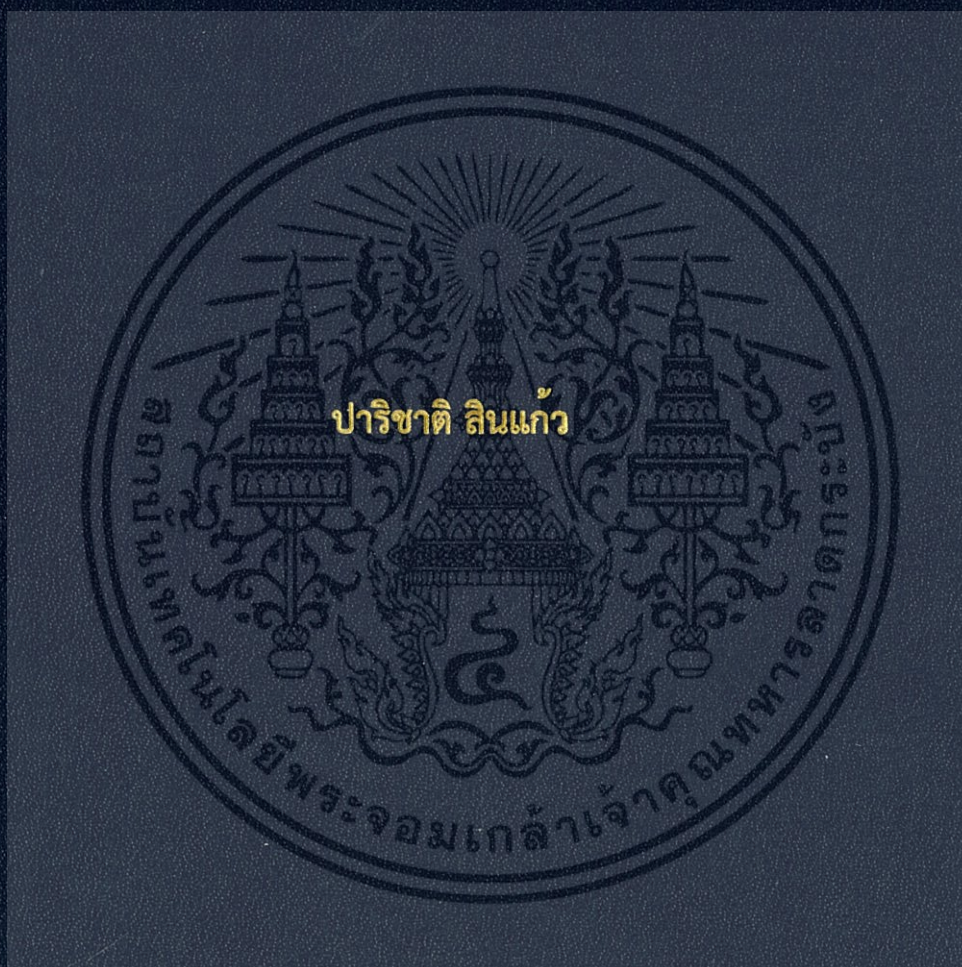


การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
DEVELOPMENT OF IN-SITU NEUTRON MOISTURE
GAUGE IN SOIL



สหกิจศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๙

การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
DEVELOPMENT OF IN-SITU NEUTRON MOISTURE
GAUGE IN SOIL



T149456



ปาริชาติ สิ้นแก้ว

b. 12881776
i.

สงทพ...
เลขทะเบียน... 149456
รับเดือนปี... 8 ส.ค. 2561

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF IN-SITU NEUTRON MOISTURE
GAUGE IN SOIL



COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
 Development of In-Situ Neutron Moisture Gauge in Soil

ชื่อนักศึกษา นางสาวปาริชาติ สิ้นแก้ว รหัสนักศึกษา 56051168

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)







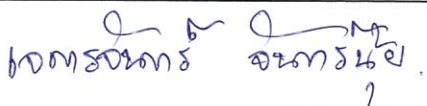
ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ชนาธิป ทิพยกุล
 นายเจตรจันทร์ จันทรน้อย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
ดร.กฤษกร ไกลเจริญรัตน์ กรรมการ	
ดร.รพพน พิชา กรรมการ	
ดร.ศศิพันธุ์ คณะวีรัตน์ กรรมการ	
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ชนาธิป ทิพยกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	
นายเจตรจันทร์ จันทรน้อย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปาริชาติ สิ้นแก้ว รหัสนักศึกษา 56051168
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชนาธิป ทิพยกุล นายเจตรจันทร์ จันทรน้อย

บทคัดย่อ

สหกิจศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาการวัดความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน โดยอาศัยหลักการการกระเจิงกลับของนิวตรอน และออกแบบโพรบเป็นวัสดุพอลิเอธิลีนรูปทรงกระบอก ภายในบรรจุด้วยต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม และใช้หัววัดรังสีนิวตรอนแบบบรรจุก๊าซชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ เชื่อมต่อกับระบบวัดนิวตรอนแบบนับรวม ทำการทดลองวัดจำนวนนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ได้ผิวดินไม่เกิน 1 เมตร ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กรุงเทพฯ โดยทำการเปรียบเทียบจำนวนนับนิวตรอนที่วัดได้กับปริมาณความชื้นของดินที่คำนวณได้จากการอบดิน นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบและจัดทำระบบนับจำนวนรังสีนิวตรอนรวมถึงภาคแสดงผลปริมาณความชื้นของดิน โดยอาศัยการเปรียบเทียบจากผลการทดลองในภาคสนาม จากระบบที่ได้พัฒนาขึ้นพบว่าความชื้นของดินมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 15% เมื่อเทียบกับการหาความชื้นด้วยวิธีการอบดิน

คำสำคัญ : การกระเจิงกลับของนิวตรอน โบรอนไตรฟลูออไรด์ อะเมริเซียม-241/เบริลเลียม

Title	Development of In-Situ Neutron Moisture Gauge in Soil
Students	Miss Parichat Sinkaew Student ID 56051168
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof.Sarai Lakchaum
Co-advisor	Dr.Chanatip Tippayakul Mr.Jatechan Channuie

ABSTRACT

This cooperative education, a neutron moisture gauge in soil was developed based on the principle of neutron backscattering. The probe was made of cylindrical high-density polyethylene. This probe was designed to contain a $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source and a BF_3 proportional counter and connected to a suitably calibrated integral counting system. The field measurements of the neutron probe response were collected at different depths (less than 1 m) under the ground surface at Thailand Institute of Nuclear Technology, Bangkok. The gravimetric method was used for comparison with the neutron probe measurement. In addition, a soil moisture monitor was designed and constructed to count the slow neutron number and display the water content in soil. The calibration equation derived from the field measurements of the neutron count rate and the soil water content was applied. The results of the water content in soil were taken by in-house developed monitor system shown that the uncertainty less than 15% compared with the gravimetric method (direct method).

Keywords : Neutron backscattering, BF_3 proportional counter, $^{241}\text{Am-Be}$ neutron source

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากรองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำในด้านของการนำเสนอ รวมถึงแนวทางในการจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนด

ขอขอบคุณ คุณเจตรจันทร์ จันทรนัย สังกัดกลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีชีวเคมีแห่งชาติ ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำทางด้านวิชาการ ชี้แนะปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบทุกขั้นตอนของการปฏิบัติงาน ยังคงยึดหัวใจวัตถุประสงค์และสถานที่ทำการทดสอบ รวมถึงตรวจแก้เล่มโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.ชนาธิป ทิพยกุล คุณมาโนช ฉิมทิน คุณปัญญา เหมลา ศูนย์เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย คุณปาพจน์ พรวนตันไทร หน่วยความปลอดภัย สถาบันเทคโนโลยีชีวเคมีแห่งชาติ ที่คอยให้การสนับสนุน ในด้านของเครื่องมือวัดรังสี อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ รวมถึงอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และสถานที่ทำการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณนฤชา อมรดิษฐ์ คุณฐิติภรณ์ เดชโหมด และคุณกมลทิพย์ แก้วบุญเรือง นักศึกษาปริญญาโท ซึ่งให้ความรู้และคำปรึกษาในเรื่องของการเขียนโปรแกรม ขอขอบคุณ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งสนับสนุนทุนในการทำโครงการพิเศษนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ผู้ศึกษาไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้ศึกษา ที่คอยสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ทั้งการให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่สำคัญที่ช่วยผลักดันให้ทำโครงการพิเศษในครั้งนี้จนสำเร็จ

ปาริชาติ สิ้นแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron sources)	4
2.1.1 ทั่วไป	4
2.1.2 คุณสมบัติ	4
2.2 นิวตรอน (neutron)	5
2.2.1 นิวตรอนช้า (slow neutron)	5
2.2.2 อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron)	6
2.2.3 นิวตรอนพลังงานสูง หรือนิวตรอนเร็ว (fast neutron)	6
2.3 อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนกับสสาร (neutron interaction with matter)	6
2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)	7
2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)	8
2.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Radiative Capture)	8
2.3.4 ปฏิกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission)	9
2.3.5 ปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission reaction)	10
2.3.6 การลดทอนนิวตรอน (Neutron attenuation)	10
2.4 การกระเจิงกลับรังสี (Radiation Backscattering)	11
2.5 หัววัดนิวตรอน (neutron detectors)	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ระบบวัดนิวตรอน (detection system)	12
2.6.1 BF ₃ proportional tube	13
2.6.2 ³ He proportional counter	13
2.6.3 Fission counters	14
2.7 หัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector)	15
2.7.1 ส่วนประกอบ	15
2.7.2 หลักการทำงาน	16
2.7.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes	16
2.8 ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	19
2.8.1 สมดุลของน้ำในดิน (Soil Water Balance)	20
2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นในดิน	20
2.9 Arduino	21
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
2.10.1 การทดสอบความชื้นในดินบริเวณกว้างโดยใช้นิวตรอน	23
2.10.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการวัดค่าความชื้นจากหัววัด	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 ออกแบบโพรบสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน	24
3.2 จัดทำระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน	25
3.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน	26
3.4 ขั้นตอนการทดสอบระบบวัดเบื้องต้น	32
3.5 การทดสอบในภาคสนาม	32
3.6 การจัดทำอุปกรณ์สำหรับนับวัดรังสี และแสดงผลโดยใช้โปรแกรม	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	35
4.1 การสร้าง Plateau curve เพื่อทดสอบหา Operating voltage ที่เหมาะสม	35
4.2 ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด	38
4.3 ทดสอบการออกแบบระบบวัดความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน	39
4.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดิน	39
4.3.2 วิเคราะห์ธาตุในดินโดยใช้ X-ray fluorescence : XRF	44
4.4 การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยในส่วนของภาคแสดงผล	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
2.1 จำนวนการชนแบบยืดหยุ่นในการลดพลังงานนิวตรอนจาก 4 MeV ไปเป็น 0.025 eV ของไอโซโทปต่าง ๆ	7
4.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า(V) กับอัตราการนับนิวตรอน (cpm)	35
4.2 การตั้งค่าอุปกรณ์การวัดจำนวนนิวตรอน	40
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น(%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 1	42
4.4 แสดงจำนวนองค์ประกอบของธาตุในดิน	44
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นจากการอบ (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2	46
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นจากเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2	48
4.7 หลุมที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการอบกับปริมาณความชื้นจากสมการ $y = 0.0066x + 4.2757$ ของเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM)	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รายละเอียดของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ที่ใช้ในการทดลอง	4
2.2 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก $^{241}\text{Am-Be}$ ซึ่งจะมีพลังงานครอบคลุมตั้งแต่ 1- 10 MeV โดยมีค่าเฉลี่ย ที่ประมาณ 4 MeV	5
2.3 ช่วงพลังงานของรังสีนิวตรอน	6
2.4 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)	7
2.5 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)	8
2.6 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Radiative Capture)	9
2.7 ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction)	10
2.8 แผนภาพและกราฟแสดงการลดลงของความเข้มนิวตรอนเมื่อผ่านวัสดุตัวกลาง	10
2.9 การกระเจิงกลับของรังสี	11
2.10 หัววัด ^3He counter	13
2.11 สเปกตรัมขนาดสัญญาณไฟฟ้าของหัววัด ^3He counter	14
2.12 หัววัดแบบ fission counters	14
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า cross sections กับพลังงานของนิวตรอน	15
2.14 ส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector)	15
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสีกับจำนวนคู่อิออนที่เกิดขึ้น ซึ่งขนาดของสัญญาณจะขึ้นกับชนิดของรังสี	16
2.16 หัววัดรังสีแบบ Ionization chamber แบบพกพา	17
2.17 การเกิด gas multiplication ในบริเวณ proportion	18
2.18 หัววัดรังสีแบบ Proportional counter	18
2.19 ส่วนประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของ Geiger-Muller counters	18
2.20 หัววัดรังสีแบบ Geiger-Muller counters	19
2.21 (a) Three-Phase System of Soil Structure	19
(b) ปริมาณน้ำที่อุกอนภาคของดินดูดยึดไว้	19
2.22 สมดุลของน้ำในดิน (Soil Water Balance)	20
2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นในดิน และน้ำที่เป็นประโยชน์	21
2.24 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)	22
3.1 การออกแบบภาชนะสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน	24
3.2 โพรบที่ใช้ในการทดสอบ	25
3.3 ระบบวัดความชื้นของดินด้วยนิวตรอน	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัดความชื้น	26
3.5 หัววัด BF ₃ proportional counter	26
3.6 ต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹ Am-Be	26
3.7 (a) แผ่นพอลิเอธิลีน	27
(b) ภาพสำหรับใส่หัววัดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน	27
3.8 Preamplifier	27
3.9 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	28
3.10 เครื่องออสซิลอโคป	28
3.11 เครื่องวัดความแรงรังสีแกมมา	29
3.12 เครื่องวัดความแรงรังสีนิวตรอน	29
3.13 ตู้ความชื้น	29
3.14 เครื่องชั่ง	30
3.15 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)	30
3.16 ท่อโลหะและท่อลุมิเนียม	30
3.17 ถุงซิป	31
3.18 กระจกป้องใส่ดิน	31
3.19 ถาดและชั้นดักดิน	31
3.20 X-ray fluorescence	32
3.21 แผนผังการทำงานของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)	33
3.22 Neutron moisture model 2017 (NMM)	34
3.23 (a) ด้านหน้าของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)	34
(b) ด้านหลังของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)	34
4.1 ระบบวัดความชื้น	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V) กับอัตรานับนิวตรอน (cpm)	37
4.3 ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด BF ₃ proportional counter	38
4.4 สัญญาณไฟฟ้าที่ปรากฏบนหน้าจอเครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า	38
4.5 พื้นที่ทำการทดสอบบริเวณรอบรั้วสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ	39
4.6 การจัดวางอุปกรณ์วัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน	39
4.7 หลุมมีขนาดความลึก 100 cm	40
4.8 เก็บตัวอย่างดินใส่ถุงซิป	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 การหย่อนหัววัดลงไปในกลุ่มดิน	40
4.10 ตัวอย่างดินที่ความลึกต่าง ๆ	41
4.11 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน	41
4.12 อบตัวอย่างดินด้วยตู้อบความชื้น	41
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cps/50) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 1	43
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนนับนิวตรอน(cps) กับปริมาณความชื้น(%)	44
4.15 (a) บริเวณที่ทำการวัดความชื้นในดินและวัดจำนวนรังสีนิวตรอนของหลุมที่ 2	46
(b) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการนับจำนวนรังสีนิวตรอนกับเครื่อง NMM	46
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cps/80) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2	47
4.17 ผลความชื้นของดิน (%) แสดงด้วยเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017	48

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
amu	หน่วยของอะตอม ย่อมาจาก atomic mass unit
atm	หน่วยของความดันบรรยากาศ
mCi	มิลลิวูรี่ หน่วยวัดรังสี
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
keV	กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
MeV	เมกะอิเล็กตรอนโวลต์
cm	เซนติเมตร
mm	มิลลิเมตร
g	กรัม
cps	หน่วยอัตราการนับรังสีต่อวินาที (count per second)
cpm	หน่วยอัตราการนับรังสีต่อนาที (count per minute)
n	นิวตรอน
p	โปรตอน
γ	รังสีแกมมา
α	รังสีอัลฟา
e ⁻	อิเล็กตรอน
Q	พลังงานที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้
R	ตัวต้านทาน
C	ตัวเก็บประจุ
V(t)	ความต่างศักย์ที่ขึ้นกับเวลา
V	หน่วยของความต่างศักย์ (โวลต์)
°C	องศาเซลเซียส
NMM	Neutron moisture model 2017 ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จะเห็นว่าภาคเกษตรกรรมมีบทบาทมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อการเพาะปลูก เนื่องจากน้ำเป็นตัวลำเลียงแร่ธาตุ สารอาหารต่าง ๆ ของพืช ช่วยปรับความเป็นกรด-ด่างภายในดินให้เหมาะสม และยังช่วยปรับอุณหภูมิของดินในเวลากลางวันได้ คุณภาพดินในหลาย ๆ พื้นที่เริ่มเสื่อมไปจากที่เคยเป็นอยู่ เนื่องจากอุตสาหกรรมเจริญเติบโตมากขึ้น มีการปล่อยมลพิษออกมาส่งผลต่อพื้นที่ดินบริเวณใกล้เคียง การทำเกษตรกรรมจึงต้องมีการเลือกพื้นที่ให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูก โดยดูจากแหล่งที่ตั้ง ชนิดของดินที่ใช้เพาะปลูก ปุ๋ยที่ช่วยในการเจริญเติบโต ความพรุนของดิน และปริมาณความชื้นในดิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าสวนหรือไร่ที่ได้รับมาตรฐาน จะมีการตรวจสอบความชื้นในดินสม่ำเสมอ เพื่อที่จะทำให้ผลผลิตมีคุณภาพ ไม่ว่าจะ เป็นในเรื่องของรสชาติหรือผิวพรรณเปลือกนอก รวมถึงเพิ่มการส่งออกผลผลิตให้สูงสุด ในส่วนของระบบชลประทาน ปริมาณความชื้นในดินจะเป็นตัวกำหนดปริมาณการให้น้ำแก่พืช ว่าเมื่อใดควรให้น้ำ ให้น้ำครั้งละเท่าไร และการรักษาระดับน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังมีบทบาทในด้านของการก่อสร้าง สถานที่ อาคาร โรงงาน และด้านการคมนาคมทางบก เช่น การทำถนนลาดยาง ที่จะต้องมีการบดอัด และตรวจสอบความชื้นในดินก่อนที่จะทำการก่อสร้าง เพื่อดูว่าความลาดชันของพื้นที่เป็นอย่างไร ความพรกตัวของดินกับหินและความลาดเทของชั้นหินเป็นอย่างไร ซึ่งจะทำให้ทราบว่าจะต้องบดอัดดินเพิ่มมากขึ้นน้อยเพียงใด แน่นพอที่จะรองรับน้ำหนักตามข้อกำหนดที่ได้ออกแบบคำนวณไว้หรือไม่

ปัจจุบันมีวิธีการวัดความชื้นของดินหลายแบบ ได้แก่ การวัดความชื้นโดยตรง เป็นการวัดโดยนำดินมาชั่ง แล้วนำไปอบให้แห้ง ซึ่งจะเห็นว่าวิธีนี้ค่อนข้างใช้เวลานานในการตรวจวัด และวิธีวัดความชื้นในดินทางอ้อมโดยใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น แท่งยิปซัม (gypsum block), เทนซิโอมิเตอร์ (tensiometer), เครื่องวัดความชื้นชนิดวัดค่าความจุไฟฟ้า (moisture meter capacitance type) และทามโดเมนรีเฟล็กโตมิเตอร์ (time domain reflectometry : TDR) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอายุการใช้งาน และเครื่องมือวัดความชื้นของดินที่สั่งมาจากต่างประเทศ จะพบว่าเมื่อชำรุดจะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการส่งซ่อม นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการวัดความชื้นที่ระดับความลึกมาก ๆ อีกด้วย

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนขึ้น เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน ลดเวลาในการตรวจวัด สามารถวัดความชื้นของดินตรงจุดเดิมซ้ำ ๆ ได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่างดิน ตอบโจทย์ในการวัดความชื้นที่ระดับความลึกมาก ๆ และสามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ต่าง ๆ ได้ ซึ่งจำนวนนับนิวตรอนที่วัดได้จะอาศัยหลักการการกระเจิงกลับของรังสีนิวตรอนเข้าสู่หัววัด กล่าวคือรังสีนิวตรอนพลังงานสูงจะถูกปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวตรอนพลังงานสูงจะไปชนกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของดินจนทำให้รังสีนิวตรอนมีพลังงานต่ำลง และกระเจิงกลับเข้าสู่หัววัด โดยอะตอมของไฮโดรเจนจะลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด ซึ่งหมายถึงหากบริเวณใดของดินมีปริมาณความชื้นสูงก็จะทำให้หัววัดนิวตรอนได้มากตามไปด้วย จากจำนวนนับของนิวตรอนที่แปรผันตามปริมาณความชื้นนี้เอง จึงสามารถแสดงปริมาณความชื้นของดินได้จากการวัดจำนวนนิวตรอน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบและจัดทำระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
- 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดินที่ระยะความลึกต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ช่วงความลึกที่ใช้ในการวัด มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 เซนติเมตร และมีความลึกประมาณไม่เกิน 2 เมตร จากผิวดิน
- 2) ออกแบบภาชนะสำหรับบรรจุหัววัดนิวตรอนและต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน มีความยาวไม่เกิน 25 เซนติเมตร
- 3) สถานที่ทำการทดลอง พื้นที่บริเวณของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กรุงเทพฯ

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัยจะสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
 - 1.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron sources)
 - 1.2 อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนกับสสาร (neutron interactions with matter)
 - 1.3 หัววัดนิวตรอน (neutron detectors)
 - 1.4 ระบบวัดนิวตรอน (detection system)
 - 1.5 การกระเจิงกลับนิวตรอน (neutron backscattering technique)
 - 1.6 ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช
2. ออกแบบและจัดทำระบบวัดรังสีนิวตรอน
 - 2.1 ออกแบบภาชนะสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน
 - 2.2 จัดทำระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
 - 2.3 จัดเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน
 - 2.4 ขั้นตอนการทดสอบระบบวัดเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การทดสอบหา Operating voltage ที่เหมาะสมของหัววัด

2.4.2 การทดสอบการตอบสนองของหัววัดต่อรังสีแกมมา

2.4.3 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นที่
ระยะความลึกต่าง ๆ

2.5 การทดสอบในภาคสนาม

3. จัดทำอุปกรณ์สำหรับนับวัดรังสีนิวตรอนและแสดงผลโดยใช้โปรแกรม

3.1 พัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้นับรังสีนิวตรอนและแสดงผลค่าความชื้น

3.2 จัดทำกล่องสำหรับบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4. ผลการทดลอง

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

เดือน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน
ขั้นตอนที่ 1	←→						
ขั้นตอนที่ 2		←→					
ขั้นตอนที่ 3			←→				
ขั้นตอนที่ 4					←→		
ขั้นตอนที่ 5							←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้มีความรู้ทางด้านเทคนิคการวัดทางนิวเคลียร์ที่เป็นประโยชน์เพิ่มมากขึ้น
- 2) ได้เรียนรู้เกี่ยวกับระบบการทำงานภายในเครื่องมืออุปกรณ์วัด
- 3) ทราบถึงหลักการวัดรังสีนิวตรอน โดยเฉพาะการจัดระบบวัด ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับจำนวนนิวตรอนที่เปลี่ยนแปลงไป
- 4) ระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนที่สร้างขึ้น สามารถใช้วัดในงานจริงได้ และมีความถูกต้องเทียบเท่ากับเครื่องมือที่ได้รับมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

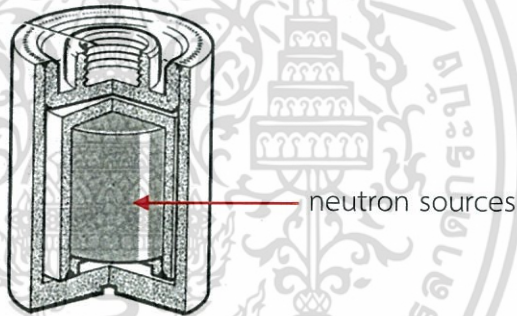
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron sources) อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนกับสสาร (neutron interaction with matter) หัววัดนิวตรอน (neutron detectors) ระบบวัดนิวตรอน (detection system) หัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector) และความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron sources)

ต้นกำเนิดนิวตรอนได้แก่ Ra-Be, $^{239}\text{Pu-Be}$, $^{238}\text{Pu-Be}$ หรือ $^{241}\text{Am-Be}$ เป็นต้น ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ใช้ในการทดลอง คือ $^{241}\text{Am-Be}$ ซึ่งมีความแรง 300 mCi ลักษณะเป็นทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำด้วยเหล็กกล้า ห่อหุ้มสารประกอบ $^{241}\text{AmO}_2$ ผสมอยู่กับ ^9Be



รูปที่ 2.1 รายละเอียดของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ ที่ใช้ในการทดลอง [1]

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

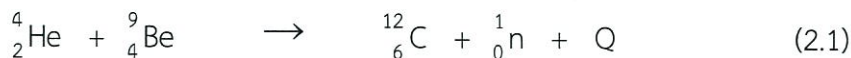
อะเมริเซียม (Americium) เป็นธาตุสังเคราะห์ มีสัญลักษณ์ว่า Am และมีเลขอะตอม 95 เป็นธาตุโลหะกัมมันตรังสี ธาตุอะเมริเซียมเป็นธาตุแอกทีไนต์ ซึ่งมีมวลอะตอมเท่ากับ 243 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1449 เคลวิน และจุดเดือดอยู่ที่ 2880 เคลวิน [1]

2.1.2 คุณสมบัติ

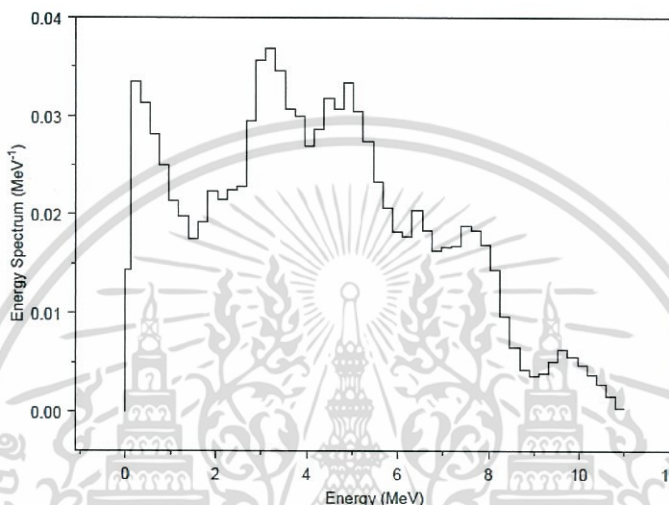
ธาตุอะเมริเซียมบริสุทธิ์มีสีขาวเงินวาว ที่อุณหภูมิห้องธาตุนี้จะเกิดการหมองอย่างช้าในอากาศแห้ง สามารถตีเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย ^{241}Am เป็นไอโซโทปที่ไม่เสถียรมีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 432 ปี และสลายตัวให้ทั้งรังสีอัลฟาและรังสีแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผลิตนิวตรอนจะอาศัยรังสีอัลฟาที่ได้จากการสลายตัวของไอโซโทป ^{241}Am โดยรังสีอัลฟาจะถูกนิวเคลียสของ ^9Be จับ และกลายเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังสมการ



Q คือพลังงานคงเหลือของปฏิกิริยานั้น ๆ โดยพลังงานบางส่วนของ Q และพลังงานจลน์ของรังสีอัลฟาจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของนิวตรอน ซึ่งช่วงพลังงานแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก ^{241}Am -Be ซึ่งจะมีพลังงานครอบคลุมตั้งแต่ 1- 10 MeV โดยมีค่าเฉลี่ย ที่ประมาณ 4 MeV [17]

2.2 นิวตรอน (neutron) [2, 3]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มวล 1.008665 amu เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียส ยกเว้นอะตอมของไฮโดรเจน เมื่ออยู่ในนิวเคลียส นิวตรอนจะเป็นอนุภาคที่อยู่ตัว แต่เมื่ออยู่เป็นอิสระจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาและโปรตอน ด้วยครึ่งชีวิต 12.8 วินาที ดังสมการ



ในทางปฏิบัติสามารถจำแนกนิวตรอนได้ตามพลังงานและความเร็ว ดังนี้

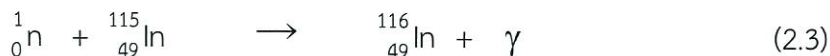
2.2.1. นิวตรอนช้า (slow neutron)

หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 1 eV ซึ่งนิวตรอนเร็วจะถูกหน่วงด้วยความเร็วทำให้ช้าลงมาอยู่ที่ประมาณ 2.2 กิโลเมตรต่อวินาที (เร็วกว่าเสียงประมาณ 7 เท่า) ซึ่งก่อให้เกิดการแบ่งแยกนิวเคลียสได้ง่ายขึ้น อาจจำแนกได้เป็น

- เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) พลังงานเฉลี่ย 0.025 eV ที่ 20°C เป็นปฏิกิริยา

เอกสหลักที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปพลังงานของนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้นไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคภายในหลุด ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

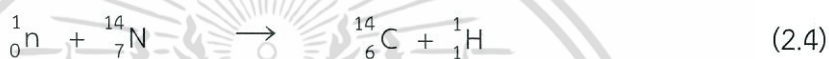
ออกมาได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปฏิกิริยาการก่อกัมมันต์แบบ (n, γ) เลขอะตอม Z คงเดิม แต่เลขมวล A จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ดังนี้



2.2.2. อิพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron)

หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-10 keV การจับนั้นแม้ว่าจะส่งผลให้เป็นแบบปฏิกิริยาการก่อกัมมันต์ดังสมการ (2.3) แต่นิวเคลียสผสมที่เกิดขึ้นอาจจะมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยว และปลดปล่อยอนุภาค เช่น โฟตอน ดิวเทอร์อน หรือนิวภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยาแบบนี้ส่งผลให้เกิดธาตุใหม่เรียกว่า “การแปรธาตุ” ตัวอย่าง

