดย Σ_{ao}, Σ_{a_1}, Σ_{a_2} คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการจับนิวตรอนของยูเรเนียมไดออกไซด์ น้ำชนิดหนัก และอะลูมินัมตามลำดับ (ซม.^{-1}) (ดูภาคผนวก ก)

$$\Sigma_{ao} = 0.17 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_1} = 8.5 \times 10^{-5} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = 0.015 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

จากสมการที่ (4.23)

$$F = 1 + \frac{(k_o R_o')^2}{8} - \frac{(k_o R_o')^4}{192}$$

ซึ่ง $k_o = 1/L_o$

เมื่อ L_o คือ ระยะการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในยูเรเนียมไดออกไซด์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.12)

$$L_o = \sqrt{D_o/\Sigma_{ao}}$$

เมื่อ D_o คือ สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจายของเทอร์มัลนิวตรอนในยูเรเนียมไดออกไซด์ โดยหาได้จากสมการที่ (2.5)

$$D_o = \frac{1}{3}\left\{\frac{1}{\left[1-\bar{\mu}_o(U)\right]\Sigma_s(U) + \left[1-\bar{\mu}_o(O)\right]\Sigma_s(O)}\right\}$$

ซึ่ง $\bar{\mu}_o = \frac{2}{3A}$

$$\bar{\mu}_o(U) = \frac{2}{3(237.9789)} = 2.80137 \times 10^{-3}$$

$$\bar{\mu}_o(O) = \frac{2}{3(18)} = 0.03703$$

ดูภาคผนวก ก.

$$\Sigma_s(U) = 0.397 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_s(O) = 21 \times 10^{-5} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

ดังนั้น

$$1-\bar{\mu}_o(U) = 0.99719$$

$$1-\bar{\mu}_o(O) = 0.96296$$

$$D_o = \frac{1}{3}\left\{\frac{1}{(0.99719)(0.39) + (0.96296)(21 \times 10^{-5})(2)}\right\}$$

$$= 0.84112$$

ดังนั้น $L_o = \sqrt{0.84112/0.18}$

$$= 2.22494 \quad \text{ซม.}$$

$$k_o = 1/(2.22494)$$

$$= 0.44945 \quad \text{ซม.}$$

แทนค่าจะได้เป็น

$$F = 1.09760$$

จากสมการที่ (4.2)

$$E = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2}\ln\frac{R_1}{R_o'} + \frac{1}{4}\left(\frac{R_o'}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

ซึ่ง $k_1 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

เมื่อแทนค่าจะได้

$$E = 1.00573$$

$$V_o\Sigma_{ao} = (12.57142)(0.17)$$

$$= 2.13714 \text{ ซม.}^2$$

$$V_1\Sigma_{a_1} = (342.70071)(8.5 \times 10^{-5})$$

$$= 0.02912 \text{ ซม.}^2$$

$$V_2\Sigma_{a_2} = (5.72785)(0.015)$$

$$= 0.08591 \text{ ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a_1} + V_2\Sigma_{a_2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 0.05383$$

$$\frac{1}{f} = 1 + (0.05383)(1.09760) + (1.00573 - 1)$$

ดังนั้น $f = 0.93912$

การคำนวณค่า p ก็ต้องคำนวณโดยใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ ในช่วงพลังงานกำธร

โดย $\Sigma_{a_1} = \frac{0.18}{\ln(E_1/E_2)}$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{a_2} = \frac{0.006}{\ln(E_1/E_2)}$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{ao} = \frac{N_o\left[a + b\ S/M\right]}{\ln(E_1/E_2)}$

เมื่อ N_o คือ จำนวนอะตอมของยูเรเนียมไดออกไซด์ในหนึ่งหน่วยปริมาตร

S คือ พื้นที่ผิวด้านข้างของแท่งเชื้อเพลิง (ซม.^{2})

M คือ มวลของแท่งเชื้อเพลิง (กรัม)

$$\frac{S}{M} = \frac{2}{\rho_o R'_o}$$

ρ_o คือ ความหนาแน่นของยูเรเนียมไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 10.38 กรัม/ซม.^{3}

ดังนั้น $$\frac{S}{M} = \frac{2}{(10.38)(2)}$$

$$= 0.09633 \quad \text{ซม.}^2/\text{กรัม}$$

จากตารางที่ 4.1 สำหรับยูเรเนียมไดออกไซด์

$a = 11.0 \qquad b = 24.5$

$$N_o = \frac{\rho_o N_A}{W}$$

W คือ เลขมวลของยูเรเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 269.978

N_A คือ อาโวกาโดร นัมเบอร์ $\left[6.02 \times 10^{23} \quad (\text{กรัม-โมล})^{-1} \right]$

$$N_o = \frac{(10.38)(6.02 \times 10^{23})}{269.9787}$$

$$= 2.314538 \times 10^{22} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3$$

เพราะฉะนั้น $$\Sigma_{ao} = \frac{0.30974}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$V_o \Sigma_{ao} = (12.57142)(0.30974)$$

$$= 3.89391 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_1 \Sigma_{a_1} = (342.70071)(0.18)$$

$$= 61.68612 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_2 \Sigma_{a_2} = (5.72785)(0.006)$$

$$= 0.03436 \quad \text{ซม.}^2$$

$$\frac{V_1\Sigma_{a1} + V_2\Sigma_{a2}}{V_o\Sigma_{ao}} = 15.85050$$

จากสมการที่ (4.53)

$$p = \exp\left[- \frac{f_r}{1 - f_r} \right]$$

และค่า f_r ก็ได้จากสมการที่ (4.47)

$$\frac{1}{f_r} = 1 + \left(\frac{V_1\Sigma_{a1} + V_2\Sigma_{a2}}{V_o\Sigma_{ao}} \right) F_r + (E_r - 1)$$

โดย $$F_r = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$$

และจากตารางที่ 4.2 สำหรับยูเรเนียมไดออกไซด์ $k_o = 0.31$ ซม.$^{-1}$

$$F_r = 1 + \frac{[(0.31)(2)]^2}{8} - \frac{[(0.31)(2)]^4}{192}$$

$$F_r = 1.04728$$

และ $$F_r = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{R_1^2 - R_o'^2}\left[\ln \frac{R_1}{R'_o} + \frac{1}{4}\left(\frac{R'_o}{R_1}\right)^2 - 0.75 \right]$$

ในตารางที่ 4.3 สำหรับน้ำชนิดหนัก $k_1 = 0.01$ ซม.$^{-1}$

ดังนั้น $E_r = 3.77575$

$$\frac{1}{f_r} = 1 + (15.85050)(1.04728) + (3.77575 - 1)$$

$$f_r = 0.04907$$

ดังนั้น $p = 0.94969$

สำหรับค่า k_∞ ก็คำนวณได้จากสูตรสี่แฟกเตอร์ในสมการที่ (3.6) โดย ε ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1.022 เท่ากับของโลหะยูเรเนียม ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ขนาดเส้น

ผ่าศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงยังมีค่าน้อย ดังนั้น จึงทำให้เส้นกราฟ k/Σ_t ของทั้งยูเรเนียมไดออกไซด์กับโลหะยูเรเนียมทับกัน ดังรูปที่ 4.4 ส่วน $\eta = 1.32$ เช่นกัน

$$k_\infty = \eta\epsilon fp$$

$$= (1.32)(1.022)(0.93912)(0.94969)$$

$$= 1.20318$$

คำนวณหาขนาดวิกฤตของแกนเครื่องปฏิกรณ์ กำหนดให้ $D/H = 1.2$ และ $k_{eff} = 1.00$ จากสมการการฟุ้งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวก ดังสมการที่ (3.43)

$$B_m^2 = (k_\infty - 1)/(L^2 + \tau)$$

แต่ $L^2 = L_m^2(1 - f)(V/V_1)$

$$= (100)^2(1 - 0.93912)\ (361)/(342.70071)$$

$$= 641.22982 \quad \text{ซม.}^2$$

แทนค่า $B_m^2 = (1.20318 - 1)/(641.22982 + 120)$

$$= 2.66919 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

เริ่มต้นจากค่า $B_m^2 = 2.66919 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$ ลองแทนค่าในสมการที่ (3.45.1) จนทำให้ $k_{eff} = 1.00$

ดังนั้น $B_m^2 = 2.59319 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

เนื่องจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ อยู่ในกรณีวิกฤต ดังนั้น

$$B_m^2 = B_g^2 = B_c^2$$

โดย $B_g^2 = \left[\frac{\pi}{H}\right]^2 + \left[\frac{2.405}{R}\right]^2$

แต่ $D/H = 1.2$ $\therefore R^2 = 9.33711/B_g^2$

$\therefore R = 189.75311$ ซม.

$D = 379.50623$ ซม.

$H = 316.25519$ ซม.

จำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด	=	1,254	แท่ง
มวลวิกฤตของยูเรเนียมไดออกไซด์	=	12.93	ตัน
มวลของน้ำชนิดหนัก	=	37.37	ตัน
มวลของอะลูมินัมทั้งหมด	=	6.13	ตัน

การคำนวณกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ กำหนดให้ความร้อนที่ระบายออกมา (heat dissipation) จากแท่งเชื้อเพลิง โดยคิดเป็นวัตต์ต่อ ซม.^{2} ไม่รวมพื้นที่ผิวหัวและท้ายของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเป็น

โลหะยูเรเนียม = 30 วัตต์/ซม.^{2}

ยูเรเนียมไดออกไซด์ = 25 วัตต์/ซม.^{2}

ดังนั้นกำลังที่ได้ออกมา = $(2\pi R_o H)$ (จำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด) (25×10^{-6})

$= 2\pi(1)(316.25)(1254)(25 \times 10^{-6})$

$= 62.29$ เมกกะวัตต์

นอกจากที่ได้แสดงวิธีการและผลการคำนวณนี้แล้วยังได้คำนวณโดยใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ คำนวณค่าต่าง ๆ ซึ่งเพิ่มระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงขึ้นทีละหนึ่งเซนติเมตร และการออกแบบนี้จะเลือกสนใจที่ค่า k_∞ มากกว่า 1 ขึ้นไปเท่านั้น และจุดที่สนใจมากที่สุดก็คือ ค่าสูงสุดของค่าบัคคลิง ดังตารางที่ 6.2 (ก) ถึง (ฉ)

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณโดยมียูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน เมื่อ

(ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่ง

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
6	.937132669	.820794076	1.03767205	4.18624094E-05	500	517.79
7	.935078855	.870981706	1.09870752	1.14335177E-04	81.38	119.95
8	.932692079	.902665383	1.13576872	1.56235726E-04	39	77.22
9	.929973696	.923956494	1.15916968	1.79428256E-04	25.04	63.93
10	.926926285	.93895688.	1.17412862	1.9111331E-04	18.45	58.93
11	.923553522	.949924289	1.18352078	1.9520938E-04	14.77	57.64
12	.91986009	.958185999	1.18903989	1.94281888E-04	12.5	58.47
13	.915851593	.964564353	1.19173897	1.89737486E-04	11.03	60.93
14	.911534478	.969591159	1.19230283	1.82949808E-04	10.05	64.64
15	.906915973	.973622826	1.19119435	1.74646376E-04	9.38	69.55
16	.902004019	.976905528	1.18873724	1.6522088E-04	8.96	75.8
17	.896807206	.979613754	1.18516493	1.55303717E-04	8.71	83.38
18	.891334715	.981873985	1.18065063	1.45008206E-04	8.61	92.6
19	.885596252	.983779719	1.17532632	1.34762034E-04	8.63	103.54
20	.879601991	.985401286	1.16929517	1.24229355E-04	8.8	117.15
21	.873362517	.986792408	1.16263977	1.13926754E-04	9.09	133.56
22	.866888763	.987994693	1.1554278	1.0393501E-04	9.5	153.45
23	.860191955	.989040772	1.1477159	9.43079233E-05	10.06	177.7
24	.853283558	.989956527	1.13955247	8.50789811E-05	10.78	207.56
25	.846175219	.990762694	1.13097961	7.62664596E-05	11.71	244.73
26	.838878717	.991476051	1.12203455	6.78773303E-05	12.89	291.66
27	.831405909	.992110285	1.11275072	5.99102535E-05	14.42	351.94
28	.823768687	.992676652	1.10315849	5.23578871E-05	16.41	430.99
29	.815978925	.993184478	1.09328576	4.52086459E-05	19.07	537.41
30	.808048446	.993641543	1.08315839	3.84480543E-05	22.72	685.51
31	.799988972	.994054376	1.0728005	3.20597689E-05	27.94	900.63
32	.791812088	.994428493	1.06223477	2.60263512E-05	35.85	1231.73
33	.783529212	.994768575	1.05148257	2.03298487E-05	48.84	1784.71
34	.775151558	.995078618	1.04056412	1.49522234E-05	72.94	2830.31
35	.76669011	.995362049	1.02949861	9.87566148E-06	128.24	5274.2

(number of rods = 1 rod / cluster)

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 แท่งต่อหนึ่งมัด

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
9	.949243422	.799271062	1.02352042	2.98372719E-05	1107.92	830.49
10	.94801872	.841095945	1.07569037	1.020699E-04	141.83	136.6
11	.946640918	.871120903	1.11247058	1.52500267E-04	64.18	76.97
12	.945108537	.893403604	1.13907997	1.86758448E-04	39.79	58.01
13	.94342054	.910395267	1.15867102	2.09964586E-04	28.44	49.45
14	.941576283	.923647515	1.1732393	2.2521044E-04	22.07	45.09
15	.939575483	.934181638	1.1840985	2.34363971E-04	18.11	42.9
16	.937418196	.942692364	1.19214257	2.3893492E-04	15.46	42.02
17	.935104791	.949665735	1.19799741	2.40147677E-04	13.59	41.98
18	.932635932	.955450124	1.20211216	2.38554819E-04	12.25	42.64
19	.93001256	.96030055	1.20481626	2.3501291E-04	11.24	43.82
20	.927235879	.964407183	1.20635601	2.2993407E-04	10.48	45.46
21	.924307344	.96791418	1.20691888	2.23621824E-04	9.91	47.56
22	.921228642	.970932426	1.20664985	2.16396545E-04	9.49	50.11
23	.918001687	.973548344	1.20566271	2.08613903E-04	9.17	53.08
24	.914628602	.975830097	1.20404804	2.00378548E-04	8.95	56.51
25	.911111711	.97783202	1.2018789	1.91754424E-04	8.81	60.49
26	.907453526	.979597863	1.19921499	1.83072729E-04	8.73	64.96
27	.903656736	.981163163	1.19610568	1.74338114E-04	8.71	70.01
28	.899724198	.982557027	1.19259228	1.65533623E-04	8.75	75.78
29	.895658921	.983803482	1.18870979	1.56824641E-04	8.85	82.28
30	.891464061	.984922497	1.18448816	1.48262092E-04	9	89.61
31	.887142908	.985930779	1.17995335	1.39885067E-04	9.19	97.88
32	.882698871	.986842392	1.17512806	1.31622956E-04	9.45	107.34
33	.878135476	.987669243	1.17003238	1.23397226E-04	9.79	118.35
34	.87345635	.988421466	1.16468425	1.15422885E-04	10.2	130.92
35	.868665208	.989107726	1.15909985	1.07709687E-04	10.68	145.34
36	.863765849	.989735474	1.15329389	1.00263145E-04	11.24	161.93
37	.858762145	.990311139	1.14727989	9.30853591E-05	11.89	181.13
38	.853658024	.990840292	1.14107033	8.61757051E-05	12.66	203.46
39	.848457469	.991327784	1.13467682	7.95314131E-05	13.55	229.6
40	.843164506	.99177785	1.12811026	7.31480336E-05	14.61	260.42

(number of rods = 3 rods / cluster)

ตารางที่ ฉ.2 (ต่อ)

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง เท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
10	.953801458	.793544097	1.02106614	2.86328189E-05	1272.85	876.62
11	.952700531	.833303198	1.07098721	1.02713248E-04	154.82	134.03
12	.951469815	.862649975	1.10727235	1.55998362E-04	69.5	73.65
13	.950107715	.884923631	1.1342361	1.93349522E-04	42.92	54.52
14	.948612987	.902225244	1.15459286	2.19695616E-04	30.55	45.77
15	.946984705	.915929802	1.17011887	2.37742315E-04	23.64	41.19
16	.945222241	.926967741	1.18201607	2.49379431E-04	19.34	38.76
17	.943325237	.935986975	1.19112156	2.56194276E-04	16.45	37.55
18	.941293592	.943449981	1.19803308	2.59216931E-04	14.42	37.16
19	.939127446	.949694059	1.20318686	2.5931921E-04	12.93	37.37
20	.936827167	.954969911	1.20690752	2.5708278E-04	11.82	38.05
21	.93439334	.959467018	1.20944079	2.53046754E-04	10.98	39.14
22	.931826754	.963330744	1.21097569	2.47641475E-04	10.33	40.58
23	.929128394	.966674107	1.21165965	2.41212933E-04	9.84	42.36
24	.926299432	.969586045	1.21160925	2.33840779E-04	9.46	44.51
25	.923341218	.97213732	1.21091781	2.25951793E-04	9.18	46.98
26	.920255272	.974384789	1.20966098	2.1773019E-04	8.97	49.78
27	.917043273	.976374562	1.20790037	2.09125604E-04	8.84	52.99
28	.913707054	.978144347	1.20568749	2.00359391E-04	8.77	56.61
29	.910248594	.979725216	1.2030651	1.9152966E-04	8.74	60.67
30	.906670008	.981142962	1.20006942	1.82615328E-04	8.78	65.26
31	.902973542	.982419134	1.19673134	1.73879433E-04	8.85	70.33
32	.899161562	.98357185	1.19307749	1.65171862E-04	8.97	76.05
33	.895236548	.984616428	1.18913102	1.56631594E-04	9.13	82.45
34	.891201089	.985565892	1.18491228	1.48288593E-04	9.34	89.59
35	.887057872	.986431369	1.18043929	1.40165345E-04	9.59	97.58
36	.882809673	.987222411	1.17572815	1.32178178E-04	9.9	106.65
37	.878459356	.987947255	1.17079338	1.24238355E-04	10.28	117.12
38	.874009857	.988613034	1.16564818	1.16552982E-04	10.73	128.99
39	.869464186	.98922595	1.16030463	1.09125779E-04	11.24	142.47
40	.86482541	.989791413	1.15477388	1.01957726E-04	11.83	157.85
41	.860096656	.990314163	1.14906627	9.50475948E-05	12.51	175.47
42	.855281093	.990798364	1.14319148	8.83923988E-05	13.3	195.76

(number of rods = 4 rods / cluster)

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 6 แท่งต่อหนึ่งมัด

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
12	.955699281	.801156703	1.03291256	4.74927636E-05	620.67	409.28
13	.954696734	.834513326	1.07478981	1.11582698E-04	146.85	117.47
14	.953588685	.860207055	1.10659554	1.59401828E-04	74.15	70.57
15	.952373637	.880410867	1.13114319	1.94417856E-04	47.95	53.45
16	.951050348	.896579875	1.15031643	2.20165838E-04	34.97	45.08
17	.949617807	.909717627	1.16541415	2.38650468E-04	27.45	40.47
18	.948075219	.920534258	1.17735539	2.51509796E-04	22.63	37.82
19	.94642199	.929543696	1.18680525	2.59837142E-04	19.34	36.35
20	.94465772	.937125287	1.19425471	2.64569441E-04	16.99	35.65
21	.942782187	.943563973	1.20007267	2.66450779E-04	15.25	35.51
22	.94079534	.949077133	1.20454074	2.65978313E-04	13.93	35.81
23	.938697295	.953832929	1.20787698	2.63635675E-04	12.91	36.46
24	.936488322	.957963089	1.21025245	2.59817598E-04	12.12	37.43
25	.934168841	.961571978	1.21180294	2.54848259E-04	11.5	38.68
26	.931739418	.964743137	1.2126375	2.48895191E-04	11.02	40.21
27	.929200755	.967544074	1.21284454	2.42279932E-04	10.64	41.99
28	.926553689	.970029811	1.21249651	2.35086333E-04	10.35	44.05
29	.92379918	.972245556	1.21165329	2.27467103E-04	10.13	46.39
30	.920938314	.974228722	1.21036484	2.19549072E-04	9.99	49.03
31	.917972289	.976010488	1.20867317	2.11437412E-04	9.9	51.98
32	.91490242	.977617	1.20661397	2.03119138E-04	9.86	55.3
33	.911730125	.979070313	1.20421772	1.94865971E-04	9.87	58.95
34	.908456923	.980389135	1.20151073	1.86636722E-04	9.92	62.98
35	.905084432	.981589415	1.19851587	1.78379314E-04	10.02	67.5
36	.901614359	.98268482	1.19525314	1.70232459E-04	10.16	72.49
37	.898048502	.98368711	1.19174023	1.622271E-04	10.34	78.01
38	.894388736	.98460645	1.18799284	1.54387615E-04	10.56	84.11
39	.890637015	.985451665	1.18402506	1.46732857E-04	10.82	90.86
40	.886795367	.986230438	1.17984959	1.39177032E-04	11.13	98.45
41	.882865883	.986949492	1.17547796	1.31830449E-04	11.49	106.88
42	.878850719	.987614721	1.17092073	1.24500161E-04	11.93	116.55
43	.874752089	.988231316	1.16618762	1.17390513E-04	12.43	127.38
44	.870572258	.988803859	1.16128764	1.10503601E-04	13	139.57
45	.866313539	.989336409	1.15622917	1.03839674E-04	13.65	153.31

(number of rods = 6 rods / cluster)

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 7 แท่งต่อหนึ่งมัด

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
13	.957415184	.809684115	1.04578102	6.94904546E-05	348.6	232.63
14	.956423071	.839631694	1.0833373	1.2894189E-04	118.92	94.82
15	.95533208	.863110825	1.112361	1.73195218E-04	66.54	62.35
16	.954140804	.881851367	1.13509625	2.06212758E-04	45.01	48.9
17	.952848057	.897042532	1.15308551	2.30680394E-04	33.7	41.97
18	.951452858	.909523196	1.16741665	2.48366035E-04	26.91	38.05
19	.949954419	.919898669	1.17887453	2.607477E-04	22.45	35.74
20	.948352132	.928614542	1.18803691	2.68810257E-04	19.35	34.45
21	.946645561	.936004683	1.19533669	2.73416765E-04	17.11	33.85
22	.94483443	.942323223	1.2011035	2.75260732E-04	15.44	33.73
23	.942918618	.947766345	1.2055919	2.74804529E-04	14.16	34
24	.940898153	.952487438	1.20900111	2.72507847E-04	13.17	34.61
25	.938773205	.95660781	1.21148889	2.68748952E-04	12.39	35.49
26	.93654408	.960224414	1.21318154	2.63840793E-04	11.78	36.63
27	.934211213	.963415473	1.21418124	2.57943347E-04	11.3	38.02
28	.931775166	.966244658	1.21457144	2.51373214E-04	10.92	39.64
29	.929236623	.968764209	1.21442089	2.44211168E-04	10.63	41.51
30	.926596383	.971017313	1.21378678	2.36608182E-04	10.41	43.64
31	.923855356	.973039914	1.212717	2.28690297E-04	10.26	46.02
32	.921014562	.974862122	1.21125204	2.20562588E-04	10.17	48.69
33	.918075119	.976509312	1.20942637	2.12312438E-04	10.13	51.65
34	.915038249	.978002984	1.20726957	2.04012278E-04	10.13	54.92
35	.911905266	.979361454	1.20480721	1.95721844E-04	10.17	58.54
36	.908677572	.980600399	1.20206154	1.87390124E-04	10.26	62.57
37	.905356659	.981733303	1.19905209	1.79256974E-04	10.38	66.97
38	.901944096	.982771807	1.19579611	1.71154508E-04	10.55	71.86
39	.898441532	.98372601	1.19230894	1.63208274E-04	10.76	77.26
40	.894850689	.984604702	1.18860433	1.55438273E-04	11	83.21
41	.891173358	.985415563	1.18469468	1.47759814E-04	11.3	89.86
42	.887411391	.986165327	1.18059124	1.40384251E-04	11.63	97.12
43	.883566705	.986859918	1.17630429	1.33119621E-04	12.01	105.27
44	.879641271	.987504563	1.17184328	1.25871182E-04	12.48	114.57
45	.875637111	.988103887	1.16721697	1.18841879E-04	13	124.98

(number of rods = 7 rods / cluster)

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด

FUEL ROD DIAMETER = 2.00 CM.
AL-CLADDING THICKNESS = 0.10 CM.
AL-TUBE THICKNESS = 0.15 CM.

