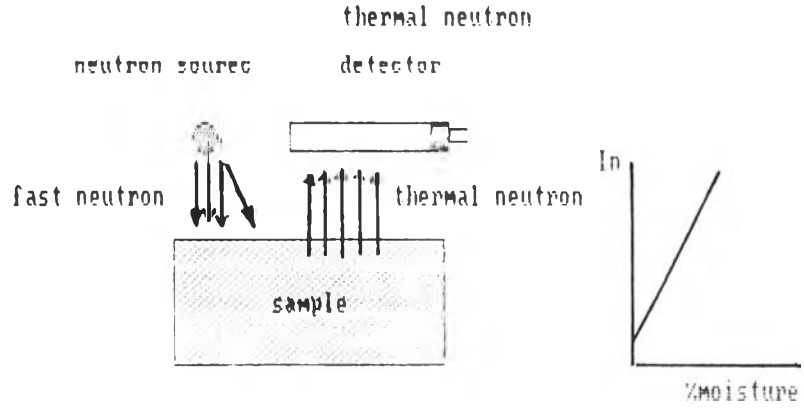
บทที่ 3

เทคนิคและอุปกรณ์วัดความชื้นด้วยนิวตรอน

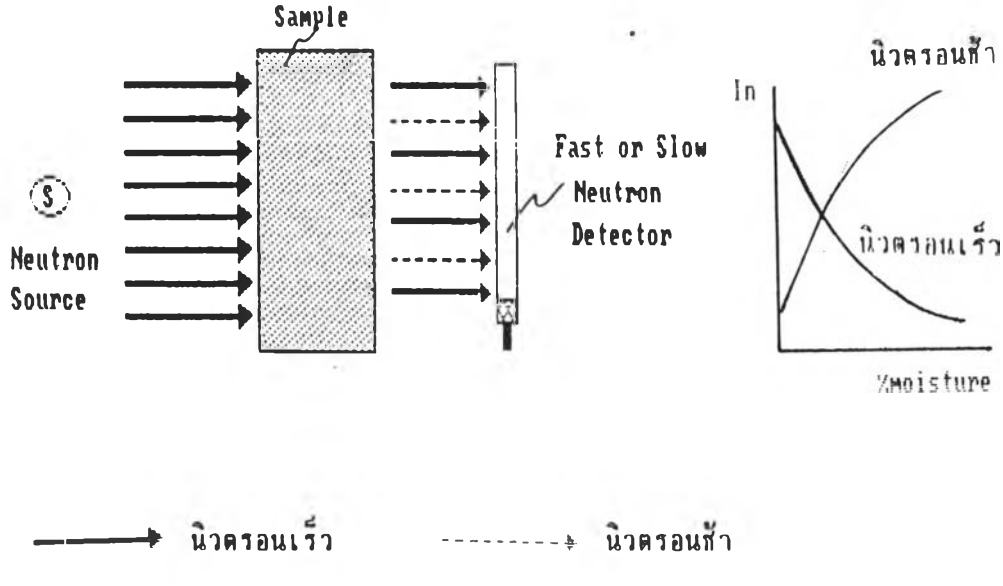
อนุภาคนิวตรอนจะลดพลังงานลงได้มากที่สุด เมื่อชนกับนิวเคลียสของไฮโดร-เจน-1 น้ำ 1 โมเลกุล ประกอบด้วยไฮโดรเจน-1 จำนวน 2 อะตอม กับออกซิเจน 1 อะตอม น้ำจึงเป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอนได้มากรองลงมาจากไฮโดรเจน-1 ดังข้อมูลในตารางที่ 2.2 และ 2.3 การใช้เทคนิคนิวตรอนในการวัดความชื้นโดยทั่วไปใช้วิธีผ่านนิวตรอนเร็วเข้าไปยังวัสดุตัวอย่าง แล้วทำการวัดนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น หรือนิวตรอนเร็วที่หายไป ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นในวัสดุนั้น [12,18,24,29] อีกวิธีหนึ่งก็คือการยิงนิวตรอนพลังงานปานกลาง ที่มีพลังงานที่สูงกว่าเทอร์มาลนิวตรอนไม่มากนักในช่วงของ "เอพิเทอร์มาลนิวตรอน (epithermal neutron)" หรือ "อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (intermediate neutron)" เข้าไปยังวัสดุแล้วตรวจวัดนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น [2,3,4,5] เทคนิคการใช้นิวตรอนเร็ว และเอพิเทอร์มาลนิวตรอน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 <u>เทคนิคนิวตรอนเร็ว</u> [19,20,28]