ปฏิกิริยาแบบ (n, p)

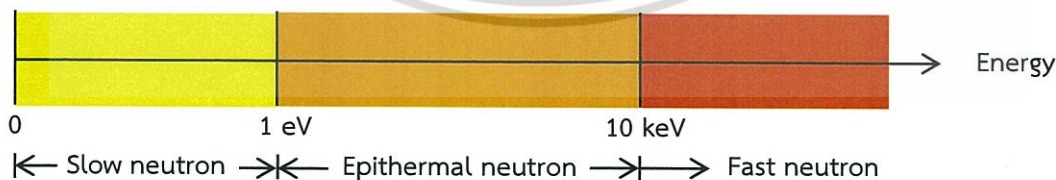


ปฏิกิริยาแบบ (n, α)



2.2.3. นิวตรอนพลังงานสูง หรือนิวตรอนเร็ว (fast neutron)

หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 10 keV ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอน 2 ถึง 3 ตัว ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียสระหว่างการเกิดการแบ่งแยกอยู่ที่ประมาณ 20,000 กิโลเมตรต่อวินาที ตัวอย่างปฏิกิริยา $(n, 2n)$



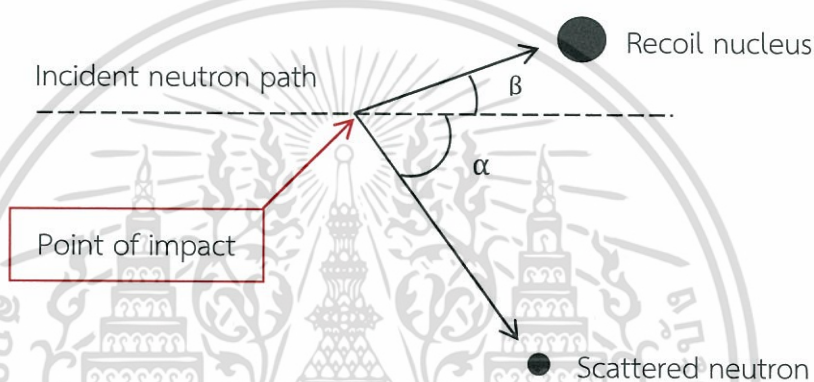
รูปที่ 2.3 ช่วงพลังงานของรังสีนิวตรอน

2.3 อันตรกิริยาของรังสีนิวตรอนกับสสาร (neutron interaction with matter) [3, 4, 5, 16]

เมื่ออนุภาคนิวตรอนทำอันตรกิริยากับสสาร อาจถูกดูดกลืนและหายไปหรือเกิดการกระเจิงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปจากเดิม โดยนิวตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางได้ระยะหนึ่งก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยา ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวกลางและพลังงานของนิวตรอน สามารถแบ่งได้ 6 แบบ ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

ในกระบวนการชนแบบยืดหยุ่นนี้ อนุภาคนิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียส โดยที่นิวเคลียสหลังการชน (recoil nucleus) ยังคงอยู่ในสถานะพื้น (ground state) ส่วนนิวตรอนที่กระเจิง (scatter) ออกมา จะมีการเปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าเท่าเดิม กล่าวคือพลังงานรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสก่อนและหลังการชนมีค่าเท่ากัน การชนแบบนี้จะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ซึ่งเป็นการทำให้นิวตรอนพลังงานสูง (fast neutrons) สูญเสียพลังงานเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีธาตุเบาอยู่ เช่น ไฮโดรเจน ดิวเทรียม และคาร์บอนในกราไฟต์ จะใช้ในกระบวนการลดพลังงาน (moderation) ของนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutrons) ให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutrons) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

ตารางที่ 2.1 จำนวนการชนแบบยืดหยุ่นในการลดพลังงานนิวตรอนจาก 4 MeV ไปเป็น 0.025 eV ของไอโซโทปต่าง ๆ [17]

Target Isotope	Atomic Mass	Number of Collisions
Hydrogen	1.008	18
Deuterium	2.000	25
Helium	4.003	43
Lithium	6.940	69
Beryllium	9.013	88
Carbon	12.011	115
Oxygen	16.000	152
Sodium	22.991	215
Iron	55.845	514
Uranium	238.070	2172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพลังงานที่นิวตรอนสูญเสียในการชนกับ recoil nucleus เป็นไปตามสมการ

$$E_{\text{loss}} = \frac{4Mm_n}{(M + m_n)^2} \cos^2 \theta \quad (2.7)$$

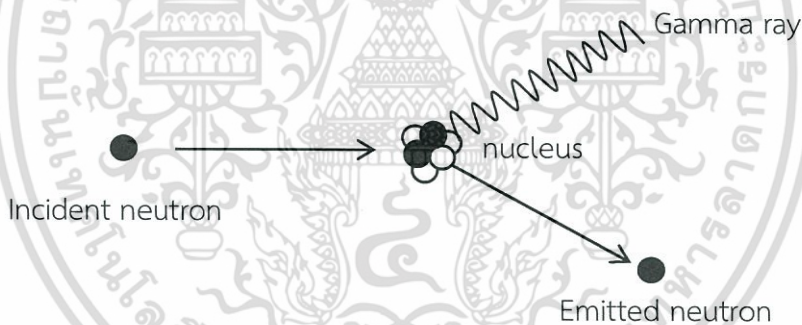
เมื่อ m_n เป็นมวลของนิวตรอนที่มาชน

M เป็นมวลของนิวเคลียสที่ถูกชน

θ เป็นมุมระหว่างนิวเคลียส และนิวตรอนที่กระเด็นเปลี่ยนทิศทางไป

2.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

ในกระบวนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นนี้ อนุภาคนิวตรอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียส โดยที่นิวเคลียสหลังการชน (recoil nucleus) จะต้องได้รับพลังงานมากพอ จึงจะสามารถเคลื่อนที่ไปสู่สถานะกระตุ้น (excited state) ได้ มักจะเกิดขึ้นกับธาตุหนัก โดยที่นิวเคลียสหลังการชน (recoil nucleus) อาจจะปลดปล่อยพลังงานในรูปของรังสีแกมมา มาฉับพลันหรืออยู่ใน metastable state ช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 2.5



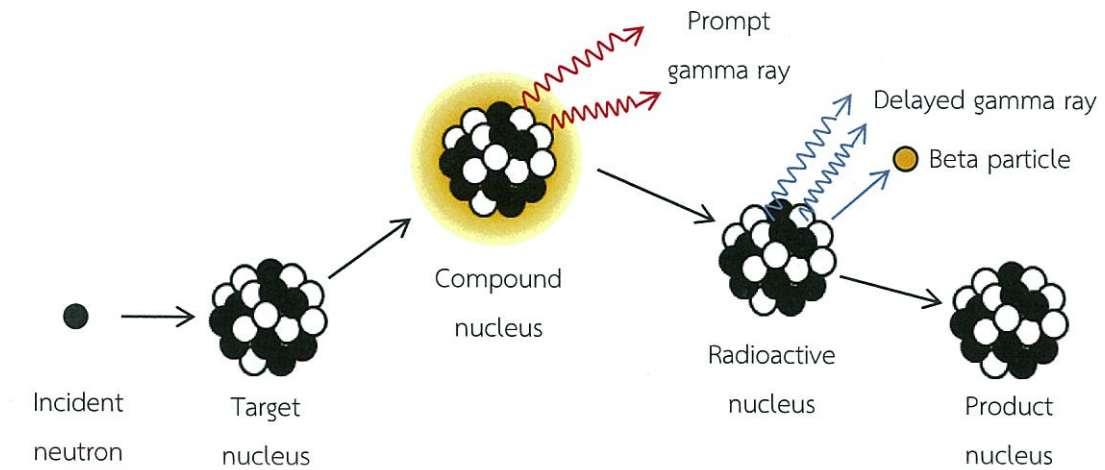
รูปที่ 2.5 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

พลังงานจลน์ก่อนและหลังการชนมีค่าต่างกัน กล่าวคือพลังงานจลน์หลังการชนจะมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานบางส่วนออกมาในรูปของโฟตอนหรือรังสีแกมมา ดังนั้นค่า Q ของปฏิกิริยาจึงมีค่าเป็นลบ

2.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Radiative Capture)

อนุภาคนิวตรอนไม่มีประจุจึงเคลื่อนที่เข้าไปในนิวเคลียสได้ง่าย เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากแรงผลัคลูกอมป์ ดังนั้นโอกาสที่จะถูกจับไว้โดยนิวเคลียสจึงมีค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง slow neutrons หรือ thermal neutrons ในกระบวนการนี้เมื่อนิวเคลียสจับนิวตรอนเอาไว้ จะกลายเป็นนิวเคลียสประกอบ (compound nucleus) ในสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งหลังจากนั้นก็มักจะกลับสู่สถานะพื้น (ground state) โดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เมื่ออยู่ในที่ที่ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Radiative Capture)

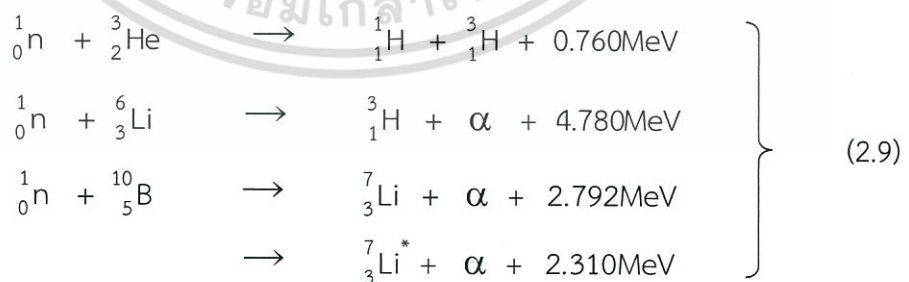
ตัวอย่างทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาแบบ Radiative Capture ดังนี้



อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาจะมีค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิมรวมกันกับนิวตรอนอิสระเสมอ

2.3.4 ปฏิกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission)

นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด หลังจากกลายเป็นนิวเคลียสประกอบ (compound nucleus) ในสถานะกระตุ้น จะมีการปลดปล่อยนิวคลีออนออกมาแทน เช่น โปรตอน (n,p), ดิวเทรอน (n,d), อัลฟา (n, α) หรือแม้แต่นิวตรอน (n,2n) ตัวอย่างปฏิกิริยา ดังนี้

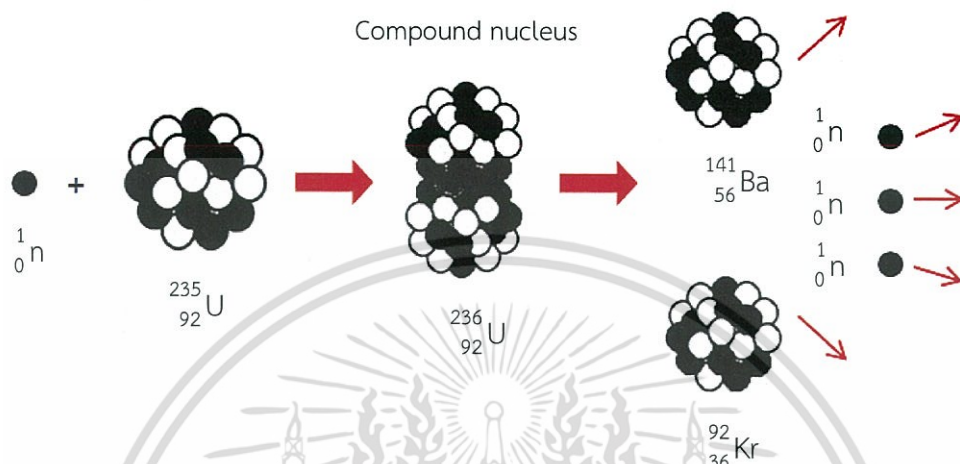


ปฏิกิริยาทั้งสามมีค่า cross section สูงมากเป็นผลให้นิวตรอนมีพลังงานลดลง สัดส่วนการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนจะมากเมื่อเกิดอันตรกิริยากับนิวคลีอิดเล็ก ๆ โดยเฉพาะไฮโดรเจนซึ่งมีมวลใกล้เคียงกับนิวตรอน ดังนั้นสารประกอบที่มีไฮโดรเจนมาก ๆ เช่น น้ำ ไขมันหรือพาราฟิน จึงสามารถหยุดยั้งหรือกั้นรังสีนิวตรอนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

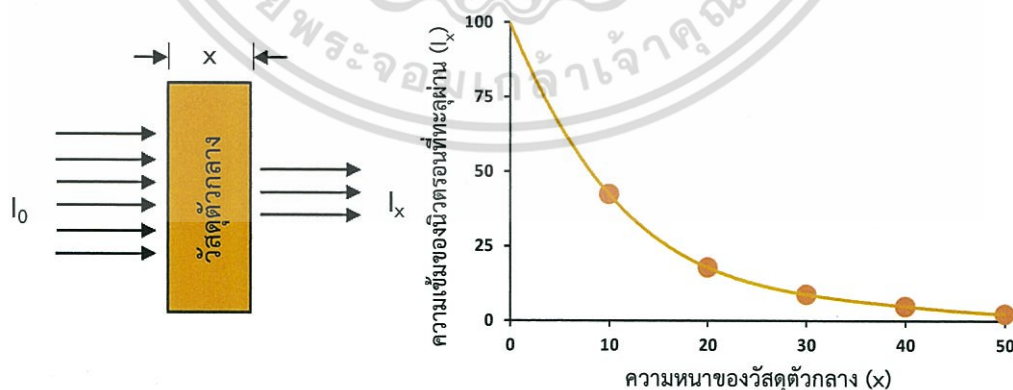
2.3.5 ปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission reaction)

เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแตกตัว มักจะเกิดขึ้นกับนิวเคลียสที่สามารถแตกแยกตัว (fissile nucleus) ได้ โดยการเหนี่ยวนำของนิวตรอน ทำให้เกิดพฤติกรรมของการ oscillating droplet ที่บางครั้งแตกตัวเป็น fission fragment 2 ส่วน และปลดปล่อยนิวตรอนออกมาอีก 2-3 ตัว



2.3.6 การลดทอนนิวตรอน (Neutron attenuation)

เมื่ออนุภาคนิวตรอนทำอันตรกิริยากับสสาร อาจถูกดูดกลืนและหายไป หรือเกิดการกระเจิง เปลี่ยนแปลงทิศทาง โดยนิวตรอนสามารถเคลื่อนที่ เข้าไปในตัวกลางได้ระยะหนึ่งก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยา ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวกลางและพลังงานของนิวตรอน อัตราส่วนของความเข้มของนิวตรอนจะลดลงในลักษณะ exponential เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพและกราฟแสดงการลดลงของความเข้มนิวตรอนเมื่อผ่านวัสดุตัวกลาง

ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและความหนาของวัสดุนั้น ตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_x = I_0 e^{-\Sigma x} \quad (2.10)$$

เมื่อ I_x คือ ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด

I_0 คือ ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบวัสดุ

Σ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านวัสดุของนิวตรอนที่พลังงานนั้น ๆ มีหน่วยเป็น cm^{-1}

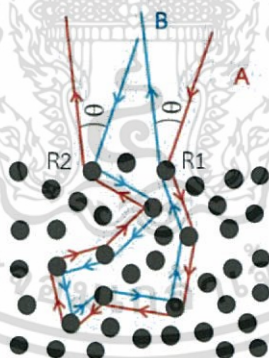
x คือ ความหนาของวัสดุ

อนุภาคนิวตรอนเมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ได้หลายแบบซึ่งกล่าวโดยสรุปคือ การลดพลังงานของนิวตรอนเร็ว การเกิดไอโซโทปรังสี และการทำให้เกิดรังสีทุติยภูมิ

นิวตรอนเร็วจะลดพลังงานลงอย่างรวดเร็วเมื่อชนกับธาตุเบา โดยเฉพาะไฮโดรเจนซึ่งมีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคนิวตรอน เป็นธาตุที่ลดพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด การวัดนิวตรอนเร็วที่หายไปหรือนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้น สามารถปรับเทียบไปหาปริมาณไฮโดรเจนและสารประกอบไฮโดรเจนได้

2.4 การกระเจิงกลับของรังสี (Radiation Backscattering) [13]

เทคนิคนี้ใช้การส่งรังสีเข้าไปยังด้านหนึ่งของวัสดุ แล้ววัดรังสีที่กระเจิงกลับมาจากด้านเดียวกันนี้ ความเข้มของรังสีที่กระเจิงกลับออกมาจะเพิ่มขึ้นตามความหนาจนถึงจุดอิ่มตัว และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุ การกระเจิงกลับของรังสีใช้พื้นที่เพียงด้านเดียวของวัสดุ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระเจิงกลับของรังสี

2.5 หัววัดนิวตรอน (neutron detectors) [6]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ ส่งผลให้การวัดอนุภาคนิวตรอนไม่สามารถกระทำได้โดยตรง จึงใช้การวัดทางอ้อมจากปฏิกิริยาของนิวตรอน ดังนี้

2.5.1 ใช้ผลของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของนิวตรอน (Neutron induced nuclear reaction) โดยให้นิวตรอนทำปฏิกิริยากับสารอื่น เกิดอนุภาคประจุไฟฟ้าขึ้น แล้ววัดประจุไฟฟ้าที่

เกิดขึ้นเทียบหาปริมาณนิวตรอน เช่น ปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$; $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$; $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ เป็นเอกสารเป็นเอกสารทงสวนเวสหาหรับการเขงนเพอการศกษาเ้านน 2 อนุอยู่ เ้านนไปเชอประเยนนด้นการค้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้น หัววัดเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ที่นิยมใช้กันมากเรียกว่า BF₃ - detector ซึ่งมีปฏิกิริยา ดังนี้



ในการวัดนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) ก็จะใช้โพสเอนที่สั่นหุ้มหัววัดไว้ เพื่อเปลี่ยนนิวตรอนพลังงานสูงให้เป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) จากผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็นอนุภาคมีประจุ 2 ตัว คืออัลฟา กับ ลิเทียม

2.5.2 ใช้ผลการออบรังสีนิวตรอนสร้างสารใหม่ (neutron induced transmutation) เมื่อยิงนิวตรอนไปยังสารอื่นจะทำให้กลายเป็นสารกัมมันตรังสี จากการวัดกัมมันตภาพรังสีของสารก็สามารถจะนำไปคำนวณหาปริมาณนิวตรอนได้

2.5.3 ใช้การเกิดการกระเจิงของนิวตรอน แล้วทำให้เกิดอนุภาคประจุไฟฟ้าขึ้น อนุภาคไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอาจเป็นอนุภาคโปรตอน อิเล็กตรอน เป็นต้น จากการวัดอนุภาคที่กระเจิงออกมาก็จะเทียบหาปริมาณนิวตรอนได้ วิธีนี้มักจะใช้กับนิวตรอนพลังงานสูง

2.5.4 ใช้ผลการเกิดฟิชชันของนิวตรอน สารบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 และ ยูเรเนียม-238 เป็นต้น เมื่อถูกชนด้วยอนุภาคนิวตรอนจะเกิดการแตกตัว จึงใช้สารเหล่านี้เคลือบหัววัด แล้ววัดปริมาณนิวตรอน จากการเกิดฟิชชันได้เรียกว่า Fission detector

2.5.5 ใช้สารประเภทฟิล์มหรืออิมัลชัน ให้นิวตรอนวิ่งไปชน จะทำให้เกิดแนวหรือหลุมเล็ก ๆ ของการชน นำไปเปรียบเทียบกับปริมาณของนิวตรอนได้

2.6 ระบบวัดนิวตรอน (detection system) [7]

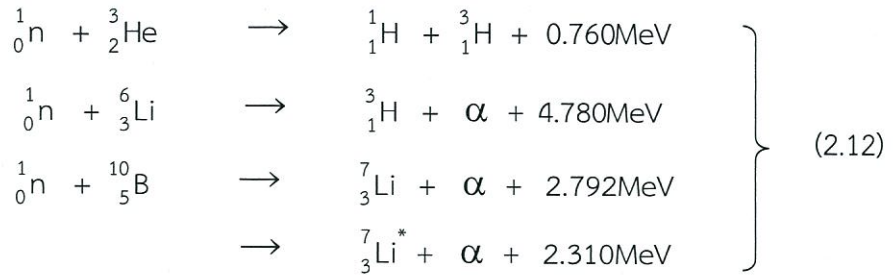
เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ ดังนั้นนิวตรอนจึงทำอันตรกิริยาเฉพาะกับนิวเคลียสเท่านั้น โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เพราะฉะนั้นหัววัดนิวตรอนจึงมีหลักการทำงานคือ ให้นิวตรอนเหนี่ยวนำจนเกิดอนุภาคที่มีประจุหตุยุมิ ซึ่งสามารถวัดได้ง่ายกว่า

ลักษณะสำคัญต่าง ๆ สำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ คือ

1. ธาตุที่นำมาใช้ต้องมีค่า cross section ค่อนข้างสูงสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้น ๆ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงตามไปด้วย จึงสามารถสร้างเป็นหัววัดที่มีขนาดเหมาะสมและไม่ใหญ่จนเกินไป
2. ควรจะมี isotropic abundance ในธรรมชาติที่สูงมากพอ ซึ่งทำให้หาได้ง่าย และมีราคาถูก
3. ปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้นต้องมีค่า Q-value เป็นบวก และควรจะมีค่าสูงพอที่จะมีผลทำให้พลังงานจลน์ของผลผลิตจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (reaction products) มีค่าสูงมากพอที่จะแปรเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสามารถแยกออกจากผลที่มาจากรังสีแกมมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มักจะใช้ในการวัดนิวตรอน เช่น



หัววัดรังสีนิวตรอนช้าแบ่งออกได้ ดังนี้

2.6.1 BF₃ proportional tube

เป็นหัววัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการตรวจวัดเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบรอนไตรฟลูออไรด์ (boron trifluoride) ทำหน้าที่เป็นทั้งธาตุเป้า (target) สำหรับเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุทุติยภูมิ (secondary charged particles) และเป็น proportional gas ไปด้วยในตัว

โดยโบรอนไตรฟลูออไรด์เป็นสารประกอบที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากความเป็น proportional gas ที่ดี และมีความเข้มข้นของโบรอนที่สูง แต่ proportional gas ของก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์จะมีประสิทธิภาพแย่ง ถ้าใช้ใน ช่วงที่ความดันมีค่าสูงมาก ดังนั้นความดันที่เหมาะสมสำหรับหัววัดชนิดนี้ จึงอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 – 1.0 atm เท่านั้น

หัววัด BF₃ proportional tube มักจะออกแบบสร้างในลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่ภายนอกเป็นตัวแคโทด (cathode) และมีแอโนด (anode) เป็นเส้นลวดขนาดเล็กอยู่ภายในแกนกลาง

2.6.2 ³He proportional counter

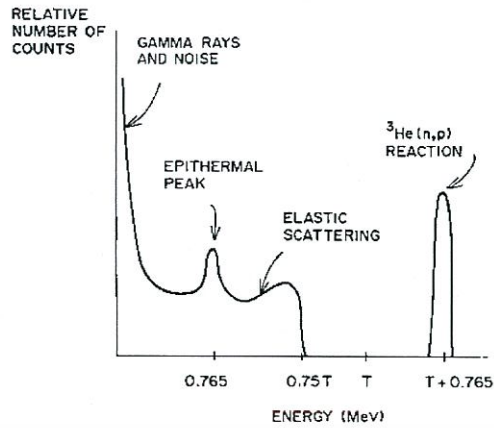
สำหรับ ³He (n, p) จะมีค่า cross section สูงกว่าของโบรอนมาก ค่า Q-value มีเพียง 0.76 MeV เท่านั้น ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้พลังงานจลน์ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (reaction products) มีค่าต่ำตามไปด้วย จึงมีปัญหาเนื่องจากการรบกวนของรังสีแกมมา ดังจะเห็นได้จากสเปกตรัมในรูปที่ 2.11

ข้อดีของ ³He counter คือสามารถทำงานได้ที่ความดันสูงมากกว่า BF₃ จึงเป็นที่นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการใช้หัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงมาก ๆ



รูปที่ 2.10 หัววัด ³He counter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกษัตริย์แห่งเมืองเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมขนาดสัญญาณไฟฟ้าของหัววัด ^3He counter [7]

2.6.3 Fission counters

อาศัยหลักการให้เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ไปเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (fission products) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดการ ionization ที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการแบบปกติ

เนื่องจากพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาแตกตัวมีค่าสูงมาก ประมาณ 200 MeV โดยที่ชิ้นส่วนฟิชชัน (fission fragments) จะได้รับพลังงานถึง 160 MeV ดังนั้นหัววัดแบบนี้จึงมีขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาสูงมากกว่าหัววัดที่ใช้ปฏิกิริยาแบบอื่น ๆ ทำให้การรบกวนจากรังสี background มีผลกระทบน้อยมาก เหมาะสำหรับการใช้ตรวจวัดนิวตรอนที่มีอัตรานับ (count rate) ที่ต่ำมาก ๆ อีกทั้งยังสามารถสร้างหัววัดให้มีขนาดเล็ก เนื่องจากชิ้นส่วนฟิชชันสูญเสียพลังงานโดยการ ionization ได้ง่ายมาก

หัววัดแบบ fission counters โดยทั่วไปนั้นมักจะนำ ionization chamber มาใช้ประกอบ โดยบรรจุแผ่นที่เคลือบด้วยสารฟิชไซล์ (fissile material) ไว้ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถทำให้สารฟิชไซล์อยู่ในรูปสารประกอบของก๊าซได้

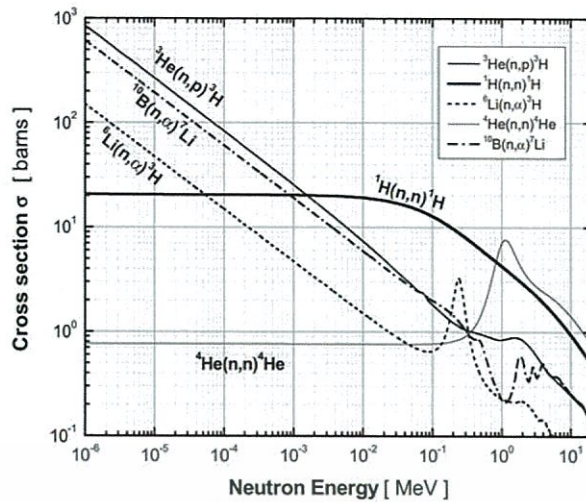


รูปที่ 2.12 หัววัดแบบ fission counters [11]

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าโดยหลักการแล้วปฏิกิริยานิวเคลียร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดนิวตรอนชิ้นนั้น สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดนิวตรอนเร็ว (fast neutrons) ได้เพียงแต่ว่าจะมีข้อด้อยคือ ค่า cross sections จะลดลงอย่างรวดเร็วตามค่าพลังงานของนิวตรอนที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็น

ได้จากรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า cross sections กับพลังงานของนิวตรอน [3]

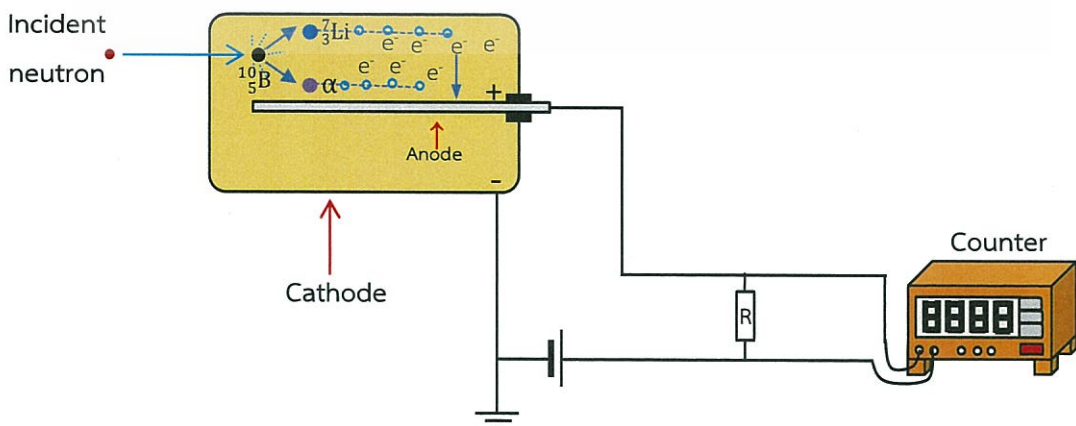
โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัววัด BF_3 proportional tube แบบธรรมดา ซึ่งจะมีค่า cross sections ที่ต่ำมาก จึงไม่สามารถนำมาใช้วัดนิวตรอนเร็วได้ ส่วนหัววัด ^3He counter นั้นมีค่า cross sections ที่ค่อนข้างสูงกว่า จึงสามารถใช้ตรวจวัดได้ทั้งนิวตรอนช้าและนิวตรอนเร็ว แม้กระนั้นก็ยังต้องมีการปรับปรุงบางประการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

2.7 หัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector) [7, 8, 9]

สำหรับการทดสอบ จะใช้หัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector) เป็นหัววัดที่ใช้วัดพลังงานและจำนวนอนุภาค ซึ่งสามารถบอกความแตกต่างระหว่างประเภทของรังสีอัลฟา กับเบตา ยังสามารถใช้กับรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ได้อีกด้วย ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.7.1 ส่วนประกอบ

หัววัดรังสีชนิดบรรจุแก๊ส (Gas-filled detector) ประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอกทำด้วยโลหะ หรือเป็นหลอดแก้วหรือหลอดพลาสติกที่มีแผ่นฟิล์มผสมโลหะฉาบไว้ภายใน ดังรูปที่ 2.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector) โปรดอย่าการคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

