การวัดปริมาณความชื้นในวัสดุก่อสร้างบางชนิดโดยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน

นายเฉลิมเดช เฉลิมลาภอัศดร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-000-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013799

I 10300181

MEASUREMENT OF THE MOISTURE CONTENT IN SOME CONSTRUCTION MATERIALS BY NEUTRON BACK SCATTERING

Mr. Chalermdej Chalermlapassadol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-569-000-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดปริมาณความชื้นในวัสดุก่อสร้างบางชนิดโดยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน
โดย	นายเฉลิมเดช เฉลิมลาภอัศดร
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธัชชัย สุมิตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธัชชัย สุมิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เฉลิมเดช เฉลิมลาภอัศดร : การวัดปริมาณความชื้นในวัสดุก่อสร้างบางชนิดโดยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน (MEASUREMENT OF THE MOISTURE CONTENT IN SOME CONTRUCTION MATERIALS BY NEUTRON BACK SCATTERING) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ธัชชัย ลุ่มมิตร, 160 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบการวัดความชื้นโดยใช้หลักการกระเจิงกลับของนิวตรอน โดยอาศัยหลักการที่นิวตรอนเร็วลดพลังงานลงเมื่อชนกับนิวเคลียส์ของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นปริมาณนิวตรอนช้าที่มีจึงขึ้นกับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุนั้น ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างโปรบวัดความชื้นซึ่งประกอบด้วยต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ความแรง 1.11×10^9 เบคเคอเรล (30 มิลลิคูรี) และหัววัดนิวตรอนพลังงานต่ำแบบโบรอนไตรฟลูออไรด์ ขนาด 2.5 ซม. ∅ ยาว 26.5 ซม. โปรบวัดเป็นแบบพื้นผิวขนาด 13x37x8 เซนติเมตร^3 น้ำหนัก 2.73 กิโลกรัม ใช้กับเครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้ว นอกจากนี้ยังมีส่วนกำบังรังสีเวลาเคลื่อนย้าย ขนาด 13x37x6 เซนติเมตร^3 หนัก 2.51 กิโลกรัม สามารถประกอบติดกับส่วนของโปรบและปิดด้วยกุญแจเพื่อป้องกันต้นกำเนิดรังสีสูญหายเมื่อเกิดอุบัติเหตุ นอกจากนั้นยังได้สร้างภาชนะบรรจุโปรบมีน้ำหนัก 27.8 กิโลกรัม เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีระหว่างการเดินทางไปทดสอบภาคสนาม

ได้ทำการทดลองกับวัสดุ 2 ชนิด คือ อิฐมอญ และดินลูกรัง ในกรณีของอิฐมอญได้กราฟปรับเทียบของอิฐมอญซึ่งมีลักษณะเส้นโค้ง ในช่วงความชื้น 3-37% แต่เพื่อสะดวกต่อการใช้งานจึงปรับเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ช่วง 3-14% และ 10-37% ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการทดสอบ เนื่องจากข้อกำหนดมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ได้กำหนดค่าความชื้นไม่เกิน 30% ส่วนการวัดความชื้นในดินลูกรังได้กราฟปรับเทียบเป็นเส้นตรง ในช่วงความชื้น 5-14% ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานวัดความชื้นในช่วงการบดอัดในการสร้างถนน ซึ่งอยู่ในช่วง 7-10% เส้นกราฟทั้งสองจึงมีความสะดวกต่อการใช้งานเมื่อต้องการทราบความชื้นอย่างรวดเร็ว โดยนำโปรบวางลงบนวัสดุเพื่อนับรังสีประมาณ 400 วินาที แล้วนำมาอ่านปริมาณความชื้นจากเส้นกราฟปรับเทียบได้ ในการทดสอบภาคสนามบริเวณก่อสร้างทางพบว่า เมื่อวัดดินที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับที่ใช้ปรับเทียบจะมีความแตกต่างระหว่างค่าความชื้นที่อ่านจากกราฟกับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานพอสมควร

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

CHALERMDEJ CHALERMLAPASSADOL : MEASUREMENT OF THE MOISTURE CONTENT IN SOME CONSTRUCTION MATERIALS BY NEUTRON BACK SCATTERING. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. TATCHAI SUMITRA, Dr.Ing. 160 pp.