UO-2 + D-2 O + AL (cladding=0.1 cm. and tub=0.15 cm.) SQUARE LATTICE

L	F	P	K(infinite)	BUCKLING	FUEL	D-2 O
16	.957785851	.808422076	1.04455523	6.68027816E-05	418.56	241.34
17	.956893929	.834537817	1.07729501	1.18113048E-04	157.7	105.55
18	.95592252	.855754452	1.10356187	1.58328724E-04	90.63	69.58
19	.954870373	.873215856	1.12484028	1.89491747E-04	62.13	54.15
20	.95373639	.887751985	1.14220704	2.13702668E-04	46.81	45.93
21	.952519616	.899976422	1.15645806	2.32280302E-04	37.47	41.08
22	.951219229	.910350492	1.1681916	2.46117079E-04	31.3	38.1
23	.949834539	.919226351	1.17786428	2.56225243E-04	26.96	36.23
24	.948364975	.92687652	1.1858294	2.63073714E-04	23.8	35.12
25	.946810085	.933514512	1.19236378	2.67216991E-04	21.42	34.57
26	.94516953	.939309502	1.19768678	2.69217635E-04	19.59	34.41
27	.943443079	.944396907	1.20197403	2.69263734E-04	18.16	34.61
28	.941630604	.948886145	1.20536756	2.67882569E-04	17.02	35.06
29	.93973208	.952866382	1.20798317	2.6525133E-04	16.1	35.75
30	.937747579	.956410866	1.20991617	2.61505621E-04	15.37	36.68
31	.935677267	.959580203	1.21124552	2.5684623E-04	14.78	37.82
32	.933521404	.962424881	1.2120372	2.51544608E-04	14.32	39.16
33	.931280333	.964987227	1.21234667	2.45647331E-04	13.95	40.7
34	.928954488	.967302935	1.21222091	2.39379766E-04	13.66	42.43
35	.926544384	.969402267	1.21169994	2.3264913E-04	13.45	44.4
36	.924050615	.971311016	1.21081809	2.25747016E-04	13.3	46.56
37	.921473856	.97305127	1.20960499	2.18551571E-04	13.22	48.99
38	.918814852	.974642031	1.20808633	2.11329308E-04	13.18	51.62
39	.916074426	.976099715	1.20628457	2.03936693E-04	13.2	54.56
40	.913253465	.977438564	1.20421942	1.96521475E-04	13.27	57.77
41	.910352926	.978670976	1.20190828	1.89223859E-04	13.37	61.24
42	.907373831	.979807789	1.19936664	1.81877506E-04	13.52	65.09
43	.904317262	.980858505	1.1966083	1.74610418E-04	13.71	69.29
44	.901184361	.981831484	1.19364567	1.67345694E-04	13.95	73.94
45	.897976326	.982734103	1.19048997	1.60302195E-04	14.23	78.96
46	.894694409	.983572891	1.18715138	1.53295126E-04	14.56	84.53
47	.891339913	.984353646	1.18363919	1.46536541E-04	14.93	90.54
48	.887914189	.985081524	1.17996193	1.39835785E-04	15.35	97.22
49	.884418634	.985761128	1.17612749	1.33299881E-04	15.83	104.55
50	.88085469	.986396573	1.17214315	1.26733864E-04	16.4	112.88

(number of rods = 12 rods / cluster)

6.4 การคำนวณโดยใช้โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน มีอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน

กำหนดให้ จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด การคำนวณก็จะเป็นทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งกำหนดระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิงเท่ากับ 20 ซม.

คำนวณค่า f ที่ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิง 20 ซม.

$R_o' = 2.0$ ซม.

$R_1 = 20/\sqrt{\pi} = 11.28152$ ซม.

$X = 0.2$ ซม.

$V_o = 12.57142$ ซม.^{3}

ปริมาตรของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง $= 4\pi \left[(1 + 0.1)^2 - 1^2 \right]$

$= 2.64$ ซม.^{3}

$= \pi \left[(3.2 + 0.15)^2 - (3.2)^2 \right]$

$= 3.08785$ ซม.^{3}

$V_2 = 2.64 + 3.08785$

$= 5.72785$ ซม.^{3}

$V_1 = (20)^2 - V_o - V_1$

$= 381.70071$ ซม.^{3}

จากสมการที่ (4.20)

$$\frac{1}{f} = 1 + \left(\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} \right) F + (E - 1)$$

เมื่อ $\Sigma_{ao} = 0.314$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{a_1} = 8.5 \times 10^{-5}$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{a_2} = 0.015$ ซม.$^{-1}$

$$V_o \Sigma_{ao} = (12.57142)(0.314)$$

$$= 3.94742 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_1 \Sigma_{a_1} = (381.70071)(8.5 \times 10^{-5})$$

$$= 0.03244 \quad \text{ซม.}^2$$

$$V_2 \Sigma_{a_2} = (5.72785)(0.015)$$

$$= 0.08591$$

$$\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} = 0.02998$$

จากสมการที่ (4.23)

$$F = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$$

สำหรับโลหะยูเรเนียม $k_o = 0.65 \quad \text{ซม.}^{-1}$

ดังนั้น $$F = 1 + \frac{[(0.65)(2.0)]^2}{8} - \frac{[(0.65)(2.0)]^4}{192}$$

$$= 1.19637$$

และจากสมการที่ (4.24)

$$E = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2} \ln \frac{R_1}{R'_o} + \frac{1}{4}\left(\frac{R'_o}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

$k_1 = 0.01 \quad \text{ซม.}^{-1}$

$R'_o = 2.0 \quad \text{ซม.}$

$R_1 = 11.28152 \quad \text{ซม.}$

แทนค่า $E = 1.00664$

$$\frac{1}{f} = 1 + (0.02998)(1.19637) + (1.00664 - 1)$$

ดังนั้น $f = 0.95921$

การคำนวณค่า p ก็ต้องคำนวณในช่วงพลังงานกำธร ซึ่งค่าภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการจับนิวตรอนของโลหะยูเรเนียม น้ำชนิดหนัก และอะลูมินัมต้องคิดในช่วงพลังงานกำธร ซึ่ง

$$\Sigma_{a_1} = \frac{0.18}{\ln(E_1/E_2)} \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$\Sigma_{a_2} = \frac{0.006}{\ln(E/E)}$$

$$\Sigma_{ao} = \frac{N_o \left[a + b\ S/M \right]}{\ln(E/E)}$$

เมื่อ N_o คือ จำนวนอะตอมของโลหะยูเรเนียม $(4.6876 \times 10^{22}$ อะตอม/ซม.$^3)$

$$\frac{S}{M} = \frac{2}{\rho_o R'_o}$$

$$= \frac{2}{(18.9)(2)} = 0.05291 \quad \text{ซม.}^2/\text{กรัม}$$

แต่จากตารางที่ 4.1 สำหรับโลหะยูเรเนียม

$a = 8.0$ $b = 27.5$

ดังนั้น $\Sigma_{ao} = \frac{0.44468}{\ln(E_1/E_1)}$ ซม.$^{-1}$

$V_o\Sigma_{ao} = (12.5714)(0.44468)$

$= 5.59038$ ซม.^{2}

$V_2\Sigma_{a_2} = (381.70071)(0.18)$

$= 68.70612$ ซม.^{2}

$V_2\Sigma_{a_2} = (5.72785)(0.006)$

$= 0.03436$

$$\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}} = 12.2962$$

และ $$F_r = 1 + \frac{(k_o R'_o)^2}{8} - \frac{(k_o R'_o)^4}{192}$$

จากตารางที่ 4.2 สำหรับโลหะยูเรเนียม $k_o = 0.44$ ซม.$^{-1}$

$$F_r = 1 + \frac{[(0.44)(2.0)]^2}{8} - \frac{[(0.44)(2.0)]^4}{192}$$

$$= 1.09367$$

$$E_r = 1 + \frac{(k_1 R_1)^2}{2}\left[\frac{R_1^2}{R_1^2 - R_o'^2} \ln \frac{R_1}{R'_o} + \frac{1}{4}\left(\frac{R'_o}{R_1}\right)^2 - 0.75\right]$$

จากตารางที่ 4.3 สำหรับน้ำชนิดหนัก $k_1 = 0.22$ ซม.$^{-1}$

$$E_r = 4.21555$$

$$\frac{1}{f_r} = 1 + \left(\frac{V_1 \Sigma_{a_1} + V_2 \Sigma_{a_2}}{V_o \Sigma_{ao}}\right) F_r + (E_r - 1)$$

$$\frac{1}{f_r} = 1 + (12.2962)(1.09367) + (4.21555 - 1)$$

$$f_r = 0.05661$$

และ $$p = \exp(- f_r/1 - f_r)$$

$$p = \exp(- 0.05661/1 - 0.05661)$$

$$= 0.94175$$

การคำนวณค่า k_∞ สามารถหาได้จากสูตรสี่แฟกเตอร์ ดังสมการที่ (3.6)

$$k_\infty = \eta \varepsilon f p$$

$$= (1.32)(1.022)(0.95921)(0.94175)$$

$$= 1.21865$$

การคำนวณขนาดวิกฤตของแกน เครื่องปฏิกรณ์ ก็เริ่มต้นที่กำหนดให้ $k_{eff} = 1.00$ ดังนั้น จากสมการการฟุ้งกระจายของนิวตรอนหนึ่งพวกตามสมการที่ (3.43)

$$B_m^2 = (k_\infty - 1)/(L^2 + \tau)$$

$$L^2 = L_m^2(1 - f)(V/V_1)$$

$$= (100)^2(1 - 0.95921)(400)/(381.70071)$$

$$L^2 = 427.3787 \quad \text{ซม.}^2$$

$$B_m^2 = (1.21865 - 1)/(427.3787 + 120)$$

$$= 3.99451 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

เริ่มต้นจากค่า $B_m^2 = 3.99451 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$ ลองแทนค่า B_m^2 ในสมการเอจดิฟฟิวชันของนิวตรอนสองพวก จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม โดยทำให้ค่า $k_{eff} = 1.00$ พอดี ดังสมการที่ (3.45.1)

$$k_{eff} = k_\infty \exp(-B_m^2\tau)/(1 + L^2B_m^2)$$

ดังนั้น $B_m^2 = 3.83351 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ อยู่ในสภาวะวิกฤต ดังนั้น

$$B_m^2 = B_g^2 = B_c^2$$

จากสมการที่ (3.62)

$$B_g^2 = \left[\frac{\pi}{H}\right]^2 + \left[\frac{2.405}{R}\right]^2$$

กำหนดให้ $D/H = 1.2$

ดังนั้น $R^2 = 9.33711/B_g^2$

แทนค่าจะได้ $R = 156.06576$ ซม.