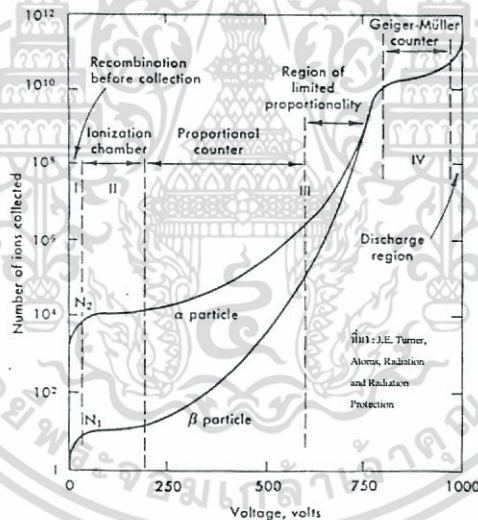
โดยที่ผนังของภาชนะทรงกระบอกนี้จะทำหน้าที่เป็นแคโทด (cathode) และส่วนตรงกลางจะเป็นเส้นลวดทำหน้าที่ เป็นแอโนด (anode) ซึ่งมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า cathode ภายในหลอดจะปิดผนึกและบรรจุก๊าซผสมที่ ประกอบด้วยก๊าซเช่น helium neon หรือ argon เป็นต้น นอกจากนี้ยังบรรจุก๊าซที่ทำหน้าที่เป็น quenching ได้แก่ bromine หรือ chlorine

2.7.2 หลักการทำงาน

เมื่อรังสีเดินทางผ่านเข้าไปชนกับโมเลกุลของก๊าซที่บรรจุในหัววัดรังสีแล้วก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระกับไอออน และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปยัง anode เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นในระหว่างทาง ซึ่งก็จะทำให้เกิดการ ionization ก๊าซที่บรรจุภายในหัววัด เกิดเป็น secondary ionizations มากมาย และกลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า (pulse) ออกจาก anode

2.7.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes

หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซจะทำงานต่างกันโดยขึ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสีกับจำนวนไอออนที่เกิดขึ้น ซึ่งขนาดของสัญญาณจะขึ้นกับชนิดของรังสี [9]

- บริเวณที่ I Recombination region

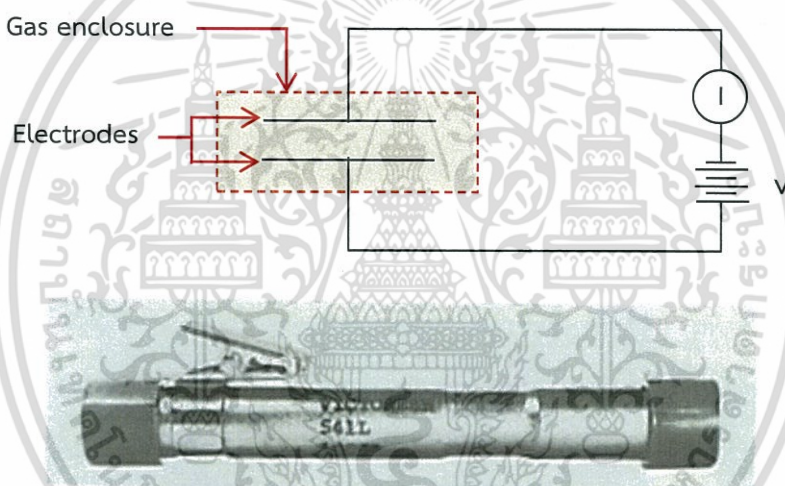
เป็นบริเวณที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าระดับต่ำให้หัววัดรังสี ดังนั้นแรงดึงดูดให้ไอออนมาที่ electrode ทั้งสองค่อนข้างต่ำ จากสถานการณ์ดังกล่าวทำให้เกิด 2 สภาวะที่แข่งกัน คือการที่คู่อิออนจะถูกดึงดูดไปที่ electrode หรือรวมตัวกัน นั่นหมายความว่าคู่อิออนที่เกิดขึ้นมีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกันภายหลังก่อนที่จะถูกจับโดย electrodes ดังนั้นบริเวณนี้จึงไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีความยากที่จะวัดปริมาณรังสีที่เข้ามาทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บริเวณที่ II Ionization region

เป็นบริเวณที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes สูงเพียงพอที่จะดึงไอออนที่เกิดขึ้นไปยัง electrodes ก่อนที่จะรวมตัวกันและไม่มีการเกิดการแตกตัวอีกครั้ง ทำให้ขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณและพลังงานของรังสี แต่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความต่างศักย์เปลี่ยนไป ดังจะเห็นได้จากกราฟในช่วงนี้จะเป็นเส้นตรง หัววัดรังสีที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงนี้ได้แก่ ionization chamber และ dose calibrator เป็นต้น

Ionization chambers เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนผ่าน จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซใน chamber ขึ้น ส่งผลให้วัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ และยังสามารถวัดกระแสไฟฟ้านี้ไปจนถึงจุดอิ่มตัว เมื่อบรรลุถึงค่าสนามไฟฟ้าที่แน่นอน ก๊าซประเภทต่าง ๆ ที่บรรจุใน chamber ขึ้นกับประเภทของรังสีที่วัด เช่น ก๊าซอาร์กอนที่มีความดันสูงใช้กับรังสีแกมมา ก๊าซไฮโดรเจนใช้กับนิวตรอนพลังงานสูง ส่วนก๊าซ BF₃ ใช้กับนิวตรอนพลังงานต่ำ ดังรูปที่ 2.16



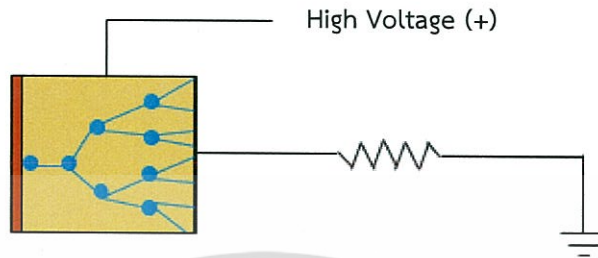
รูปที่ 2.16 หัววัดรังสีแบบ Ionization chamber แบบพกพา [9]

เนื่องจาก Ionization chamber มีปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีทำให้วัดปริมาณรังสีได้ถูกต้อง แต่ข้อเสีย คือสัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กทำให้ต้องใช้รังสีปริมาณมากที่จะวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- บริเวณที่ III Proportional region และ IV limited proportional region

เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้ electrodes สูงขึ้น จะทำให้มีพลังงานเพียงพอที่สามารถไปถึง electrodes และยังให้ไอออนซึ่งมีความเร็วเพิ่มขึ้น จากการที่เพิ่มความเร็วนี้ทำให้เกิดการแตกตัวอีกครั้งเป็น secondary ionization ทำให้ได้ไอออนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.17 ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า gas multiplication มีผลให้ได้กระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นได้ว่าจำนวนไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น การเกิด gas multiplication สามารถทำให้เกิดไอออนประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้านคู่ต่อ 1 ปฏิกริยา ซึ่งต่างจาก ionization chamber ที่ 1 ปฏิกริยาทำให้เกิดเพียง 1 คู่ไอออน ถึงแม้จะเกิดการขยายตัวได้คู่ไอออนมากมาย แต่อัตราการขยายยังเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีหรืออนุภาคที่เข้ามาทำปฏิกริยา หัววัดรังสีที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณนี้ได้แก่ proportional counter ซึ่งนิยมใช้วัดนิวตรอน



รูปที่ 2.17 การเกิด gas multiplication ในบริเวณ proportion

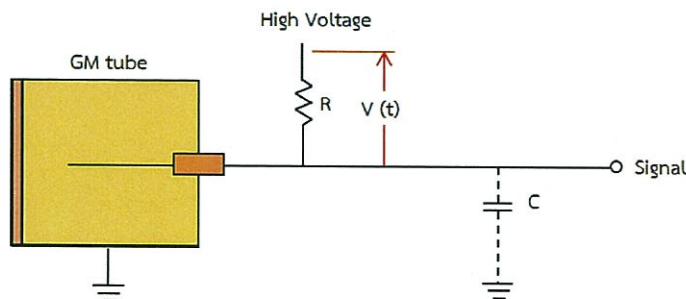


รูปที่ 2.18 หัววัดรังสีแบบ Proportional counter [10]

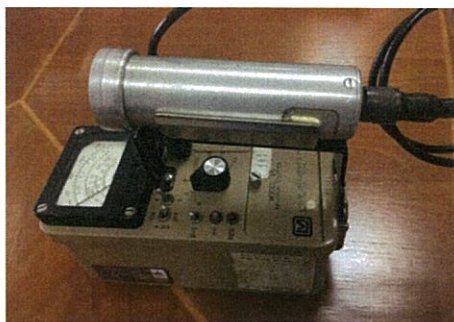
เนื่องจาก proportional counter ให้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่ทำให้ประสิทธิภาพการวัดสูง จึงเป็นเหตุให้แยกชนิดของรังสีหรืออนุภาคได้ แต่มีข้อเสีย คือหัววัดชนิดนี้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ ทำให้อัตราขยายสัญญาณเปลี่ยนแปลงด้วย จึงจำเป็นต้องควบคุมการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าในการใช้งาน

- บริเวณที่ V Geiger-Mueller (GM) region

ความต่างศักย์บริเวณนี้รังสีหรืออนุภาคเพียง 1 ตัว จะทำให้เกิดการแตกตัวของคู่ไอออนอย่างต่อเนื่องตามระยะทางที่ผ่านไป เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จากปรากฏการณ์นี้ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดคงที่และไม่ขึ้นกับพลังงานของรังสี ความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณนี้ใช้ในหัววัดรังสีชนิด survey meter และ GM counter เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.19 ส่วนประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของ Geiger-Mueller counters โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 หัววัดรังสีแบบ Geiger-Muller counters

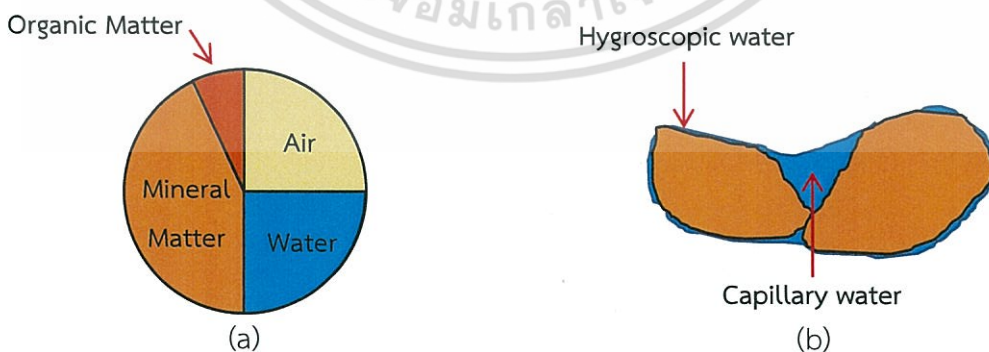
หัววัดรังสีแบบ Geiger-Mueller counters ออกแบบมาเพื่อวัดรังสีอัลฟา เบตา โดยการที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยากับผนังของหัววัด แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้น GM counter ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาต่อพ่วงเหมือนกับ ionization chamber หรือ proportional counter ดังนั้นจึงมีส่วนประกอบที่ง่ายไม่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.20 หัววัดชนิดนี้นิยมใช้วัดรังสีที่มีปริมาณน้อยเนื่องจากมีความไวในการวัดสูง แต่ไม่สามารถแยกชนิดของรังสีได้

- บริเวณที่ VI Discharge region

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes สูงมากจนทำให้เกิดก๊าซเกิดการแตกตัวแม้จะไม่มีรังสีเข้ามาทำปฏิกิริยา ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณนี้จะไม่ถูกนำไปใช้งาน

2.8 ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช [12]

โดยทั่วไปดินจะประกอบด้วยกัน 3 สถานะ คือส่วนที่เป็นของแข็งหรือเนื้อดินซึ่งประกอบด้วย แร่ (mineral matter) และสารอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ส่วนที่เป็นของเหลวประกอบด้วยน้ำ (water) ส่วนที่เป็นก๊าซประกอบด้วยอากาศ (air) และไอน้ำ (water vapor) ตามรูปที่ 2.21(a)



รูปที่ 2.21 (a) Three-Phase System of Soil Structure

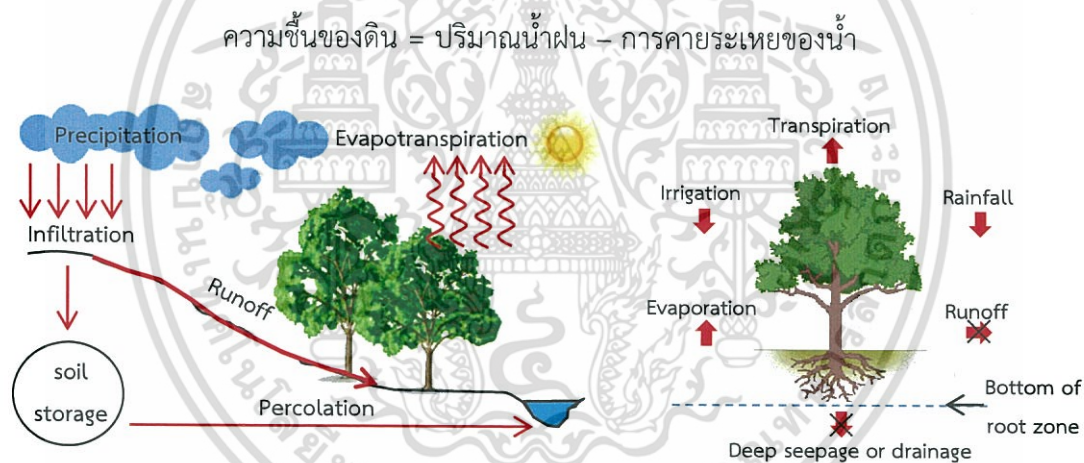
(b) ปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินดูดยึดไว้

ดังนั้นส่วนที่เป็นของเหลวหรือน้ำในดินจะเป็นความชื้นในดิน คือปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินยึดไว้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้น้ำที่แทรกซึมลงในดินยังคงค้างอยู่ตามช่องของเนื้อดิน (capillary water) หรือเคลือบเป็นฟิล์มรอบอนุภาคดิน (hygroscopic water) ตามรูปที่ 2.21(b) ถ้าในส่วนของช่องว่างในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็ม ไม่มีอากาศอยู่เลยเรียกว่า ดินที่อึดตัวด้วยน้ำ ถ้าในช่องว่างของดินมีทั้งน้ำและอากาศอยู่ด้วยเรียกว่า ดินที่ไม่อึดตัว

2.8.1 สมดุลของน้ำในดิน

เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของพืชและสัตว์ เพื่อใช้ในขบวนการเมแทบอลิซึม เช่น ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและจุลินทรีย์ในดินบางชนิด ในรูปที่ 2.22 จะแสดงถึงสมดุลของน้ำในดิน โดยน้ำไหลเข้าคือน้ำฝนที่ตกลงมา หรือน้ำที่ได้จากการชลประทาน ส่วนน้ำไหลออกประกอบด้วย น้ำที่ระเหยออกจากหน้าดินโดยขบวนการคายระเหย (evapotranspiration) น้ำไหลบ่าหน้าดิน (runoff) และน้ำซึมลงไปในดิน ซึ่งประกอบด้วยน้ำที่เก็บกักไว้ในดิน (soil storage) หรือความชื้นในดิน และน้ำซึมลึก (drainage water or percolation) ในทางการเกษตรจะตัดน้ำไหลบ่าหน้าดิน และน้ำซึมลึกออก และจะพิจารณาระดับน้ำในดินที่ไม่เกินความลึกของรากพืช ดังนั้น



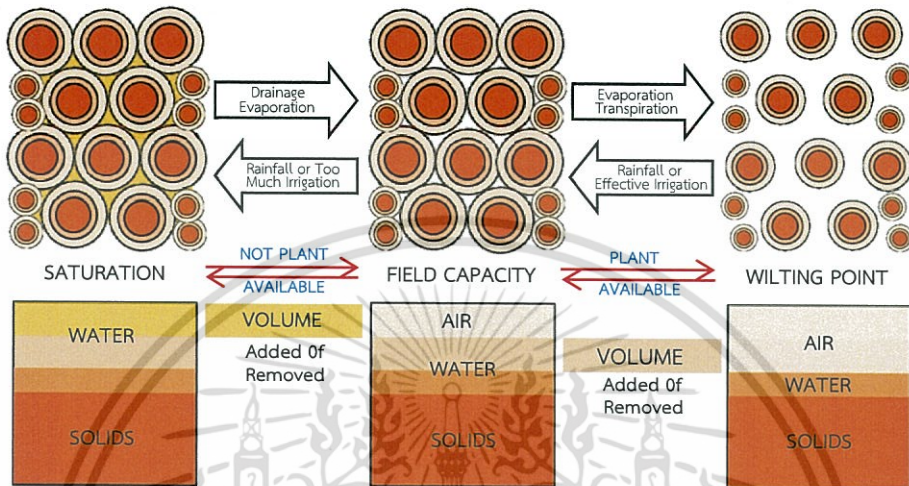
รูปที่ 2.22 สมดุลของน้ำในดิน (Soil Water Balance)

2.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นในดิน และน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

หลังจากฝนตก ดินจะมีระดับความชื้นเท่ากับจุดอึดตัว (saturation) เป็นระดับที่เนื้อดินเต็มไปด้วยน้ำ ที่ระดับนี้เนื้อดินจะไม่ยึดเกาะน้ำ จึงเป็นการง่ายที่จะนำน้ำออกจากอนุภาคดิน โดยการระเหยจากหน้าดิน ซึ่งจะซึมลึกไปในดินชั้นล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก พืชจึงใช้ประโยชน์จากน้ำในดินประเภทนี้ได้น้อยมาก และน้ำที่ระดับนี้จะซึมลึกไปชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะหยุดซึมลึก ขณะนั้นระดับความลึกในดินค่อนข้างคงที่ เรียกว่า ความจุภาคสนาม (field capacity) ที่ระดับนี้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย โดยน้ำจะไหลไปมาช้า ๆ ในดิน เปรียบเสมือนน้ำที่อยู่นิ่ง ซึ่งจะถูกรากพืชดูดไปใช้และคายน้ำออกทางใบ (transpiration) นอกจากนี้ยังระเหยออกจากผิวหน้าดินได้โดยตรง (evaporation) หลังจากนั้นระดับความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point) เมื่อถึงจุดนี้พืชจะไม่สามารถดูดน้ำจากดินได้ และเนื้อดินจะแห้งแข็ง ทำให้พืชตาย

wilting point) ซึ่งรากพืชจะดูดน้ำจากดินไม่ได้อีก พืชจะแสดงอาการเหี่ยวถาวรหากไม่ได้เติมน้ำจากระบบชลประทานหรือมีฝนตกลงมา ดังนั้นความชื้นในดินที่มีประโยชน์ต่อพืช (Available water) จะอยู่ในช่วงระหว่างความชื้นระดับความจุสนามและจุดเหี่ยวถาวร

ความชื้นในดินที่มีประโยชน์ต่อพืช = ความชื้นที่ความจุสนาม - ความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวร



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นในดิน และน้ำที่เป็นประโยชน์

ความชื้นในดินที่มีประโยชน์ต่อพืชจะมากขึ้นหรือน้อยขึ้นอยู่กับเนื้อดินเป็นหลัก พบว่าความชื้นในดินที่มีประโยชน์ต่อพืชของดินเหนียวที่เป็นดินเนื้อละเอียดจะมีช่วงกว้างกว่าดินร่วนและดินทราย ถ้าเนื้อดินเป็นดินทรายการให้น้ำต้องบ่อยครั้งมากกว่าดินร่วนและดินเหนียว

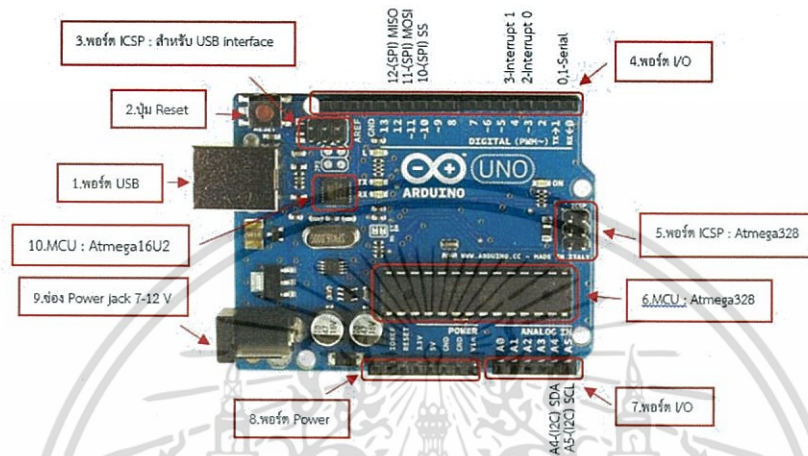
ความชื้นในดินช่วยบอกหน้าที่ของดินที่อยู่ในบริเวณระบบนิเวศนั้น ตัวอย่างเช่น แสดงถึงความสามารถในการอุ้มน้ำหรือไหลผ่านของน้ำในดินที่เกิดจากการไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของน้ำที่ผิวดิน การคายน้ำและระเหยของน้ำออกสู่บรรยากาศ และยังใช้อธิบายความสามารถของดินในการให้ธาตุอาหารและน้ำสู่พืชซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของพืช อีกทั้งจากปัญหาภาวะโลกร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิในอากาศเพิ่มสูงขึ้นทำให้ดินสูญเสียความชื้นซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาดินเค็ม ดินกรวด ดินลูกรัง และการขยายตัวของพื้นที่แห้งแล้งนั้นมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น การศึกษาความชื้นที่อยู่ในดินอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้สามารถติดตามผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรดินในท้องถิ่นได้

2.9 Arduino [14]

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ทั้งนี้ยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเปรียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย



รูปที่ 2.24 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3) [14]

1. USBPort: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/OPort: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin 0, 1 เป็นขา Tx, Rx Serial, Pin 3, 5, 6, 9, 10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/OPort: นอกจากเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0 - A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

ข้อดีของบอร์ด Arduino คือ ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน ราคาไม่แพง และ Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การทดสอบความชื้นในดินบริเวณกว้างโดยใช้นิวตรอน (Field measurement of soil moisture using neutron probes) [15]

การวัดความชื้นควรศึกษาตั้งแต่ ดิน พืช และน้ำ ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์กัน ความน่าเชื่อถือของเทคนิคเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการวัด หัววัดนิวตรอนมีการพัฒนามากกว่า 40 ปีแล้ว และยังมี การพัฒนาต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน พวกเค้าได้เสนอประโยชน์มากมายเกี่ยวกับเทคนิคการวัดนี้ ซึ่งมัน สำคัญมากในเรื่องของการวัดซ้ำ ๆ แล้วไม่ทำลายตัวอย่างดิน งานวิจัยนี้จะเน้นอยู่สองเรื่องหลัก ๆ คือ การวัดใกล้ผิวหน้าของดิน และรูปร่างของความชื้นที่ไม่ต่อเนื่องในดิน มีเทคนิคมากมายที่คิดขึ้นมาใหม่ เพื่อที่จะทำข้อจำกัดแรกให้สำเร็จ และค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีส่วนเกี่ยวข้องตามมาในข้อที่สอง แต่ก็สามารถยอมรับได้จากหัววัดที่ใช้ นำทิ้งในตัวเลขของบทความ หนังสือตามหลักวิทยาศาสตร์ ได้ บรรยายว่า หัววัดนิวตรอนในระหว่าง 10 ปีที่ผ่านมา ดูเหมือนว่าจะจะเป็นสัญญาณบ่งบอกถึงเทคนิคนี้ ได้โตเต็มที่แล้ว และก็กลายมาเป็นที่ยอมรับ เชื่อถือได้ในการทดสอบความชื้นในดินบริเวณกว้างโดยใช้ นิวตรอน

2.10.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการวัดค่าความชื้นจากหัววัดนิวตรอน (Numerical Analysis of Neutron Moisture Probe Measurements) [16]

มีการพิสูจน์มาแล้วว่าหัววัดนิวตรอนมีประสิทธิภาพระยะยาวกับการตรวจสอบความชื้น ของดินในรูปแบบต่าง ๆ แม้ว่าความสัมพันธ์ของข้อมูลหัววัดนิวตรอน (เช่น จำนวนนับนิวตรอน) กับ ความชื้น จะให้ค่าที่ถูกต้องนั้น เป็นเรื่องที่ยากพอสมควร โดยเฉพาะสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัว ในเอกสารนี้ จะศึกษาการวิเคราะห์รูปแบบพื้นฐานเชิงตัวเลข เกี่ยวกับทฤษฎีการแพร่กระจายของนิวตรอน ที่ถูกใช้ ในการทำนายความหนาแน่นของนิวตรอนในระบบหัววัดนิวตรอน แบบจำลองสเปกตรัมของพลังงาน นิวตรอนแบ่งออกเป็น 7 ช่วง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายขึ้นอยู่กับพลังงานและพารามิเตอร์ สำหรับแต่ละช่วงของพลังงาน วิธีข้อจำกัดของธาตุสามารถแก้สมการการแพร่กระจายของนิวตรอน 7 กลุ่มได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณเปรียบเทียบได้ดีกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและการ วัดภาคสนาม วิธีการเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการสอบเทียบหัววัดนิวตรอนที่อธิบายไว้ในเอกสารฉบับนี้ช่วย ประหยัดเวลาในการทดสอบและประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีการสอบเทียบแบบดั้งเดิม และอาจมีรูปแบบการทำงานสำหรับตรวจสอบด้วยหัววัดนิวตรอนแบบใหม่

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานในการทดลองวัดความชื้นด้วยรังสีนิวตรอน สามารถศึกษาการออกแบบระบบของหัววัดรังสี และออกแบบระบบวัดรังสี ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบภาชนะสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน

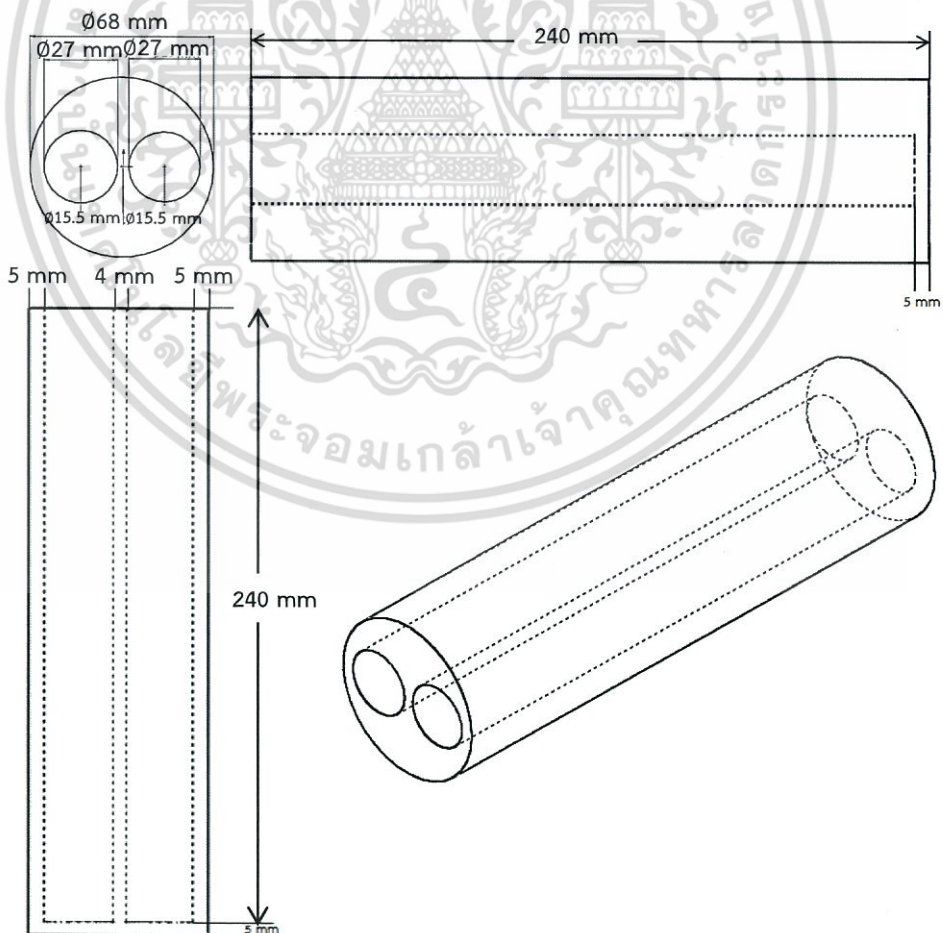
ขั้นตอนที่ 2 การจัดทำระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน

ขั้นตอนที่ 3 การจัดเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบระบบวัดเบื้องต้น

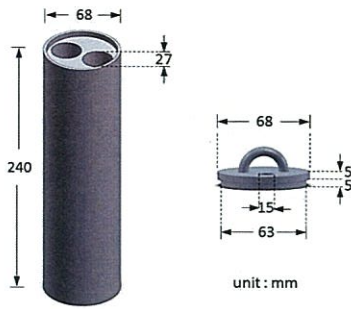
3.1 การออกแบบโพรบสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน

ในการออกแบบภาชนะสำหรับใส่หัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน จะใช้วัสดุเป็นพอลิเอธิลีน เนื่องจากพอลิเอธิลีนเป็นสารประกอบที่มีไฮโดรเจน ซึ่งมีมวลใกล้เคียงกับนิวตรอน ดังนั้นจึงสามารถลดพลังงานของรังสีนิวตรอนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.1 การออกแบบภาชนะสำหรับใส่หัววัดและ แหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยเว็บไซต์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