เครื่องวัดความชื้นด้วยนิวตรอนที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการสร้างถนน อุตสาหกรรม หรือการสำรวจทรัพยากร ล้วนอาศัยเทคนิคนิวตรอนเร็วทั้งสิ้น การวัดนิวตรอนช้าที่กระเจิง (scatter) ออกมา ความเข้มของนิวตรอนช้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในวัสดุ ส่วนการวัดนิวตรอนเร็วที่สูญหายไปจะเป็นการวัดรังสีนิวตรอนแบบส่งผ่าน (transmit) ซึ่งความเข้มรังสีนิวตรอนเร็วจะลดลงเมื่อความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

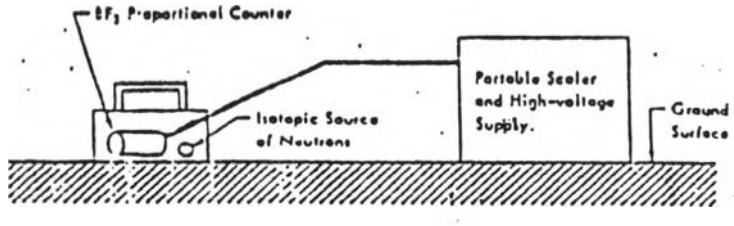
รูปที่ 3.1 หลักการของวิธีใช้นิวตรอนเร็ววัดความชื้น [2,5,12,19]

ก. แบบการกระเจิง (scattering)

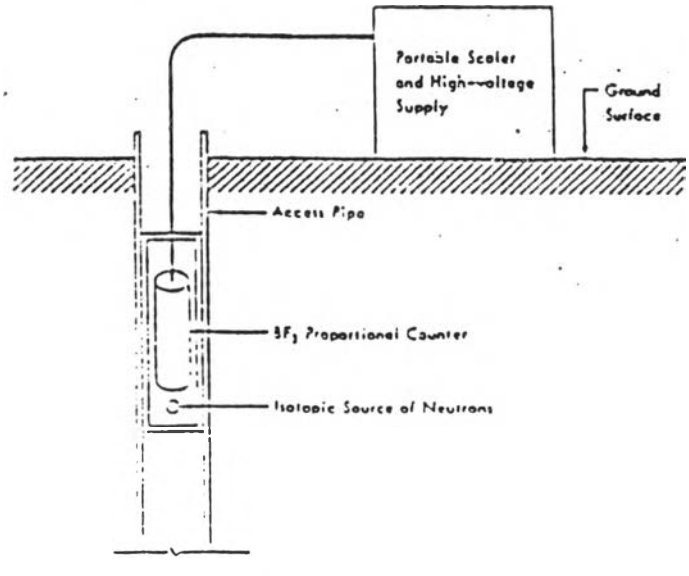
ข. แบบการส่งผ่าน (transmission)

3.1.1 อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยนิวตรอนเร็ว [8,15]

