บทที่ 1

บทนำ

นิวตรอนที่เกิดจากตัวกำเนิดนิวตรอนทั่ว ๆ ไปเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงอยู่ในช่วงของเมกะอีเลกตรอนโวลต์ นิวตรอนพวกนี้มักไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุที่วิ่งเข้าชน (ไม่ถูกดูดกลืน) เป็นแต่เพียงถ่ายทอดพลังงานที่มีอยู่ในตัวให้กับนิวเคลียสที่ถูกชน แล้วตัวเองก็กระเจิงไป (scatter) นิวตรอนพวกที่ทำปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ได้ดี (ถูกดูดกลืน) เมื่อวิ่งไปชนนิวเคลียสของธาตุนั้นเป็นพวกที่มีพลังงานต่ำอยู่ในช่วงอีเลกตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงมีการนำเอาวัสดุชนิดที่ไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชน มาขวางกั้นทางเดินของนิวตรอนที่ออกมาจากตัวกำเนิด เพื่อที่จะทำให้นิวตรอนเหล่านั้นมีพลังงานลดลง ในการนำเอาวัสดุมาขวางกั้นทางเดินของนิวตรอนนั้นอาจกระทำเพื่อ ใช้เป็นตัวกำบังนิวตรอนหรือลดอันตรายที่จะเกิดจากการได้รับนิวตรอน เพราะว่าอันตรายที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับนิวตรอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนนั้น หรืออาจกระทำเพื่อนำนิวตรอนที่มีพลังงานลดลงนั้นไปใช้ในงานที่เรียกว่านิวตรอนแอคทิเวชั่น (neutron activation) วัสดุที่ใช้สำหรับลดความเร็วนิวตรอนที่ใช้กันส่วนมากได้แก่ น้ำธรรมดา (H_2O) heavy water (D_2O) คาร์บอน เบอริลเลียม และพาราฟิน วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงการกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุด ที่ใช้น้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอน

1.1 ความมุ่งหมายหลัก

เพื่อเรียนรู้ถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดนิวตรอน เมื่อมีน้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอน และเพื่อเรียนรู้ถึงเทคนิคและวิธีการคำนวณแบบต่าง ๆ

1.2 ความมุ่งหมายเฉพาะ

เพื่อดูว่าทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้นำมาศึกษาในครั้งนี้ แต่ละทฤษฎีใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดนิวตรอนที่วางอยู่ในน้ำได้ผลดีเพียงใด

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

1.3 <u>วิธีที่จะดำเนินการวิจัย</u>

ศึกษาและใช้ทฤษฎีต่อไปนี้คือ

1) ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก (Two Group Diffusion Theory)

2) ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก (First Scattering Theory)

3) ทฤษฎีเฟอร์มิเอจ (Fermi Age Theory)

คำนวณหาปริมาณนิวตรอนที่ปรากฏที่ระยะต่าง ๆ จากตัวกำเนิดนิวตรอนที่วางอยู่ในน้ำ ตัวกำเนิดนิวตรอนที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณ เป็นตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม–เบอริลเลียม มีความแรงเท่ากับ 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที ซึ่งเป็นตัวกำเนิดอันเดียวกันกับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เรื่อง Neutron Measurement ของนายยุทธ อัครมาส[1] ทั้งนี้เพื่อที่จะนำค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีทั้ง 3 นี้ไปเปรียบเทียบกับปริมาณนิวตรอน ซึ่งนายยุทธ ได้ทำการทดลองวัดหาค่าเอาไว้ที่ระยะต่าง ๆ ไม่เกิน 19.5 ซ.ม. จากตัวกำเนิด ซึ่งอยู่ในตารางที่ 4.3.2 หน้าที่ 36 ของวิทยานิพนธ์เรื่อง Neutron Measurement นี้ และเปรียบเทียบปริมาณนิวตรอนซึ่งเป็นผลจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีกับผลการคำนวณที่มีผู้คำนวณเอาไว้แล้วโดยใช้ moments method ซึ่งเป็นการคำนวณที่ยุ่งยากกว่าทฤษฎีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับที่ระยะไกลจนถึง 120 ซ.ม. แสดงอยู่ในตารางที่E- 16 หน้า 393 ของหนังสืออ้างอิงเล่มที่ 4 จากข้อมูลในตารางที่E- 16 นี้ได้นำไปหาสูตรสำเร็จเพื่อใช้หาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ปรากฏ ในน้ำ ที่ระยะห่างใด ๆ จากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม–เบอริลเลียม ที่มีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที และนำค่าปริมาณนิวตรอนจากผลการทดลองของนายยุทธที่นำมาใช้เปรียบเทียบ ไปใช้หาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน

---

[1] วิทยานิพนธ์เรื่อง Neutron Measurement นี้เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต แผนกวิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย ปี 2511 ของนายยุทธ อัครมาส ซึ่งปัจจุบันเป็นอาจารย์อยู่ที่แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

