# บทที่ 2

# ทฤษฎี

## 2.1 อนุภาคนิวตรอน[9]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุซึ่งมีมวลอาจมากกว่าโปรตอนเล็กน้อย (1.00867 amu) นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที แล้วสลายตัวไปเป็นโปรตอน อิเลกตรอนหรืออนุภาคเบตา (Beta particle) และนิวทริโน (neutrino) เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ จึงไม่เกิดแรงระหว่างประจุกับตัวกลางทำให้มันสามารถทะลุทะลวงไปในตัวกลางได้มาก การค้นพบนิวตรอนเกิดจากการศึกษาพฤติกรรมของรังสีได้จากการยิงอนุภาคแอลฟา (alpha particle) จากโพโลเนียม (Polonium) ลงสู่เป้าที่เป็นเบอริลเลียม (Berylium) รังสีดังกล่าวเมื่อยิงลงบนพาราฟินจะได้โปรตอนออกมา ในระยะแรกเข้าใจว่ารังสีดังกล่าวคือรังสีแกมมาพลังงานสูง (High energy gamma) เนื่องจากรังสีดังกล่าวไม่มีประจุ แต่พลังงานของรังสีดังกล่าวไม่สอดคล้องกับพลังงานของโปรตอนที่เกิดจากการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering) ของรังสีแกมมา Chadwick เป็นคนแรกที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวโดยใช้หลักของโมเมนตัมและพลังงาน เขาเสนอว่าถ้ารังสีดังกล่าวไม่ใช่รังสีแกมมา แต่เป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าและมีมวลใกล้เคียงกับโปรตอน เมื่อชนกับ นิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจนในพาราฟินแล้วสามารถทำให้ได้โปรตอนที่มีพลังงานสอดคล้องกับผลการทดลองดังกล่าว จากการค้นพบนิวตรอนดังกล่าวทำให้ความเข้าใจทฤษฎีของอะตอมสมบูรณ์ขึ้น จากเดิมที่เข้าใจว่านิวเคลียสของอะตอม มีเพียงโปรตอน ดังนั้นมวลอะตอมของนิวเคลียสก็คือมวลของโปรตอน และเนื่องจากจำนวนโปรตอนเท่ากับประจุของนิวเคลียสซึ่งเท่ากับเลขอะตอม แต่เนื่องจากเลขอะตอมจะประมาณครึ่งหนึ่งของมวลอะตอม แต่เดิมไม่สามารถอธิบายได้ แต่จากการค้นพบนิวตรอนทำให้เข้าใจโครงสร้างที่ถูกต้องของนิวเคลียส และจากการค้นพบนิวตรอนทำให้มีความก้าวหน้าในด้านนิวตรอนฟิสิกส์มากขึ้น และการนำนิวตรอนมาใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่วนในด้านการแพทย์มีการนำนิวตรอนมาใช้เป็นรังสีรักษาซึ่งเรียกว่าเทคนิคนิวตรอนเทราปี

2.1.1 การจำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงาน

นิวตรอนมีหลายระดับพลังงานขึ้นกับกระบวนการที่มันเกิด ตั้งแต่ เทอร์มอลนิวตรอน ที่มีพลังงานในระดับอิเลกตรอนโวลต์ จนถึงพลังงานสูงในระดับเมกะอิเลกตรอนโวลต์ อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียสของเป้าแตกต่างกันตามชนิดของนิวเคลียสและระดับพลังงานของนิวตรอน ดังนั้นในการที่เราจะเข้าใจพฤติกรรมของนิวตรอนจึงได้จำแนกนิวตรอนตามระดับพลังงานออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งอาจมีการซ้อนทับกันของบางกลุ่มดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของนิวตรอน จำแนกตามพลังงาน

| ชนิดของนิวตรอน | ช่วงพลังงาน |
|---|---|
| Slow | 0.00 eV ถึง$10^3$ eV |
| Cold | น้อยกว่า 0.01 eV |
| Thermal | 0.01 eV ถึง0.3 eV |
| Epithermal | 0.03 eV ถึง$10^4$ eV |
| Resonance | 1 eV ถึง$10^2$ eV |
| Fast | $10^3$ eV ถึง20 MeV |

นิวตรอนเมื่อชนกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตจะมีอันตรกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งผลเสียให้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต อันตรกิริยาดังกล่าวขึ้นกับพลังงานของอนุภาคนิวตรอนและโครงสร้างทางนิวเคลียร์ของนิวเคลียสที่เกิดอันตรกิริยา

2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อเนื้อเยื่อ[10]