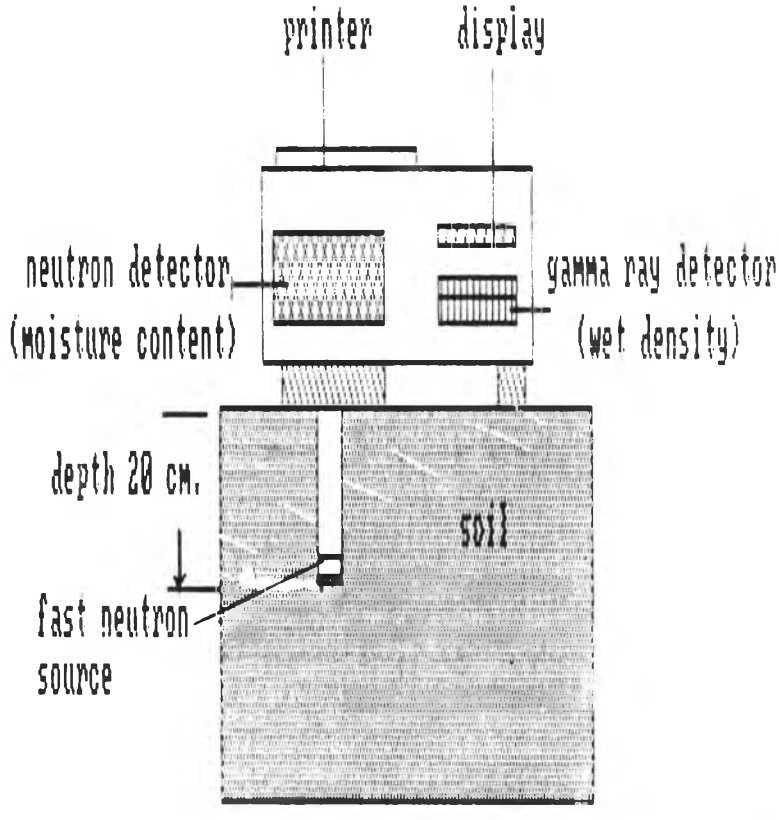
อุปกรณ์วัดความชื้นด้วยนิวตรอนเร็วประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็ว และหัววัดนิวตรอนช้าหรือนิวตรอนเร็ว สำหรับวัดความเข้มนิวตรอน อุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่มีการออกแบบต่าง ๆ กันมีทั้งแบบที่ใช้สำหรับวัดความชื้นบริเวณพื้นผิว (surface moisture gauge) แบบที่ใช้สำหรับวัดความชื้นในระดับลึก (subsurface moisture gauge) และแบบวัดความชื้นและความหนาแน่นโดยการส่งผ่านพื้นผิว (surface transmission moisture and density gauge) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์วัดความชื้นบริเวณพื้นผิวแบบนิวตรอนกระเจิงกลับ [8,15]



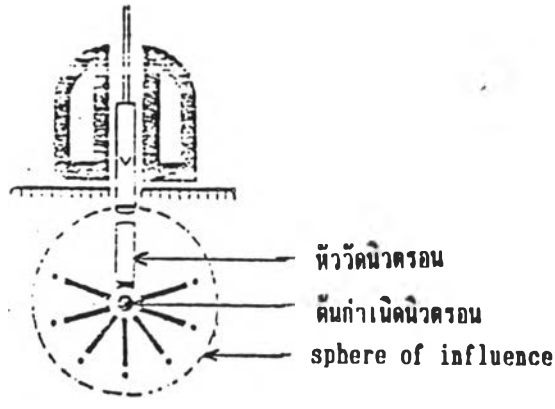
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงอุปกรณ์วัดความชื้นในระดับลึกแบบนิวตรอนกระเจิงกลับ [8,15]



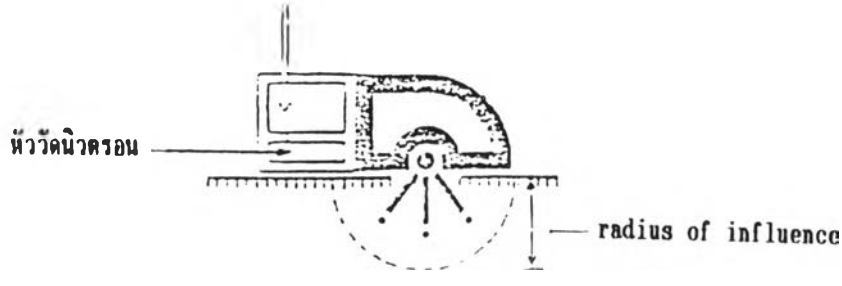
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงอุปกรณ์การวัดความชื้นแบบการส่งผ่านของนิวตรอนเร็ว [29]

3.1.2 ปริมาตรและความหนาของตัวอย่าง [6,17]