$D = 312.13153$ ซม.

$H = 260.10961$ ซม.

จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิงทั้งหมด	=	765	แท่ง
มวลวิกฤตของโลหะยู เร เนียม	=	11.82722	ตัน
มวลของน้ำชนิดหนัก	=	20.90027	ตัน
มวลของอะลูมินัมทั้งหมด	=	3.07816	ตัน

นอกจากที่ได้คำนวณนี้แล้ว ยังได้ เปลี่ยนชนิดของ เชื้อ เพลิงและ เปลี่ยนชนิดของวัสดุหุ้มแท่ง เชื้อ เพลิง รวมทั้งการคำนวณโดยมีและไม่มีท่อความดัน ซึ่งสามารถสรุป เป็นตารางได้ โดยจะสนใจที่ค่าสูงสุดของบัคคลิง เพราะการออกแบบ เครื่องปฏิกรณ์ ที่ดีที่สุดนี้จะต้องพิจารณาที่ค่าสูงสุดของบัคคลิง ซึ่งจะทำให้ขนาดของแกน เครื่องปฏิกรณ์ เล็กที่สุด และทุ่นรายจ่ายได้มากที่สุด

และจากตารางที่ 6.3 ถึง ตารางที่ 6.6 เป็นตารางแสดงผลการคำนวณที่ค่าสูงสุดของบัคคลิงซึ่งแต่ละมัด เชื้อ เพลิงยังไม่มีชั้นของท่อความดัน

กำหนดให้

n	=	จำนวนแท่ง เชื้อ เพลิงต่อหนึ่งมัด
L	=	ระยะห่างระหว่างมัด เชื้อ เพลิง (ซม.)
B^2	=	ค่าบัคคลิงวิกฤต ($ซม.^{-2}$)
M_F	=	มวลของ เชื้อ เพลิง (ตัน)
M_{D_2O}	=	มวลของน้ำชนิดหนัก (ตัน)
P	=	กำลัง (เมกกะวัตต์)

ตารางที่ 6.3 โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

$\varepsilon = 1.022 \quad \eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) $ซม.^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	11	0.9771	0.9329	1.2299	6.0840	4.88	10.61	15.47
3	16	0.9769	0.9254	1.2196	5.7422	7.56	11.41	23.96
4	18	0.9757	0.9272	1.2206	5.5686	8.34	11.92	26.44
6	21	0.9737	0.9291	1.2205	5.2675	9.99	12.89	31.67
7	22	0.9732	0.9282	1.2187	5.1435	11.00	13.31	34.87
12	26	0.9705	0.9274	1.2142	4.6816	15.55	15.13	49.29

ตารางที่ 6.4 ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

$\varepsilon = 1.022$ $\eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) ซม.$^{-2}$	M_F^2 ตัน	$M_{D_o}^2$ ตัน	P เมกกะวัตต์
1	10	0.9649	0.9399	1.2235	4.4040	5.27	17.11	25.38
3	15	0.9658	0.9349	1.2182	4.3460	7.17	17.22	34.54
4	17	0.9648	0.9365	1.2190	4.2647	7.66	17.68	36.90
6	20	0.9632	0.9376	1.2184	4.1033	8.79	18.64	42.34
7	21	0.9629	0.9364	1.2164	4.0312	9.56	19.08	46.05
12	25	0.9607	0.9339	1.2104	3.7177	13.05	21.25	62.86

ตารางที่ ๖. ๕ โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

$\varepsilon = 1.022 \qquad \eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) ซม.$^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	12	0.9793	0.9439	1.2470	6.9431	3.36	8.74	10.65
3	16	0.9821	0.9254	1.2261	6.8878	5.75	8.68	18.22
4	17	0.9827	0.9177	1.2166	6.7125	7.06	8.95	22.38
6	20	0.9810	0.9210	1.2189	6.4061	8.21	9.56	26.02
7	21	0.9806	0.9203	1.2175	6.2763	8.96	9.82	28.40
12	25	0.9786	0.9204	1.2152	5.7985	12.2	10.91	38.67

ตารางที่ ๖. ๖ ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

ε = 1.022 η = 1.32

n แท่ง/มัด	L ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) $ซม.^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	9	0.9766	0.9252	1.2190	5.6618	4.46	11.62	21.48
3	14	0.9767	0.9246	1.2184	5.6259	5.59	11.60	26.92
4	16	0.9757	0.9277	1.2212	5.5430	5.83	11.84	28.08
6	18	0.9761	0.9213	1.2132	5.3639	7.26	12.30	34.97
7	20	0.9741	0.9291	1.2211	5.2826	7.02	12.63	33.81
12	24	0.9726	0.9273	1.2168	4.9350	9.26	13.80	44.60

จากตารางที่ 6.7 ถึงตารางที่ 6.12 เป็นการแสดงผลการคำนวณ โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นโลหะยูเรเนียมและยูเรเนียมไดออกไซด์ มีอะลูมินัมและเซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง ในกรณีนี้จะคำนวณโดยเพิ่มชั้นท่อความดัน เข้าไปอีกชั้นหนึ่งโดยชั้นนี้ใช้อะลูมินัมหรือเซอร์โคเนียม

กำหนดให้

n = จำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด

L = ระยะห่างระหว่างมัดเชื้อเพลิง (ซม.)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อความดัน (ซม.)

B^2 = ค่าบัคคลิงวิกฤต ($ซม.^{-2}$)

M_F = มวลวิกฤตของเชื้อเพลิง (ตัน)

M_{D_o} = มวลของน้ำชนิดหนัก (ตัน)

P^2 = กำลัง (เมกกะวัตต์)

ตารางที่ 6. 7 โลหะยูเรเนียม เป็น เชื้อ เพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่ง เชื้อ เพลิง และท่อความดัน

ε = 1.022 η = 1.32

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) ซม.$^{-2}$	M_F (ตัน)	M_{D_2O} (ตัน)	P เมกกะวัตต์
1	12	3.0	0.9527	0.9434	1.2125	3.3536	10.03	25.78	31.79
3	18	6.0	0.9576	0.9425	1.2177	3.7152	11.47	21.94	36.35
4	20	6.4	0.9592	0.9417	1.2186	3.8335	11.82	20.90	37.47
6	22	8.0	0.9605	0.9356	1.2124	3.7941	14.89	21.01	47.20
7	23	8.0	0.9613	0.9347	1.2122	3.8438	15.58	20.55	49.39
12	27	10.8	0.9599	0.9332	1.2085	3.6439	21.00	21.98	66.56

ตารางที่ ๖. ๘ ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง และท่อความดัน

$\varepsilon = 1.022 \quad \eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) $ซม.^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	11	3.0	0.9235	0.9499	1.1835	1.9520	14.77	57.64	71.15
3	17	6.0	0.9351	0.9496	1.1979	2.4014	13.59	41.98	65.46
4	19	6.4	0.9391	0.9496	1.2031	2.5931	12.93	37.37	62.28
6	21	8.0	0.9427	0.9435	1.2000	2.6645	15.25	35.51	73.46
7	22	8.0	0.9448	0.9423	1.2011	2.7526	15.44	33.73	74.38
12	27	10.8	0.9434	0.9443	1.2019	2.6926	18.16	34.61	87.48

ตารางที่ 6. 9 โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง และท่อความดัน

ε = 1.022 η = 1.32

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) ซม.$^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	11	3.0	0.9699	0.9322	1.2198	4.8205	6.93	14.85	21.96
3	17	6.0	0.9718	0.9339	1.2244	5.1167	7.96	13.50	25.23
4	18	6.4	0.9740	0.9267	1.2177	5.2223	9.18	12.99	29.10
6	21	8.0	0.9732	0.9286	1.2192	5.1333	10.38	13.28	32.90
7	22	8.0	0.9735	0.9278	1.2184	5.1577	10.96	13.15	34.74
12	28	10.8	0.9691	0.9387	1.2273	4.8066	12.89	14.58	40.86

ตารางที่ 6.10 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน

ε = 1.022 η = 1.32

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) $ซม.^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_o} $ตัน^2$	P เมกกะวัตต์
1	10	3.0	0.9523	0.9389	1.2063	3.1979	8.52	27.22	41.04
3	16	6.0	0.9579	0.9426	1.2182	3.7109	7.99	21.71	38.49
4	17	6.4	0.9620	0.9359	1.2147	3.9186	8.69	19.85	41.86
6	20	8.0	0.9623	0.9371	1.2166	3.9696	9.24	19.40	44.51
7	21	8.0	0.9634	0.9360	1.2166	4.0506	9.49	18.77	45.71
12	25	10.8	0.9633	0.9335	1.2132	3.9436	11.95	19.28	51.56

ตารางที่ 6.11 โลหะยู เร เนียม เป็น เชื้อ เพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โค เนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่ง เชื้อ เพลิง อะลูมินัม เป็นท่อความดัน $\varepsilon = 1.022$ $\eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) ซม.$^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_2O} ตัน	P เมกกะวัตต์
1	12	3.0	0.9572	0.9434	1.2182	3.7153	8.6	22.11	27.26
3	18	6.0	0.9626	0.9415	1.2226	4.1681	9.65	18.46	30.59
4	19	6.4	0.9661	0.9348	1.2185	4.3820	10.72	17.01	33.98
6	22	8.0	0.9661	0.9356	1.2195	4.3782	12.01	16.95	38.07
7	22	8.0	0.9681	0.9278	1.2125	4.4680	13.54	16.31	42.92
12	26	10.4	0.9679	0.9270	1.2105	4.3163	17.57	16.95	55.70

ตารางที่ 6.12 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็น เชื้อ เพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่ง เชื้อ เพลิง อะลูมินัม เป็นท่อความดัน $\varepsilon = 1.022$ $\eta = 1.32$

n แท่ง/มัด	L ซม.	d ซม.	f	p	k_∞	B^2 ($\times 10^{-4}$) $ซม.^{-2}$	M_F ตัน	M_{D_o} $ตัน^2$	P เมกกะวัตต์
1	11	3.0	0.9311	0.9499	1.1932	2.2449	11.97	46.73	57.66
3	16	6.0	0.9456	0.9426	1.2026	2.8234	12.04	32.71	58.00
4	18	6.4	0.9497	0.9434	1.2088	3.0946	11.05	28.49	53.23
6	21	8.0	0.9516	0.9435	1.2113	3.2160	11.50	26.77	55.40
7	21	8.0	0.9557	0.9360	1.2068	3.3520	12.60	24.93	60.70
12	26	10.8	0.9551	0.9393	1.2102	3.3490	14.12	24.80	68.02

