

# ภาคผนวก

## 1. ความหมายของค่าและสัญลักษณ์ ในวิชาฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์

ในการศึกษาวิชาฟิสิกส์เครื่องปฏิกรณ์ จำเป็นต้องทราบความหมายของค่าต่างๆ ที่นำมาใช้ในวิชานี้ จึงได้รวบรวมไว้ดังต่อไปนี้

### 1. อัลบิโด (Albedo)

เป็นตัวเลขที่แสดงว่าตัวกลางนั้นมีคุณสมบัติในการสะท้อนนิวตรอนได้ดีหรือไม่

$$\text{อัลบิโด} = \frac{J_-}{J_+}$$

เมื่อ  $J_-$  คือกระแสนิวตรอนจากตัวสะท้อนที่ผ่านเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์

$J_+$  คือกระแสนิวตรอนที่ผ่านออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์

### 2. เครื่องปฏิกรณ์ผลิตเชื้อเพลิง (Breeder reactor)

คือเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนธาตุที่มีอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติ (fertile) เช่น  $U^{238}$  และ  $Th^{232}$  ให้เป็นธาตุที่เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวได้ เช่น  $Pu^{239}$  และ  $U^{233}$

### 3. บัคลิง (Buckling) ใช้สัญลักษณ์ $B^2$

เป็นค่าที่ใช้หาขนาดและส่วนผสมของเครื่องปฏิกรณ์เมื่ออยู่ในสภาวะวิกฤต,  $B_g^2$  เรียก บัคลิงที่ขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของเครื่องปฏิกรณ์  $B_m^2$  เรียก บัคลิงที่ขึ้นกับส่วนผสมของเชื้อเพลิง, เมื่อเครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต,  $B_g^2 = B_m^2$

### 4. ความหนาแน่นของการชน (Collision density) ใช้สัญลักษณ์ $F$

คือปริมาณการชนที่เกิดขึ้น ต่อ 1 หน่วยปริมาตร ในเวลา 1 วินาที

$$F = \Sigma \phi \text{ อะตอม/ซม.}^3/\text{วินาที}$$

เมื่อ  $\Sigma$  มีหน่วยเป็น  $\text{ซม.}^{-1}$  และ  $\phi$  มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ $\text{ซม.}^2/\text{วินาที}$

5. ความหายนะทางนิวเคลียร์ (Catastrophe)

หมายถึงการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวมากมายจนควบคุมไม่ได้ มีรังสีและความร้อนออกมา

6. พารามิเตอร์สำหรับการชน (Collision parameter) ใช้สัญลักษณ์  $\alpha$

เป็นตัวเลขที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของพลังงานของนิวตรอนก่อนชนและหลังชนขึ้นกับเลขมวลของนิวเคลียสที่นิวตรอนเข้าชน

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$$

เมื่อ A คือเลขมวล

7. มวลวิกฤต (Critical mass)

หมายถึง มวลที่พอดีทำให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานต่อไปได้เรื่อยๆ โดยมีแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1

8. ระบบวิกฤต (Critical system)

คือระบบที่มีมวลพอดีทำให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานต่อไปได้เรื่อยๆ โดยมีแฟกเตอร์ตัวคูณ = 1

9. ดีเลย์ นิวตรอน (Delayed neutrons)

คือนิวตรอนที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวนานกว่า  $10^{-12}$  วินาที เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์

10. พื้นที่การแพร่ (Diffusion area) ใช้สัญลักษณ์  $L^2$

คือพื้นที่ที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลาง มีหน่วยเป็น ซม.<sup>2</sup>

11. สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ใช้สัญลักษณ์ D

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นค่าคงที่ สำหรับตัวกลางที่มีการแพร่ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

12. สมการการแพร่ (Diffusion equation)

เป็นสมการหนึ่งที่ใช้หาฟลักซ์ ที่ตำแหน่งใดๆ ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณอื่นที่ไม่มีเชื้อเพลิง สมการทั่วไป คือ

$$D \nabla^2 \phi - \Sigma_a \phi + S = \frac{\partial n}{\partial t}$$

13. ความยาวของการแพร่ (Diffusion length) ใช้สัญลักษณ์  $L$

คือระยะทางที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลางตามทฤษฎีการแพร่

$$L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}} = \frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\lambda_a \lambda_s}{3(1-\mu)}}$$

14. เวลาการแพร่ (Diffusion time)

เวลาที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลางจนกว่าจะถูกจับไป

สำหรับระบบขนาดอนันต์ เวลาการแพร่  $t_d = \frac{1}{v\Sigma_a}$  วินาที

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของนิวตรอน มีหน่วย ซม./วินาที

15. การชนแบบยืดหยุ่นแล้วกระเจิง (Elastic scattering collision)