แม้นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของอะตอม (coulombic interactions) ได้อย่างอนุภาคที่มีประจุ อย่างไรก็ตามนิวตรอนก็ยังเป็นรังสีหลักที่ทำความเสียหายให้แก่เนื้อเยื่อ เพราะอนุภาคนิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับบางนิวไคลด์แล้วได้อนุภาคมีประจุ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความเสียหายให้แก่เนื้อเยื่อ นอกจากนี้นิวตรอนยังกระตุ้นให้บางนิวไคลด์ที่เสถียรเปลี่ยนไปเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี และเนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของอนุภาคนิวตรอนที่สูง ทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในระดับที่ลึกไม่ใช่เพียงแค่ผิวหน้าเหมือนอย่างเช่นอนุภาคมีประจุอื่นๆ

กระบวนการถ่ายเทพลังงานของนิวตรอนสู่เนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต มีดังนี้

1. Elastic scatterring
2. Inelastic scatterring
3. Nonelastic scatterring
4. Neutron capture

Elastic Scatterring

การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เป็นอันตรกิริยาถ่ายเทพลังงานของนิวตรอนไปสู่นิวเคลียสของตัวกลาง โดยเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 14 MeV และเป็นอันตรกิริยาหลักในการลดพลังงานของนิวตรอน การชนดังกล่าวพลังงานและโมเมนตัมก่อนและหลังชนคงที่ ตัวอย่างของธาตุในเนื้อเยื่อที่สามารถเกิดการชนแบบยืดหยุ่นกับอนุภาคนิวตรอนได้เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยอนุภาคนิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่นิวเคลียสของตัวกลางดังสมการ

$$E_t = E_n \frac{4M_a M_n}{(M_a + M_n)^2} cos^2\theta \qquad 2.1$$

โดย $E_t$ = พลังงานของนิวตรอนก่อนชน $\theta$ = มุมที่นิวตรอนเบี่ยงเบนไป

$M_a$ = มวลของนิวเคลียสของเป้า $M_n$ = มวลของนิวตรอน

และพลังงานเฉลี่ยของนิวเคลียสของตัวกลางหลังชน คือ

$$\overline{E}_t = \frac{2E_n M_a M_n}{(M_a + M_n)^2} \qquad 2.2$$

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตคือโปรตอน เพราะร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีองค์ประกอบของน้ำสูง พลังงานของโปรตอนสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.2 ซึ่งพลังงานส่วนนี้เองที่จะถ่ายเทให้กับเนื้อเยื่อและกระตุ้นให้เกิดความเสียหายในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต

Inelastic scatterring

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น(Inelastic scattering) มีการสูญเสียพลังงานหลังการชน ตัวอย่างเช่น $(n,n'\gamma)$ บางครั้งอนุภาคนิวตรอนอาจจะถูกจับด้วยนิวเคลียสของตัวกลางตามกระบวนการจับนิวตรอนขึ้นชั่วคราวแล้วจึงปลดปล่อยนิวตรอนออกมาอีกครั้งหนึ่งซึ่งพลังงานของอนุภาคนิวตรอน

ที่ถูกปลดปล่อยออกมาอาจแตกต่างจากพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่เข้าชน ส่วนนิวเคลียสของตัวกลางมักอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) ซึ่งสามารถปล่อยรังสีแกมมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางยังคงเป็นเช่นเดิมกับก่อนการชน ดังสมการ

$$^{14}N(n,n')^{14}N \qquad : E_\gamma = \text{approx } 10 \text{ MeV} \qquad 2.3$$

ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้กับไนโตรเจน คาร์บอน และ ออกซิเจน ในเนื้อเยื่อ ปฏิกิริยานี้จะเป็น kinematically ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อพลังงานของอนุภาคนิวตรอนมากกว่า threshold energy พลังงานที่ถ่ายเทให้กับตัวกลางโดยการชนแบบไม่ยืดหยุ่น จะเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมา และเนื่องจากพลังงานของโฟตอนนั้นสูง พลังงานที่ถ่ายเทให้กับเนื้อเยื่อจึงต่ำ