6.5 การคำนวณกรณีที่มีตัวสะท้อนนิวตรอน

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เมื่อแกน เครื่องปฏิกรณ์ถูกหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนนั้น จะทำให้ค่า k_{eff} เพิ่มขึ้นจาก เดิม และจากหลักการนี้การออกแบบ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวสะท้อนนิวตรอนจึงสามารถ เลือก เอาว่า ความหนาของตัวสะท้อนนิวตรอน เท่าไรที่จะทำให้ค่า k_{eff} เพิ่มขึ้นตามต้องการ

ตามปกติการคำนวณขนาดของ เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนนั้น ส่วนมากจะมองในแง่ของ รี เฟลค เตอร์ เซฟวิง ซึ่งหมายถึง ถ้าออกแบบแกน เครื่องปฏิกรณ์ขึ้นมาขนาดหนึ่งแล้ว มีค่า k_{∞} อยู่ค่าหนึ่ง เมื่อหุ้มแกน เครื่องปฏิกรณ์ด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนหนาขนาดหนึ่งจะต้องลดขนาดของแกน เครื่องปฏิกรณ์ลงไป เท่าใดจึงจะทำให้ เครื่องปฏิกรณ์เครื่องนั้นยังอยู่ในสภาวะวิกฤต เช่น เดียวกับ เมื่อยังไม่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน

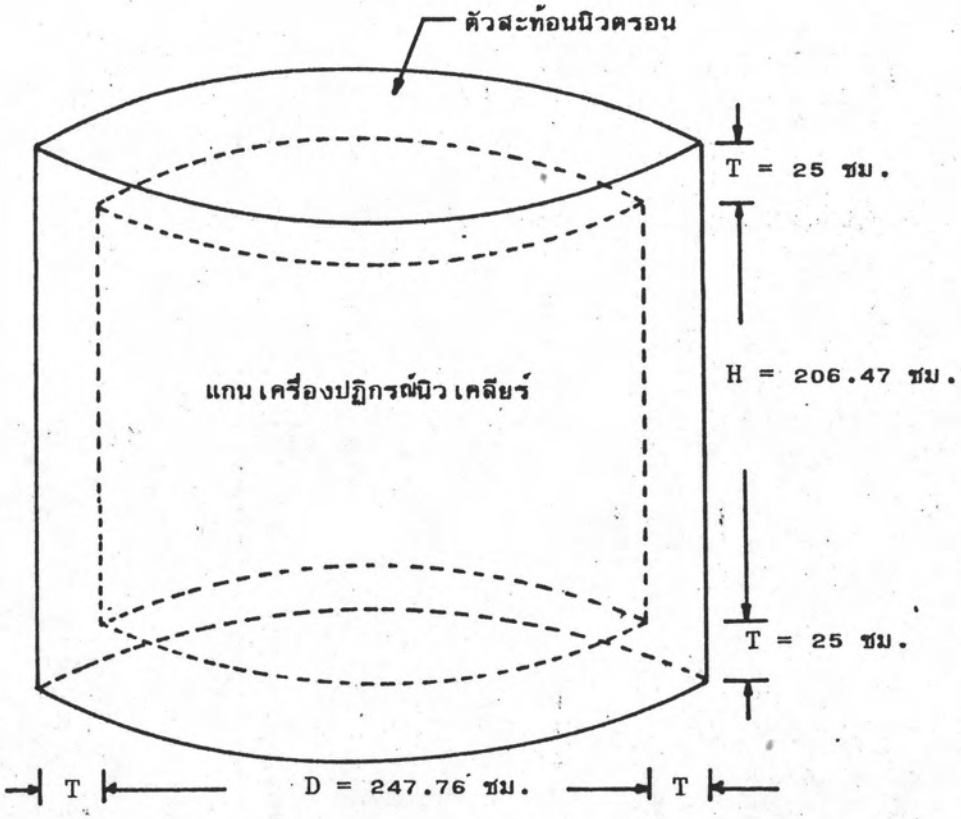
จากหัวข้อที่ 6.1 เป็นการแสดงการคำนวณแกน เครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้โลหะยู เร เนียมเป็น เชื้อเพลิง มีน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และใช้อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง จำนวนแท่ง เชื้อเพลิง เท่ากับ 1 แท่งในแต่ละ เซล ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 2.0 ซม. ซึ่งผลการคำนวณ เป็นดังนี้

k_{∞}	=	1.22993	
R	=	123.88	ซม.
D	=	247.76	ซม.
H	=	206.47	ซม.
B^2	=	6.084068×10^{-4}	ซม.$^{-2}$
L_{1s}^2	=	L^2 = 235.54	ซม.^{2}

เมื่อ R, D, H, B^2 คือ รัศมี เส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูง และบัคคลิง

ส่วน L_{1s}^2 คือ ดิฟฟิวชัน เอเรีย (diffusion area) สำหรับ เทอร์มัลนิวตรอน

กำหนดให้ ตัวสะท้อนนิวตรอนมีความหนา เป็น T = 25 ซม. ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดง เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์รูปทรงกระบอกที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน

ดูภาคผนวก ค.

สำหรับน้ำชนิดหนัก $D_{1s} = 0.85$ ซม.

ส่วน D_{1f} หมายถึง สัมประสิทธิ์การฟุ้งกระจายของนิวตรอนเร็วในน้ำชนิดหนัก โดยที่อาศัยสมการที่ (2.5)

$$D_{1f} = \frac{1}{3}\left\{ \frac{1}{\left[1 - \bar{\mu}_o(D)\right]\Sigma_s(D) + \left[1 - \bar{\mu}_o(O)\right]\Sigma_s(O)} \right\}$$

เมื่อ $\Sigma_s(D)$ คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการชนแบบกระเจิงของดิวเทอร์เลียม มีค่าเท่ากับ 0.12512 ซม.$^{-1}$ (2)

$\Sigma_s(O)$ คือ ภาคตัดขวางต่อปริมาตรในการชนแบบกระเจิงของออกซิเจน (oxygen) มีค่าเท่ากับ 0.13248 ซม.$^{-1}$ (2)

และ $\bar{\mu}_o = \frac{2}{3A}$

$1 - \bar{\mu}_o(D) = 0.666$

$1 - \bar{\mu}_o(O) = 0.958$

ดังนั้น $D_{1f} = \frac{1}{3}\left\{ \frac{1}{(0.666)(0.12512)(2) + (0.958)(0.13248)} \right\}$

$= 1.14$ ซม.

สำหรับ L_f^2 คือ ดิฟฟิวชัน เอเรีย ของนิวตรอนเร็ว

จากสมการที่ (3.21) และ (3.22)

$$L_f^2 = \left[\exp(\tau B^2) - 1\right]/B^2$$

แทนค่า $L_f^2 = \frac{e^{(120)(6.084086 \times 10^{-4})} - 1}{6.084086 \times 10^{-4}}$

$= 124.489$ ซม.^{2}

สำหรับการคิดคำนวณจะลดลงมา เหลือหนึ่งมิติ ซึ่งสามารถ เลือกได้ว่าจะหาในแนวรัศมีหรือในแนวแกน ในที่นี้จึง เลือกเอาการคำนวณในแนวรัศมีโดยกำหนดว่าให้ความหนาของตัวสะท้อนนิวตรอนทั้งข้างบนและข้างล่างหนา 25 ซม.

$$\text{บัคคลิงในแนวแกน} = \frac{\pi^2}{\left[H + 2(25)\right]^2}$$

$$= \frac{\pi^2}{\left[206.47 + 50\right]^2}$$

$$= 1.50046 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

จากบทที่ 5 เราทราบว่าการที่จะทำให้ เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤตขึ้นมาได้นั้น ในวิธีการคำนวณจะต้องทำให้ค่าดี เทอร์มิแนนท์ เป็นศูนย์ (D = 0) ด้วย เหตุนี้ค่า k_∞ จึงสามารถบอกได้ เพราะว่าถ้าคิด เอาแกน เครื่องปฏิกรณ์ที่อยู่ในสภาวะวิกฤตพอดีค่า k_∞ ก็มีค่าอยู่ค่าหนึ่ง และค่า k_{eff} เท่ากับ 1 แต่พอ เมื่อมีตัวสะท้อนนิวตรอนแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ก็จะสูงกว่าวิกฤต (หมายถึง $k_{eff} > 1$) ดังนั้น ถ้าต้องการที่จะยังคงให้ เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะวิกฤต เช่น เดิม ก็จะต้องลดขนาดของแกน เครื่องปฏิกรณ์ลงอีก ซึ่งก็หมายถึงลดค่า k_∞ ลงไปด้วย แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจ เฉพาะกรณีที่เมื่อคำนวณขนาดวิกฤตของ เครื่องปฏิกรณ์ได้แล้ว ลองหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนด้วยความหนาต่าง ๆ กันแล้วคำนวณหาค่า k_{eff} ที่เพิ่มขึ้น โดยอาศัยสมการที่ (5.67) ซึ่ง เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนจะอยู่ในสภาวะวิกฤตได้นั้น จะต้องมีค่าดี เทอร์มิแนนท์ เป็นศูนย์ (D = 0) เนื่องจากในสมการที่ (5.67) นี้ ค่า k_∞ มีความสำคัญมากที่จะทำให้ค่า D เป็นศูนย์ ดังนั้นจะต้องลองสมมุติค่า k_∞ แล้วแทนค่าคำนวณจนกระทั่งทำให้ค่า D เป็นศูนย์ ซึ่งค่า k_∞ ที่สมมุติขึ้นจะต้องน้อยกว่า ค่า k_∞ ที่เราสร้างจริง ๆ

จากการคำนวณแกน เครื่องปฏิกรณ์ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ได้ค่า k_∞ = 1.2299 จึงสมมุติให้ค่า k_∞ = 1.1755 และใช้น้ำชนิดหนัก เป็นตัวสะท้อนนิวตรอน

ส่วนของแกน เครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ดังนี้

k_∞ = 1.1755 (สมมุติขึ้นมา)

R_1 = 123.88 ซม.

$L_{1s}^2 = 235.54$ ซม.^{2}

$L_{1f}^2 = 124.489$ ซม.^{2}

$D_{1s} = 0.85$ ซม. (ดูภาคผนวก ค.)

$D_{1f} = 1.14$ ซม.

$\Sigma_{1s} = D_{1s}/L_{1s}^2 = 0.00361$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{1f} = D_{1f}/L_{1f}^2 = 0.00951$ ซม.$^{-1}$

$k_{1s}^2 = 1/L_{1s}^2 = 0.00424$ ซม.$^{-2}$

$k_{1f}^2 = 1/L_{1f}^2 = 0.00803$ ซม.$^{-2}$

$$B_1^2 = \frac{-(k_{1s}^2 + k_{1f}^2) + \sqrt{(k_{1s}^2 + k_{1f}^2)^2 + 4k_{1s}^2 k_{1f}^2 (k_\infty - 1)}}{2}$$

$= 4.69052 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$ จากสมการที่ (5.31)

$$B_1'^2 = \frac{-(k_{1s}^2 + k_{1f}^2) - \sqrt{(k_{1s}^2 + k_{1f}^2)^2 + 4k_{1s}^2 k_{1f}^2 (k_\infty - 1)}}{2}$$

$= -0.01273$ ซม.$^{-2}$ จากสมการที่ (5.32)

$$1^2 = B_1^2 - \left[\frac{\pi}{H + 2(25)}\right]^2 \quad \text{..... จากสมการที่ (5.41)}$$

$= 3.19005 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$1 = 0.01786$ ซม.$^{-1}$

$$-m^2 = B_1'^2 - \left[\frac{\pi}{H + 2(25)}\right]^2 \quad \text{.... จากสมการที่ (5.42)}$$

$= -20.01288$ ซม.$^{-2}$

$m = 0.11353$ ซม.$^{-1}$

$$S_1 = \frac{\Sigma_{1s} + D_{1s}B_1^2}{\Sigma_{1f}} \quad \text{.....จากสมการที่ (5.49)}$$

$$= 0.4381$$

$$S_1' = \frac{\Sigma_{1s} + D_{1s}B_1'^2}{\Sigma_{1f}} \quad \text{.....จากสมการที่ (5.50)}$$

$$= -0.78887$$

$$1R_1 = 2.212$$

$$mR_1 = 14.064$$

ส่วนของตัวสะท้อนนิวตรอน มีค่าคงที่ดังนี้

$R_2 = 123.88 + 25 = 148.88$ ซม.