ปฏิกิริยา  $X (n,n) X$  เป็นการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสเพื่อลดพลังงานของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์

16. ระยะทางเอกซ์ตราโพลชัน (Extrapolation distance) ใช้สัญลักษณ์  $d$

คือระยะทางห่างจากขอบเขตที่มีฟลักซ์นิวตรอนเป็นศูนย์

$$d = 0.71 \lambda_{tr}$$

เมื่อ  $\lambda_{tr}$  คือทางเดินเฉลี่ยการนำพา

17. แฟกเตอร์ฟาสต์ฟิชชัน (Fast fission factor) ใช้สัญลักษณ์  $\epsilon$

คือแฟกเตอร์ที่เกิดการแบ่งแยกตัวโดยนิวตรอนเร็ว หาได้จาก อัตราส่วนของนิวตรอนเร็วทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยการแบ่งแยกตัว ที่มาจากนิวตรอนทุกพลังงาน ต่อจำนวนนิวตรอนเร็วที่เกิดจากการแบ่งแยกตัวโดยเทอร์มาลนิวตรอน

18. นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron)

คือนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 เมมอีวี ขึ้นไป

19. เฟอริไทล์ไอโซโทป (Fertile isotope)

คือไอโซโทปของธาตุที่มีอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติ เช่น  $U^{238}$  และ  $Th^{232}$  เกิดการแบ่งแยกตัวได้ยากโดยนิวตรอนเร็ว (fissionable nuclides) แต่สามารถเปลี่ยนให้เป็นฟิชไซล์ไอโซโทปได้

20. กฎของฟิค (Fick's law)

เป็นกฎที่ใช้ในการแพร่ของนิวตรอนในตัวกลาง กล่าวว่ามีนิวตรอนไหลจากบริเวณที่มีความหนาแน่น (ฟลักซ์) สูงไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า กระแสนิวตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามระยะทาง

ตามกฎของฟิค, กระแสนิวตรอน ตามทิศทาง  $x$  คือ

$$J_x = -D \frac{d\phi}{dx}$$

21. ฟิชชันแฟรกเมนต์ (Fission fragment)

หมายถึง ส่วนที่แตกออกมาหลังจากเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว เช่น เมื่อนิวตรอนเข้าชนยูเรเนียม-235 จะเกิดส่วนที่แตกออกมาคือ  $\text{Sr}^{94}$  และ  $\text{Xe}^{140}$

22. ฟิชไซส์ไอโซโทป (Fissile isotope)

คือไอโซโทปของธาตุที่เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัวได้ ไม่ว่านิวตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานเท่าใด ได้แก่  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{U}^{233}$  และ  $\text{Pu}^{239}$

23. ฟิชชันยิลด์ (Fission yield)

คือผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว

24. เลทาร์จี (Lethargy) ใช้สัญลักษณ์  $U$

หมายถึงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการชน ในรูปของลอการิทึม เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

$$U = \ln \frac{E_0}{E}$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นพลังงานของตัวกำเนิดนิวตรอน

$E$  เป็นพลังงานของนิวตรอน

25. ภาคตัดขวางมหัพภาค (Macroscopic cross section) ใช้สัญลักษณ์  $\Sigma$

หมายถึงพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น เซนติเมตร<sup>-1</sup>

$$\Sigma = N \sigma$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนอะตอม/ซม.<sup>3</sup>,  $\sigma$  คือภาคตัดขวางจุลภาค มีหน่วยเป็น ซม.<sup>2</sup>

26. ทางเดินเฉลี่ย (Mean free path) ใช้สัญลักษณ์  $\lambda$

คือระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปได้ในตัวกลางจนกว่าจะถูกจับ หรือเกิดการชน แล้วกระเจิง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

$\lambda_s$  = ระยะทางเฉลี่ยกระเจิง

$\lambda_a$  = ระยะทางเฉลี่ยดูดกลืน

$\lambda_r$  = ระยะทางเฉลี่ยการนำพา

## 27. ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section) ใช้สัญลักษณ์ $\sigma$

หมายถึงพื้นที่ของเป้าที่อนุภาคตกกระทบแล้วเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็นเซนติเมตร<sup>2</sup> เป็นค่าที่ขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบ, ชนิดของธาตุที่ใช้เป็นเป้า และชนิดของปฏิกิริยา