1.4 ตัวกำเนิดนิวตรอน

หมายถึงตัวหรือแหล่ง (ซึ่งอาจจะใหญ่หรือเล็กก็ได้) ที่แผ่อนุภาคนิวตรอนออกมา นิวตรอนที่เกิดขึ้นได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ทั้งนั้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้นิวตรอนออกมามีหลายชนิดด้วยกันได้แก่ ปฏิกิริยาฟิชชั่น (fission reaction) ปฏิกิริยาแบบที่ใช้อนุภาคมีประจุเป็นตัวยิงเข้าไปยังธาตุแล้วเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้นิวตรอนออกมา อนุภาคที่ใช้เป็นตัวยิงทำให้เกิดปฏิกิริยามี อนุภาคอัลฟา โปรตอน และดิวธีรอน ปฏิกิริยานิวเคลียร์อีกชนิดหนึ่งที่ให้นิวตรอนคือปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้รังสีแกมมาเป็นตัวยิงเข้าไปในธาตุ สำหรับตัวกำเนิดนิวตรอนแบบอเมริเซียม – เบอริลเลียม ที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณเป็นตัวกำเนิดนิวตรอนชนิดที่มีอนุภาคอัลฟาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา ธาตุอเมริเซียมที่ใช้มีอะตอมมิคนัมเบอร์เท่ากับ 241 มีครึ่งชีวิตประมาณ 470 ปี เป็นไอโซโทปที่ให้อนุภาคอัลฟาออกมา เมื่ออนุภาคอัลฟา (ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนนิวเคลียสของฮีเลียมทุกประการ) วิ่งไปชนนิวเคลียสของธาตุเบอริลเลียม ก็จะให้นิวตรอนออกมาดังสมการ

$$_4Be^9 + _2He^4 \longrightarrow _6C^{12} + _0n^1$$

ตัวกำเนิดแบบอเมริเซียม – เบอริลเลียมนี้ใช้กันแพร่หลายมาก เนื่องจากธาตุเบอริลเลียมที่ใช้เป็นเป้าสำหรับให้อนุภาคอัลฟาวิ่งเข้าชนนั้นเป็นธาตุที่ให้นิวตรอนออกมาเป็นจำนวนมาก ตัวกำเนิดชนิดนี้ทำได้โดยเอาอเมริเซียมผสมเข้ากับเบอริลเลียมให้ได้ $Am\text{-}Be_{13}$ นิวตรอนที่แผ่ออกจากตัวกำเนิดชนิดที่มีธาตุเบอริลเลียมเป็นเป้าส่วนมากมีพลังงานสูง มีค่าพลังงานประมาณ 5 MeV และสูงสุดประมาณ 12 MeV แต่ก็อาจมีนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่นอกพิสัย (range) นี้ ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีรังสีแกมมาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา โดยรังสีแกมมานี้ออกมาจากธาตุที่เป็นตัวให้อนุภาคอัลฟา

1.5 ตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุด

เป็นตัวกำเนิดนิวตรอนที่มีขนาดเล็ก สำหรับตัวกำเนิดที่ใช้อ้างอิงในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ยาว 3 ซ.ม. มีรัศมียาวประมาณ 1 ซ.ม. ในการคำนวณอาจถือว่า

เป็นจุดซึ่งแผ่นิวตรอนออกมารอบตัว ปริมาณนิวตรอนทุกทิศทางที่ห่างจากตัวกำเนิดเท่ากันจะมีค่าเท่ากัน เช่นถ้าตัวกำเนิดนิวตรอนมีความแรง a นิวตรอน/วินาที คือปล่อยนิวตรอนออกมา a ตัวใน 1 วินาที นิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับ r ซ.ม. (ในสูญญากาศ) ในทิศใด ๆ จะมีค่าเป็น

$$\phi(r) = \frac{a}{4\pi r^2} \qquad \text{นิวตรอน/ตร.ซ.ม.วินาที}$$

1.6 <u>นิวตรอนเร็วและเทอร์มาลนิวตรอน</u> (fast and thermal neutrons)

นิวตรอนที่วิ่งออกจากตัวกำเนิดนิวตรอนทั่ว ๆ ไป เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงอยู่ในช่วงของเมกะอิเลคตรอนโวลต์ เราเรียกนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไปว่า นิวตรอนเร็ว สำหรับตัวกำเนิดที่วางอยู่ในวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งออกมาจากตัวกำเนิดก็จะมีการชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง ซึ่งเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ในการชนกับนิวเคลียสแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่ในตัวให้กับนิวเคลียสที่ถูกชน แล้วก็กระเจิงไปชนกับนิวเคลียสของอะตอมอื่นต่อไปจนกระทั่งตัวนิวตรอนเองมีพลังงานเหลืออยู่ในตัวโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับพลังงานของตัวกลาง เราเรียกนิวตรอนเหล่านี้ว่า เทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งจะมีพลังงานหรือความเร็วเท่าไรขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลางนั้น ๆ เราอาจกล่าวได้ว่าเทอร์มาลนิวตรอนก็คือนิวตรอนที่อยู่ใน thermal equilibrium กับอะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางที่นิวตรอนอยู่ เทอร์มาลนิวตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่และชนกับนิวเคลียสอยู่ตลอดเวลา ในการชนกับนิวเคลียสแต่ละครั้งนิวตรอนอาจจะได้รับหรือสูญเสียพลังงานไปก็ได้ แต่พลังงานรวมของนิวตรอนทั้งหมดมีค่าคงที่ สำหรับตัวกลางที่มีค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืน (absorption cross section) น้อยมาก การแจกแจงความเร็วของเทอร์มาลนิวตรอนจะเป็นไปตามแบบของ Maxwell distribution