$L_{2s}^2 = (100)^2 = 10000$ ซม.^{2} (เฉพาะน้ำชนิดหนัก)

$L_{2f}^2 = 124.489$ ซม.^{2}

$D_{2s} = 0.85$ ซม.^{2}

$D_{2f} = 1.14$ ซม.

$\Sigma_{2s} = D_{2s}/L_{2s}^2 = 0.85 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-1}$

$\Sigma_{2f} = D_{2f}/L_{2f}^2 = 0.00915$ ซม.$^{-1}$

$k_{2s}^2 = 1/L_{2s}^2 = 1 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$k_{2f}^2 = 1/L_{2f}^2 = 0.008$ ซม.$^{-2}$

$B_2^2 = -k_{2s}^2$ .....จากสมการที่ (5.33)

$= -1 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$B_2'^2 = -k_{2f}^2$ จากสมการที่ (5.34)

$= -0.008$ ซม.$^{-2}$

$-\mu_s^2 = -k_{2s}^2 - \left[\frac{\pi}{H + 2(25)}\right]^2$ จากสมการที่ (5.43)

$$= -2.5004 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

$$\mu_s = 0.01581 \quad \text{ซม.}^{-1}$$

$$-\mu_f^2 = -k_{1f}^2 - \left[\frac{\pi}{H + 2(25)}\right]^2 \quad \text{จากสมการที่ (5.44)}$$

$$= -0.00815$$

$$\mu_f = 0.09045$$

$$S_2' = \frac{\Sigma_{2s} - D_{2s}k_{2f}^2}{\Sigma_{2f}}$$

$$\mu_s R_1 = 1.958$$

$$\mu_f R_1 = 11.206$$

$$\mu_s R_2 = 2.354$$

$$\mu_f R_2 = 13.464$$

จากตาราง เบสเสล (ดูภาคผนวก ง.)

$$J_o(1R_1) = J_o(2.212) = 0.1037$$

$$I_o(mR_1) = I_o(14.064) = 137624.3776$$

$$I_o(\mu_s R_1) = I_o(1.958) = 2.214$$

$$I_o(\mu_s R_2) = I_o(2.354) = 2.9458$$

$$I_o(\mu_f R_1) = I_o(11.206) = 8870.400426$$

$$I_o(\mu_f R_2) = I_o(13.467) = 77442.09311$$

$$K_o(\mu_s R_1) = K_o(1.958) = 0.1199$$

$$K_o(\mu_s R_2) = K_o(2.354) = 0.074184$$

$$K_o(\mu_f R_1) = K_o(11.206) = 5.0346 \times 10^{-6}$$

$$K_o(\mu_f R_2) = K_o(13.467) = 4.7963 \times 10^{-7}$$

และ

$$J_1(1R_1) = J_1(2.212) = 0.56698$$

$$I_1(mR_1) = I_1(14.064) = 132706.2908$$

$$I_1(\mu_s R_1) = I_1(1.958) = 1.5292$$

$$I_1(\mu_f R_1) = I_1(11.206) = 8465.762437$$

$$K_1(\mu_s R_1) = K_1(1.958) = 0.1478$$

$$K_1(\mu_f R_1) = K_1(11.206) = 5.2547 \times 10^{-6}$$

และจากสมการที่ (5.67)

$$J_o(1R_1) = 0.1037$$

$$S_1 J_o(1R_1) = 0.04543$$

$$D_{1s}1\, J_1(1R_1) = 0.00861$$

$$D_{1f}S_1\, 1\, J_1(1R_1) = 0.00505$$

$$I_o(mR_1) = 137624.3776$$

$$S_1' I_o(mR_1) = -108568.2496$$

$$-D_{1s}m\, I_1(mR_1) = 12806.24237$$

$$-D_{1f}S_1' mI_1(mR_1) = 13549.24546$$

$$\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_o(\mu_s R_1) - K_o(\mu_s R_1) = -0.06414$$

$$-D_{2s}\mu_s \left[\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_1(\mu_s R_1) + K_1(\mu_s R_1) \right] = -0.002503$$

$$\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) = -4.979662 \times 10^{-6}$$

$$S_2' \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) \right] = 3.666525 \times 10^{-6}$$

$$-D_{2s}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_1) + K_1(\mu_f R_1) \right] = -4.080255 \times 10^{-7}$$

$$-S_2' D_{2f}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_1) + K_1(\mu_f R_1) \right] = 4.029286 \times 10^{-7}$$

$$D = \begin{vmatrix} 0.1037 & 137624.3776 & -0.0641 & -4.9796 \times 10^{-6} \\ 0.0454 & -108568.2496 & 0 & 3.6665 \times 10^{-6} \\ 0.0086 & -12806.2423 & -0.0025 & -4.0802 \times 10^{-7} \\ 0.0050 & 13549.2454 & 0 & 4.0292 \times 10^{-7} \end{vmatrix}$$

$$= -2.73433 \times 10^{-5}$$

จะเห็นได้ว่าค่าดีเทอร์มิแนนท์ (D) ยังไม่เป็นศูนย์ตามต้องการหรือตามจุดประสงค์ของเงื่อนไขในการเกิดกรณีวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน จึงต้องมีการกำหนดค่า k_∞ ขึ้นใหม่อีกค่าหนึ่ง ซึ่งสมมุติให้ $k_\infty = 1.15307$ ดังนั้น

ส่วนของแกนเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่เป็นดังนี้

K_∞	=	1.15307	
R_1	=	123.88	ซม.
L_{1s}^2	=	235.54	ซม.^{2}
L_{1f}^2	=	124.489	ซม.^{2}
D_{1s}	=	0.85	ซม.
D_{1f}	=	1.14	ซม.
Σ_{1s}	=	0.00361	ซม.$^{-1}$
Σ_{1f}	=	0.00915	ซม.$^{-1}$
k_{1s}^2	=	0.00424	ซม.$^{-1}$

k_{1f}^2 = 0.00803 ซม.$^{-2}$

B_1^2 = 4.11377×10^{-4} ซม.$^{-2}$

$B_1^{\prime 2}$ = -0.012689 ซม.$^{-2}$

1^2 = 2.61330597 ซม.$^{-2}$

1 = 0.01616 ซม.$^{-1}$

$-m^2$ = -0.01284 ซม.$^{-2}$

m = 0.11331 ซม.$^{-2}$

S_1 = 0.43226

$S_1^{\prime}$ = 0.7838

$1R_1$ = 2.0026

mR_1 = 14.037

ส่วนของตัวสะท้อนนิวตรอนมีค่าคงที่ ดังนั้น

R_2 = 148.88 ซม.

L_{2s}^2 = 10000 ซม.

L_{2f}^2 = 124.489 ซม.^{2}

D_{2s} = 0.85 ซม.

D_{2f} = 1.14 ซม.

Σ_{2s} = 0.85×10^{-4} ซม.$^{-1}$

Σ_{2f} = 0.00915 ซม.$^{-1}$

K_{2s}^2 = 1×10^{-4} ซม.$^{-2}$

K_{2f}^2 = 0.00803 ซม.$^{-2}$

$B_2^2 = -1 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$B_2^{\prime 2} = -0.00803$ ซม.$^{-2}$

$-\mu_s^2 = -2.5004 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$\mu_s = 0.01581$ ซม.$^{-1}$

$-\mu_f^2 = -0.00818$ ซม.$^{-2}$

$\mu_f = 0.09045$ ซม.$^{-1}$

$S_2^{\prime} = -0.7363$

$\mu_s R_1 = 1.958$

$\mu_f R_1 = 11.206$

$\mu_s R_2 = 2.354$

$\mu_f R_2 = 13.467$

จากตารางเบสเสล (ดูภาคผนวก ง.)

$J_o(1R_1) = J_o(2.0026) = 0.222392$

$I_o(mR_1) = I_o(14.037) = 134,093.012$

$I_o(\mu_s R_1) = I_o(1.958) = 2.214$

$I_o(\mu_s R_2) = I_o(2.354) = 2.9458$

$I_o(\mu_f R_1) = I_o(11.206) = 8870.400426$

$I_o(\mu_f R_2) = I_o(13.467) = 77442.09311$

$K_o(\mu_s R_1) = K_o(1.958) = 0.1199$

$$K_o(\mu_s R_2) = K_o(2.354) = 0.074184$$

$$K_o(\mu_f R_1) = K_o(11.206) = 5.0346 \times 10^{-6}$$

$$K_o(\mu_f R_2) = K_o(13.467) = 4.7963 \times 10^{-7}$$

และ

$$J_1(1R_1) = J_1(2.0026) = 0.576544$$

$$I_1(mR_1) = I_1(14.037) = 139272.2424$$

$$I_1(\mu_s R_1) = I_1(1.958) = 1.5292$$

$$I_1(\mu_f R_1) = I_1(11.206) = 8465.762437$$

$$K_1(\mu_s R_1) = K_1(1.958) = 0.1478$$

$$K_1(\mu_f R_1) = K_1(11.206) = 5.254 \times 10^{-6}$$

และสมการที่ (5.67)

$$J_o(1R_1) = 0.22239$$

$$S_1 J_o(1R_1) = 0.09613$$

$$D_{1s} 1 J_1(1R_1) = 0.00792$$

$$D_{1f} S_1 1 J_1(1R_1) = 0.00459$$

$$I_o(mR_1) = 134093.012$$

$$S'_1 I_o(mR_1) = -105102.1028$$

$$-D_{1s} m I_1(mR_1) = -13413.79714$$

$$-D_{1f} S'_1 m I_1(mR_1) = 14100.77292$$

$$\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_o(\mu_s R) - K_o(\mu_s R_1) = -0.0641$$

$$-D_{2s}\mu_s \left[\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_1(\mu_s R_1) + K_1(\mu_s R_1) \right] = -0.00250$$

$$\left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) \right] = -4.9796 \times 10^{-6}$$

$$S_2 \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) \right] = 3.6665 \times 10^{-6}$$

$$-D_{2s}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_2) + K_1(\mu_f R_1) \right] = -4.080255 \times 10^{-7}$$

$$-S'_2 D_{2f}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_1) + K_1(\mu_f R_1) \right] = 4.02928 \times 10^{-7}$$