Nonelastic scatter

Nonelastic scatter แตกต่างจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ที่อนุภาคที่ปลดปล่อยหลังกระบวนการจับ จะไม่ใช่นิวตรอน ดังตัวอย่างในสมการ

$$^{12}C(n,\alpha)^{9}Be \qquad : E_\gamma = 1.75 \text{ MeV} \qquad 2.4$$

ด้วยปฏิกิริยานี้พลังงานที่ถ่ายเทให้กับเนื้อเยื่อของอนุภาคที่มีประจุที่เกิดขึ้น เช่นอนุภาคแอลฟาดังในสมการที่ 2.4 และ nonelastic scatter ส่วนใหญ่มักให้รังสีแกมมาออกมาด้วย อันตรกิริยานี้จะเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูง มีไม่กี่ปฏิกิริยาที่ค่าภาคตัดขวางมีค่าสูง ที่พลังงานต่ำกว่า 5 MeV

Neutron capture

อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture) คือการที่นิวตรอนถูกจับโดยนิวเคลียสของเป้า นิวไคลด์ส่วนใหญ่ทำให้เกิดพลังงานเพิ่มขึ้น 1 MeV บวกกับพลังงานของนิวตรอน เกิดเป็นคอมพาวด์นิวเคลียส (compound nucleus) ที่ไม่เสถียร อยู่ในสภาวะกระตุ้น แล้วต้องปลดปล่อยโฟตอนหรืออนุภาคออกมา อันตรกิริยาการจับนิวตรอนแตกต่างจาก nonelastic scatter ตรงที่กระบวนการจับนิวตรอนจะเกิดกับนิวตรอนพลังงานต่ำเช่นเทอร์มอลนิวตรอนหรือใกล้เคียง ตัวอย่างเช่นการจับเทอร์มอลนิวตรอนโดยไนโตรเจนดังสมการ

$$^{14}N(n,p)^{14}C \qquad : \text{proton energy} = 0.58 \text{ MeV} \qquad 2.5$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาอื่นที่สำคัญเช่นการจับเทอร์มอลนิวตรอนโดยไฮโดรเจน

$$^{1}H(n,\gamma)^{2}H \qquad : E_{\gamma} = 2.2 \text{ MeV} \qquad 2.6$$

ปฏิกิริยาหลังมีความสำคัญในแง่การการจายของ Dose จากเทอร์มอลนิวตรอน แม้ว่ารังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากกระบวนการจับนิวตรอนจะมีพลังงาน 2.2 MeV การกระจายของ dose จะแปรผันตามขนาดของเป้า เป้าที่มีขนาดใหญจะเกิดปฏิกิริยานี้ได้ง่าย

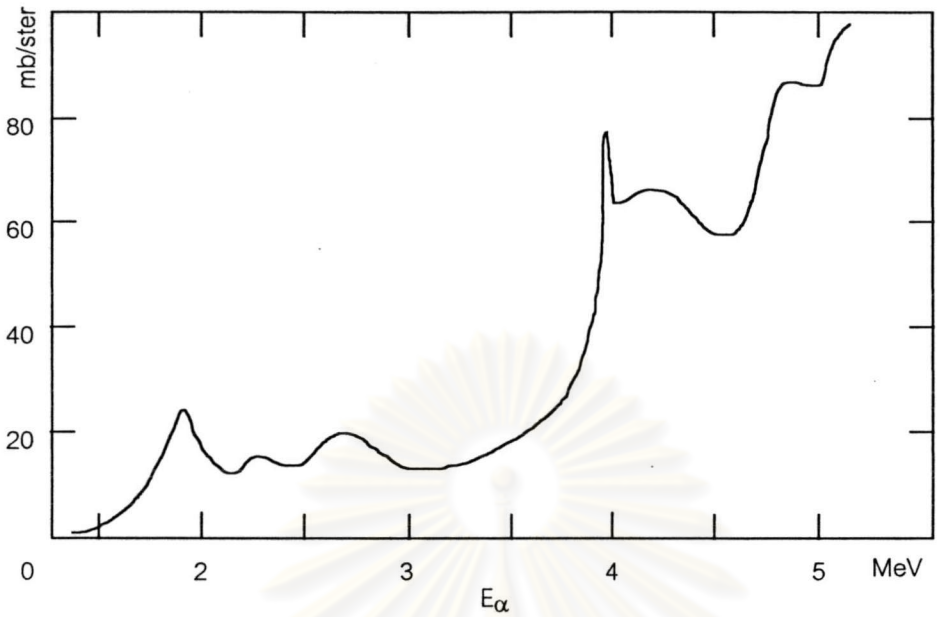
จากกระบวนการถ่ายเทพลังงานของอนุภาคนิวตรอนให้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตดังกล่าวมาข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการกำบังเพื่อลดปริมาณรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับอนุภาคนิวตรอนจะได้รับ