This thesis is result of research and development of a neutron moisture gauge using back scattering principle. Fast neutrons slow down when interact with hydrogen nuclei in the water nolecules, thus slow neutron flux is proportional to the water content in the material. A surface-type moisture probe was designed and assembled. A 1.11 GBq (30 mCi) Am-Be neutron source and a 2.5 cm ϕ, 26.5 cm long BF_3 detector were used. The probe weighs about 2.73 kg with the dimensions of 13 cm x 37 cm x 8 cm. A Shield with the dimensions of 13 cm x 37 cm x 6 cm and 2.51 kg weight, could be locked to the probe for safety reason to prevent the loss of neutron source in case of accident. The container used for transporation is about 27.8 kg in weight.

Two types of construction materials, i.e., bricks and lateritic soil-aggregates were investigated. For bricks, the probe can measure water content within the range of 3-37%. Two linear calibration curves, i.e., 3-14% and 10-37% were prepared to facilitate the use in practice. For soil-aggregates, water content of 5-14% could be measured. Measuring time was about 400 s. Field test indicated that there were strong correlations between the neutron moisture gauge reading and the convertional method, when the type of soil-aggregates were similar.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกท่านที่ได้เริ่มและสนับสนุนการศึกษาวิจัย เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของภาควิชา ซึ่งระยะแรกผู้เขียนได้มีส่วนในการช่วยเหลือต่อมาได้รับการสนับสนุนให้เป็นวิทยานิพนธ์เพื่อศึกษาให้ละเอียดขึ้น รองศาสตราจารย์ดร.รัชชัย สุมิตร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำและแก้ปัญหาทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านปฏิบัติ ตลอดจนให้กำลังใจอย่างดีจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ผู้ช่วยศาสตราเรศร์ จันทน์ขาว ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำและแก้ปัญหาต่างๆ ทั้งทางด้านวิชาการและปฏิบัติการอย่างมาก

ขอขอบพระคุณนายช่างและเจ้าหน้าที่จากกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคมที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทั้งทางวิชาการ สถานที่ และร่วมทดสอบและส่งผลการทดลองมาให้ ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

คุณลิขิต ขาวเธียร ผู้เชี่ยวชาญงานก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงแผ่นดิน

คุณบุญชวน ลิ่มศิรา นายช่างผู้ควบคุมโครงการก่อสร้างสะพานลอย กม.28 กรมทางหลวงแผ่นดิน

คุณวันชัย สุทธิสมภพ หัวหน้าฝ่ายทดสอบดินโครงการก่อสร้างสะพานลอย กม.28 กรมทางหลวงแผ่นดิน

คุณสุรชัย จิตธินะกุล หัวหน้าหน่วยควบคุมและแนะนำโครงการรามอินทรา-มีนบุรี-ร่มเกล้า กรมทางหลวงแผ่นดิน

คุณวินัด สังข์มาลา หัวหน้าฝ่ายทดสอบดินโครงการรามอินทรา-มีนบุรี-ร่มเกล้า กรมทางหลวงแผ่นดิน

ขอขอบคุณ คุณเกียรติศักดิ์ วรรณพงษ์ คุณวิรวัฒน์ นาคย้อย เจ้าหน้าที่ควบคุมห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทดลองบางอย่างและข้อมูลทางวิชาการ

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางอิเล็กทรอนิคส์ ภาควิชานิวเคลียร์-เทคโนโลยีที่ช่วยเหลือในด้านซ่อมอุปกรณ์บางส่วนที่ชำรุด

ขอขอบคุณ คุณเรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์ เพื่อนนิสิตที่ได้ช่วยเหลือการทดลองในห้องปฏิบัติการบางส่วน