ดังนั้น

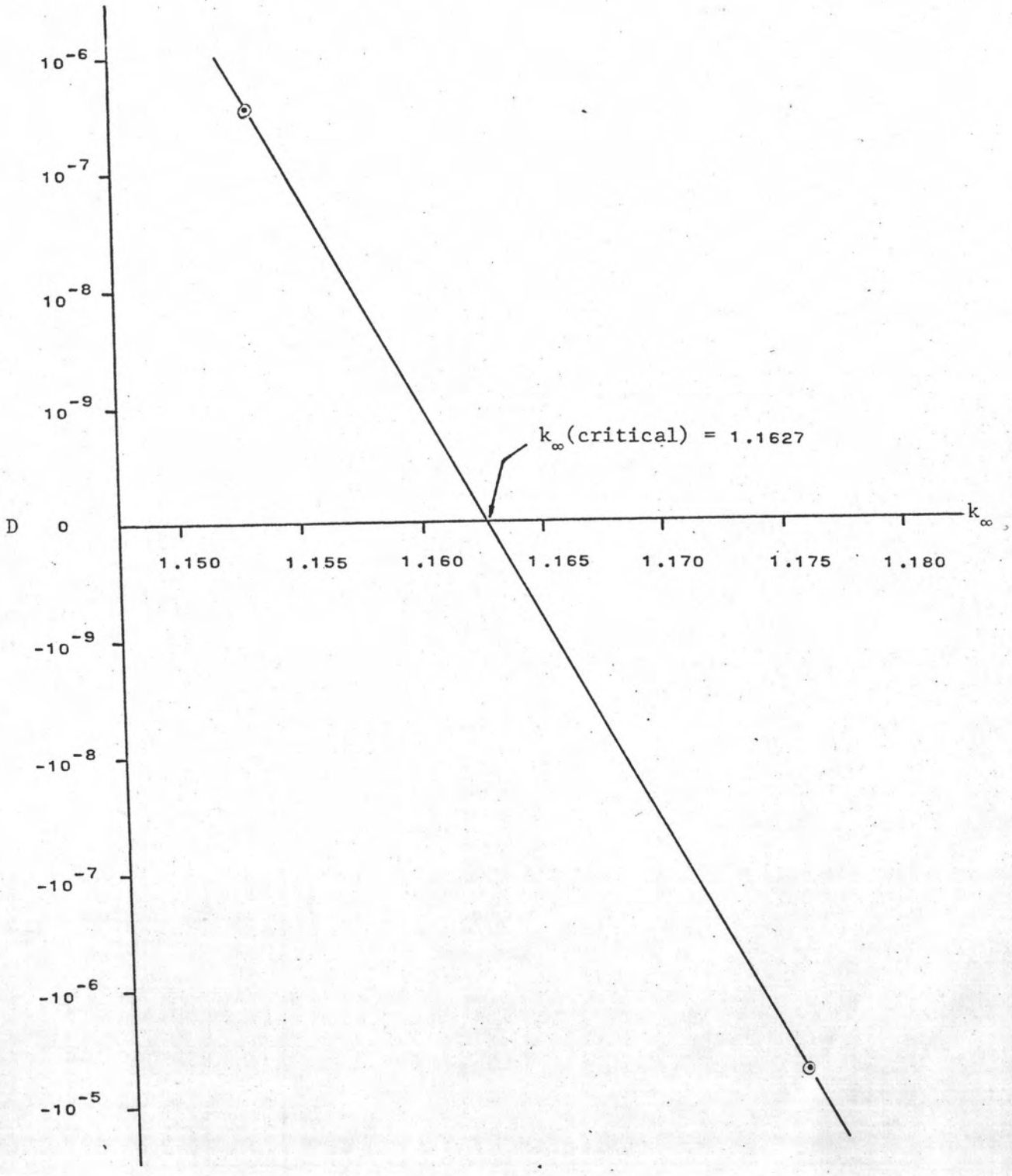
$$D = \begin{vmatrix} 0.22239 & 134093.012 & -0.06414 & -4.9796 \times 10^{-6} \\ 0.09613 & -105102.102 & 0 & 3.6665 \times 10^{-6} \\ 0.00792 & -13413.797 & -0.00250 & -4.0802 \times 10^{-7} \\ 0.00459 & 14100.772 & 0 & 4.0292 \times 10^{-7} \end{vmatrix}$$

$$= 4.5757629 \times 10^{-6}$$

แต่ค่าดีเทอร์มิแนนท์ (D) ที่คำนวณได้เมื่อสมมุติค่า $k_\infty = 1.15307$ ก็ยังไม่เป็นศูนย์ จึงสามารถหาได้โดยวิธีเขียนกราฟระหว่างค่า k_∞ กับ D ซึ่งกำหนดให้ค่า D เป็นศูนย์เมื่อ $D = 10^{-10}$ เมื่อลากเส้นตรงระหว่างจุดสองจุดตัดแกน D ที่ศูนย์แล้วอ่านค่า k_∞ ซึ่งค่านี้จะเป็นค่า k_∞ ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤต ดังรูปที่ 6.10

จากรูปที่ 6.10 จะเห็นว่า ที่ค่า D = 0 นั้น สามารถอ่านค่า k_∞ ได้เท่ากับ 1.1627 ซึ่งค่า $k_\infty = 1.1627$ นี้ จะทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤตได้พอดี แต่ที่จริงแล้วเราได้ออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่มีค่า $k_\infty = 1.2299$ จากเหตุผลนี้เราสามารถคำนวณค่า k_{eff} ที่เพิ่มขึ้นได้จากสมการที่ (5.73)

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{k_\infty(\text{actual}) - k_\infty(\text{critical})}{k_\infty(\text{actual})}$$



รูปที่ 6.10 แสดงวิธีการหาค่า k_∞ ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤต เมื่อ k_{eff} มากกว่า 1

ในที่นี้ k_∞(actual) คือ ค่า k_∞ที่ออกแบบสำหรับแกน เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่ง เป็นค่าจริง

k_∞(critical) คือ ค่า k_∞ที่สมมุติขึ้นมา เมื่อ เกิดกรณีวิกฤต ซึ่งมีตัวสะท้อนนิวตรอนหุ้มแกน เครื่องปฏิกรณ์

และ k_∞(actual) = 1.2299

k_∞(critical) = 1.1627

แทนค่าจะได้

$$\frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{1.2299 - 1.1627}{1.2299}$$

$$\frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} = 0.054638$$

ดังนั้น k_{eff} = 1.05779

จะ เห็นได้ว่าตอนแรกที่ออกแบบแกน เครื่องปฏิกรณ์นั้น จะอยู่ในกรณีวิกฤตพอดี (k_{eff} = 1.00) เมื่อหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนโดย เป็นน้ำชนิดหนักแล้ว เครื่องปฏิกรณ์ก็จะอยู่ในกรณีสูงกว่าวิกฤต (k_{eff} > 1) เนื่องจากว่าน้ำชนิดหนัก เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนที่ดี การกำหนดให้ความหนาของตัวสะท้อนนิวตรอน เป็น 25 ซม. นั้น เหมาะสมที่สุดแล้ว ซึ่ง เพิ่มค่ารีแอคติวิตี้ขึ้นประมาณ 5 เปอร์ เซนต์

ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นการแสดงวิธีคำนวณโดยแกน เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีขนาดวิกฤตพอดีตามการคำนวณในหัวข้อ 6.1.1 แล้วหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนที่มีความหนา 25 ซม. เกิดกรณีสูงกว่าวิกฤต แต่ถ้า เราต้องการที่จะออกแบบตามความ เหมาะสมโดยกำหนดให้

R = 100 ซม.

D = 200 ซม.

H = 166.66 ซม.

จะ เห็นได้ว่าขนาดที่ต้องการออกแบบนั้น เล็กกว่าขนาดวิกฤตที่คำนวณได้ ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์นี้จึงต่ำกว่าวิกฤต (k_{eff} < 1) การที่จะให้ เครื่องปฏิกรณ์นี้อยู่ในกรณีวิกฤตได้นั้นจะต้องหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนซึ่งหนา เท่าไรก็ยังไม่ทราบ

ในที่นี้กำหนดให้หนา 30 ซม. แต่ เนื่องจากน้ำชนิดหนัก เป็นตัวสะท้อนนิวตรอนที่ดีจึงคิดเอาว่าหนา 25 ซม. สำหรับส่วนบนและล่าง ค่าบัคคลิงตามแนวแกน เท่ากับ $(\pi/H + 50)^2 = 2.1025 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

ส่วนของแกน เครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ดังนี้

K_∞	=	1.2195	(สมมุติขึ้นมา)
R_1	=	100	ซม.
L_{1s}^2	=	235.54	ซม.^{2}
L_{1f}^2	=	124.489	ซม.^{2}
D_{1s}	=	0.85	ซม.
D_{1f}	=	1.14	ซม.
Σ_{1s}	=	0.00361	ซม.$^{-1}$
Σ_{1f}	=	0.00915	ซม.$^{-1}$
k_{1s}^2	=	0.00424	ซม.$^{-2}$
k_{1f}^2	=	0.00803	ซม.$^{-2}$
B_1^2	=	5.8151586×10^{-4}	ซม.$^{-2}$
B'^2	=	-0.01285	ซม.$^{-2}$
1^2	=	3.7126283×10^{-4}	ซม.$^{-2}$
1	=	0.01926	ซม.$^{-1}$
$-m^2$	=	-0.01306	ซม.$^{-2}$
m	=	0.11428	
S_1	=	0.44855	
S'_1	=	-0.79932	

$1R_1$ = 1.926

mR_1 = 11.428

ส่วนของตัวสะท้อนนิวตรอนมีค่าคงที่ดังนี้

R_2 = 130 ซม.

L_{2s}^2 = 10000 ซม.^{2}

L_{2f}^2 = 124.489 ซม.^{2}

D_{2s} = 0.85 ซม.

D_{2f} = 1.14 ซม.

Σ_{2s} = 0.85×10^{-4} ซม.$^{-1}$

Σ_{2f} = 0.00915 ซม.$^{-1}$

k_{2s}^2 = 1×10^{-4} ซม.$^{-2}$

k_{2f}^2 = 0.00803 ซม.$^{-2}$

B_2^2 = -1×10^{-4} ซม.$^{-2}$

$B_2^{'2}$ = -0.00803 ซม.$^{-2}$

$-\mu_s^2$ = -3.102413×10^{-4} ซม.$^{-2}$

μ_s = 0.01761 ซม.$^{-1}$

$-\mu_f^2$ = -0.00824 ซม.$^{-2}$

μ_f = 0.09077 ซม.$^{-1}$

S_2' = -0.73666

$\mu_s R_1$ = 1.761

$\mu_f R_1$ = 9.077

$\mu_s R_2$ = 2.289

$\mu_f R_2$ = 11.801

จากตาราง เบส เสล. (ดูภาคผนวก ง.)