## 2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}$Am/Be

ต้นกำเนิดนิวตรอน[11] ในห้องทดลองส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคแอลฟาที่เหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยา ($\alpha$,n) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ($Q > 0$) $^{241}$Am มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 470 ปี ให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานประมาณ 5.4 MeV แล้วยังให้รังสีแกมมาพลังงานช่วง 40 ถึง 60 keV ส่วน $^{9}$Be เมื่อโดนยิงด้วยอนุภาคแอลฟาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น $^{12}$C และอนุภาคนิวตรอน ดังสมการ

$$^{9}Be + \alpha \longrightarrow n + {}^{12}C \qquad Q = 5.702 \text{ MeV} \qquad 2.7$$

Bonner และเพื่อนร่วมงานได้ทำการศึกษาค่า neutron yield ที่ได้จากปฏิกิริยา ($\alpha$,n) ของ $^{9}$Be ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยากับพลังงานของอนุภาคแอลฟาดังแสดงในรูปที่ 2.1




รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยากับพลังงานของอนุภาคแอลฟา

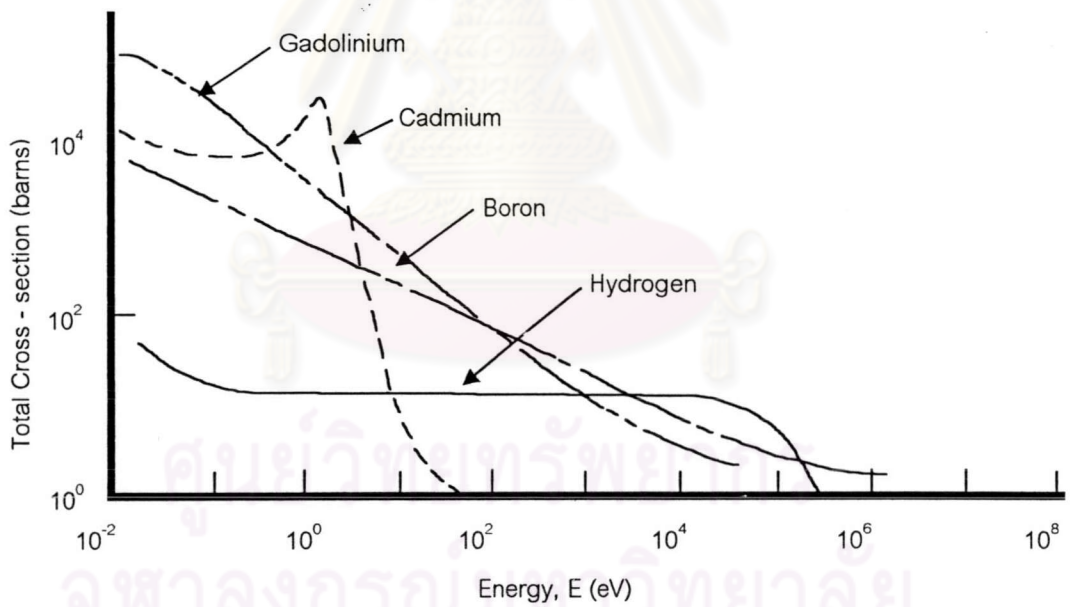
ต้นกำเนิดอนุภาคนิวตรอน $^{241}$Am/Be อยู่ในรูปสารประกอบอัลลอยด์ $AmBe_{13}$ ให้อนุภาคนิวตรอนพลังงานประมาณ 4.5 MeV คุณสมบัติของต้นกำเนิดอนุภาคนิวตรอน $^{241}$Am/Be แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}$Am/Be

| ต้นกำเนิด | ค่าครึ่งชีวิต | พลังงานของอนุภาคแอลฟา (MeV) | พลังงานเฉลี่ยของอนุภาคนิวตรอน(MeV) | จำนวนของอนุภาคนิวตรอนต่อ $10^6$ อนุภาคแอลฟา |
|---|---|---|---|---|
| $^{241}$Am/Be | 458 | 5.49,5.44 | 4.5 | 75 |