$$dN(V) = N_o A V^2 e^{-MV^2/2KT} dV$$

เมื่อ No คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดใน 1 หน่วยปริมาตร, T เป็นอุณหภูมิของตัวกลางเป็นเคลวิน, M เป็นมวลของนิวตรอน, K คือ Boltzmann's constant, V เป็นความเร็วของนิวตรอน, และ $A = 4\pi\left(\frac{M}{2\pi KT}\right)^{3/2}$

1.7 นิวตรอนฟลักซ์ (neutron flux)

หมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กันวิ่งผ่านพื้นที่ 1 ตร.ซ.ม. ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัวนิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน ค่าฟลักซ์อันนี้เรียกว่าฟลักซ์ทั้งหมด (total flux)

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ N(V) เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ V นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ V นั้นมีค่าเป็น

$$\phi(V) = N(V)\,V$$

ดังนั้น $\phi(V)\,dV$ จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง V และ $V + dV$

ฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่าง ๆ กันมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{tot} = \int_0^\infty \phi(V)\,dV$$

ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

$$\bar{V} = \int_0^\infty V N(V)\,dV \Big/ \int_0^\infty N(V)\,dV$$

ฟลักซ์ทั้งหมดมีค่าเป็น $\phi_{tot} = N\bar{V}$

เมื่อ $N = \int_0^\infty N(V)\,dV$ = ความหนาแน่นของนิวตรอนทุกค่าความเร็ว

นั่นคือนิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน

1.8 ภาคตัดขวาง (cross section)

ภาคตัดขวางจุลภาค (σ, microscopic cross section) คือบริเวณหรือพื้นที่ของนิวเคลียสที่เมื่อมีอนุภาควิ่งไปชนแล้วเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็นบาร์น (barn)

$$1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ ตร.ซ.ม.}$$

ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวเคลียสประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a$$

เมื่อ σ_s = ภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง (microscopic scattering cross section)

σ_a = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้ามีจำนวนนิวเคลียส N ตัวใน 1 ลบ.ซ.ม. ผลคูณของ N กับ σ เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Σ,macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น ซ.ม.$^{-1}$

$$\Sigma = N\sigma$$

หรือกล่าวได้ว่าภาคตัดขวางมหภาคก็คือ บริเวณหรือพื้นที่ของนิวเคลียสใน 1 ลบ. ซ.ม. ที่จะเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไปชน

ภาคตัดขวางนี้สำหรับธาตุหนึ่ง ๆ จะมีค่าเปลี่ยนไปตามพลังงานของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นสำหรับอนุภาคที่มีพลังงานค่าหนึ่ง ก็จะมีค่าภาคตัดขวางค่าหนึ่งสำหรับธาตุหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า differential cross section ($\sigma(E)$)

ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวางมีค่าเท่ากับ

$$\bar{\sigma} = \int_0^\infty \phi(E)\sigma(E)dE \Big/ \int_0^\infty \phi(E)dE$$

1.9 <u>วัสดุสำหรับลดความเร็ว</u> (moderator)

ในการลดความเร็วของนิวตรอนทำได้โดย นำเอาวัสดุมาขวางกั้นทางเดินของนิวตรอน หรือเอาตัวกำเนิดนิวตรอนไปวางไว้ในวัสดุที่จะใช้เป็นตัวลดความเร็วนิวตรอน วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่วัสดุที่ทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลงได้อย่างรวดเร็วโดยการชนกับนิวเคลียสของวัสดุนั้นเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งได้แก่วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อย ๆ และมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่น้ำธรรมดา (H_2O) heavy water (D_2O) เบอริลเลียม คาร์บอน และพาราฟิน

ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) ส่วนมากใช้น้ำธรรมดาเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอน

น้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วนิวตรอนที่ดีตัวหนึ่ง ประกอบขึ้นด้วยไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีปริมาณของอะตอมของไฮโดรเจนมากกว่าออกซิเจนอยู่ในอัตราส่วน 2 : 1 ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยมากเท่ากับ 1 เป็นตัวการสำคัญในการลดความเร็วของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ถูกชนเป็นจำนวนมาก และบางครั้งอาจจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่เกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนถ้าเกิดการชนกันอย่างจัง (head-on collision) ส่วนการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนมีความสำคัญน้อยในการลดความเร็วนิวตรอน เพราะว่าในการชนกันแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของออกซิเจนเป็นจำนวนน้อยมาก ออกซิเจนยังเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนต่ำด้วย