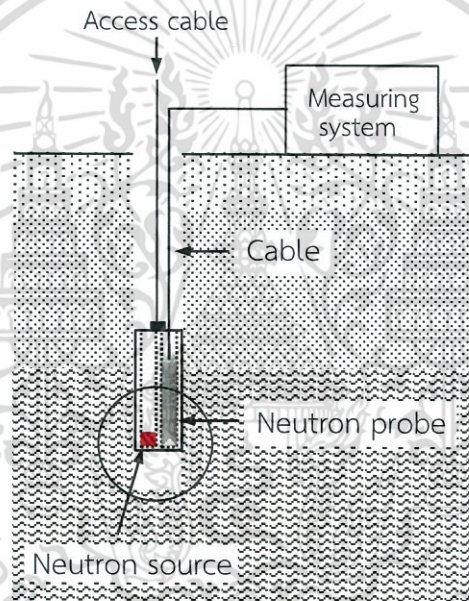
(a) แบบจำลอง



(b) ภาพจริง

รูปที่ 3.2 โพรบที่ใช้ในการทดสอบ

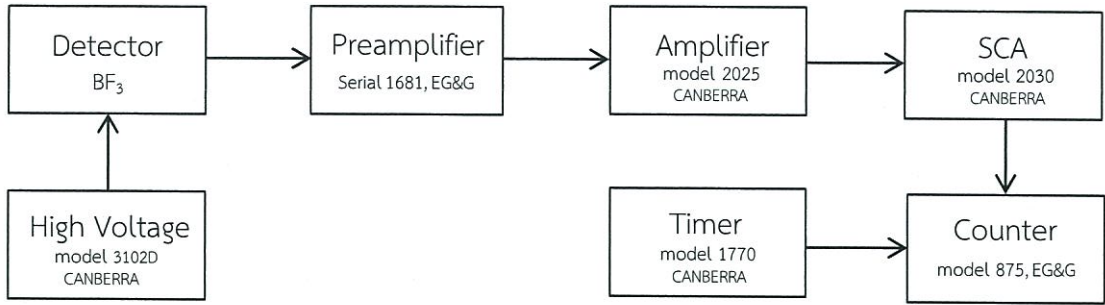
3.2 จัดทำระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน



รูปที่ 3.3 ระบบวัดความชื้นของดินด้วยนิวตรอน

อุปกรณ์วัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนประกอบด้วยหัววัดนิวตรอน (neutron probe) และระบบนับวัด (measuring system) ในขณะทำการทดสอบจะต้องขุดหลุม ซึ่งหลุมมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ลึก 1 เมตรดังรูปที่ 3.3 สำหรับหย่อนโพรบพอลิเอธิลีนลงไป在地 โดยที่โพรบพอลิเอธิลีนประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอนความเร็วสูง ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสี และมีหัววัดนิวตรอนความเร็วต่ำ รวมทั้งสายเคเบิลนำสัญญาณ (cable) ต่อจากหัววัดไปยังระบบนับวัด ในการทดสอบที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะมีการทำเครื่องหมายไว้บนสายเคเบิล (access cable) เมื่อหย่อนหัววัดลงถึงระดับความลึกที่กำหนดไว้ก็เริ่มทำการวัดได้

ในขณะที่หัววัดนิวตรอนอยู่ในดิน นิวตรอนความเร็วสูงจะถูกแพร่ผ่านเข้าไปในดินตลอดเวลา และเกิดการชนกับอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำหลายครั้งจนกลายเป็นนิวตรอนความเร็วต่ำ เอกส ส่วนหนึ่งของนิวตรอนความเร็วต่ำจะกระเจิงกลับเข้าสู่หัววัด ทำให้เกิดเป็นพัลส์สัญญาณไฟฟ้าขึ้น การคำนวณความชื้นของดินทำได้โดยการวัดจำนวนพัลส์สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น การคำนวณความชื้นของดินทำได้โดยการวัดจำนวนพัลส์สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น การคำนวณความชื้นของดินทำได้โดยการวัดจำนวนพัลส์สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัดความชื้น

3.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์วัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน

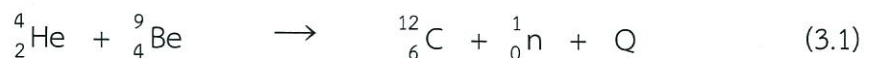
3.3.1 Gas Filled detector

หัววัดที่ใช้ในการทดสอบ คือ หัววัด BF₃ proportional counter ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งมีรหัสเป็น A 8098 ความดันอยู่ที่ 70 cmHg และป้อนโวลต์สูงสุดได้ไม่เกิน 2200 V หัววัดชนิดนี้เหมาะสำหรับการวัดนิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์มัลนิวตรอน ให้สัญญาณขนาดใหญ่ทำให้มีประสิทธิภาพในการวัดสูง แต่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ จึงต้องควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าในการใช้งาน หัววัดนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่ภายนอกเป็นตัว cathode และภายในแกนกลางมีเส้นลวดขนาดเล็กที่เป็น anode อยู่

รูปที่ 3.5 หัววัด BF₃ proportional counter

3.3.2 Neutron source

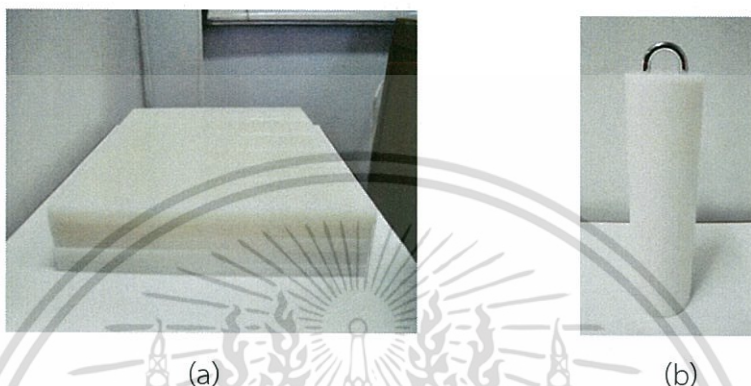
ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการทดสอบ คือ ²⁴¹Am-Be มีความแรงแรังสี 300 mCi ไอโซโทปกัมมันตรังสี ²⁴¹Am จะสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา ซึ่งอนุภาคนี้จะไปทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับ ⁹Be ทำให้เกิดคาร์บอน และรังสีนิวตรอนพลังงานต่าง ๆ ออกมา ดังสมการ

รูปที่ 3.6 ต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹Am-Be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 พอลิเอธิลีน(Polyethylene, PE)

ในการทดสอบ 4.1 จำเป็นต้องใช้แผ่นพอลิเอธิลีนมาช่วยลดพลังงานของรังสีนิวตรอน ซึ่งในการทดสอบนี้ จะใช้แผ่นพอลิเอธิลีนอยู่ 5 แผ่น ขนาดกว้าง 32 เซนติเมตร ยาว 32 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.7 (a) ในการทดสอบ 4.2 จะออกแบบเป็นภาชนะสำหรับใส่หัววัดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน เพื่อที่จะวัดลงไปในดิน เป็นการช่วยลดพลังงานของรังสีนิวตรอนและป้องกันการเปราะเปื้อนของหัววัดกับต้นกำเนิดรังสี ดังรูปที่ 3.7 (b)



รูปที่ 3.7 (a) แผ่นพอลิเอธิลีน

(b) ภาชนะสำหรับใส่หัววัดกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน

3.3.4. Preamplifier (serial number 1681, rev.15, EG&G company)

- Preamplifier ทำหน้าที่รวบรวมประจุจากหัววัด



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูปที่ 3.8 Preamplifier

3.3.5 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (NIM, High Voltage, Amplifier, SCA, Counter, Timer)

- Nuclear Instrumentation Module, NIM (model 1000, serial number 03936930, CANBERRA Industries, 220 volts)

- High Voltage (model 3102D, serial number 08940356, CANBERRA Industries)

ใช้ H.V. อยู่ที่ 1500 V ซึ่งเป็นค่าที่ได้จาก Plateau curve ในการทดสอบที่ 4.1
 เอกสารที่เขียนขึ้นนี้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับนิวเคลียร์ โดยผู้เขียนได้ศึกษาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Amplifire (model 2025, serial number 08940192, CANBERRA Industries) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะตั้งเครื่องให้ coarse gain เท่ากับ 200
- SCA (model 2030, serial number 12036694, CANBERRA Industries) ทำหน้าที่เลือกช่วงพลังงาน แคพลังงานเดียว
- Counter (model 875, serial number 167, rev.02, EG&G company) เป็นตัวนับสัญญาณรังสีนิวตรอนที่เข้ามาสู่หัววัด และมี discriminator เอาไว้ตัดสัญญาณรบกวน
- Timer (model 1770, serial number 127422, CANBERRA Industries) เป็นตัวจับเวลาในการวัดแต่ละครั้ง



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

3.3.6 เครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า (Agilent Technologies model DSO5052A Oscilloscope , MEGA ZOOM) ทำหน้าที่วัดสัญญาณไฟฟ้า ตรวจสอบค่าอุปกรณ์



รูปที่ 3.10 เครื่องออสซิลอโคป

3.3.7 เครื่องวัดความแรงรังสี

- เครื่องวัดความแรงรังสีแกมมา (model radiagem2000, serial number 4012, CANBERRA Industries) ใช้สำหรับวัดความแรงของรังสีแกมมาบริเวณที่ทำการทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความแรงรังสีแกมมา

- เครื่องวัดความแรงรังสีนิวตรอน (Model 2241-4, Serial number 310923, Ludlum measurements, INC)



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความแรงรังสีนิวตรอน

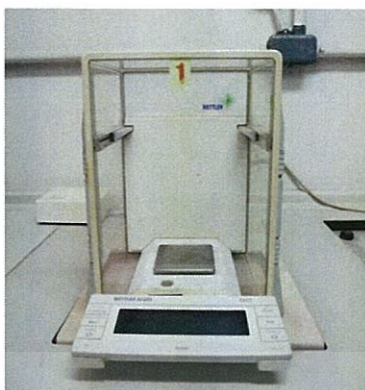
3.3.8 ตู้อบ (Heraeus D-6450 Hanau, Type : T 6030, Bestell-Nr : 51000547, Fabrik-Nr : 92101398, Nenntemp : 300°C) ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้



รูปที่ 3.13 ตู้อบความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 เครื่องชั่ง (METTLER AT201, MAX 205g, d=0.01mg) สำหรับชั่งกระป๋อง และดิน



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่ง

3.3.10 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)

ใช้สำหรับวัดขนาดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดสอบ



รูปที่ 3.15 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers)

3.3.11 ท่อโลหะและท่ออลูมิเนียม

ใช้สำหรับนำร่องดิน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ยาว 130 กับ 170 เซนติเมตร



รูปที่ 3.16 ท่ออลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.12 ถุงซิปป

ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดิน ไม่ให้ความชื้นระเหยออก เพื่อที่จะนำมาทำการทดสอบ



รูปที่ 3.17 ถุงซิปป

3.3.13 ครอบใส่ดิน

ใช้สำหรับเป็นภาชนะใส่ดิน ขนาด 9 ออนซ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร เพื่อทำการอบในตู้อบความชื้น



รูปที่ 3.18 ครอบใส่ดิน

3.3.14 ถาดและช้อนตักดิน



รูปที่ 3.19 ถาดและช้อนตักดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.15 X-ray fluorescence : XRF (SERIAL NO. 543125, MODEL DPO-2000, DATE of MFG : Aug 2016, INNOV-X, OLYMPUS) ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.20 X-ray fluorescence

3.4 ขั้นตอนการทดสอบระบบวัดเบื้องต้น

3.4.1 การสร้าง Plateau curve เพื่อทดสอบหา Operating voltage ที่เหมาะสมของหัววัด

ทำการต่อระบบวัด เพิ่มค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 400 V จนถึง 2200 V บันทึกค่าอัตราการนับนิวตรอนที่ปรากฏบน counter พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V) กับอัตราการนับนิวตรอน (cpm) จะได้เป็น Plateau Curve ขึ้นมา คำนวณช่วงที่ 30% ก็จะทำให้ได้ voltage ที่เหมาะสมกับหัววัดที่ใช้ในการทดสอบนี้

3.4.2 ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด

ทำการต่อระบบวัด รอบนี้จะใช้แหล่งกำเนิดรังสีเป็น Co-60 สังเกตสัญญาณไฟฟ้าหรือรังสีแกมมาได้จากหน้าจอของออสซิลอโคป ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่ารังสีแกมมามีผลตอบสนองต่อหัววัดที่ใช้ในการทดสอบมากน้อยเพียงใด

3.5 การทดสอบในภาคสนาม

3.5.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดินที่ระยะลึกต่าง ๆ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดิน โดยการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะทุก ๆ 5 เซนติเมตรจากผิวดิน จนถึง 100 เซนติเมตร นำตัวอย่างดินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้ทราบปริมาณความชื้นซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคการวัดปริมาณความชื้นทางตรง วัดจำนวนรังสีนิวตรอนโดยการหย่อนโพรบพอลิเอธิลิน ซึ่งบรรจุหัววัดและแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน ใช้เวลาวัดระยะละ 30 วินาที และบันทึกผลการทดลองสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดินที่ระยะลึกต่าง ๆ จะได้เป็นสมการเส้นตรง $y = mx + c$

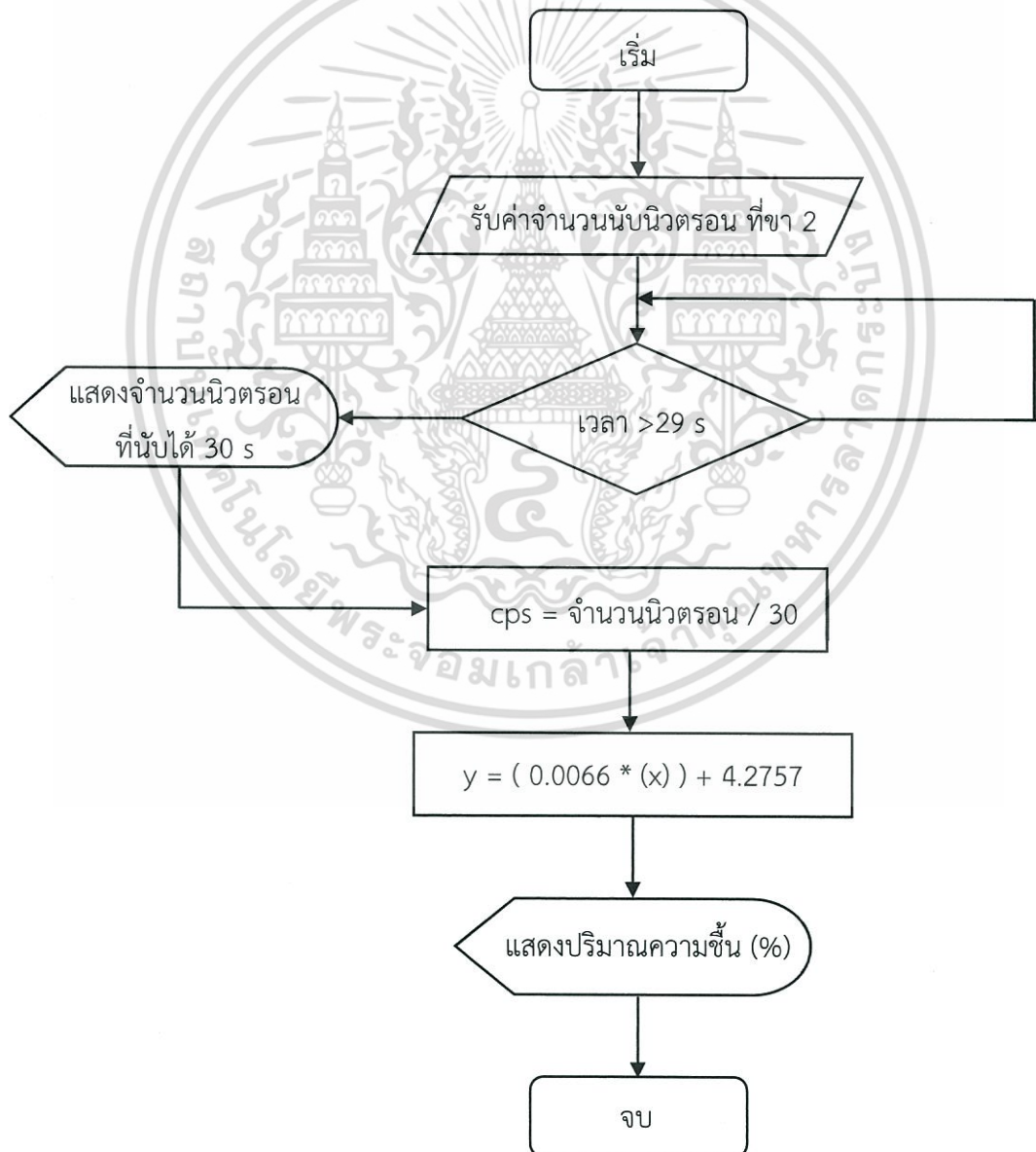
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ศึกษาองค์ประกอบธาตุในดินที่มีผลต่อการลดพลังงานของนิวตรอนโดยใช้ X-ray fluorescence : XRF และมีธาตุตัวใดที่สามารถบ่งบอกถึงการแยกของดินแต่ละชั้น

3.6 การจัดทำอุปกรณ์สำหรับนับวัดรังสี และแสดงผลโดยใช้โปรแกรม

3.6.1 พัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้นับวัดรังสีนิวตรอน และแสดงผลค่าความชื้น

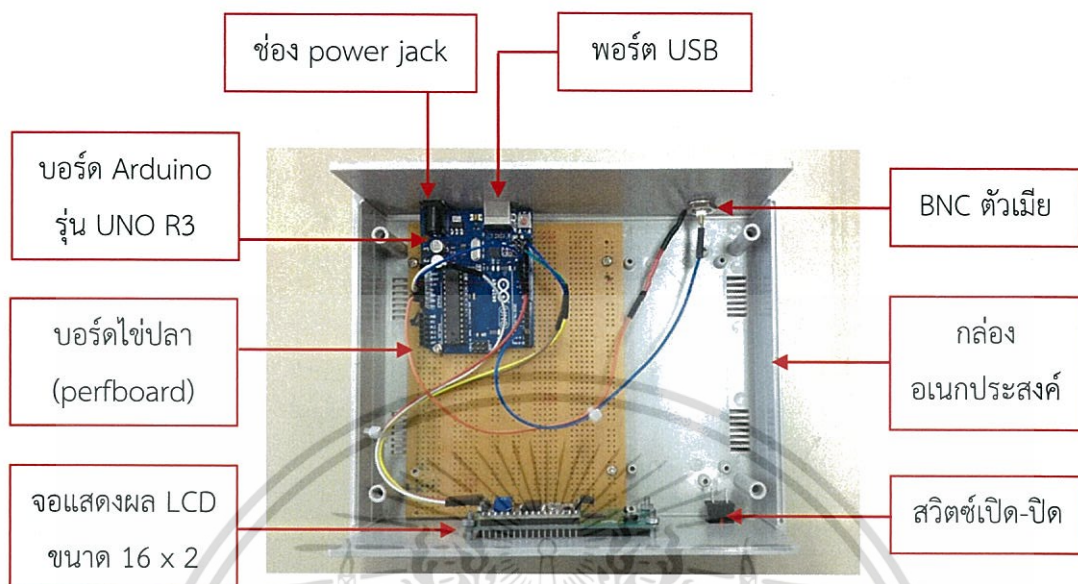
ในการเขียนโปรแกรมประมวลผลจะใช้โปรแกรม Arduino 1.8.1 เขียนคำสั่งให้ขา 2 รับค่าจำนวนนิวตรอนจากสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว (single channel analyzer : sca) ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำจำนวนนิวตรอนที่นับได้ให้เป็นหน่วย cps ส่งค่าเข้าสู่สมการที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดินที่ระยะลึกต่าง ๆ จากนั้นส่งค่าที่ทำการประมวลผลแล้วไปแสดงค่าที่จอ LCD จะได้เป็นปริมาณความชื้นออกมาทันที



รูปที่ 3.21 แผนผังการทำงานของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์อื่นใดในขณะนี้ เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 จัดทำกล่องสำหรับบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

- ภายในของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)



รูปที่ 3.22 Neutron moisture model 2017 (NMM)

- ภายนอกของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)



(a) ด้านหน้า

(b) ด้านหลัง

รูปที่ 3.23 (a) ด้านหน้าของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)

(b) ด้านหลังของเครื่อง Neutron moisture model 2017 (NMM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบวัดความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน ต้องสร้าง Plateau curve เพื่อทดสอบหา Operating voltage ที่เหมาะสมของหัววัด ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด ทดสอบการออกแบบระบบวัดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และศึกษาองค์ประกอบของธาตุในดินที่ระยะความลึกต่าง ๆ โดยการใช้นิเทศของ X-ray fluorescence ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การสร้าง Plateau curve เพื่อทดสอบหา Operating voltage ที่เหมาะสมของหัววัด

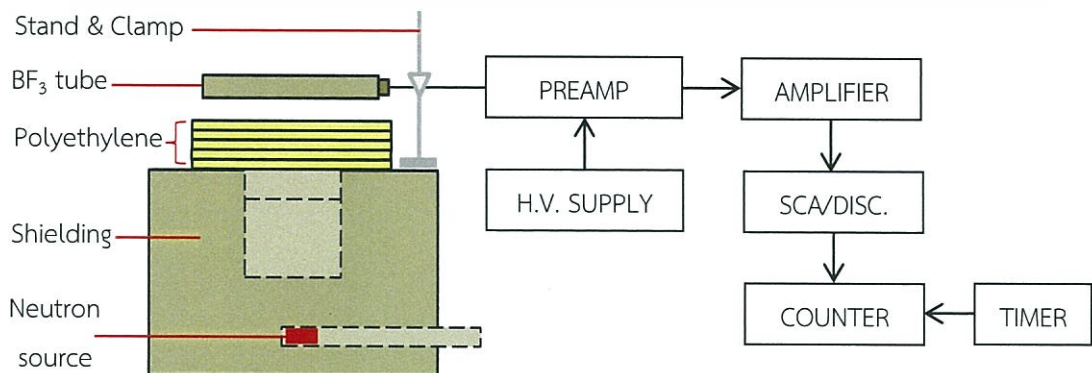
เนื่องจากแก๊สที่อยู่ภายในหัววัดจะมีการเสื่อมคุณภาพไปตามกาลเวลา ถ้าจ่าย voltage ให้กับหัววัดมากเกินไป ก็อาจทำให้อายุการใช้งานของหัววัดสั้นลง ถ้าจ่าย voltage น้อยเกินไปก็อาจจะส่งผลกับค่าของการทดสอบขั้นต่อ ๆ ไปได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหา voltage ที่เหมาะสมของหัววัด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

วัสดุอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิด $^{241}\text{Am-Be}$ ขนาดความแรงรังสี 300 mCi
2. หัววัด BF_3 proportional counter
3. วัสดุกำบังรังสีนิวตรอน
4. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Preamp, Amplifier, SCA/DISC, Counter, Timer, H.V. supply และ Nuclear Instrumentation module : NIM)
5. พอลิเอธิลีน ขนาดกว้าง 32 cm ยาว 32 cm สูง 1 cm จำนวน 5 แผ่น
6. ชุดขาตั้งและแคลมป์จับ

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 4.1 ระบบวัดความชื้น นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เริ่มทำการเพิ่มโวลต์เริ่มจาก 400 V เพิ่มขึ้นทีละ 100 V จนถึง 2200 V และวัดรังสีนิวตรอน โดยวัด 5 ครั้ง ครั้งละ 60 วินาที

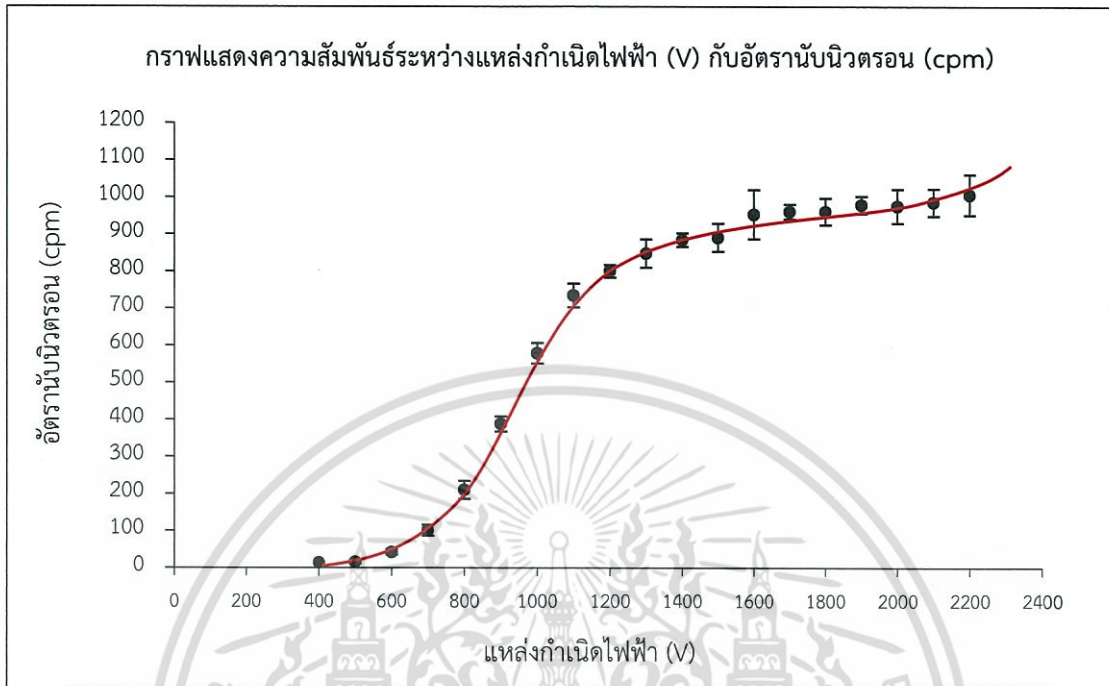
ตารางที่ 4.1 ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า(V) กับอัตราการนับนิวตรอน(cpm)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V)	อัตราการนับนิวตรอน (cpm)					เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
400	17	11	17	12	11	13.60
500	20	11	16	19	13	15.80
600	46	45	38	51	33	42.60
700	86	87	106	120	108	101.40
800	229	193	180	212	238	210.40
900	386	379	389	366	421	388.20
1000	562	560	625	583	565	579.00
1100	770	700	758	744	703	735.00
1200	828	795	786	803	789	800.20
1300	849	821	903	806	863	848.40
1400	900	879	877	861	906	884.60
1500	878	861	905	861	950	891.00
1600	1023	861	1011	944	926	953.00
1700	954	950	996	953	950	960.60
1800	911	942	1005	978	969	961.00
1900	975	995	1008	948	968	978.80
2000	1022	939	977	1019	921	975.60
2100	956	953	1044	995	980	985.60
2200	993	975	975	1104	984	1006.20

Amplifier ; coarse gain = 200 , shaping time = 1µsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำข้อมูลที่ได้จากตาราง 4.1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V) กับอัตราการนับนิวตรอน (cpm) จะได้เป็น Plateau Curve ขึ้นมา



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (V) กับอัตราการนับนิวตรอน (cpm)

4. คำนวณหาค่า Operating voltage ที่เหมาะสมของหัววัด

จากกราฟจะได้ว่า ; Lower Knee = 1200 V และ Upper Knee = 2100 V

วิธีการคำนวณ

$$\text{Lower Knee} - \text{Upper Knee} = 2100 - 1200 = 900$$

$$\text{กรณีที่ 1} \quad 900 \times \frac{25}{100} = 225 \text{ V} ; \quad 1200 + 225 = 1425 \text{ V}$$

$$\text{กรณีที่ 2} \quad 900 \times \frac{30}{100} = 270 \text{ V} ; \quad 1200 + 270 = 1470 \text{ V}$$

ดังนั้น 25% จะต้องใช้ High voltage อยู่ที่ 1425 V และ 30% จะต้องใช้ High voltage อยู่ที่ 1470 V ซึ่งการทดสอบในขั้นตอนต่อ ๆ ไปจะเลือกใช้ High voltage อยู่ที่ 1500 V เนื่องจากอุปกรณ์ High Volt ที่ใช้ในการทดสอบนี้ไม่สามารถปรับละเอียดได้เท่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด

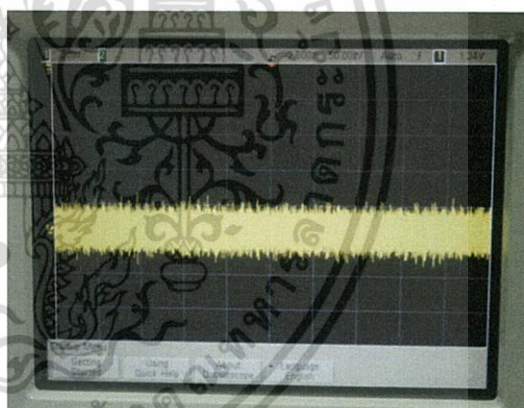
เนื่องจากเมื่อมีรังสีแกมมาเข้าสู่หัววัด ก็สามารถที่จะตรวจสอบสัญญาณได้จากออสซิลโลสโคป ถ้ารังสีแกมมามีจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ Counterก็จะนับทั้งรังสีแกมมารวมไปกับนิวตรอนได้ ในการทดสอบความชื้นในดินนี้ต้องการนับแค่นิวตรอน จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัดว่ามีมากน้อยเพียงใด จะได้ทำการปรับตั้งสัญญาณที่ SCA เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

วัสดุอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Co-60
2. หัววัด BF₃ proportional counter (A 8098)
3. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Preamp, Amplifier, SCA/DISC, Counter, Timer, H.V. supply และ Nuclear Instrumentation Module : NIM)
4. เครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope model DSO5052A, MEGA ZOOM)
5. เครื่องวัดความแรงรังสีแกมมา (Radiagem model 2000, CANBERRA)



รูปที่ 4.3 ทดสอบการตอบสนองของรังสีแกมมาต่อหัววัด BF₃ proportional counter



รูปที่ 4.4 สัญญาณไฟฟ้าที่ปรากฏบนหน้าจอเครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าไม่มีสัญญาณรูปเพาส์ของรังสีแกมมาปรากฏขึ้นมาที่หน้าจอเครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหัววัด BF₃ proportional counter ที่ใช้ในการทดสอบนี้ไม่ตอบสนองต่อรังสีแกมมาหรือตอบสนองต่อรังสีแกมมาน้อยมากนั่นเอง

4.3 ทดสอบการออกแบบระบบวัดความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน

4.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดิน

ในการทดสอบนี้จะดูความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับจำนวนนับนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ ความชื้นที่นำมาเทียบกับจำนวนนับนิวตรอนจะใช้วิธีการอบ ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างแม่นยำมากในการหาความชื้น หลังจากนั้นทำเป็นกราฟสอบเทียบขึ้นเพื่อที่จะสามารถหาความชื้นที่ไม่ทราบได้จากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ นั้นเอง

วัสดุอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิด $^{241}\text{Am-Be}$ ขนาดความแรงรังสี 300 mCi
2. หัววัด BF3 proportional counter
3. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Preamp, Amplifier, SCA/DISC, Counter, Timer, H.V. supply และ Nuclear Instrumentation module : NIM)
4. เครื่องตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope model DSO5052A, MEGA ZOOM)
5. เครื่องวัดความแรงรังสี (Radiagem model 2000, CANBERRA)
6. พอลิเอธิลีน สำหรับใส่หัววัดและต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน
7. ชุดขาตั้งและแคลมป์จับ
8. ถุงซิป สำหรับเก็บตัวอย่างดิน, กระจุก, อุปกรณ์ตักดิน
9. ตู้อบความชื้น
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก
11. ท่อเหล็กสั้นและยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 130 เซนติเมตร กับ 170 เซนติเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

1. เลือกพื้นที่ทำการทดสอบ และต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้พร้อม



รูปที่ 4.5 พื้นที่ทำการทดสอบบริเวณรอบรั้ว
สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ



รูปที่ 4.6 การจัดวางอุปกรณ์วัดความชื้น
ของดินด้วยรังสีนิวตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ท่อกดดิน ให้เป็นรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ลึก 1 เมตร และทำการเก็บตัวอย่างดินตั้งแต่ระยะ 5,10,15,20,...,100 เซนติเมตร ลงในถุงซิปรีดอากาศออกให้หมด



รูปที่ 4.7 หลุมมีขนาดความลึก 100 cm



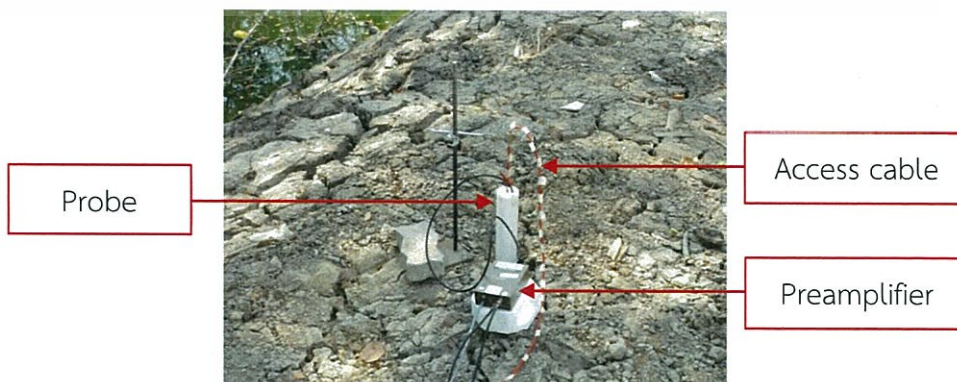
รูปที่ 4.8 เก็บตัวอย่างดินใส่ถุงซิปรีด

3. เปิดเครื่อง ตั้งค่าอุปกรณ์ก่อนทำการทดสอบวัดนิวตรอน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การตั้งค่าอุปกรณ์การวัดจำนวนนิวตรอน

data	Setting
High Voltage	1500 V
Amplifire, coarse gain	200
SCA, lower level	200
Timer	30 s

4. ทำการหย่อนหัววัด BF₃ proportional counter ลงไปในหลุมดินที่ระยะ 5 cm บันทึกค่าจำนวนนับนิวตรอนที่ระยะ 5 cm โดยใช้เวลาวัด 30 วินาที บันทึกค่าที่อ่านได้จาก Counter ดังตารางที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.9 การหย่อนหัววัดลงไปในหลุมดินให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำซ้ำข้อ 4 ที่ระยะ 4, 5, 10, 15, 20 จนถึง 100 cm และบันทึกผลดังตารางที่ 4.3

6. นำตัวอย่างดินที่ได้มาใส่ในกระป๋อง และชั่งน้ำหนักก่อนที่จะทำการอบดินด้วยตู้อบความชื้น (ซึ่งกระป๋องเก็บตัวอย่างดินก่อนที่จะใส่ตัวอย่างด้วย)



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินที่ความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน

7. นำไปอบด้วยตู้อบความชื้น ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อความชื้นคงที่แล้วก็นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง



รูปที่ 4.12 อบตัวอย่างดินด้วยตู้อบความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. คำนวณหาปริมาณความชื้น (%) ดังตารางที่ 4.3

$$\text{วิธีการคำนวณ ; ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{ดินเปียก} - \text{ดินแห้ง}}{\text{ดินเปียก} - \text{น้ำหนักกระป๋อง}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณความชื้นที่ระยะ 2 cm

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \frac{23.8587 - 23.3593}{23.8587 - 15.5715} \times 100$$

$$\text{ปริมาณความชื้น} = 6.0262 \%$$

ดังนั้นความลึกที่ระยะ 2 cm จากหน้าดิน มีจำนวนนับนิวตรอนเท่ากับ 17523.67 cpm และมีปริมาณความชื้นอยู่ 6.0262 %

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 1

ความลึก (cm)	จำนวนนับนิวตรอน (cpm)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	ดินเปียก (g)	ดินแห้ง (g)	ปริมาณความชื้น (%)
5	20211.00	15.3521	25.9257	24.9866	8.8816
10	34343.67	15.3648	34.3753	30.8141	18.7328
15	54764.67	15.2869	32.4060	29.3880	17.6294
20	74660.67	15.5107	41.1710	36.0685	19.8848
25	85060.00	15.3634	37.0310	32.4499	21.1426
30	89243.00	15.3517	41.0488	35.5318	21.4693
35	86460.33	15.2548	42.0035	36.2637	21.4582
40	81928.33	15.7996	37.4575	32.6504	22.1956
45	81049.00	15.1981	41.5342	35.5500	22.7224
50	82445.67	15.5035	44.0136	37.4491	23.0252
55	81211.67	15.2275	40.6688	36.4527	16.5719
60	77383.00	15.4930	46.2225	42.1430	13.2755
65	75096.00	15.6335	37.2973	35.3773	8.8627
70	79681.33	15.5381	33.9871	32.4420	8.3750
75	83628.00	15.3859	41.2662	36.4770	18.5052
80	87268.67	15.6392	49.3556	40.9333	24.9798

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 1

ความลึก (cm)	จำนวนนับนิวตรอน (cpm)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	ดินเปียก (g)	ดินแห้ง (g)	ปริมาณความชื้น (%)
85	90891.33	15.3963	45.4611	36.9121	28.4352
90	95043.00	15.1623	46.0980	37.9694	26.2758
95	100393.00	15.5477	46.2088	38.4246	25.3879
100	105444.00	15.5169	46.6417	38.2425	26.9856

9. นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.3 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cps) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ

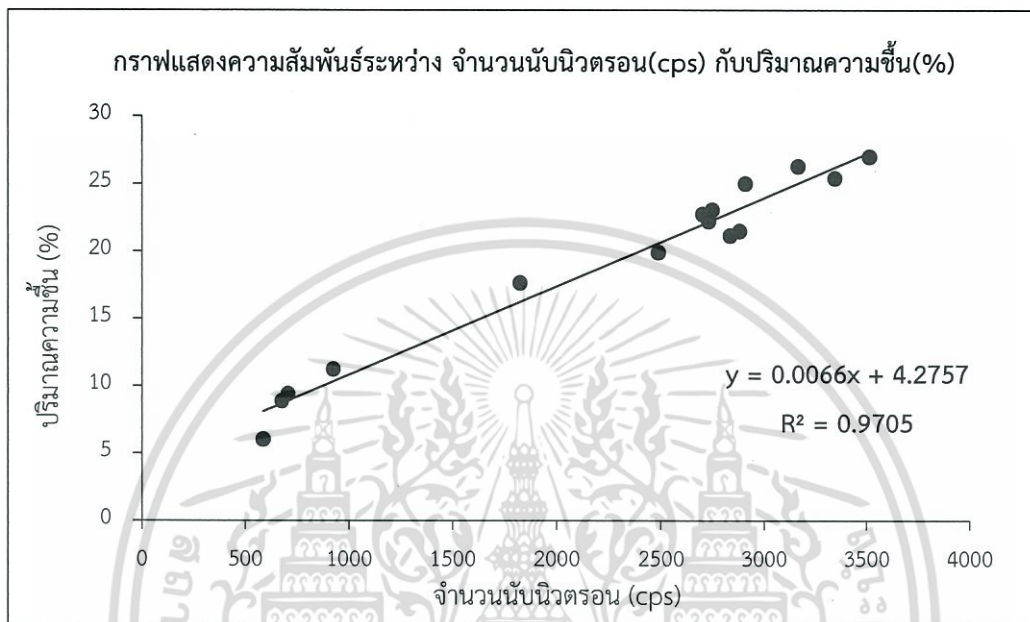


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cps/50) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 1

จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในดินกับจำนวนนับนิวตรอนที่ระยะความลึก 10 ถึง 100 เซนติเมตร จากกราฟจะเห็นว่าสามารถแบ่งดินออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ความลึก 10 ถึง 25 เซนติเมตร, ช่วงที่ 2 ความลึก 30 ถึง 80 เซนติเมตร และช่วงที่ 3 ความลึก 85 ถึง 100 เซนติเมตร ซึ่งพบว่าความลึกช่วงที่ 1 จะมีผลกระทบต่ออัตราการวัดจำนวนนับนิวตรอนเข้า เนื่องจากเนื้อดินไม่หนาแน่นและอาจจะมีการสูญเสียนิวตรอนไปในบรรยากาศ ซึ่งจะส่งผลกับปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นในดิน ดังนั้นตั้งแต่ความลึกที่ 25 เซนติเมตรลงไปจะสามารถวัดนิวตรอนช้าได้อย่างถูกต้อง ความลึกช่วงที่ 2 พบว่ามีปริมาณความชื้นน้อยลง และความลึกช่วงที่ 3 หรือต่ำกว่า 85 เซนติเมตร จากพื้นดิน พบว่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างต่อเนื่อง

10. พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนนับนิวตรอน(cps) กับปริมาณความชื้น(%)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอน(cps) กับปริมาณความชื้น(%)

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอน(cps) กับปริมาณความชื้น(%) ของตัวอย่างดินที่ระดับความลึกไม่เกิน 100 เซนติเมตร ได้เป็นสมการเส้นตรง $y = 0.0066x + 4.2757$ สำหรับหาค่าปริมาณความชื้นของดินช่วงสั้น ๆ

4.3.2 วิเคราะห์ธาตุในดินโดยใช้ X-ray fluorescence : XRF

จากรูปที่ 4.3 ความลึก 55 ถึง 75 เซนติเมตร จะเห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงมาก จึงมีการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในดินจากตัวอย่างดินหลุมที่ 1 บดละเอียด และตรวจสอบธาตุในดินว่ายังมีธาตุใดที่สามารถจับนิวตรอนได้ดี นอกจากไฮโดรเจนอีกหรือไม่ ซึ่งจะใช้ X-ray fluorescence (MODEL DPO-2000, OLYMPUS) เป็นตัววิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงจำนวนองค์ประกอบของธาตุในดิน

Element	avg. concentration	Element	avg. concentration
Light elements	57.20% - 60.13%	Light elements	56.66 - 58.81%
Si	22.97% - 28.06%	Si	15.15 - 22.97 %

ตารางที่ 4.4(ต่อ) แสดงจำนวนองค์ประกอบของธาตุในดิน

Element	avg. concentration	Element	avg. concentration
Al	6.63% - 7.99%	Al	5.03 – 7.22 %
Fe	3.37% - 7.68%	Fe	3.47 – 5.22 %
K	1.16%-1.51%	K	0.77 – 1.31 %
Ti	3619 - 4610 µg/g	Ti	3210 – 4190 µg/g
Ca	684 - 1.34%	Ca	4.21 – 16.61 %
Mn	375 - 941 µg/g	Mn	645 – 1458 µg/g
Zr	168 - 232 µg/g	Zr	100 – 168 µg/g
Rb	130 - 158 µg/g	Rb	66 – 138 µg/g
Zn	73 - 147 µg/g	Zn	113 – 170 µg/g
Sr	62 - 106 µg/g	Sr	106 – 295 µg/g
Y	31 - 48 µg/g	Y	23 – 32 µg/g
Ni	27 - 43 µg/g	Ni	23 – 32 µg/g
Pb	23 - 46 µg/g	Pb	19 – 35 µg/g
Th	15 - 30 µg/g	Th	14 – 16 µg/g
Nb	21 - 30 µg/g	Nb	11 – 26 µg/g
Cu	20 - 34 µg/g	Cu	32 – 72 µg/g
As	4 - 22 µg/g	As	19 – 32 µg/g

ตารางที่ 4.4 (ซ้าย) แสดงจำนวนองค์ประกอบธาตุในดินทุกระยะ ยกเว้นระยะ 55 ถึง 75 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 (ขวา) แสดงจำนวนองค์ประกอบธาตุในดินที่ระยะ 55 ถึง 75 เซนติเมตร

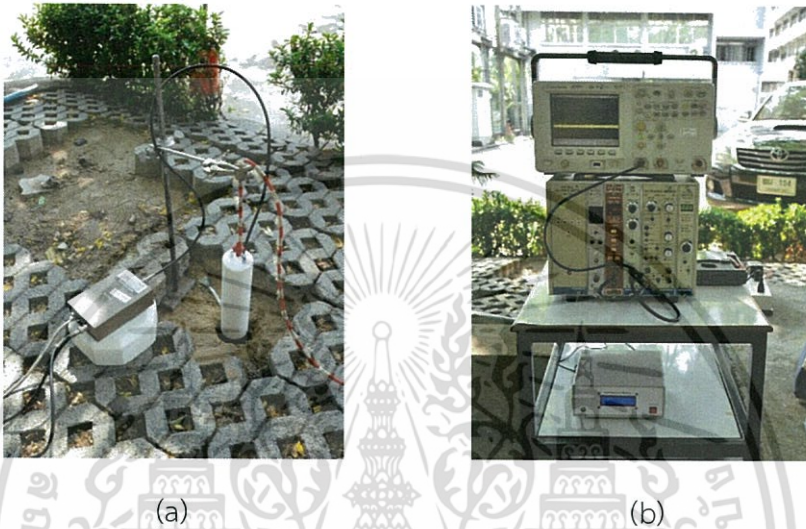
จากตารางที่ 4.4 พบว่า Ca เป็นธาตุองค์ประกอบในดินที่สามารถแบ่งแยกดินแต่ละชั้นได้ ตัวอย่างดินที่เก็บมาระยะ 55 ถึง 75 เซนติเมตร ส่วนใหญ่ก็มีหินปูนผสมอยู่จำนวนมาก ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่าสภาพของพื้นที่ที่ทำการทดสอบ เมื่อก่อนบริเวณตรงนี้เคยเป็นไหล่ถนน และเมื่อทำการตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบในดินที่มีผลต่อการลดพลังงานของนิวตรอน พบว่าส่วนใหญ่ในดินมีไฮโดรเจนที่จับนิวตรอนเป็นหลักเพียงแคธาตุเดียว

4.4 การพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยในส่วนของภาคแสดงผล

เนื่องจากหลุมที่ 1 ได้สมการเส้นตรง $y = 0.0066x + 4.2757$ จากความสัมพันธ์ของจำนวนนับเอกส นิวตรอนกับปริมาณความชื้นของดินที่ระยะลึกต่าง ๆ จึงนำสมการจากหลุมที่ 1 ไปคำนวณหาทางด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นหลุมที่ 2 และเปรียบเทียบค่าความชื้นที่ได้จากการอบ กับความชื้นที่ได้จากสมการที่ใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยแสดงผลความชื้นบนเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM) ที่สร้างขึ้นโดยใช้บอร์ดArduino รุ่น UNO R3 ต่อเข้ากับจอแสดงผล LCD ขนาด 16 x 2

1. หลุมที่ 2 ทำซ้ำข้อ 1-8 (ของหัวข้อ 4.3.1) แต่จะขุดหลุมลึกลงไปแค่ 70 เซนติเมตร บันทึกผลในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.15 (a) บริเวณที่ทำการวัดความชื้นในดินและวัดจำนวนรังสีนิวตรอนของหลุมที่ 2 (b) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการนับจำนวนรังสีนิวตรอนกับเครื่อง NMM

ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นจากการอบ (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2

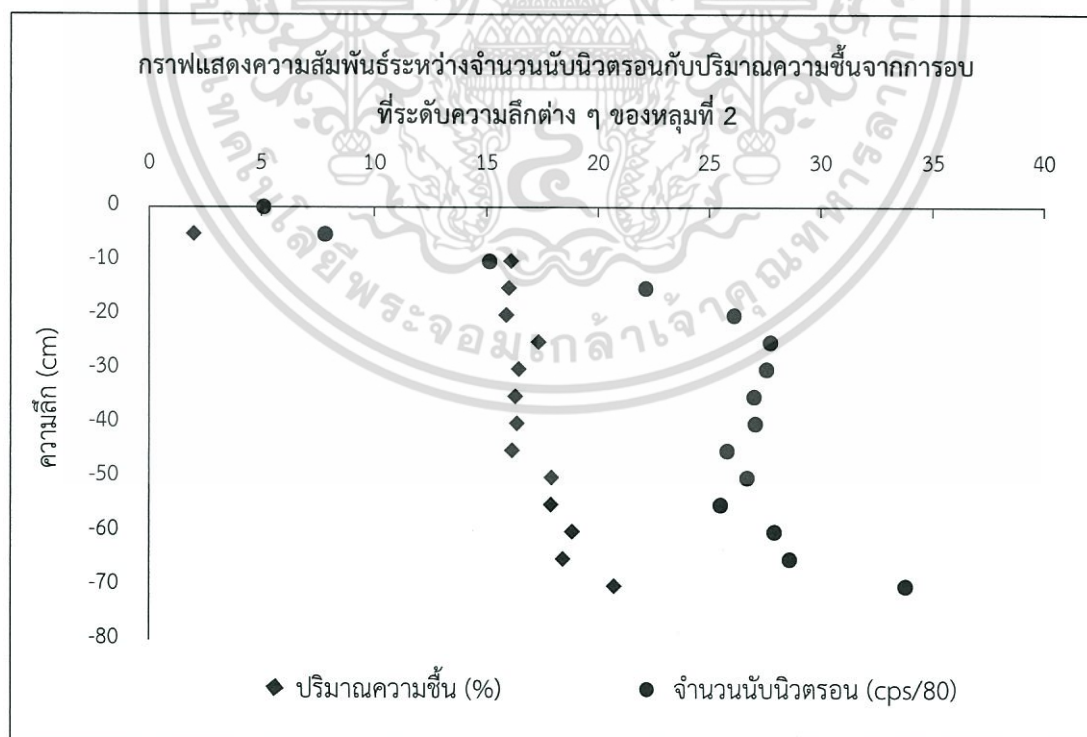
ความลึก (cm)	จำนวนนับนิวตรอน (cpm)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	ดินเปียก (g)	ดินแห้ง (g)	ปริมาณความชื้น (%)
5	18797.33	15.3521	40.8901	40.3812	1.99
10	36286.67	15.3648	46.8309	41.7705	16.08
15	53142.00	15.2869	45.0475	40.2914	15.98
20	62666.00	15.5107	49.1668	43.8275	15.86
25	66601.33	15.3634	47.2324	41.7126	17.32
30	66186.00	15.3517	46.6838	41.5342	16.44
35	64834.33	15.2548	46.6833	41.5708	16.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นจากการอบ (%) กับจำนวนนับนิวตรอน(cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2

ความลึก (cm)	จำนวนนับนิวตรอน (cpm)	น้ำหนักกระป๋อง (g)	ดินเปียก (g)	ดินแห้ง (g)	ปริมาณความชื้น (%)
40	64976.67	15.7996	42.557	38.1851	16.34
45	61927.67	15.1981	43.321	38.7836	16.13
50	64094.00	15.5035	45.8807	40.444	17.90
55	61207.33	15.2275	42.7567	37.8365	17.87
60	67010.67	15.493	43.7735	38.4486	18.83
65	68638.67	15.6335	41.6527	36.8595	18.42
70	81034.33	15.5381	47.5252	40.9032	20.70

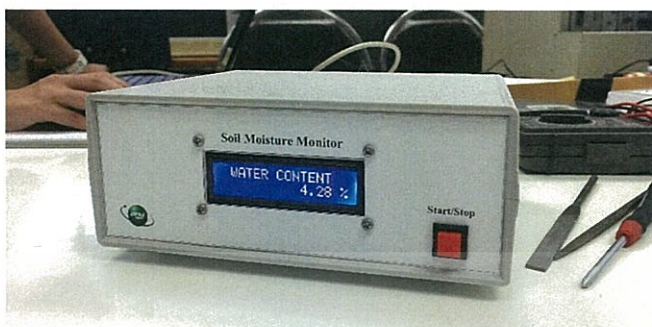
2. นำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 ของหลุมที่ 2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับนิวตรอนกับปริมาณความชื้นจากการอบ ที่ระดับความลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cps/80) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำสมการ $y = 0.0066x + 4.2757$ ที่ได้จากหลุมที่ 1 มาหาความชื้นหลุมที่ 2 โดยการเขียนโปรแกรมให้แสดงผลความชื้นบนเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM) แสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.17 ผลความชื้นของดิน (%) แสดงด้วยเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นจากเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (%) กับจำนวนนับนิวตรอน (cpm) ที่ระยะความลึกต่าง ๆ ของหลุมที่ 2

ความลึก (cm)	Neutron moisture monitor model 2017 (NMM)				เฉลี่ย	
	1		2			
	จำนวน นิวตรอน (cpm)	ปริมาณ ความชื้น (%)	จำนวน นิวตรอน (cpm)	ปริมาณ ความชื้น (%)	จำนวน นิวตรอน (cpm)	ปริมาณ ความชื้น (%)
5	18906	8.43	18873	8.43	18889.50	8.43
10	35934	12.18	36605	12.33	36269.50	12.26
15	52882	15.9	53534	16.05	53208.00	15.98
20	62827	18.1	62658	18.06	62742.50	18.08
25	66328	18.86	66637	18.93	66482.50	18.90
30	66108	18.82	66060	18.81	66084.00	18.82
35	64970	18.56	64902	18.55	64936.00	18.56
40	65033	18.58	64285	18.41	64659.00	18.50
45	61980	17.91	59412	17.34	60696.00	17.63
50	63633	18.27	63936	18.34	63784.50	18.31
55	57746	16.97	61324	17.77	59535.00	17.37
60	67150	19.05	67072	19.03	67111.00	19.04
65	68558	19.36	69266	19.51	68912.00	19.44
70	77428	21.3	70684	19.83	74056.00	20.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำปริมาณความชื้นจากการอบที่ได้จากตารางที่ 4.5 และปริมาณความชื้นจากสมการ $y = 0.0066x + 4.2757$ ที่เขียนโปรแกรมให้แสดงผลความชื้นบนเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM) ที่ได้จากตารางที่ 4.6 ของกลุ่มที่ 2 เปรียบเทียบหาความคลาดเคลื่อน แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 กลุ่มที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการอบกับปริมาณความชื้นจากสมการ $y = 0.0066x + 4.2757$ ของเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM)

ความลึก (cm)	ปริมาณความชื้นจากการอบ (%)	ปริมาณความชื้นจาก $y = 0.0066x + 4.2757$ ของเครื่อง NMM (%)	ความคลาดเคลื่อน (%)
15	15.98	15.98	0.04
20	15.86	18.08	13.97
25	17.32	18.90	9.09
30	16.44	18.82	14.48
35	16.27	18.56	14.06
40	16.34	18.50	13.20
45	16.13	17.63	9.24
50	17.90	18.31	2.28
55	17.87	17.37	2.81
60	18.83	19.04	1.12
65	18.42	19.44	5.50
70	20.70	20.57	0.66

จากตารางที่ 4.7 กลุ่มที่ 2 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการอบ กับปริมาณความชื้นจากสมการ $y = 0.0066x + 4.2757$ ของเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM) พบว่าค่าความชื้นผิดพลาดไม่เกิน 15 % ที่ระยะความลึก 15 ถึง 70 เซนติเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน ทำการออกแบบโพรบสำหรับใส่หัววัด BF₃ proportional counter และแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน ²⁴¹Am-Be เป็นพอลิเอธิลีน รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 24.5 เซนติเมตร จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า High Volt ที่จ่ายให้หัววัด คือ 1500 V และพบว่าหัววัดที่ใช้ในการทดลองไม่มีตอบสนองต่อรังสีแกมมาหรือตอบสนองต่อรังสีแกมมาน้อยมาก

ใช้หลักการกระเจิงกลับของนิวตรอน ในการออกแบบระบบวัดความชื้นของดิน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับจำนวนนับนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ (10 ถึง 100 เซนติเมตร) จะเห็นว่าผลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินมาอบแล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับจำนวนนับนิวตรอนที่ระดับความลึกต่าง ๆ พบว่าการกระจายของปริมาณความชื้นกับจำนวนนับนิวตรอนค่อนข้างแปรผันตรงกัน ซึ่งถือว่าเป็นที่น่าพอใจ อีกทั้งพบว่าเทคนิคการวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอนสามารถแยกชั้นดินได้ ดังรูปที่ 4.13 จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับจำนวนนับนิวตรอนของหลุมที่ 1 จะได้เป็นสมการเส้นตรง $R^2 = 0.9705$ นำสมการที่ได้จากหลุมที่ 1 มาหาความชื้นหลุมที่ 2 โดยการเขียนโปรแกรมให้แสดงความชื้นบนเครื่อง Neutron moisture monitor model 2017 (NMM) ที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบความชื้นหลุมที่ 2 จากการอบกับความชื้นที่ได้จากสมการ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15 % ดังนั้นการพัฒนาระบบวัดความชื้นของดินด้วยรังสีนิวตรอน สมการเส้นตรงจากการทดลองสามารถนำไปพัฒนาต่อในการคำนวณหาปริมาณความชื้นของดินได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจาก

- ในการทดลองเกิดช่องว่างระหว่างโพรบกับหลุมดิน ซึ่งส่งผลกับค่านับวัดจำนวนนิวตรอน ดังนั้นในการทดลองจึงต้องทำให้มีช่องว่างน้อยที่สุด หรือไม่มีช่องว่างอยู่เลย

- สภาพภายในดินด้านบน (ระยะ 0-25 เซนติเมตร จากผิวดิน) มีปัจจัยหลายอย่าง เช่น ดินไม่แน่น มีขยะ มีหิน และผลกระทบในเรื่องของนิวตรอนในบรรยากาศ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบกับจำนวนนับนิวตรอนที่วัดได้ จึงควรทำการวัดจำนวนนิวตรอนที่ระดับความลึกมากกว่า 25 ถึง 30 เซนติเมตรจากผิวดินลงไป ถึงจะทำให้ได้ค่านับวัดที่แม่นยำมากขึ้น

- สมการที่ได้จากการทดลอง เหมาะสำหรับการหาความชื้นในดินที่เนื้อดินมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ

และดินเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (neutron sources).” [Online].
Available : www.oocities.org/earl06us/TRY.htm. สืบค้นข้อมูล 18 ตุลาคม 2559
- [2] สาทร่าย เล็กชะอุ่ม. 2558. เอกสารประกอบการสอนวิชา POWER PLANT (05346413).
กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ฝ่ายวิจัยและพัฒนา. เอกสารประกอบการเรียนการสอน : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ.
- [4] Interaction of neutrons with matter. [Online].
Available : www.physics.science.cmu.ac.th/courses/207403/assichapt7.pdf.
สืบค้นข้อมูล 26 ตุลาคม 2559
- [5] อัมพร ฝันเขียน. อันตรายจากรังสีและการควบคุม (หน้า 23,24). [Online].
Available : http://kmcenter.rid.go.th/kcresearch/article_out/article_out_02.pdf.
สืบค้นข้อมูล 27 พฤศจิกายน 2559
- [6] คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. “หัววัดนิวตรอน (neutron detectors).”
[Online]. Available : <http://203.158.100.100/charud/scibook/nuclearphysics/index/index6-9.htm>. สืบค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2559
- [7] Gas-filled detector. [Online].
Available : www.physics.science.cmu.ac.th/courses/207403/assichapt8.pdf
สืบค้นข้อมูล 15 พฤศจิกายน 2559
- [8] เจือทิพย์ ภูริจิตราวรงค์ และคณะ. ส่วนประกอบหัววัดรังสีชนิดแก๊ส (Gas-filled detector).
[Online]. Available : www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/15/19/nuclear-medicine/15_compound_of_Geiger_Muller_counter.htm.
- [9] เจือทิพย์ ภูริจิตราวรงค์ และคณะ. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้ electrodes. [Online].
Available : www.mt.mahidol.ac.th/e-learning/Instrumentation/NMP_chap2_48/4_region_of_detector.htm. สืบค้นข้อมูล 19 พฤศจิกายน 2559
- [10] Oak Ridge Associated Universities. 2011. Nuclear-Chicago Model NC-205 BF₃ Counter (ca. 1955-1965). [Online].
Available : www.ornl.gov/ptp/collection/proportional%20counters/nucchicago205bf3.htm. สืบค้นข้อมูล 20 พฤศจิกายน 2559
- [11] Neutron Fission Counters and Chambers. [Online].
Available : www.gemeasurement.com/radiation-measurement.
สืบค้นข้อมูล 25 ธันวาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] อนุรัตน์ ศฤงคารภาชิต. ความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช. [Online].
Available : www.arcims.tmd.go.th/Research_files/ความชื้นในดินที่เป็น_ประโยชน์ต่อพืช.pdf. สืบค้นข้อมูล 3 มกราคม 2560
- [13] อิชชัย สุมิตร นเรศร์ จันทน์ขาว และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2540. นิวเคลียร์เทคโนโลยีกับอุตสาหกรรม. การกระเจิงกลับของรังสี (Radiation Backscattering). [Online].
Available : www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/044/29044533.pdf สืบค้นข้อมูล 23 กุมภาพันธ์ 2560
- [14] บริษัท วินัส ซัพพลาย จำกัด. 2012. Arduino. [Online].
Available : www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/บทความ-arduino-คืออะไร-เริ่มต้นใช้งาน-arduino.html สืบค้นข้อมูล 7 เมษายน 2560
- [15] D. S. ChanasYk and M. A. Naeth, Field measurement of soil moisture using neutron probes. canadian journal of soil science. 317-323.
- [16] Jie Li¹, David W. Smith², Stephen G. Fityus³, and Daichao Sheng⁴, Numerical Analysis of Neutron Moisture Probe Measurements. Int. J. Geomech., 2003, 3(1): 11-20
- [17] AL Ward and RS Wittman, August 2009. Calibration of a Neutron Hydroprobe for Moisture Measurements in Small-Diameter Steel-Cased Boreholes. U.S. Department of Energy. PNNL-18539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้ดโปรแกรม Arduino

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2);

int pinIN = 0 ;
int Button = 0 ;
long firstPulseTime ;
long lastPulseTime ;
long numPulses ;
long Value=0 ;
int Count =0 ;
double Avg ;
double WaterC=0 ;

void isr() {
  unsigned long now = micros() ;
  if (numPulses == 0)
  {
    firstPulseTime = now ;
  }
  else {
    lastPulseTime = now ;
  }
  ++numPulses ;
}

void setup() {
  lcd.begin() ;
  lcd.setCursor (4,0) ;
  lcd.print ("WELCOME") ;
  delay (2000) ;
  lcd.clear () ;
  lcd.setCursor (1,0) ;
  lcd.print ("SOIL MOISTURE") ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    lcd.setCursor (4,1) ;
    lcd.print ("MONITOR") ;
    delay (5000) ;
    lcd.clear () ;
}

unsigned int readFrequency(unsigned int sampleTime)
{
    numPulses = 0 ;
    attachInterrupt(0, isr, RISING) ;
    delay(sampleTime) ;
    detachInterrupt(0) ;
    return (numPulses < 2) ? 0 : (1000000UL * (numPulses - 1))/(lastPulseTime -
firstPulseTime) ;
}

void loop() {
    if(Count >29) {
        Avg=Value/30 ;
        WaterC=(0.0066*(Avg))+4.2757 ;
        lcd.clear() ;
        lcd.setCursor(1,0) ;
        lcd.print("WATER CONTENT") ;
        lcd.setCursor(10,1) ;
        lcd.print(WaterC) ;
        lcd.setCursor(15,1) ;
        lcd.print("%") ;

        Count=0 ;
        Value=0 ;
        delay(7000) ;
    }
    else {
        unsigned int freq = readFrequency(1000) ;
        //Value2+=Value ;
        Value+=freq ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Count++;  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(2,0);  
lcd.print("TOTAL COUNTS");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("t=");  
lcd.print(Count);  
lcd.print("s");  
lcd.setCursor(7,1);  
lcd.print(Value);  
lcd.setCursor (14,1);  
lcd.print("c");  
}  
delay(1000);  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Field measurement of soil moisture using neutron probes

D. S. Chanasyk and M. A. Naeth

Department of Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2H1.