## 2.3 การกำบังอนุภาคนิวตรอน[12]

หลักในการเลือกวัสดุสำหรับกำบังอนุภาคนิวตรอน พิจารณาจากความสามารถของวัสดุในการเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอน 3 แบบ คือ การชนแบบยืดหยุ่น การชนแบบไม่ยืดหยุ่น และ non-elastic scattering ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุและพลังงานของนิวตรอน เพื่อลดพลังงานของนิวตรอนจากนิวตรอนเร็วมาเป็นนิวตรอนช้า อิพิเทอร์มอลนิวตรอน และ เทอร์มอลนิวตรอน ตามลำดับ โดยทั่วไปเลือกใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบของธาตุเบาเช่นไฮโดรเจนตัวอย่างเช่น น้ำ โพลีเมอร์หรือคอนกรีต เพราะสามารถเกิดการถ่ายเทพลังงานโดยอาศัยอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นจนพลังงานของนิวตรอนลดลงเป็นเทอร์มอลนิวตรอนซึ่งมีพลังงานอยู่ในสมดุลกับตัวกลางไม่มีการสูญเสียพลังงานจลน์ของนิวตรอนจากการชน แต่เทอร์มอลนิวตรอนสามารถถูกจับได้โดยนิวไคลด์ที่มีค่าภาคตัดขวางในการจับเทอร์มอลนิวตรอนสูงเช่น โบรอน แคดเมียม หรือลิเธียม เป็นต้น ค่าภาคตัดขวางของไฮโดรเจน โบรอน แคดเมียมและแกดโดลิเนียม แสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างค่าภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มอลนิวตรอนของบางธาตุในธรรมชาติแสดงในตารางที่ 2.3

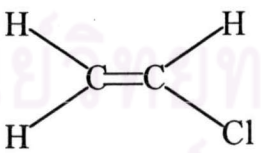



รูปที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางรวมของไฮโดรเจน โบรอน แคดเมียมและแกดโดลิเนียม

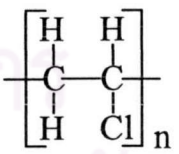
ตารางที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มอลนิวตรอนของธาตุในธรรมชาติ[13]

| ธาตุ | % ในธรรมชาติ | $\sigma_s$ | $\sigma_a$ |
|---|---|---|---|
| H (natural) | | 82.02 | 0.3326 |
| B (natural) | | 5.24 | 767 |
| $^{10}B$ | 19.8 | 3.1 | 3835 |
| C (natural) | | 5.551 | 0.0035 |
| O (natural) | | 4.232 | 0.00019 |
| Cl (natural) | | 16.8 | 33.5 |
| Cd (natural) | | 6.5 | 2520 |
| $^{113}Cd$ | 12.22 | 12.4 | 20600 |
| Li (natural) | | 1.37 | 70.5 |
| $^{6}Li$ | 7.4 | 0.97 | 940 |
| Al (natural) | | 1.503 | 0.231 |

ในการวิจัยนี้เลือกใช้โพลีไวนิลคลอไรด์หรือนิยมเรียกสั้นๆ ว่าพีวีซี (Polyvinylchloride : PVC) [14,15] เป็นวัสดุพื้นฐานในการกำบังอนุภาคนิวตรอน พีวีซีเป็นโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์จากไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinylchloride monomer) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูป



ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์



โพลีไวนิลคลอไรด์

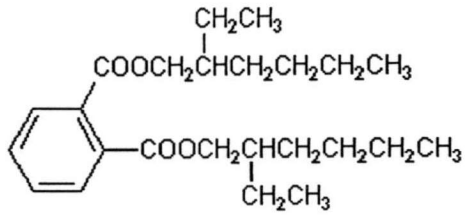
เนื่องจากพีวีซีประกอบไปด้วยอะตอมของ ไฮโดรเจน คาร์บอน และคลอรีน ซึ่งไฮโดรเจนและคาร์บอนมีความสามารถในการลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนโดยอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนคลอรีนสามารถเกิดอันตรกิริยา $^{35}Cl(n,p)^{35}S$ มีค่าภาคตัดขวางเท่ากับ 0.3 บาร์น ในธรรมชาติมี $^{35}Cl$ อยู่ 75.4%

$$^{35}Cl + n \longrightarrow {}^{35}S + {}^{1}H \qquad Q = 0.62\ MeV \qquad 2.8$$

นอกจาก $^{35}Cl$ แล้วยังมี $^{37}Cl$ ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยา $^{37}Cl(n,\gamma)^{38}Cl$ โดย $^{38}Cl$ เป็นไอโซโทปที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้รังสีเบตาพลังงาน 4.917 MeV และรังสีแกมมาพลังงาน 1.643 และ 2.167 MeV โดย $^{38}Cl$ มีค่าครึ่งชีวิต 37.24 นาที แต่ค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยา $^{37}Cl(n,\gamma)^{38}Cl$ มีค่าเพียง 432.9 มิลลิบาร์น