อนุภาคนิวตรอน จะกระจายออกจากต้นกำเนิดในทุกทิศทุกทางความเข้มของนิวตรอนที่บริเวณต้นกำเนิดและบริเวณใกล้เคียงที่เวลาใด ๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของวัสดุที่อยู่ในบริเวณรอบ ๆ ต้นกำเนิด ถ้าค่อย ๆ เพิ่มปริมาตรของวัสดุรอบ ๆ ต้นกำเนิดขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง ความเข้มของนิวตรอนจะมีค่าสูงสุดและไม่เพิ่มขึ้นอีก ปริมาตรของวัสดุที่น้อยที่สุดในรูปของทรงกลมที่อยู่รอบต้นกำเนิด ซึ่งให้ค่าความเข้มของนิวตรอนสูงสุด เรียกว่า "ปริมาตรวิกฤต" และเรียกรัศมีของทรงกลมว่า "รัศมีวิกฤต" ดังนั้นถ้าในกรณีที่เอาวัสดุนอกบริเวณพื้นที่วิกฤตออก จะไม่มีผลต่อความเข้มของนิวตรอนบริเวณต้นกำเนิดและบริเวณใกล้เคียง



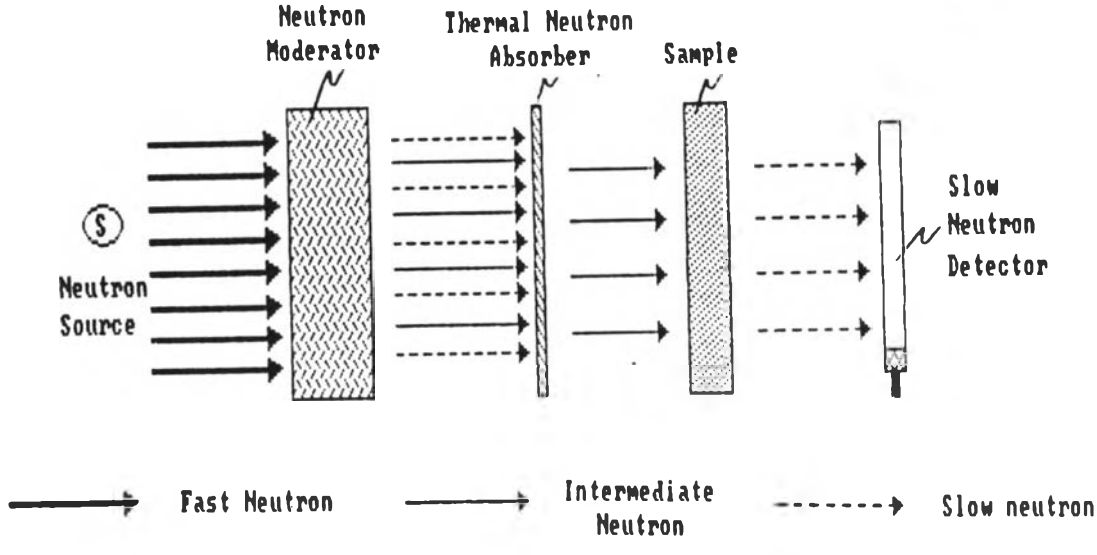
(ก) หัววัดความชื้นระดับลึก [6]



(ข) หัววัดความชื้นบริเวณพื้นผิว

รูป 3.5 แผนภาพแสดง Sphere of Influence และ Radius of Influence ของอุปกรณ์วัดความชื้นระดับลึกและพื้นผิว [6]

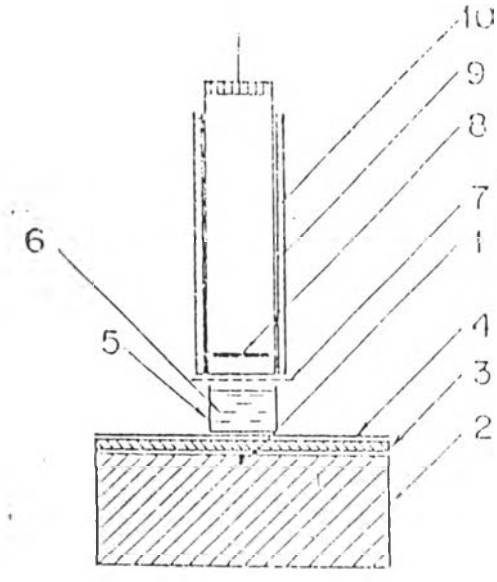
3.2 เทคนิคเอพิเทอร์มาลนิวตรอน [2,5]