$\sigma_s$  = ภาคตัดขวางจุลภาคกระเจิง

$\sigma_a$  = ภาคตัดขวางจุลภาคดูดกลืน

## 28. อัตราส่วนลดความเร็ว (Moderating Ratio)

เป็นตัวเลขที่แสดงถึงความสามารถของตัวลดความเร็วในการลดพลังงานของนิวตรอนหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง กำลังที่ทำให้นิวตรอนมีพลังงานลดลง (Slowing down power) คือ  $\xi\Sigma_s$  ต่อภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืน (Macroscopic absorption cross section) คือ  $\Sigma_a$  เขียนได้ว่า

$$\text{อัตราส่วนลดความเร็ว} = \frac{\xi\Sigma_s}{\Sigma_a}$$

## 29. แฟกเตอร์ตัวคูณ (Multiplication factor) ใช้สัญลักษณ์ $k$

เป็นตัวเลขที่แสดงว่า เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤตหรือไม่

ถ้า  $k = 1$  แสดงว่าเครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤต (Critical)

$k > 1$  แสดงว่าเป็นระบบสูงกว่าวิกฤต (Super critical)

$k < 1$  แสดงว่าเป็นระบบต่ำกว่าวิกฤต (Sub critical)

ถ้าเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่มาก เรียก  $k_{\infty}$  คือ แฟกเตอร์ตัวคูณอนันต์ (Infinite multiplication factor) ถ้าเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดจำกัด เรียก  $k_{\text{eff}}$  คือ แฟกเตอร์ตัวคูณที่แท้จริง (Effective multiplication factor)

## 30. กระแสนิวตรอน (Neutron current) ใช้สัญลักษณ์ $J$

หมายถึง จำนวนนิวตรอนที่วิ่งไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ผ่านพื้นที่ 1 ซม.<sup>2</sup> ในเวลา 1 วินาที เป็นปริมาณเวกเตอร์

ดังนั้นกระแสนิวตรอนตามทิศทาง  $x$  คือ  $J_x$  มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที

**31. นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux) ใช้สัญลักษณ์  $\phi$**

หมายถึง ปริมาณนิวตรอนที่ผ่านเข้ามาในพื้นที่ 1 ตารางหน่วย จากทุกทิศทางในเวลา 1 วินาที เป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที

**32. ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนไม่หนีออกไปจากระบบ**

(Non leakage probability) ใช้สัญลักษณ์  $\epsilon$

คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนไม่รั่วออกไปจากระบบ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อไป สำหรับเทอร์มาลนิวตรอน เรียก ความน่าจะเป็นที่เทอร์มาลนิวตรอนไม่รั่วออกไปจากระบบ (Thermal non leakage probability) =  $\epsilon_{th}$

**33. พรีเคอร์เซอร์ (Precursor)**

คือนิวตรอนที่เกิดขึ้นทีหลัง มีค่าครึ่งชีวิต ค่าเดียวกับ โบรมีน -87

**34. พรอมป์นิวตรอน (Prompt neutron)**

คือนิวตรอนที่เกิดขึ้นทันทีหลังจากการเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว ภายในเวลา  $10^{-12}$  วินาที

**35. รีแอกทิวิตี (Reactivity)**

เป็นตัวเลขที่แสดงว่าเครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤตหรือไม่

$$\text{รีแอกทิวิตี} = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

**36. ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนหนีออกมาได้เมื่อผ่านพลังงานเรโซแนนซ์**

(Resonance escape probability) ใช้สัญลักษณ์  $p$

หมายถึง โอกาสที่นิวตรอนจะหนีออกมาได้จากการถูกจับขณะที่ผ่านพลังงานเรโซแนนซ์ เพื่อลดพลังงานต่อไปจนเป็นเทอร์มาลนิวตรอน

37. เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)

คือนิวตรอนที่มีพลังงาน 0.0253 อีวี ที่ 20° เซลเซียส การชนของนิวตรอนกับสิ่งแวดล้อม จะไม่มีการเสียหรือได้รับพลังงาน

38. แฟกเตอร์เทอร์มัลยูทิลิเซชัน (Thermal utilization factor) ใช้สัญลักษณ์  $f$

หมายถึงอัตราส่วนที่เทอร์มัลนิวตรอนจะถูกดูดกลืนโดยเชื้อเพลิงต่อเทอร์มัลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนทั้งหมด ทั้งโดยเชื้อเพลิงและตัวลดความเร็ว

$$f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}}$$

39. อีตา (Eta) ใช้สัญลักษณ์  $\eta$

หมายถึง ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนเร็วที่ส่งออกมาต่อการจับเทอร์มัลนิวตรอนหนึ่งตัว แล้วเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c}$$

เมื่อ  $\nu$  คือ นิวตรอนที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อเกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว

40.  $\xi$

คือค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ลดลงต่อการชนหนึ่งครั้ง ในรูปของลอการิทึม

$$\xi = \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right)_{av}$$

41.  $r^2$

คือระยะทางกำลังสองเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปจนกว่าจะถูกดูดกลืน เป็นการรวมระยะทางทั้งหมด

$$\overline{r^2} = 6L^2$$

เมื่อ  $L^2$  คือพื้นที่การแพร่

## 2. หน่วยวัดรังสี

หน่วยเดิม	หน่วยใหม่
rad	gray (Gy)
rem	sievert (Sv)
1 rem	$10^{-4}$ micro Sv
<b>curie (Ci)</b>	becquerel (Bq)
roentgen (R)	<b>coulomb (C) per kilogram (kg)</b>

### ความหมายของคำ

- rad** หมายถึง วัตถุใดได้รับรังสี แล้วทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่วัตถุนั้น มีค่าเท่ากับ 100 เอิร์ก ต่อกรัมของวัตถุ กำหนดว่า วัตถุนั้นได้รับรังสี 1 แรด
- rem** หมายถึง การที่มนุษย์ได้รับรังสี แล้วก่อให้เกิดผลทางชีววิทยา เทียบเท่ากับผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา 1 แรด ปริมาณรังสีที่ได้รับเท่ากับ 1 เรม
- curie (Ci)** กำหนดว่า ไอโซโทปกัมมันตรังสีใด มีการสลายด้วยอัตรา  $3.7 \times 10^{10}$  นิวเคลียส (อะตอม) ต่อวินาที ไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นมีความแรง 1 คูรี
- roentgen (R)** คือ ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ และความดันมาตรฐานแตกตัวเกิดไอออน  $2.08 \times 10^9$  คู่ ปริมาณรังสีนั้นมีค่าเท่ากับ 1 เรินท์เก้น



$$100 \text{ rad} = 1 \text{ gray (Gy)}$$

**rem → sievert (Sv)**

$$1 \text{ rem} = .01 \text{ Sv} = 1 \text{ centi Sv} = 10 \text{ milli Sv} = 10^4 \text{ micro Sv}$$

$$10 \text{ rem} = 1 \text{ Sv} = 10 \text{ centi Sv} = 100 \text{ milli Sv} = 10^5 \text{ micro Sv}$$

$$100 \text{ rem} = 10 \text{ Sv} = 100 \text{ centi Sv} = 1000 \text{ milli Sv} = 10^6 \text{ micro Sv}$$

$$1 \text{ millirem} = .01 \text{ milli Sv} = 10 \text{ micro Sv}$$

$$10 \text{ millirem} = .1 \text{ milli Sv} = 100 \text{ micro Sv}$$

$$100 \text{ millirem} = 1 \text{ milli Sv} = 1000 \text{ micro Sv}$$

$$1 \text{ microrem} = .01 \text{ micro Sv} = 10 \text{ nano Sv} = 10^{-8} \text{ Sv}$$

**curie (Ci) → becquerel (Bq)**

$$1 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dis/sec} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = .037 \text{ tera Bq}$$

$$10 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{11} \text{ dis/sec} = 3.7 \times 10^{11} \text{ Bq} = .37 \text{ tera Bq}$$

$$100 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{12} \text{ dis/sec} = 3.7 \times 10^{12} \text{ Bq} = 3.7 \text{ tera Bq}$$

$$1000 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{13} \text{ dis/sec} = 3.7 \times 10^{13} \text{ Bq} = 37 \text{ tera Bq}$$

$$1 \text{ milli Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = \text{mega Bq}$$

$$1 \text{ micro Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ Bq} = .037 \text{ mega Bq} = 37 \text{ kilo Bq}$$

$$1 \text{ nano Ci} = 37 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ pico Ci} = .037 \text{ Bq} = 37 \text{ milli Bq}$$

$$100 \text{ milli Ci} = 3.7 \text{ giga Bq}$$

$$100 \text{ micro Ci} = 3.7 \text{ mega Bq}$$

**roentgen (R) → coulomb (C) per kilogram (kg)**

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} = .258 \text{ milli C/kg} = 258 \text{ micro C/kg} \approx 260 \frac{\mu\text{C}}{\text{kg}}$$

$$10 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-3} \text{ C/kg} = 2.58 \text{ milli C/kg} = 2580 \text{ micro C/kg}$$

$$100 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-2} \text{ C/kg} = 25.8 \text{ milli C/kg}$$

$$1 \text{ milli R} = 2.58 \times 10^{-7} \text{ C/kg} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ milli C/kg} = .258 \text{ micro C/kg}$$

$$10 \text{ milli R} = 2.58 \times 10^{-6} \text{ C/kg} = 2.58 \times 10^{-3} \text{ milli C/kg} = 2.58 \text{ micro C/kg}$$

$$100 \text{ milli R} = 2.58 \times 10^{-5} \text{ C/kg} = 2.58 \times 10^{-2} \text{ milli C/kg} = 25.8 \text{ micro C/kg}$$