พีวีซีเป็นโพลีเมอร์ที่มีสมบัติแข็งไม่ยืดหยุ่นและเปราะ แตกง่ายเมื่อได้รับแรงกระทบภายนอก เมื่อขึ้นรูปเป็นรูปร่างใดๆ แล้ว หากต้องการเปลี่ยนรูปร่างต้องให้ความร้อนเพื่อให้พีวีซีหลอมเหลวแล้วจึงขึ้นรูปอีกครั้ง แต่การเติมสารประกอบบางตัวลงไปในพีวีซีสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พีวีซีได้ กระบวนการเพิ่มความยืดหยุ่นเรียกว่า[16] พลาสติไซเซชัน (Plasticization) และสารที่เติมเพื่อการนี้เรียกว่า พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) โดยทั่วไปพลาสติไซเซอร์เป็นสารประกอบ Non-volatile ที่ละลายและทำให้โพลีเมอร์นิ่มลงได้ แต่การละลายที่อุณหภูมิห้องไม่ดีนัก มีการผสมพลาสติไซเซอร์กับโพลีเมอร์ตั้งแต่สมัยเริ่มแรกของอุตสาหกรรมพลาสติก ในครั้งนั้นพลาสติไซเซอร์ถูกใช้เพื่อให้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์ (ลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล) ทำให้โพลีเมอร์ไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า decomposition temperature ต่อมาพบว่าพลาสติไซเซอร์นอกจากจะเพิ่มความสามารถในการไหลของโพลิเมอร์แล้ว (ลดความหนืดของโพลีเมอร์หลอมเหลว, ลดอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition) ยังสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เช่นเพิ่มความอ่อนตัว เพิ่มความสามารถในการดึงให้ยืดออก (extensibility) ลดจุดอ่อนตัว (softening point) ลดอุณหภูมิซึ่งโพลีเมอร์จะสูญเสียความยืดหยุ่นไปหมด (cold flex temperature) ลดความทนแรงดึงและความทนแรงอัด แต่เพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่สำคัญที่นำมาใช้กับพีวีซีได้แก่ DOP (dioctyl phthalate), DINP (diisonanonyl phthalate) และ DIDP (diisodecyl phthalate) เป็นต้น โดยธรรมชาติของอะตอมคลอรีนที่มีแรง electronegative สูง ทำให้เกิดแรงไดโพล (Dipole) ขึ้นในสายโซ่โพลีเมอร์ การจับตัวกันจึงสูง ในขณะเดียวกันอะตอมคลอรีนซึ่งมีขนาดใหญ่ จึงแยกสายโซ่ออกจากกันและเกิดแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waals) แต่เป็นแรงที่ต่ำไม่สำคัญในการยึดเกาะของสายโซ่ พลาสติไซเซอร์ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนที่มีขั้วทำหน้าที่ในการสร้างพันธะกับอะตอมคลอรีน ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วทำหน้าที่กำบังให้สายโซ่โพลีเมอร์แยกออกจากกัน ผลก็คือลดแรงไดโพลระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ โมเลกุลมีอิสระในการเคลื่อนที่มากขึ้น

DOP เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ทั่วไปสำหรับพีวีซี มีสถานะเป็นของเหลวจุดเดือด 230 องศาเซลเซียส ประกอบไปด้วยอะตอมของไฮโดรเจน คาร์บอน และ ออกซิเจน มีค่ามวลโมเลกุล 390 และมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Dioctyl phthalate :DOP

จากวัสดุสองชนิดคือดินน้ำมันยี่ห้อ FIMO และพีวีซี ไฮบริด ดิสเพอร์ชัน เรซิน เกรด 74GP ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้มีองค์ประกอบของอะตอมไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนซึ่งสามารถลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนโดยการชนแบบยืดหยุ่น ส่วนคลอรีนนอกจากจะเกิดอันตรกิริยาการชน แล้วยังมีสามารถเกิดการจับอนุภาคนิวตรอนได้แต่ค่าภาคตัดขวางไม่สูงนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ข้างต้น การจับอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานลดลงจากผลของธาตุเบาในองค์ประกอบของวัสดุสองชนิดแรกทำได้โดยการเติมกรดบอริก[17] ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวและมีฤทธิ์เป็นกรด กรดบอริกมีความสามารถในการกำบังนิวตรอนเพราะ $^{10}B$ มีค่าภาคตัดขวางสำหรับอันตรกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ สูง ปฏิกิริยาสามารถให้ $^{7}Li$ ที่อยู่ในสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นขั้นที่ 1 ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ $10^{-13}$ วินาที ก่อนจะปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 0.48 MeV หากปฏิกิริยาเกิดจากเทอร์มอลนิวตรอน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสภาวะกระตุ้น 94 % ในขณะที่เพียง 6 % เท่านั้นที่เป็นสภาวะพื้น[18]

| | | Q-value | |
|---|---|---|---|
| $^{10}B + n \longrightarrow$ | $^{7}Li + \alpha$ | 2.792 MeV (ground state) | 2.9 |
| $^{10}B + n \longrightarrow$ | $^{7}Li^{*} + \alpha$ | 2.792 MeV (ground state) | 2.10 |