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงหลักการวัดความชื้นในวัสดุ โดยใช้เอพิเทอร์มาลนิวตรอน [5]

เนื่องจากเทคนิคนิวตรอนเร็ว มีข้อจำกัดในด้านของปริมาตรหรือความหนาของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ ซึ่งจะต้องใช้กับวัสดุตัวอย่างปริมาตรหรือความหนาค่อนข้างมาก ไม่สามารถใช้วัดความชื้นในวัสดุที่มีปริมาตรน้อย ๆ หรือมีลักษณะเป็นแผ่นบางได้ เพราะนิวตรอนเร็วต้องการจำนวนครั้งในการชนกับไฮโดรเจนหลายครั้ง จึงจะลดพลังงานลงเป็นนิวตรอนช้าได้ เทคนิคเอพิเทอร์มาลนิวตรอน เป็นเทคนิคที่ใช้พลังงานนิวตรอนต่ำลงมาเพื่อให้จำนวนครั้งในการชนที่จะทำให้เป็นเทอร์มาลนิวตรอนลดลง ดังจะเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 นิวตรอนเร็วพลังงาน 4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ต้องชนกับโมเลกุลของน้ำจำนวน 20 ครั้ง จึงจะลดพลังงานลงเหลือ 0.0253 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่นิวตรอนพลังงาน 100 อิเล็กตรอนโวลต์ชนกับโมเลกุลของน้ำเพียง 8 ครั้งก็จะเหลือพลังงาน 0.0253 อิเล็กตรอนโวลต์ การใช้เอพิเทอร์มาลนิวตรอนจึงเป็นเทคนิคที่สามารถใช้งานได้กับวัสดุที่มีปริมาณน้อย และวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่น การผลิตเอพิเทอร์มาลนิวตรอนออกมาใช้ในการวัดความชื้น สามารถทำได้โดยการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วลงมาโดยให้ชนกับสารประกอบไฮโดรเจน เช่น พาราฟิน โพลิเอธิลีน หรือน้ำ ซึ่งจะได้นิวตรอนช้า

ที่มีเทอร์มาลนิวตรอนปนกับเอพิเทอร์มาลนิวตรอน จากนั้นจึงใช้แผ่นแคดเมียมและ/หรือโบรอนดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนออกไป ให้เหลือแต่เพียงเอพิเทอร์มาลนิวตรอน ที่จะผ่านไปยังวัสดุตัวอย่างที่ต้องการวัดความชื้น ดังแผนภาพในรูปที่ 3.7



1 - 1.1 µg californium-252 neutron source (2.7×10^6 n/s)
2 - Polyethylene moderator
3 - Boric acid filter
4 - Cadmium filter
5 - Aluminium sample cell
6 - Sample
7 - Cadmium absorber
8 - LiI (Eu) scintillation detector
9 - Cadmium shield
10 - Boric acid shield

รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการใช้เทคนิคเอพิเทอร์มาลนิวตรอนให้การวัดความชื้นหรือหาปริมาณไฮโดรเจนในตัวอย่างที่มีปริมาตรน้อย [2,5]

ในการวัดความชื้นด้วยนิวตรอน ตัวอย่างต้องมีปริมาตรอย่างน้อยเท่ากับรูปทรงกลมที่มีขนาดเท่ากับ sphere of influence สำหรับอุปกรณ์วัดความชื้นระดับลึก ดังแสดงไว้ในแบบภาพในรูป 3.5 (ก) ซึ่งหมายความว่าในการวัดความชื้นในดินจะต้องหย่อนหัววัดความชื้นลงไปในดินอย่างน้อยเท่ากับ radius of influence สำหรับอุปกรณ์วัดความชื้นบริเวณพื้นผิวตัวอย่างจะต้องมีความหนาอย่างน้อยเท่ากับ radius of influence ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข)