$J_o(1R_1)$ = $J_o(1.926)$ = 0.26672

$I_o(mR_1)$ = $I_o(11.428)$ = 10964.1798

$I_o(\mu_s R_1)$ = $I_o(1.761)$ = 1.9375

$I_o(\mu_s R_2)$ = $I_o(2.289)$ = 2.8069

$I_o(\mu_f R_1)$ = $I_o(9.077)$ = 1168.77

$I_o(\mu_f R_2)$ = $I_o(11.801)$ = 15658.94434

$K_o(\mu_s R_1)$ = $K_o(1.761)$ = 0.15321

$K_o(\mu_f R_1)$ = $K_o(9.077)$ = 0.46517×10^{-4}

$K_o(\mu_f R_2)$ = $K_o(11.801)$ = 2.7078245×10^{-6}

$K_o(\mu_s R_2)$ = $K_o(2.289)$ = 0.080196

และ $J_1(1R_1)$ = $J_1(1.846)$ = 0.58042

$I_1(mR_1)$ = $I_1(11.415)$ = 10477.33201

$I_1(\mu_s R_1)$ = $I_1(1.761)$ = 1.27692

$I_1(\mu_f R_1)$ = $I_1(9.077)$ = 1109

$K_1(\mu_s R_1)$ = $K_1(1.761)$ = 0.19254

$K_1(\mu_f R_1)$ = $K_1(9.077)$ = 0.49436×10^{-4}

จากสมการที่ (5.67)

$$J_o(1R_1) = 0.26672$$

$$S_1 J_o(1R_1) = 0.11964$$

$$D_{1s} 1 J_1(1R_1) = 0.00950$$

$$D_{1f} S_1 1 J_1(1R_1) = 0.00572$$

$$I_o(mR_1) = 10964.1798$$

$$S_1' I_o(mR_1) = -8763.90077$$

$$-D_{1s} m I_1(mR_1) = -1017.8192$$

$$-D_{1f} S_1' m I_1(mR_1) = 1091.1334$$

$$\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_o(\mu_s R_1) - K_o(\mu_s R_1) = -0.09785$$

$$-D_{2s}\mu_s \left[\frac{K_o(\mu_s R_2)}{I_o(\mu_s R_2)} I_1(\mu_s R_1) + K_1(\mu_s R_1) \right] = -0.00344$$

$$\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) = -0.46314 \times 10^{-4}$$

$$S_2' \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_o(\mu_f R_1) - K_o(\mu_f R_1) \right] = 0.34118 \times 10^{-4}$$

$$-D_{2s}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_1) + K_1(\mu_f R_1) \right] = -0.03829 \times 10^{-4}$$

$$-S_2' D_{2f}\mu_f \left[\frac{K_o(\mu_f R_2)}{I_o(\mu_f R_2)} I_1(\mu_f R_1) + K_1(\mu_f R_1) \right] = 0.03782 \times 10^{-4}$$

ดังนั้น

$$D = \begin{vmatrix} 0.26672 & 10964.179 & -0.09785 & -0.46314 \times 10^{-4} \\ 0.11964 & -8763.900 & 0 & 0.34118 \times 10^{-4} \\ 0.00950 & -1017.819 & -0.00344 & -0.03829 \times 10^{-4} \\ 0.00572 & 1091.133 & 0 & 0.03782 \times 10^{-4} \end{vmatrix}$$

$$= -8.48564 \times 10^{-7}$$

การกำหนดค่า k_∞ ครั้งแรกยังไม่ทำให้ค่าดี เทอร์มิแนนท์ เป็นศูนย์ จึงกำหนดค่า k_∞ ขึ้นมาอีกค่าหนึ่งสมมุติให้ เท่ากับ 1.21755 จากการคำนวณใน เรื่องตัวสะท้อนนิวตรอน ที่ผ่านมาจะสัง เกต เห็นว่าพอ เปลี่ยนค่า k_∞ ค่าคงที่ในแกน เครื่องปฏิกรณ์จะ เปลี่ยนไปบางค่า ส่วนค่าคงที่ในตัวสะท้อนนิวตรอนนั้นไม่มีการ เปลี่ยนแปลง เลย และจะสัง เกต เห็นว่าค่า เบส เสล ในสองคอลัมน์แรกในดี เทอร์มิแนนท์ เปลี่ยนแปลง ส่วนสองคอลัมน์หลังยังคงที่

ส่วนของแกน เครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ดังนี้

k_∞	=	1.21755	(สมมุติขึ้นมา)
R_1	=	100	ซม.
L_{1s}^2	=	235.54	ซม.^{2}
L_{1f}^2	=	124.489	ซม.^{2}
D_{1s}	=	0.85	ซม.
D_{1f}	=	1.14	ซม.
Σ_{1s}	=	0.00361	ซม.$^{-1}$
Σ_{1f}	=	0.00915	ซม.$^{-1}$
k_{1s}^2	=	0.00424	ซม.$^{-1}$
k_{1f}^2	=	0.00803	ซม.$^{-2}$
B_1^2	=	5.765716×10^{-4}	ซม.$^{-2}$

$B_1'^2 = -0.01284$ ซม.$^{-2}$

$1^2 = 3.6631856 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

$1 = 0.01913945$ ซม.$^{-1}$

$-m^2 = -0.01305$ ซม.$^{-2}$

$m = 0.11426$ ซม.$^{-1}$

$S_1 = 0.44809$

$S_1' = -0.79886$

$1R_1 = 1.914$

$mR_1 = 11.426$

จากตารางเบสเสลในภาคผนวก ง. (เฉพาะค่าที่เปลี่ยนไป)

$J_o(1R_1) = J_o(1.914) = 0.27368$

$I_o(mR_1) = I_o(11.426) = 10943.19011$

$J_1(1R_1) = J_1(1.914) = 0.58078$

$I_1(mR_1) = I_1(11.426) = 10457.31504$

และจากสมการที่ (5.67) (เฉพาะค่าที่เปลี่ยนไป)

$J_o(1R_1) = 0.27368$

$S_1 J_o(1R_1) = 0.12263$

$D_{1s}\ 1\ J_1(1R_1) = 0.00945$

$D_{1f}\ S_1\ 1\ J_1(1R_1) = 0.00567$

$I_o(mR_1) = 10943.19011$

$S_1' I_o(mR_1) = -8742.0964$

$-D_{1s}\ m\ I_1(mR_1) = -1015.6823$

$-D_{1f}\ S_1'\ m\ I_1(mR_1) = 1088.2169$

ดังนั้น

$$D = \begin{vmatrix} 0.27368 & 10943.190 & -0.09785 & -0.46314 \times 10^{-4} \\ 0.12263 & -8742.096 & 0 & 0.34118 \times 10^{-4} \\ 0.00945 & -1015.682 & -0.00344 & -0.03829 \times 10^{-4} \\ 0.00567 & 1088.216 & 0 & 0.03782 \times 10^{-4} \end{vmatrix}$$

$$= 1.177563 \times 10^{-6}$$

การสมมุติค่า k_∞ ครั้งที่สองก็ยังไม่ทำให้ค่าดีเทอร์มิแนนท์เป็นศูนย์ แต่ก็สามารถหาค่า k_∞ ได้ โดยการเขียนกราฟระหว่าง D กับ k_∞ แล้วลากเส้นตรงระหว่างทั้งสองตัดที่แกน D เท่ากับศูนย์ และจะสามารถอ่านค่า k_∞ ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดกรณีวิกฤตได้พอดี ดังรูปที่ 6.11

จากรูปที่ 6.11 ค่า k_∞ ที่พอดีทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดวิกฤตมีค่าเท่ากับ 1.21857 ดังนั้น เราสามารถที่จะหาค่าความหนาที่แท้จริงสำหรับขนาดที่ต้องการนี้ (R = 100 ซม. , H = 166.66) ได้โดย

$$B^2 = \frac{-(k_{1s}^2 + k_{1f}^2) + \sqrt{(k_{1s}^2 + k_{1f}^2) + 4k_{1s}^2 k_{1f}^2 (k_\infty - 1)}}{2}$$

เมื่อ B^2 คือ ค่าบัคคลิงของเครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน

และ $k_{1s}^2 = 0.00424$ ซม.$^{-2}$

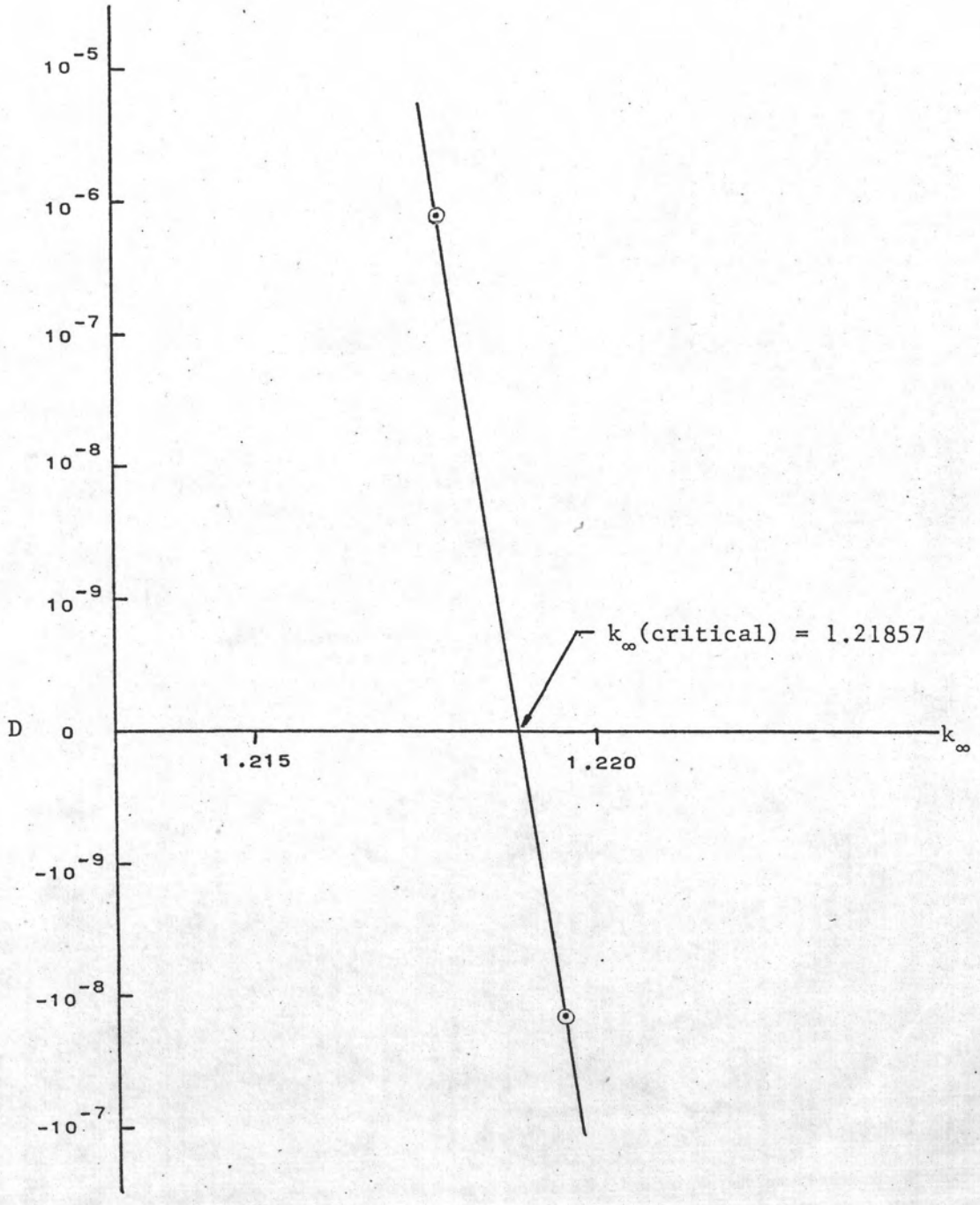
$k_{1f}^2 = 0.00803$ ซม.$^{-2}$

$k_\infty = 1.21857$

แทนค่าได้ $B^2 = 5.79158 \times 10^{-4}$ ซม.$^{-2}$

แต่จากสมการที่ (3.62)

$$B^2 = \left[\frac{2.405}{R}\right]^2 + \left[\frac{\pi}{H + 50}\right]^2$$



รูปที่ 6.11 แสดงวิธีการหาค่า k_∞ ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤต เมื่อค่า k_{eff} เท่ากับ 1

$$\left[\frac{2.405}{R}\right]^2 = (5.79158 \times 10^{-4}) - \left[\frac{\pi}{216.66}\right]^2$$

$$= 3.689 \times 10^{-4} \quad \text{ซม.}^{-2}$$

เพราะฉะนั้น $$R = \frac{2.405}{\sqrt{3.689 \times 10^{-4}}}$$

$$= 125 \quad \text{ซม.}$$

แสดงว่าตัวสะท้อนนิวตรอนที่ใช้จริงนั้นควรหนา = 125 - 100 = 25 ซม.