

การพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษอัดก้อน  
โดยใช้การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา

นางสาวสุทธมณี ไชยจันทร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE TO DETERMINE MOISTURE CONTENT  
IN WASTE PAPER BALE USING FAST NEUTRON AND GAMMA-RAY TRANSMISSION

Miss Suthamane Chaiyakhan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษอัด
	ก้อนโดยใช้การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา
โดย	นางสาวสุทธมณี ไชยจันทร์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. สมบูรณ์ รัศมี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

.....กรรมการ  
(ดร. พรรณี แสงแก้ว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# # 5670434121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: FNGT / WASTE PAPER BALE / MOISTURE CONTENT

SUTHAMANEE CHAIYAKHAN: DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE TO DETERMINE MOISTURE CONTENT IN WASTE PAPER BALE USING FAST NEUTRON AND GAMMA-RAY TRANSMISSION. ADVISOR: SOMBOON RASSAME, Ph.D., 105 pp.

The technique of Fast Neutron and Gamma-ray Transmission, FNGT to measure the moisture content in the waste paper bale has been developed in this study. Initially, to investigate the applicability of this technique, the MCNP5 program was applied to simulate the FNGT measurement setup for moisture meter in the paper bale of  $80 \times 90 \times 60 \text{ cm}^3$  in size. The calculated results present that if the moisture content in a paper bale increases by 30% then, the neutron flux and gamma flux will decrease by 50% and 70 %, respectively. Consequently, it was represented that the technique of FNGT has a potential to use as the moisture content measurement in a waste paper bale. To select the optimized condition of paper bale size to perform the experiments, the MCNP5 simulation is used to simulate the FNGT measurement system with paper bales of  $90 \times 90 \times 90$ ,  $30 \times 30 \times 30$  and,  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  in size. Although, the paper bale of  $90 \times 90 \times 90 \text{ cm}^3$  in size gives the highest sensitivity of neutron flux variation to moisture change, but the paper bale of  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  in size is chosen to perform the tests due to the experimental setup simplicity. The FNGT to measure moisture content in the waste paper bale was setup with varied test conditions of moisture contents and density of waste paper bale. The Cs-137 and Am-241/Be isotopes are used as the gamma and neutron source in the experiment. The intensity of gamma and neutron are measured using the neutron and gamma survey meter to determine the moisture contents in waste paper bale comparing with the estimated by the oven-heat technique. The general test results indicate that both moisture and density can affect to neutron attenuation while the attenuation of gamma depends merely on the density of waste paper bale. Finally, the equation to represent the relation between the moisture content in the wasted paper bale and the attenuation term of neutron and gamma ratio is developed in this study based on the experimental results.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตารางและรูปภาพ.....	9
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	14
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	16
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 คุณสมบัติของรังสีแกมมา.....	20
2.1.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา.....	20
2.1.2 การทะลุผ่านของรังสีแกมมา.....	23
2.2 คุณสมบัติของนิวตรอน.....	24
2.2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอน.....	24
2.2.2 ภาคตัดขวางของอันตรกิริยา (Cross Section).....	27
2.3 เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและแกมมา (Fast Neutron and Gamma-ray Transmission).....	29
2.4 กระบวนการมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method).....	32
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย.....	39

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....	39
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย .....	46
3.2.1 การ Run โปรแกรม MCNP5 .....	47
3.2.2 การออกแบบระบบวัดเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอน เร็วและรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP5 .....	52
3.2.3 การทดลองโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษ กระดาษอัดก้อนที่มีความชื้นต่างๆ .....	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย .....	64
4.1 จำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนขนาดทั่วไปที่ใช้ ในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรม MCNP เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ .....	64
4.2 การออกแบบระบบวัดที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่าน นิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม MCNP .....	70
4.3 ผลการทดลองใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาวัดความชื้นในมัดเศษ กระดาษอัดก้อน .....	79
4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการส่งผ่านรังสีและผลการทดลองที่ได้จากปฏิบัติการ ทดลอง .....	85
4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับเทคนิคอื่นๆ .....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	92
รายการอ้างอิง .....	96
ภาคผนวก .....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	105



## สารบัญตารางและรูปภาพ

ตารางที่ 1 ชนิดของนิวตรอนและพลังงาน.....	24
ตารางที่ 2 หน่วยที่ใช้ในการกำหนดข้อมูลขาเข้า.....	33
ตารางที่ 3 MCNP Surface cards.....	35
ตารางที่ 4 การระบุ Tally และความหมาย.....	37
ตารางที่ 5 นิวไคลด์ที่ใช้ในการจำลองการส่งผ่านรังสี.....	52
ตารางที่ 6 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีควบคุมความหนาแน่นตัวอย่าง .....	56
ตารางที่ 7 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีควบคุมความชื้นของตัวอย่าง.....	57
ตารางที่ 8 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีไม่ควบคุมทั้งความชื้นและความหนาแน่น .....	57
ตารางที่ 9 ผลการคำนวณความชื้นจากเทคนิค FNGT เทียบกับความชื้นที่ประเมินได้จากวิธีการ อบกระดาษ .....	84
รูปที่ 1-1 ตัวอย่างมัดเศษกระดาษและการประเมินขนาด .....	14
รูปที่ 2-1 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก .....	20
รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการเกิดโฟโตอิเล็กทริกกับพลังงานของรังสีแกมมา.....	21
รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\mu$ กับพลังงานของรังสีแกมมา.....	22
รูปที่ 2-4 การเกิดอิเล็กตรอนคู่.....	22
รูปที่ 2-5 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน.....	22
รูปที่ 2-6 แผนภาพแสดงการทะลุผ่านรังสีแกมมา.....	23
รูปที่ 2-7 อันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น .....	24
รูปที่ 2-8 อันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น .....	25
รูปที่ 2-9 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน .....	25
รูปที่ 2-10 อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ.....	26
รูปที่ 2-11 อันตรกิริยาการผลิตนิวตรอน.....	26
รูปที่ 2-12 อันตรกิริยาการผลิตนิวตรอน.....	27

รูปที่ 2-13 การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา.....	29
รูปที่ 2-14 อันตรกิริยานิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ.....	32
รูปที่ 2-15 ตัวอย่างลักษณะการกำหนดข้อมูลขาเข้า.....	33
รูปที่ 2-16 ตัวอย่างการป้อนข้อมูลส่วนคำสั่งนิยามเซลล์.....	34
รูปที่ 3-1 เครื่องสำรวจรังสีแกมมา/นิวตรอน Ludlum รุ่น 2363 และรุ่น M42-41L PLESCILA .....	39
รูปที่ 3-2 แผ่นแคดเมียมหนา 0.1 ซม.....	40
รูปที่ 3-3 แผ่นยางผสมโบรอนหนา 0.4 ซม.....	40
รูปที่ 3-4 แผ่นอะคริลิกหนา 1 ซม.....	41
รูปที่ 3-5 หัววัดรังสีแกมมาชนิดซินทิลเลชัน โซเดียมไอโอไดต์ (ทัลเลียม).....	41
รูปที่ 3-6 กระจาดชุกฟูกที่ตัดให้มีขนาด 15 ซม. x 15 ซม. ....	42
รูปที่ 3-7 เบ้าอัดกระจาด.....	42
รูปที่ 3-8 เครื่องอัด รุ่น HP 100.....	43
รูปที่ 3-9 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.2 ซม. ....	43
รูปที่ 3-10 สายรัดพลาสติก .....	44
รูปที่ 3-11 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น DS-708 ของ TS SCALE .....	44
รูปที่ 3-12 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น FEJ-1500A ของ CST .....	45
รูปที่ 3-13 ตู้อบ Heraeus VT5042 EK vacuum oven.....	45
รูปที่ 3-14 เครื่องวัดความชื้น รุ่น MD916 .....	46
รูปที่ 3-15 MCNP Visual editor .....	47
รูปที่ 3-16 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ด .....	47
รูปที่ 3-17 MCNP Visual editor หน้า Input file .....	48
รูปที่ 3-18 ขั้นตอนการ Run โปรแกรม (1).....	48
รูปที่ 3-19 ขั้นตอนการ Run โปรแกรม (2).....	49
รูปที่ 3-20 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ดด้วยโปรแกรม Command Prompt (1).....	49

รูปที่ 3-21 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ดด้วยโปรแกรม Command Prompt (2).....	50
รูปที่ 3-22 โปรแกรม Command Prompt ขณะ Run ข้อมูล.....	50
รูปที่ 3-23 ไฟล์ Output .....	51
รูปที่ 3-24 แบบจำลอง MCNP5 ภาคตัดขวางระนาบ xz .....	53
รูปที่ 3-25 แบบจำลองระบบวัดแบบ 3 มิติ กับตัวอย่าง ขนาด 80x90x60 ลบ.ซม.....	54
รูปที่ 3-26 แบบจำลอง MCNP5 ภาคตัดขวางระนาบ xz .....	55
รูปที่ 3-27 แบบจำลองระบบวัดแบบ 3 มิติ กับตัวอย่างมัดเศษกระดาศ ขนาด 15x15x15 ลบ.ซม.....	56
รูปที่ 3-28 กระดาศลูกฟูกที่ซื้อจากผู้ผลิต.....	58
รูปที่ 3-29 กระดาศลูกฟูกที่ตัดให้มีขนาด 15x15 ตร.ซม.....	58
รูปที่ 3-30 ตัวอย่างกระดาศที่เตรียมให้มีน้ำหนักเท่ากัน.....	59
รูปที่ 3-31 ตัวอย่างมัดเศษกระดาศ.....	60
รูปที่ 3-32 การอัดก้อนตัวอย่างมัดเศษกระดาศ.....	60
รูปที่ 3-33 การจัดระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว.....	61
รูปที่ 3-34 แผนภาพการจัดระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว.....	61
รูปที่ 3-35 การจัดระบบวัดการส่งผ่านรังสีแกมมา .....	62
รูปที่ 3-36 แผนภาพการทำงานของระบบวัดการส่งผ่านรังสีแกมมา.....	63
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Phi_{n0}/\Phi_{nx})$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่น .....	65
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Phi_{s0}/\Phi_{sx})$ ของรังสีแกมมากับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่น .....	65
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Phi_0/\Phi_x)$ กับความหนาแน่น เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่าง .....	67
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมากับความหนาแน่น เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่าง .....	68

รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รังสีกับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	69
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รังสีกับความหนาแน่น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	69
รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$ กับปริมาณความชื้น .....	70
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ .....	72
รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_{g0}/\phi_{gx})$ ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ .....	73
รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_0/\phi_x)$ กับน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ .....	74
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมา กับความหนาแน่นของตัวอย่าง .....	75
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_0/\phi_x)$ กับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	76
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_0/\phi_x)/\text{density}$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	77
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\phi_0/\phi_x)$ ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นตัวอย่าง .....	78
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_0/I_x)$ กับปริมาณความชื้น .....	79
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_0/I_x)$ กับน้ำหนักตัวอย่าง .....	80
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมา กับน้ำหนักตัวอย่าง .....	81
รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_0/I_x)$ ของรังสีแกมมา กับความหนาแน่น .....	82
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_0/I_x)$ ของนิวตรอนเร็วกับความหนาแน่น .....	82
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_0/I_x)/\text{density}$ กับปริมาณความชื้นที่ได้จากการอบกระดาษ .....	83
รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมา .....	84

รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{n0}/I_{nx})$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ .....	85
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{n0}/I_{nx})$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น ที่คำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 .....	86
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{g0}/I_{gx})$ ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ .....	87
รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมา กับความหนาแน่น .....	88
รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{n0}/I_{nx})$ ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อไม่มีการควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	89
รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_{g0}/I_{gx})$ ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น .....	89
รูปที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากวิธีอบกระดาษกับความชื้นที่ได้จาก เครื่องวัดความชื้น รุ่น MD 916 .....	91

## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัยนี้ รวมไปถึงการรวบรวมข้อมูลงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมกระดาษมีการใช้วัตถุดิบในการผลิตอยู่ 2 ประเภท ประเภทแรกเป็นวัสดุที่เรียกว่า Virgin pulp หรือมวลเส้นใย (Fiber mass) ที่ได้จากต้นไม้ และประเภทที่ 2 ที่เรียกว่า Recycled pulp เป็นมวลเส้นใยที่ได้จากการแปรรูปกระดาษที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งกระดาษที่ใช้แล้วมักจะมีการปนเปื้อนของวัสดุต่างๆ เช่น สารแต่งเติมทางเคมี (Additives) ซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ เช่น สี วัสดุเคลือบสารเคมีต่างๆ บางครั้งอาจมีการปนเปื้อนสารเคมีจำพวกหมึกพิมพ์ ฟอสฟอรัส สังกะสี กาว รวมทั้งวัสดุแปลกปลอมอื่นๆ เช่น ลวดโลหะ ทนายน ก้อนหิน ที่ติดกระดาษ



รูปที่ 1-1 ตัวอย่างมัดเศษกระดาษและการประเมินขนาด

โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ใช้แล้วจะถูกรวบรวมจากผู้บริโภคและส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูปเศษกระดาษที่ใช้แล้ว โดยโรงงานผู้แปรรูปจะทำการอัดกระดาษด้วยเครื่องจักรให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาดใหญ่ (Paper Bale) ก่อนส่งให้ผู้ผลิตกระดาษอีกทีหนึ่ง ซึ่งกระดาษที่ใช้แล้วนี้อาจจะมีความชื้น

สะสมอยู่ในเนื้อกระดาษสูงกว่าความชื้นปกติ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวกระดาษแต่ละประเภทเอง สภาพอากาศระหว่างการรวบรวม การขนส่ง กระบวนการอัดกระดาษที่ใช้งานแล้ว นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับสภาพการจัดเก็บมัดเศษกระดาษที่ใช้งานแล้วว่ามีการจัดเก็บในร่มหรือกลางแจ้ง

ในการซื้อขายระหว่างผู้ผลิตและผู้แปรรูปจะทำการซื้อขายกันในราคาต่อหน่วยน้ำหนัก [1] จากการสอบถามผู้ประกอบการแปรรูปกระดาษแห่งหนึ่งพบว่ามัดเศษกระดาษจะมีขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 300-500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นความชื้นที่อยู่ในกระดาษจึงมีผลโดยตรงกับราคาการซื้อขาย ในบางประเทศในทวีปยุโรปมีการคิดเงินคืนให้แก่ผู้ผลิตในส่วนมัดเศษกระดาษที่ใช้งานแล้วหากตรวจพบว่ามัดเศษกระดาษที่ใช้งานแล้วมีค่าความชื้นสูงกว่า 10% ดังนั้นกระบวนการตรวจสอบความชื้นของมัดเศษกระดาษที่ใช้งานแล้วจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตของโรงงานผลิตกระดาษโดยตรง

ในปัจจุบันมีกระบวนการตรวจสอบความชื้นหลายเทคนิคที่ถูกใช้โดยผู้ผลิตกระดาษ เช่น

1.1.1 เทคนิคที่อาศัยกระบวนการสุ่ม (Sampling techniques) ปริมาณ 0.3-3.0 กิโลกรัมของกระดาษที่ใช้แล้วจะถูกนำออกมาจากด้านในของมัดเศษกระดาษที่ใช้งานแล้วโดยการเจาะเข้าไปหรือการเลือกเก็บโดยใช้มือ และนำกระดาษส่วนนี้ไปใช้เทคนิคการหาความชื้นโดยเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อนำมาประเมินปริมาณน้ำหนักส่วนที่หายไปเป็นค่าความชื้นของกระดาษ

1.1.2 เทคนิคการใช้อุปกรณ์ (Devices techniques) ระบบการวัดโดยใช้หลักของการนำไฟฟ้า ความต้านทานทางไฟฟ้า หรือคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric characteristic) ซึ่งสามารถทำการวัดและอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการวัดมักจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากเทคนิคการใช้ตู้อบเป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตามจะพบว่าสองเทคนิคดังกล่าวยังมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1) การใช้เทคนิคตู้อบนั้นแม้ว่าความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการวัดจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิคการใช้อุปกรณ์ แต่เนื่องด้วยกระบวนการของเทคนิคที่ใช้เวลาค่อนข้างนานกว่าจะทราบผลของการวัดและค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่างที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งเป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งนับว่าเป็นข้อจำกัดของเทคนิคนี้

2) การใช้เทคนิคที่มีการใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าแม้ว่าจะมีข้อดีเรื่องความรวดเร็วในการทราบผลได้ทันที และค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่างที่ต่ำกว่า หากแต่มีข้อจำกัดเรื่องดังต่อไปนี้

2.1) เรื่องความคลาดเคลื่อนจากผลการวัด อาจเกิดจากจำนวนข้อมูลน้อยเกินไปไม่เพียงพอที่จะเป็นตัวแทนความชื้นเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง ซึ่งมีการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากการสุ่มประเมินวัดความชื้นของมัดเศษกระดาษ 1 มัด จำนวน 10 จุด ด้วยเทคนิคการใช้ตู้อบค่าความชื้นที่วัดได้มีค่า

ต่างกันประมาณ 5-10% ดังนั้นการกระจายตัวของความชื้นในมัดเศษกระดาษมีค่าไม่คงที่ (Non-uniform distribution) และพบว่าไม่ขึ้นกับตำแหน่งของการวัดแต่อย่างใด

2.2) การที่เครื่องมือที่ใช้หลักการทางไฟฟ้ามักจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความลึกหวังผล (Effective depth) ในการวัดของอุปกรณ์ที่อยู่ในช่วงที่ไม่สูง เมื่อเทียบกับขนาดของมัดเศษกระดาษบางประเภทที่อาจมีความกว้างมากกว่า 1 เมตร ยกตัวอย่างเช่น เครื่องวัดความชื้นอาศัยการส่งผ่านทางสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมของบริษัท Emco รุ่น AP-500M สามารถวัดความลึกได้ประมาณ 50 เซนติเมตร

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเครื่องมือในการวัดความชื้นในปัจจุบันยังต้องการการพัฒนาและปรับปรุงในด้านต่างๆซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการอุตสาหกรรมของการผลิตกระดาษใช้แล้วซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ควรจะเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายในการวัดต่อ 1 มัดเศษกระดาษไม่สูงนัก
2. ควรจะเป็นเทคนิคที่ใช้เวลาในการวัดที่ไม่สูง สามารถทราบผลได้ทันที
3. ควรจะเป็นเทคนิคที่สามารถนำไปติดตั้งกับระบบสายพานได้ เพื่อทำการตรวจสอบได้ทุกตัวอย่าง
4. ควรจะเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการวัดความชื้นได้ตลอดทั้งมัดเศษกระดาษ เพื่อเป็นตัวแทนเฉลี่ยของค่าความชื้นของมัดเศษกระดาษ

ซึ่งเทคนิคทางด้านรังสีในปัจจุบันนำไปใช้ในการตรวจสอบความชื้นในงานต่างๆ เช่น การตรวจสอบความชื้นในดินด้วยรังสีนิวตรอน การตรวจสอบความชื้นในวัสดุก่อสร้าง การวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอนเร็วโดยใช้หัววัดแบบแก้วเรืองรังสี ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคด้านรังสีมาใช้ในการตรวจวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษเนื่องด้วยเทคนิคทางรังสีมีความเป็นไปได้ที่สามารถตอบโจทย์ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษอัดก้อน โดยใช้การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. จำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนขนาดทั่วไปที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรม MCNP เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบวัดที่ใช้เทคนิคดังกล่าว



2. ออกแบบระบบวัดที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม MCNP

3. ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่มีความชื้นต่างๆกันโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP และผลการทดลองจากเทคนิคการอบกระดาษเพื่อชั่งน้ำหนัก

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษา MCNP Code จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ออกแบบ MCNP Code เพื่อจำลองระบบในห้องปฏิบัติการ
4. ทดลองวัดความชื้นในกระดาษด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอนและแกมมาในตัวอย่างขนาดเล็ก
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคใหม่ในการวัดความชื้นเฉลี่ยที่ถูกต้องในมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

#### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ประวิทย์ เจริญกิจสุพัฒน์ (1995) ศึกษาการใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วในการหาปริมาณความชื้นของแป้งน้ำมันสำปะหลัง ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ใช้คือ อะเมริเซียม-241/เบริลเลียม ความแรง 1.11 กิกะเบคเคอเรล (30 มิลลิวูรี) และซีซีเซียม-137 ความแรง 0.37 กิกะเบคเคอเรล (10 มิลลิวูรี) เป็นต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้หัววัดแบบแก้วเรืองรังสี NE 905 ขนาด 2.54 x 1 ตารางเซนติเมตร วัดทั้งนิวตรอนและรังสีแกมมา หัววัดแก้วเรืองรังสีจะสอดอยู่ในแท่งโพลิเอทิลีนซึ่งถูกล้อมรอบด้วยแผ่นแคดเมียมและโบรอนเพื่อให้วัดได้เฉพาะนิวตรอนเร็วเท่านั้น ซึ่งพบว่าหัววัดรังสีชนิดนี้สามารถวัดได้ทั้งนิวตรอนเร็วเร็วและรังสีแกมมาพร้อมกันได้โดยไม่มี การรบกวนใดๆ ได้พบว่าอัตราส่วนการลดทอนรังสีนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาลดลงตามปริมาณความชื้นและความหนาในช่วง 0-15% โดยน้ำหนัก และ 0-3.5 กรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และพบว่าสามารถหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างได้เป็นที่น่าพอใจเมื่อตัวอย่างมีความหนาเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความหนาที่ใช้เปรียบเทียบ

2. อีร์พัทธ์ มานวงค์ (2006) พัฒนาระบบสำหรับตรวจหาตำแหน่งรอยต่อระหว่างน้ำมันดิบกับน้ำในถังเก็บโดยใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน พบว่าเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอนมีความไวต่ำ จึงทำการศึกษาเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอน การกระเจิงกลับของรังสีแกมมาและการส่งผ่านรังสีแกมมาเพิ่มเติม ผลที่ได้จากการศึกษาคือการส่งผ่านรังสีแกมมาสามารถใช้หาตำแหน่งรอยต่อของน้ำมันดิบกับน้ำได้ดี

3. T. Cywicka - Jakiel (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการวัดความชื้นในถ่านหินด้วยวิธีการส่งผ่านนิวตรอนเร็วควบคู่กับรังสีแกมมา ใช้ Pu-Be เป็นต้นกำเนิดรังสี ใช้หัววัดรังสีสองชนิดคือ He-3 หุ้มด้วยพาราฟินหน่วงพลังงานสำหรับวัดนิวตรอน และ NaI(Tl) สำหรับวัดรังสีแกมมา เนื่องจากในถ่านหินจะมีช่องว่างซึ่งอาจจะกักเก็บความชื้นไว้อีกทั้งมีขนาดใหญ่ ด้วยหลักการที่ว่าไฮโดรเจนมีความสามารถในการหน่วงพลังงานนิวตรอน และความหนาของวัตถุก็มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมา เทคนิคนี้จึงเหมาะที่จะวัดทั้งความชื้นและความหนาแน่นของตัวอย่างและมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุได้ดี

4. สิตา กองคำ (1998) พัฒนาการหาปริมาณไขมันในเนื้อหมูบดโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านเอพิเทอร์มาลนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม ใช้แผ่นแคดเมียมและแผ่นยางผสมโบรอนในการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนให้เหลือแต่เอพิเทอร์มาลนิวตรอนทะลุผ่านไปยังตัวอย่างเนื้อหมูบดโดยใช้หัววัดเทอร์มาลนิวตรอนชนิดโบรอนไตรฟลูออไรด์ 2 หัว ผลการวิจัยพบว่าจำนวนนับนิวตรอนขึ้นกับปริมาณไขมันในตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีการวัดการส่งผ่านรังสีแกมมาพลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์จากต้นกำเนิดรังสีชนิดเดียวกันเพื่อปรับแก้ค่ารบกวนจากความหนาของตัวอย่าง เมื่อทำการปรับเทียบมาตรฐานพบว่าได้ผลที่น่าพอใจนำไปสู่การพัฒนาการวัดหาปริมาณไขมันได้

5. C. Murray Bartle (1996) ใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและแกมมาในการตรวจวัดสารละลายผสมที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันหรือไม่สามารถแยกได้โดยการชั่งน้ำหนักเช่น เอทิลแอลกอฮอล์/น้ำ, เอทิลแอลกอฮอล์/เบียร์, น้ำทะเล/น้ำจืด และ น้ำมันไร้สารตะกั่ว/น้ำมันผสมสารตะกั่ว พบว่าเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและแกมมาให้ค่าความไวในการตรวจวัดสารละลายผสมได้ดีแต่ยังต้องใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 10 นาทีเพื่อให้ค่าความถูกต้องของการวัดดี

6. Bc. Martin Gondar (2012) ศึกษาการวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้ายี่ห้อ Emco รุ่น AP-500M เปรียบเทียบกับเทคนิคการใช้ตู้อบ พบว่าแนวโน้มเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในมัดเศษกระดาษกับส่วนของมัดเศษกระดาษบริเวณที่วัดความชื้นของทั้งสองเทคนิคมีลักษณะคล้ายกันมาก อีกทั้งเทคนิคการใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้านี้มีความไวต่อส่วนที่เป็นขึ้นโลหะที่อาจปนอยู่ในมัดเศษกระดาษจึงสามารถที่จะคัดแยกมัดเศษกระดาษที่มีปัญหาการปะปนของโลหะออกได้

7. B.D. Sowerby ศึกษาการพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้นในถ่านหินและถ่านโค้กโดยใช้เทคนิค FNGT จากต้นกำเนิดรังสี Cf-252 และ Cs-137 ใช้หัววัดนิวตรอน He-3 และหัววัดรังสีแกมมา NaI(TL) พบว่าเมื่อวัดความชื้นในถ่านหินสามารถวัดความชื้นได้มากกว่า 1% ในช่วงความชื้น 0-16% โดยน้ำหนักและช่วงความหนาของตัวอย่าง 5-17 ซม. ในขณะที่เมื่อวัดความชื้นของถ่านโค้กจะสามารถวัดได้แม้เพียง 0.26% โดยน้ำหนัก ในช่วงความชื้น 1-16% และสามารถวัดได้ในช่วงความหนา 30-50 ซม.



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของรังสีแกมมาและนิวตรอน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย กระบวนการมอนติคาร์โลและอธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล เวอร์ชัน 5 (Monte Carlo N-particle version 5, MCNP5)

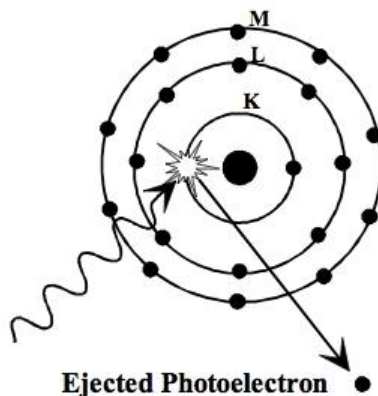
### 2.1 คุณสมบัติของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเกิดจากการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของนิวเคลียสที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้รังสีแกมมาไม่มีมวล ไม่มีประจุ มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงและมีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับความเร็วแสง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที [2],[3]

#### 2.1.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

อันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่สำคัญได้แก่ โฟโตอิเล็กทริก, การเกิดผลผลิตคู่ และการกระเจิงแบบคอมป์ตัน [4]

1) โฟโตอิเล็กทริก เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาชนกับอะตอมแล้วมีการถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนจนหมดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนจะเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

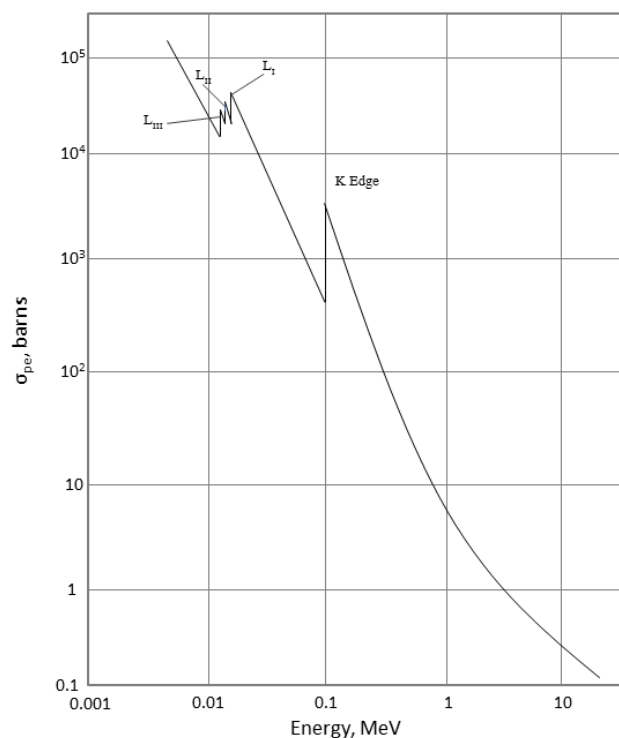


รูปที่ 2-1 การเกิดโฟโตอิเล็กทริก

ถ้าโฟโตอิเล็กทริกเกิดกับอิเล็กตรอนวงใน จะเกิดช่องว่างขึ้นและถูกแทนที่ด้วยอิเล็กตรอนวงนอกซึ่งจะมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา (Characteristic X-rays) มีพลังงานเฉพาะขึ้นกับอะตอม

และอาจมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากชั้นโคจร เรียกว่า Auger electron

ภาคตัดขวางการเกิดโฟโตอิเล็กทริกแสดงด้วยสัญลักษณ์  $\sigma_{pe}$  แสดงถึงโอกาสการเกิดอันตรกิริยา เมื่อกำหนด  $I$  คือความเข้มของรังสีแกมมามาก่อนเคลื่อนชนตัวกลางที่มีความหนาแน่น  $N$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น เมื่อรังสีแกมมาผ่านตัวกลาง อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกจะเท่ากับ  $IN\sigma_{pe}$  ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตร-วินาที ทั้งนี้ภาคตัดขวางการเกิดโฟโตอิเล็กทริกจะขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมาและเลขอะตอมของตัวกลาง [2]

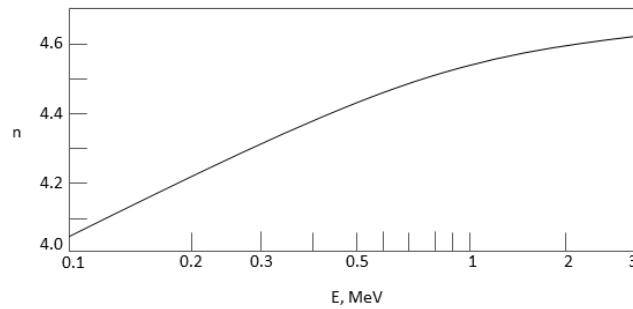


รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางการเกิดโฟโตอิเล็กทริกกับพลังงานของรังสีแกมมาในเป้าตะกั่ว

นอกจากนี้ ภาคตัดขวางการเกิดโฟโตอิเล็กทริกยังขึ้นกับเลขอะตอม  $Z$  ของตัวกลาง [2] ซึ่งแสดงดังสมการ

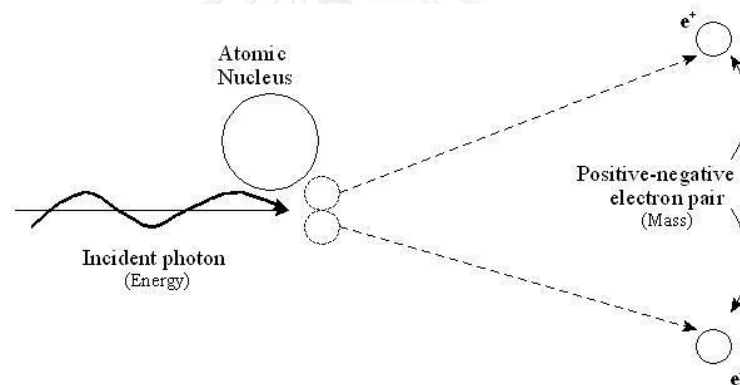
$$\sigma_{pe} \sim Z^n \quad (1)$$

เมื่อ  $n$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับพลังงานของรังสีแกมมา ดังแสดงในรูปที่ 2-3



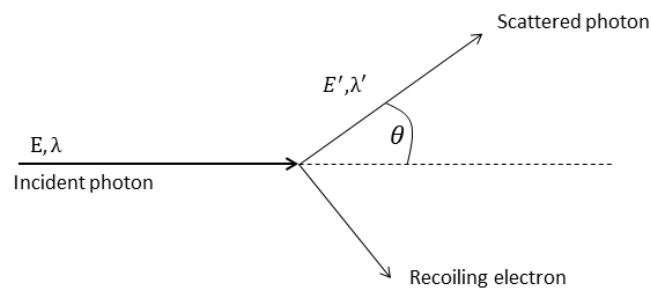
รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n$  กับพลังงานของรังสีแกมมา

2) การเกิดผลผลิตคู่ เป็นกระบวนการที่รังสีแกมมาพลังงานสูงถูกดูดกลืนกลายเป็นคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอนเกิดขึ้น พลังงานของรังสีแกมมาจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ Rest mass energy ของคู่อิเล็กตรอน หรือ 1.02 MeV ซึ่งจะถูกแบ่งโดยอิเล็กตรอนและโพสิตรอนเท่ากันคือ 0.511 MeV [5]



รูปที่ 2-4 การเกิดอิเล็กตรอนคู่

3) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นเนื่องจากโฟตอนไปชนกับอิเล็กตรอนของตัวกลางเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม [2] ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2-5 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

จากรูปที่ 2-5 โฟตอนตกกระทบบที่ตัวกลางด้วยพลังงาน  $E_e$  และความยาวคลื่น  $\lambda$  มีการถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอนแล้วเกิดการกระเจิงด้วยมุม  $\theta$  หลังเกิดการกระเจิงโฟตอนจะมีพลังงานเท่ากับ

$$E' = \frac{E_e}{1 + \frac{E_e}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

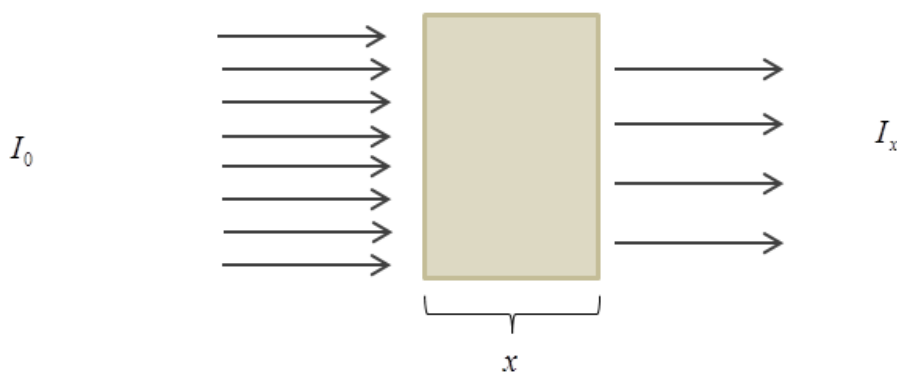
เมื่อ  $m_0 c^2$  คือ rest mass energy ของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 0.511 MeV การกระเจิงแบบคอมป์ตันขึ้นกับจำนวนของอิเล็กตรอนหรือเลขอะตอมของตัวกลางนั่นเอง

### 2.1.2 การทะลุผ่านของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาที่ตกกระทบบกับวัสดุจะเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบข้างต้น ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางไปได้จะขึ้นกับพลังงานของรังสี ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบบ ชนิดและความหนาของตัวกลาง ทำให้มีช่วงพลังงานหนึ่งของรังสีแกมมาที่สามารถผ่านตัวกลางออกไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางออกมา ( $I_x$ ) กับความเข้มรังสีที่ตกกระทบบตัวกลาง ( $I_0$ ) เป็นไปดังสมการ

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

เมื่อ  $\mu$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  ขึ้นกับชนิดของวัตถุและพลังงานของรังสีแกมมา และ  $x$  คือความหนาของตัวกลางที่รังสีทะลุผ่าน



รูปที่ 2-6 แผนภาพแสดงการทะลุผ่านรังสีแกมมา

## 2.2 คุณสมบัติของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า มีมวล  $1.67495 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม เป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรยกเว้นนิวตรอนที่อยู่ภายในนิวเคลียส สลายตัวให้อนุภาคโปรตอนโดยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและแอนตินิวตริโน ซึ่งกระบวนการสลายตัวนี้จะใช้เวลาประมาณ 12 นาที ชนิดของนิวตรอนจะจำแนกตามพลังงานของนิวตรอน [3],[3] ดังนี้

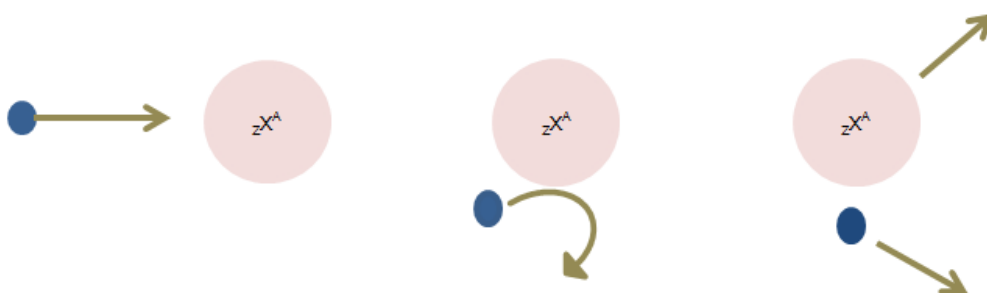
ตารางที่ 1 ชนิดของนิวตรอนและพลังงาน

ชนิด	ช่วงพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0 eV – $10^3$ eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV – 0.3 eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	$10^3$ eV – 20 MeV

### 2.2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสามารถเคลื่อนผ่านกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนและทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสโดยตรง อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนและนิวเคลียสมีดังนี้ [2]

1) การชนแบบยืดหยุ่น เป็นการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสแล้วมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมเกิดขึ้นโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของนิวเคลียส นิวตรอนที่ชนกับนิวเคลียสจะเกิดการกระเจิงออกมาแบบยืดหยุ่นขึ้นกับทิศทางและความเร็วที่ชน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ  $(n, n)$

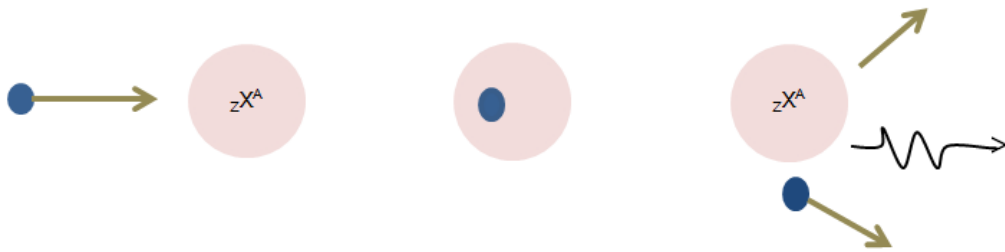


รูปที่ 2-7 อันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น

2) การชนแบบไม่ยืดหยุ่น เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนและเข้าไปในนิวเคลียสทำให้นิวเคลียสเกิดความไม่เสถียรและขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น นิวตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาทันทีโดยพลังงานของนิวตรอนอาจจะเท่ากับหรือน้อยกว่าก่อนชน ในขณะที่นิวเคลียสจะปรับเข้าสู่สภาวะพื้นด้วยการปลดปล่อยรังสีแกมมา พลังงานจลน์รวมหลังการชนจะลดลงเนื่องจากการสูญเสียพลังงานในการ

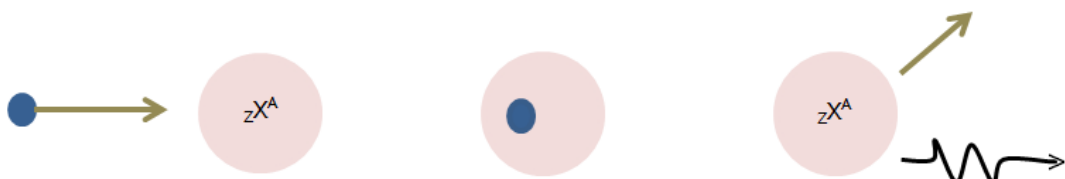


ปลดปล่อยรังสีแกมมา การชนแบบนี้นิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นในนิวเคลียสขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ  $(n, n')$



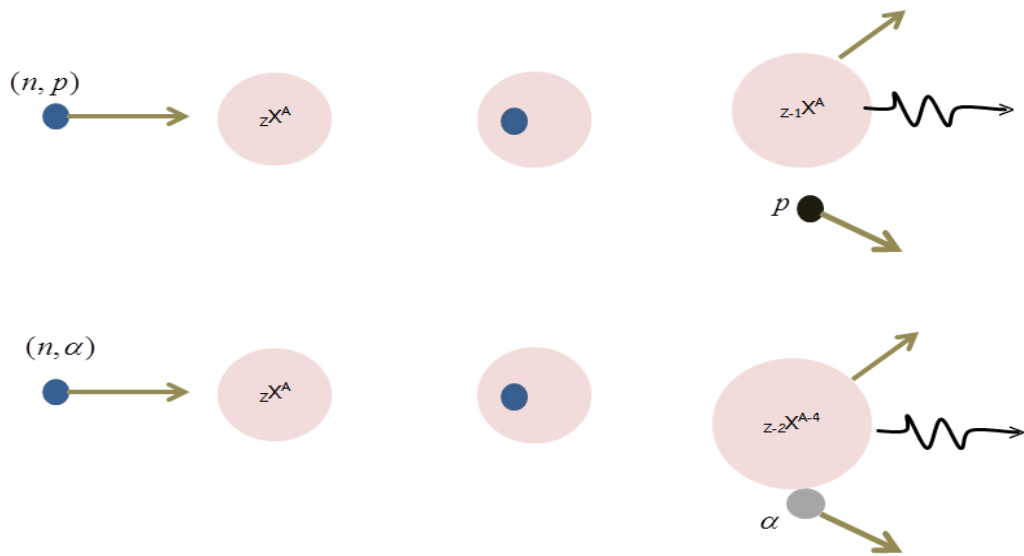
รูปที่ 2-8 อันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

3) การจับนิวตรอน อันตรกิริยานี้นิวตรอนจะถูกนิวเคลียสจับไว้แล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาหนึ่งตัวหรือมากกว่าทันที เป็นอันตรกิริยาแบบคายพลังงาน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาคือ  $(n, \gamma)$



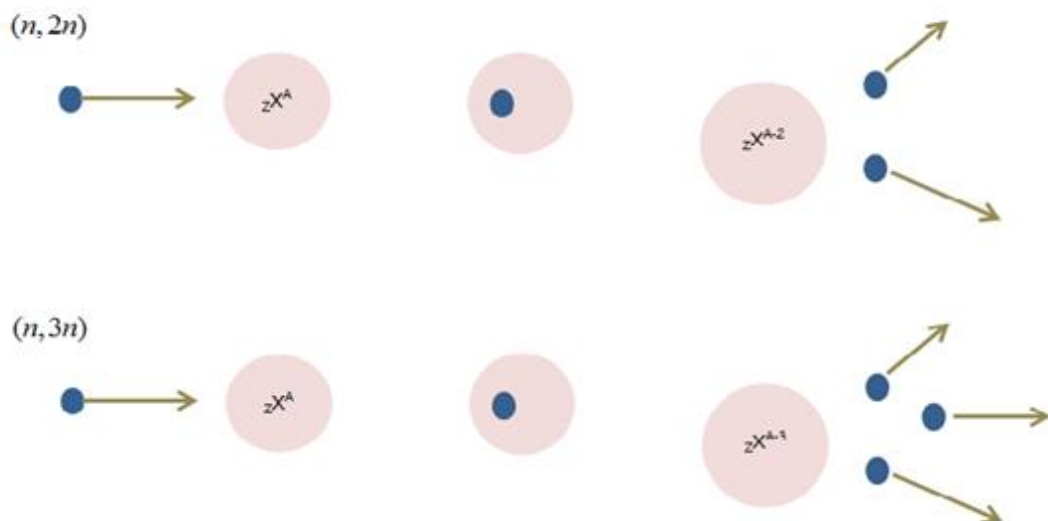
รูปที่ 2-9 อันตรกิริยาการจับนิวตรอน

4) การปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ เกิดเนื่องจากนิวเคลียสดูดจับนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมาเช่น ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา  $(n, \alpha)$  หรือการปลดปล่อยอนุภาคโปรตอน  $(n, p)$  อันตรกิริยานี้เป็นได้ทั้งดูดพลังงานและคายพลังงาน



รูปที่ 2-10 อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ

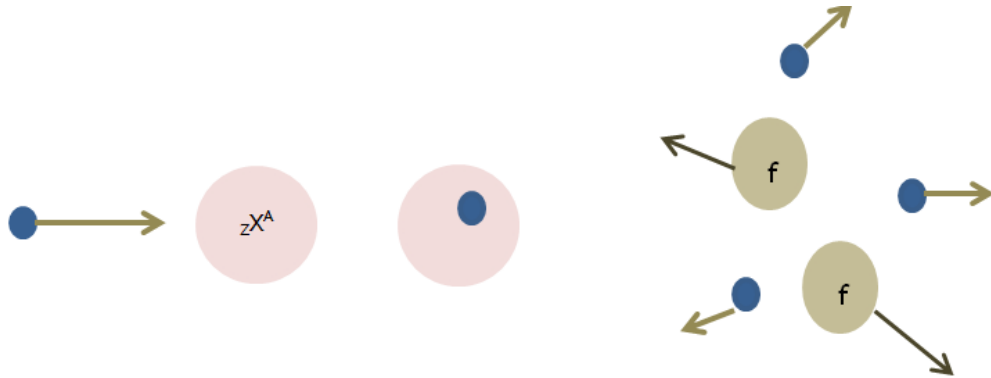
5) การผลิตนิวตรอน เกิดจากนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นอันตรกิริยาแบบดูดพลังงานทำให้เกิดนิวตรอนใหม่ขึ้นมากกว่า 1 ตัว เช่น  $(n, 2n)$  และ  $(n, 3n)$  โดยที่อันตรกิริยาแบบ  $(n, 2n)$  จะพบมากในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้น้ำชนิดหนักหรือเบอริลียมเป็นสารหน่วงพลังงาน เนื่องจาก H-2 และ Be-9 มีแรงยึดระหว่างนิวตรอนกับโปรตอนในนิวเคลียสต่ำนิวตรอนจึงหลุดออกมาได้ง่าย



รูปที่ 2-11 อันตรกิริยาการผลิตนิวตรอน

6) การเกิดฟิชชัน เกิดเมื่อนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแล้วมีการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วนที่มีเลขมวลเป็นสัดส่วนของนิวเคลียสเริ่มต้นพร้อมกับนิวตรอนใหม่อีก 3 ตัว อันตรกิริยานี้จะให้พลังงาน

มหาศาล สัญลักษณ์ของอันตรกิริยา คือ  $(n, f)$  ธาตุที่เกิดอันตรกิริยาฟิชชันกับนิวตรอนได้แก่ ยูเรเนียม-235 และ พลูโตเนียม-239



รูปที่ 2-12 อันตรกิริยาการผลิตนิวตรอน

### 2.2.2 ภาคตัดขวางของอันตรกิริยา (Cross Section)

อันตรกิริยาของนิวตรอนที่กล่าวมานั้นมีโอกาสเกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง แต่จะเกิดแบบใดนั้นขึ้นกับโอกาสการเกิดอันตรกิริยาหรือภาคตัดขวางของตัวกลางต่อพลังงานที่นิวตรอนเคลื่อนชน ภาคตัดขวางนี้แสดงในหน่วย บาร์น หรือ  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตร มีสัญลักษณ์  $\sigma$  เรียกภาคตัดขวางจุลภาค [3] แบ่งออกเป็น

$\sigma_s$  = ภาคตัดขวางจากการกระเจิงแบบยืดหยุ่น

$\sigma_I$  = ภาคตัดขวางจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น

$\sigma_a$  = ภาคตัดขวางจากการดูดกลืนนิวตรอน

$\sigma_r$  = ภาคตัดขวางจากการจับนิวตรอน

$\sigma_f$  = ภาคตัดขวางจากการแตกตัว

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาในตัวกลางจะคิดจากผลรวมจากค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่างๆ ดังนี้

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_I + \sigma_a + \sigma_f + \dots \quad (4)$$

หากพิจารณาการลดทอนพลังงานของนิวตรอนโดยรวมต่อระยะทางในตัวกลางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน ค่าภาคตัดขวางจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของอะตอมในตัวกลาง เรียกภาคตัดขวางนี้ว่า ภาคตัดขวางมหัพภาค ใช้สัญลักษณ์  $\Sigma$  มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$

โดยที่ 
$$\Sigma = N\sigma_t \quad (5)$$

เมื่อ  $N$  คือความหนาแน่นของอะตอมในตัวกลาง

เมื่อนิวตรอนที่มีความเข้ม ( $I$ ) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) โอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นกับความหนาของตัวกลาง ( $x$ ) ค่าภาคตัดขวางจุลภาค ( $\sigma$ ) และความหนาแน่นของตัวกลาง ( $N$ ) จำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$\text{จำนวนอันตรกิริยา} = IN\sigma Ax \quad (6)$$

หรือ  $\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อปริมาตรต่อวินาที} = I\Sigma \quad (7)$

โดยที่  $Ax = \text{ปริมาตรของตัวกลาง}$

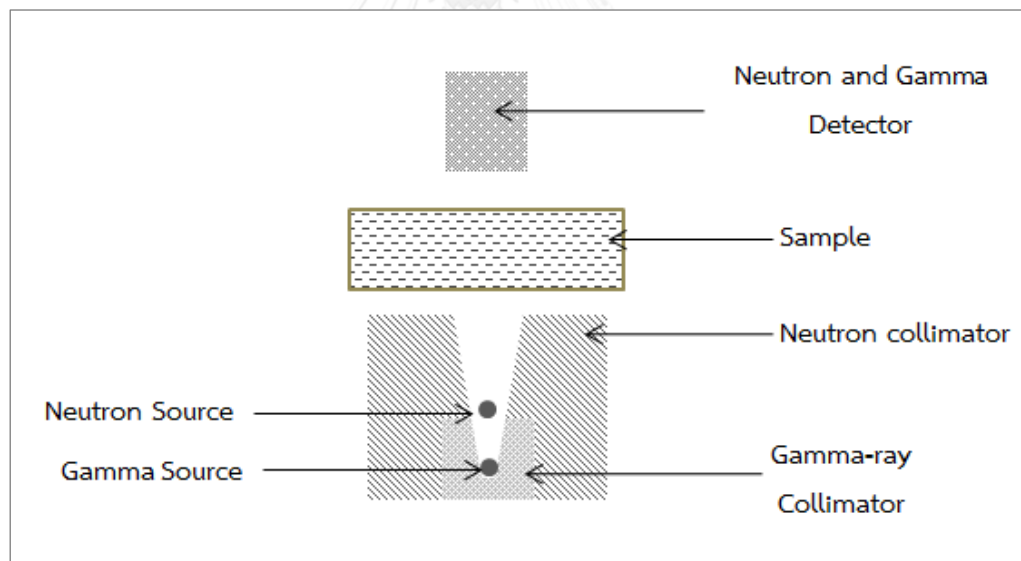
$$I = \text{จำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$



### 2.3 เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและแกมมา (Fast Neutron and Gamma-ray Transmission)

ข้อเสียของการวัดความชื้นโดยหลักการตรวจจับเทอร์มัลนิวตรอนนั้นถูกจำกัดด้วยหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็น ความหนาของตัวอย่างที่มีผลต่อการทะลุผ่านของอนุภาคนิวตรอน, การแก้ค่ารบกวนที่เกิดจากความหนาแน่นของตัวอย่างทำได้ยาก, ความไวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความไม่แม่นยำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางจากการดูดกลืนนิวตรอนสูง [6]

ระบบวัดความชื้นที่ใช้หลักการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดของหลักการตรวจจับเทอร์มัลนิวตรอนได้ โดยการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นนั้นจะอาศัยการลดทอนของนิวตรอนเร็วที่เกิดจากไฮโดรเจนได้ดีกว่าธาตุอื่นๆ ด้วยเหตุนี้เทคนิคการวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา ปริมาณการลดทอนของนิวตรอนเร็วจะแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นในตัวอย่าง และปริมาณการลดทอนรังสีแกมมาจะช่วยแก้ค่ารบกวนที่เกิดจากความหนาแน่นและความหนาของตัวอย่าง และพบว่าเทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเมื่อตัวอย่างมีปริมาตรเท่ากัน [7] [8]



รูปที่ 2-13 การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา

ในเทคนิคการส่งผ่านรังสี เมื่อระบบถูกจัดวางในลักษณะที่ดีแล้วลำรังสีนิวตรอนพลังงานเดี่ยวที่ถูกส่งผ่านตัวอย่างที่มีความหนา  $z$  และมีความหนาแน่น  $\rho$  ฟลักซ์นิวตรอน  $\phi_n$  จะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการ

$$\phi_n = \phi_{n0} \exp(-\mu_n \rho z) \quad (8)$$

เมื่อ  $\phi_{n0}$  คือ ฟลักซ์นิวตรอนที่หัววัดรังสีวัดได้เมื่อไม่มีตัวอย่าง

$$\mu_n = \frac{N_A \cdot \sigma}{A} \quad \text{คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่าง (Mass}$$

attenuation coefficient) หน่วย  $cm^2 / g$

$\sigma$  - ภาคตัดขวางจุลภาครวม มีหน่วยเป็น บาร์น

$N_A$  - เลขอาโวกาโดร

$A$  - มวลอะตอม

ทำนองเดียวกันกับนิวตรอน ฟลักซ์แกมมา  $\phi_g$  ก็สามารถคำนวณเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างสำหรับรังสีแกมมาจะใช้สัญลักษณ์  $\mu_g$

ในกรณีที่ต้นกำเนิดรังสีปลดปล่อยนิวตรอนในช่วงพลังงานกว้างๆ และตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถจัดระบบวัดที่ดีได้ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนเชิงมวล (Neutron mass absorption coefficient,  $\mu_{na}$ ) จะถูกนำมาพิจารณา

โดยที่

$$\mu_{na} = -\frac{1}{\rho z} \ln(\phi_n / \phi_{n0}) \quad (9)$$

เมื่อ  $\rho z = m$  คือ มวลต่อพื้นที่ หน่วย  $g / cm^2$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนเชิงมวลนี้ไม่เพียงแต่จะขึ้นความหนาของตัวอย่าง, ความหนาแน่น, องค์ประกอบของตัวอย่างและพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแล้ว แต่ยังขึ้นกับการจัดวางของระบบวัดอีกด้วย

ตัวอย่างที่เป็นของผสมระหว่างความชื้นกับกระดาษ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนเชิงมวลจะประกอบไปด้วย  $\mu_{na1}$  และ  $\mu_{na2}$  สำหรับความชื้นและกระดาษตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_{na} = (\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2} \quad (10)$$

เมื่อ  $w = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของความชื้น

และ  $m_1 + m_2 = m$  คือ มวลรวมต่อพื้นที่

ในทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแกมมาเชิงมวล จะคำนวณจากสมการ

$$\mu_g = (\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2} \quad (11)$$

ดังนั้น ฟลักซ์นิวตรอนและแกมมาจะหาได้จากสมการ

$$\phi_n = \phi_{n0} \exp\{ - [(\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2}] m \} \quad (12)$$

และ 
$$\phi_g = \phi_{g0} \exp\left\{-\left[(\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2}\right]m\right\} \quad (13)$$

สัดส่วนโดยน้ำหนักของความชื้นหาได้โดย (12) ÷ (13) จะได้

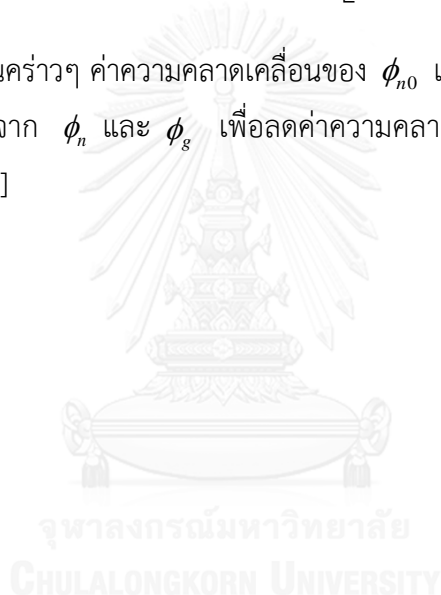
$$w = \frac{(\mu_{g2}R - \mu_{na2})}{\left[(\mu_{na1} - \mu_{na2}) - R(\mu_{g1} - \mu_{g2})\right]} \quad (14)$$

เมื่อ 
$$R = \ln(\phi_n / \phi_{n0}) / \ln(\phi_g / \phi_{g0})$$

ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนนิเวทรอนเร็วต่อรังสีแกมมาคำนวณได้จากสมการ

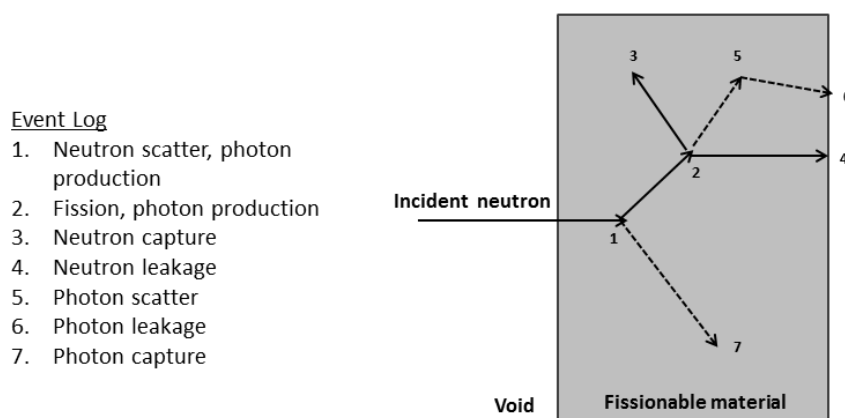
$$\delta R = \frac{R}{\rho z} \sqrt{\left[\frac{\delta \phi_n}{\phi_n [(\mu_{na1} - \mu_{na2})w + \mu_{na2}]}\right]^2 + \left[\frac{\delta \phi_g}{\phi_g [(\mu_{g1} - \mu_{g2})w + \mu_{g2}]}\right]^2} \quad (15)$$

จากการประมาณคร่าวๆ ค่าความคลาดเคลื่อนของ  $\phi_{n0}$  และ  $\phi_{g0}$  ควรจะน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจาก  $\phi_n$  และ  $\phi_g$  เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของ  $R$  และ  $w$  จำเป็นจะต้องให้ค่านับวัดสูงๆ [9]



## 2.4 กระบวนการมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method)

มอนติคาร์โล (Monte Carlo) ถูกใช้ในการจำลองทฤษฎีกระบวนการทางสถิติ เช่น อันตรกิริยานิวเคลียร์กับวัสดุ มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะถูกอธิบายด้วยหลักของความน่าจะเป็น โดยทั่วไปแล้วในการจำลองจะเริ่มจากการกำหนดตัวเลขเนื่องจากตัวเลขมีความจำเป็นต่อการอธิบายปรากฏการณ์ที่มักจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างกระบวนการทางสถิติขึ้นกับการสุ่มตัวเลขคล้ายการโยนลูกเต๋า การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีมอนติคาร์โลจะประกอบไปด้วย อนุภาคจากต้นกำเนิดผ่านการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ เช่น การดูดจับอนุภาค การกระเจิงของอนุภาค เป็นต้น ความน่าจะเป็นมีการกระจายตัวแบบสุ่มจากข้อมูลการเคลื่อนที่แต่ละขั้นตอนของอนุภาค [10]



รูปที่ 2-14 อันตรกิริยานิวตรอนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ

รูปที่ 16 จำลองการเคลื่อนที่นิวตรอนแบบสุ่มผ่านวัสดุที่สามารถเกิดอันตรกิริยาแบบฟิชชันได้ หมายเลข 1 ถึง 7 แสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาต่างๆที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในวัสดุตามกฎของฟิสิกส์และความน่าจะเป็นเมื่อนิวตรอนมีการเคลื่อนที่เข้าไป

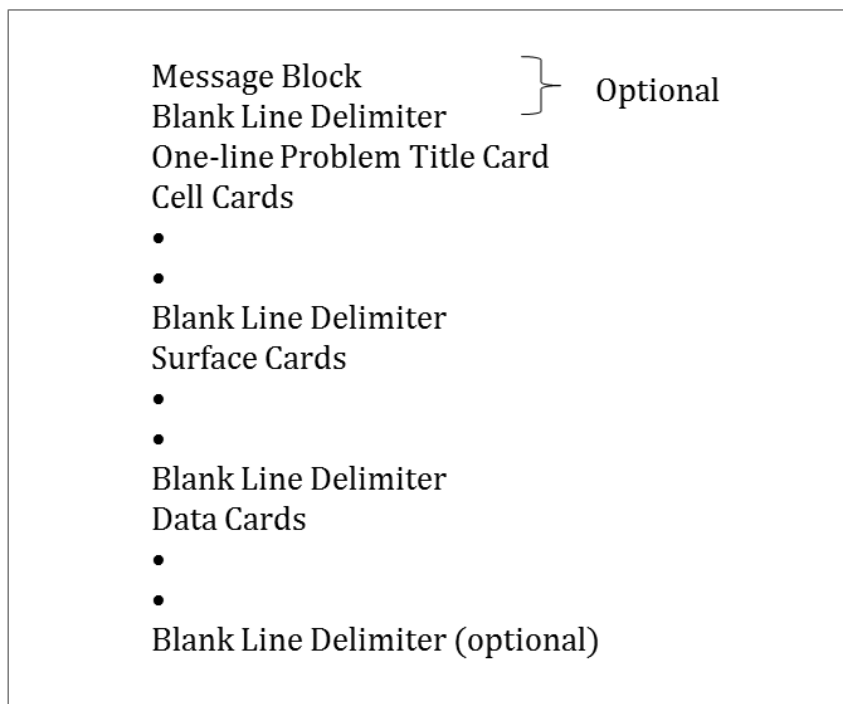
### 2.4.1 การจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาด้วยโปรแกรม MCNP5

#### การป้อนข้อมูลขาเข้า (INPUT file)

ในการกำหนดข้อมูลขาเข้าจะสามารถเขียนข้อความใดๆก็ได้ในบรรทัดแรกของข้อมูล โดยแต่ละบรรทัดจะจำกัดจำนวนตัวอักษรให้ไม่เกิน 80 ตัวอักษร ไม่สามารถใช้ Tab ในการป้อนข้อมูล สัญลักษณ์ “\$” (ดอลลาร์) เป็นสัญลักษณ์ระบุการสิ้นสุดการป้อนข้อมูลในแต่ละบรรทัดโดยตัวอักษรที่อยู่หลังสัญลักษณ์นี้จะถือเป็นคำอธิบาย ใช้บรรทัดว่างเปล่าเป็นตัวคั่นเพื่อแยกข้อมูลออกจากกัน



สัญลักษณ์ “C” ใช้เมื่อต้องการสร้างบรรทัดคำอธิบาย ใช้เครื่องหมาย “&” ในการเชื่อมบรรทัดที่ต่อเนื่องกันเมื่อมีการกำหนดข้อมูลเกิน 80 ตัวอักษรในบรรทัดนั้น [11]



รูปที่ 2-15 ตัวอย่างลักษณะการกำหนดข้อมูลขาเข้า

ตารางที่ 2 หน่วยที่ใช้ในการกำหนดข้อมูลขาเข้า

Unit used in MCNP	
Length	Centimeters (cm)
Energies	MeV
Times	Shakes ( $10^{-8}$ sec)
Temperatures	MeV (kT)
Atomic densities	atoms/barn-cm
Mass densities	$\text{g/cm}^3$
Cross sections	barns ( $10^{-24}$ $\text{cm}^2$ )
Heating numbers	MeV/collision

คำสั่งนิยามเซลล์ (Cell Cards) จะต้องกำหนดตัวเลขระบุเซลล์ในคอลัมน์แรกของบรรทัดมีค่า 1 ถึง 9999 ตามด้วยตัวเลขระบุวัสดุที่ใช้จะต้องตรงกับตัวเลขวัสดุที่ระบุในส่วนคำสั่งข้อมูลหลักจะใช้ตัวเลข 0 เมื่อต้องการกำหนดเซลล์นั้นให้เป็นเซลล์ว่างเปล่า ตัวเลขถัดมาจะบอกถึงความ

หนาแน่นของวัสดุ เครื่องหมาย (+) หน้าตัวเลขจะแสดงหน่วยเป็นความหนาแน่นเชิงอะตอมต่อตารางเซนติเมตร ( $10^{24}$  atom/cm<sup>3</sup>) เครื่องหมายลบแสดงหน่วยความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อปริมาตร (g/cm<sup>3</sup>) เซลล์ว่างเปล่าจะไม่กำหนดตัวเลขความหนาแน่น คอลัมน์ถัดมาจะเป็นกลุ่มตัวเลขระบุพื้นผิวที่จะประกอบกันเป็นเซลล์ กลุ่มตัวเลขนี้มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบหมายถึงการเลือกด้านของพื้นผิวที่จะประกอบเป็นเซลล์ [11]

c cell cards for sample problem							
1	1	-0.0014	-7				
2	2	-7.86	-8				
3	3	-1.60	1 -2 -3 4 -5 6 7 8				
c end of cell cards for sample problem							
blank line delimiter							

รูปที่ 2-16 ตัวอย่างการป้อนข้อมูลส่วนคำสั่งนิยามเซลล์

ส่วนคำสั่งนิยามพื้นผิว (Surface Cards) ในการกำหนดคำสั่งนิยามพื้นผิวจะเริ่มด้วยตัวเลขระบุพื้นผิวในคอลัมน์แรก มีค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง 9999 ตามด้วยตัวอักษรที่บอกถึงชนิดของพื้นผิว ในการประกอบพื้นผิวจะอาศัยหลักของสมการคณิตศาสตร์และระบบพิกัดฉาก X Y Z ในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3

นอกจากนี้ การกำหนดพื้นผิวของข้อมูลสามารถกำหนดให้เป็นในรูปของ Macro bodies ซึ่งเป็นรูปทรงเรขาคณิต การเลือกด้านของพื้นผิวที่ใช้ทำได้โดยกำหนดค่าบวกและลบ ซึ่งค่าบวกหมายถึงเลือกด้านที่อยู่ด้านในของตัว Macro bodies ค่าลบหมายถึงเลือกด้านที่อยู่นอกตัว Macro bodies ตัวอย่างคำสั่งง่ายๆ [11] เช่น

BOX – Arbitrarily oriented orthogonal box	REC – Right Elliptical Cylinder
RPP – Rectangular Parallelepiped	TRC – Truncated Right Angle Cone
SPH – Sphere	ELL – Ellipsoid
RCC – Right Circular Cylinder, Can	WED – Wedge
RHP or HEX – Right Hexagonal Prism	ARB – Arbitrary Polyhedron

ตารางที่ 3 MCNP Surface cards

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entries
P	Plane	General	$Ax+By+Cz-D=0$	ABCD
PX		Normal to X-axis	$x-D=0$	D
PY		Normal to Y-axis	$y-D=0$	D
PZ		Normal to Z-axis	$z-D=0$	D
SO	Sphere	Centered at origin	$x^2+y^2+z^2-R^2=0$	R
S		General	$(x-\bar{x})^2+(y-\bar{y})^2+(z-\bar{z})^2-R^2=0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} R$
SX		Centered on X-axis	$(x-\bar{x})^2+y^2+z^2-R^2=0$	$\bar{x} R$
SY		Centered on Y-axis	$x^2+(y-\bar{y})^2+z^2-R^2=0$	$\bar{y} R$
SZ		Centered on Z-axis	$x^2+y^2+(z-\bar{z})^2-R^2=0$	$\bar{z} R$
C/X	Cylinder	Parallel to X-axis	$(y-\bar{y})^2+(z-\bar{z})^2-R^2=0$	$\bar{y} \bar{z} R$
C/Y		Parallel to Y-axis	$(x-\bar{x})^2+(z-\bar{z})^2-R^2=0$	$\bar{x} \bar{z} R$
C/Z		Parallel to Z-axis	$(x-\bar{x})^2+(y-\bar{y})^2-R^2=0$	$\bar{x} \bar{y} R$
CX		On X-axis	$y^2+z^2-R^2=0$	R
CY		On Y-axis	$x^2+z^2-R^2=0$	R
CZ		On Z-axis	$x^2+y^2-R^2=0$	R
K/X	Cone	Parallel to X-axis	$\sqrt{(y-\bar{y})^2+(z-\bar{z})^2}-t(x-\bar{x})=0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Y		Parallel to Y-axis	$\sqrt{(x-\bar{x})^2+(z-\bar{z})^2}-t(y-\bar{y})=0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Z		Parallel to Z-axis	$\sqrt{(x-\bar{x})^2+(y-\bar{y})^2}-t(z-\bar{z})=0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
KX		On X-axis	$\sqrt{y^2+z^2}-t(x-\bar{x})=0$	$\bar{x} t^2 \pm 1$
KY		On Y-axis	$\sqrt{x^2+z^2}-t(y-\bar{y})=0$	$\bar{y} t^2 \pm 1$
				$\bar{z} t^2 \pm 1$
KZ		On Z-axis	$\sqrt{x^2+y^2}-t(z-\bar{z})=0$	$\pm 1$ used only for 1 sheet cone
SQ	Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axis parallel to X-, Y-, or Z-Axis	$A(x-\bar{x})^2+B(y-\bar{y})^2+C(z-\bar{z})^2$ $+2D(x-\bar{x})+2E(y-\bar{y})$ $+2F(z-\bar{z})+G=0$	A B C D E F G $\bar{x} \bar{y} \bar{z}$
GQ	Cylinder Cone Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axes not parallel to X-, Y-, or Z-axis	$Ax^2+By^2+Cz^2+Dxy+Eyz$ $+Fzx+Gx+Hy+Jz$ $+K=0$	A B C D E F G H J K

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entries
TX	Elliptical or circular		$(x-\bar{x})^2/B^2 + (\sqrt{(y-\bar{y})^2 + (z-\bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
TY	torus. Axis is		$(y-\bar{y})^2/B^2 + (\sqrt{(x-\bar{x})^2 + (z-\bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
TZ	parallel to X-, Y-, or Z- axis		$(z-\bar{z})^2/B^2 + (\sqrt{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} A B C$
XYZP	Surfaces defined by points			

ส่วนคำสั่งข้อมูลหลัก (Data Cards) แบ่งออกเป็น 6 คำสั่งย่อย ได้แก่

	<u>MCNP card name</u>
1. mode,	MODE
2. cell and surface parameter,	IMP:N
3. source specification,	SDEF
4. tally specification,	Fn, En
5. material specification, and	Mn
6. problem cutoffs.	NPS

1) คำสั่งนิยามชนิดของอนุภาค (Mode cards) โปรแกรมจะ run คำสั่งต่างกันขึ้นกับการป้อนคำสั่ง ดังนี้

MODE N - การเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนเท่านั้น (ค่าเริ่มต้น)

N P - การเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนและโฟตอนที่เกิดการเหนี่ยวนำของอนุภาคนิวตรอน

P - การเคลื่อนที่ของโฟตอนเท่านั้น

E - การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเท่านั้น

NE - การเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนและอิเล็กตรอน

NP E- การเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอน, โฟตอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของอนุภาคนิวตรอนและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ข้อสังเกต หากไม่มีการระบุ mode card ดังกล่าว โปรแกรมจะใช้ mode N ซึ่งเป็นโหมดค่าเริ่มต้น

2) คำสั่งนิยามพารามิเตอร์เซลล์และพื้นผิว (Cell and Surface Parameter cards) ใช้ระบุความสำคัญของเซลล์โดยการกำหนด IMP: ตามด้วยอนุภาคที่เราสนใจ กำหนดเลข 1 เมื่อต้องการให้

อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ที่สนใจ และ 0 เมื่อไม่ต้องการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ ยกตัวอย่างการกำหนดปัญหาให้มีเซลล์ 4 เซลล์และไม่ต้องการให้อนุภาคนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านเซลล์สุดท้าย

IMP:N 1 1 1 0

3) คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี (Source Specification cards) ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

POS = x y z (ตำแหน่ง)	ค่าเริ่มต้น คือ 0 0 0
CEL = เซลล์ที่กำหนดเป็นต้นกำเนิดรังสี	
ERG = พลังงานของต้นกำเนิดรังสี	ค่าเริ่มต้น คือ 14 MeV
WGT = ค่าน้ำหนักเริ่มต้น	ค่าเริ่มต้น คือ 1
TME = เวลา	ค่าเริ่มต้น คือ 0
PAR = ชนิดของอนุภาค	1 สำหรับ N, N P, N P E; 2 สำหรับ P, P E; 3 สำหรับ E

ตัวอย่างการกำหนดคำสั่งต้นกำเนิดรังสีอนุภาคนิวตรอนพลังงาน 14 MeV ที่ตำแหน่ง (0,-4,-2.5) ในเซลล์ 1 ดังนี้

SDEF pos = 0 -4 -2.5 CEL = 1 ERG = 14 WGT = 1 TME = 0 PAR = 1

4) คำสั่งนิยามประมาณค่า (Tally cards) เป็นคำสั่งที่ระบุความต้องการให้โปรแกรมคำนวณสิ่งใด ในการป้อนคำสั่งสามารถกำหนด tally ได้มากกว่า 1 tally card Tally ที่ใช้ในโปรแกรมการคำนวณมอนติคาร์โล มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 การระบุ Tally และความหมาย

Tally Mnemonic	Description
F1:N or F1:p or F1:E	Surface Current
F2:N or F2:P or F2:E	Surface flux
F4:N or F4:P or F4:E	Track length estimate of cell flux
F5a:N or F5a:P	Flux at a point (point detector)
F6:N or F6:P or F6:N,P	Track length estimate of energy deposition
F7:N	Track length estimate of fission energy deposition
F8:P or F8:E or F8:P,E	Energy distribution of pulses created in a detector

การกำหนด Tally จะระบุตัวเลข 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, หรือมากกว่า 10 เนื่องจากการป้อนคำสั่งอาจมีหลาย Tally ที่มีพลังงานต่างกัน เช่น F4:N, F14:N, F104:N ต่างก็หมายถึงการคำนวณฟลักซ์ของเซลล์เช่นเดียวกัน [11]

5) คำสั่งนิยามชนิดของวัสดุ (Materials cards) ทำหน้าที่อธิบายชนิดของวัสดุในลักษณะของไอโซโทปที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์

Mm ZAID<sub>1</sub> fraction<sub>1</sub> ZAID<sub>2</sub> fraction<sub>2</sub> ...

ในการป้อนคำสั่งจะประกอบด้วยหมายเลข m ระบุวัสดุที่สัมพันธ์กับตัวเลขในคอลัมน์ที่ 2 ของนิยามคำสั่งเซลล์ ตัวเลข ZAID จะบอกถึงชนิดของไอโซโทปของวัสดุตามด้วยสัดส่วนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุ โดยทั่วไปแล้วการระบุ ZAID จะอยู่ในรูปแบบ ZZAAA.nnX

เมื่อ ZZZ คือ เลขอะตอมของนิวไคลด์

AAA คือ เลขมวลของนิวไคลด์ ยกเว้น โฟตอนและอิเล็กตรอน

nn คือ ค่า Cross-section ของธาตุหรือนิวไคลด์

X คือ ประเภทของข้อมูล เช่น C คือพลังงานต่อเนื่อง; D คือการแบ่งพลังงาน

เป็นช่วงๆ

6) คำสั่งนิยามหยุดการทำงาน (Problem Cut off) เป็นคำสั่งสิ้นสุดการคำนวณของโปรแกรม MCNP ซึ่งอาจจะเป็นการกำหนดจำนวนของอนุภาค (NPS)

### บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาของบทนี้อธิบายถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ วิธีดำเนินการวิจัย การจำลองระบบการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาและการ Run โปรแกรม MCNP5

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

##### 3.1.1 อุปกรณ์สำหรับระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว

- 1) ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน อะเมริเซียม-241/เบริลเลียม (Am-241/Be) ความแรง 30 มิลลิวรี จำนวน 3 เม็ด
- 2) เครื่องสำรวจรังสีแกมมา/นิวตรอน Ludlum รุ่น 2363 และรุ่น M42-41L PLESCILA



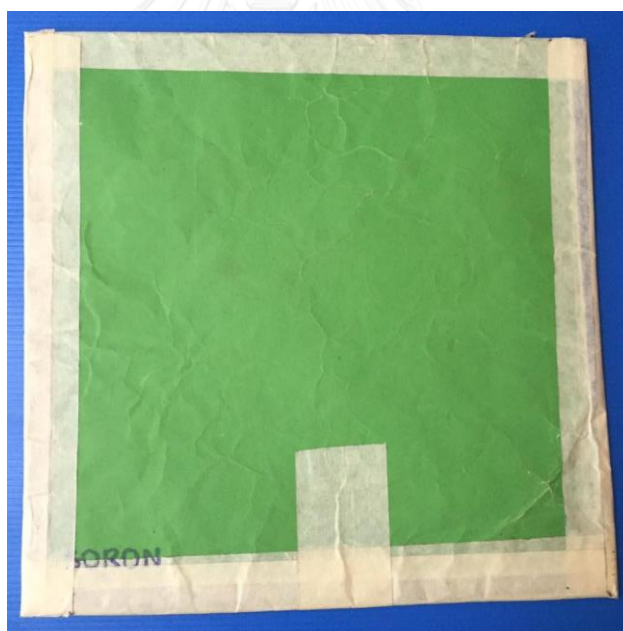
รูปที่ 3-1 เครื่องสำรวจรังสีแกมมา/นิวตรอน Ludlum รุ่น 2363 และรุ่น M42-41L PLESCILA

3) แผ่นแคดเมียมหนา 0.1 ซม. จำนวน 1 แผ่น



รูปที่ 3-2 แผ่นแคดเมียมหนา 0.1 ซม.

4) แผ่นยางผสมโบรอนหนา 0.4 ซม. จำนวน 1 แผ่น



รูปที่ 3-3 แผ่นยางผสมโบรอนหนา 0.4 ซม.



5) แผ่นอะคริลิกหนา 1 ซม. ขนาด 30 ซม. x 30 ซม. จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3-4 แผ่นอะคริลิกหนา 1 ซม.

### 3.1.2 อุปกรณ์สำหรับระบบวัดการส่งผ่านรังสีแกมมา

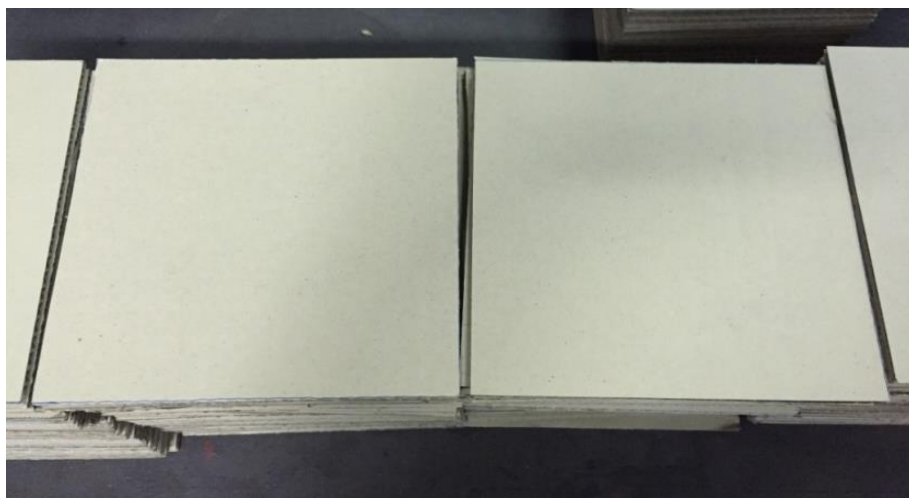
- 1) ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ซีเซียม-137 (Cs-137) ความแรง 100 ไมโครคูรี จำนวน 1 เม็ด
- 2) หัววัดรังสีแกมมาชนิดซินทิลเลชัน โซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)



รูปที่ 3-5 หัววัดรังสีแกมมาชนิดซินทิลเลชัน โซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)

- 3) NIM BIN power supply รุ่น 4001C ของ ORTEC
- 4) แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง รุ่น 3002 ของ CANBERRA
- 5) อุปกรณ์ขยายสัญญาณ รุ่น 2022 ของ CANBERRA
- 6) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) พร้อมซอฟต์แวร์ GENIE-2000

### 3.1.3 กระจาดลูกฟูกขนาด 15 ซม. x 15 ซม.



รูปที่ 3-6 กระจาดลูกฟูกที่ตัดให้มีขนาด 15 ซม. x 15 ซม.

### 3.1.4 เบ้าอัดกระจาด



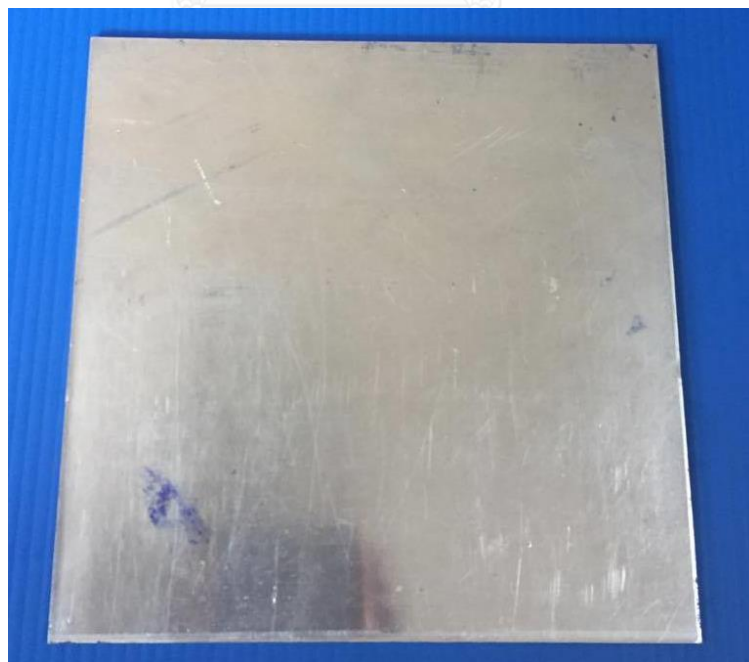
รูปที่ 3-7 เบ้าอัดกระจาด

### 3.1.5 เครื่องอัด รูน HP 100



รูปที่ 3-8 เครื่องอัด รูน HP 100

### 3.1.6 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.2 ซม. ขนาด 15 ซม. x 15 ซม.



รูปที่ 3-9 แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.2 ซม.

## 3.1.7 สายรัดพลาสติก



รูปที่ 3-10 สายรัดพลาสติก

## 3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น DS-708 ของ TS SCALE และ รุ่น FEJ-1500A ของ CST



รูปที่ 3-11 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น DS-708 ของ TS SCALE



รูปที่ 3-12 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น FEJ-1500A ของ CST

### 3.1.9 ตู้อบ Heraeus VT5042 EK vacuum oven



รูปที่ 3-13 ตู้อบ Heraeus VT5042 EK vacuum oven

### 3.1.10 เครื่องวัดความชื้น รุ่น MD916



รูปที่ 3-14 เครื่องวัดความชื้น รุ่น MD916

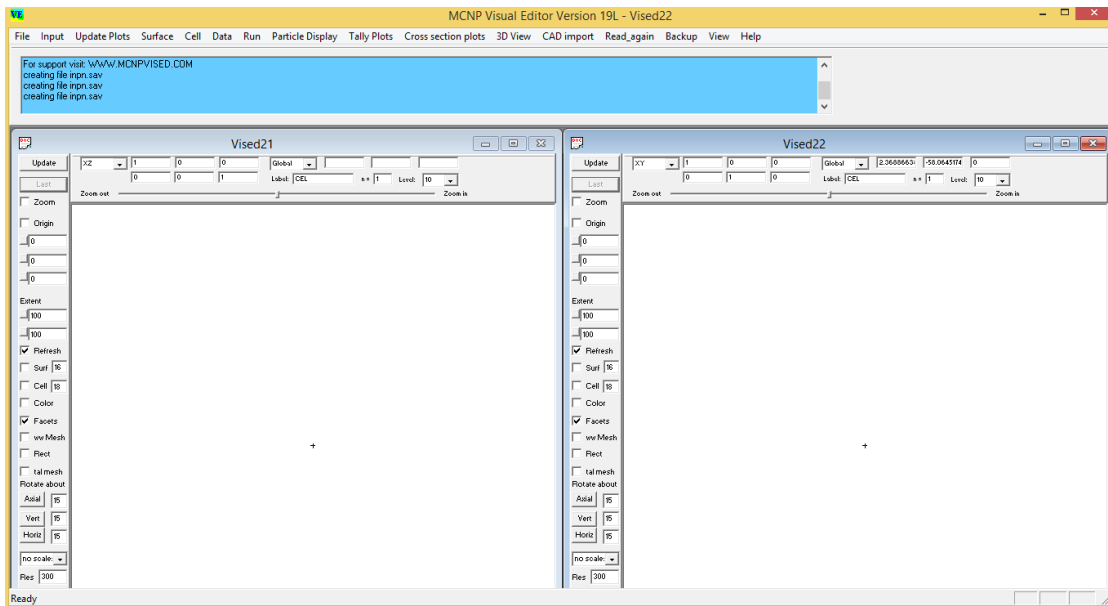
## 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษา และค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดความชื้นในวัสดุโดยใช้เทคนิครังสีวิธีต่างๆ รวมถึงโปรแกรมคำนวณและจำลองการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับวัสดุด้วยวิธีมอนติคาร์โล
- 2) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการแปรรูปกระดาษใช้แล้ว การตรวจสอบความชื้นรวมถึงการซื้อขายกระดาษใช้แล้วระหว่างโรงงานผู้แปรรูปและโรงงานผู้ผลิต
- 3) จำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนขนาดทั่วไปที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรม MCNP เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ
- 4) ออกแบบระบบวัดที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม MCNP
- 5) ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่มีความชื้นต่างๆกันโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP และผลการทดลองจากเทคนิคการชั่งน้ำหนัก
- 6) วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

### 3.2.1 การ Run โปรแกรม MCNP5

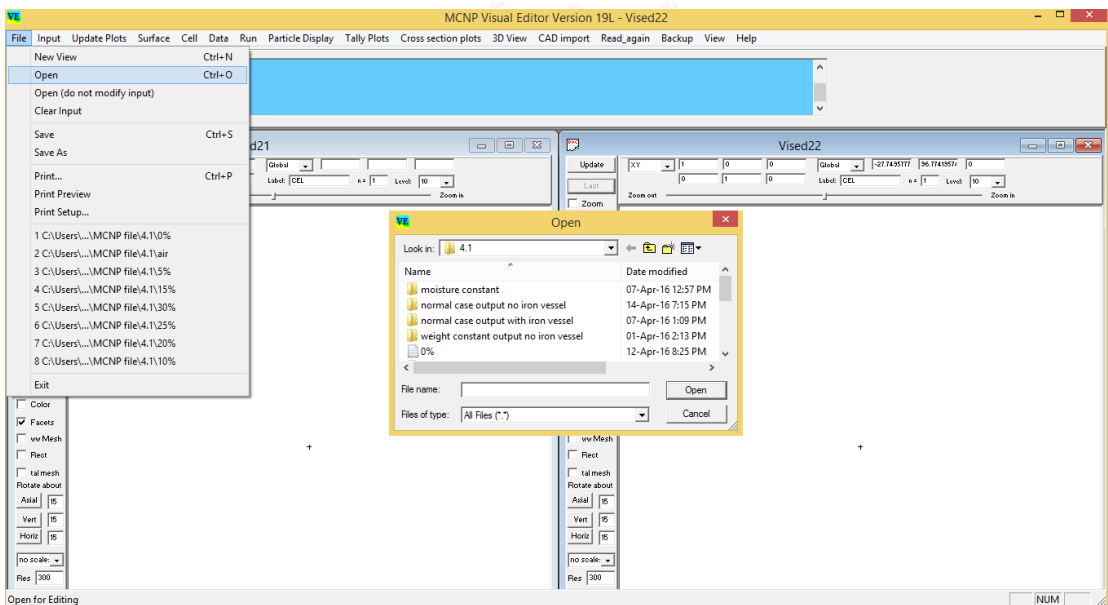
อันดับแรกจะทำการกำหนดข้อมูลป้อนเข้าไว้ที่โปรแกรม Notepad จากนั้นจะทำการเรียกข้อมูลป้อนเข้าตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 1) เปิดโปรแกรม MCNP Visual editor



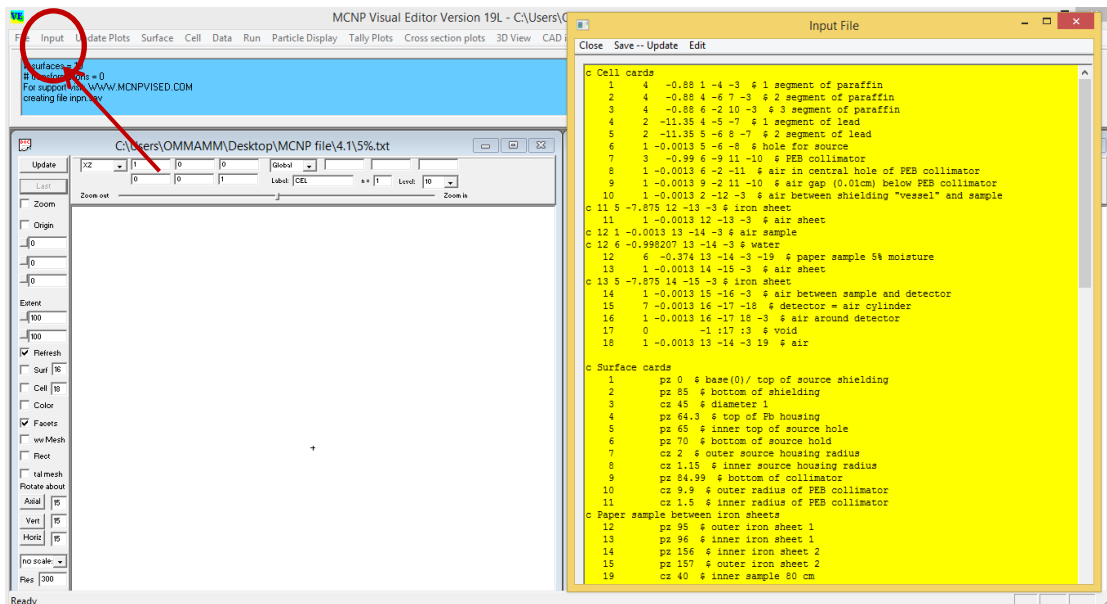
รูปที่ 3-15 MCNP Visual editor

#### 2) เรียกไฟล์โค้ดที่ต้องการ



รูปที่ 3-16 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ด

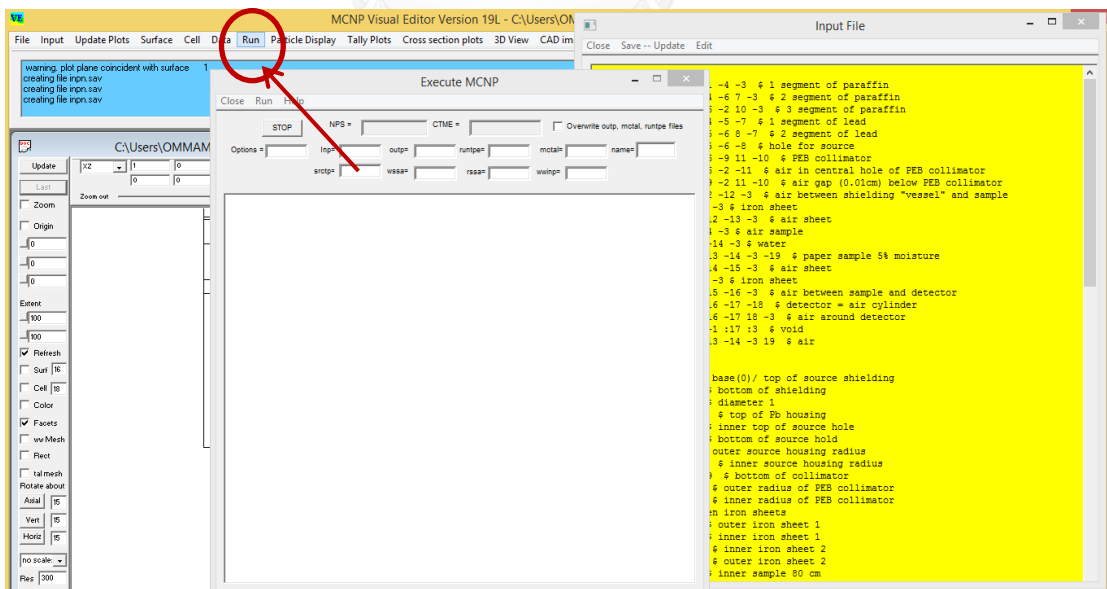
3) คลิก input จะปรากฏข้อมูลโค้ดที่สร้างไว้



รูปที่ 3-17 MCNP Visual editor หน้า Input file

4) การ Run ข้อมูลทำได้ 2 วิธีดังนี้

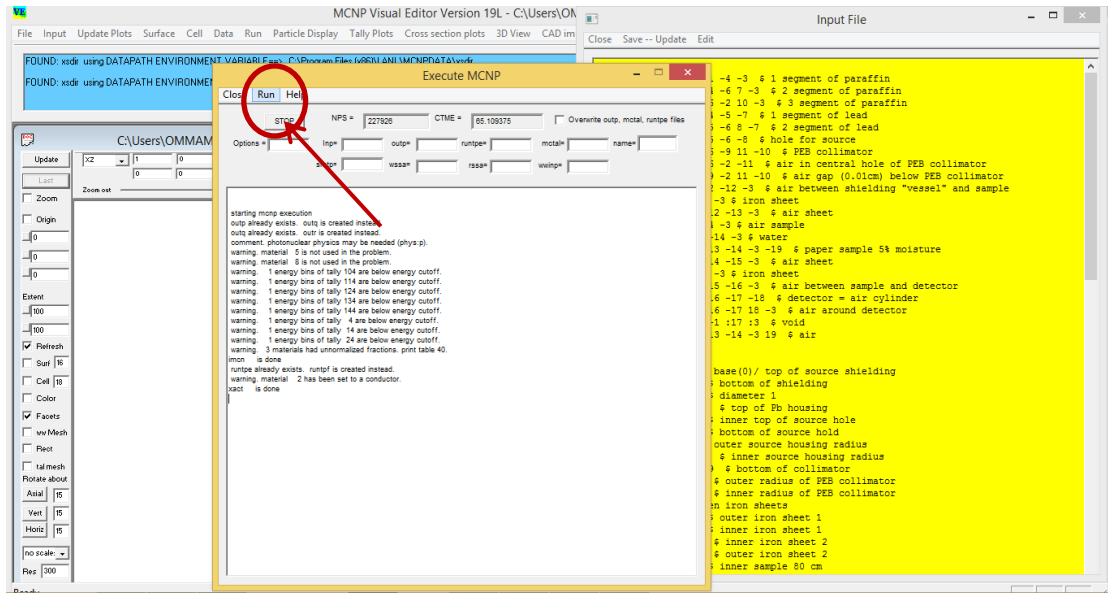
4.1) Run จากโปรแกรม MCNP Visual editor (VISed) โดยคลิกที่ไอคอน Run จะปรากฏหน้า Execute MCNP



รูปที่ 3-18 ขั้นตอนการ Run โปรแกรม (1)



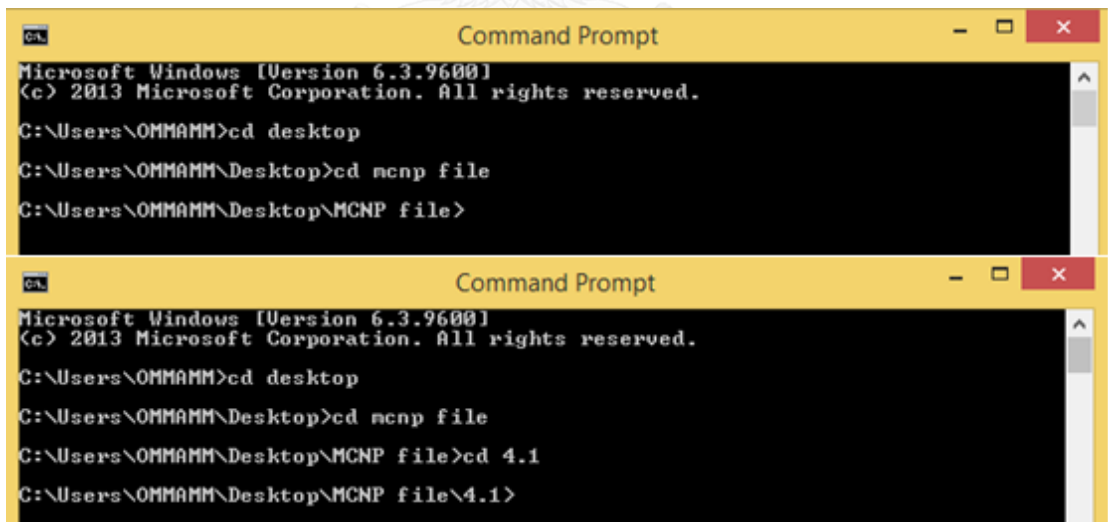
คลิกที่ไอคอน Run อีกครั้งเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค



รูปที่ 3-19 ขั้นตอนการ Run โปรแกรม (2)

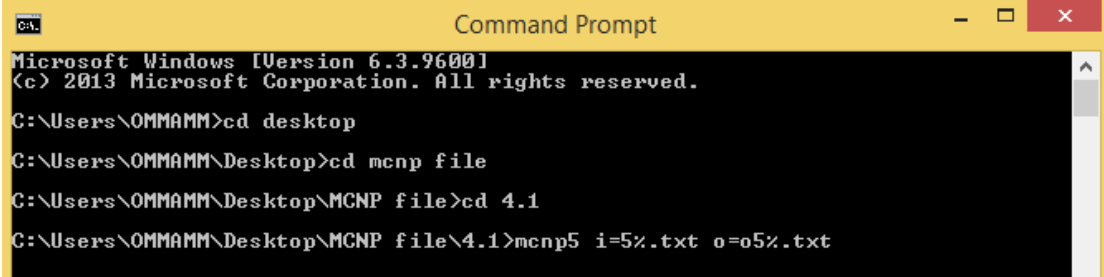
4.2) Run ด้วยโปรแกรม Command Prompt

- ไฟล์โค้ดจะอยู่ที่ desktop>MCNP file>4.1



รูปที่ 3-20 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ดด้วยโปรแกรม Command Prompt (1)

- พิมพ์ mcnp5 ตามด้วย i=ชื่อไฟล์โค้ดที่ต้องการ Run.txt และตั้งระบุไฟล์ output โดยการพิมพ์ o=ชื่อไฟล์ output.txt

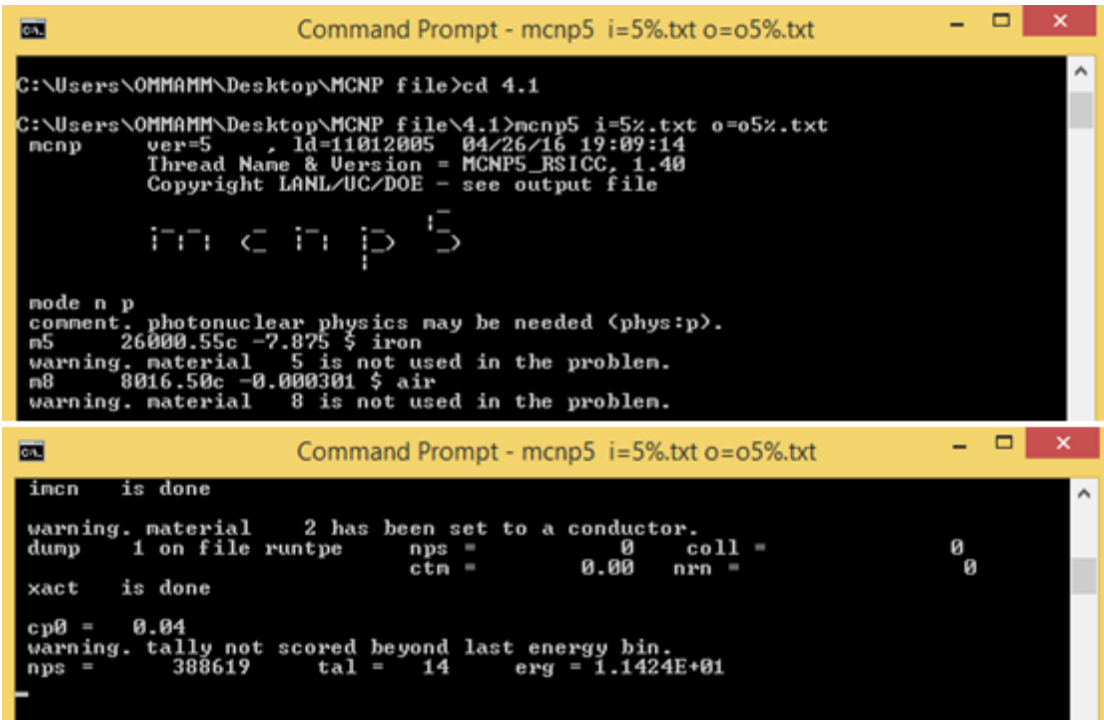


```

Microsoft Windows [Version 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\OMMAMM>cd desktop
C:\Users\OMMAMM\Desktop>cd mcnp file
C:\Users\OMMAMM\Desktop\MCNP file>cd 4.1
C:\Users\OMMAMM\Desktop\MCNP file\4.1>mcnp5 i=5%.txt o=o5%.txt
  
```

รูปที่ 3-21 ขั้นตอนการเรียกไฟล์โค้ดด้วยโปรแกรม Command Prompt (2)



```

C:\Users\OMMAMM\Desktop\MCNP file>cd 4.1
C:\Users\OMMAMM\Desktop\MCNP file\4.1>mcnp5 i=5%.txt o=o5%.txt
mcnp  ver=5      , ld=11012005  04/26/16 19:09:14
      Thread Name & Version = MCNP5_RSICC, 1.40
      Copyright LANL/UC/DOE - see output file

      m c n p 5

mode n p
comment. photonuclear physics may be needed <phys:p>.
m5      26000.55c -7.875 $ iron
warning. material 5 is not used in the problem.
m8      8016.50c -0.000301 $ air
warning. material 8 is not used in the problem.

incn  is done

warning. material 2 has been set to a conductor.
dump  1 on file runtpe      nps =          0      coll =          0
      ctn =          0.00      nrn =          0

xact  is done

cp0 = 0.04
warning. tally not scored beyond last energy bin.
nps = 388619      tal = 14      erg = 1.1424E+01
  
```

รูปที่ 3-22 โปรแกรม Command Prompt ขณะ Run ข้อมูล

5) ไฟล์ Output ที่ได้

```

o5 - Notepad
File Edit Format View Help
Thread Name & Version - MCNP5_RSTCC, 1.40

          * * * * *
          |   M C N P 5   |
          * * * * *

This program was prepared by the Regents of the University of
California at Los Alamos National Laboratory (the University) under
contract number W-7495-ENG-26 with the U.S. Department of Energy
(DOE). The University has certain rights in the program pursuant to
the contract and the program should not be copied or distributed
outside your organization. All rights in the program are reserved
by the DOE and the University. Neither the U.S. Government nor the
University makes any warranty, express or implied, or assumes any
liability or responsibility for the use of this software.

-----
mcnp  version 5      id=11012005      04/12/16 20:29:21
*****
i=5%.txt o=5.txt      probid = 04/12/16 20:29:21

1-      c Cell cards
2-      1 4 -0.880 1 -4 -3 $ 1 segment of paraffin
3-      2 4 -0.880 4 -6 7 -3 $ 2 segment of paraffin
4-      3 4 -0.880 6 -2 10 -3 $ 3 segment of paraffin
5-      4 2 -11.35 4 -5 -7 $ 1 segment of lead
6-      5 2 -11.35 5 -6 8 -7 $ 2 segment of lead
7-      6 1 -0.0013 5 -6 -8 $ hole for source
8-      7 3 -0.00 9 -11 -10 $ PEB collimator
9-      8 1 -0.0013 6 -2 -11 $ air in central hole of PEB collimator
10-     9 1 -0.0013 9 -2 11 -10 $ air gap (0.01cm) below PEB collimator
11-     10 1 -0.0013 2 -12 -3 $ air between shielding "vessel" and sample
12-     c 11 5 -7.875 12 -13 -3 $ iron sheet
13-     11 1 -0.0013 12 -13 -3 $ air sheet
14-     c 12 1 -0.0013 13 -14 -3 $ air sample
15-     c 12 6 -0.998207 13 -14 -3 $ water

-----
computer time in secrun      715.04 minutes      bank overflow to backup file      0
source particles per minute      1.3985E+05
random numbers generated      51923592831      most random numbers used was      15052 in history      47072108

range of sampled source weights = 2.4542E-01 to 1.1400E+01
source efficiency = 1.0000 in cell      6
1neutron activity in each cell      print table 126

      cell      tracks      population      collisions      collisions      number      flux      average      average
      entering      population      collisions      * weight      weighted      weighted      track weight      track nfp
                                     (per history)      energy      energy      (relative)      (cm)
1      1      21105121      18523429      267680126      6.7628E+00      4.1623E-03      1.8541E+00      2.9033E+00      2.6127E+00
2      2      95207952      66493833      989458128      6.3817E+00      5.6839E-01      2.1034E+00      1.3240E+00      2.8562E+00
3      3      37548352      31557619      365786524      2.6140E+00      3.6651E-01      1.7707E+00      7.2138E-01      2.5337E+00
4      4      4818782      4368659      1120478      3.8823E-02      2.7437E-02      1.1973E+00      3.7780E+00      4.5205E+00
5      5      89246564      77267938      25229830      2.6511E-01      4.8628E-02      3.3962E+00      3.8495E+00      4.5682E+00
6      6      18722898      180060833      15682      1.4666E-04      1.9643E-01      3.8381E+00      9.2248E-01      1.9933E+04
7      7      96028000      74154024      779361084      4.2382E+00      5.0300E-03      1.9543E+00      5.8780E-01      2.4641E+00
8      8      43411885      35220068      17830      7.5573E-05      1.3967E-02      2.7678E+00      3.6186E-01      9.0694E+03
9      9      7119880      6710189      12      3.4694E-08      4.9035E-01      2.3303E+00      1.3309E-01      8.3822E+03
10     10     18434583     12398652     65481     2.4986E-04     1.6348E-03     1.9304E+00     3.8432E-01     7.2874E+03
11     11     17864022     13776954     6784     2.5714E-05     1.4567E-03     1.8536E+00     3.8836E-01     7.3230E+03
12     12     12438661     11671518     349822115     9.6895E-01     2.8566E-04     1.1904E+00     3.8851E-01     7.5721E+00
13     13     1411619     1406589     572     1.4241E-06     8.5796E-04     2.3148E+00     2.6979E-01     7.7368E+03
14     14     1389376     1385873     4979     1.2067E-05     8.7827E-04     2.3901E+00     2.6915E-01     7.8292E+03
15     15     19113     19182     31     8.8902E-08     1.3722E-03     3.2522E+00     2.6180E-01     9.8228E+03
16     16     120092     1184446     4785     1.1166E-05     9.6941E-04     2.5746E+00     2.6918E-01     8.1876E+03
18     18     6398262     6391282     12909     4.8466E-05     8.8444E-04     2.8287E+00     3.5355E-01     7.2969E+03

total      558864154     468769048     2298527258     2.1266E+01

1photon activity in each cell      print table 126

      cell      tracks      population      collisions      collisions      number      flux      average      average
      entering      population      collisions      * weight      weighted      weighted      track weight      track nfp

Itally 104      nps = 100000000
*      tally type 4      track length estimate of particle flux.      units      1/cm**2
tally for: neutrons
volumes
      cell:      15
      2.55254E+02

cell 15
energy
0.0000E+00      0.0000E+00      0.0000
2.0000E-01      4.15615E-07      0.0211
4.0000E-01      2.62568E-06      0.0914
6.0000E-01      2.08477E-08      0.0600
8.0000E-01      1.82238E-08      0.0705
1.0000E+00      1.61416E-08      0.0800
1.2000E+00      1.68345E-08      0.1904
1.4000E+00      1.50567E-08      0.0918
1.6000E+00      1.48299E-08      0.1626
1.8000E+00      1.69031E-08      0.1890
2.0000E+00      1.62531E-08      0.0938
2.2000E+00      1.46939E-08      0.0993
2.4000E+00      2.07573E-08      0.0847
2.6000E+00      2.21081E-08      0.0858
2.8000E+00      2.07869E-08      0.0809
3.0000E+00      1.91080E-08      0.0756
3.2000E+00      2.00888E-08      0.0729
3.4000E+00      2.04492E-08      0.2403
3.6000E+00      1.38581E-08      0.1034
3.8000E+00      1.49176E-08      0.0862
4.0000E+00      1.81553E-08      0.0761
4.2000E+00      1.68261E-08      0.0895
4.4000E+00      1.68235E-08      0.0954
4.6000E+00      2.16183E-08      0.0712
    
```

รูปที่ 3-23 ไฟล์ Output

### 3.2.2 การออกแบบระบบวัดเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP5

3.2.1.1) การออกแบบระบบวัดเพื่อจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมากับชิ้นงานขนาดใหญ่ในงานอุตสาหกรรม ขนาดมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่โรงงานผู้แปรรูปทำการบีบอัดมีหลายขนาดด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกมัดเศษกระดาษขนาด 80 x 90 x 60 ลบ.ซม. เพื่อทำการจำลองความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP5 ใช้คำสั่ง Tally F4 คำนวณฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่สนใจ

จากการศึกษางานวิจัยทำให้ทราบว่า การสร้างเซลล์ที่เหมาะสมเพื่อใช้การคำนวณนั้น แบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

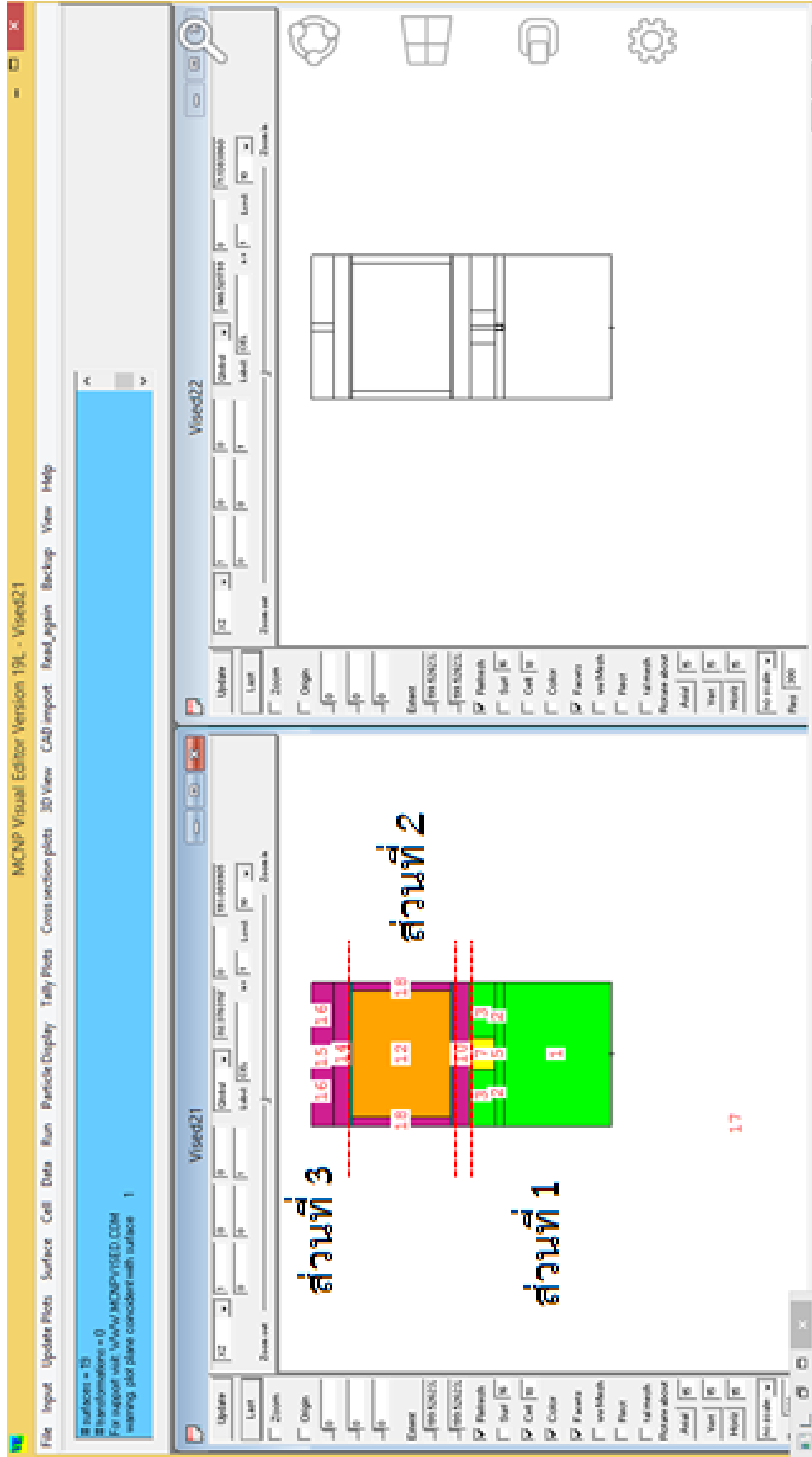
ส่วนที่ 1) ส่วนของกำบังรังสีและภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสี ประกอบด้วยพาราฟินสูง 64.3 ซม. ภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีทำจากตะกั่วสูง 5.7 ซม. และช่องบังค้ำลำรังสี (Collimator) ทำจากโพลีโอทิลีนผสมโบรอน 3% สูง 15 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 ซม.

ส่วนที่ 2) ส่วนของตัวอย่าง มีความกว้าง 80 ซม. สูง 60 ซม. วางห่างจากส่วนช่องบังค้ำลำรังสี (Collimator) 10 ซม. นิวไคลด์ที่ใช้ในการจำลองมัดเศษกระดาษ มีดังต่อไปนี้

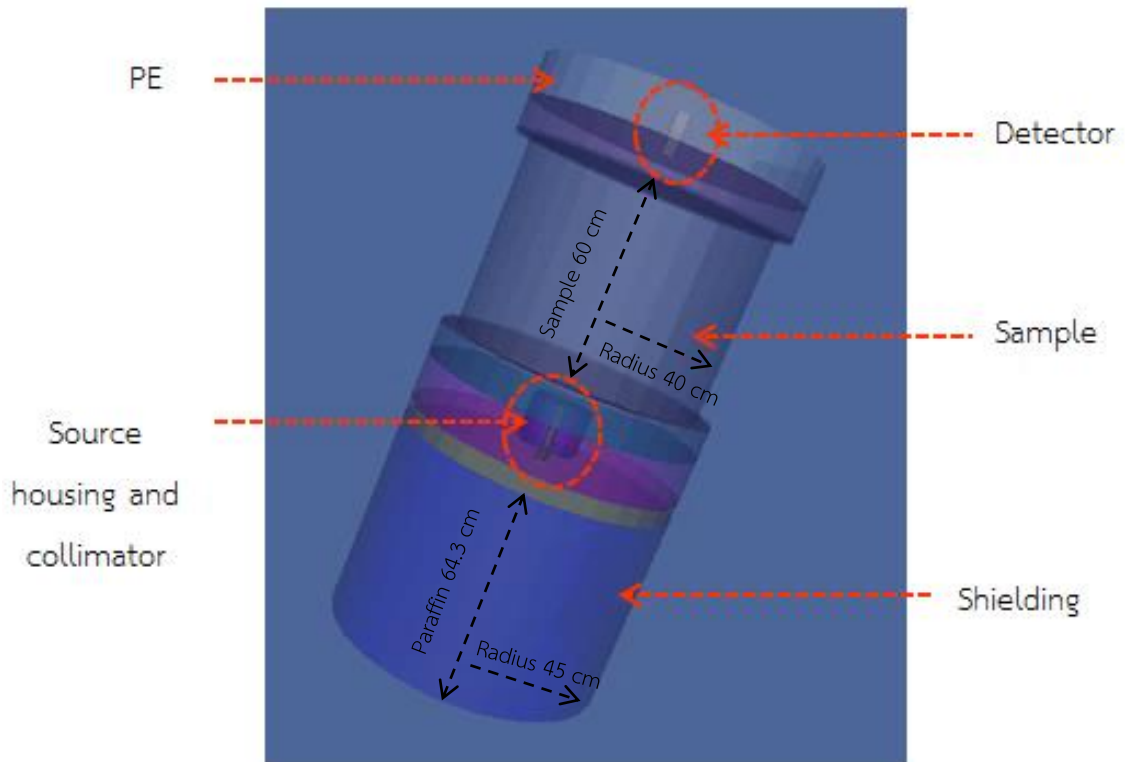
ตารางที่ 5 นิวไคลด์ที่ใช้ในการจำลองการส่งผ่านรังสี

นิวไคลด์	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม)	สัดส่วนโมเลกุล	เปอร์เซ็นต์สัดส่วน
คาร์บอน	1.7	6	44.45
ไฮโดรเจน	0.0898	10	6.22
ออกซิเจน	1.429	5	49.34

ส่วนที่ 3) ส่วนของหัววัดรังสีที่ใช้วัดทั้งนิวตรอนและรังสีแกมมาจำลองด้วยทรงกระบอกของอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ยาว 13 ซม. วางห่างจากตัวอย่าง 10 ซม. หัววัดรังสีจะออกแบบให้มีความคล้ายกับหัววัดรังสีชนิด NE213 Liquid scintillator



รูปที่ 3-24 แบบจำลอง MCNP5 ภาคตัดขวางระนาบ xz

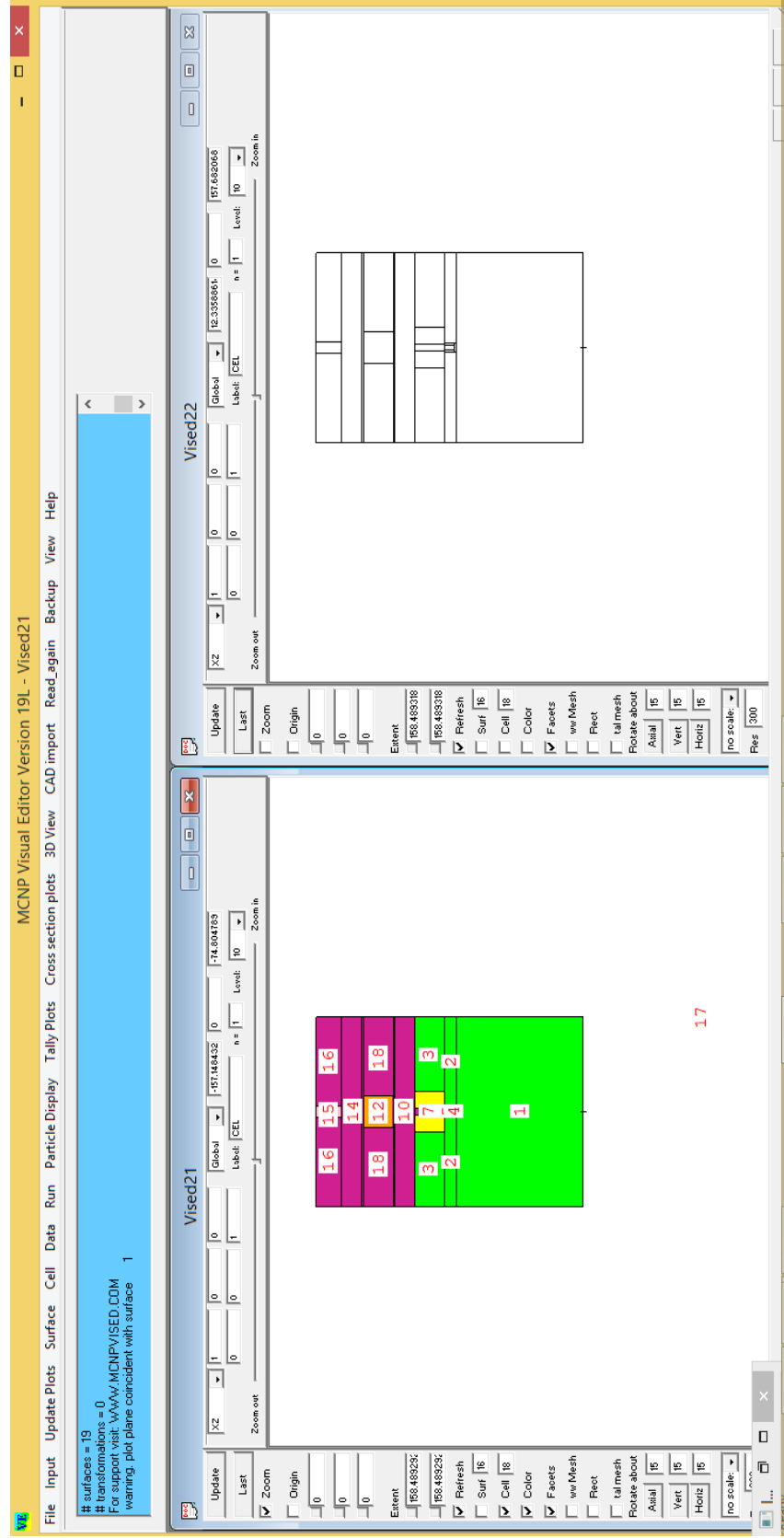


รูปที่ 3-25 แบบจำลองระบบวัดแบบ 3 เมตร กับตัวอย่าง  
ขนาด 80x90x60 ลบ.ซม.

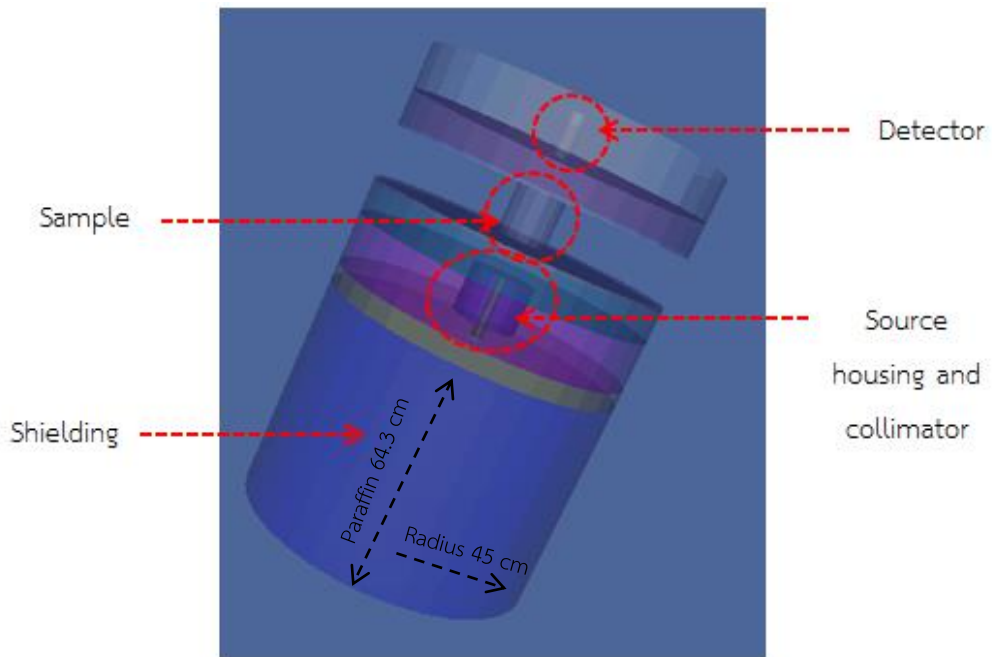
จากรูปที่ 3-25 แสดงการจำลองการจัดวางระบบวัดรังสีซึ่งประกอบไปด้วย

1. ส่วนของกำบังรังสีและภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสี (Shielding and Source housing) ประกอบด้วยพาราฟินสูง 64.3 ซม. ภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีทำจากตะกั่วสูง 5.7 ซม. และช่องบังลำรังสี (Collimator) ทำจากโพลีเอทิลีนผสมโบรอน 3% สูง 15 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 ซม.
2. ส่วนของตัวอย่าง (Sample) มีความกว้าง 80 ซม. สูง 60 ซม. วางห่างจากช่องบังลำรังสี (Collimator) 10 ซม.
3. ส่วนของหัววัดรังสี (Detector) ที่ใช้วัดทั้งนิวตรอนและรังสีแกมมาจำลองด้วยทรงกระบอกของอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ยาว 13 ซม. วางห่างจากตัวอย่าง 10 ซม. หัววัดรังสีจะออกแบบให้มีความคล้ายกับหัววัดรังสีชนิด NE213 Liquid scintillator [5]

3.2.1.2) การออกแบบระบบวัดเพื่อจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา กับชิ้นงานขนาดเล็กสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการงานวิจัยนี้ได้จำลองตัวอย่างที่มีขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 15 ซม. ลักษณะการสร้างเซลล์ในโปรแกรม MCNP5 เช่นเดียวกับที่กล่าวมาเบื้องต้น



รูปที่ 3-26 แบบจำลอง MCNP5 ภาคตัดขวางระนาบ xz



รูปที่ 3-27 แบบจำลองระบบวัดแบบ 3 มิติ กับตัวอย่างมัดเศษกระดาษ  
ขนาด 15x15x15 ลบ.ซม.

แบ่งกรณีศึกษาในการจำลองตัวอย่างเพื่อการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณี 1: ควบคุมให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเท่ากัน แล้วปรับเปลี่ยนความชื้นในตัวอย่างที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

ตารางที่ 6 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีควบคุมความหนาแน่นตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	สัดส่วนองค์ประกอบนิวไคลด์		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
1	0.324	0	0.444467	0.062165	0.493369
2		5	0.444244	0.067730	0.537525
3		10	0.444022	0.073296	0.581682
4		15	0.443800	0.078861	0.625839
5		20	0.443578	0.084427	0.669996
6		25	0.443355	0.089992	0.714152
7		30	0.443133	0.095558	0.758309



กรณี 2: ควบคุมให้ความชื้นในตัวอย่างเท่ากัน แล้วปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของตัวอย่าง  
 ตารางที่ 7 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีควบคุมความชื้นของตัวอย่าง

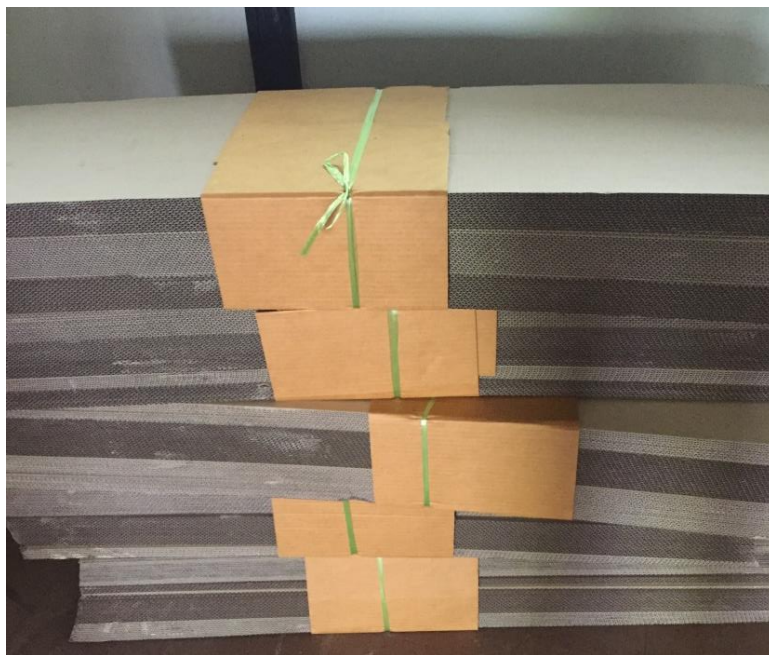
ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	สัดส่วนองค์ประกอบนิวไคลด์		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
1	0.324				
2	0.374				
3	0.424				
4	0.474	15	0.44380	0.078861	0.625839
5	0.524				
6	0.574				
7	0.623				

กรณี 3: ไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น  
 ตารางที่ 8 สัดส่วนนิวไคลด์ที่ใช้ในกรณีไม่ควบคุมทั้งความชื้นและความหนาแน่น

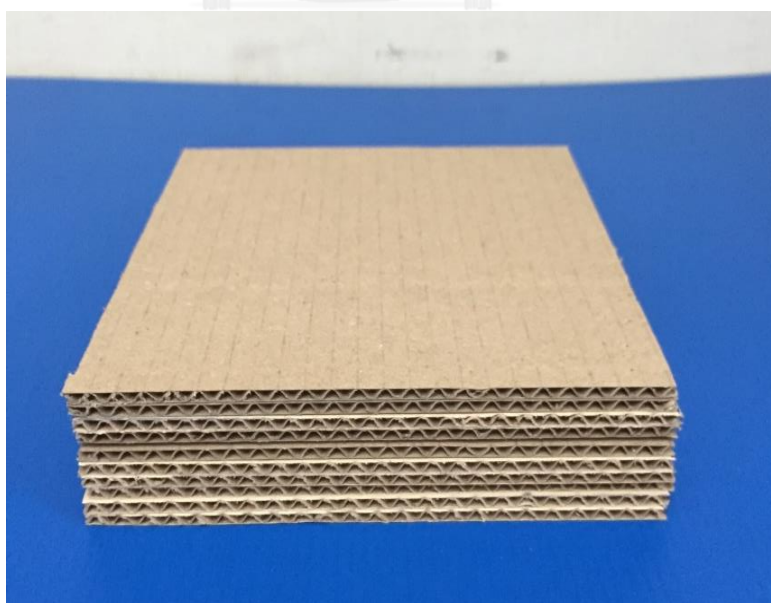
ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	สัดส่วนองค์ประกอบนิวไคลด์		
			คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
1	0.324	0		0.062165	0.493369
2	0.374	5		0.067730	0.537525
3	0.424	10		0.073296	0.581682
4	0.474	15	0.444467	0.078861	0.625839
5	0.524	20		0.084427	0.669996
6	0.574	25		0.089992	0.714152
7	0.623	30		0.095558	0.758309

### 3.2.3 การทดลองโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่มีความชื้นต่างๆ

กระดาษที่นำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างในงานวิจัยนี้จะใช้กระดาษลูกฟูก นำมาตัดให้ได้ขนาดประมาณ 15x15 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3-28 กระดาษลูกฟูกที่ซื้อจากผู้ผลิต



รูปที่ 3-29 กระดาษลูกฟูกที่ตัดให้มีขนาด 15x15 ตร.ซม.

จากนั้นนำกระดาษไปแช่น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นแล้วนำไปบีบอัดให้ได้ความสูงประมาณ 15 ซม. รัศมีตัวอย่างด้วยสายรัดพลาสติกเคเบิลไทร์ แบ่งการเตรียมความชื้นในตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณี 1) ควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษให้เท่ากัน (Weight Constant) ตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษแต่ละก้อนจะมีจำนวนเนื้อกระดาษแห้งต่างกัน จากนั้นนำกระดาษที่มีความชื้นแทรกเข้าไปในตัวอย่างแต่ละก้อนโดยควบคุมให้น้ำหนักหลังจากที่แทรกกระดาษชื้นเข้าไปแล้วแต่ละก้อนมีน้ำหนักเท่ากัน



รูปที่ 3-30 ตัวอย่างกระดาษที่เตรียมให้มีน้ำหนักเท่ากัน

กรณี 2) ควบคุมปริมาณความชื้นต่อปริมาณน้ำหนักรวมของตัวอย่างให้เท่ากันแล้ว (Moisture Constant) ตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษที่ได้จากการเตรียมแต่ละก้อนจะมีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อนำไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความชื้นแล้วตัวอย่างแต่ละก้อนจะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักรวมเท่ากันทุกก้อน

กรณี 3) ไม่มีการควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของตัวอย่าง (Normal case) ในการเตรียมนี้เมื่อนำตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษแต่ละก้อนไปเพิ่มความชื้นจะทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างมัดพิเศษกระดาษเพิ่มขึ้น

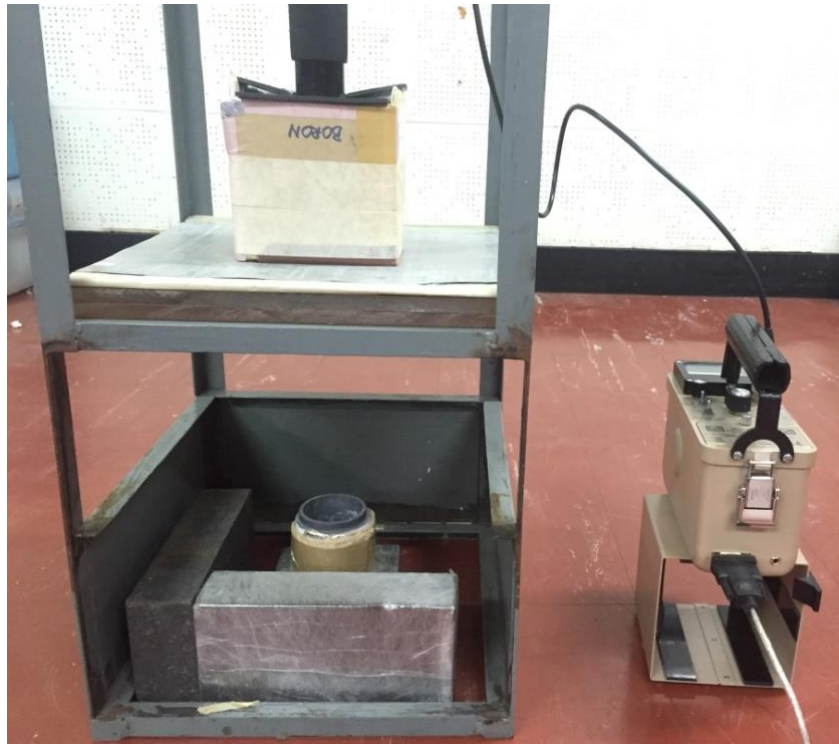


รูปที่ 3-31 ตัวอย่างมัดเศษกระดาศ

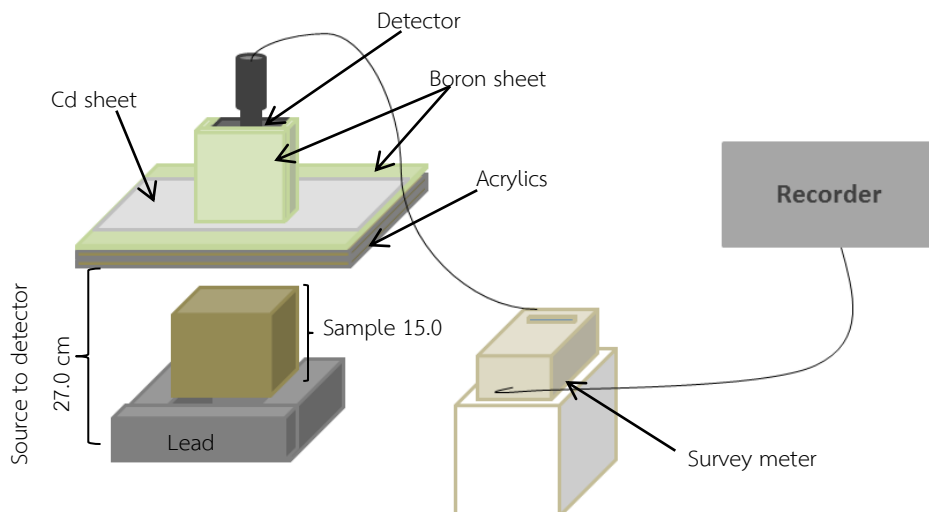


รูปที่ 3-32 การอัดก้อนตัวอย่างมัดเศษกระดาศ

หลังจากนั้นนำตัวอย่างมัดเศษกระดาศไปชั่งน้ำหนักและทำการวัดปริมาณการส่งผ่าน  
 นิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา จากนั้นนำตัวอย่างมัดเศษกระดาศไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ  
 110°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างมัดเศษกระดาศหลังอบแห้งอีกครั้งแล้วคำนวณปริมาณ  
 ความชื้นจากน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปหลังจากอบแห้ง



รูปที่ 3-33 การจัดระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว

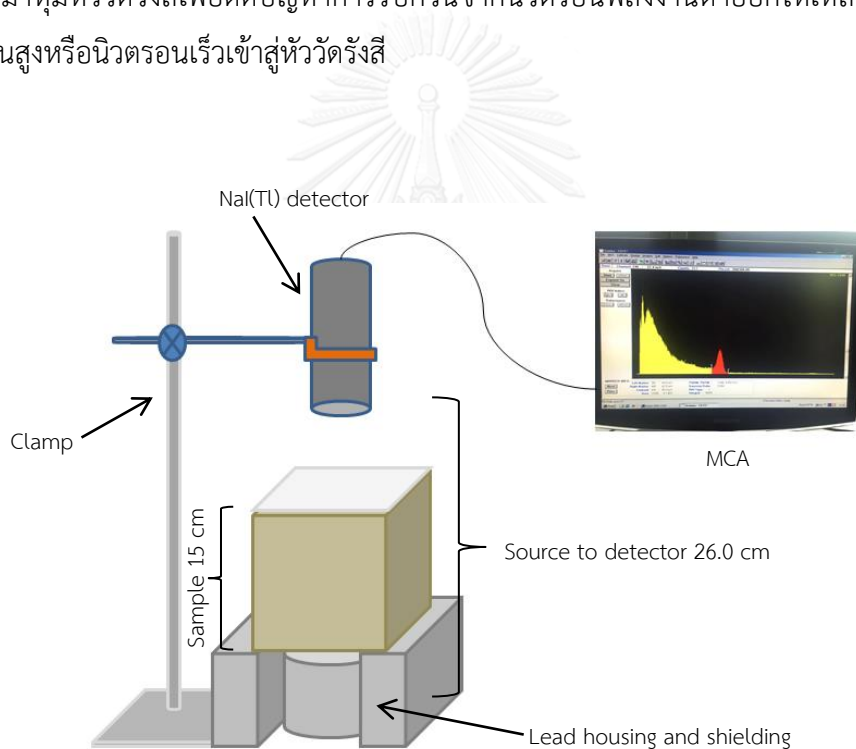


รูปที่ 3-34 แผนภาพการจัดระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว

การวัดความชื้นด้วยนิวตรอนนั้นสามารถทำได้ทั้งการวัดเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากการ  
 หน่วงพลังงานจากความชื้น และนิวตรอนเร็วที่หลีกเลี่ยงการลดทอนด้วยความชื้นทำให้มีความจำเป็น

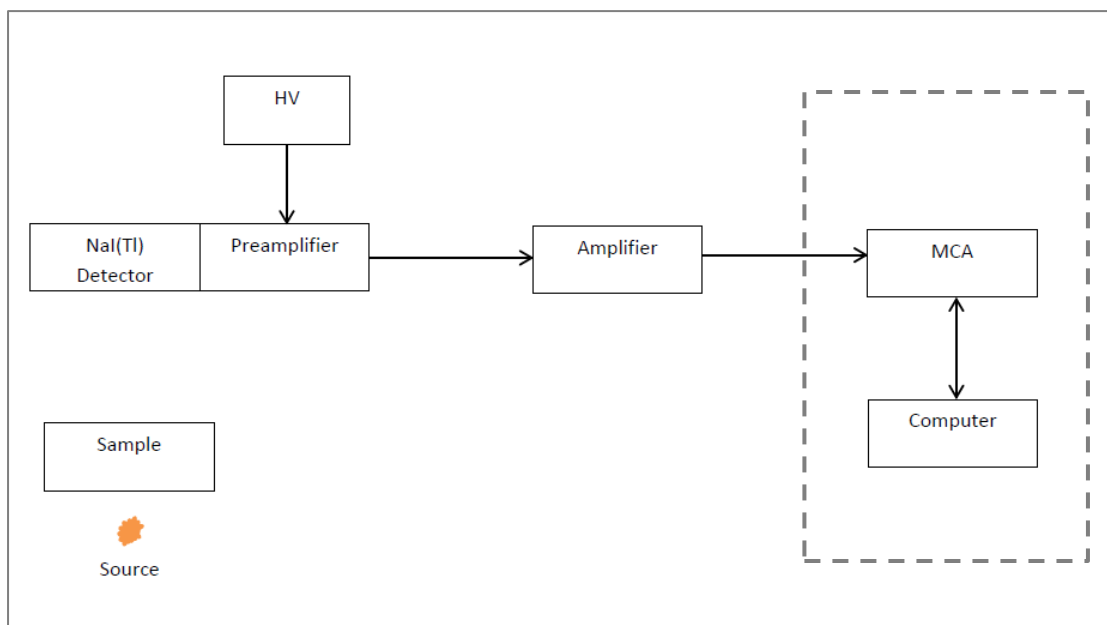
อย่างมากที่จะต้องออกแบบอุปกรณ์ช่วยหัววัดนิวตรอนให้วัดเฉพาะนิวตรอนเร็วโดยการเพิ่มอะคริลิกแผ่นยางผสมโบรอนและแผ่นแคดเมียมเข้าไปบริเวณหน้าหัววัดเพื่อให้อะคริลิกทำหน้าที่หน่วงพลังงานนิวตรอนให้กลายเป็นเอพิเทอร์มัลและเทอร์มัลนิวตรอน แผ่นยางผสมโบรอนและแผ่นแคดเมียมทำหน้าที่ในการตัดนิวตรอนพลังงานต่ำออกไปทำให้เหลือเพียงนิวตรอนพลังงานสูงเท่านั้นที่เข้าสู่หัววัด

เนื่องจากไม่สามารถจัดระบบวัดให้เหมือนโปรแกรมการจำลองได้ จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงการจัดวางระบบวัดนิวตรอนดังแสดงในรูป 3-33 และ 3-34 โดยใช้ตะกั่วเป็นภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน ด้านหน้าของหัววัดรังสีได้มีการนำแผ่นอะคริลิกความหนา 1 ซม. จำนวน 2 แผ่น แผ่นยางผสมโบรอนหนา 0.4 ซม. และแผ่นแคดเมียมหนา 0.1 ซม. มาวางไว้ รวมถึงการนำแผ่นยางผสมโบรอนมาหุ้มหัววัดรังสีเพื่อตัดปัญหาการรบกวนจากนิวตรอนพลังงานต่ำออกให้เหลือเพียงนิวตรอนพลังงานสูงหรือนิวตรอนเร็วเข้าสู่หัววัดรังสี



รูปที่ 3-35 การจัดระบบวัดการส่งผ่านรังสีแกมมา

สำหรับการจัดวางระบบการวัดรังสีแกมมาจะประกอบไปด้วยภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสีที่ทำจากตะกั่ว หัววัดรังสีโซเดียมไอโอดด์ (ทลเลียม) ขนาด 3" x 3" เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel analyzer, MCA) ดังแสดงในรูปที่ 3-35 และแผนภาพการทำงานของระบบวัดรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 3-36



รูปที่ 3-36 แผนภาพการทำงานของระบบวัดการส่งผ่านรังสีแกมมา



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการคำนวณที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมาด้วยโปรแกรม MCNP5 และผลการทดลองที่ได้จากการทดลองปฏิบัติการ ผลการศึกษาจะแสดงในรูปแบบของตาราง ภาพการจำลอง และกราฟแสดงผล พร้อมทั้งอภิปรายสรุปผลการวิจัย

#### 4.1 จำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านมัดเศษกระดาษอัดก้อนขนาดทั่วไปที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรม MCNP เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ

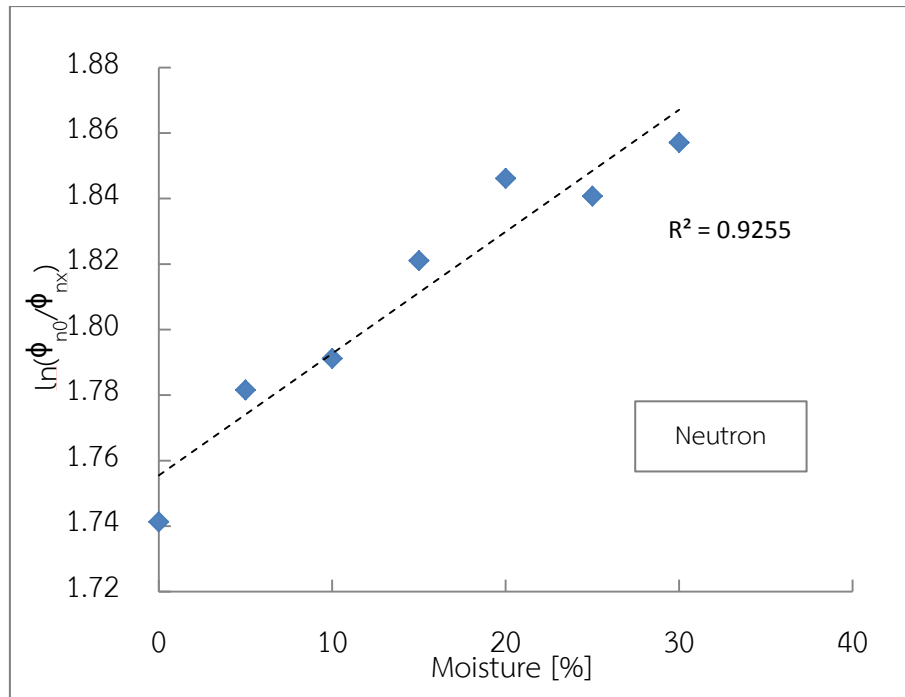
ในการจำลองการส่งผ่านรังสีนั้นได้ทำการจำลองอนุภาคนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม ซึ่งสามารถปลดปล่อยทั้งนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา

จากทฤษฎีของการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาทำให้ทราบว่านิวตรอนเร็วตอบสนองต่อความชื้นและปริมาณความหนาแน่นของตัวอย่าง ในขณะที่รังสีแกมมาจะตอบสนองต่อความหนาแน่นของตัวอย่างเท่านั้น เพื่อเป็นการพิสูจน์ข้อเท็จจริงนี้จึงได้ทำการจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP5 เพื่อศึกษาแนวโน้มของรังสีที่ถูกส่งผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่มีทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นต่างๆ โดยจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ ดังนี้

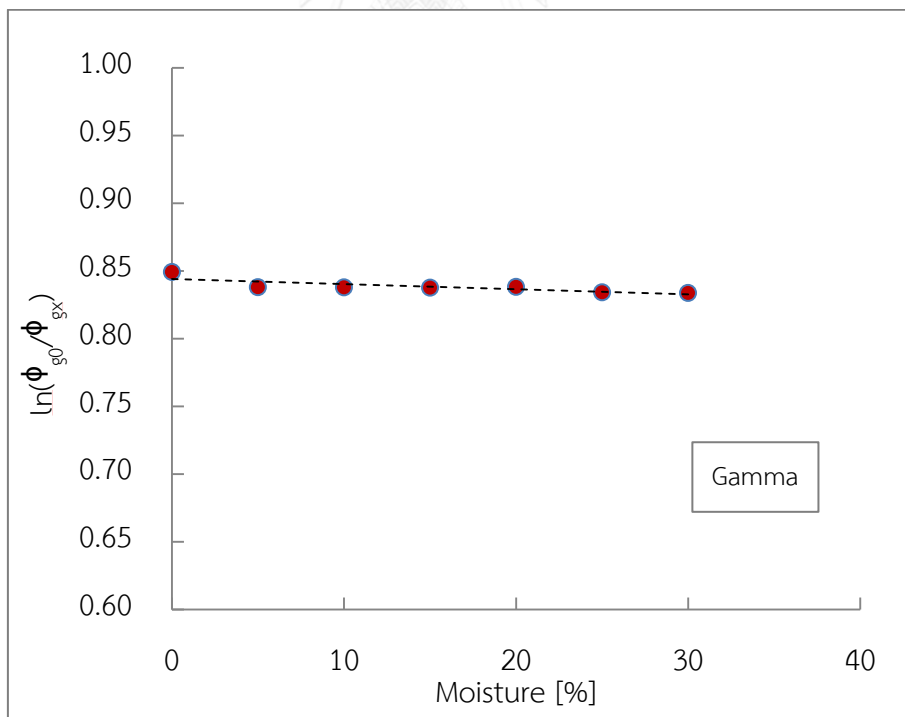
##### 4.1.1 กรณีควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่าง

การจำลองการส่งผ่านรังสีในกรณีที่มีการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษนี้เพื่อพิสูจน์ว่านิวตรอนเร็วตอบสนองต่อปริมาณความชื้นได้ดี ในขณะที่รังสีแกมมาจะไม่ตอบสนองต่อปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคนิวตรอนและแกมมาที่ถูกส่งผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างมัดเศษกระดาษโดยที่ตัวอย่างมัดเศษกระดาษทุกก้อนนั้นถูกควบคุมให้มีความหนาแน่นเดียวกัน แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์กับความชื้นที่เพิ่มขึ้นของนิวตรอนและรังสีแกมมารูปที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ





รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่น

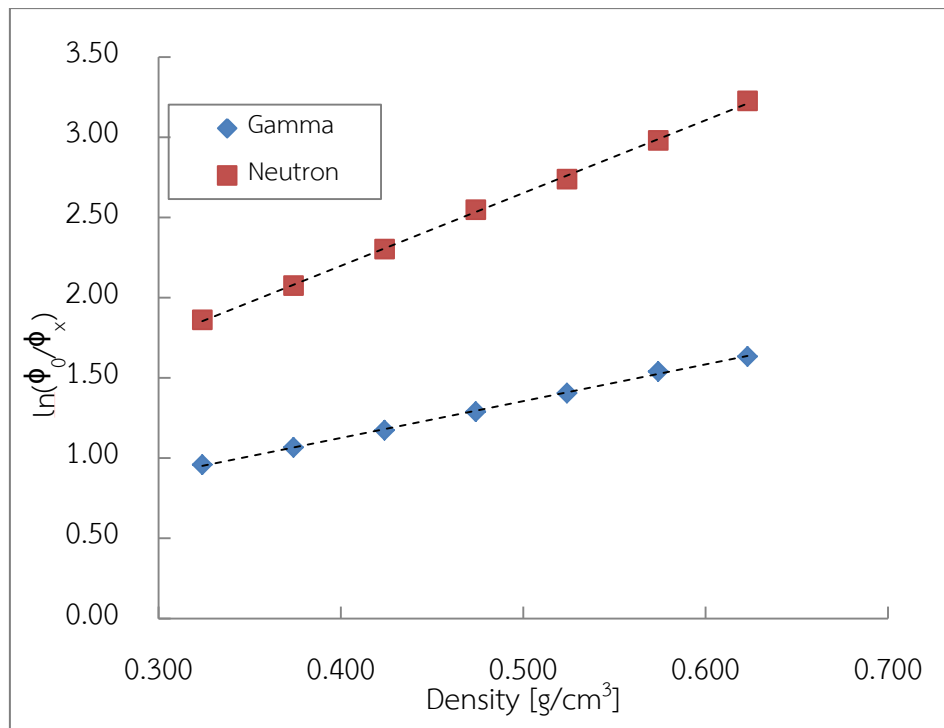


รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{g0}/\phi_{gx})$  ของรังสีแกมมากับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่น

จากรูปที่ 4-1 และ 4-2 จะเห็นว่าเมื่อมีการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ จำนวนฟลักซ์ของอนุภาคนิวตรอนมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้อย่างชัดเจนโดยมีแนวโน้มของความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-1 ค่า  $\ln(\Phi_0/\Phi_x)$  แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของตัวกลางที่รังสีเคลื่อนผ่านเมื่อตัวอย่างมีการเพิ่มปริมาณความชื้นเข้าไปส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่รังสีแกมมามีแนวโน้มความสัมพันธ์ค่อนข้างคงที่เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวอย่างทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีแกมมาคงที่จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า  $\ln(\Phi_{g0}/\Phi_{gx})$  ดังแสดงในรูปที่ 4-2

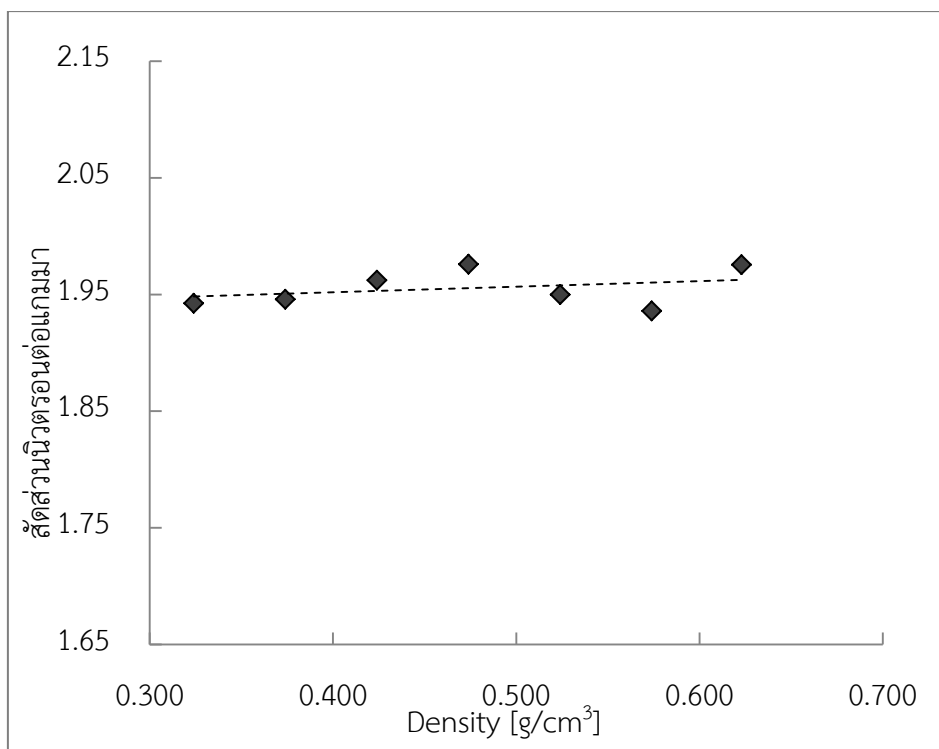
#### 4.1.2 กรณีควบคุมปริมาณความชื้น

จากผลการจำลองการส่งผ่านรังสีในกรณีที่มีการควบคุมปริมาณความชื้นนี้จะเห็นว่าเมื่อควบคุมปริมาณความชื้นตัวอย่างที่ 15% โดยน้ำหนัก แนวโน้มของจำนวนอนุภาคนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในรูปที่ 4-3 มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความหนาแน่นของตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้น สำหรับการลดทอนนิวตรอนเร็ว นั้นเนื่องจากองค์ประกอบของอะตอมไฮโดรเจนในตัวอย่างมัดเศษกระดาษเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เพิ่มโอกาสที่นิวตรอนเร็วเคลื่อนที่ชนเข้ากับอะตอมไฮโดรเจนในตัวอย่างและถูกลดทอนลง ในขณะที่การลดทอนของรังสีแกมมานั้นเป็นผลเนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\Phi_0/\Phi_x)$  กับความหนาแน่น  
เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่าง

หากพิจารณาข้อสำคัญของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา พบว่าการลดทอนของนิวตรอนเร็วจะแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นและปริมาณความหนาแน่นของตัวอย่าง ดังนั้นการลดทอนรังสีแกมมาจะช่วยแก้ค่ารบกวนที่เกิดจากความหนาและความหนาแน่นของตัวอย่าง โดยเมื่อทำการปรับแก้ค่าโดยคำนวณเป็นสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมาจะพบว่าตัวอย่างเม็ดเศษกระดาษที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโดยที่ปริมาณความชื้นคงที่นั้น สัดส่วนของนิวตรอนต่อรังสีแกมมาจะมีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4-4

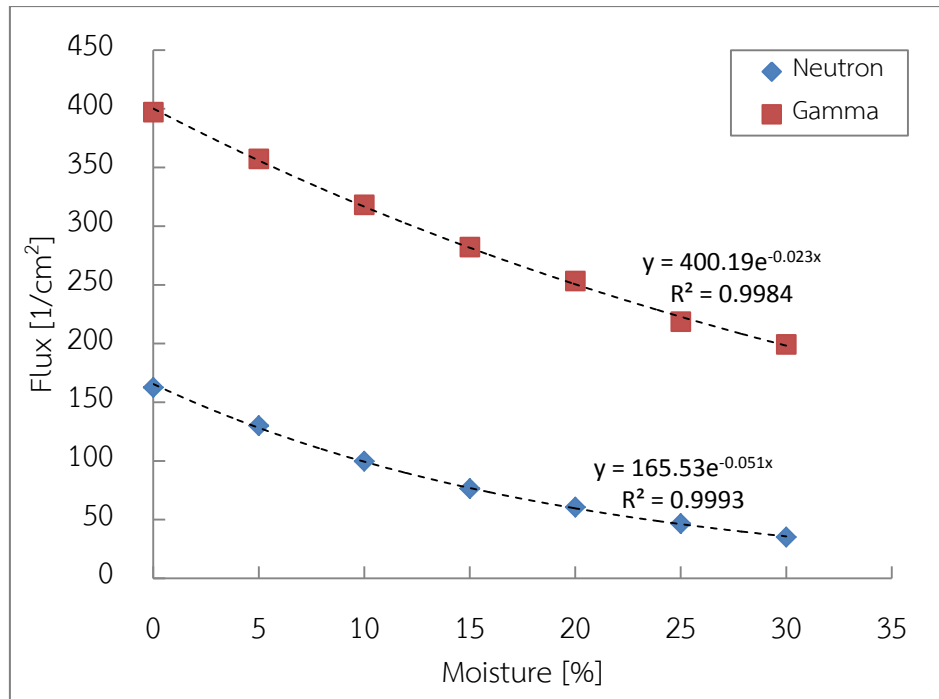


รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมากับความหนาแน่น  
เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่าง

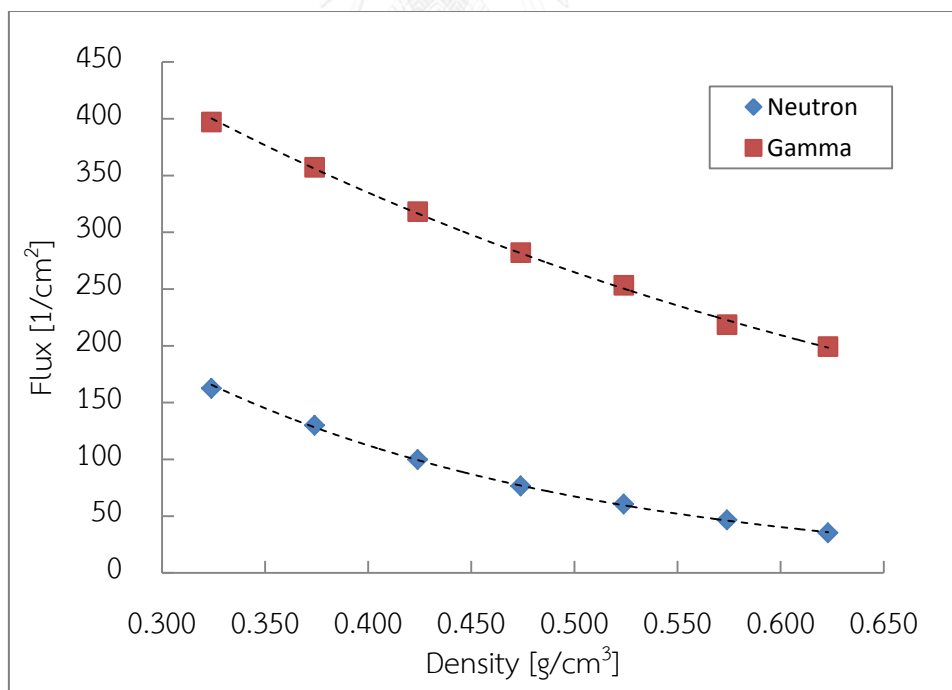
จากการศึกษาผลการตอบสนองรังสีแกมมาและนิวตรอนในการวัดความชื้นด้วยการจำลอง การส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241/เบริลเลียมด้วยโปรแกรม การคำนวณ MCNP5 ทั้ง 2 กรณีข้างต้นนั้นทำให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถนำไปพัฒนาใช้กับตัวอย่าง ขนาดจริงในโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษได้

#### 4.1.3 ไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

ในการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าขณะที่ตัวอย่างที่มีปริมาตรคงที่แต่ไม่มีการควบคุมปริมาณ ความชื้นหรือความหนาแน่นของตัวอย่าง เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นให้แก่ตัวอย่างมัดเศษกระดาษจะ ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมีอนุภาครังสีถูกส่งผ่านตัวอย่าง มัดเศษกระดาษที่มีปริมาณความชื้นและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการลดทอนแบบเอกซ์ โพนเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 4-5 และ 4-6



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รังสีกับปริมาณความชื้น  
เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

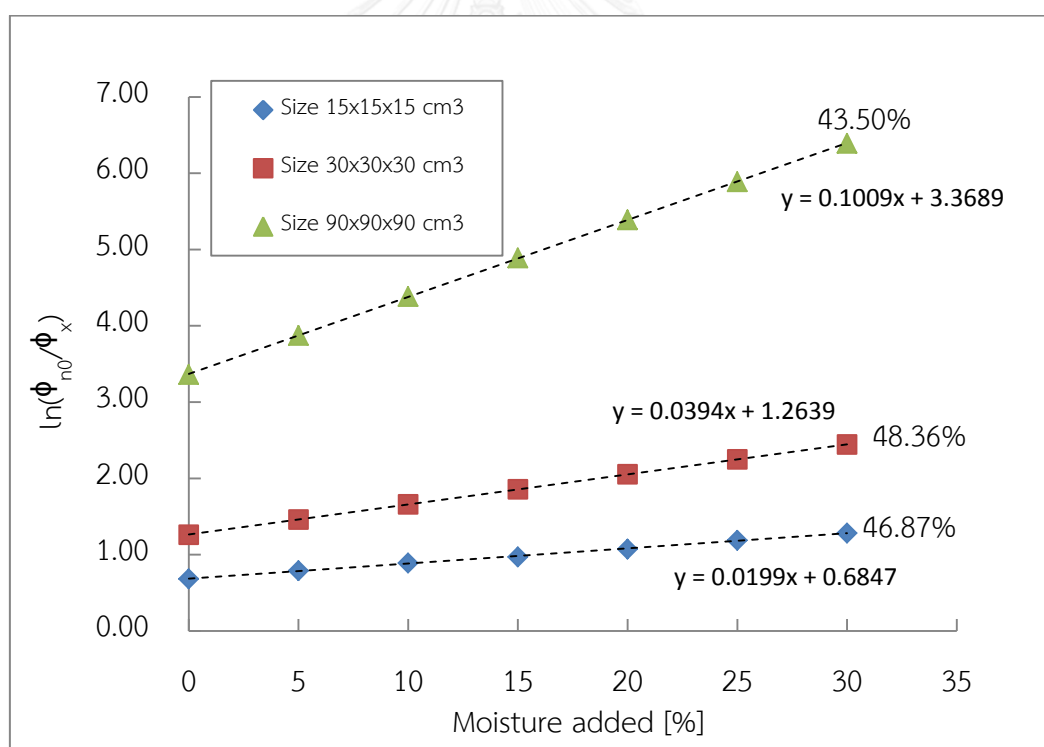


รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รังสีกับความหนาแน่น  
เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

## 4.2 การออกแบบระบบวัดที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม MCNP

### 4.2.1 จำลองการส่งผ่านรังสีกับตัวอย่างขนาดต่างๆ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้นำมาเป็นแนวทางในการจัดวางระบบวัดและการเลือกวัสดุที่ใช้ประกอบการจัดวางระบบวัด ได้แก่ วัสดุที่ใช้บรรจุต้นกำเนิดรังสี และวัสดุกำบังรังสี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการวัดรังสีของระบบจากการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณวัดต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) วัสดุที่ใช้ ได้แก่ ตะกั่วเป็นภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสี โพลีเอทิลีนผสมโบรอนเป็นช่องบังคับลำรังสี (Collimator) และพาราฟินเป็นวัสดุกำบังรังสี (Shielding) ดังนั้นจึงได้จำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาจากโค้ดอ้างอิงและทำการปรับขนาดของตัวอย่าง 3 ขนาด คือ ขนาด 90x90x90 ลบ.ซม., ขนาด 30x30x30 ลบ.ซม. และขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. เพื่อดูแนวโน้มของอนุภาคนิวตรอนเร็วหลังจากเคลื่อนผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษ ได้ผลความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$  กับปริมาณความชื้นดังแสดงในรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$  กับปริมาณความชื้น

ในรูปที่ 4-7 ตัวอย่างมัดเศษกระดาษทุกขนาดเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น 30% โดยมวล พบว่าจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนฟลักซ์นิวตรอนประมาณ 45% เมื่อเทียบกับตัวอย่างมัดเศษกระดาษเมื่อไม่เพิ่มปริมาณความชื้น และหากสังเกตความชันจากสมการเส้นตรงของตัวอย่าง

มัดเศษกระดาษแต่ละขนาดพบว่ายิ่งตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่จะให้ความไว (Sensitivity) ในการวัดความชื้นมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นในตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยค่านิวตรอนจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ถึงแม้ว่ามัดเศษกระดาษขนาด 90x90x90 ลบ.ซม. จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์นิวตรอนต่อปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนไปสูงที่สุด แต่ในการทดลองจะเลือกตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่มีขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. ด้วยเหตุผลเรื่องความสะดวกในการจัดอุปกรณ์การทดลองและความแรงของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.2.2 ผลการจำลองระบบวัดจากวัสดุที่ใช้จริงในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากในปฏิบัติการทดลองจริงไม่สามารถจัดระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วให้เหมือนกับโปรแกรมการจำลองได้ จึงได้มีการปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เพื่อให้เหมาะสม โดยวัสดุที่ใช้สำหรับการจัดวางระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วประกอบไปด้วย ตะกั่วเป็นภาชนะบรรจุต้นกำเนิดรังสี แผ่นอะคริลิก แผ่นยางผสมโบรอน และแผ่นแคดเมียมสำหรับป้องกันการรบกวนจากเทอร์มัลนิวตรอนและเอพิเทอร์มัลนิวตรอนที่จะเข้าสู่หัววัดนิวตรอน

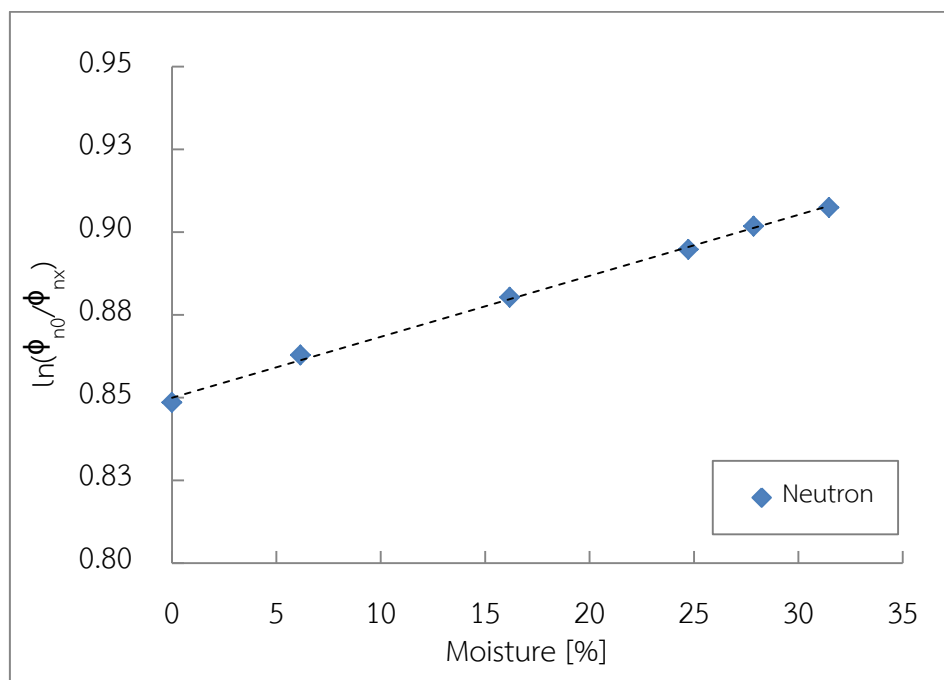
การจัดวางระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วได้แสดงไว้ดังรูป 3-33 และ 3-34 พบว่าเมื่อคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) จากค่าที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ MCNP5 ได้เท่ากับ 1.194

สำหรับการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาที่จำลองจากปฏิบัติการทดลองจริงดังรูปที่ 3-35 เมื่อคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดต่อสัญญาณรบกวนได้ 6.065

จากนั้นทำการจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี 2 ชนิด คือ ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเร็วจากอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม และต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 ด้วยระบบวัดที่ใช้จริงในปฏิบัติการทดลองกับตัวอย่างมัดเศษกระดาษอัดก้อนที่มีขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. ได้ผลดังต่อไปนี้

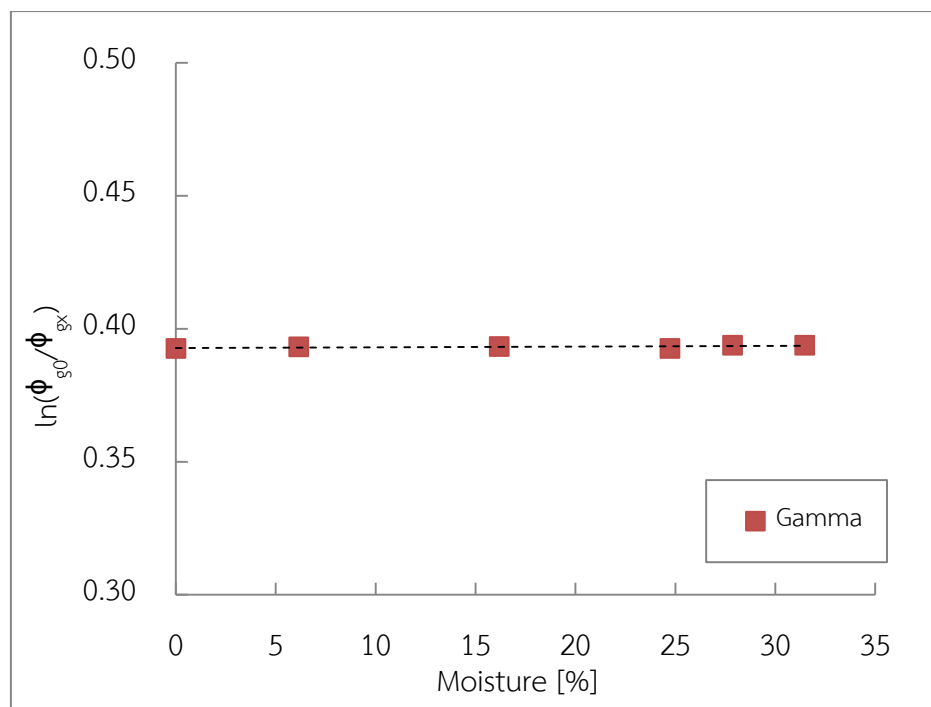
1) กรณีควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่าง

จากรูปที่ 4-8 แสดงให้เห็นผลของความชื้นที่มีต่อค่าอัตราส่วนฟลักซ์ของนิวตรอน จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นให้แก่ตัวอย่างมัดเศษกระดาษจะส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์นิวตรอนกับปริมาณความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการลดทอนนิวตรอนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากโอกาสที่นิวตรอนจะถูกลดทอนด้วยอะตอมของไฮโดรเจนจากความชื้นเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่เพิ่มความชื้น 30% จะลดทอนปริมาณรังสีได้ประมาณ 6% เมื่อเทียบกับตัวอย่างกระดาษที่ไม่เพิ่มความชื้น



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{n0}/\phi_{nx})$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้นเมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ



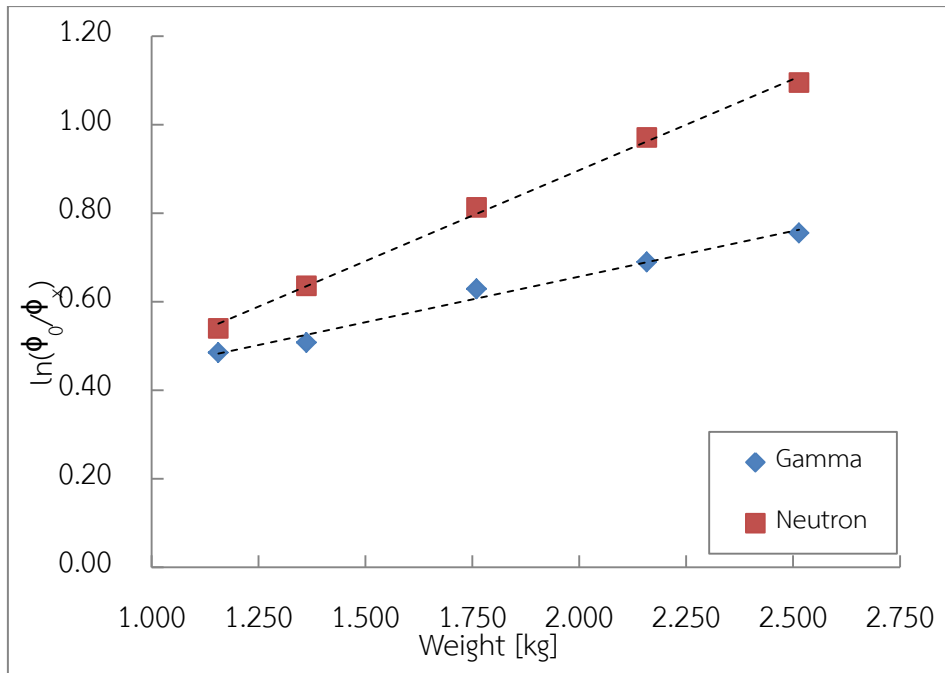


รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_{g0}/\phi_{gx})$  ของรังสีแกมมากับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ

ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของรังสีแกมมาเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง พจน์ของฟลักซ์รังสีแกมมากับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นพบว่าเส้นความสัมพันธ์มีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น โดยที่ตัวอย่างมัดเศษกระดาษมีความหนาแน่นคงที่ไม่มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมา

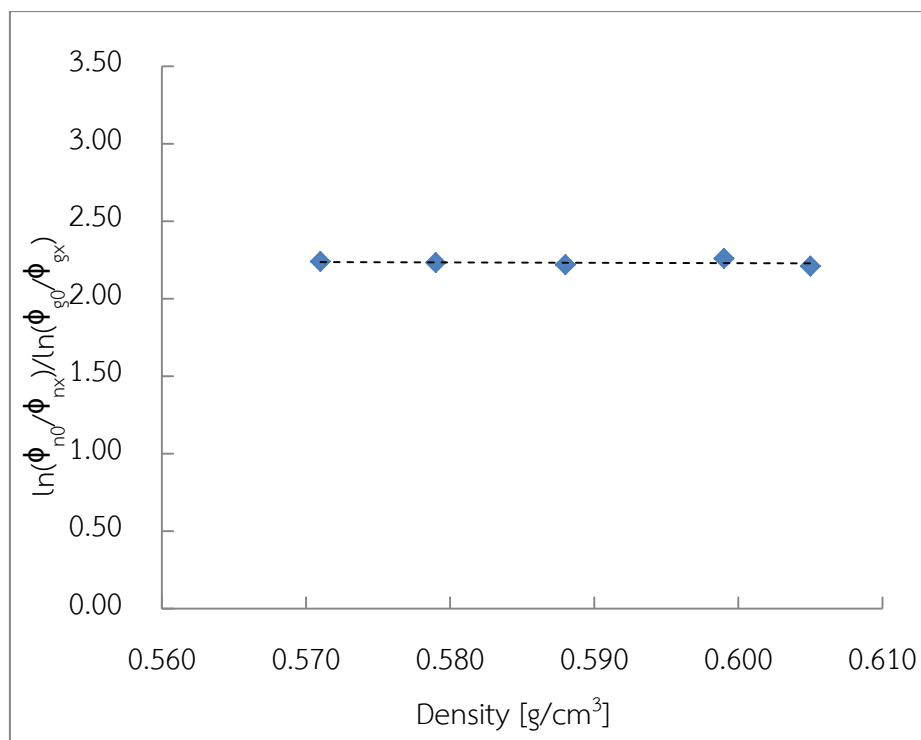
## 2) กรณีควบคุมปริมาณความชื้น

จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 ที่แสดงในรูปที่ 4-10 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์รังสีกับน้ำหนักตัวอย่างมัดกระดาษของทั้งนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของตัวอย่างเพิ่มขึ้น แสดงว่าน้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดทอนรังสีทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของตัวอย่างกระดาษในการจำลอง MCNP5 นั้นเป็นการเพิ่มสัดส่วนขององค์ประกอบของธาตุที่จำลอง ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เมื่อปริมาณธาตุไฮโดรเจนในตัวอย่างกระดาษเพิ่มขึ้นจึงเป็นผลให้เกิดการลดทอนนิวตรอนเร็วได้ดีขึ้น และเนื่องจากปริมาตรของตัวอย่างกระดาษคงที่ เมื่อน้ำหนักของตัวอย่างมีการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการลดทอนรังสีแกมมาได้เช่นกัน



รูปที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_0/\phi_x)$  กับน้ำหนักของตัวอย่าง  
เมื่อควบคุมปริมาณความชื้นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ

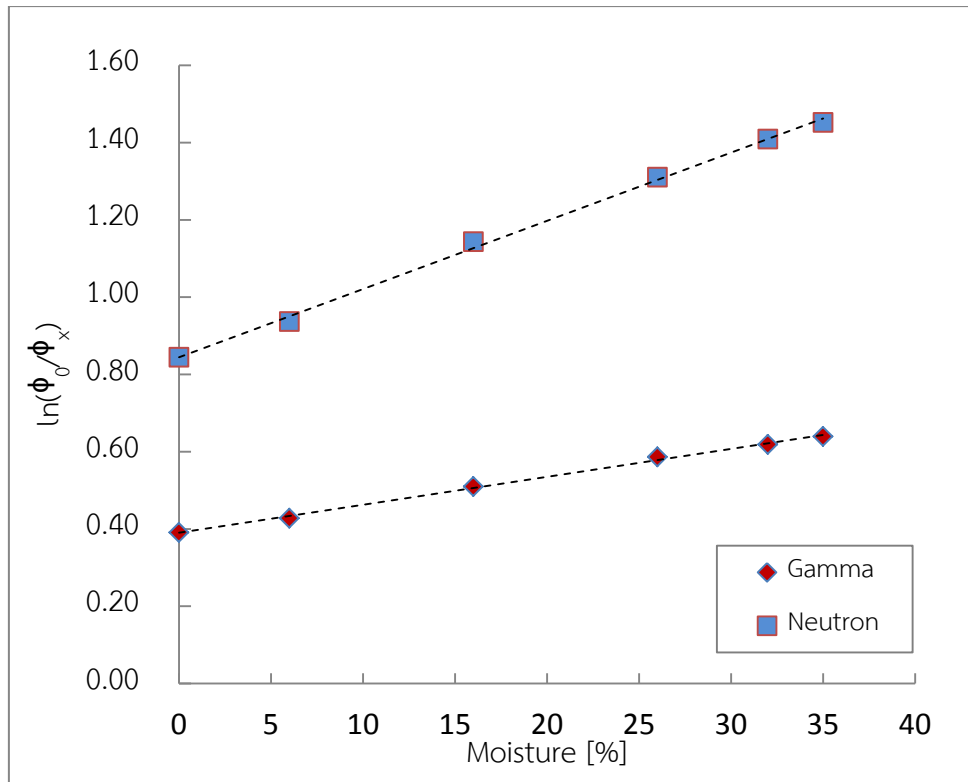
หากนำค่าการคำนวณฟลักซ์ที่ได้จากการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา มาปรับแก้ค่าเพื่อพิจารณาความชื้นในตัวอย่าง จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมา กับความหนาแน่นของตัวอย่างจะได้แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมา ค่อนข้างคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4-11 เนื่องจากความชื้นในตัวอย่างกระดาษเท่ากันเป็นผลค่าสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมาที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมากับความหนาแน่นของตัวอย่าง

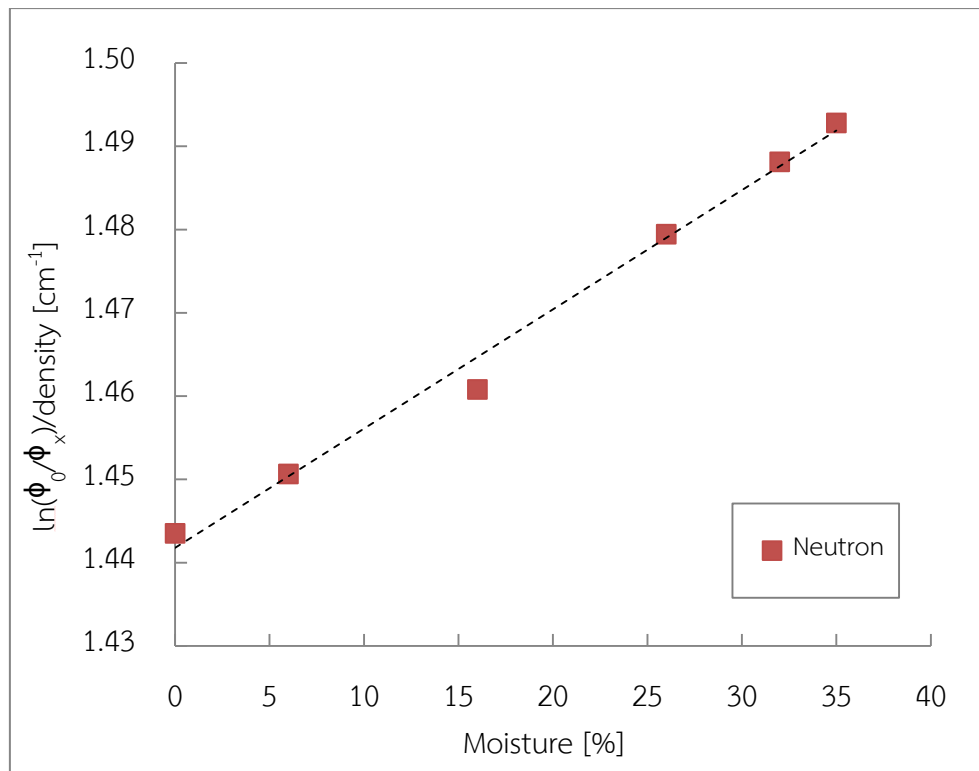
### 3) ไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

การจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาในกรณีนี้ค่อนข้างคล้ายกับในกรณีการควบคุมปริมาณความชื้นของตัวอย่างกระดาษเนื่องจากมีการแปลงแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปนี้เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้น จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 จะเห็นว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์รังสีกับความชื้นของทั้งนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-12 แสดงให้เห็นว่าเกิดการลดทอนรังสีทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดทอนของนิวตรอนนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณอะตอมของไฮโดรเจนจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการลดทอนนิวตรอนเร็วได้มาก ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นก็ยังเป็นผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างกระดาษเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาตรของตัวอย่างกระดาษคงที่ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดทอนรังสีแกมมาได้ด้วย



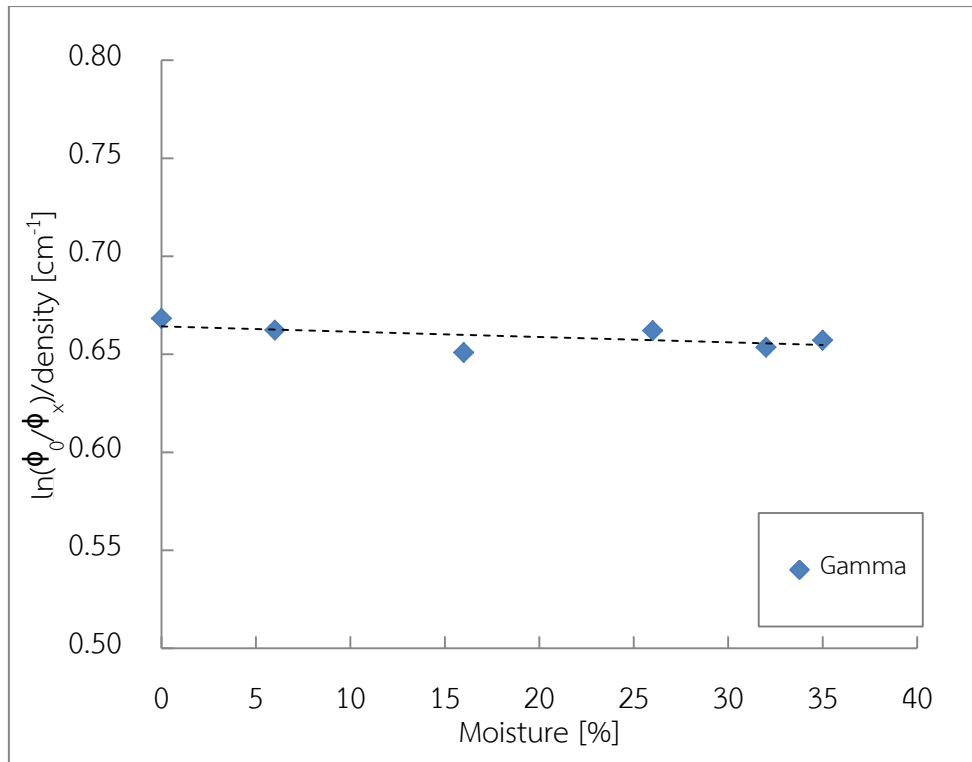
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_0/\phi_x)$  กับปริมาณความชื้น  
เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

แต่หากพิจารณาเพียงผลจากปริมาณความชื้นของตัวอย่างกระดาษว่ามีผลต่อนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาหรือไม่ โดยการนำค่าอัตราส่วนฟลักซ์รังสีของทั้งนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาหารด้วยความหนาแน่นของตัวอย่าง จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่าง และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_0/\phi_x)/\text{density}$  กับปริมาณความชื้นจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4-13 และ 4-14



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_0/\phi_x)/\text{density}$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

จากรูปที่ 4-13 จะเห็นว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์กับปริมาณความชื้นของนิวตรอนเร็วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากตัวอย่างกระดาษมีปริมาณอะตอมของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากปริมาณความชื้นทำให้เพิ่มโอกาสการลดทอนนิวตรอนเร็ว ในขณะที่แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์กับปริมาณความชื้นของรังสีแกมมาในรูปที่ 4-14 ค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากในการจำลองนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของตัวอย่างกระดาษ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าความชื้นไม่มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมา



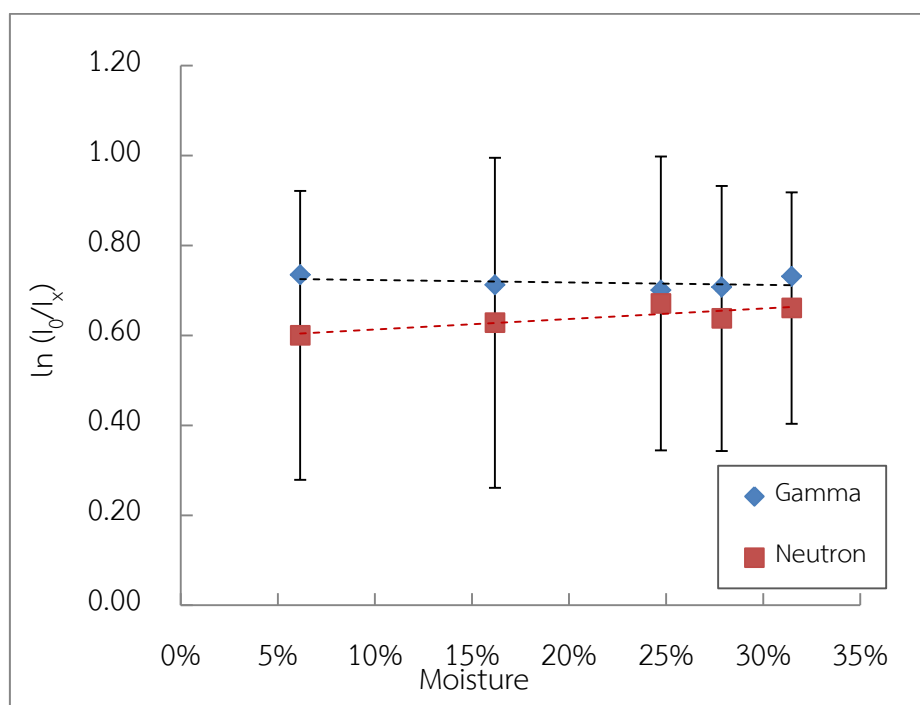
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\phi_0/\phi_x)$  ของรังสีแกมมากับปริมาณความชื้น  
เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นตัวอย่าง

จากผลการจำลองระบบวัดรังสีที่จะใช้จริงในปฏิบัติการทดลอง พบว่าความชื้นค่อนข้างมีผลต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์นิวตรอนกับปริมาณความชื้น ในขณะที่แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์แกมมากับปริมาณความชื้นค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าการจัดวางระบบวัดด้วยวัสดุที่ใช้ในปฏิบัติการทดลองจริงสามารถใช้ในการทดสอบความชื้นในตัวอย่างขนาดเล็กได้

#### 4.3 ผลการทดลองใช้เทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาวัดความชื้นในมัดเศษกระดาษอัดก้อน

ในการทดลองนี้ได้ทำการส่งผ่านรังสีเพื่อประเมินความชื้นตัวอย่างมัดเศษกระดาษขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. ด้วยต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนจากอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม และต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากซีเซียม-137 โดยมีการจัดวางระบบวัดดังรูปที่ 3-34 สำหรับการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว และรูปที่ 3-35 สำหรับการส่งผ่านรังสีแกมมา การทดลองถูกกระทำในหลายๆกรณีดังต่อไปนี้

กรณี 1: การควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่าง

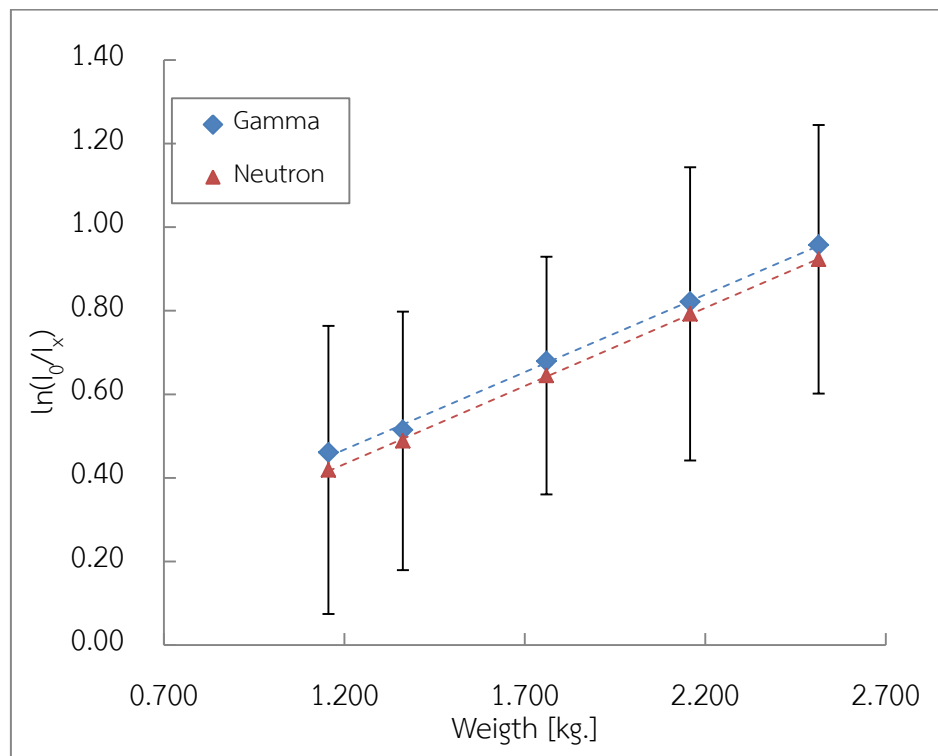


รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)$  กับปริมาณความชื้น

จากรูปที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มรังสีกับความชื้นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ จะเห็นว่าผลจากการลดทอนรังสีแกมมามีแนวโน้มค่อนข้างจะคงที่ ในขณะที่นิวตรอนเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างมัดเศษกระดาษได้ถูกเตรียมให้มีความหนาแน่นเท่ากันแต่ปริมาณความชื้นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษแต่ละก้อนมีการเปลี่ยนแปลง รังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นเดียวกันจะให้ค่าการลดทอนรังสีที่ใกล้เคียงกัน ในทางกลับกันนิวตรอนเร็วจะตอบสนองต่อปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างที่รังสีเคลื่อนผ่าน เมื่อตัวอย่างมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณความเข้มรังสีของนิวตรอนเร็วถูกลดทอนได้มากขึ้น ค่า

$\ln(I_0/I_x)$  แสดงถึงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวกลางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รังสีที่ทะลุผ่านตัวอย่างมีค่าเฉพาะกระดาชลดลง

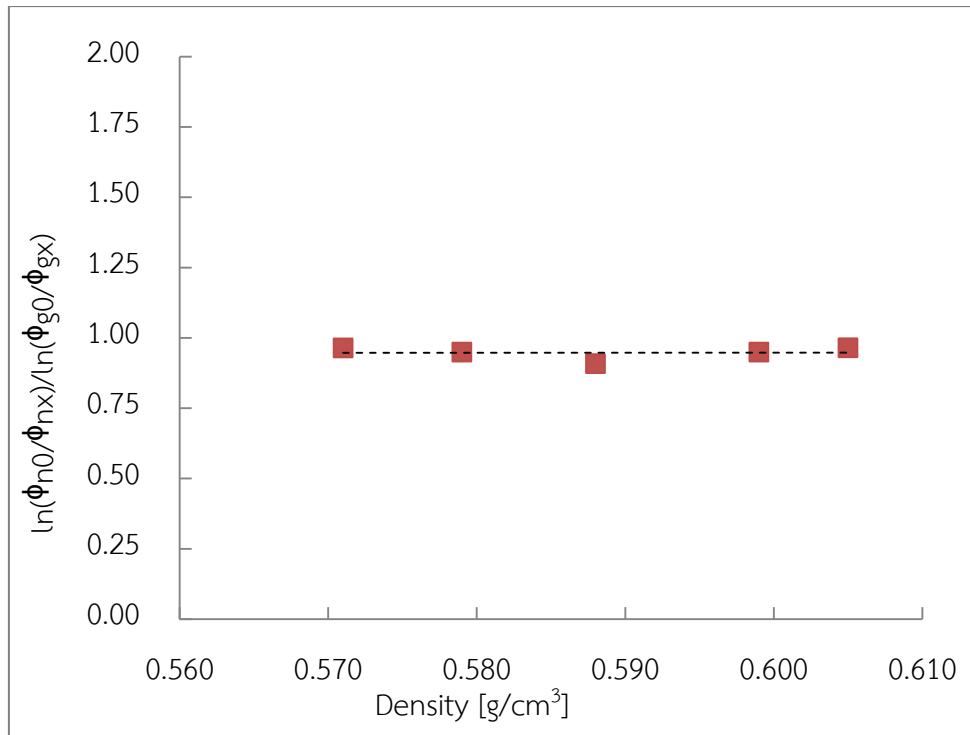
กรณี 2: การควบคุมความชื้น



รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)$  กับน้ำหนักตัวอย่าง

รูปที่ 4-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีกับน้ำหนักของตัวอย่างมีค่าเฉพาะกระดาช จากรูปจะเห็นว่าตัวอย่างมีค่าเฉพาะกระดาชที่มีน้ำหนักมากขึ้นสามารถดูดกลืนรังสีได้มาก ทำให้จำนวนรังสีที่ผ่านตัวอย่างมีค่าเฉพาะกระดาชลดลงส่งผลให้ให้อัตราส่วนความเข้มรังสี  $I_0/I_x$  เพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์จะเห็นว่าการส่งผ่านรังสีนิวตรอนเร็วและแกมมาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งเป็นผลจากปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจากความชื้น และตัวอย่างมีค่าเฉพาะกระดาชที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการลดทอนรังสีทั้ง 2 ชนิด

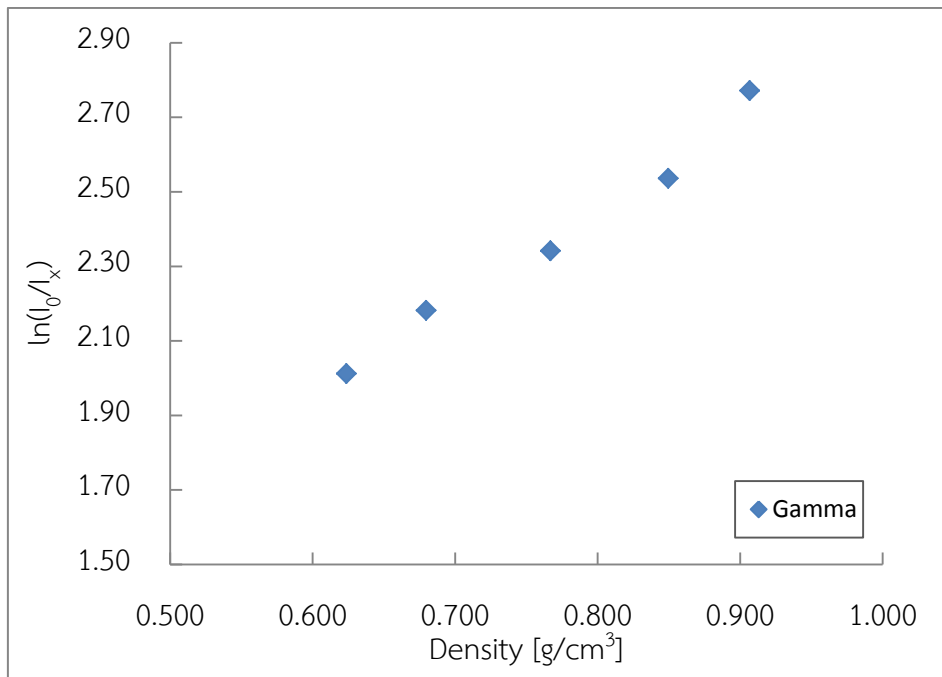




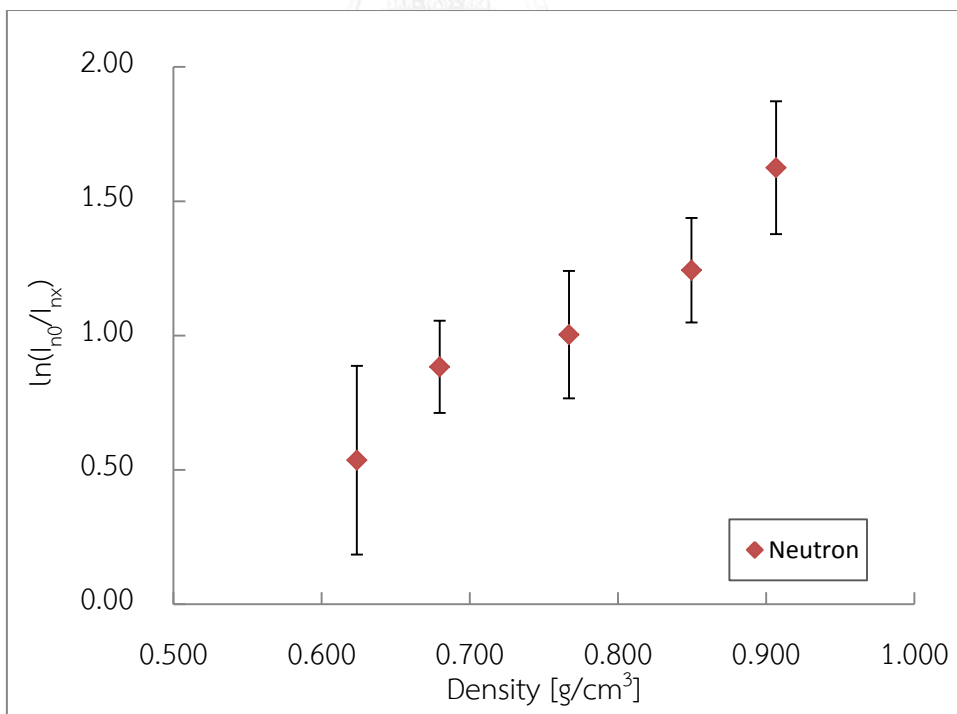
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมากับน้ำหนักตัวอย่าง

รูปที่ 4-17 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมากับน้ำหนักของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ พบว่าเมื่อตัวอย่างมัดเศษกระดาษมีปริมาณความชื้นคงที่ที่ 25% โดยน้ำหนัก ค่าสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมาจะมีค่าคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.96 และแนวโน้มความสัมพันธ์ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไป

กรณี 3: ไม่ควบคุมทั้งความชื้นและความหนาแน่น

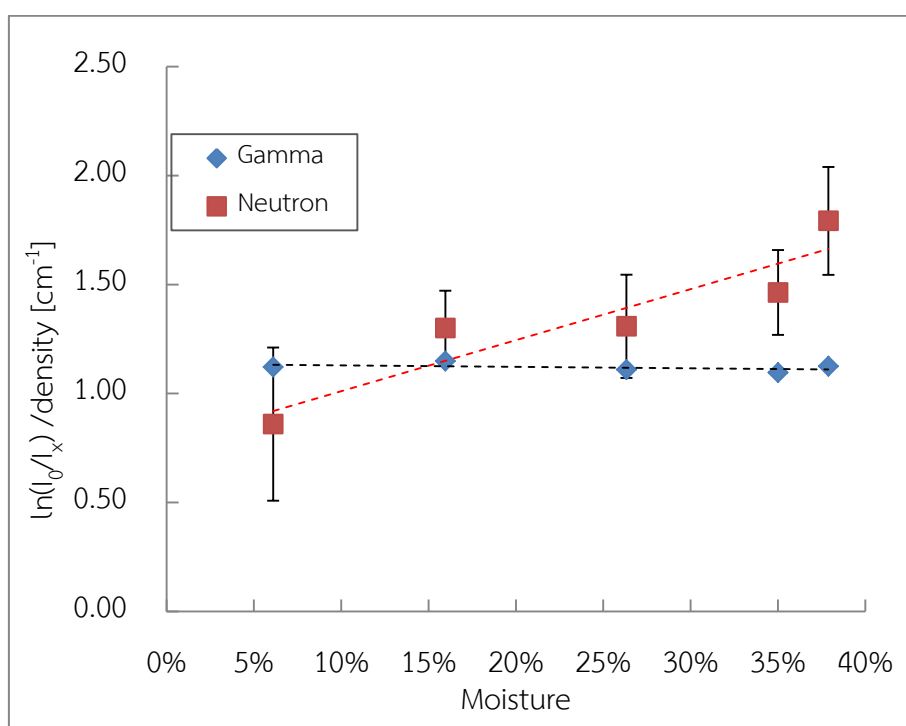


รูปที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)$  ของรังสีแกมมากับความหนาแน่น



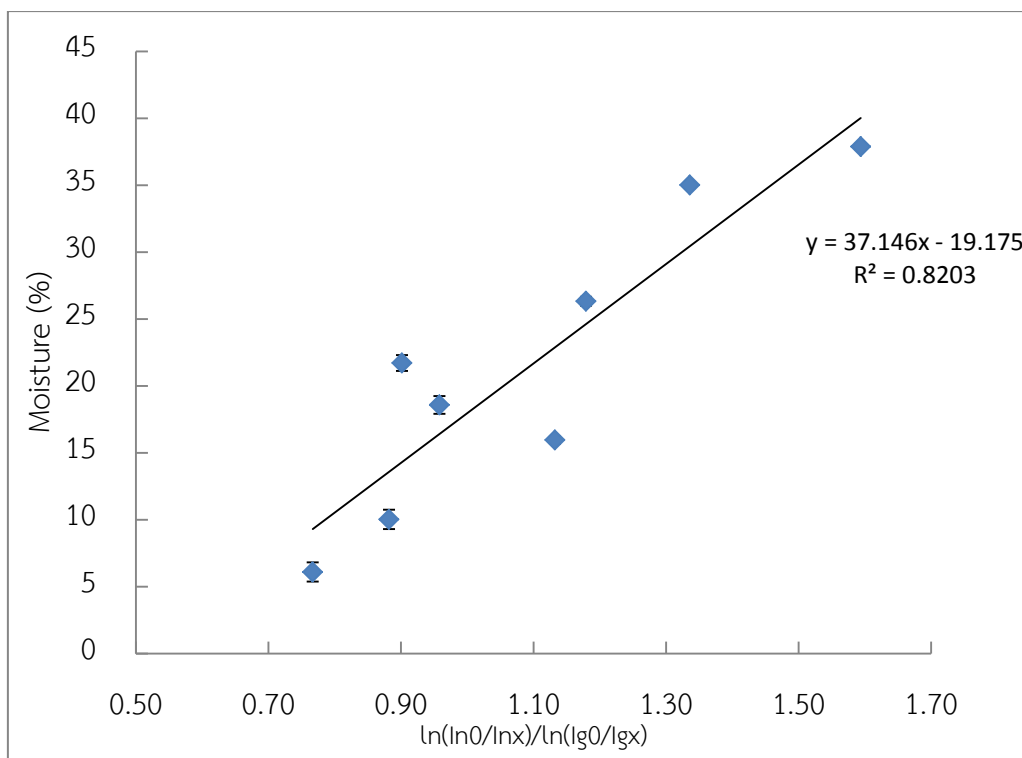
รูปที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)$  ของนิวตรอนเร็วกับความหนาแน่น

จากรูปที่ 4-18 และ 4-19 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มรังสีกับความหนาแน่นของตัวอย่าง จะเห็นว่าทั้งรังสีแกมมาและนิวตรอนเร็วมีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่ไม่มีการควบคุมความหนาแน่นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น อีกทั้งค่าอัตราส่วนความเข้มรังสียังบอกได้ถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการลดทอนรังสีที่ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่าง ดังนั้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นจึงเป็นผลให้รังสีที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมีเศษกระดาษลดลง



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)/\text{density}$  กับปริมาณความชื้นที่ได้จากการอบกระดาษ

เนื่องจากในสถานะที่ไม่สามารถควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างได้ เพื่อให้เห็นผลจากปริมาณความชื้นที่มีผลต่อการลดทอนรังสีเพียงอย่างเดียวจึงทำการแก้ค่าโดยการหารค่าอัตราส่วนความเข้มรังสีด้วยความหนาแน่นของตัวอย่าง หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  ที่ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่าง เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_0/I_x)/\text{density}$  กับความชื้นของตัวอย่าง แสดงในดังรูปที่ 4-20 จะเห็นว่าเส้นความสัมพันธ์ของนิวตรอนเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจากความชื้นจึงเพิ่มโอกาสในการลดทอนนิวตรอนเร็วได้ ในขณะที่เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ของรังสีแกมมาค่อนข้างคงที่เนื่องจากความหนาแน่นของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการส่งผ่านรังสีแกมมา



รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมา

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมาสามารถสร้างเป็นสมการเปรียบเทียบได้  $y=31.146x - 19.175$  ดังแสดงในรูปที่ 4-21 เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างมัดเศษกระดาษโดยการแทนค่าสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมาที่ทราบค่าจากการวัดการส่งผ่านรังสีในสมการเปรียบเทียบ ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการคำนวณความชื้นจากเทคนิค FNGT เทียบกับความชื้นที่ประเมินได้จากวิธีการอบกระดาษ

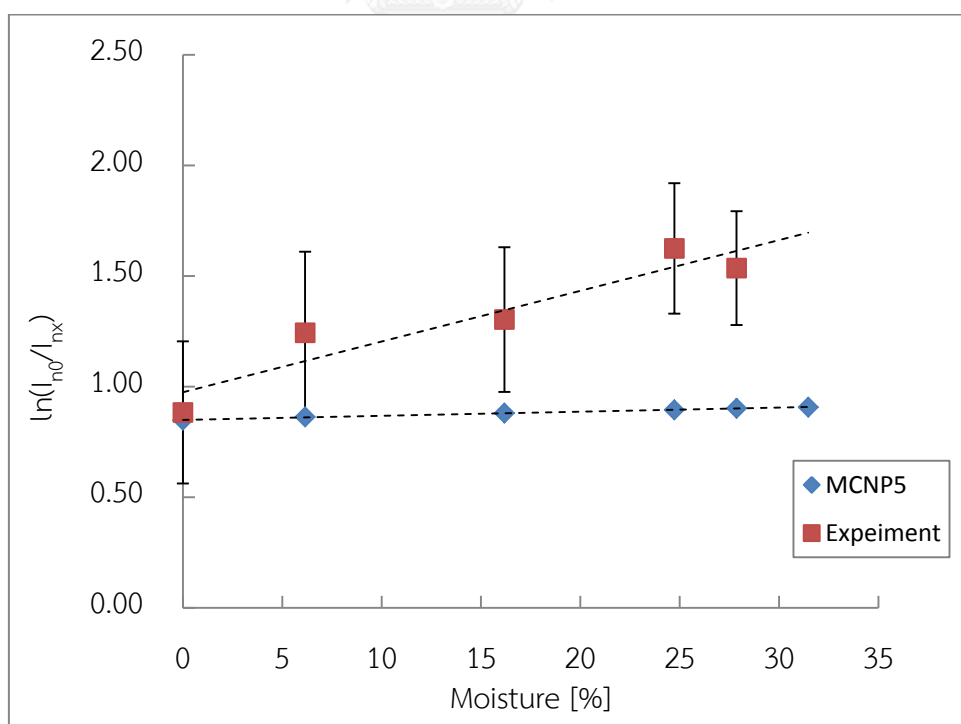
Oven dried	FNGT	% Accuracy
20.09%	22.57%	12.36%
17.73%	18.83%	6.18%
25.86%	16.10%	37.76%
35.46%	25.63%	27.73%
39.22%	33.28%	15.15%

จากการสุ่มตัวอย่างมาคำนวณด้วยสมการเปรียบเทียบที่ได้จากเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็ว และรังสีแกมมา พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่คำนวณได้ค่อนข้างแปรปรวนมาก เนื่องจากการวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วในการทดลองจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการวัดค่อนข้างมีความแปรปรวนสูง ซึ่งเป็นผลจากขนาดตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่ใช้ในการทดลองมีขนาดค่อนข้างเล็กและมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคของนิวตรอนเร็วไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างความชื้นกับเนื้อกระดาษได้ อีกทั้งหัววัดนิวตรอนเร็วที่ใช้สามารถวัดปริมาณนิวตรอนได้น้อยที่อาจเป็นผลจากการจัดวางระบบวัดที่ไม่มีช่องบังคับลำรังสีที่ดีทำให้อนุภาครังสีที่ถูกปลดปล่อยจากต้นกำเนิดรังสีทุกทิศทางไม่สามารถเคลื่อนเข้าหัววัดรังสีได้ทุกตัวจึงเกิดความแปรปรวนขึ้นได้

#### 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการส่งผ่านรังสีและผลการทดลองที่ได้จากปฏิบัติการทดลอง

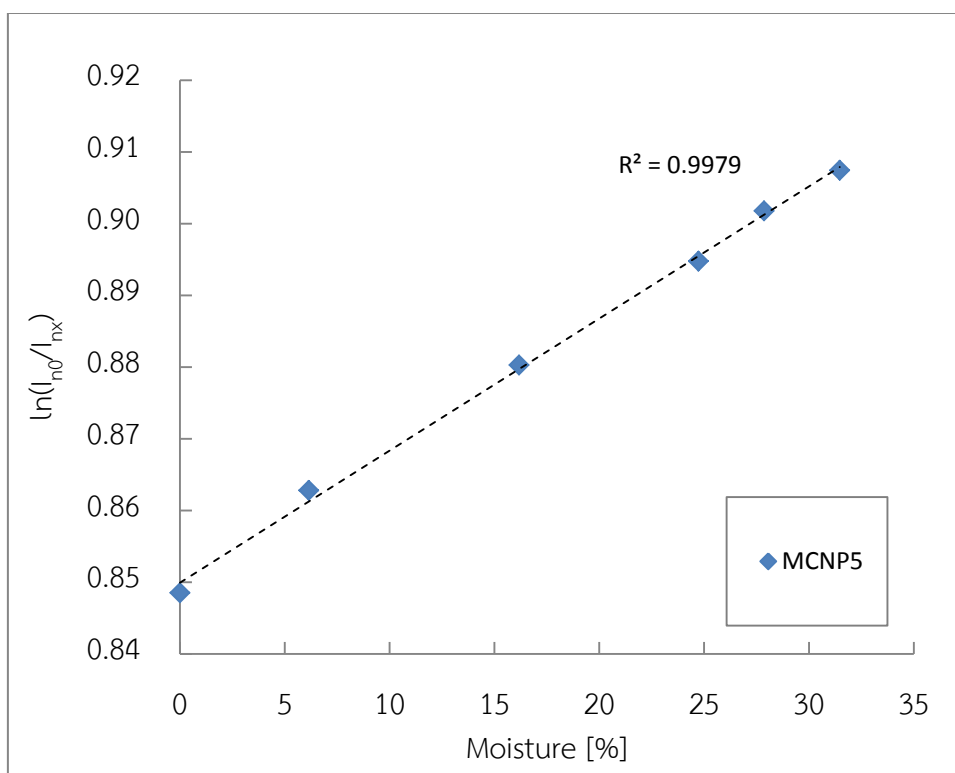
การเปรียบเทียบผลจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ และแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น และความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.1.1) กรณีควบคุมความหนาแน่นตัวอย่าง



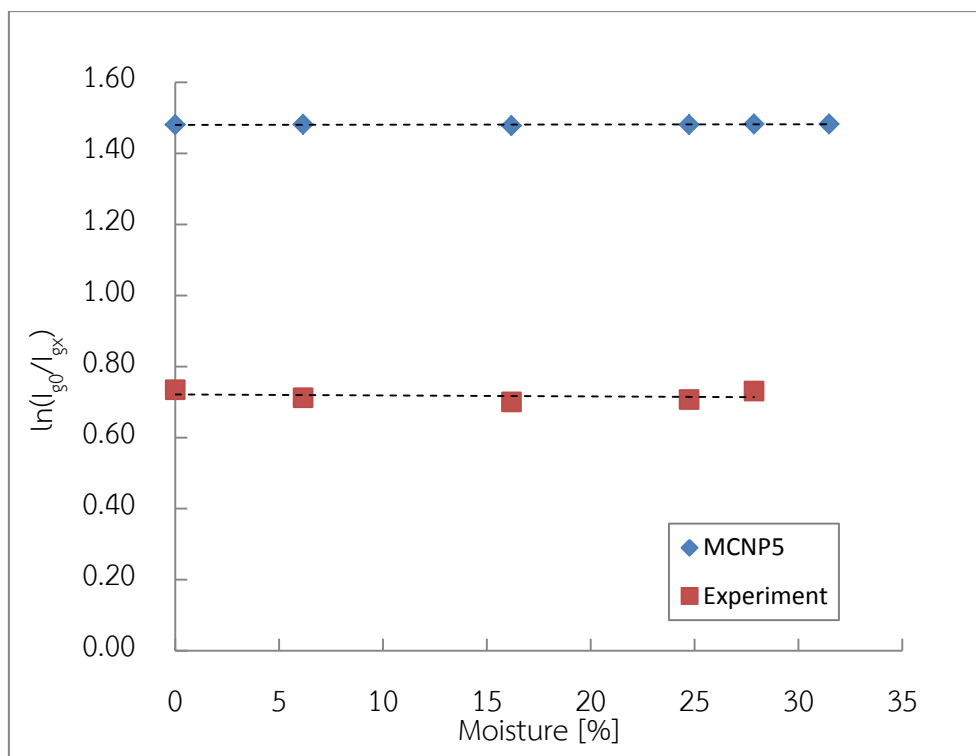
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{n0}/I_{nx})$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ

สำหรับตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่มีการที่ควบคุมความหนาแน่นให้คงที่ เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของนิวตรอนเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงถึงการเกิดการลดทอนอนุภาคนิวตรอนเร็วซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนที่มีคุณสมบัติในการลดทอนพลังงานนิวตรอนให้แก่ตัวอย่าง ดังนั้นความเข้มข้นของนิวตรอนเร็วที่ถูกส่งผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษจะมีปริมาณลดลงจากผลของการลดทอนด้วยไฮโดรเจนในตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4-22 อย่างไรก็ตามผลการวัดมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก



รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{n0}/I_{nx})$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้นที่คำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5

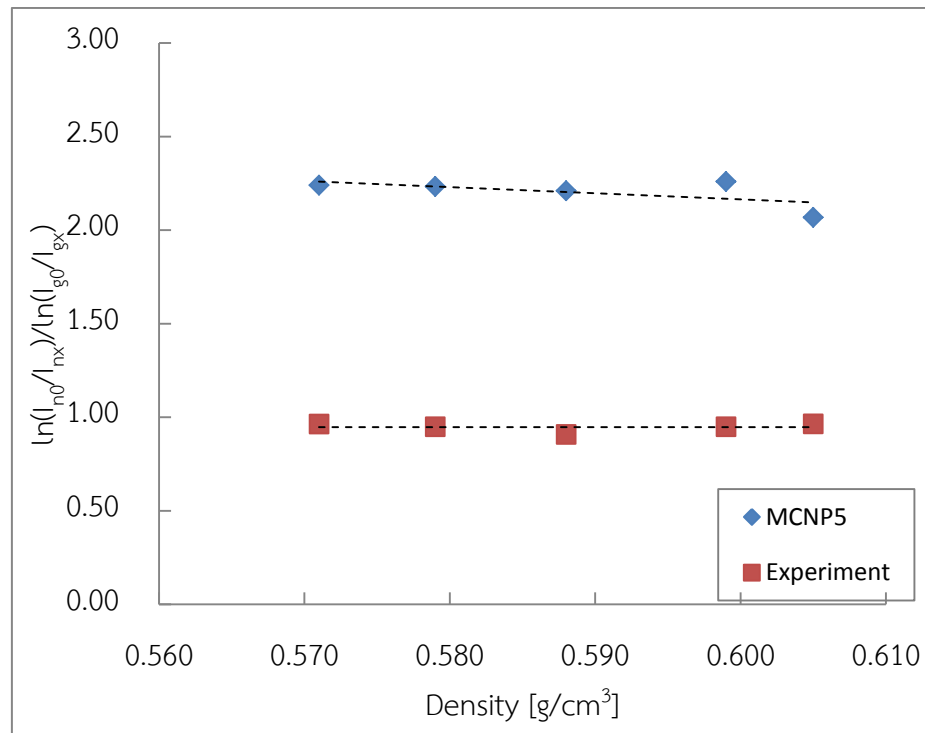
จากรูปที่ 4-23 เป็นการปรับขนาดของกราฟความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 จะเห็นได้ว่าเส้นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นรังสีของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และจะเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม MCNP5 ค่อนข้างมีค่าที่อยู่บนเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์มากกว่าผลที่ได้จากการทดลองเนื่องจากในโปรแกรมการจำลองสามารถระบุแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาครังสีได้ ผลที่ได้จึงแสดงให้เห็นในรูปความเป็นเส้นตรงของเส้นความสัมพันธ์มากกว่าผลจากปฏิบัติการทดลองจริง



รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{90}/I_{9x})$  ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ

รูปที่ 4-24 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น จะเห็นว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นในตัวอย่างมัดเศษกระดาษโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ ปริมาณความชื้นจะไม่มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมา ซึ่งแนวโน้มเส้นความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 และผลที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่และจุดข้อมูลที่ได้จากการวัดค่อนข้างอยู่บนเส้นความสัมพันธ์ จากรูปจะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 มีค่าสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเนื่องมาจากในโปรแกรมการจำลองสามารถกำหนดแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ ซึ่งในปฏิบัติการทดลองการส่งผ่านรังสีนั้นมีโอกาสที่อนุภาครังสีจะเกิดการกระเจิงภายในตัวอย่างมัดเศษกระดาษส่งผลให้อนุภาครังสีไม่เข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรงจึงวัดรังสีได้น้อยกว่า

#### 4.4.2) กรณีควบคุมความชื้นตัวอย่าง



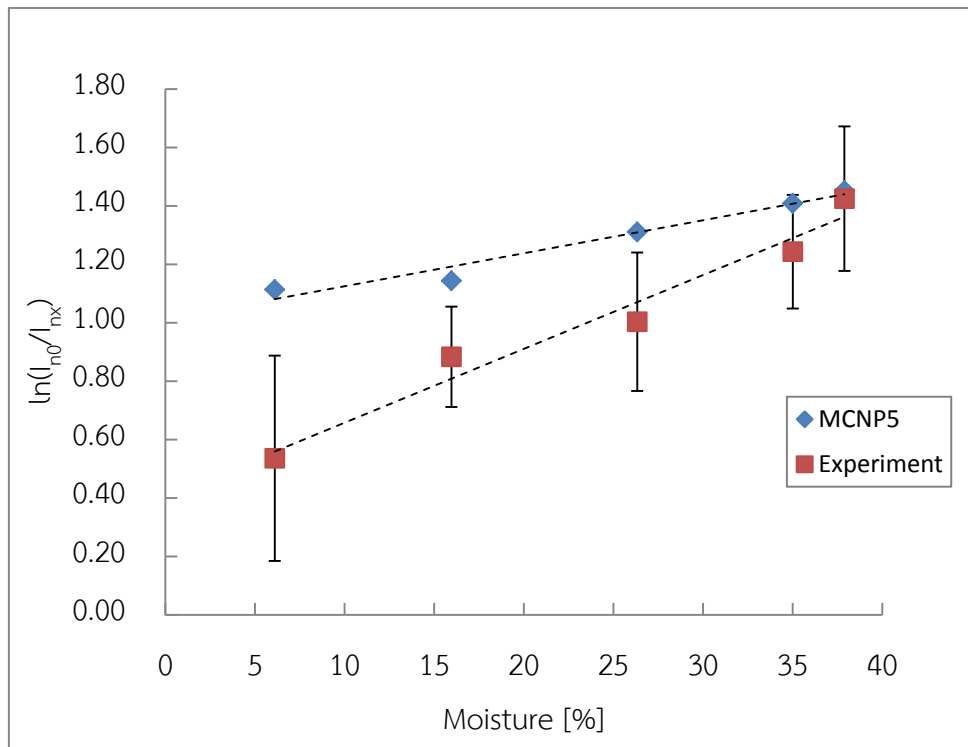
รูปที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมากับความหนาแน่น

รูปที่ 4-25 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมากับความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุพิเศษที่เปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุพิเศษเพิ่มขึ้นโดยที่ควบคุมให้ความชื้นมีค่าคงที่เมื่อคำนวณเป็นค่าสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมาจะเห็นว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมและข้อมูลที่ได้จากปฏิบัติการทดลองมีค่าคงที่

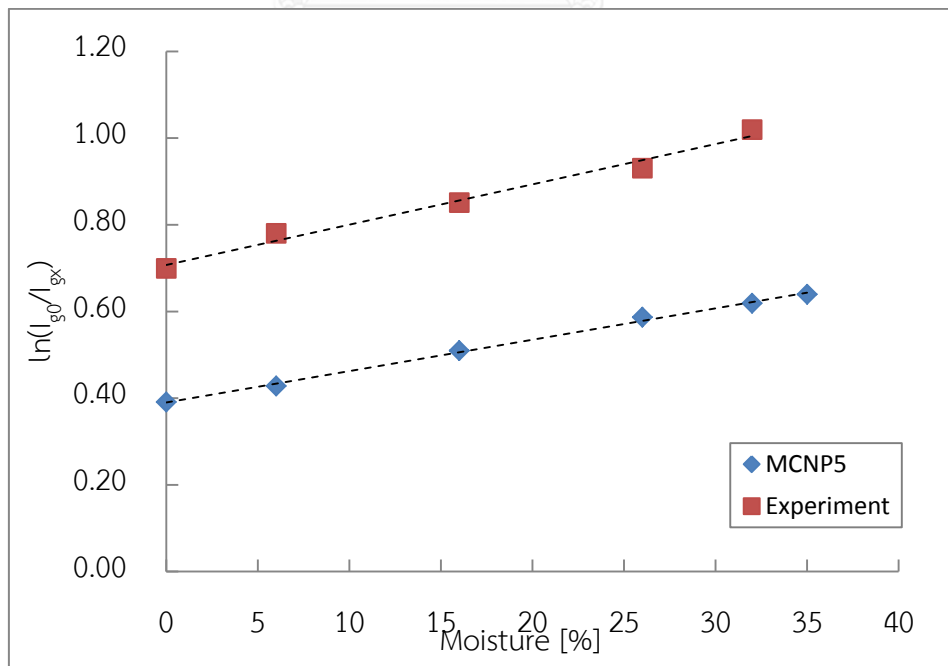
ในทำนองเดียวกัน จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากปฏิบัติการทดลองเนื่องจากในโปรแกรมการจำลองสามารถกำหนดแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ ซึ่งในปฏิบัติการทดลองการส่งผ่านรังสีนั้นมีโอกาสที่อนุภาครังสีจะเกิดการกระเจิงภายในตัวอย่างวัสดุพิเศษส่งผลให้อนุภาครังสีไม่เข้าสู่หัววัดรังสีโดยตรงจึงวัดรังสีได้น้อยกว่า



#### 4.4.3) กรณีไม่ควบคุมทั้งความชื้นและความหนาแน่น



รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{n0}/I_{nx})$  ของนิวตรอนเร็วกับปริมาณความชื้น เมื่อไม่มีการควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น



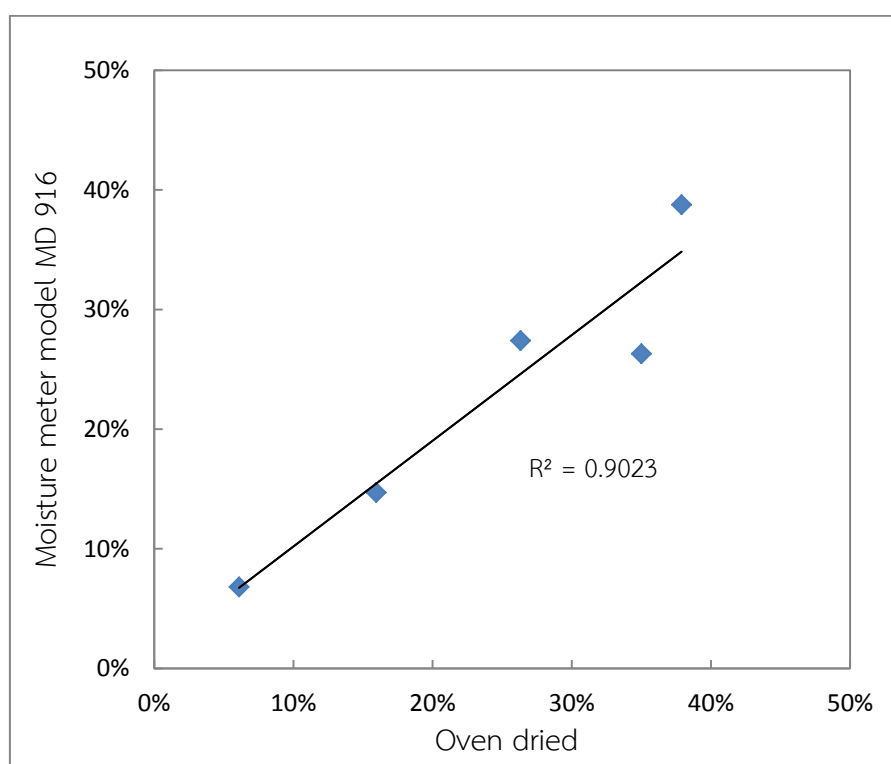
รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_{g0}/I_{gx})$  ของรังสีแกมมา กับปริมาณความชื้น เมื่อไม่ควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่น

รูปที่ 4-26 และ 4-27 แสดงให้เห็นแนวโน้มความสัมพันธ์เมื่อไม่มีการควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษ ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 และผลที่ได้จากปฏิบัติการทดลองมีแนวโน้มคล้ายกันคือเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มความสัมพันธ์ของนิวตรอนเร็วเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันแนวโน้มความสัมพันธ์ของรังสีแกมมาซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น

จากการเปรียบเทียบแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 และข้อมูลที่ได้จากปฏิบัติการทดลอง พบว่าในทุกๆสภาวะการเปลี่ยนแปลงของมัดเศษกระดาษไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่น และปริมาณความชื้น แนวโน้มความสัมพันธ์ของทั้งนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาค่อนข้างมีแนวโน้มในทางเดียวกัน จากการเปรียบเทียบจะสังเกตได้อีกว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากปฏิบัติการทดลองซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการกำหนดแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคในโปรแกรมการจำลองได้ อีกทั้งในปฏิบัติการทดลองจริงมีความเป็นไปได้ที่อนุภาครังสีที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษแล้วเกิดการกระเจิงและเปลี่ยนแปลงทิศทางไม่สามารถเข้าสู่หัววัดรังสีได้

#### 4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับเทคนิคอื่นๆ

ในการศึกษานี้ได้มีการทดลองนำเครื่องวัดความชื้น รุ่น MD 916 ซึ่งใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าของตัวกลางมาทดสอบวัดความชื้นในตัวอย่างบางสถานะ เนื่องจากเครื่องวัดความชื้นมีคุณสมบัติในการวัดความชื้นได้เฉพาะผิวหน้าของวัตถุเท่านั้น ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในบางสถานะที่ศึกษาไม่เหมาะสมที่จะนำมาวัดความชื้นด้วยอุปกรณ์ชนิดนี้ ดังนั้นสถานะของตัวอย่างมีลักษณะที่นำมาทดสอบกับเครื่องวัดความชื้นได้แก่ตัวอย่างมีลักษณะที่เป็นการควบคุมทั้งปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของตัวอย่างมีลักษณะที่ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4-28



รูปที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากวิธีอบกระดาษกับความชื้นที่ได้จากเครื่องวัดความชื้น รุ่น MD 916

จากการเปรียบเทียบการวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น รุ่น MD 916 กับความชื้นที่ประเมินได้จากการอบกระดาษในรูปที่ 4-28 พบว่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องวัดความชื้นสามารถอ่านค่าได้ใกล้เคียงกับความชื้นที่ได้จากวิธีการอบกระดาษในช่วงไม่เกิน 30% เนื่องจากข้อจำกัดของตัวเครื่องวัดความชื้นที่สามารถวัดความชื้นได้ในช่วง 0 - 40% และสามารถวัดความชื้นได้เฉพาะผิวหน้าตัวอย่าง อีกทั้งค่อนข้างไวต่อแรงกดขณะวัดความชื้น ดังนั้นเมื่อตัวอย่างมีลักษณะที่อัดก้อนที่มีความชื้นสูงๆ เครื่องมือวัดความชื้นจะสามารถอ่านเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้เร็วมากซึ่งในบางครั้งก็ไม่อาจแสดงผลการวัดความชื้นได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิค การออกแบบระบบการทดลอง และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้ผลสรุปการวิจัยดังต่อไปนี้

1. จากการจำลองการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษขนาดจริงที่มีการใช้งานทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรม MCNP5 ซึ่งทุกสถานการณ์ที่จำลองได้มีการตั้งสมมติฐานไว้ว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ของรังสีทั้ง 2 ชนิดกับปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่เปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะเป็นอย่างไร และผลการจำลองที่ได้ค่อนข้างเป็นไปตามสมมติฐานซึ่งค่อนข้างน่าพอใจ ซึ่งจากการจำลองทำให้อนุมานได้ว่าเทคนิคการส่งผ่านนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมาสามารถนำไปพัฒนาใช้ในโรงงานวัดความชื้นกระดาษรีไซเคิลในโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษได้

2. มัดเศษกระดาษอัดก้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษมีหลายขนาดซึ่งได้กล่าวไว้แล้วนั้น โดยได้เลือกจำลองตัวอย่างที่มีขนาด 80x90x60 ลบ.ซม. ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุด พบว่าเมื่อจำลองเพิ่มปริมาณความชื้นขึ้น 30% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการลดทอนฟลักซ์นิวตรอนประมาณ 50% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเพิ่มปริมาณความชื้นขึ้น ในทำนองเดียวกันฟลักซ์รังสีแกมมาถูกลดทอนไปประมาณ 70% ทั้งนี้ เนื่องจากการจำลองนี้ได้เพิ่มความชื้นในตัวอย่งมัดเศษกระดาษเป็นผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์นิวตรอนและแกมมาได้ชัดเจน

3. จากการจำลองตัวอย่างมัดเศษกระดาษขนาดจริงที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นได้ทดสอบผลของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นที่มีต่อนิวตรอนเร็วและรังสีแกมมา พบว่าเมื่อมีการควบคุมความหนาแน่นตัวอย่างแล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น พบว่าปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่งมัดเศษกระดาษไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มความสัมพันธ์ของรังสีแกมมาเมื่อเทียบกับนิวตรอนเร็ว ในทางกลับกันเมื่อควบคุมตัวอย่างมัดเศษกระดาษให้มีปริมาณความชื้นคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ จะเห็นว่าแนวโน้มฟลักซ์นิวตรอนและรังสีแกมมาลดลงเนื่องจากนิวตรอนเร็วถูกลดทอนด้วยอะตอมของไฮโดรเจนที่เพิ่มเข้าไปในตัวอย่งมัดเศษกระดาษ และรังสีแกมมาถูกลดทอนด้วยความหนาแน่นตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาเป็นสัดส่วนนิวตรอนต่อรังสีแกมมาจะพบว่าแนวโน้มเส้นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมามีค่าคงที่

4. เมื่อทำการจำลองการส่งผ่านรังสีผ่านตัวอย่างมัดเศษกระดาษ 3 ขนาด คือขนาด 90x90x90 ลบ.ซม., ขนาด 30x30x30 ลบ.ซม. และขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. พบว่าเมื่อพิจารณาข้อมูลที่มีการเพิ่มปริมาณความชื้นที่เข้าไป 30% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าอัตราส่วนฟลักซ์นิวตรอนประมาณ 45% เมื่อเทียบกับตัวอย่างเมื่อไม่มีการเพิ่มปริมาณความชื้น และยังพบอีกว่ายิ่งตัวอย่างมีขนาดใหญ่จะมีค่าความไวหรือ Sensitivity ในการวัดความชื้นดีขึ้น และเพื่อให้เหมาะสมกับข้อจำกัดในการทดลองจึงได้เลือกจำลองตัวอย่างที่มีขนาด 15x15x15 ลบ.ซม.

5. การออกแบบระบบวัดเพื่อนำมาใช้ในปฏิบัติการทดลองทำให้ทราบว่า ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญเมื่อต้องทำงานด้วยเทคนิคทางรังสีเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการวัดมากที่สุดคือ การจัดวางระบบวัดและอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของรังสีที่จะใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยมีความเป็นไปได้ยากที่จะจัดวางระบบวัดรังสีให้เหมือนกับโปรแกรมการจำลองเนื่องจากไม่มีการบังคับลำรังสีสำหรับนิวตรอนเร็ว ทำให้ค่าการวัดรังสีเกิดความแปรปรวนได้ง่าย ซึ่งในบางการทดลองมีค่าความแปรปรวนค่อนข้างสูง จึงได้พยายามแก้ปัญหาไม่ว่าจะเป็นการนำแผ่นยางผสมโบรอนมาหุ้มหัววัดนิวตรอนเพื่อตัดการรบกวนจากนิวตรอนพลังงานต่ำ ได้แก่ เทอร์มัลนิวตรอนและเอพิเทอร์มัลนิวตรอนที่กระเจิงเข้าสู่หัววัดรังสีซึ่งทำให้เกิดความแปรปรวนของข้อมูล และการเก็บข้อมูลหลายครั้งเพื่อลดความแปรปรวนตามหลักของทางสถิติ

6. จากผลการทดลองกับตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่มีขนาด 15x15x15 ลบ.ซม. พบว่าเมื่อควบคุมตัวอย่างมัดเศษกระดาษให้มีความหนาแน่นคงที่แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นส่งผลให้แนวโน้มการลดทอนของนิวตรอนเร็วจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มเข้าไป ในขณะที่แนวโน้มการลดทอนรังสีแกมมาค่อนข้างคงที่

7. เมื่อตัวอย่างมีปริมาณความชื้นคงที่ ไม่ว่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงไปจะไม่ส่งผลต่อแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมากับความหนาแน่นของตัวอย่างมัดเศษกระดาษ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ควบคุมความชื้นตัวอย่างที่ประมาณ 25% โดยน้ำหนัก ค่าสัดส่วนนิวตรอนเร็วต่อรังสีแกมมามีค่าคงที่อยู่ในช่วง 0.96

8. ในการเปรียบเทียบแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP5 และข้อมูลที่ได้จากปฏิบัติการทดลองการส่งผ่านรังสี พบว่าทุกสภาวะของตัวอย่างมัดเศษกระดาษที่ศึกษามีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นไปในทำนองเดียวกันทำให้อนุมานได้ว่าผลการทดลองค่อนข้างประสบผลสำเร็จในระดับหนึ่ง

9. เมื่อนำค่าสัดส่วนนิวตรอนต่อแกมมาของตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าความชื้นมาก่อนแทนลงในสมการเปรียบเทียบที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณค่อนข้างแปรปรวนมาก

เป็นไปได้ว่าตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจริงมีขนาดเล็กเกิน อีกทั้งการจะวางระบบวัดการส่งผ่านนิวตรอนเร็วไม่มีการบังคับลำรังสีจากต้นกำเนิดที่มีคุณสมบัติปลดปล่อยรังสีได้ทุกทิศทางทำให้รังสีเคลื่อนที่เข้าสู่หัววัดนิวตรอนเร็วได้น้อยส่งผลให้เกิดความแปรปรวนในการวัดรังสี

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทำงานที่ใช้เทคนิคทางรังสีควรคำนึงถึงความเหมาะสมของการจัดวางระบบวัด และวัสดุที่ใช้งานเพื่อประสิทธิภาพในการวัดผล เช่น ต้นกำเนิดรังสีที่เลือกใช้ควรเหมาะสมต่อชนิดและขนาดของตัวอย่างที่จะใช้งาน พลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่จะใช้ ความแรงของต้นกำเนิดรังสี

2. เพื่อให้ความแปรปรวนของจำนวนนับรังสีน้อยลง ควรมีส่วนกำบังรังสีบริเวณหัววัดรังสี และช่องบังคับลำรังสีที่เหมาะสม และควรจะมีการเก็บข้อมูลการวัดปริมาณรังสีให้มากขึ้น

3. ควรจะต้องมีการทำการทดลองกับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 15x15x15 ลบ.ซม. เพื่อเปรียบเทียบความไวในการวัดความชื้นดังเช่นที่ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP5 แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องอัดกระดาษ ปริมาตรของตู้อบกระดาษ และความแรงของต้นกำเนิดรังสีที่มีในห้องปฏิบัติการจึงไม่สามารถทำการทดลองในส่วนนี้ได้

4. งานวิจัยนี้ทำการทดลองในสภาพแวดล้อมปกติซึ่งอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการทดลองจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นถ้าสามารถควบคุมสภาวะของห้องที่ทำการทดลอง เช่นทำการทดลองในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจะช่วยให้ได้ผลที่แม่นยำมากขึ้น

5. หัววัดนิวตรอนที่ใช้ในการทดลองถูกออกแบบมาเพื่อวัดนิวตรอนเร็วและสามารถวัดได้ในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-100 MeV เนื่องจากอนุภาครังสีสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง หากมีการกำบังรังสีช่วงพลังงานที่ไม่ต้องการออกไปได้หมดจะให้ค่านับจำนวนรังสีได้ดีขึ้น

6. กราฟเปรียบเทียบ (Calibration curve) ควรมีข้อมูลมากพอ และควรมีข้อมูลความชื้นครอบคลุมในช่วง 6 - 30 % โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบเมื่อนำไปใช้งานจริงในงานอุตสาหกรรมกระดาษ

7. ต้องมีกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวอย่างที่ควบคุมปริมาณความชื้นให้คงที่ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ แล้วปรับเปลี่ยนความหนาแน่นตัวอย่างเพื่อให้ได้กราฟเปรียบเทียบที่หลากหลายในการเลือกใช้อุปกรณ์

8. เครื่องวัดความชื้นที่นำมาทดสอบวัดความชื้นใช้ได้ด้วยตัวอย่างบางกรณีศึกษาเนื่องจากมีข้อจำกัดระยะลึกของวัตถุที่เครื่องสามารถวัดได้ซึ่งจะต้องไม่หนาเกินไปและจะต้องมีการกระจายความชื้นทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง



### รายการอ้างอิง

1. Gondár, B.M., *Determination of Moisture Content of Recovered Paper Bales*, in *Faculty of Technology*. 2012, Tomas Bata University.
2. LAMARSH, J.R., *Introduction To Nuclear Engineering*, ed. 2. 1983: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
3. Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*. 3 ed. 1999, New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Toronto/Singapore: John Wiley & Sons, Inc.
4. *Basic Physics of Digital Radiography/The Patient*. 27 January 2016; Available from:  
[https://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Basic\\_Physics\\_of\\_Digital\\_Radiography/The\\_Patient&action=history](https://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Basic_Physics_of_Digital_Radiography/The_Patient&action=history).
5. *The phenomenon of pair production - Energy conversion to mass*. . 10 July 2016]; Available from:  
[http://ryuc.info/creativityphysics/energy/pair\\_production.htm](http://ryuc.info/creativityphysics/energy/pair_production.htm).
6. กองคำ, ส., พัฒนาการหาปริมาณไขมันในเนื้อหมูดโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านเอพิเทอร์มัลนิวตรอน. . 1998, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
7. Sowerby, B.D., *IAEA Advisory Group Meeting on Gamma, X-ray and Neutron Techniques in the Coal Industry*. 1984.
8. เจริญกิจสุพัฒน์, ป., การวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอนเร็วโดยใช้หัววัดแบบแก้วเรืองรังสี. 2539, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. Cywicka-Jakiel, T., *Fast-neutron and gamma-ray transmission method for coke-humidity determination*. 2003.
10. Team, X.-M.C., *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Vol. 1*. 2003, Los Alamos National Laboratory.
11. Team, X.-M.C., *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Vol. 2*. 2003, Los Alamos National Laboratory.





ตัวอย่าง MCNP Code

c cell# mat# density# surface#  
 1 1 -11.35 1 -3 -10 7 \$ Pb sheilding  
 2 1 -11.35 1 -5 -7 8 \$ Pb housing  
 3 1 -11.35 5 -7 -6 8 \$ Pb housing  
 4 2 -0.0013 5 -6 -8 \$ air in Pb housing  
 5 2 -0.0013 6 -3 -7 \$ air above Pb housing  
 c 6 3 -0.624 3 -9 -10 \$ paper sample  
 6 2 -0.0013 3 -9 -10 \$ air  
 7 2 -0.0013 9 -11 -10 \$ air above sample  
 8 5 -0.93 14 -16 -17 \$ neutron detector  
 9 2 -0.0013 3 -9 -4 10 \$ air around sample  
 10 1 -11.35 1 -5 -8 \$ \$ bottom of Pb shilding  
 11 2 -0.0013 9 -11 -4 10 \$ air  
 12 1 -11.35 1 -3 -4 10 \$ Pb  
 13 6 -2.73 12 -13 -4 10 \$ boron  
 14 8 -1.19 11 -12 -10 \$ acrylic  
 15 6 -2.73 12 -13 -15 4 \$ boron sheet  
 16 2 -0.0013 1 -11 -15 4 \$ air  
 17 8 -1.19 11 -12 -4 10 \$ acrylic  
 18 8 -1.19 11 -12 -15 4 \$ acrylic  
 19 7 -8.65 13 -14 -10 17 \$ Cd  
 20 7 -8.65 13 -14 -15 4 \$ Cd  
 21 7 -8.65 13 -14 -4 10 \$ Cd  
 22 2 -0.0013 14 -2 -15 4 \$ air  
 23 6 -2.73 12 -13 -10 \$ boron sheet  
 24 7 -8.65 13 -14 -17 \$ Cd  
 25 2 -0.0013 14 -16 -10 17 \$ air

26 2 -0.0013 16 -2 -10 \$ air  
 27 2 -0.0013 14 -2 -4 10 \$ air  
 28 0 -1:15:2 \$ void  
 c surface card  
 1 pz 0 \$ base Pb  
 2 pz 50 \$ bottom of NaI detector  
 3 pz 10 \$ bottom of Pb sheilding  
 4 cz 9.5 \$ radius of Pb sheilding  
 5 pz 3 \$ inner of Pb source housing  
 6 pz 8 \$ top of Pb source housing  
 7 cz 4.5 \$ radius of Pb source housing  
 8 cz 2 \$ radius of inner Pb source housing  
 9 pz 25 \$ top of sample  
 10 cz 7.5 \$ radius of sample  
 11 pz 30 \$ bottom of acrylic  
 12 pz 34 \$ top of acrylic  
 13 pz 34.2 \$ boron sheet  
 14 pz 34.26 \$ Cd sheet  
 15 cz 15 \$ radius of acrylic  
 16 pz 44.76 \$ top of neutron detector  
 17 cz 5.25 \$ radius of neutron detector  
 c data card  
 mode n  
 m1 82000.50c -11.35 \$ Pb  
 m2 7014.50c -0.000976 \$ air  
 8016.50c -0.000301  
 m3 6000.50c -0.444467 \$ paper sample (0.624 g/cm<sup>3</sup>)  
 1001.50c -0.062165

8016.50c -0.493369  
 c m4 11000 -0.153373 \$ Nal detector  
 c 53000 -0.846627  
 m5 1001.50c -0.148605 \$ paraffin  
 6000.50c -0.851395  
 m6 5010.50c -2.37 \$ boron  
 m7 48000.50c -8.65 \$ Cd  
 m8 1001.50c -0.080538 \$ acrylic  
 6000.50c -0.599848  
 8016.50c -0.319614  
 c source specification  
 sdef cel 4 rad d3 erg d1 pos 0.0 0.0 3.05 vec 0.0 0.0 1.0  
 ext d4 wgt=1 dir=d2 axs 0.0 0.0 1.0  
 si1 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2  
 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2 3.4 3.6 3.8 4.0 4.2 4.4 4.6 4.8  
 5.0 5.2 5.4 5.6 5.8 6.0 6.2 6.4 6.6 6.8 7.0 7.2 7.4  
 7.6 7.8 8.0 8.2 8.4 8.6 8.8 9.0 9.2 9.4 9.6 9.8 10.0  
 10.2 10.4 10.6 10.8 11.0 11.2  
 sp1 0 280 280 280 280 280 280 168 182  
 178 183 202 202 201 225 286 351 362  
 324 296 284 277 283 301 286 311 295  
 265 241 216 184 168 169 162 146 134  
 143 159 166 171 162 134 102 73 48  
 36 40 53 64 64 58 48 35 22 11 3 1  
 sb2 -31 2  
 si3 0.0 1.12  
 si4 0.250  
 c Tally card

f4:n 1 2 3 4 5 6 7 8 16 22 25 26 27

e4 0.0 0.2 53i 11.2

imp:n 1 26r 0

nps 100eE+6



## Model 42-41L PRESCILA Neutron Detector

*Radiation Detection for a Safer World*



Ludlum Measurements, Inc.

### Features

- PRESCILA Proton Recoil Scintillator
  - Drop Resistant to 100 g in Three Directions
  - Works with a Variety of Instruments
  - Ergonomic Alternative to REM-Ball
- Designs for Hand-Held Surveys



Part Number: 47-3309

### Introduction

The Ludlum Model 42-41L PRESCILA Neutron Detector is a viable and ergonomically superior alternative to traditional REM-ball designs for handheld radiation surveys, proven through extensive performance and field testing by the Health, Safety, and Radiation Protection Division of Los Alamos National Laboratory (LANL). This detector features a low-weight probe capable of excellent sensitivity of 35 cpm for  $^{241}\text{AmBe}$  and extended energy response to over 20 MeV. Directional response is uniform ( $\pm 15\%$ ) over a wide range of energies. Response linearity has been characterized to a dose rate exceeding  $20 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$  and can be extended to  $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$  when using dynamic gamma compensation. Gamma rejection is effective in gamma fields up to about  $1 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ , and can be extended to  $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$  when using dynamic gamma compensation.

### Specifications

**INDICATED USE:** neutron survey and dose measurement  
**DETECTOR:** PRESCILA proton recoil scintillator  
**PHOTOMULTIPLIER TUBE:** 2.9 cm (1.13 in.) diameter  
**SENSITIVITY:** approximately 350 cpm/mrem/hr ( $^{241}\text{AmBe}$ )  
**NEUTRON ENERGY RESPONSE:** thermal to 100 MeV  
**ANGULAR DEPENDENCE:** within 15% over a wide range of energies  
**GAMMA REJECTION:** approximately 400 cpm at 100 mR/hr with ( $^{137}\text{Cs}$ )  
**TYPICAL BACKGROUND:** approximately 12 cpm (0.05 mrem/hr)  
**OPERATING VOLTAGE:** typically 500 to 700 volts  
**DETECTOR CONNECTOR:** type "C" series (others available)  
**CONSTRUCTION:** aluminum housing with black powder coat finish and foam grip  
**TEMPERATURE RANGE:** temperature dependent  
**DROP RESISTANCE:** survives 100g drops in three orientations  
**SIZE:** 25.7 x 10.8 x 10.8 cm (10.1 x 4.3 x 4.3 in.) (H x W x L)  
**WEIGHT:** 2.3 kg (5 lb)



Model 42-41L with Model 2363  
Neutron Dose Rate meter

P.O. Box 810, Sweetwater, Texas 79556 / <http://www.ludlums.com>  
 Tel: 800-622-0828 / 325-235-5494 / Fax: 325-235-4672 / Email: [ludlum@ludlums.com](mailto:ludlum@ludlums.com)

Dec 2012

## เครื่องวัดความชื้นในกระดาษ (Paper Moisture Meter) Model MD-916

### คุณสมบัติ:

ช่วงความชื้นที่วัดได้ : 0 - 40%

ความถูกต้อง (Accuracy) : 0.5%

ใช้งานกับกระดาษประเภท : กระดาษทั่วไป, กระดาษหนังสือพิมพ์, กระดาษลูกฟูก

ใช้งานที่อุณหภูมิ : 0 – 50 องศาเซลเซียส

Power: 9V battery

ขนาด: 129×64×32 ตารางมิลลิเมตร

น้ำหนัก : 116 กรัม