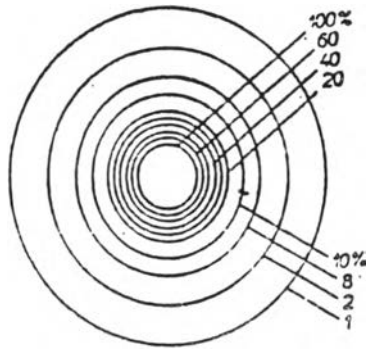
ถ้าในน้ำบริสุทธิ์ปริมาตรของ sphere of influence มีรัศมีเท่ากับ 15 เซนติเมตร[6,8,24]และรัศมีของsphere of influence ของวัสดุอื่น ๆ มีความสัมพันธ์กับปริมาตรน้ำดังนี้

$$R = 15(100/V_{\omega})^{1/3} \quad \text{---------- (3.1)}$$

เมื่อ R เป็นรัศมีของ sphere of influence มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

V_{ω} เป็นร้อยละของน้ำโดยปริมาตร

จากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.1) แสดงว่าค่า radius of influence มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูป (3.8)



รูป 3.8 ภาคตัดขวางของเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับการวัดปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน (มาตราส่วน 1:30) [24]

3.3 <u>หัววัดนิวตรอน</u> [19,20]

3.3.1หัววัดพรอพอชันแนลโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 Proportional counter)

หัววัดนิวตรอนช้าที่นิยมใช้กันมากเป็นหัววัดพรอพอชันแนลโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3 - Proportional counter) หรือบางทีเรียกย่อ ๆ ว่า หัววัด BF_3 (BF_3 - counter) ซึ่งเป็นหัววัดที่บรรจุก๊าซโบรอน -10 ไตรฟลูออไรด์ (BF_3, Boron trifluoride) โดยบรรจุก๊าซโบรอน-10 (^{10}B) ประมาณ 96% แรงดันประมาณ 700 มิลลิเมตรของปรอท หัววัดมักเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งอาจทำด้วยทองเหลืองหรืออลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 [7] ซึ่งแสดงส่วนที่สำคัญของหัววัด

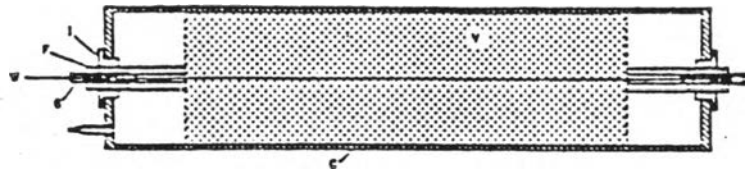
หัววัด BF_3 ใช้วัดนิวตรอนช้า โดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียสกับโบรอน -10 ดังสมการ

$$_5B^{10} + n^1 \text{ -----} > {}_3Li^7 + {}_2He^4 + 2.792 \text{ MeV}$$

$$\text{-----} > {}_3Li^7 + {}_2He^4 + 2.310 \text{ MeV}$$

ค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยานี้เป็นไปตามกฎ $^1/_v$ (V เป็นความเร็วของนิวตรอน) ดังนั้น หัววัด BF_3 จึงเหมาะสำหรับใช้วัดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ ค่าภาคตัดขวางสำหรับนิวตรอนช้ามีค่า 3840 บาร์น ดังในกราฟรูปที่ 3.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานสำหรับปฏิกิริยา $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ ซึ่งจะพบว่าค่าภาคตัดขวางจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น จะเป็นสัดส่วนตามแบบ $^1/_v$