ในทั้งสองกรณีค่า Q-value ของปฏิกิริยานั้นสูงเมื่อเทียบกับพลังงานของนิวตรอน ดังนั้นพลังงานของผลิตภัณฑ์ก็คือค่า Q-value นั่นเอง แต่ค่าพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่ต่ำมากที่ไปรวมกับพลังงานของปฏิกิริยาจนไม่สามารถจำแนกปริมาณเริ่มต้น และเพราะค่าโมเมนตัมเชิงเส้นของนิวตรอนที่ต่ำมาก ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจึงแสดงค่า โมเมนตัมเท่ากับศูนย์ หรือก็คือผลิตภัณฑ์ทั้งสองจะถูกปลดปล่อยออกในทิศทางตรงกันข้าม และพลังงานของปฏิกิริยาก็จะแบ่งให้กับผลิตภัณฑ์ทั้งสอง ทำให้เราสามารถคำนวณพลังงานของอนุภาคแอลฟาและลิเธียมได้

$$E_{Li} + E_{Li} = Q = 2.310 \text{ MeV} \qquad 2.11$$

$$m_{Li} v_{Li} = m_{\alpha} v_{\alpha} \qquad 2.12$$

$$\sqrt{2 m_{Li} E_{Li}} = \sqrt{2 m_{\alpha} E_{\alpha}} \qquad 2.13$$

จากสมการที่ 2.16 และ 2.18 ได้ $E_{Li} = 0.84$ MeV และ $E_{\alpha} = 1.47$ MeV ค่าภาคตัดขวางของเทอร์มอลนิวตรอนของปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ เท่ากับ 3840 บาร์น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานของนิวตรอนเพิ่มขึ้นเป็นไปตาม 1/v ในธรรมชาติมีโบรอน-10 อยู่ 19.8 %

## 2.4 การลดทอนของอนุภาคนิวตรอน[19]

เมื่ออนุภาคนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใดๆ มีทั้งส่วนที่เกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง และส่วนที่ไม่เกิดอันตรกิริยา โดยจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาแสดงดังสมการ

$$n = n_0 e^{-N\sigma x} \qquad 2.14$$

เมื่อ n และ $n_0$ คืออนุภาคนิวตรอน หลังและก่อนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนา x ส่วน N คือจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางที่สัมผัสกับลำนิวตรอน และเราเรียก $\sigma$ ว่าค่าภาคตัดขวาง หรือก็คือพื้นที่หน้าตัดที่นิวตรอนเกิดอันตรกิริยา มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร แต่นิยมใช้หน่วยบาร์น (barn) โดย 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ $10^{-24}$ $cm^2$ ค่าภาคตัดขวางเป็นค่าที่ไม่คงที่ขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนและโครงสร้างทางนิวเคลียร์ของนิวเคลียสของตัวกลาง ค่า $N\sigma$ ในสมการที่ 2.8มีค่าเท่ากับ $\Sigma$

$$N\sigma = \Sigma \qquad 2.15$$

ในที่นี้ $\Sigma$ เรียกว่า ค่าภาคตัดขวางมหภาค (macroscopic cross section) มีความหมายคือโอกาสที่นิวตรอนเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง มีหน่วยเป็น $cm^{-1}$ จากสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

$$n = n_0 e^{-\Sigma x} \qquad 2.16$$

เนื่องจากแต่ละนิวไคลด์สามารถเกิดอันตรกิริยาได้หลายแบบดังนั้นค่าภาคตัดขวางรวม (total cross section) จึงเป็นผลรวมของค่าภาคตัดขวางของแต่ละอันตรกิริยาของนิวไคลด์ ดังสมการ