ขอขอบคุณ คุณสุทธิพงศ์ กองสมบัติสุข เพื่อนนิสิตที่เอื้อเฟื้อรถยนต์เพื่อนำอุปกรณ์ต่างๆไปปฏิบัติการยังนอกสถานที่

ขอขอบคุณ คุณจินตนา รัตนชัยเจริญ ที่ช่วยเหลือในด้านการพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยและสมาคมนิสิตเก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ นี้

และท้ายสุดนี้ผู้เขียนเองขอแสดงความกตัญญูกตเวทิตาคุณพ่อ และคุณแม่ ผู้ซึ่งให้ชีวิต ความเมตตา ความอบอุ่น ทั้งกายและใจ และสนับสนุนต่อการทำวิทยานิพนธ์ของผู้เขียนมาตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 2

2. อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร

2.1 นิวตรอน..... 3

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน..... 3

2.3 อันตรกิริยาของนิวตรอน..... 4

2.4 ภาคตัดขวาง..... 6

2.5 วัสดุสำหรับลดความเร็ว..... 8

2.6 นิวตรอนฟลักซ์..... 8

2.7 การกระเจิงของนิวตรอน..... 9

2.8 หลักการวัดความชื้นด้วยรังสีนิวตรอน..... 14

3. การวัดความชื้นด้วยนิวตรอน

3.1 การจัดอุปกรณ์วัดความชื้น..... 16

3.2 ความหนาและพื้นที่วิกฤต..... 17

3.3 การปรับเทียบเครื่องวัดความชื้นด้วยนิวตรอน..... 18

3.4 ความคลาดเคลื่อน..... 19

3.5 หัววัดนิวตรอนช้า..... 20

4. วิธีดำเนินการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

4.1 วิธีดำเนินการทดลอง..... 23

4.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

4.3.1 การหาศักดาไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสมของหัววัดรังสีนิวตรอนช้า... 26

4.3.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดนิวตรอน..... 27

4.3.3 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างระนาบของหัววัดนิวตรอนและต้นกำเนิดนิวตรอนกับชิ้นงานที่ต้องการวัดความชื้น..... 28

4.3.4 ศึกษาการเพิ่มปริมาณรังสีสะท้อนโดยการลดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูง..... 30

4.3.5 การประกอบต้นแบบโปรบวัดความชื้นระดับพื้นผิวแบบหัวเดี่ยว..... 32

4.3.6 ศึกษาความหนาและพื้นที่วิกฤตของอิฐมอญ..... 33

4.3.7 การสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นในอิฐมอญกับจำนวนนับรังสี..... 36

4.3.8 การทดสอบความถูกต้องของการใช้อุปกรณ์วัดความชื้นกับการวัดความชื้นในอิฐมอญ..... 38

4.3.9 ศึกษาความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของดินลูกรัง..... 38

4.3.10 การสร้างกราฟปรับเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างดินลูกรังกับจำนวนนับรังสี..... 39

4.3.11 การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้อุปกรณ์วัดความชื้นกับการวัดความชื้นในดินลูกรัง..... 44

4.3.12 การออกแบบและสร้างโปรบวัดความชื้นพร้อมภาชนะบรรจุสำหรับการขนย้ายและกำบังรังสี..... 44

4.3.13 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรบวัดความชื้นที่ประกอบขึ้นกับชุดนับรังสีในห้องปฏิบัติการ..... 45

4.3.14 ประกอบโปรบวัดความชื้นเข้ากับเครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้วหรือชุดวัดความชื้นในงานภาคสนาม..... 46

4.3.15 การทดสอบภาคสนามในงานสร้างทางโดยชุดวัดความชื้นในงานภาคสนาม..... 48

5. ผลการทดลอง

5.1 การทดลองการหาศักดาไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสมของหัววัดรังสีนิวตรอนช้า..... 54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน..... 55

5.3 การศึกษาหาระยะห่างระหว่างระนาบของหัววัดรังสีนิวตรอน และต้นกำเนิดรังสีกับชิ้นงานที่ต้องการวัดความชื้น..... 55

5.4 การศึกษาการเพิ่มปริมาณรังสีสะท้อนโดยการลดพลังงาน ของนิวตรอนพลังงานสูง..... 58

5.5 การประกอบต้นแบบโปรบวัดความชื้นระดับพื้นผิวแบบหัวเดี่ยว..... 60

5.6 การศึกษาความหนาและพื้นที่วิกฤตของอิฐมอญ..... 60

5.7 การสร้างกราฟปรับเทียบของอิฐมอญ..... 62

5.8 การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้อุปกรณ์วัดความชื้น กับการวัดความชื้นในอิฐมอญ..... 68

5.9 การศึกษาความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของดินลูกรัง..... 70

5.10 การสร้างกราฟปรับเทียบของตัวอย่างดินลูกรัง..... 71

5.11 การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้อุปกรณ์วัดความชื้น กับการวัดความชื้นในดินลูกรัง..... 74

5.12 การออกแบบและสร้างโปรบวัดความชื้นพร้อมภาชนะบรรจุโปรบ สำหรับการขนย้ายและกำบังรังสี..... 75

5.13 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรบวัดความชื้นที่ประกอบขึ้น กับชุดนับรังสีในห้องปฏิบัติการ..... 79

5.14 การประกอบโปรบวัดความชื้นเข้ากับเครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้ว..... 80

5.15 การทดสอบภาคสนามต่องานสร้างทางโดยชุดวัดความชื้น ในงานภาคสนาม..... 82

6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง..... 86

6.2 ข้อเสนอแนะ..... 87

เอกสารอ้างอิง..... 89

ภาคผนวก.....

ก. ตารางผลการทดลองการสร้างกราฟปรับเทียบของอิฐมอญ..... 92

ข. ตารางผลการทดลองการศึกษาความหนาวิกฤตและพื้นที่วิกฤตของดินลูกรัง..... 96

ค. ตารางผลการทดลองการสร้างกราฟปรับเทียบของตัวอย่างดินลูกรัง..... 100

ง. การคำนวณหาขนาดของโปรบวัดความชื้นและภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้น..... 102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

จ. ข้อกำหนดมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
สำหรับอิฐดินเผา (อิฐมอญ)..... 110
ฉ. วิธีมาตรฐานการทดสอบสำหรับการวัดความชื้นของดินโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์
ตามวิธีของ ASTM..... 113
ช. วิธีมาตรฐานการหาปริมาณความชื้นของดินตามวิธีของ ASTM..... 118
ซ. วิธีมาตรฐานการหาปริมาณความชื้นของดินตามวิธีของ JIS..... 120
ฌ. วิธีมาตรฐานการหาปริมาณความชื้นของดินตามวิธีของ DIN..... 123
ญ. วิธีมาตรฐานการหาปริมาณความชื้นของดินตามวิธีของ BS..... 124
ฎ. ลักษณะภาชนะบรรจุดินลูกรังเพื่อทดสอบหาความชื้นโดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์
ตามวิธีของ JIS..... 127
ฏ. อิฐและผลิตภัณฑ์ดิน..... 128
ฐ. คุณสมบัติของอิฐ..... 137
ฑ. ระบบการจำแนกประเภทของดิน..... 139
ฒ. การจำแนกดินทางวิศวกรรม..... 147
ณ. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน..... 153
ประวัติผู้เขียน..... 160

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ในงานภาคสนาม	4
2.2	Collision Parameters ของนิวเคลียสบางชนิด	14
5.1	จำนวนนับรังสีที่ศักดาไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ	54
5.2	จำนวนนับรังสีสุทธิ เมื่อวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ	55
5.3	ผลของวัสดุรองรับต่อการวัดความชื้น	61
5.4	ผลการนับรังสีในการหาความหนาและพื้นที่วิกฤตของอิฐมอญที่ความชื้น 29.66%	61
5.5	ผลการนับรังสีในการหาความหนาและพื้นที่วิกฤตของอิฐมอญที่ความชื้น 19.03%	62
5.6	ข้อมูลนับรังสีเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในอิฐมอญ	62
5.7	เปรียบเทียบผลการวัดความชื้นด้วยนิวตรอนเมื่อใช้กราฟปรับเทียบแบบเส้นโค้งและแบบเส้นตรง	66
5.8	ผลการตรวจสอบการวัดความชื้นในอิฐมอญด้วยอุปกรณ์วัดความชื้นด้วยนิวตรอน	68
5.9	ตัวอย่างจำนวนนับรังสีแต่ละรูปแบบของตัวอย่างดินลูกรังในกะบะ	70
5.10	ข้อมูลของจำนวนนับรังสีเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างดินลูกรังเพียงบางข้อมูล	72
5.11	ผลการตรวจสอบการวัดความชื้นในตัวอย่างดินลูกรังด้วยอุปกรณ์วัดความชื้นด้วยรังสีนิวตรอน	74
5.12	การตรวจสอบการวัดความชื้นในตัวอย่างดินลูกรังด้วยโปรบวัดความชื้นที่ประกอบขึ้นใหม่	80
5.13	การตรวจสอบเมื่อประกอบโปรบวัดความชื้นกับเครื่องนับรังสีแบบกระเบ๊าหิ้ว	81
5.14	การใช้ชุดวัดความชื้นในงานภาคสนาม	83

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ	6
2.2	ภาคตัดขวางรวมต่ออะตอมไฮโดรเจนของน้ำ สำหรับพลังงานของนิวตรอนในช่วง 0.002 ถึง 100 eV	7
2.3	ภาคตัดขวางรวมของนิวตรอนสำหรับไฮโดรเจน ในช่วงพลังงาน 0.01 ถึง 100 eV	8
2.4	การชนแบบยืดหยุ่นของนิวตรอน	10
2.5	เวคเตอร์ของโมเมนตัม	10
3.1	แผนภาพแสดงอุปกรณ์วัดความชื้นบริเวณพื้นผิว	16
3.2	แผนภาพแสดงอุปกรณ์วัดความชื้นในระดับลึก	16
3.3	แผนภาพแสดงความหนาและพื้นที่วิกฤตของอุปกรณ์วัดความชื้น ระดับลึกและพื้นผิว	17
3.4	ภาคตัดขวางของเส้นผ่าศูนย์กลางสำหรับการวัดปริมาณความชื้นต่างๆกัน (มาตรส่วน 1:30)	18
3.5	แผนภาพแสดงส่วนประกอบของหัววัดนิวตรอนช้าชนิดหลอด BF_3	21
3.6	กราฟแสดงระหว่างภาคตัดขวางกับพลังงานสำหรับปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^7Li$	22
4.1	หัววัดนิวตรอนช้า	24
4.2	ชุดนับรังสีที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ	24
4.3	เครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้วพร้อมแบตเตอรี	25
4.4	เครื่องชั่งทั้ง 2 ขนาดที่ใช้ในการทดลอง	26
4.5	ชุดนับรังสีในห้องปฏิบัติการพร้อมหัววัดนิวตรอนช้า (BF_3) วางบนแผ่นพาราฟินควบคู่กับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน	27
4.6	(ก) ลักษณะการวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนและหัววัดรังสีนิวตรอนบนแผ่นพาราฟิน (ข) ตำแหน่งที่วางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน	29
4.7	การจัดอุปกรณ์การทดลองหาระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสี-หัววัด-ชิ้นงาน	30
4.8	(ก) การจัดระบบวัดโดยใช้นิวตรอนพลังงานสูง (ข) การจัดระบบวัดโดยลดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูงก่อน	31
4.9	โครงสร้างและรายละเอียดของต้นแบบโปรบวัดความชื้นระดับพื้นผิว	33
4.10	การนับรังสีในอากาศโดยยกโปรบวัดความชื้น สูงจากพื้นห้อง 30 เซนติเมตร	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	การจัดอุปกรณ์นับรังสีและโครงเหล็กสูงจากพื้นห้องประมาณ 80 เซนติเมตร ในภาพเป็นการวัดแบคกราวนด์	35
4.12	การจัดเรียงอิฐมอญ 1 ชั้นในแต่ละรูปแบบ	36
4.13	การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อการสร้างกราฟปรับเทียบของอิฐมอญ	37
4.14	กะบะดินซึ่งสามารถจัดดินเป็นขนาดต่างๆ (มองจากด้านบน)	39
4.15	รูปแบบของภาชนะใช้สำหรับปรับเทียบ	41
4.16	การชั่งน้ำหนักภาชนะปรับเทียบซึ่งบรรจุดินลูกรัง	42
4.17	การนับจำนวนนับรังสีของตัวอย่างดินลูกรังในภาชนะปรับเทียบ	43
4.18	การนับจำนวนนับรังสีของแผ่นพาราฟินที่ใช้เป็นมาตรฐานตรวจสอบ	43
4.19	การตรวจสอบอุปกรณ์การนับรังสีของชุดวัดความชื้นที่ใช้ในภาคสนาม	47
4.20	การทดสอบดินลูกรังด้วยชุดวัดความชื้นในงานภาคสนาม	47
4.21	แผนภาพจุดที่วัดความชื้นของโครงการก่อสร้างสะพานลอย กม.28	48
4.22	การวัดความชื้นที่โครงการก่อสร้างสะพานลอย กม.28	49
4.23	แผนภาพจุดวัดความชื้นแต่ละแนวถนนในโครงการ รามอินทรา-มีนบุรี-ร่มเกล้า	50
4.24	บริเวณก่อสร้างทางโครงการรามอินทรา-มีนบุรี-ร่มเกล้า	51
4.25	การวัดความชื้น ณ จุดที่ 2	51
4.26	การวัดความชื้น ณ จุดที่ 3	52
4.27	การขุดและเจาะเพื่อการวัดความหนาแน่นและเก็บตัวอย่างดิน	52
4.28	การแทนที่ตัวอย่างทรายในหลุมที่ขุดเพื่อการวัดความหนาแน่น	53
4.29	การเก็บตัวอย่างดินจากหลุมที่ขุดเพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น	53
5.1	จำนวนนับรังสีนิวตรอนเมื่อวางต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ	56
5.2	ผลของระยะห่างระหว่างระนาบของหัววัดรังสีและต้นกำเนิดรังสี กับแผ่นพาราฟิน	57
5.3	ผลเปรียบเทียบการวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่างวิธีการใช้ต้นกำเนิดนิวตรอน พลังงานสูงโดยตรงและการลดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูงบางส่วนก่อน	59
5.4	ต้นแบบโปรบวัดความชื้นที่ประกอบขึ้น	60
5.5	กราฟปรับเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของอิฐมอญกับจำนวนนับรังสี	64
5.6	กราฟปรับเทียบความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น ในอิฐมอญกับจำนวนนับรังสีนิวตรอน	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.7	ภาชนะปรับเทียบพร้อมฐานรองไม้	71
5.8	กราฟปรับเทียบระหว่างเปอร์เซนต์ความชื้นของตัวอย่างดินลูกรัง กับจำนวนนับรังสี	73
5.9	โปรบวัดความชื้นที่ประกอบเสร็จ (เฉพาะส่วนของการวัด : ต้นกำเนิดรังสี-หัววัดรังสี)	77
5.10	โปรบวัดความชื้นที่ประกอบเสร็จทั้งชุด (ส่วนของการวัดและส่วนล่างที่ใช้กำบังรังสี)	77
5.11	ภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้นในส่วนของการบรรจุโปรบ	78
5.12	ภาชนะบรรจุโปรบวัดความชื้นพร้อมฝาปิด	78
5.13	โปรบวัดความชื้นและภาชนะบรรจุโปรบ	79
5.14	ชุดวัดความชื้นที่ใช้ในงานภาคสนาม: เครื่องนับรังสีแบบกระเป๋าหิ้ว, แบตเตอรี, โปรบวัดความชื้น และภาชนะบรรจุโปรบ	82
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่อ่านจากโปรบ กับวิธีมาตรฐาน	84