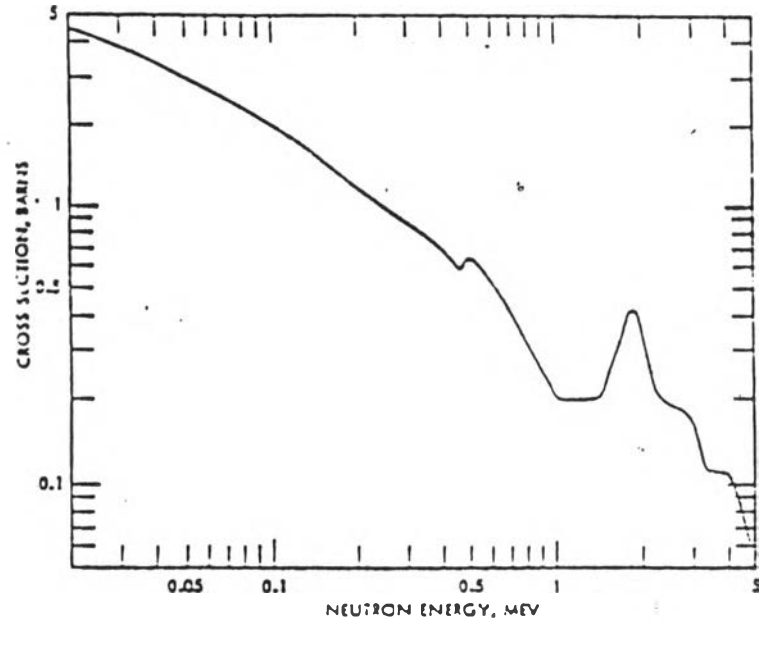
สำหรับประสิทธิภาพของหัววัด ซึ่งมีขนาดยาวประมาณ 15 เซนติเมตร จะมีค่าประมาณ 22-25 % ประสิทธิภาพของหัววัดจะลดลงเมื่อความยาวของหัววัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของหัววัดนิวตรอนชนิดหลอด BF_3 [7]

F - field tube. V-sensitive volume. W-center wire.

C - guard tube. I-insulation.



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานสำหรับปฏิกิริยา $^{10}B\ (n, \alpha)\ ^{7}Li$ [7]

3.3.2 หัววัดพรอพอชันแนลฮีเลียม-3 (^{3}He Proportional Counter) [12,25]

หัววัด ^{3}He ซึ่งเป็นหัววัดที่บรรจุก๊าซผสม ระหว่างก๊าซฮีเลียม กับคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตรของก๊าซที่บรรจุนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio) สำหรับงานที่จัดงการวัด รวมทั้งลักษณะการดูดกลืนของก๊าซด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 3% ลักษณะของหัววัดมักจะเป็นรูปทรงกระบอก โลหะทรงกระบอกนี้ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ อาจทำด้วยทองเหลืองหรืออะลูมิเนียม ลักษณะเช่นเดียวกับหัววัดแบบ BF_3

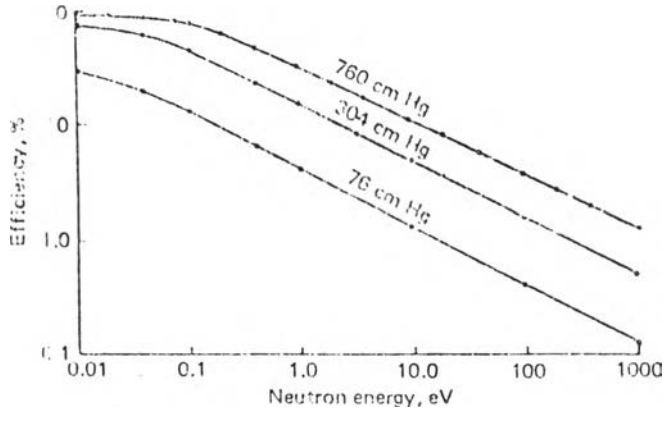
หัววัด ^{3}He ใช้วัดนิวตรอนช้า โดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียสกับ Helium-3 ดังสมการ

$$_2He^3 + {}_0n^1 \longrightarrow {}_1H^3 + {}_1P^1 + 764\ keV$$

ซึ่งภายในหัววัดค่าภาคัดขวางของปฏิกริยานี้เป็นตามกฎ $^1/_v$ ค่าภาคัดขวางสำหรับนิวตรอนช้ามีค่า 5400 บาร์น ที่ 0.025 eV สัดส่วนตามแบบ $^1/_v$ จาก 0.001 eV ถึง 0.04 eV

ประสิทธิภาพของหัววัด ^{3}He จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันก๊าซ แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพของหัววัด ^{3}He กับพลังงานของความดันต่างกัน

การเพิ่มขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดให้โตขึ้น และเพิ่ม stopping power ของก๊าซ (เพิ่มความดันของก๊าซ) จะแก้ปัญหา wall effect ได้



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพของหัววัด ^{3}He กับพลังงานของนิวตรอน [28]