Chanasyk, D. S. and Naeth, M. A. 1996. **Field measurement of soil moisture using neutron probes.** *Can. J. Soil Sci.* 76: 317–323. Soil moisture measurements are critical to all field studies of soil-plant-water relationships. Dependable and reliable techniques are required to provide such measurements. Neutron probes were developed more than 40 years ago and continue to be used today. They offer many advantages as a measurement technique, the most important of which is non-destructive, repetitive measurements of soil moisture. Much research has been focused on overcoming the two major limitations of neutron probes: measuring near-surface soil moisture and a smoothing of moisture data at sharp moisture discontinuities in the soil. Various techniques have been devised to overcome the first limitation and the error associated with the second is acceptable by probe users. The dramatic decline in the number of articles in the scientific literature related to neutron probes during the past decade is likely an indication that neutron probe technology has matured and that neutron probes have become accepted as a reliable and dependable field technique for soil moisture measurement.

Key words: Neutron probe, soil moisture, water budget

Chanasyk, D. S. et Naeth, M. A. 1996. **Mesure de la teneur en eau du sol à l'aide de la sonde à neutrons.** *Can. J. Soil Sci.* 76: 317–323. La mesure de la teneur en eau du sol est essentielle aux études sur les relations sol-plante-eau. Des techniques fiables sont nécessaires à l'obtention de telles mesures. Les sondes à neutrons ont été développées il y a plus de quarante ans et sont encore utilisées. Elles offrent plusieurs avantages dont les plus importants sont d'être non destructifs et de permettre la répétition des mesures. Plusieurs travaux ont cherché à surmonter les deux principales faiblesses de la sonde à neutrons: la difficulté de mesurer la teneur en eau près de la surface du sol et la faible résolution verticale pour la mesure des profils de teneur en eau. Plusieurs techniques ont été conçues pour palier la première et la seconde est généralement acceptée par les usagers. La baisse importante du nombre de publications scientifiques portant sur la sonde à neutrons durant la dernière décennie est une indication que cette technique est maintenant à point et acceptée comme une méthode fiable de mesure au champ de la teneur en eau du sol.

Mots clés: Sonde à neutrons, teneur en eau du sol, bilan hydrique

Accurate measurement of soil moisture is a common requirement of field-based hydrological or ecological research. The measurement technique should be reliable, dependable, simple, cost-effective and non-destructive. Schmutge et al. (1980) identified three general requirements of soil moisture measurements: frequent measurements, an estimate of moisture within the upper 1 to 2 m of the soil, and generally, a description of moisture variations over large study areas. The neutron probe meets all of these requirements. The requirement for measurement over large areas often limits other measurement techniques. No one technique that is "best" under all applications has been identified in comparisons among the different techniques available for the measurement of soil moisture; "favouritism" among researchers for a specific technique is common. The precision of measurements possible with neutron probes has always been high and satisfactory for soil water investigations (Evet and Steiner 1995). Evett and Steiner (1995) concluded from their good results with neutron probes that this technique of soil moisture measurement was useful. The terms for soil moisture measuring instruments which use neutron scattering methods include: neutron moisture meter, neutron probe, neutron-scattering moisture meter, neutron depth probe and neutron meter. Soil moisture data collected using neutron probes can be used in several ways: (1) to determine the soil moisture content at a given depth, (2) to

determine the total amount of soil moisture to a given depth; e.g. 0.50 m and (3) to determine changes in soil moisture during time at a given depth or to a given depth. Use of neutron probes for this latter purpose is fundamental to hydrologic water balance studies or determination of evapotranspiration at a site (e.g. Naeth and Chanasyk 1996), and is made possible by the calibration of neutron probes to volumetric moisture content.

History and Principles of Operation of Neutron Probes

Neutron probe technology was developed more than forty years ago (Belcher et al. 1950). In neutron scattering, soil moisture is measured indirectly. It is estimated from the thermal or slow neutron density (Schmutge et al. 1980). Neutron probes consist of a probe and an electronic counting scaler which are connected together by an electric cable. Measurements with depth are made by lowering the probe down an access tube, usually made of either aluminum or steel, to the required depth(s) of measurement. Access tubes are generally installed by placement in snug-fitting holes, pre-drilled by soil tube or auger which are either hand or machine-operated. Ideal tubes have minimal wall thickness, just large enough for the probe to fit without an air gap, and are of material that will not thermalize neutrons. Other factors such as cost, durability and availability are important in

choice of access tube material. Aluminum is generally the material of choice, although brass, steel and stainless steel have also been used successfully (Nixon and Lawless 1960). The method of placing tubes in an over-sized hole and back-filling is not recommended because it may create voids adjacent to the tube. The underlying principles of neutron probe operation were discussed by Gardner and Kirkham (1952). Neutrons with a high energy are emitted by a radioactive source into the soil and are slowed by elastic collisions with nuclei of atoms (this process is called thermalization). The average energy loss is much greater with neutrons colliding with atoms of low atomic weight than from collisions with heavier atoms. In soils, this is primarily hydrogen and, as a result, hydrogen can slow fast neutrons much more effectively than can any other element present in the soils. The density of the resultant cloud of slow neutrons is a function of the soil moisture content. Slow neutrons returning to the detector per unit time are counted. The moisture content is determined from previously determined calibration curves relating volumetric water content with counts or count ratios (ratio of counts at a given depth to the standard count) (Schmugge et al. 1980). Beryllium has the highest neutron yield of all elements, and thus has been used almost exclusively as the target material in radioactive neutron sources (McHenry 1963). By using the ratio of field count divided by standard count, effects of changing meter performance with time can be minimized (Hauser 1984). Standard counts are usually taken with the probe in its shield and located on top of its carrying case so that the probe is not resting on the ground during this time. The reader is referred to Greacen (1981) and Gardner (1986) for a more complete discussion of the theory of operation of neutron probes. Dramatic design improvements have made neutron probes lighter and more portable. With improvements in electronics, both the counting and probe units can be part of one unit. The advent of more efficient detectors has resulted in use of smaller and thus safer radioactive sources (Evet and Steiner 1995).

Calibration of Neutron Probes

Calibration curves for neutron probes are the relationships between counts per minute and per cent moisture by volume. This is generally a linear relationship through the common range of soil moisture (Merriam and Knoerr 1961). Rawls and Asmussen (1973) found that the manufacturer's calibration curve could not measure absolute soil water or changes in soil water within acceptable ranges. Their field calibration curve relating the ratio of neutron probe counts and standard counts to volumetric soil water was linear between 4 and 40% soil water by volume with this calibration curve independent of soil depths and soil types. Manufacturers generally supply calibration curves with the neutron probes they sell. Babalola (1978) found that calibration curves obtained under controlled laboratory conditions were parallel to the factory calibration curves and postulated that any departure stems from experimental error, particularly spatial variability of the field soils. However, he also found that in all cases, the factory calibration curves were inadequate to monitor absolute moisture content in the

field. Nakayama and Reginato (1982) recommended calibrating neutron probes by comparing them directly with a master reference probe.

Hauser (1984) commented that where soil chemistry, geologic origin and morphology are similar, one calibration curve may be valid for several soils. The elements boron, chlorine and iron are strong absorbers of neutrons, but they occur in small quantities in most soils and thus cause few calibration problems (Hauser 1984). Calibration equations for dolomitic limestone, limestone, sand and terra rossa were parallel in spite of large differences in chemical content of these geologic materials (Cotecchia et al. 1968). Douglas (1966) found identical calibration curves for four soils while Rawls and Asmussen (1973) did likewise for 11 soils.

An increase in bulk density increases the number of neutron-absorbing elements per unit volume of soils, thus reducing the count rate and affecting probe calibration. However, in the presence of organic matter or bound water, increasing density may increase count rate (Hauser 1984). Thus it is not surprising that the literature is divided on the effect of bulk density on calibration of neutron probes. Non-uniform soil moisture conditions during collection of calibration data may have a greater influence than bulk density on the uncertainty in the relationship between soil moisture content and count ratio (Parkes and Siam 1979). Cannell and Asbell (1974) also found that bulk density effects were small compared to errors from limited depth resolution at sub-surface interfaces. Hauser (1984) indicated that temperature differences between the counting unit and probe could lead to errors, although the temperature range used (0–53°C) was large.

Marais and de V. Smit (1962) found that hydrogen present in organic matter increased the count rate for a given water content, but Visvalingam and Tandy (1972) concluded that the effect of organic matter is negligible.

Sphere of Influence

The volume of soil sensed during measurement is an important parameter in soil moisture measurement. The sphere of influence of the neutron probe is the volume from which an average moisture content is calculated and depends on the amount of moisture at the measurement location. The sphere of influence concept was proposed by van Bavel (1956); namely the sphere around the source that contains 95% of all thermal neutrons. Mortier et al. (1960) and Olgaard (1965), both as cited by Visvalingam and Tandy (1972), criticized this concept and suggested that the sphere of importance is the one which, if all the soil and water outside the sphere were removed, would yield a neutron flux at the source that is 95% of the flux obtained in an infinite medium. Kristensen (1973) offered the following equation for predicting the sphere of importance (influence):

$$R = 100/(1.4 + 0.1 W)$$

where R is the radius (cm) and W is the volumetric water content (%). Hence the sphere's radius is a strong function of moisture content, decreasing as W increases.

Advantages of Neutron Probes Compared to Gravimetric Sampling

The advantages of the neutron probe are: (1) soil moisture can be measured regardless of its physical state, (2) average moisture contents can be determined with depth, (3) probes can be interfaced for automatic downloading of stored data, (4) temporal soil moisture changes through seasons can be easily monitored, (5) rapid changes in soil moisture can be detected, (6) readings are related directly to soil moisture and (7) measurements can be made repeatedly and non-destructively at the same site (Schmugge et al. 1980). The large volume of soil sensed by neutron probes provides more reliable measurements of soil moisture than can be obtained from generally smaller gravimetric samples (Nixon and Lawless 1960). In addition, depth of measurement with the neutron probe is limited only by the depth of the access tube and the length of the cable; gravimetric sampling at depth can only be accomplished with great expenditure of time, effort and money. The length of time required to make a moisture measurement with a neutron probe is the same regardless of depth, while progressively more time is required as depths increase in gravimetric sampling (Nixon and Lawless 1960). Neutron probes are capable of measuring soil moisture even under frozen soil conditions. Advantage (5) offered by Schmugge et al. (1980) is a relative one: neutron probes can be used to monitor the advance of wetting fronts in soils but often several days must pass before changes in soil moisture due to evapotranspiration are large enough to be sensed by the probes.

Disadvantages of Neutron Probes

Schmugge et al. (1980) listed the following disadvantages of neutron probes: (1) inadequate depth resolution makes measurement of absolute moisture content difficult, especially in layered soils, (2) the moisture measurement may depend on physical and chemical properties of the soil which are in themselves difficult to measure, (3) care must be taken to minimize health risks since the probes contain a radioactive source and (4) accurate measurements of soil water at or near the soil surface cannot be made because of the neutron probe's sphere of influence. Measurements of soil moisture by the neutron scattering method may be inaccurate when made in the presence of abrupt moisture changes due to the large sphere of influence of the probes. Individual neutron probe readings taken near a horizontal wet-dry interface located at depth are in error; however, the errors from one side of the interface compensate, to a varying degree, those from the other side. Stone et al. (1955) showed that probe discrimination between varying moisture regions in the soil profile is higher if all but the centre part of the detector tube were made less sensitive to slow neutrons by partially shielding the non-centre portions with cadmium, which absorbs slow neutrons. Van Bavel et al. (1963) stated that the errors caused by steep soil moisture gradients can be ignored where differences in water content are the desired data. Errors in determining moisture content of soil zones containing wet-dry interfaces or wet layers were not serious and could be neglected in many practical applications (Lawless et al. 1963).

When the sphere of influence extends above the soil, neutrons that pass out of the soil into the air are not deflected back in significant amounts by the air. This loss results in a lower meter reading than is characteristic for the particular moisture content (Nixon and Lawless 1960). Chanasyk and Naeth (1988) determined the depth of influence for their CPN 503 Depthprobes to be approximately 20 cm by comparing near-surface neutron probe readings without and with bags of water placed on the soil surface adjacent to the access tubes. Interestingly this depth did not vary greatly under moisture conditions that varied from 16 to 32% (volume).

A health hazard is posed by the use of neutron probes due to their radioactive source. However, exposure to this radiation was within acceptable limits as monitored with film badges. The method is without hazard to personal health (Visvalingam and Tandy 1972), especially when users are properly trained and use simple precautions. That remains true today. The time of greatest hazard in probe use occurs when the probe is first being lowered from its shield down the access tube. Efficient probe users can minimize this time and thus minimize hazards associated with the use of the probe. Accidents with the use of neutron probes can be easily dealt with provided the sealed source remains intact. Users of the probe must be trained for emergency measures whether or not the sealed source has been broken. Enhanced safety requirements for the transportation of neutron probes assure safety of the general public and can generally be met easily with proper training and vigilance of personnel using the probes. Owners of probes that are no longer functional are, however, faced with the task, and associated cost, of safe disposal of the radioactive source.

Sources of Measurement Error

Hewlett et al. (1964) identified the following sources of error in the use of neutron probes (excluding human errors in reading scaler counts and timing intervals): (1) instrument error (irregular timing counts of returning neutrons and noise in the equipment); (2) timing error (random errors in measurement of the time interval during which counts are accumulated for a single observation) and (3) location error (reflecting the difference in soil moisture content and soil physical properties from place to place). They found that the instrument and timing errors were negligible compared to location error in a single moisture estimate but became a measurable percentage of the total variance in estimates of moisture change over two dates.

They concluded there was little advantage in increasing the timing interval or accumulated time of reading regardless of the number of measurement points. They suggested that the shortest timing interval was between 10 and 30 s (Hewlett et al. 1964).

Haverkamp et al. (1984), through an analysis of errors involved in the determination of an individual water content value when using neutron scattering, showed that the estimation variance is composed of two terms: instrument and calibration components. They found that for application to a specific data set, the calibration component represents the major contribution to total variance of an individual water

content estimate. Instrumental variance can be reduced by increasing the number of replications at each sampling point or the counting time. The loss of precision due to using neutron count ratios rather than counts rates can be minimized by increasing the number of replications in the standard medium or the counting time. They found that for heterogeneous water profiles, determination of profile soil moisture using Simpson's rule was more accurate than was the use of trapezoidal rule. These two techniques are available in some current computer graphics packages and are described in calculus textbooks.

To compare methods for determining total profile soil moisture, data were selected for a date and location where the profile of soil moisture with depth was not uniform but was characterized by a decrease, then an increase, with depth (Table 1). Two techniques of analysis for determining the total soil water to a given depth were compared: one assuming that the moisture measurement at a given depth is valid from 0.05 m above the measurement depth to 0.05 m below; the other using trapezoids. Both techniques gave similar total soil water at all depths, differing by only 2 mm to a depth of 0.90 m. Perhaps the result is not surprising, given that a difference of 2% soil moisture over a 0.20-m depth interval would result in only a 4-mm difference in soil moisture over the depth interval. Determining soil moisture in this manner for profiles that often extend to at least 1 m smooths out differences in soil moisture at given depths.

The influence of rocks or air gaps around access tubes lowers moisture content somewhat since each has few, if any, hydrogen atoms, and hence no thermalization occurs within the volume of the rock or the air space (McHenry 1963). If the soil were to become saturated at the depth of the gaps, inordinately high and unrepresentative soil moisture contents would be determined. Air gaps around the access tube at the ground surface must be plugged to prevent infiltrating water from flowing down along the tube side.

Depth Intervals of Measurement

Gornat and Goldberg (1972) determined that the permissible depth increment by which a neutron probe may be lowered between two consecutive soil moisture determinations without losing accuracy is influenced by soil texture. In 0.60-m increments of a relatively homogeneous sandy soil, the average moisture content for the profile was the same as for 0.15-m increments, although soil moisture was uniform with depth in the profile. Under such moisture uniformity, depth interval of measurement would not matter. Kristensen (1973) stated that the depth increment chosen for a given soil depends on water content and the purpose of the investigation; e.g. if the purpose is to examine root development, a smaller value depth increment may be used than if a determination of water balance is the goal. He concluded that for non-layered soils, 0.20-m intervals for soils with low water holding capacities was sufficient for most investigations but for soils with higher water holding capacities 0.10- or 0.15-m intervals may be advisable.

There is no way of judging a priori what this increment should be unless the moisture distribution with depth is known. Visual observation of the soil as it is being removed

Table 1. Total soil water in a soil profile determined using different techniques

Depth (m)	VMC ^z (m ³ m ⁻³)	Total soil water	
		Tech. A ^y (mm)	Tech. B ^x (mm)
0.15	0.422		64
0.20		84	
0.25	0.421		106
0.30		126	
0.35	0.383		146
0.40		164	
0.45	0.364		183
0.50		200	
0.55	0.402		221
0.60		240	
0.65	0.432		263
0.70		283	
0.75	0.458		308
0.80		329	
0.85	0.475		355
0.90		377	379

^zVMC = volumetric moisture content.

^yTechnique A: Assumes 0.15-m reading valid to a depth of 0.20 m, thereafter a given depth reading valid 0.05 m above and below the depth of reading: e.g. reading at 0.85 m valid from 0.80 to 0.90 m.

^xTechnique B: Trapezoidal rule, assumes 0.15-m reading valid to a depth of 0.15 m and reading at 0.85 m valid to a depth of 0.90 m and trapezoidal calculation for all measurements in between.

during access tube installation, or during laboratory analysis of it, can be useful in this regard. The extra time required to take neutron probe readings at a smaller interval is generally small relative to the time required to carry the probe between tubes and set it up; hence use of smaller depth intervals may be warranted given the extra confidence in soil moisture data gained through the use of smaller intervals. To illustrate this point, consider Table 2, with soil moisture data on two dates for a field reclaimed after coal strip mining characterized by 0.20 m of clay loam topsoil underlain by sandy loam soil to depth. If Technique A, described in Table 1, is used to compare total soil water to a depth of 1.60 m calculated using depth intervals of 0.10 and 0.20 m, the totals differ by only 5 mm (total soil moisture of 438 versus 433 mm; data not shown). Given these data, a 0.20-m depth interval of measurement likely would have been acceptable for this field. Doubling the depth interval to 0.20 m from 0.10 m would have resulted in a saving of 3.7 minutes/tube. In most research applications, this added time would have been offset by greater confidence in the data.

If the soil moisture data from Table 1 are used to calculate total soil moisture with 0.10-m (using all data) and 0.20-m intervals (using measurements at depths of 0.15, 0.35, 0.55 and 0.75 m only), the totals are identical (data not shown). Hence, if the sole purpose of the soil moisture measurements in this case was to determine total profile soil moisture, then 0.20-m intervals would be sufficient.

Near-surface Measurement of Soil Moisture

Methods to overcome problems related to the measurement of near-surface soil moisture with neutron probes (underestimation of moisture content at the air/soil interface incurred

Table 2. Volumetric soil moisture in a reclaimed field

Depth (m)	17 Apr. 1991		7 Sept. 1991	
	Mean	SE ²	Mean	SE
	(m ³ m ⁻³)			
0.15	0.352	0.015	0.230	0.024
0.25	0.351	0.012	0.258	0.015
0.35	0.280	0.009	0.233	0.014
0.45	0.263	0.015	0.238	0.013
0.55	0.259	0.015	0.254	0.010
0.65	0.258	0.016	0.273	0.008
0.75	0.254	0.012	0.277	0.012
0.85	0.261	0.009	0.291	0.013
0.95	0.272	0.017	0.299	0.009
1.05	0.263	0.016	0.300	0.009
1.15	0.252	0.017	0.295	0.008
1.25	0.252	0.011	0.303	0.008
1.35	0.246	0.019	0.321	0.016
1.45	0.245	0.019	0.302	0.014
1.55	0.222	0.005	0.289	0.022

²SE = standard error.
n = 9.

by the direct application of the probe calibration curve) include those where the probe is retained within the access tube and those where it is taken out and placed horizontally upon the ground surface (Visvalingam and Tandy 1972). In the former method, a surface shield can be placed so that the sphere of influence does not encounter an air interface. Ideally the shield should be constructed of a material that has the same hydrogen content as the near-surface soil layer (Visvalingam and Tandy 1972). Pierpoint (1966) proposed to cover the soil surface around the access tube with a material high in hydrogen to reduce the escape of fast neutrons from the soil. This method is limited in dense vegetation and counts rose as the probe approached the soil surface. Parkes and Siam (1979) described a physical technique involving the use of a surface tray of either aluminum or fibreglass (low neutron thermalizers) which contains soil identical to that around the desired measurement location. At the time of measurement, the tray is lowered onto the measurement access tube so that when probe measurements are being made near the surface, the sphere of influence remains within soil and does not extend into the air. Hanna and Siam (1980) used aluminum trays 0.50 × 0.50 × 0.20 m made of expanded aluminum mesh with a central tube to fit over the top of an access tube. The tray was filled with turf from the vicinity of the access tube, and when not in use, was placed in a hole 2 to 3 m away from the access tube. They reported these trays were an improvement on previously reported fibreglass trays and could be used for all readings to a depth of 0.20 m without need for correction. This technique is likely impractical in many settings and would have obvious limitations in areas with significant amounts of vegetation.

Use of a neutron probe at all depths eliminates the necessity to use additional instruments for determining soil moisture in the topsoil (Karsten and van der Vyver 1979), but does require special calibration for the near-surface measurements. Black and Mitchell (1968) shielded part of the sphere by placing cadmium around the top of the detector in

conjunction with a surface shield, resulting in a decrease in the sensitivity of the probe in measuring soil water.

Sharma and Tunny (1972) used a cadmium sheet underneath a hydrogenous polyethylene shield enabling measurements at depths below 0.05 to 0.10 m, without affecting the overall sensitivity of the probe and eliminating the danger from the radioactive source. They also reported on the importance of careful probe placement, citing errors of 4% moisture by volume at a depth of 100 mm through a probe misplacement of only 10 mm. This error decreased to only 0.2% at a depth of 250 mm.

Chanasyk and Naeth (1988) developed a hydrogenous surface shield within which the neutron probe is placed prior to being placed horizontally on the ground. This method was calibrated to volumetric soil samples and a separate calibration curve derived. It was linear over the range of 1 to 47% soil moisture (volume), with an *r*² value of 0.91. The authors calculated total soil moisture to a depth of 0.50 m under two different moisture conditions using two techniques: one using the surface measurement obtained with their shielded neutron probe and the other assuming that the measurement taken at a depth of 0.15 m was valid to the surface. Soil moisture measurements were made within access tubes at depths of 0.15, 0.25, 0.35 and 0.45 m. In one condition, water contents differed by only 2 mm but by 19 mm in the other. The latter value represented over a 10% (relative) error in soil moisture. This shielded method of measuring near-surface soil moisture has the added advantage that it can be used solely for the determination of near-surface soil moisture, a critical hydrologic parameter. Normally two measurements are taken at each sample location, one on each side of the access tube being measured. Many measurements can be made in a given area, facilitating statistical comparisons. The method is limited in areas of tall or lush vegetation.

A different method for determining near-surface moisture measurements with neutron probes involves empirical corrections for counts made at specific depths in the surface layer (Parkes and Siam 1979). Luebs et al. (1968) suggested making a special calibration for the upper soil layers. In the technique proposed by Harris (1973), empirical coefficients are derived from measurements of the changes of count ratio (count at a given depth/standard count) with depth both for soil at a known uniform moisture content and for water. These values are used to calculate measures of the extent to which the true count ratio would be reduced at particular moisture contents. The reciprocals of these estimates are the factors by which an observed count ratio must be multiplied to give the correct ratio. Since moisture content is unknown for measurements requiring correction, tabulated values of observed count ratio must be used to back-calculate the original true count ratios. Exact values of true count ratio must be interpolated between those values initially used to calculate the correction factors (Parkes and Siam 1979). Grant (1975) proposed another empirical technique whereby the surface measurements of count ratio are repeated once a 10-cm layer of soil surrounding the access tube has been removed. From the comparison of readings taken before and after removal of the top layer, a series of correc-

Table 3. Total soil water in a soil profile with and without surface measurement

Depth (m)	VMC ^z (m ³ m ⁻³)	Total soil water	
		Tech. A ^y	Tech. B ^x
Surface	0.159	12	—
0.15	0.299		
0.20		49	60
0.25	0.347		
0.30		84	95
0.35	0.302		
0.40		114	125
0.45	0.317		
0.50		146	157
0.55	0.377		
0.60		184	195
0.65	0.406		
0.70		225	236
0.75	0.388		
0.80		264	275

^zVMC = volumetric moisture content.

^yTechnique A: Assumes 0.15-m reading valid to a depth of 0.20 m, thereafter a given depth reading valid 0.05 m above and below the depth of reading; e.g. reading at 0.85 m valid from 0.80 to 0.90 m.

^xTechnique B: As in Technique A except surface reading assumed valid to a depth of 0.075 m and 0.15-m reading assumed valid from 0.075 to 0.20 m.

tions for individual depths can be derived. Again, the correction factors are functions of soil moisture (Parkes and Siam 1979), a reflection of varying sphere of influence. Parkes and Siam (1979) compared these latter two empirical correction methods for near-surface count ratios, and found that the Grant technique appeared more useful for general purposes given its good agreement with values obtained with the surface tray technique. However, the good agreement of this technique with that of surface trays should not be surprising given they both use the same principle for compensation for sphere of influence retention within the soil. Correction techniques such as these would be reliable only when soil moisture and organic matter do not vary with depth in the near-surface zone (Hanna and Siam 1980). Such assumptions are likely poor, given that this zone is generally the most dynamic for both these parameters.

The importance of correct measurement of surface soil moisture is illustrated with the data from Table 3. For this soil profile, assumption that the 0.15-m reading was valid for the uppermost 0.20 m resulted in an 11-mm overestimation of total water within the profile compared to incorporation of the surface moisture measurement of soil water using the technique of Chanasyk and Naeth (1988) described above. As deeper profiles are considered, this "error" in measurement becomes smaller as a percent error. This observation also explains why it is often difficult to obtain statistical differences in total soil moisture among treatments if the profile depth considered is large.

Babalola, O. 1978. Field calibration and use of the neutron moisture meter on some Nigerian soils. *Soil Sci.* 126: 118–124.

Belcher, D. J., Cuykendall, T. R. and Sack, H. S. 1950. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma-ray scattering. *Tech. Dev. Rep.* 127. Civ. Aeron. Admin., Tech.

Dev. and Eval. Centre. Washington. DC. pp. 1–20.

Black, J. D. F. and Mitchell, P. D. 1968. Near surface soil moisture measurement with a neutron probe. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 34: 181–182.

Cannell, G. H. and Asbell, L. W. 1974. The effects of soil-profile variations and related factors on neutron moderation measurements. *Soil Sci.* 117: 124–127.

Chanasyk, D. S. and Naeth, M. A. 1988. Measurement of near-surface soil moisture with a hydrogenously shielded neutron probe. *Can. J. Soil Sci.* 68: 171–176.

Cotecchia, V., Inzaghi, A., Pirastru, E. and Ricchena, R. 1968. Influence of the physical and chemical properties of soil on measurements of water content using neutron probes. *Water Resour. Res.* 4: 1023–1028.

Douglas, J. E. 1966. Volumetric calibration of neutron moisture meters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 541–544.

Evelt, S. R. and Steiner, J. L. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 961–968.

Gardner, W. H. 1986. Water content. Pages 493–544 in A. Klute, ed. *Methods of soil analysis*. Part I. 2nd ed. Agronomy no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.

Gardner, W. and Kirkham, D. 1952. Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Sci.* 73: 391–401.

Gornat, B. and Goldberg, D. 1972. The relation between moisture measurements with a neutron probe and soil texture. *Soil Sci.* 114: 254–257.

Grant, D. R. 1975. Measurements of soil moisture near the surface using a neutron moisture meter. *J. Soil Sci.* 26: 124–129.

Greacen, E. L., Correll, R. L., Cunningham, R. B., Johns, G. G. and Nicholls, K. D. 1981. Calibration. Pages 50–57 in E. L. Greacen, ed. *Soil water assessment by the neutron method*. CSIRO. Australia.

Hanna, L. W. and Siam, N. 1980. The estimation of moisture content in the top 10 cm of soil using a neutron probe. *J. Agric. Sci.* 94: 251–253.

Harris, W. 1974. A method for improving the accuracy of measuring soil moisture near the surface with a neutron meter. ARC Letcombe Lab. Report for 1973. 56 pp.

Hauser, V. L. 1984. Neutron meter calibration and error control. *Trans. ASAE.* 27: 722–728.

Haverkamp, R., Vauclin, M. and Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: I. Local standpoint. *Soil Sci.* 137: 78–90.

Hewlett, J. D., Douglass, J. E. and Clutter, J. L. 1964. Instrumental and soil moisture variance using the neutron-scattering method. *Soil Sci.* 97: 19–24.

Karsten, J. H. M. and van der Vyver, C. J. 1979. The use of a neutron moisture meter near the soil surface. *Agrochemophysics* 11: 45–49.

Kristensen, K. J. 1973. Depth intervals and topsoil moisture measurement with the neutron depth probe. *Nordic Hydrol.* 4: 77–85.

Lawless, G. P., MacGillivray, N. A. and Nixon, P. R. 1963. Soil moisture interface effects upon readings of neutron moisture probes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27: 502–507.

Luebs, R. E., Brown, M. J. and Laag, A. E. 1968. Determining water content of different soils by the neutron probe method. *Soil Sci.* 106: 207–212.

Marais, P. G. and de V. Smit, W. B. 1962. Effect of bulk density and of hydrogen in forms other than free water on the calibration curve of the neutron moisture meter. *S. Afr. J. Agric. Sci.* 5: 225–238.

McHenry, J. R. 1963. Theory and application of neutron scatter-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ing in the measurement of soil moisture. *Soil Sci.* 95: 294–307.
- Merriam, R. A. and Knoerr, K. R.** 1961. Counting time required with neutron soil-moisture probes. *Soil Sci.* 92: 394–395.
- Mortier, P., DeBoodt, M., Donsercoer, W. and DeLeenheer, L.** 1960. The resolution of the neutron scattering method for soil moisture determination. *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci.* 1: 321–329.
- Naeth, M. A. and Chanasyk, D. S.** 1996. Influence of grazing on soil water regimes in the foothills fescue grasslands of Alberta, Canada. *J. Range Manage.* 48: 528–534.
- Nakayama, F. S. and Reginato, R. J.** 1982. Simplifying neutron moisture meter calibration. *Soil Sci.* 133: 48–52.
- Nixon, P. R. and Lawless, G. P.** 1960. Detection of deeply penetrating rain water with neutron-scattering moisture meter. *Trans. ASAE* 3: 5–8.
- Olgaard, P. L.** 1965. On the theory of the neutronic method for measuring the water content of soils. *Danish Atomic Energy Comm. Res. Est. Riso Rept.* 97.
- Parkes, M. E. and Siam, N.** 1979. Error associated with measurement of soil moisture change by neutron probe. *J. Agric. Eng. Res.* 24: 87–93.
- Pierpoint, G.** 1966. Measuring surface soil moisture with the neutron probe and a surface shield. *Soil Sci.* 101: 189–192.
- Rawls, W. J. and Asmussen, L. E.** 1973. Neutron probe field calibration for soils in the Georgia Coastal Plain. *Soil Sci.* 116: 262–265.
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J. and McKim, H. L.** 1980. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resour. Res.* 16: 961–979.
- Sharma, M. L. and Tunny, J.** 1972. Measuring soil moisture near the surface with the neutron subsurface probe. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 38: 221–223.
- Stone, J. F., Kirkham, D. and Read, A. A.** 1955. Soil moisture determination by a portable neutron scattering moisture meter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19: 419–423.
- van Bavel, C. H. M.** 1956. Neutron and gamma radiation applied to measuring physical properties of soils in its natural state. *Trans. 6th Intern. Congr. Soil Sci. B.* pp. 355–360.
- van Bavel, C. H. M., Nixon, P. R. and Hauser, V. L.** 1963. Soil moisture measurement with the neutron probe. *US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC. USDA-ARS-41-70.* 9 pp.
- Visvalingam, M. and Tandy, J. D.** 1972. The neutron method for measuring soil moisture content — A review. *J. Soil Sci.* 23: 499–511.



Can. J. Soil. Sci. Downloaded from www.nrcresearchpress.com by 193.43.158.229 on 10/15/16
For personal use only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Numerical Analysis of Neutron Moisture Probe Measurements

Jie Li¹; David W. Smith²; Stephen G. Fityus³; and Daichao Sheng⁴

Abstract: The neutron probe has proven to be an effective means for monitoring long term in situ soil moisture variations. However, it is difficult to experimentally correlate neutron probe data (i.e., neutron counts) with accurate estimates of absolute soil moisture content, particularly for unsaturated clay soils. In this paper, a numerical model based on multigroup neutron diffusion theory is employed to predict the distribution of neutron flux in a neutron probe system. The model discretizes the neutron energy spectrum into seven intervals, with energy-dependent diffusion coefficients and parameters for each energy interval. The finite element method is employed to solve the coupled seven-group neutron diffusion equations. It is demonstrated that the numerical results compare very well with both laboratory experimental results and field measurements. The theoretical approach to neutron probe calibration described herein offers significant time and cost savings over traditional calibration methods, and potentially opens up new applications for neutron probe monitoring.

DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)3:1(11)

CE Database subject headings: Calibration; Soil moisture; Finite element method; Numerical analysis; Measurement.

Introduction

The neutron-scattering method is widely used in agriculture, forestry, hydrology, and civil engineering, for measuring the water content of soil. The main advantages of the neutron method compared to the gravimetric method are (1) it is nondestructive, (2) it is fast, and (3) repeated measurements can be carried out in situ.

Although the neutron probe has proven to be a convenient and effective means for monitoring long-term in situ soil moisture variations (Schmugge et al. 1980; Silvestri et al. 1991), the experimental correlation of neutron probe data (i.e., neutron counts) with moisture contents to give accurate absolute values of moisture content is a difficult task, particularly for clay soils. Neutron probe counts in moist soils are influenced by the moisture content, soil elemental composition, soil density, and proximity of the probe to the water table and soil surface (Dickey 1990). Neutron counts are also influenced by the strength of the neutron source, the size and type of the neutron detector, the position of the detector relative to the source, and the size and type of access tube (Schmugge et al. 1980; Stone 1990). It has been shown that factory calibrations are often inaccurate (see, for example, Bell and McCulloch 1969; Rawls and Asmussen 1973; Vachaud et al.

1977; Carneiro and Jong 1985; Chanasyk and Naeth 1996). For example, Silvestri et al. (1991) found that the factory calibration curve supplied by the manufacturer was only applicable for sandy soil (with no significant amount of absorbing elements or organic materials), and only for volumetric water contents ranging from 0 to 33%. Calibration is therefore necessary for each type of soil, different types of access tube, and different measuring locations with respect to the soil surface and water table.

Calibration of a neutron probe involves correlating neutron counts with known volumetric water contents of the soil. Two experimental approaches are commonly employed: laboratory drum calibration, and in situ or field calibration. Laboratory calibrations are made by packing a drum of suitable dimensions with the soil having a range of known moisture contents, installing an access tube as used in the field, and measuring the neutron probe counts. The radius of the drum must be larger than the radius of influence of the neutron probe to prevent neutron leakage. The soil used in laboratory calibrations should have the same elemental composition and bulk density as the soil in the field. However, it is usually difficult to reproduce in a drum the soil fabric found in situ (IAEA 1970).

Field calibrations are accomplished by correlating the probe readings in an access tube installed in the field, with the estimated volumetric moisture contents of the soil along the tube (or possibly immediately adjacent to the tube). These comparisons have to be repeated at different times of the year, so as to sample the soil at different moisture contents. The volumetric moisture contents are usually estimated from gravimetric soil moisture content and soil density. However, it is often difficult to obtain representative soil samples from heterogeneous soil profiles. In addition, the soil moisture content in the field may vary rapidly with depth, significantly complicating the interpretation of neutron readings. Detailed descriptions of the laboratory and field calibrations can be found in Greacen (1981) and IAEA (1970).

Even though both laboratory and field calibrations are time consuming and labor-intensive, the results are not always satisfactory, especially for clay soils. Greacen (1981) indicated that early "calibration curves for clay soils" in the literature were

¹Dept. of Civil, Surveying and Environmental Engineering, Univ. of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia. E-mail: jilie@mail.newcastle.edu.au

²Dept. of Civil, Surveying and Environmental Engineering, Univ. of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia.

³Dept. of Civil, Surveying and Environmental Engineering, Univ. of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia.

⁴Dept. of Civil, Surveying and Environmental Engineering, Univ. of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, Australia.

Note. Discussion open until February 1, 2004. Separate discussions must be submitted for individual papers. To extend the closing date by one month, a written request must be filed with the ASCE Managing Editor. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 14, 2001; approved on March 5, 2002. This paper is part of the *International Journal of Geomechanics*, Vol. 3, No. 1, September 1, 2003. ©ASCE, ISSN 1532-3641/2003/1-11-20/\$18.00.

“almost invariably wrong.” The problem is further complicated for unsaturated expansive clay soils, due to the fact that both soil volume and density change as the in situ soil moisture content changes. Experimental investigations on various types of soil have shown that, in addition to the moisture content, the neutron probe reading depends mainly upon the dry bulk density of the soil (IAEA 1970).

In some circumstances, it is nearly impossible to obtain an experimental calibration. Morris and Williams (1990) discussed the attempted neutron probe calibration of fine-grained coal mine tailings first deposited as a slurry, and then sedimented and finally consolidated. They found that it was impractical to directly measure density profiles with depth as the majority of the tailings were too soft to sample. In another example, Elder and Rasmussen (1994) reported that the experimental calibrations were unsuitable for some geologic media, such as unsaturated tuff, due to the difficulty of extracting undisturbed samples for volumetric moisture content measurement.

Because the neutron probes can be so difficult to calibrate by experimental methods, it is desirable to develop an alternative and more reliable calibration method. The purpose of this study is to develop a generalized calibration method from first principles that can be used for all media. The method is based on a numerical model of the neutron probe system and on the elemental composition of the medium in which the neutron probe is used. The theory behind the model is known as “multigroup neutron diffusion theory” (Isbin 1963; Zweifel 1973; Iliffe 1982; Stacey 2001). The numerical model predicts the count rate for a neutron probe based on dry density, moisture content, and elemental composition of the soil, and the known geometry and size of the neutron detector and source, and strength of the neutron source.

Theoretical Background

Physical Phenomena Involved in Neutron Moisture Gauges

The neutron moisture gauge consists of a probe containing a source of fast (high-energy) neutrons that move radially outward from the source, a thermal neutron detector, and the associated electronic equipment necessary to supply power for the detector and to display the results. A gauge is illustrated in Fig. 1. Measurements with depth are made by lowering the probe down an access tube, usually made of either stainless steel or aluminum, to the required depths of measurement. Aluminum is generally the material of choice because it has the low absorption cross section for slow (thermalized) neutrons. Stainless steel tubes may have to be used if the soil is corrosive.

The neutron scattering method for measuring soil water content exploits neutron “thermalization behavior.” When the neutron probe is in the borehole, fast neutrons emitted by the source collide with the atomic nuclei of the surrounding medium. Each collision between a neutron and a nucleus results in a transfer of energy from the neutron to the nucleus. The average energy decrement per collision (ξ) is defined as (Glasstone and Edlund 1957; Weinberg and Wigner 1958)

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \quad (1)$$

where A = atomic mass of the impacted nucleus.

It can be seen from Eq. (1) that ξ is dependent only on the atomic mass of the impacted nucleus, and is independent of the initial energy of the neutrons. In other words, after each collision,

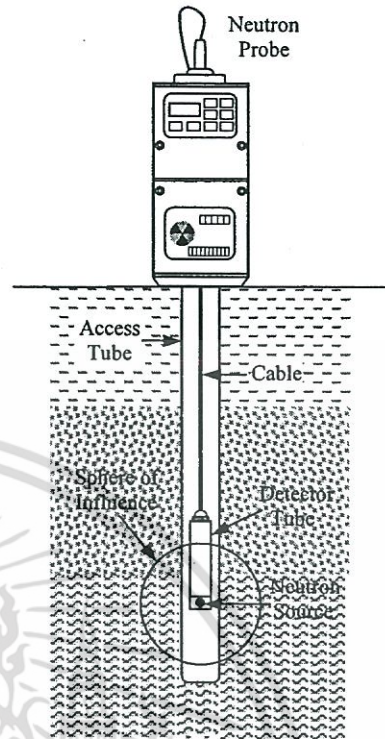


Fig. 1. Schematic of neutron gauge

the neutron always loses the same fraction of its energy. This fraction decreases with increasing atomic mass of the impacted nucleus. Using ξ , the average number of collisions required to convert fast neutrons with initial energy of E_0 , say, two million electron volts (MeV), to the thermal value of $E = 0.025$ electron volts (eV), can be calculated as follows (Glasstone and Edlund 1957; Gibson 1980):

Average number of collisions to thermalize fast neutrons (from 2 MeV to 0.025 eV)

$$\frac{\ln \frac{E_0}{E}}{\xi} = \frac{\ln \frac{2 \times 10^6}{0.025}}{\xi} = \frac{18.2}{\xi} \quad (2)$$

The results of a set of these calculations for a number of selected elements are given in Table 1. From the table, it can be seen that

Table 1. Number of Collisions Required to Thermalize a Fast Neutron for Selected Elements

Element	Atomic mass	ξ	Number of collisions
Hydrogen	1.008	1.00000	18
Deuterium	2.000	0.72500	25
Helium	4.003	0.42500	43
Lithium	6.940	0.26200	69
Beryllium	9.013	0.20600	88
Carbon	12.011	0.15800	115
Oxygen	16.000	0.12000	152
Sodium	22.991	0.08500	215
Iron	22.850	0.35400	514
Uranium	238.070	0.00838	2,172

hydrogen nuclei have a much greater thermalizing effect on fast neutrons than any other element. Since neutrons and hydrogen atoms have the same mass, fast neutrons are slowed down most effectively by collisions with hydrogen atoms, much like a billiard ball hitting a stationary ball of the same size and each moving away with equal speeds (one slowing down and the other speeding up). This is the fundamental reason why a neutron gauge can be employed to detect the proportion of water molecules present in a soil.

Neutron Sources

The radioisotope most commonly employed in moisture gauges is Americium-241. Americium undergoes decay to Neptunium, ejecting an alpha particle in the process. Beryllium, which is incorporated in the source, is bombarded by α particles and converted into carbon and "fast neutrons," according to the reaction



Most neutron probes also emit a low level of γ radiation. γ rays may arise from the radioisotope itself or from ${}^{12}_6\text{C}$ left in the excited state after conversion from beryllium (IAEA 1970). At present, the most widely used neutron source is ${}^{241}\text{Am}$ -Be because it produces a much lower level of γ radiation than a ${}^{226}\text{Ra}$ -Be source, and so needs very little shielding. With a half life of approximately 460 years, the ${}^{241}\text{Am}$ -Be source can be permanently sealed in a shielded container and maintain an effectively constant neutron production rate for many years.

Neutron Energy Spectrum

The fast neutrons from the radioactive source in a neutron probe possess a range of velocities and energies. For example, fast neutrons emitted from an Americium-241-Beryllium source have an initial energy of approximately 4.5 MeV. As the fast neutrons diffuse in the soil medium, they are slowed down and lose energy, mainly by elastic collisions with hydrogen nuclei (and to a lesser extent by absorption), and finally become "thermalized." Thermalization is the process whereby neutrons are slowed to the point where further collisions with hydrogen and other materials do not continue to slow the neutrons further (i.e., they are just as likely to gain energy as lose energy in collisions once thermalized).

It is important to note that neutron transport involves a spectrum of energy levels, scattering collisions, and absorption reactions (see next section). Fast neutrons are defined here as those having kinetic energies in excess of 2 eV, while slow neutrons are defined as those with kinetic energy below 2 eV. It should be noted that the slow neutrons may be further divided into two groups: "thermal neutrons" having energies from 0 to 0.5 eV, and so-called "epithermal neutrons" with energies between 0.5 and 2.0 eV (IAEA 1970).

Neutron Interactions and Cross Sections

Neutron interactions with the surrounding material can be classified as either absorption reactions or scattering interactions. Absorption is the process where a neutron enters a nucleus, thereby forming a new isotope in an excited state, which usually rapidly relaxes by emitting gamma radiation. Absorption reactions are strongly dependent on the neutron energy level. The absorption of fast neutrons can usually be neglected in ordinary soils since absorption rapidly decreases for energies above the thermal range.

In scattering interactions, the kinetic energy of a neutron is partially or completely transferred to the impacted nuclei in successive collisions through elastic or inelastic scattering. Reactions due to elastic scattering are by far the dominant mode of interaction of fast neutrons in soils (IAEA 1970).

Neutron interactions with atomic nuclei (whether scattering or absorption), can be quantitatively described through the use of the concept of *nuclear cross sections*. A cross section is defined as the probability of occurrence of a given type of nuclear interaction. The experimental determination of cross sections is based on the attenuation of a collimated neutron beam passing through a slab of material of finite thickness. Defining d as the distance through the slab in the direction of the beam, the number of neutrons varies with distance through the slab according to

$$I = I_0 e^{-\Sigma d} \quad (4)$$

where I_0 = initial neutron intensity; I = neutron intensity at distance d ; and Σ is called the "macroscopic cross section." The units of Σ are inverse length (usually cm^{-1}), because the exponent (Σd) has no dimension. The "microscopic cross section" denoted (σ) is obtained by dividing Σ by the number of element nuclei per unit volume, so σ has units of area. The unit usually used to describe nuclear reaction cross sections is the *barn*; one barn defined as 10^{-24} cm^2 .

The general equation describing the macroscopic cross section for a soil containing n different elements is

$$\Sigma = N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + \dots = \sum_{i=1}^n N_i \sigma_i \quad (5)$$

where N_i = number of atoms of element i per cm^3 of the medium and σ_i = its microscopic cross section at the specified energy level (and for the specified interaction; the designations σ_s and σ_a are used for scattering and absorption interactions, respectively). With Avogadro's number ($N_0 = 6.02 \times 10^{23}$), Eq. (5) can be rewritten more conveniently as

$$\Sigma = 6.02 \times 10^{-3} \rho \sum_{i=1}^n \frac{w_i \sigma_i}{A_i} \quad (6)$$

where A_i = atomic weight of the i th element (see Table 2); w_i = percentage weight of the i th element; and ρ = density of the medium in g/cm^3 .

In practically every case known, the microscopic cross section (σ) depends on the energy level of the neutrons. To illustrate this, the microscopic elastic scattering cross sections for hydrogen and oxygen are shown in Fig. 2. For these elements, elastic scattering cross sections are almost constant over the middle energy levels, but decrease at higher neutron energies (and may vary irregularly; see for example, oxygen), while at low energies scattering usually increases.

As noted previously, the absorption of fast neutrons can usually be neglected in ordinary soils since absorption rapidly decreases for energies above the thermal range. At low energy levels, absorption is approximately inversely related to the neutron velocity (i.e., σ_a is proportional to $1/v$). This behavior is often referred to as the "1/v law" (Iliffe 1982).

The theoretical determination of nuclear cross sections for scattering and absorption interactions is a complex problem, and so the cross sections are usually measured experimentally. A list of microscopic thermal absorption and microscopic scattering cross sections of the 20 most common elements in most soils is shown in Table 2 [data for other elements can be found in Stacey

Table 2. Microscopic Thermal Cross Sections (from Stacey 2001)

Element	Atomic mass A	$\sigma_a^{2,200}$ barn	$\bar{\sigma}_s$ barn
H	1.008	0.33200	20.49 ^a
Li	6.940	71.00000	1.40
B	10.820	755.00000	4.00
C	12.011	0.00373	4.80
N	14.008	1.88000	10.00
O	16.000	0.00020	4.20
Na	22.990	0.50500	4.00
Mg	24.320	0.06900	3.60
Al	26.980	0.24100	1.40
Si	28.090	0.16000	1.70
P	30.975	0.20000	5.00
S	32.066	0.52000	1.10
Cl	35.457	33.80000	16.00
K	39.100	2.07000	1.50
Ca	40.080	0.44000	3.00
Ti	47.900	5.80000	4.00
Mn	54.940	13.20000	2.30
Fe	55.850	2.62000	11.00
Co	58.940	38.00000	7.00
Cd	112.410	2,450.00000	7.00
H ₂ O	18.016	0.66400	—

^aFrom Mughabghab et al. (1981).

(2001)]. The 2,200 superscript represents the neutron velocity (v) when thermalized (i.e., at 0.025 eV, $v=2,200$ m/s).

Neutron Flux

The “neutron flux” ϕ is a very significant quantity in all studies concerning neutrons. For a prescribed energy level it is defined as (Glasstone and Edlund 1957)

$$\phi = n v \tag{7}$$

where n = neutron density (i.e., the number of neutrons per cubic centimeter) and v = neutron velocity (e.g., cm/s). Hence the units of neutron flux are (neutrons)(cm)/(cm³)(s), that is, neutrons/cm²-s (as is suggested by the name “neutron flux”). However, one should not be misled by the usual interpretation that the flux represents the number of neutrons crossing a unit area per unit time. This interpretation is correct only for a collimated beam (all neutrons traveling in one direction) with the unit area taken normal to the travel direction. In a neutron gauge sys-

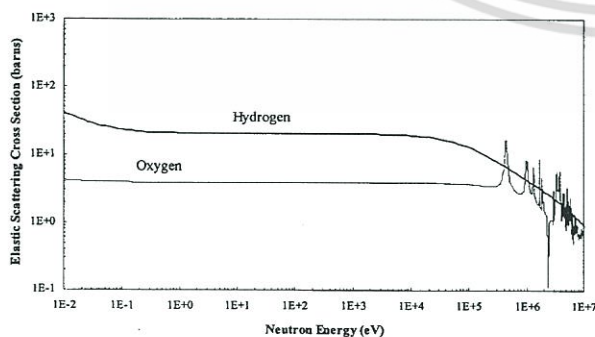


Fig. 2. Elastic scattering cross section of ¹H₁ and ¹⁶O₈ as function of neutron energy after Stacey (2001)

tem, the neutrons may travel in all directions. The general interpretation of the flux is that the product, $n v$, represents the sum of the distances traveled by all the neutrons in one second in a unit volume. This interpretation is independent of neutron direction.

Since neutron cross sections are energy-dependent, the neutron flux is often expressed as a function of energy. The total flux over the energy range E_1 to E_2 is then

$$\phi = \int_{E_1}^{E_2} n(E)v(E)dE = \int_{E_1}^{E_2} \phi(E)dE \tag{8}$$

where $n(E)$ defines the number of neutrons per unit volume per unit energy interval. Hence $n(E)dE$ is the number of neutrons per unit volume in the energy interval from E to $E + dE$.

Neutron Current

Another important quantity for describing neutron behavior is the neutron current J (also known as neutron current density). Using Fick’s law of diffusion, the net current of monoenergetic neutrons (i.e., neutrons of uniform energy) can be written as (Isbin 1963; Stacey 2001)

$$J = -D \text{ grad } \phi \tag{9}$$

where the neutron current vector J = net number of neutrons flowing in a given direction in unit time through a unit area normal to the direction of flow and D = diffusion coefficient.

It should be noted that the units of neutron flux and neutron current are the same (neutrons per square centimeter per second), but the neutron current is a vector quantity, while the neutron flux is a scalar quantity. Eq. (9) then implies that the diffusion coefficient has units of length (cm). When the energy spectrum of the neutrons is considered, the neutron current becomes a function of the energy, as does the neutron flux (ϕ) and neutron density (n).

Neutron Diffusion Equation

When neutrons have slowed to thermal energies, their spatial movement is quite similar to the diffusion of gases, except that their lifetime is limited by absorption (IAEA 1970). After high-energy neutrons are emitted by the source and diffuse outward through the soil, a fraction of the slow neutrons rebound back towards the probe and are absorbed by the nucleus of the gas in the detector, giving rise to a signal that, after processing, is known as the “neutron count.” The detector only measures slow neutrons.

It can be summarized that in a neutron moisture probe the fast, high-energy neutrons emitted from the source undergo simultaneously the processes of transport (diffusion) and slowing-down (thermalization). Therefore a model describing neutron moisture probe behaviors must take into account the complete energy spectrum of neutrons, from their initial fast state to their thermalized state. A straightforward and practical approach is to subdivide the continuous energy spectrum of all neutrons into a number of discrete energy groups so that each energy group can, to reasonable approximation, be treated as monoenergetic with constant parameters. A set of simultaneous diffusion equations then covers the whole neutron spectrum from fast down to thermal, a representation known as “multigroup diffusion theory” (Iliffe 1982).

For a given neutron energy group, the neutron balance (or conservation) equation under steady-state conditions is expressed as:

$$\overbrace{(-\nabla J)}^{\text{Leakage}} + \overbrace{(\sum_{s_i} \phi_i + \sum_{a_i} \phi_i)}^{\text{Sink}} = \overbrace{(\mathcal{S} \text{ or } \sum_{s_{i-1}} \phi_{i-1})}^{\text{Source}} \tag{10}$$

Downloaded from ascelibrary.org by King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang on 03/27/17. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.

From this neutron balance, the neutron diffusion equation for an n -group diffusion model can be written in the form

$$\left. \begin{aligned} D_1 \nabla^2 \phi_1 - \sum_{s1} \phi_1 - \sum_{a1} \phi_1 + S &= 0 & E_1 \geq E > E_2 \\ D_2 \nabla^2 \phi_2 + \sum_{s1} \phi_1 - \sum_{s2} \phi_2 - \sum_{a2} \phi_2 &= 0 & E_2 \geq E > E_3 \\ D_3 \nabla^2 \phi_3 + \sum_{s2} \phi_2 - \sum_{s3} \phi_3 - \sum_{a3} \phi_3 &= 0 & E_3 \geq E > E_4 \\ \dots & \dots & \dots \\ D_n \nabla^2 \phi_n + \sum_{s(n-1)} \phi_{n-1} - \sum_{a_n} \phi_n &= 0 & E_n \geq E \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

where S = high-energy neutron source term; D_i = diffusion coefficient for the i th energy group; \sum_{s_i} = slow-down cross section; \sum_{a_i} = macroscopic absorption cross section; and E_i = energy interval. The unknown quantities ϕ_i , are the neutron flux fields to be found [defined in Eq. (8)]. The groups are numbered from 1, for the highest energy, to n , for the lowest (i.e., thermal) energy. Clearly the larger the number of energy groups, the greater the accuracy, since one is attempting to represent the actual continuous energy distribution in a material by a finite number of discrete groups. In an index notation, Eqs. (11) are denoted

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ik} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) - a_{ik} \phi_k = -f_i \quad (12)$$

where the standard summation convention applies. a_{ik} = matrix of the slow-down and absorption cross sections. It is noted that the diffusion coefficient in Eq. (12) represents a constant (i.e., for an isotropic material), and is not a second order tensor quantity.

In its crudest approximation, "multigroup diffusion theory" reduces to a single group. Single group theory assumes that all diffusion and absorption of neutrons occur in a single energy, that is, at the thermal energy. Obviously, this model is not a good model for neutron probe analysis. The two-group diffusion model breaks the energy spectrum of neutrons into two separate groups (i.e., fast and thermal groups), while for the three-group theory, the fast neutrons are further split into an upper and lower fast groups. Analytical solutions to Eq. (11) or (12) are available for one-, two- and three-group diffusion theory, assuming a point source situated in an infinite homogeneous medium.

Two-group theory was used by Haahr and Olgaard (1965) to determine a so-called "sphere of importance." Olgaard (1965) also used three-group diffusion theory as an improvement on the two-group theory calculations and achieved reasonable agreement with some experimental measurements in various soil types. Based on the three-group model developed by Olgaard (1965), Elder and Rasmussen (1994) obtained a calibration equation between neutron counts and water content in an unsaturated tuff. The three-group approximation was also applied by Morris and William (1990) to develop a moisture content calibration for coal mine tailings.

While these solutions have served to assist in neutron probe calibration, the assumptions made in deriving the analytic solutions clearly ignore the access tube geometry, probe and detector geometry, the spatially variable soil composition, and the boundary conditions encountered in practice.

In this study, a numerical model based on seven-group diffusion theory has been developed to give a better physical description of the problem and to improve upon previous results. Seven-group diffusion theory (whose upper and lower energy limits are given in Table 3), was found to be sufficiently accurate to describe neutron slowing down and diffusion in a neutron gauge. As

Table 3. Upper and Lower Energy Limits E_i Used in Numerical Model

Group	Upper limit	Lower limit
1	4.5 MeV	4.0 MeV
2	4.0 MeV	3.0 MeV
3	3.0 MeV	2.0 MeV
4	2.0 MeV	1.0 MeV
5	1.0 MeV	0.1 MeV
6	0.1 MeV	1.44 eV
7	1.44 eV	$5kT_n^a$ eV

^a T_n is the neutron temperature.

far as the writers are aware, this is the first time a seven-group diffusion theory has been applied to a neutron probe analysis.

Calculation of Diffusion Coefficient, Slow-down, and Absorption Cross Sections

To solve the neutron diffusion Eq. (11), the diffusion coefficients D_i , the slow-down cross sections \sum_{s_i} , and the absorption cross section \sum_{a_i} have to be first estimated. As mentioned previously, absorption rapidly decreases for energies above the thermal energy. Therefore absorption of fast neutrons can be neglected in moisture gauge studies with little loss in accuracy.

By assuming that the thermal neutrons are distributed according to the Maxwell-Boltzmann distribution law (because the thermal neutrons behave like an ideal gas) and that all absorbers follow the "1/v law," then the absorption cross section for the thermal neutrons is found to be (Olgaard 1965)

$$\sum_a = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sum_a^{2,200} \sqrt{\frac{293}{T_n}} \quad (13)$$

where $\sum_a^{2,200}$ and T_n = total macroscopic absorption cross section of the medium corresponding to a neutron velocity of 2,200 m/sec and the neutron temperature, respectively. T_n is obtained from the following relation (Weinberg and Wigner 1958):

$$T_n = T_m \left(1 + 0.92 \frac{\sum_a^{2,200}}{\sum_{s/A}} \sqrt{\frac{293}{T_m}} \right) \quad (14)$$

It can be seen that the neutron temperature is always higher than the physical temperature, T_m (in °K), of the medium in which neutrons diffuse, and this difference is dependent on the macroscopic absorption cross section of the medium. $\sum_a^{2,200}$ may be calculated based on the experimentally estimated microscopic cross sections given in Table 2, viz,

$$\sum_a^{2,200} = n_{H_2O} \sigma_{a,H_2O}^{2,200} + \sum_1^n n_i \sigma_{a,i}^{2,200} \quad (15)$$

where n_i and n_{H_2O} = number of atoms of a specific chemical element and the number of water molecules per cubic centimeter respectively. n_i is defined as

$$n_i = \frac{6.02 \times 10^{23}}{A_i} \times \rho_s \times \frac{w_i}{100} \quad (16)$$

where ρ_s = dry density of the soil and A_i = atomic mass given in Table 2. The mass percentage of the i th element w_i is usually determined from the chemical analysis of the soil material. If the volume fraction of water in the soil (in percent of the total volume) is equal to V_w , n_{H_2O} is given by (Olgaard 1965)

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{18.016} \times \rho_w \times \frac{V_w}{100} \quad (17)$$

The density of water ρ_w shown in Eq. (17) is a function of water temperature t_m in degrees centigrade. This relationship is taken to be

$$\rho_w = 0.9998 + 6.296 \times 10^{-5} t_m - 8.201 \times 10^{-6} t_m^2 + 4.826 \times 10^{-3} t_m^3 \quad (18)$$

For the calculation of the thermal neutron temperature [Eq. (14)], a value of Σ_s/A may be estimated using the following formula

$$\Sigma_s/A = n_{\text{H}_2\text{O}}(2\bar{\sigma}_{s,H}/A_H + \bar{\sigma}_{s,O}/A_O) + \sum_{i=1}^n n_i \bar{\sigma}_{s,i}/A_i \quad (19)$$

For thermalized neutrons, both the macroscopic scattering and absorption cross sections are important. The macroscopic thermal scattering cross sections of the soil elements are calculated with the assumption that the microscopic scattering cross sections of all elements in the material are independent of neutron energy; but the contribution to $\Sigma_s(1-\bar{\mu})$ from water is assumed to be dependent on the neutron temperature [see Eq. (20)]. This is expressed by

$$\Sigma_s(1-\bar{\mu}) = 2.156 \times \left(0.047 + 0.953 \sqrt{\frac{293}{T_n}} \right) \times \rho_w \frac{v_w}{100} + \sum_{i=1}^n n_i \bar{\sigma}_{s,i} \left(1 - \frac{2}{3A_i} \right) \quad (20)$$

Once the macroscopic absorption and scattering cross sections have been determined, the macroscopic transport cross section of the medium Σ_{tr} and the thermal diffusion coefficient D_{th} are calculated using (IAEA 1970)

$$\Sigma_{tr} = \Sigma_s(1-\bar{\mu}) + \Sigma_a \quad (21)$$

$$D_{th} = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} \quad (22)$$

For fast neutrons, the scattering interaction is of primary importance (i.e., absorption is small and so neglected). The slow-down cross sections are determined using (Ilfie 1982)

$$\Sigma_{sl_i} = \frac{(\xi \Sigma_s)_i}{\ln(E_i/E_{i+1})} \quad (23)$$

The product $\xi \Sigma_s$ is called the "macroscopic slowing down power" and given by

$$(\xi \Sigma_s)_i = n_{\text{H}_2\text{O}}[2(\bar{\xi} \sigma_{s,H})_{H,i} + (\bar{\xi} \sigma_{s,O})_{O,i}] + \sum_{j=1}^n n_j (\bar{\xi} \sigma_{s,j})_{j,i} \quad (24)$$

where Σ_{s_i} = macroscopic cross section for scattering. Considering the forward biases from the "center of mass correction" and the anisotropic scattering, the energy-dependent expressions for $\bar{\xi}$ and $\bar{\mu}$ are taken to be (Weinberg and Wigner 1958) for $0.07A^{2/3} \leq 0.2$

$$\bar{\mu} = \frac{2}{3A} + 0.07A^{2/3}E \left(1 - \frac{3}{5A^2} \right) \quad (25)$$

$$\bar{\xi} = \xi - 0.21A^{2/3}E \times \left(\frac{\xi}{a} - 0.5 \right) \quad (26)$$

for $0.07A^{2/3} > 0.2$

$$\bar{\mu} = \frac{2}{3A} + 0.2 \left(1 - \frac{3}{5A^2} \right) \quad (27)$$

$$\bar{\xi} = \xi - 0.6 \times \left(\frac{\xi}{a} - 0.5 \right) \quad (28)$$

Fast group constants Σ_{tr} and D_i are now obtained from

$$\Sigma_{tr} = [\Sigma_s(1-\bar{\mu})]_i = n_{\text{H}_2\text{O}}\{2[\sigma_s(1-\bar{\mu})]_{H,i} + [\sigma_s(1-\bar{\mu})]_{O,i}\} + \sum_{j=1}^n n_j [\sigma_s(1-\bar{\mu})]_{j,i} \quad (29)$$

$$D_i = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} \quad (30)$$

The fast microscopic scattering cross sections (σ_s) for each energy group, can be estimated using the figures in Hughes and Schwartz (1958) or Mughabghab et al. (1981). As noted previously and from the cross-section curves given in Hughes and Schwartz (1958), it can be seen that the cross sections for fast neutrons may vary in a highly irregular way with energy level, having many high sharp peaks. If required, more accurate cross-section data can be obtained from the *MIRANDA* code developed by the Australian Nuclear Science and Technology Organization (Robinson and Harrington 1998), which contains the cross-section library for all elements over the 200 energy groups (covering the range 15.5 MeV to 1×10^{-5} eV) based on the U.S. data file *ENDF/B-VI*.

Material Interface and Boundary Conditions

In order to solve the general governing Eq. (11) or (12), the following material interface and boundary conditions need to be specified.

Interface Between Two Different Media

At an interface between two media with different diffusion properties (for example, between the detector and soil or between two different soils), both neutron flux and neutron net current must be continuous across the interface. If two media are denoted by the symbols *A* and *B*, then the required boundary conditions for neutrons with a particular energy range are simply,

$$\phi_A = \phi_B \quad (31)$$

$$J_A = J_B \quad (32)$$

Soil-Atmosphere Boundary

At the top surface of a soil profile, there is a flow of neutrons out of the surface but there is practically no flow from the atmosphere back into the surface. The correct boundary condition is clearly that there are no neutrons returned from the atmosphere to the soil (Fig. 3). Generally, the net neutron current *J* represents the balance between the currents in the positive (outward) and negative (inward) directions; according to neutron diffusion theory these are defined as

$$J_{\text{out}}^+ = \frac{\phi_i}{4} - \frac{1}{2} \vec{n} \cdot (D_i \nabla \phi_i) \quad (33)$$

$$J_{\text{in}}^- = \frac{\phi_i}{4} + \frac{1}{2} \vec{n} \cdot (D_i \nabla \phi_i) \quad (34)$$

where ϕ_i and D_i = neutron flux and the diffusion coefficient for the *i*th energy group, respectively. The difference between these

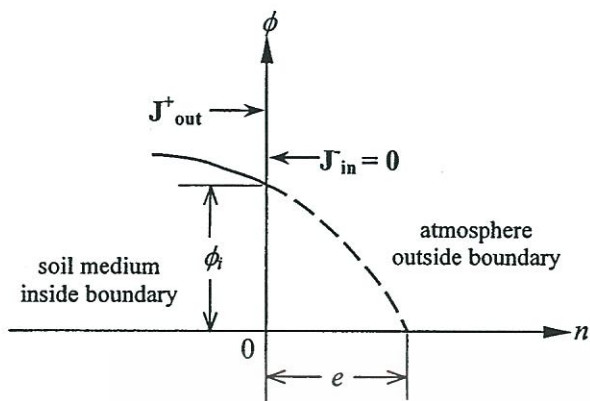


Fig. 3. Interface between soil and atmosphere

two components gives the net neutron current, in agreement with Eq. (9). Since there is no scattering back of neutrons from the air into the soil medium, the negative component of the neutron current for all seven energy groups is zero and so

$$J_{in}^+ = \frac{\phi_i}{4} + \frac{1}{2} \vec{n} \cdot (D_i \nabla \phi_i) = 0 \quad (35)$$

Since the flux ϕ_i at the boundary is positive, the flux gradient ($\nabla \phi_i$) must be negative, as indicated schematically in Fig. 3. Therefore if the neutron flux is extrapolated into the air, as shown in Fig. 3, it will vanish at some distance e beyond the boundary. It can be seen that modeling the response of a neutron gauge is a complex problem. Analytical solutions are possible only for the very simplest cases, and consequently numerical methods need to be adopted. Given that the problem geometry may be irregular, that there may be multiple materials with varying properties, and a range of different types of boundary conditions, it is apparent that solving the neutron diffusion equations is ideally suited to the finite element method.

Numerical Model

Finite Element Formulation

The governing differential equation for multigroup neutron diffusion with boundary conditions can be written as

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{lk} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) + a_{lk} \phi_k &= f_l & \text{in } \Omega \\ n_i \left(D_{lk} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) + q_{lk} \phi_k &= g_l & \text{on } \partial\Omega \\ h_{lk} \phi_k &= r_l & \text{on } \partial\Omega \end{aligned} \quad (36)$$

where Ω = domain and $\partial\Omega$ = boundary of the domain. The second equation is referred to as a generalized Neumann boundary condition, and the third equation as a Dirichlet boundary condition. For two-dimensional or axisymmetric problems the space index i ranges from 1 to 2. The component indices k and l range from 1 to N ; where N is the number of coupled second-order partial differential equations; and n_i is the i th component of the outward normal vector.

Eq. (36) is solved using the finite element spatial discretization procedure. Without restricting the generality, we assume general-

ized Neumann conditions on the whole boundary. Multiplying an arbitrary test function v by Eq. (36) and applying Gauss's theorem, we find

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left[\left(D_{lk} \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v}{\partial x_i} + a_{lk} \phi_k v \right] dx + \int_{\partial\Omega} q_{lk} \phi_k v ds \\ = \int_{\Omega} f_l v dx + \int_{\partial\Omega} g_l v ds \end{aligned} \quad (37)$$

This equation defines the weak or variational form of the governing differential equation. Obviously, any solution of the differential equation is also a solution of the variational problem. In order to obtain the weak solution of Eq. (37), we need to project the weak form of the differential equation onto a finite dimensional function space (i.e., a set of continuous, piecewise linear functions on a triangulation τ of the domain Ω). Introducing the space discretization

$$\phi_k(x) \approx \sum_{I=1}^{N_p} \psi_{I,k} N_I(x) \quad (38)$$

where N_I = shape functions; $\psi_{I,k}$ = nodal values of the unknown; and N_p = number of nodes in an element. By setting the test functions v equal to the shape function N_j in Eq. (37), we obtain a system of equations in matrix form as

$$(C + A + Q)\psi = F + G \quad (39)$$

where

$$C_{(j,l),(l,k)} = \sum_{\tau} \int_{\tau} D_{lk} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial N_J}{\partial x_i} dx \quad (40)$$

$$A_{(j,l),(l,k)} = \sum_{\tau} \int_{\tau} a_{lk} N_I N_J dx \quad (41)$$

$$Q_{(j,l),(l,k)} = \sum_{\partial\tau} \int_{\partial\tau} q_{lk} N_I N_J ds \quad (42)$$

$$F_{(j,l)} = \sum_{\tau} \int_{\tau} f_l N_J dx \quad (43)$$

$$G_{(j,l)} = \sum_{\partial\tau} \int_{\partial\tau} g_l N_J ds \quad (44)$$

The sign Σ indicates the summation over all elements, and ψ is an $N_p N$ -vector containing the numbers $\psi_{l,k}$

$$\psi = [\psi_{1,1} \psi_{2,1} \dots \psi_{N_p,1} \psi_{1,2} \psi_{2,2} \dots \psi_{N_p,2} \dots \psi_{1,N} \dots \psi_{N,N}]^T \quad (45)$$

The solution of Eq. (39) results in a set of nodal flux values for each neutron energy group in the domain of interest.

Two-Dimensional Model

The source, detector and surrounding soils were modeled in an axisymmetric geometry as shown in Fig. 4. This geometry is a reasonable representation of the physical arrangement of modern neutron moisture gauges. The volume of the soil shown in Fig. 4 exceeds the radius of influence of the neutron probe since the effective volume "sensed" by a neutron probe is approximately a sphere of radius 20 to 70 cm, increasing with decreasing moisture content (because at low water contents, the fast neutrons have to travel greater distances to undergo scattering interactions and so become thermalized).

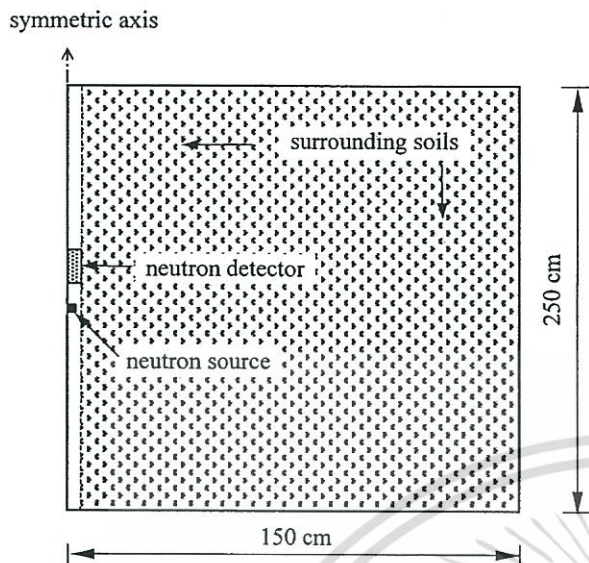


Fig. 4. Cylindrical system used for numerical analysis (not to scale)

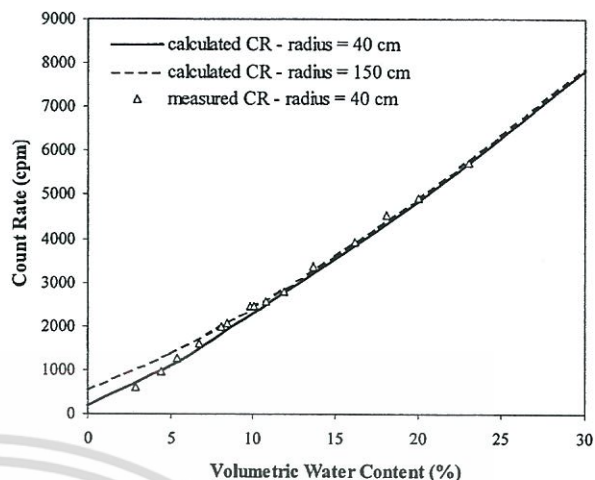


Fig. 5. Count rate as function of water volume percent for Borris soil—comparison of results predicted by numerical model with experimental results

The two-dimensional axisymmetric finite element analysis was carried out to calculate the thermal flux distribution in the system. A total of 4,073 three-node triangular elements were used in the analysis.

In order to include the effect of the detector in the analysis, the detector was treated as a separate region. The detector is usually a gas with a very large absorption cross section. The most widely used detector gases are ^3He and $^{10}\text{BF}_3$. Their thermal absorption cross sections may be estimated from the following equation:

$$\sum_{a,D} = \frac{0.6023 \times 10^{24}}{22.41 \times 10^3} \frac{p}{760} \frac{273}{T_D} \frac{E}{100} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_a^{2,200} \times 10^{-24} \sqrt{\frac{293}{T_n}} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \quad (46)$$

where p = pressure of the gas in the detector (in mm Hg); T_D = detector temperature (in degrees kelvin); E = percentage of the detector gas in the detector; and T_n = neutron temperature. For the $^{10}\text{BF}_3$ -filled and ^3He -filled proportional counters, $\sigma_a^{2,200}$ may be taken as 3,813 and 5,330 barns, respectively.

It should be noted that the effects of the access tube and absorption in the neutron source are not taken into account in this study. Although the numerical approach described here could include these effects, it is believed that their influences on neutron flux at the detector are insignificant (at least for the aluminum access tubes considered here).

Once the distribution of the thermal neutron flux, ϕ_{th} , in the neutron detector (as shown in Fig. 4) is known, the gauge response (i.e., the number of counts or neutrons detected in a given time) can be obtained by integrating $\phi_{th} \sum_{a,D}$ over the volume of the detector. That is, by evaluating

$$\text{CR} = \int_v \phi_{th} \cdot \sum_{a,D} \cdot T \cdot dv \quad (47)$$

where CR = count rate and T = count period in seconds.

Verification of Numerical Model Using Laboratory Experimental Results

In order to verify the validity of the seven-group neutron diffusion model, the numerical results were first checked against laboratory experimental results available in the literature.

The experimental data used for verification purposes were extracted from Olgaard (1965). Neutron probe experiments were conducted on different types of Danish soil by the Agricultural Department at the Riso Establishment, Roskilde, Denmark. Measurements were performed in a steel drum that was 80 cm in diameter and 100 cm in height. For each soil type, measurements were carried out at different water contents. Using the soil elemental composition given in Olgaard (1965), the count rates as function of water volume percent for Borris soil were predicted by the numerical model. It is noted that Borris soil is described as a "loamy sand" type of soil. The actual source-detector geometry of the Danish study (i.e., a source situated at the midline and just outside the detector) was used in the analysis. The source strength was 79,000 neutrons per second. The results are plotted against the experimental data in Fig. 5. As can be seen from Fig. 5, when the radius of the cylindrical system in the numerical model (see Fig. 4) was reduced from 150 to 40 cm, the predicted count rates agreed very well with the measured values. It is interesting to note that for water contents less than approximately 8%, the calculated count rates are larger than the experimental values. The reason for the discrepancy is that the size of the drum container used in the experiments was too small to prevent neutron leakage out of the container. Similar conclusions about neutron leakage in small-diameter containers at low water contents have been also reported by other researchers (Olgaard 1965; Olgaard and Haahr 1967; Elder and Rasmussen 1994).

Verification of Numerical Model Using Field Experimental Results

Soil and Site Description

The site selected for a field study is located on grassed rangeland some 10 km west of the city of Newcastle, Australia. The soil

Table 4. Composition of Dried Maryland Soils by Mass Percent

Element	Depth= 0.45 m	Depth= 1.25 m
H	0.30000	0.38000
Li	0.00166	0.00167
B	0.00600	0.00480
C	0.64000	0.41000
N	0.09000	0.12000
O	54.17000	52.51000
Na	0.32000	0.56000
Mg	0.50000	0.55000
Al	8.26000	8.64000
Si	30.87000	30.20000
P	0.01300	0.01300
S	0.09000	0.09000
Cl	0.00500	0.04600
K	1.21000	2.06000
Ca	0.04000	0.03000
Ti	0.37000	0.37000
Mn	0.00500	0.00500
Fe	3.10000	4.10000
Co	~0.00000	~0.00000
Cd	~0.00000	~0.00000

profile across the site is relatively uniform and can be generally described as 250 mm silty clay topsoil underlain by high plasticity clay to a depth of approximately 1.2 m, then a medium plastic silty clay to approximately 1.8 m, where highly weathered siltstone is encountered. The Maryland site classification for reactivity following the Australian Standard for Residential Slab and Footings (AS 2870 1996) is H (i.e., highly reactive, with a predicted open uncovered ground movement ranging between 40 and 70 mm). The instrumentation installed at the site includes: automatic weather station, surface movement probes, subsurface movement probes, neutron probe, gypsum blocks, in situ filter paper devices, thermocouples, and piezometers. Detailed description of the testing site can be found in Fityus et al. (2003).

Chemical Composition of Maryland Soils

In order to carry out the numerical analysis, it is necessary to first know the elemental composition of the soil with depth. A total of 14 chemical analyses of the soils at different depths over a 3 m interval were carried out. Before the analysis, the soil samples were dried at 105°C. Typical results of the chemical analyses for two depths are listed in Table 4. The list shows the mass percent of each element. It should be noted that the oxygen content in Table 4 was estimated by subtracting the sum of the percentages of all other elements from 100.

As can be seen from Table 4, about half the elemental weight is oxygen (which occurs as metal and silicon oxides). Oxygen is thus the main contributor to the scattering cross section (other major contributors are Si, Al, and Fe).

The macroscopic scattering and absorption cross sections are calculated from the elemental composition of the soil. The calculation involves a summation of microscopic cross sections over all elements in the soil.

Neutron Instruments

The neutron probe used in this study is a Campbell Pacific Nuclear Model 503 Hydroprobe. Fast neutrons are generated by

the probe using a 50 mCi (1.85 GBq) Americium-241-Beryllium source, with a strength of 111,000 neutrons per second. A helium-3 filled proportional counter detector of 13.2 cm in length and 2.54 cm in diameter is used to detect thermalized neutrons. The neutron source is situated 3 cm below the detector. The commercial neutron probe was not modified in any way for the research work described herein.

Access Tubes

Aluminum access tubes of 53 mm external diameter and 1.9 mm wall thickness were used in this study. Because of the low thermal cross section of aluminum ($\sigma_a=0.23$ b and $\sigma_s=1.4$ b, see Table 2), it was considered that aluminum casings would have little effect on the neutron flux. All access tubes are sealed at the bottom. When not in use, the top end of the tube is covered with a cap to prevent the ingress of rain and debris.

Field Measurement

In order to calibrate the neutron probe readings with volumetric moisture contents, the soil moisture contents need to be measured independently. To do this, thin-walled steel tubes, 120 mm in length and 48 mm in diameter, were used to obtain soil samples from the experimental site. Each tube had a sharpened outward-facing edge to allow easy penetration of the soil. To minimize disturbance, the thin-walled steel tubes were pushed into the soil at a constant penetration rate. After being removed from the ground, the ends of the thin-walled sample tube were wax sealed, and then immediately sealed in an air tight jar to maintain the soil moisture content. The soil volumetric and gravimetric moisture contents and the soil density were determined on each soil sample following standard geotechnical practices.

After the last sample was obtained, an aluminum access tube was installed in the center of the core. The neutron probe was then lowered in the tube and count rates were measured at the same depths where the soil samples had been recovered.

The neutron counts of 16-s duration were taken in this study. The counting time interval of 16-s was chosen because it gave sufficiently precise readings in acceptable period of time after comparison with 32-, 64-, and 256-s counts.

Comparison of Numerical and Field Experimental Results

The results predicted by the numerical model were compared with the field observations at the Maryland site. The test site, approximately 80 m \times 25 m, was divided into five distinct zones for study: an open area, a naturally grassed, tree affected area, a 10 m \times 10 m area with an unloaded flexible cover, and a 10 m \times 10 m area covered by a loaded reinforced concrete slab. Since 1994, the soil moisture content has been monitored at these zones by the neutron probe method.

The numerical model was used to predict the neutron counts with depth for the open area, based on the system geometry defined in Fig. 4 and the chemical analysis of the soils at different depths. The soil bulk density and volumetric moisture contents were determined from the field measurement by the thin-walled steel tube method. The calculated count rate variation with depth is plotted in Fig. 6. It can be seen that very good agreement is obtained between the numerical analyses and the field measurements.

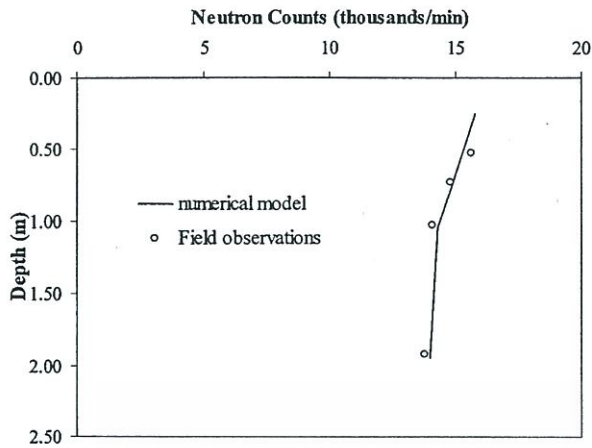


Fig. 6. Count rate variation with depth—comparison of results predicted by numerical model and Maryland field measurements

Conclusions

In this study, a numerical model based on multigroup diffusion theory has been developed to predict the neutron flux distribution in a neutron probe system. Neutron counts predicted by the neutron diffusion model are found to agree favorably with the measured data at a field site. The numerical results also compare very well with the experimental results available in the literature. It is believed that a calibration between neutron counts and moisture content for soils (including unsaturated expansive soil) can be accurately estimated using the proposed numerical model with a minimum of experimental effort. The establishment of a calibration relationship requires that the chemical composition of the soil be determined, and the geometry of the source-detector system be known. The numerical analysis also indicates that large containers are necessary for laboratory calibration to prevent neutrons leaking into the air surrounding the container, and so may be of assistance for laboratory calibration procedures.

An apparent disadvantage of the numerical model is the requirement of a complete elemental analysis of the soil. However, this analysis is now comparatively straightforward using modern analytical chemical methods (e.g., using high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry, HR-ICPMS), and is much easier than performing an experimental calibration on soils.

This research has shown that the proposed numerical model is capable of describing the response of a neutron moisture gauge to a degree of sophistication that has not been achieved previously. It is believed that the utilization of a model such as the one described here can lead to a much better understanding of the distribution of neutron flux in a neutron probe system for any geometry and soil type under a variety of environmental conditions. This greater capacity for interpretation of probe data may open up new applications for the neutron probe. For example, it may be possible to use the neutron probe to monitor rising salt (i.e., sodium chloride) in a groundwater system.

Acknowledgment

This research has been carried out with financial support from the Mine Subsidence Board of New South Wales.

References

- AS 2870. (1996). "Residential slab and footings-construction." Standards Australia, Sydney.
- Bell, J. P., and McCulloch, J. S. C. (1969). "Soil moisture estimation by the neutron method in Britain." *J. Hydrol.*, 7, 415–433.
- Carneiro, C., and Jong, E. D.E. (1985). "In situ determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique." *Soil Sci.*, 139(3), 250–254.
- Chanasyk, D. S., and Naeth, M. A. (1996). "Field measurement of soil moisture using neutron probes." *Can. J. Soil Sci.*, 76, 317–323.
- Dickey, G. L. (1990). "Factors affecting neutron gauge calibration." *Proc., National Conf. ASCE Irrigation and Drainage Division*, ASCE, New York, 9–20.
- Elder, A. N., and Rasmussen, T. C. (1994). "Neutron probe calibration in unsaturated tuff." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 1301–13071.
- Fityus, S. G., Smith, D. W., and Allman, M. A. (2003). "An expansive soil test site near Newcastle." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, in press.
- Gibson, W. M. (1980). *The physics of nuclear reactions*, Pergamon, Oxford, England.
- Glasstone, S., and Eddlund, M. C. (1957). *The elements of nuclear reactor theory*, D. Van Nostrand Company, Princeton, N.J.
- Greacen, E. L. (1981). *Soil water assessment by the neutron method*, CSIRO Publication, East Melbourne, Victoria, Australia.
- Haahr, V., and Olgaard, P. L. (1965). "Comparative experimental and theoretical investigations of the neutronic method for measuring the water content in soil." *Symposium on the Use of Isotopes and Radiation in Soil-Plant Nutrition Studies*, Ankara, Turkey, IAEA, Vienna, Austria, 129–147.
- Hughes, D. J., and Schwartz, R. B. (1958). *Neutron cross sections BNL-325*, Brookhaven National Laboratory, N.Y.
- Iliffe, C. E. (1982). *An introduction to nuclear reactor theory*, Manchester University Press, Manchester, England.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (1970). *Neutron moisture gauges: A guide-book on theory and practice*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Isbin, H. (1963). *Introduction to nuclear reactor theory*, Reinhold, N.Y.
- Morris, P. H., and William, D. J. (1990). "Generalized calibration of a nuclear moisture/density depth gauge." *Geotech. Test. J.*, 13, 24–35.
- Mughabghab, S. F., Divadeenam, M., and Holden, N. E. (1981). *Neutron cross sections, Vol. 1, Part A.*, Academic, N.Y.
- Olgaard, P. L. (1965). "On the theory of the neutronic method of measuring the water content in soil." *Riso Rep. No. 97*, Danish Atomic Energy Commission, Copenhagen, Denmark.
- Olgaard, P. L., and Haahr, V. (1967). "Comparative experimental and theoretical investigations of the DM neutron moisture probe." *Nucl. Eng. Des.*, 5, 311–324.
- Rawls, W. J., and Asmussen, L. E. (1973). "Neutron field calibration for soils in the Georgia coastal plain." *Soil Sci.*, 116(4), 262–265.
- Robinson, G. S., and Harrington, B. V. (1998). "AUS98—The 1998 version of the AUS modular neutronics code system, ANSTO/E734." Australian Atomic Energy Commission, Research Establishment, Lucas Heights, New South Wales, Australia.
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J., and McKim, H. L. (1980). "Survey of methods for soil moisture determination." *Water Resour. Res.*, 16(16), 961–979.
- Silvestri, V., Sarkis, G., Bekkouche, N., Soulie, M., and Tabib, C. (1991). "Laboratory and field calibration of a neutron depth moisture gauge for use in high water content soils." *Geotech. Test. J.*, 14(1), 64–70.
- Stacey, W. M. (2001). *Nuclear reactor physics*, Wiley, New York.
- Stone, J. F. (1990). "Neutron physics considerations in moisture probe design." *Proc., National Conf. ASCE Irrigation and Drainage Division*, ASCE, New York, 1–8.
- Vachaud, G., Royer, J. M., and Cooper, J. D. (1977). "Comparison of methods of calibration of a neutron probe by gravimetry or neutron-capture model." *J. Hydrol.*, 34, 343–356.
- Weinberg, A. M., and Wigner, E. P. (1958). *The physical theory of neutron chain reactors*, University of Chicago Press, Chicago.
- Zweifel, P. F. (1973). *Reactions physics*, McGraw-Hill, New York.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