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 + \ldots \qquad 2.17$$

และเมื่อตัวกลางมีองค์ประกอบของนิวไคลด์มากกว่าหนึ่งนิวไคลด์ ค่าภาคตัดขวางรวมเชิงมวล (total macroscopic cross section) จึงเป็นผลรวมของค่าภาคตัดขวางมหภาคของตัวกลาง ดังสมการ

$$\Sigma = N_a\sigma_a + N_b\sigma_b + \ldots \qquad 2.18$$

## 2.5 หัววัดรังสีชนิดแก้วเรืองแสง (Glass Scintillator) NE905

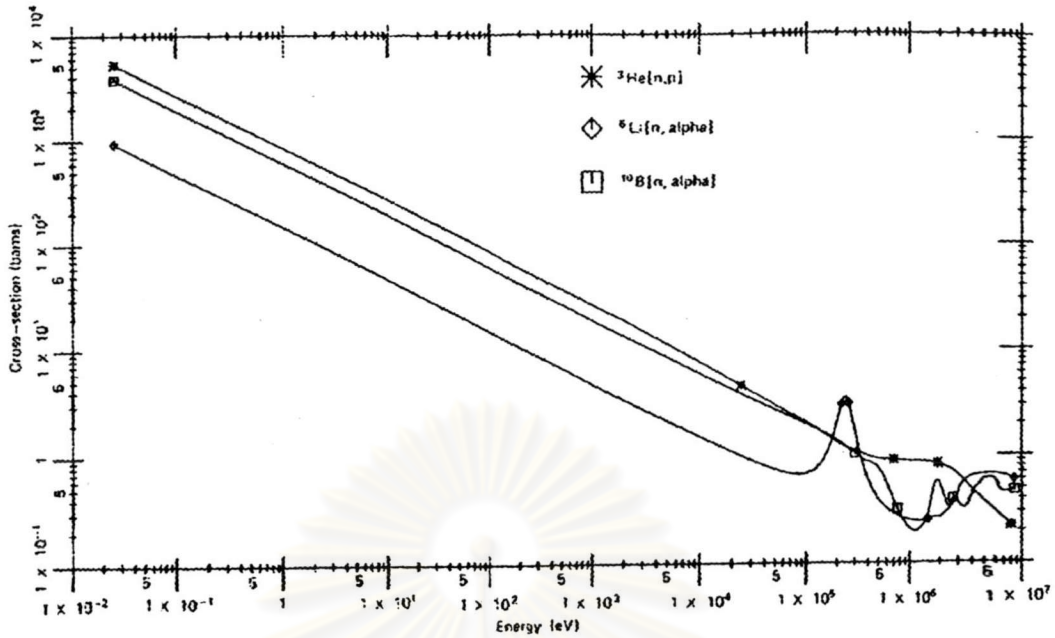
หัววัด NE905 เป็นหัววัดรังสีที่มีผลึกผสมระหว่างลิเธียมฟลูออไรด์ (Lithium fluoride) และสังกะสีซัลไฟด์ (Zinc sulfide) หัววัด NE905 สามารถวัดนิวตรอนได้เพราะมี $^{6}Li$ สามารถใช้ในการวัดนิวตรอนช้าได้โดยปฏิกิริยา (n,$\alpha$) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะพื้นดังสมการ

$$^{6}Li + n \longrightarrow {}^{3}H + \alpha \qquad \text{Q-value } 4.78 \text{ MeV} \qquad 2.19$$

สามารถคำนวณพลังงานของผลิตภัณฑ์ได้ $E_{^3H} = 2.73$ MeV และ $E_{\alpha} = 2.05$ MeV อนุภาคแอลฟาและทริทอนมักถูกปลดปล่อยในทิศทางตรงกันข้าม ค่าภาคตัดขวางของเทอร์มอลนิวตรอนของปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ 940 บาร์น ภาคตัดขวางที่น้อยทำให้ปฏิกิริยานี้มีข้อด้อยแต่ก็มีข้อชดเชยที่ค่า Q-value ที่สูง ในธรรมชาติมี ลิเธียม-6 อยู่ 7.40 เปอร์เซ็นต์ แต่หัววัด NE905 สามารถเพิ่มปริมาณลิเธียม-6 เป็น 95 เปอร์เซ็นต์ คุณสมบัติต่างๆ ของหัววัด NE905 แสดงดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของหัววัดรังสีชนิดแก้วเรืองแสง NE905

| คุณสมบัติ | |
|---|---|
| ความหนาแน่น ($g/cm^3$) | 2.48 |
| จุดหลอมเหลว (°C) | 1200 |
| ความยาวคลื่นสูงสุด(nm) | 395 |
| ค่าคงที่การสลายตัว (ns) | 100 |
| ปริมาณ Li | 6.6 wt % |
| ปริมาณ $^{6}Li$ | 95 % |
| ความแรงของ $\alpha$ ต่อผลึก 100 g (/min) | 100-200 |




รูปที่ 2.4 ค่าภาคตัดขวางของบางอันตรกิริยาที่ใช้ในการตรวจวัดนิวตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย