

การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

นางสาวณัฐนันท์ จันทร์กลั่น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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.

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF FAST-NEUTRON RADIOGRAPHY TECHNIQUE.

Miss Nattanan Janklan



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

การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

โดย

นางสาวณัฐนันท์ จันทร์กลั่น

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัศมี)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. พรรณี แสงแก้ว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

ณัฐนันท์ จันทร์กลั่น : การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว (DEVELOPMENT OF FAST-NEUTRON RADIOGRAPHY TECHNIQUE.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. สมบูรณ์ รัศมี, 106 หน้า.

งานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนาการเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วร่วมกับแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ โดยอาศัยหลักการการเกิดอันตรกิริยาชนิด การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ระหว่างนิวตรอนพลังงานสูงและฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ได้แก่ เทปผ้า (ยางพารา), แผ่นพีวีซี, และแผ่นอะคริลิก จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อพิสูจน์ว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นเป็นโปรตอนจริงและเพื่อตรวจสอบความสามารถในการผลิตโปรตอนของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เลือกมาใช้ ด้วยวิธีการกักรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มชนิด CR-39 พบว่าจากรอยที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเป็นรอยอนุภาคโปรตอน โดยเทปผ้าความหนา 0.27 มม. ให้ปริมาณความหนาแน่นโปรตอน 1.1328×10^5 อนุภาค/cm² แผ่นพีวีซีความหนา 0.1 มม. ให้ปริมาณความหนาแน่นโปรตอน 5.5692×10^4 อนุภาค/cm² และแผ่นอะคริลิกความหนา 1 มม. ให้ปริมาณความหนาแน่นโปรตอน 6.0412×10^4 อนุภาค/cm²

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็วรุ่น MP-320 ซึ่งอาศัยการเกิดนิวตรอนเร็วจากปฏิกิริยา DD และ DT reaction โดยนิวตรอนที่ผลิตได้มีพลังงาน 2.4 MeV และ 14.1 MeV ตามลำดับ การอ่านค่าความดำจากภาพถ่ายใช้เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 จากการทดสอบประสิทธิภาพของฉากเปลี่ยนนิวตรอนเร็ว ซึ่งใช้วัสดุ เทปผ้า แผ่นพีวีซี และ แผ่นอะคริลิก ที่ความหนาประมาณ 0.1-5.0 มม. พบว่า เทปผ้าจะให้ความดำสูงสุดที่ 281.71 PSL/mm² ที่ความหนา 2.35 มม. แผ่นพีวีซีให้ความดำสูงสุดที่ 168.2 PSL/mm² ที่ 3 มม. และแผ่นอะคริลิกให้ความดำสูงสุดที่ 63.14 PSL/mm² ที่ความหนา 2 มม. จากนั้นนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำด้วยวัสดุแต่ละชนิดที่มีความหนาซึ่งให้ค่า PSL สูงสุด มาทำการถ่ายภาพด้วยชิ้นงานตัวอย่างที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็น step-wedge มีชั้นความหนาอะคริลิก หนา 1 - 9 ซม. พบว่า แผ่นพีวีซีให้ค่าความคมชัดและความเปรียบต่างสูงที่สุดเมื่อพิจารณาจากลักษณะความชันของโปรไฟล์ของค่า PSL ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของ step-wedge

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670196821 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: PSL / RECOILED PROTON / FAST-NEUTRON RADIOGRAPHY

NATTANAN JANKLAN: DEVELOPMENT OF FAST-NEUTRON RADIOGRAPHY TECHNIQUE..

ADVISOR: LECTURER DR. SOMBOON RASSAME, Ph.D., 106 pp.

This research aims to develop the technique of fast-neutron radiography with the X-rays imaging plate using the (n,p) reaction between the high energy of neutron and hydrogenous converter screen. In this study, the common and in expensive hydrogenous materials are chosen to be the neutron converter screen such as Duct tape, PVC sheet, and acrylic plate. Firstly, to confirm that particles coming out from the hydrogenous converter screen are the recoiled protons, the track-etching method on CR-39 film is used. The radiographs show that tracks formed on CR-39 are the recoiled proton. For details results of recoiled proton density per area, the duct tape thickness of 0.27 mm, the PVC sheet 0.1 mm, and the acrylic plate of 1 mm thickness provide the amount of proton density at 1.1328×10^5 particles/cm², 5.5692×10^4 particles/cm², and 6.0412×10^4 particles/cm², respectively.

The fast-neutron for radiography produced from DD and DT reaction using the neutron generator model MP320 which gives neutron energy of 2.4 MeV and 14.1 MeV, respectively. Radiographic density is measured by the image plate reading machine of FLA-5100 model. The performance of fast-neutron converter screen using three-hydrogenous materials at thickness of approximately 0.1-5.0 mm is investigated. The test results show that the duct tape gives the highest density of 281.71 PSL/mm² at 2.35 mm of thickness while the PVC sheet provides the highest density of 168.2 PSL/mm² at 3 mm of thickness and the acrylic plate gives the highest density of 63.14 PSL/mm² at 2 mm of thickness. The convertor screen at the thickness of the highest PSL/mm² for each material is radiographed with the step-wedge specimen made by the acrylic plate of 1-9 cm of varied thickness. The experimental results show that the converter screen made by PVC sheet gives the best image quality in term of image contrast and sharpness by considering the characteristic of the slope profile of the PSL value at the point of step-wedge changing thickness.

Department: Nuclear Engineering

Student's Signature

Field of Study: Nuclear Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกคนที่ได้สนับสนุนการ
ศึกษาวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมบูรณ์ รัชมี อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และอาจารย์จเด็จ
เย็นใจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมงานวิจัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ
ในด้านวิชาการและปฏิบัติมาโดยตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์พรรณี แสงแก้ว และอาจารย์สมยศ ศรี
สถิตย์ ซึ่งได้เข้าร่วมฟังวิจัยและให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ที่คอยให้กำลังใจ
คำแนะนำ รวมถึงช่วยในเรื่องต่างๆเสมอ

ในท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว คุณพ่อ คุณแม่และน้องสาว ผู้ซึ่งคอยให้
กำลังใจและสนับสนุนต่อการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้มาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	3
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 อนุภาคนิวตรอน (Neutron Particles).....	8
2.2 การเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอน.....	8
2.3 การทะลุทะลวงของรังสี.....	11
2.4 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron radiography).....	12
2.5 แผ่นบันทึกภาพ (imaging Plate).....	16
2.5.1 หลักการของแผ่นบันทึกภาพ.....	17
2.5.2 ชนิดของแผ่นบันทึกภาพ.....	22
2.6 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	23

2.7 การเกิดโปรตอนรีคอยล์ (Recoiled proton)	23
2.7.1 การศึกษาการเกิดโปรตอนรีคอยล์บนแผ่นฟิล์ม CR-39	24
2.7.2 ตัวอย่างวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูงที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
2.8 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่าย	27
2.8.3 วัสดุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน	29
2.9 เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 (Neutron Generator model MP 320)	33
บทที่ 3 วิธีการวิจัย.....	35
3.1 การทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มาจากนิวตรอนเร็ว	35
3.1.1 ทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากแผ่นเทปผ้า.....	35
3.1.2 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่เกิดจากนิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่น CR-39	39
3.1.3 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มีผลมาจากนิวตรอนเร็วด้วยแผ่นบันทึกภาพ	42
3.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพนิวตรอน.....	45
3.3 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยความหนาที่แตกต่างกันของเทปผ้า แผ่นอะคริลิก และแผ่นพีวีซี.....	49
3.4 การถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้วัสดุตัวอย่างเพื่อหาความเปรียบต่าง (contrast) และความคมชัด (sharpness).....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	57
4.1 ทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เป็นเทปผ้า.....	57
4.2 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์โดยใช้แผ่น CR-39 ร่วมกับเทปผ้า,แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิก	59
4.3 ผลการทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มีผลมาจากอันตรกิริยานิวตรอนเร็วจากแผ่นบันทึกภาพ.....	60
4.4 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพนิวตรอน.....	62
4.5 ทดสอบการถ่ายภาพโดยใช้เทปผ้า,แผ่นพีวีซี, และแผ่นอะคริลิก เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนโดยอาศัยการอ่านผลด้วยค่า PSL/mm ²	66

4.5.1 ผลจากการใช้แผ่นพีวีซีเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	66
4.5.2 ผลจากการใช้เทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	67
4.5.3 ผลจากการใช้แผ่นอะคริลิกเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	68
4.5.4 ผลการเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิดที่ใช้ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน	70
4.6 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่นพีวีซี, เทปผ้า, และแผ่นอะคริลิก เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนโดยใช้ผลค่า PSL/mm ² เมื่อนำมาถ่ายด้วยตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1 – 9 เซนติเมตร.....	71
4.6.1 ผลความเปลี่ยนแปลงค่า PSL เมื่อใช้แผ่นพีวีซี, เทปผ้า, และแผ่นอะคริลิก มาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	71
4.6.2 การหาค่าความคมชัด (Sharpness).....	81
4.6.3 การหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast).....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 การทดสอบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนทั้ง 3 ชนิดเป็นโปรตอนรีคอร์ด.....	88
5.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการให้ค่า PSL ต่อพื้นที่ของวัสดุที่นำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีความหนาต่างๆกัน	88
5.3 วัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว.....	89
5.4 ตำแหน่งของ step-wedge ที่ทำให้ค่าความคมชัดสูงสุด	89
5.5 ขนาดของตัวอย่างและความเหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว	90
ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง	92
การใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	106

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1-1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	13
ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) ของบริษัท Fujifilm (จาก home.fujifilm.com เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2559).....	22
ตารางที่ 2-3 ตารางแสดงชื่อและสูตรทางเคมีของวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูงที่นำไปใช้งานวิจัย.....	25
ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อเสียของการถ่ายภาพด้วยรังสี.....	27
ตารางที่ 2-5 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	31
ตารางที่ 2-6 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	32
ตารางที่ 2-7 รายละเอียดของเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	33
ตารางที่ 3-8 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการวิจัย.....	52
ตารางที่ 3-9 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการวิจัย.....	56
ตารางที่ 4-10 ผลจากอนุภาคที่มีประจุซึ่งมีผลต่อความดำ.....	58
ตารางที่ 4-11 ปริมาณและรูปร่างการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์.....	59
ตารางที่ 4-12 การลักษณะข้อมูลโปรไฟล์เพียงบางเส้นที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วทั้ง แนวตั้งและแนวนอนบนแผ่นบันทึกภาพ โดยทำการเลื่อนระยะจากปลายขอบ เครื่องกำเนิดนิวตรอนในแนวแกนตั้ง 10 เส้น และแนวแกนนอน 10 เส้น.....	63
ตารางที่ 4-13 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อความดำ.....	66
ตารางที่ 4-14 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เทปผ้า) ที่มีผลต่อความดำ.....	67
ตารางที่ 4-15 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นอะคริลิก) ที่มีผลต่อความดำ.....	69
ตารางที่ 4-16 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ²	71
ตารางที่ 4-17 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ² ที่นอร์ มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร.....	72
ตารางที่ 4-18 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้แผ่น พีวีซีเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	74

ตารางที่ 4-19 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เทปผ้า) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ²	75
ตารางที่ 4-20 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เทปผ้า) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ² ที่นอร์ มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร.....	75
ตารางที่ 4-21 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้เทปผ้า เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	77
ตารางที่ 4-22 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (อะคริลิก) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ²	78
ตารางที่ 4-23 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (อะคริลิก) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm ² ที่นอร์ มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร.....	78
ตารางที่ 4-24 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้ อะคริลิกเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน	80
ตารางที่ 4-25 ค่า PSL/mm ² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างด้วยนิวตรอนเร็ว โดยใช้เทปผ้า, แผ่นพีวีซี และอะคริลิกความหนา 2.35 มิลลิเมตร ,3 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	85
ตารางที่ 4-26 ผลการหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast).....	86

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 1-1 การเกิดโปรตอนรีคอยล์ (Mikerov, 2015).....	2
รูปที่ 2-2 อันตรกิริยาของนิวตรอน (Chankow).....	10
รูปที่ 2-3 การทะลุทะลวงของรังสี (จาก www.eduktc.com เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559).....	12
รูปที่ 2-4 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	13
รูปที่ 2-5 สัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา ระหว่างธาตุกับรังสีเอกซ์ และรังสีนิวตรอน (จาก www.wikipedia.com เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559)	14
รูปที่ 2-6 ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุ.....	15
รูปที่ 2-7 กราฟการลดทอนความเข้มของรังสีนิวตรอนเมื่อผ่านวัสดุ (จาก www.psi.ch เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558).....	15
รูปที่ 2-8 โครงสร้างและส่วนประกอบของ แผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558).....	17
รูปที่ 2-9 การสแกนแผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558).....	18
รูปที่ 2-10 กระบวนการใช้งานแผ่นบันทึกภาพประกอบด้วย การอ่าน การลบ การนำกลับมาใช้ใหม่ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)	19
รูปที่ 2-11 กลไกการเรืองแสงของ แผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558).....	20
รูปที่ 2-12 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ แผ่นบันทึกภาพ กับฟิล์มรังสีเอกซ์ทั่วไป (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558).....	21
รูปที่ 2-13 ตัวอย่างแผ่นฟิล์ม CR-39 ที่ได้รับอนุภาคโปรตอน (recoiled proton) จากการชนของนิวตรอน (CHARGED-PARTICLE SPECTROSCOPY ON OMEGA, 2001).....	25
รูปที่ 2-14 โครงสร้าง monomer ของยางธรรมชาติ หรือ โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene) (จาก http://chemispolymer.siam2web.com/ เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559)	26

รูปที่ 2-15 โครงสร้าง monomer ของแผ่นอะคริลิก หรือ โพลีเมทิล เมทาคริเลท (Polymethyl methacrylate) (จาก http://chemispolymer.siam2web.com/ เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559).....	26
รูปที่ 2-16 โครงสร้าง monomer ของแผ่นพีวีซี หรือ โพลีไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) (จาก http://chemispolymer.siam2web.com/ เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559).....	27
รูปที่ 2-17 การเกิดความไม่คมชัดเรขาคณิต	28
รูปที่ 2-18 ภาพความเปรียบเทียบกับความเปรียบต่างโดยใช้รังสีเอกซ์ 200 และ 300 kV (จาก http://www.nst.or.th/ เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559).....	29
รูปที่ 2-19 ลักษณะ Beam Purity Indicator (BPI) (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , 2554)....	30
รูปที่ 2-20 ลักษณะ ASTM Sensitivity Indicator (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , 2554)	33
รูปที่ 2-21 ส่วนประกอบภายในของเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP 320 (McConnell , 2013).....	34
รูปที่ 2-22 ภาพการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านข้าง (side view)....	37
รูปที่ 3-23 แผนภาพการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านหน้า (Front view).....	38
รูปที่ 3-24 ภาพถ่ายของการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านหน้า	38
รูปที่ 3-25 แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของ CR-39 เมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอน .	41
รูปที่ 3-26 แผนภาพการกัดรอยด้วยสารละลาย 6 N NaOH บนแผ่น CR-39.....	41
รูปที่ 3-27 แผนภาพการจัดวางการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้านข้าง (side view).....	47
รูปที่ 3-28 แผนภาพการจัดวางการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้านบน (top view)	47
รูปที่ 3-29 ภาพถ่ายในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	48
รูปที่ 3-30 รูปแบบการอ่านค่า PSL บนแผ่นบันทึกภาพในแนวตั้ง.....	49
รูปที่ 3-31 รูปแบบการอ่านค่า PSL บนแผ่นบันทึกภาพในแนวนอน.....	49
รูปที่ 3-32 รายละเอียดความหนาของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว (ขนาด 5 x 13.5 ซม)	55

รูปที่ 4-33 ภาพที่ได้จากการอ่านด้วยเครื่องอ่านความดำแผ่นบันทึกภาพเพื่อทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน	57
รูปที่ 4-34 ภาพที่เกิดจากการถ่ายภาพโดยไม่ใช้แผ่นตะกั่วกำบังรังสีเอกซ์	61
รูปที่ 4-35 ภาพที่เกิดจากการถ่ายภาพโดยใช้แผ่นตะกั่วกำบังรังสีเอกซ์	62
รูปที่ 4-36 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ	63
รูปที่ 4-37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm ²	67
รูปที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm ²	68
รูปที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิกและค่า PSL/mm ²	69
รูปที่ 4-40 การเปรียบเทียบค่า ความหนาที่มีผลต่อค่า PSL/mm ² ของวัสดุ 3 ชนิด	70
รูปที่ 4-41 การวางชิ้นงานตัวอย่างในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว	71
รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm ² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	73
รูปที่ 4-43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm ² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	73
รูปที่ 4-44 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm ² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	76
รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm ² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	76
รูปที่ 4-46 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาของอะคริลิกและค่า PSL/mm ² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	79
รูปที่ 4-47 การเปรียบเทียบระหว่างความหนาของอะคริลิกและค่า PSL/mm ² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร	79
รูปที่ 4-48 การหาค่า sharpness ในช่วงที่เปลี่ยนชั้นความหนาของตัวอย่าง 1-9 เซนติเมตร	81

รูปที่ 4-49 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า PSL/mm ² ที่คาดหวังว่าจะได้จากการถ่ายภาพด้วย นิวตรอนเร็ว.....	82
รูปที่ 4-50 ค่า PSL/mm ² ของเทปผ้าเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร.....	82
รูปที่ 4-51 ค่า PSL/mm ² ของแผ่นพีวีซีเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร.....	83
รูปที่ 4-52 ค่า PSL/mm ² ของแผ่นอะคริลิกเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนา ตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร.....	83
รูปที่ 4-53 การเกิดการกระเจิงบนตัวอย่างอะคริลิกที่ใช้ถ่ายภาพ.....	84
รูปที่ 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Contrast และความแตกต่างความหนา.....	87
รูปที่ ภาพผนวก-55 ภาพลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP 320.....	95
รูปที่ ภาพผนวก-56 บริเวณด้านหลังของเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	95
รูปที่ ภาพผนวก-57 บริเวณด้านหน้าของเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	96
รูปที่ ภาพผนวก-58 บริเวณด้านข้างเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	97
รูปที่ ภาพผนวก-59 กล่องสวิตช์ Interlock.....	98
รูปที่ ภาพผนวก-60 สายเชื่อมต่อสัญญาณ Interlock.....	98
รูปที่ ภาพผนวก-61 ไฟแสดงสถานะการเดินเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	99
รูปที่ ภาพผนวก-62 ไฟแสดงสถานะการเดินเครื่องกำเนิดนิวตรอน.....	99
รูปที่ ภาพผนวก-63 การเชื่อมต่อสายสัญญาณชนิด RS232 กับ PC.....	100
รูปที่ ภาพผนวก-64 การเชื่อมต่อสายสัญญาณจากห้องปฏิบัติการไปยังห้องควบคุม.....	100
รูปที่ ภาพผนวก-65 ภาพของหน้าจอคอมพิวเตอร์หลังจากที่ทำการติดตั้งโปรแกรม DNCII.....	101
รูปที่ ภาพผนวก-66 รายละเอียดต่างๆของหน้าต่างโปรแกรม DNCII.....	102
รูปที่ ภาพผนวก-67 สวิตช์ Power ของเครื่องกำเนิดนิวตรอน , สวิตช์ Interlock และกุญแจ Interlock.....	104

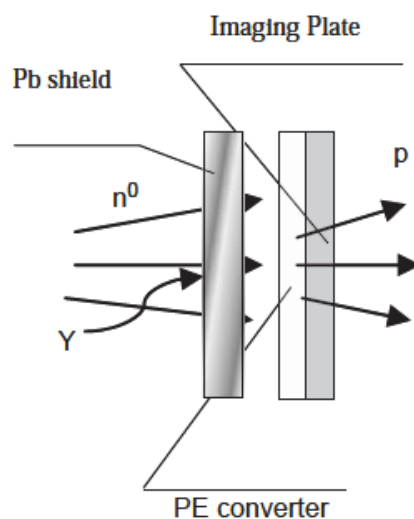
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive testing, NDT) เป็นการตรวจสอบความบกพร่องหรือความผิดปกติของชิ้นงานโดยไม่จำเป็นต้องมีการทำลาย โดยการตรวจสอบนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถเพิ่มความปลอดภัยและความเชื่อมั่นอีกทั้งยังช่วยให้ความประหยัดเนื่องจากสามารถนำชิ้นงานกลับมาใช้ได้ อีก การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray radiography), การถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา (Gamma Radiography) และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron Radiography) ก็เป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีหนึ่ง ซึ่งอาศัยการทะลุทะลวงของรังสีเอกซ์, รังสีแกมมา และนิวตรอน ซึ่งหากนำไปตรวจสอบวัสดุที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุเบาเช่น ไฮโดรเจน ลิเทียม โบรอนนั้น จะพบว่า การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นจะให้ความละเอียดภาพที่ดีกว่าวิธีอื่น ดังนั้น การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงนิยมนำไปตรวจสอบวัสดุที่มีธาตุเบาปะปนอยู่ในวัสดุต่างๆ เช่น น้ำ น้ำมัน ยาง และวัสดุที่มีธาตุเบาเป็นองค์ประกอบอื่นๆ และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาส่วนของการบันทึกภาพโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) แทนการถ่ายภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-ray Film) ทำให้การใช้เวลาบันทึกภาพนั้นลดลงเนื่องจากแผ่นบันทึกภาพนั้นมีความไวต่อรังสีมากกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์หลายเท่า ซึ่งแผ่นบันทึกภาพนั้นก็มีการพัฒนาสำหรับถ่ายภาพด้วยรังสีหลายชนิด เช่น แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน แผ่นบันทึกภาพเอ็กซเรย์ เป็นต้น แต่เนื่องจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนนั้นมีราคาสูงกว่าแผ่นบันทึกภาพเอ็กซเรย์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้แผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์มาถ่ายภาพร่วมกับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแล้วได้ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนที่มีคุณภาพเท่าเทียมกับฉากที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ในราคาที่ถูกลง

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่นบันทึกภาพเอ็กซเรย์นั้นจำเป็นต้องอาศัย “ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter screen)” เพื่อให้เกิดภาพ และได้ภาพที่มีคุณภาพของภาพถ่ายสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำจากวัสดุที่เป็นแผ่นพลาสติกหรือวัสดุที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจน เช่น โพลีเอทิลีน เพื่อทำให้เกิดการหลุดของโปรตอนรีคอยล์ (Recoiled Proton) ขึ้น โดยเคยมีงานวิจัยซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหลุดของโปรตอนมาแล้วดังนี้



รูปที่ 1-1 การเกิดโปรตอนรีคอยล์ (Mikerov, 2015)

การค้นคว้าเกี่ยวกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้โพลีเอทิลีนเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน [2] พบว่าภาพที่ถ่ายด้วยนิวตรอนนั้นมีความดำเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาของนิวตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดได้เข้าชนอะตอมของไฮโดรเจนที่อยู่ในแผ่นพลาสติกที่ทำมาจากโพลีเอทิลีนปรากฏความดำขึ้นบนแผ่นบันทึกภาพ ซึ่งภาพที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากอนุภาคโปรตอนที่หลุดออกมา ดังภาพที่แสดงในรูปที่ 1-1

การวิจัยเรื่องการศึกษาร่องรอยของ recoiled proton บน NTA film จากปฏิกิริยา D-T reaction [3] วิเคราะห์จากการนับรอย recoiled proton จากนิวตรอนพลังงานต่างๆที่ได้จากปฏิกิริยา D-T reaction โดยใช้โพลีเอทิลีน พบว่าพลังงานนิวตรอนในช่วง 15.91 ถึง 18.88 MeV จะสามารถคำนวณการเกิดรอยบนฟิล์ม NTA ได้ $(1.72 \pm 0.08) \times 10^{-3}$ tracks n^{-1} ถึง $(1.97 \pm 0.16) \times 10^{-3}$ tracks n^{-1} ตามลำดับ

การวิจัยเรื่องการกระจายพลังงานและมุมของ recoiled proton ของนิวตรอนพลังงานสูงของ Scintillation fiber โดยใช้โปรแกรมมอนติคาร์โล (Monte Carlo N-Particle) [4] พบว่าในการกระจายของมุม ในช่วงมุมประมาณ 70 องศา นิวตรอนจะให้โปรตอนพลังงานสูง และนิวตรอนพลังงาน 2 MeV สามารถให้โปรตอนพลังงานสูงที่สุดในด้านการแจกแจงพลังงาน ยิ่งถ้าพลังงานของนิวตรอนที่เข้าไปทำอันตรกิริยาสูง ก็จะได้โปรตอนพลังงานสูงขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ยังทำการทดลองโดยใช้นิวตรอนพลังงาน 4 MeV ให้โปรตอนพลังงาน 1.5 MeV ทำการทดลองที่มุม 50-65 องศา, 0-40 องศา และ 0-20 องศา พบว่ายิ่งมุมขนาดเล็กยิ่งให้โปรตอนพลังงานสูง

ซึ่งจากในงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นพบว่านิวตรอนพลังงานสูงนั้นสามารถทำให้เกิดการหลุดของโปรตอน ขึ้นจากวัสดุที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนจริง แต่การทดลองส่วนนั้นศึกษาเพียงการใช้โพลี

เอทิลีนเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนเท่านั้น จึงเป็นเรื่องน่าศึกษาวิจัย เนื่องจากวัสดุที่เป็นแผ่นพลาสติกสามารถหาได้ทั่วไป โดยเฉพาะเทปผ้า แผ่นพีวีซี หรืออะคริลิก ซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์ ในโครงสร้างทางเคมีมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนอยู่ และมีราคาค่อนข้างถูก หาได้ใช้ได้ในทันที ทำให้เกิดความประหยัด และประยุกต์ใช้ได้ง่าย เหมาะสำหรับการศึกษาและพัฒนาฉากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อสำหรับเป็นแนวทางในการตรวจสอบวัสดุในโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพโดยใช้แผ่นวัสดุที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุไฮโดรเจนเพื่อเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนร่วมกับแผ่นบันทึก (Imaging Plate) และต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนเร็ว
2. หาปัจจัยและเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น ความหนาและชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุจากวัสดุที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูง (เทปผ้า) พิสูจน์อนุภาคโปรตอนที่เกิดขึ้นโดยการกัดรอย (Track-etching)
3. ศึกษาการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุไฮโดรเจนร่วมกับแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ และต้นกำเนิดนิวตรอนเร็ว
4. ศึกษาการเปลี่ยนชนิดและความหนาของวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุไฮโดรเจนที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย
5. สรุปผลงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้วัสดุที่เหมาะสมเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. นิวัฒน์ ตะโพนทอง (1988) ทำการวิจัยเรื่องการถ่ายภาพนิวตรอนโดยเทคนิคแทร็ก-เอตช์ (Track-Etch) โดยในการทดลองได้ใช้ท่อขนาด 8 นิ้ว เป็นตัวบังคับลำนิวตรอน (Collimator) จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่มีนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งชิ้นงาน 7×10^6 นิวตรอน/ตร.ซม.วินาทีและพื้นที่ตรวจสอบชิ้นงาน 7.9×7.9 ซม. พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพคือ 60 ถึง 150 นาที และใช้เวลาในการกัดรอยอนุภาคบนแผ่นภาพ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้นร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

2. Kazuo Kato , Genichi Matsumoto , Yuuko Karasawa , et al. (1996) ทำการวิจัยเรื่องการถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้วัสดุที่มีไฮโดรเจนโดยใช้อิมเมจิงเพลต โดยจะทำการถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้ตัวอย่างทางชีวการแพทย์คือการถ่ายอวัยวะภายในหนู โดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียมและฟิล์มถ่ายภาพรังสี พบว่าหากไม่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน บริเวณท้องของหนูจะใช้เวลาในการถ่ายภาพเท่ากับ 200 วินาที แต่หากใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะใช้เวลาในการถ่ายภาพท้องเท่ากับ 180 วินาที ไตและตับจะใช้เวลาในการถ่ายภาพเท่ากับ 100 วินาที

3. Shigenori Fujine, Kenji Yoneda, Masahiro Kamata, Masahiro Etoh (1999) ทำการวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้อิมเมจิงเพลตในการถ่ายภาพนิวตรอน โดยใช้อิมเมจิงเพลตรุ่น ND ซึ่งเหมาะกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนพลังงานต่ำ โดยแหล่งกำเนิดนิวตรอนให้ความเข้มข้นนิวตรอนที่ตำแหน่งถ่ายภาพชิ้นงาน 10^5 นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที และใช้ Gd_2O_3 เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยภาพที่ได้มีคุณภาพและความคมชัดสูงชิ้น

4. Kinney H. Kim, Ray T. Klann, Basavaraju B. Raju [5] ทำการวิจัยเรื่อง การถ่ายภาพนิวตรอนพลังงานสูงสำหรับการประเมินผลวัสดุผสมและการทดสอบ โดยใช้เซรามิก แก้วผสมเรซินสังเคราะห์และยางมาสร้างต่อกันเรียกว่า Integral Armor Composite Laminates ความหนา 0.6 – 4.5 cm แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้มี 2 แบบคือจากเครื่องเร่ง D-T ให้นิวตรอนพลังงาน 14-15 MeV และมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน Am-241 , Cf-252 ให้นิวตรอนพลังงาน 1.0-4.4 MeV ซึ่งจะใช้นิวตรอนเหล่านี้ชนกับตัวอย่างแล้วให้ recoil proton ออกมาเมื่อพลังงานนิวตรอนถูกดูดกลืนอยู่ใน Scintillation plate จะเกิดการเรืองแสงในช่วงน้ำเงิน-เขียว

5. Toshiya Sanami, Mamoru Baba, Keiichiro Saito, et al. [6] ทำการวิจัยเรื่อง การบันทึกข้อมูลนิวตรอนพลังงานสูงด้วยการใช้อิมเมจิงเพลต โดยจะศึกษาการพัฒนาการใช้อิมเมจิงเพลตโดยใช้ polypropylene เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน (converter) เพื่อดูการปะปนของรังสีแกมมาที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนโดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนและไม่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน พบว่าข้อมูลที่ได้จากใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน หากทำการหักลบการไม่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะไม่มีการรบกวนของรังสีแกมมาเกิดขึ้น

6. ศราวุธ ใจเย็น (2002) ทำการออกแบบและสร้างระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการตรวจสอบโดยไม่ทำลายผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมบางชนิด โดยเลือกใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิด NE426 เพื่อเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาของนิวตรอนไปเป็นแสงที่ถูกบันทึกได้ด้วยฟิล์มไวแสง ในระบบใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนเป็น Cf-252 ขนาด 20 ไมโครกรัม ซึ่งให้ความเข้มนิวตรอนที่ตำแหน่งถ่ายภาพชิ้นงาน 6.82×10^2 นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที ในการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างอิมเมจิงเพลต 3 ชนิด คือ Ilford HP 5 Plus, ฟิล์มความไวสูง Ilford Delta 3200 และ กระดาษ Fuji FP-3000B ที่เวลาต่างกัน พบว่าเวลาถ่ายภาพที่เหมาะสมเพื่อให้ภาพที่มีความดำสม่ำเสมอควรมากกว่า 6 , 2 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ

7. M.A. Hamid Khan, M.S. Chowdhury (2003) ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาร่องรอยของ recoil proton บน NTA film โดยใช้ปฏิกิริยา D-T reaction โดยทำการนับรอย recoil proton จากนิวตรอนพลังงานต่างๆที่ได้จากปฏิกิริยา D-T reaction พบว่าพลังงานนิวตรอนในช่วง 15.91 ถึง 18.88 MeV จะสามารถคำนวณการเกิดรอยบนฟิล์ม NTA ได้ $(1.72 \pm 0.08) \times 10^{-3}$ tracks n^{-1} ถึง $(1.97 \pm 0.16) \times 10^{-3}$ tracks n^{-1} ตามลำดับ

8. V. Mikerov, V. Samosyuk, S. Verushkin (2005) ทำการวิจัยเรื่อง การใช้อิมเมจิงเพลตสำหรับการถ่ายภาพนิวตรอนพลังงานสูง โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องกำเนิดนิวตรอน รุ่น ING-07 และอิมเมจิงเพลต (imaging plate) ชนิด BAS-MS ในงานวิจัยนี้มีการวิจัย 2 แบบ คือแบบทางตรง (direct) และทางอ้อม (transfer) ซึ่งการทำแบบทางตรงนั้นจะใช้ Polyethylene เป็นฉากเปลี่ยน (converter screen) ในการรับลำนิวตรอนเกิดเป็น Proton recoil เข้าสู่อิมเมจิงเพลต ส่วนแบบทางอ้อมนั้นจะใช้แผ่นทองแดงเป็นฉากเปลี่ยนในการเปลี่ยนจาก Cu-63 เป็น Cu-62 แล้วนำแผ่น

ทองแดงวางอีกชั้น เพื่อกรองรังสีแกมมาออกเหลือแต่โพสิตรอนเข้าสู่อิมเมจิงเพลต พบว่าการถ่ายภาพโดยใช้วิธีทางอ้อมจะไม่มี background ที่เกิดจากรังสีแกมมา แต่ประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับวิธีทางตรงพบว่าวิธีทางตรงนั้นมีผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีทางอ้อม

9. ศรีนรัตน์ วงษ์ลี (2007) ทำการวิจัยเรื่อง การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้อิมเมจิงเพลต นิวตรอน เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้อิมเมจิงเพลต นิวตรอนยี่ห้อ Fuji รุ่น BAS-ND 2040 และฟิล์มรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Kodak รุ่น MX125 กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียม พบว่า ค่าความเข้มแสง (PSL) ที่อ่านได้จะแปรผันตรงกับการเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ และการถ่ายภาพที่ระยะ 120 ซม. เวลาถ่ายภาพ 15 – 25 วินาทีเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

10. C.T.S. Lima, V.R. Crispim , W.M.S. Santos [7] ทำการวิจัยเรื่อง การใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียมสำหรับการถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้ตัวอย่างที่ทำมาจากแคดเมียมและใช้ $GdCl_3$ เป็นวัสดุที่ใช้เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนเนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ตามทั่วไป ฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นฟิล์ม Kodak ชนิด AA400 และใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู Argonauta ด้วยค่าฟลักซ์นิวตรอนพลังงานต่ำ $4.46 \times 10^5 \text{ n/cm}^2$, L/D ratio 70, พลังงาน = 30 MeV และภาพถ่ายที่ได้มีคุณภาพดี มีความคมชัดมากขึ้น

11. MA Qingli, TANG Shinaio, ZouJiwei (2009) ทำการวิจัยเรื่องการกระจายพลังงานและมุมของ recoil proton ของนิวตรอนพลังงานสูงใน Scintillation fiber โดยใช้โปรแกรมมอนติคาร์โล(MCNP) พบว่าในการกระจายของมุม ในช่วงมุมประมาณ 70 องศา นิวตรอนจะให้โปรตอนพลังงานสูง และนิวตรอนพลังงาน 2 MeV สามารถให้โปรตอนพลังงานสูงที่สุดในด้านการแจกแจงพลังงาน ยิ่งถ้าพลังงานของนิวตรอนที่เข้าไปทำอันตรกิริยาสูง ก็จะได้โปรตอนพลังงานสูงขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ยังทำการทดลองโดยใช้นิวตรอนพลังงาน 4 MeV ให้โปรตอนพลังงาน 1.5 MeV ทำการทดลองที่มุม 50-65 องศา , 0-40 องศา และ 0-20 องศา พบว่ายิ่งมุมขนาดเล็กยิ่งให้โปรตอนพลังงานสูง

12. ภาคภูมิ อรชร (2009) ทำการวิจัยเรื่อง การถ่ายภาพนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 โดยใช้อิมเมจิงเพลตนิวตรอน อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ 5.75×10^6 ต่อวินาที ใช้คอลลิเมเตอร์ยาว 30 cm , L/D ratio 10, Cd ratio ประมาณ 18 อิมเมจิงเพลตนิวตรอนที่ใช้ Fujifilm BAS-ND 2040 จากงานวิจัยนี้พบว่า ใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อยกว่าการใช้ฟิล์มไวแสง Ilford HP 5 plus ร่วมกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE 426 ถึง 5 เท่า ถึงแม้ภาพถ่ายที่ได้จะมีค่า PSL ต่ำมาก แต่สามารถใช้โปรแกรมปรับภาพได้ ทำให้มีความสว่างและความเปรียบต่างสูงขึ้นได้

13. Chang Il Choi, ByoungHwi Kang, Yong Kyun Kim, et al. (2011) ทำการวิจัยเรื่องการถ่ายภาพโปรตอนโดยใช้โดยใช้แผ่น CR-39 เปรียบเทียบระหว่างโปรตอนที่ได้มาจากเครื่อง femtosecond laser และเครื่องเร่ง Tandem Van de Graaff โดยใช้ step wedge เป็น Polyethylene เป็นตัวอย่างในการถ่ายภาพ ซึ่งโปรตอนที่มาจาก femtosecond laser นั้นได้มาจากการใช้เลเซอร์ยิงเข้าไปกระทบเป้าหมาย (target) ซึ่งเป็น Polyimide เกิดเป็นลำโปรตอนพลังงานต่อเนื่องได้ถึง 1.8 MeV กระทบ step wedge ซึ่งมี CR-39 อยู่ด้านหลัง เช่นเดียวกับเครื่องเร่ง Tandem Van de Graaff ซึ่งเร่งพลังงานโปรตอนเป็นพลังงานเดี่ยว พบว่ารอยที่เกิดบน CR-39 ของโปรตอนที่ถูกรังนิวตรอนด้วย femtosecond laser นั้นมีจำนวนสูงกว่าที่ถูกรังนิวตรอนด้วยเครื่องเร่ง Tandem Van de Graaf

14. เสาวนีย์ อัสวชาติบุญ , นเรศร์ จันทน์ขาว [8] ทำการวิจัยเรื่อง การเกิดรอยทางอนุภาคโปรตอนในพลาสติกพอลิคาร์บอเนตโดยการฉายนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ โดยรอยอนุภาคที่เกิดจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน Am-Be นั้นสามารถเกิดได้บนแผ่นพลาสติกพอลิคาร์บอเนตที่ใช้สำหรับทำกันสาด เมื่อทำการกัดรอยโดยใช้สารละลาย PEW ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นของอนุภาคของ Proton Track มีประมาณ 2.74×10^5 tracks/cm² เมื่อใช้เวลาอบนิวตรอนที่มีความเข้มประมาณ 1.58×10^5 neutrons/cm² เป็นเวลา 2 สัปดาห์

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยเรื่องการถ่ายภาพนิวตรอนจำเป็นต้องมีการเข้าใจเกี่ยวกับอนุภาคนิวตรอนและอันตรกิริยาของนิวตรอนที่มีผลต่อภาพถ่าย โดยเฉพาะอันตรกิริยาการเกิดการหลุดของโปรตอนซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลักที่ใช้ในงานวิจัยเล่มนี้ รวมทั้งขั้นตอนการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพและการวัดคุณภาพของภาพถ่ายด้วยรังสีซึ่งเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

2.1 อนุภาคนิวตรอน (Neutron Particles)

ในปี ค.ศ. 1932 แซดวิก (J. Chadwick) ได้ทำการทดลองระดมยิง (bombard) ธาตุเบริลเลียม (Beryllium, Be) ด้วยอนุภาคแอลฟา พบว่า มีอนุภาคที่มีพลังงานสูงแต่ไม่มีประจุถูกปลดปล่อยออกมาเรียกอนุภาคนี้ว่านิวตรอน (neutron)

นิวตรอน เป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ในนิวเคลียส มีจำนวนใกล้เคียงกับโปรตอนแต่อาจแตกต่างกันไปตามจำนวนโปรตอนเพราะยังมีโปรตอนมากก็จะเกิดแรงผลักรังสีในนิวเคลียส โดย นิวตรอนทำหน้าที่ลดแรงผลักรังสีของโปรตอนภายในนิวเคลียส เช่น ในฮีเลียมมีนิวตรอน 2 ตัว เท่ากับโปรตอน แต่ในเหล็กมี 30 ตัว และในยูเรเนียมมีนิวตรอนถึง 146 ตัว นิวตรอนมีน้ำหนัก 1.67×10^{-24} กรัม ซึ่งมากกว่าโปรตอนเล็กน้อย คำว่า "นิวตรอน" มาจากภาษากรีก neutral ที่แปลว่าเป็นกลาง

2.2 การเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนนั้นไม่มีประจุ ดังนั้นการเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคนิวตรอนจะเกิดกับนิวเคลียสภายในอะตอม ถึงแม้จะเป็นไอโซโทปของธาตุเดียวกัน จำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน แต่ละไอโซโทปก็จะเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนต่างกัน การเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด ซึ่งได้แก่

- การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)
- การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering)
- กระบวนการจับนิวตรอน (Radiation Capture)
- การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Nuclear transmutation)
- การผลิตนิวตรอน (Neutron Producing Reaction)

- ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission)

2.2.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เกิดขึ้นเมื่อมีการชนกันระหว่างอนุภาคนิวตรอนและนิวเคลียสแล้วมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น ซึ่งการชนแบบยืดหยุ่นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี ได้แก่

1) การชนโดยที่ขนาดนิวเคลียสของอะตอมมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคนิวตรอนมากๆ ทำให้เมื่อเกิดการชนแล้วจะไม่มีมีการถ่ายเทพลังงาน

2) การชนแบบยืดหยุ่นสำหรับธาตุที่มีมวลใกล้เคียงกับนิวตรอน สามารถเกิดได้ 3 กรณีดังต่อไปนี้

- กรณีที่ 1 นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสที่อยู่นิ่งแล้วทำให้นิวตรอนและนิวเคลียสเคลื่อนที่ออกจากกันด้วยมุมเบี่ยงเบนค่าหนึ่ง

- กรณีที่ 2 การถ่ายโอนพลังงานสูงสุด (Maximum transfer energy) เนื่องจากนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสแบบ head-on collision ทำให้ถ่ายโอนพลังงานเกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียส

- กรณีที่ 3 การถ่ายโอนพลังงานเพียงเล็กน้อย (Very small transfer of energy) เนื่องจากตำแหน่งที่ชนเป็นการชนแต่เพียงผิวเผิน (glancing collision) ทำให้นิวเคลียสถูกถ่ายโอนพลังงานจากนิวตรอนแต่เพียงเล็กน้อย

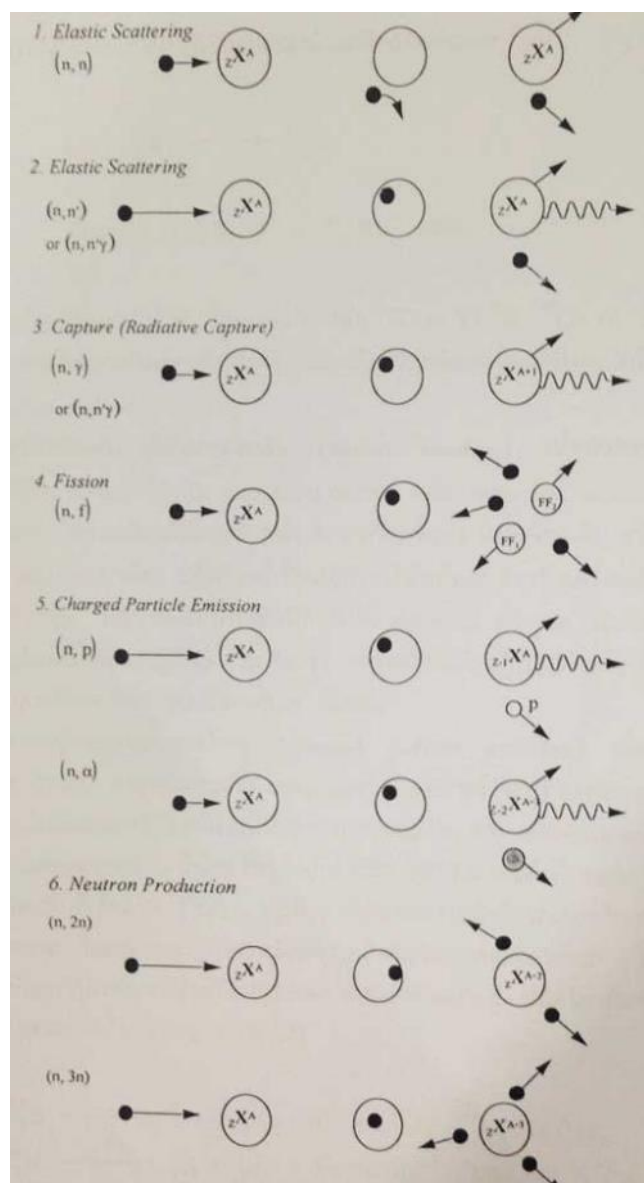
2.2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) เกิดขึ้นเมื่อเกิดอนุภาคนิวตรอนชนและเข้าไปภายในนิวเคลียส จากนั้นจะถูกกระตุ้นขึ้นสู่ สถานะกระตุ้น และปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมาพร้อมกับรังสีแกมมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น

2.2.3 กระบวนการจับนิวตรอน (Radiation Capture) เกิดขึ้นเมื่อเกิดอนุภาคนิวตรอนชนและเข้าไปภายในนิวเคลียส จากนั้นจะถูกกระตุ้นขึ้นสู่ สถานะกระตุ้น คล้ายๆกับการเกิดแบบไม่ยืดหยุ่น แต่กระบวนการจับนิวตรอนนั้นจะปล่อยเพียงรังสีแกมมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น

2.2.4 การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Nuclear transmutation) เกิดขึ้นเมื่อเกิดอนุภาคนิวตรอนชนและเข้าไปภายในนิวเคลียส จากนั้นจะถูกกระตุ้นขึ้นสู่ สถานะกระตุ้น คล้ายๆกับการเกิด การชนแบบไม่ยืดหยุ่นและกระบวนการจับนิวตรอน แต่ว่านิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นขึ้นสู่ สถานะกระตุ้นนั้นจะปล่อยอนุภาคตัวอื่นที่ไม่ใช่ นิวตรอนเช่น อนุภาคแอลฟาหรือโปรตอน เพื่อกลับสู่ สถานะพื้นจึงสามารถเรียกปฏิกิริยานี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า Charged Particle Reaction

2.2.5 การผลิตนิวตรอน (Neutron Producing Reaction) เกิดขึ้นเมื่อมีการใส่นิวตรอน 1-2 อนุภาคเข้าไปภายในนิวเคลียส จากนั้นนิวเคลียสจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นสู่ สถานะกระตุ้น และปล่อย อนุภาคนิวตรอน 2-3 อนุภาคเพื่อกลับสู่สถานะพื้น

2.2.6 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่เข้าไปภายใน นิวเคลียสอะตอม จากนั้นนิวเคลียสจะถูกกระตุ้นขึ้นสู่ สถานะกระตุ้น เกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน และรังสีแกมมา



รูปที่ 2-2 อันตรกิริยาของนิวตรอน [1]

2.3 การทะลุทะลวงของรังสี

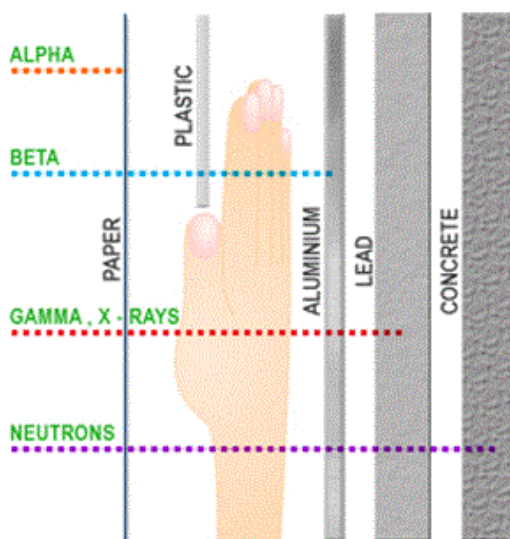
รังสีสามารถทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionizing) ซึ่งหมายถึงการที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุ แล้วทำให้เกิดประจุไฟฟ้าหรือไอออน ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ไอออนที่เกิดจากรังสีสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการทางชีววิทยาได้ โดยรังสีมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยทั่วไปจะหมายถึง

2.3.1 รังสีแอลฟา (Alpha) ประกอบด้วยอนุภาคมีประจุและมีมวลมาก ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม และเรเดียม รังสีแอลฟาสามารถหยุดยั้งได้ด้วยแผ่นกระดาษ หรือเนื้อเยื่อบางๆ ที่ผิวหนังชั้นนอกของเรา แต่ถ้าวัสดุที่ให้รังสีแอลฟาเข้าไปภายในร่างกายของเรา อาจจะทำให้เกิดการหายใจ การกินหรือการดื่ม สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเนื้อเยื่อภายใน และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ได้

2.3.2 รังสีบีตา (Beta) มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอิเล็กตรอน สามารถผ่านเข้าไปในวัตถุได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา และสามารถผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำได้ประมาณ 1-2 เซนติเมตร โดยทั่วไปแผ่นอะลูมิเนียมความหนาไม่กี่มิลลิเมตรก็สามารถหยุดรังสีบีตาได้

2.3.3 รังสีแกมมา (Gamma rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ แสง และคลื่นวิทยุ รังสีแกมมาสามารถเคลื่อนที่ผ่านร่างกายคนไปได้ แต่หยุดได้ด้วยผนังคอนกรีตหรือตะกั่วหนาๆ โดยขึ้นกับพลังงานของรังสี

2.3.4 รังสีนิวตรอน (Neutron) เป็นอนุภาคไม่มีประจุ และไม่ทำให้เกิดการไอออไนซ์โดยตรง แต่สามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมของวัตถุ แล้วทำให้เกิดรังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ รังสีนิวตรอนสามารถผ่านวัตถุได้ดี แต่จะหยุดลงได้ด้วยคอนกรีตหนา น้ำ หรือพาราฟิน (paraffin)

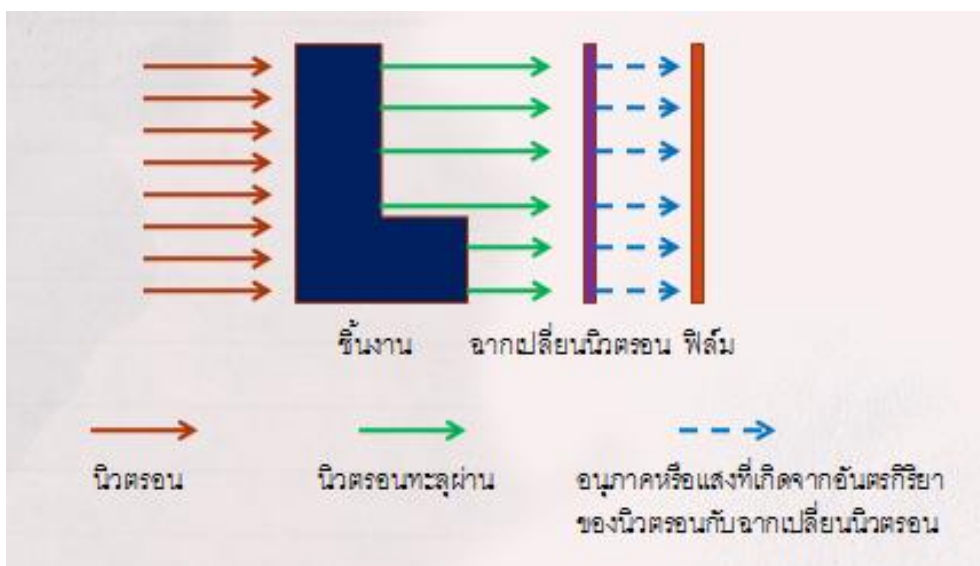


รูปที่ 2-3 การทะลุทะลวงของรังสี (จาก www.eduktc.com เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559)

2.4 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron radiography)

การถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นการฉายลำรังสีผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ รังสีจะถูกดูดกลืน ทำให้มีความเข้มลดลงตามลักษณะของชิ้นงาน ได้แก่ ชนิด รูปร่าง และขนาดของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของชิ้นงาน เมื่อบันทึกปริมาณรังสีที่ผ่านชิ้นงาน จะทำให้ได้ภาพของโครงสร้างภายในที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นหนึ่งในเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive testing, NDT) ซึ่งเป็นวิธีการในตรวจสอบคุณภาพ เพื่อหาข้อบกพร่องหรือตำหนิของวัสดุทางอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการฉายลำรังสีนิวตรอน ผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ และบันทึกความเข้มของรังสีด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์เช่นเดียวกัน โดยมีฉากเปลี่ยนนิวตรอน (neutron converter screen) ทำหน้าที่แปลงรังสีนิวตรอนเป็นรังสีเอกซ์ หรือรังสีบีตา เนื่องจากฟิล์มรังสีเอกซ์ไม่ไวต่อนิวตรอน (นเรศร์ จันทน์ขาว, 2541) ซึ่งมีหลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

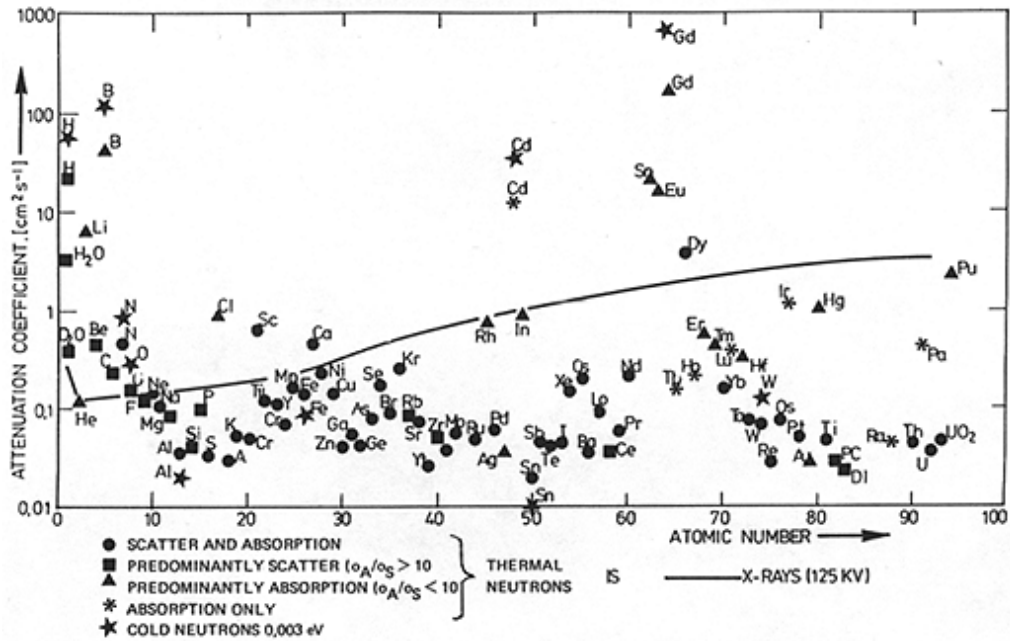
ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นวัสดุที่มีภาคตัดขวาง (cross-section) หรือสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนได้สูง เมื่อคุณกลืนนิวตรอนแล้ว จะให้รังสีที่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา ตามคุณสมบัติของการเปลี่ยนนิวตรอนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ธาตุ	ปฏิกิริยา	ภาคตัดขวาง (barn)	ครึ่งชีวิต	ชนิดของรังสี
ลิเทียม	${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	941	prompt	Alpha
โบรอน	${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$	3838	prompt	Alpha
แกโดลิเนียม	${}^{155}\text{Gd}(n,\gamma){}^{156}\text{Gd}$	60900	prompt	electron
	${}^{157}\text{Gd}(n,\gamma){}^{158}\text{Gd}$	254000	prompt	electron
ดิสโพรเซียม	${}^{164}\text{Dy}(n,\gamma){}^{165}\text{Dy}$	800	2.3 hour	beta
	${}^{164}\text{Dy}(n,\gamma){}^{165\text{m}}\text{Dy}$	2000	1.26 min.	beta

การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนให้ภาพถ่ายของโครงสร้างภายในชิ้นงานที่แตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีสัมประสิทธิ์การ

ดูดกลืน (absorption coefficient) ต่อรังสีนิวตรอนและรังสีเอกซ์ต่างกัน ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะดูดกลืนรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาได้ดี ในขณะที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีนิวตรอนไม่ขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุตามรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 สัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยา ระหว่างธาตุกับรังสีเอกซ์ และรังสีนิวตรอน (จาก www.wikipedia.com เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559)

2.3.1 ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงาน

ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุขึ้นกับสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและความหนาของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และตามสมการที่ (1) ดังนี้

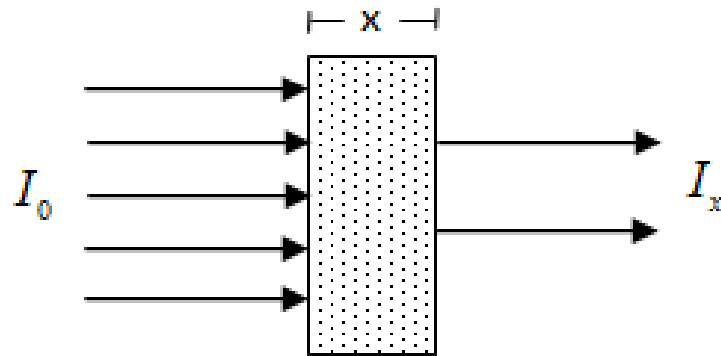
$$I_x = I_0 e^{-\Sigma X} \dots\dots\dots (1)$$

โดยที่ I_x คือความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ

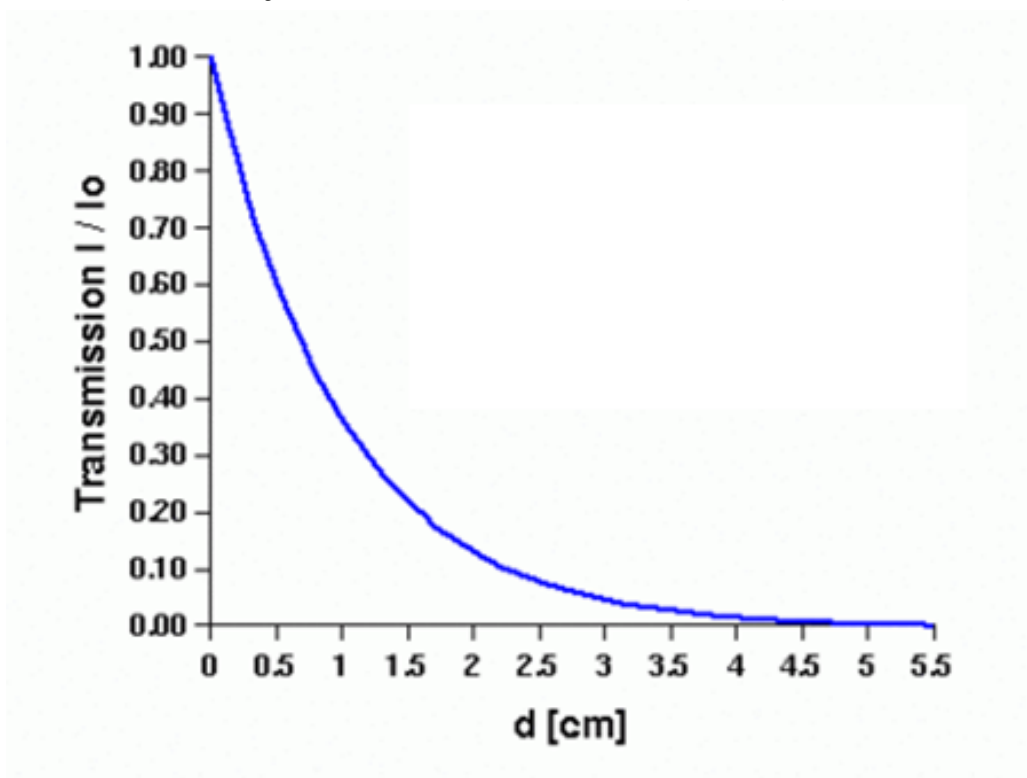
I_0 คือความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบวัสดุ

Σ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณของนิวตรอนที่พลังงานนั้นมีหน่วยเป็น cm^{-1}

X คือความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็น ซม.



รูปที่ 2-6 ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุ



รูปที่ 2-7 กราฟการลดทอนความเข้มของรังสีนิวตรอนเมื่อผ่านวัสดุ (จาก www.psi.ch เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

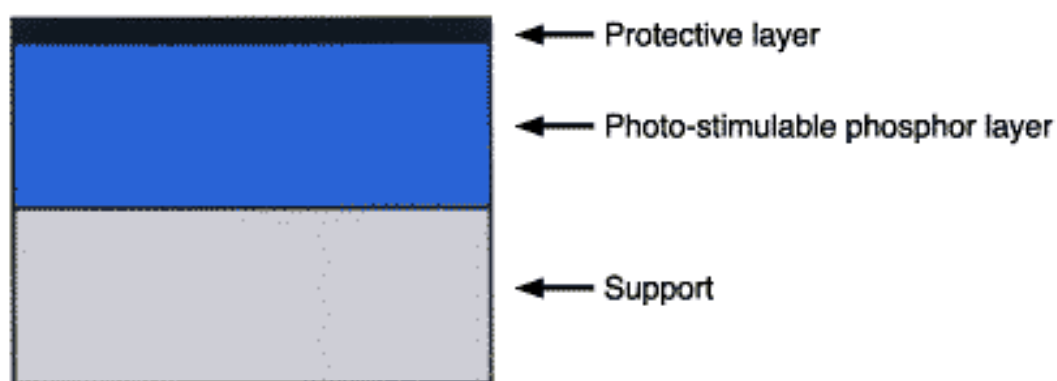
2.5 แผ่นบันทึกภาพ (imaging Plate)

แผ่นบันทึกภาพ [9] เป็นวัสดุบันทึกภาพคล้ายกับฟิล์มที่ใช้บันทึกภาพที่ถ่ายด้วยรังสีทำจากวัสดุเรืองแสงที่สามารถกักเก็บพลังงานของรังสีที่ได้รับเอาไว้แล้วนำมาสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งจะคายพลังงานโดยเรืองแสงออกมา เทคโนโลยีของสารเรืองแสงนี้มีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกทางการแพทย์ในงานด้านรังสีวินิจฉัยโดยใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ จากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้ในวงกว้างออกไปทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

แผ่นบันทึกภาพผลิตขึ้นด้วยสารเรืองแสงชนิดพิเศษ ประกอบด้วยวัสดุที่เปล่งแสงออกมาเมื่อได้รับรังสี แสง UV ลำอิเล็กตรอน ความร้อน แร่กษะแตก หรืออาจกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมีในบางกรณี โดยทั่วไปวัสดุชนิดนี้ เรียกว่า วัสดุเรืองแสง (fluorescent substances) มีลักษณะเป็นผง ซึ่งสามารถเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อถูกกระตุ้นบางอย่าง เช่น รังสี แสงที่เปล่งออกมา จะหมดลงทันทีที่หยุดการกระตุ้น ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า "fluorescence" สารเรืองแสงบางชนิดยังเปล่งแสงออกมาได้เมื่อหยุดการกระตุ้นแล้ว ซึ่งเรียกว่า "phosphorescence" ส่วนคำว่า "Luminescence" เป็นคำรวมที่ใช้เรียกปรากฏการณ์ในการเปล่งแสงทั้งสองแบบ ในการพัฒนาสารเรืองแสงนั้น มีการพิจารณาคคุณสมบัติในการเปล่งแสง (luminescence) ทั้งแบบ fluorescence และแบบ phosphorescence เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท มีการศึกษาวิจัย ทั้งการปรับสัดส่วนองค์ประกอบของสารเรืองแสง และขั้นตอนในกระบวนการผลิต สารเรืองแสงที่ใช้ในการผลิต มีคุณสมบัติในการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง (photo-stimulated luminescence, PSL) ซึ่งแตกต่างจาก fluorescent และ phosphorescent ปรากฏการณ์ของ PSL ค้นพบโดย Becquerel นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ตอนกลางศตวรรษที่ 19 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ วัสดุถูกกระตุ้นครั้งแรกด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เช่น รังสี และจะเปล่งแสงออกมา เมื่อถูกกระตุ้นครั้งที่สอง ด้วยคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ปรากฏการณ์ PSL ไม่ได้ได้รับความสนใจ จนกระทั่งปลายสงครามโลกครั้งที่สอง มีการพัฒนาไปใช้ในการตรวจวัดรังสีอินฟราเรด ของนักวิจัยในกองทัพญี่ปุ่น และใช้บันทึกภาพถ่ายด้วยรังสีในสหรัฐอเมริกา ในปี 1947 แผ่นบันทึกภาพ จึงใช้บันทึกภาพจากรังสีเอกซ์ โดยใช้หลักการพื้นฐานมาจากปรากฏการณ์ของ PSL ในการกักเก็บปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของรังสี และถูกกระตุ้นด้วยแสงความเข้มสูงให้คายพลังงานออกมาในรูปแสง

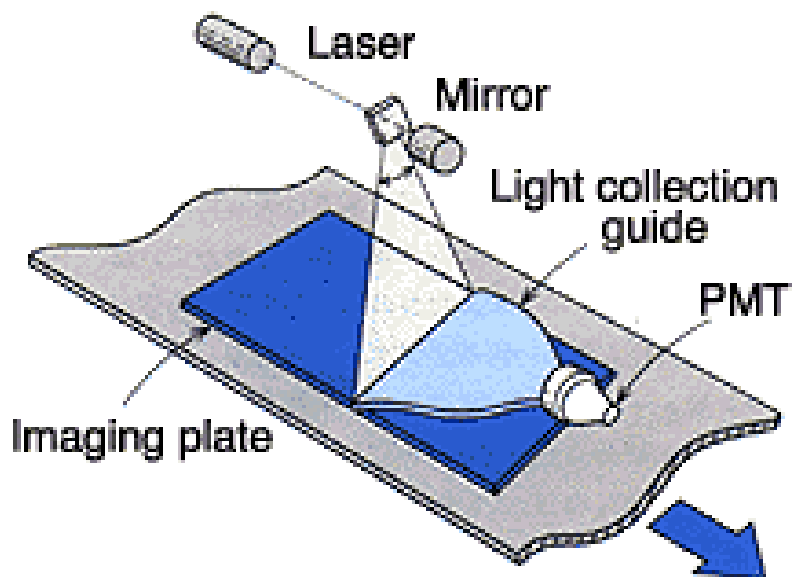
2.5.1 หลักการของแผ่นบันทึกภาพ

แผ่นบันทึกภาพมีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยผลึกสารเรืองแสงขนาดเล็ก (ขนาดผลึกประมาณ 5 mm) เป็นสารประกอบ barium fluorobromide ที่เจือด้วย bivalent europium เล็กน้อย ทำหน้าที่เป็น luminescence center มีสูตรโมเลกุลเป็น BaFBr: Eu²⁺ เคลือบอยู่บนแผ่นฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ (polyester) มีโครงสร้างและส่วนประกอบดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 โครงสร้างและส่วนประกอบของ แผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

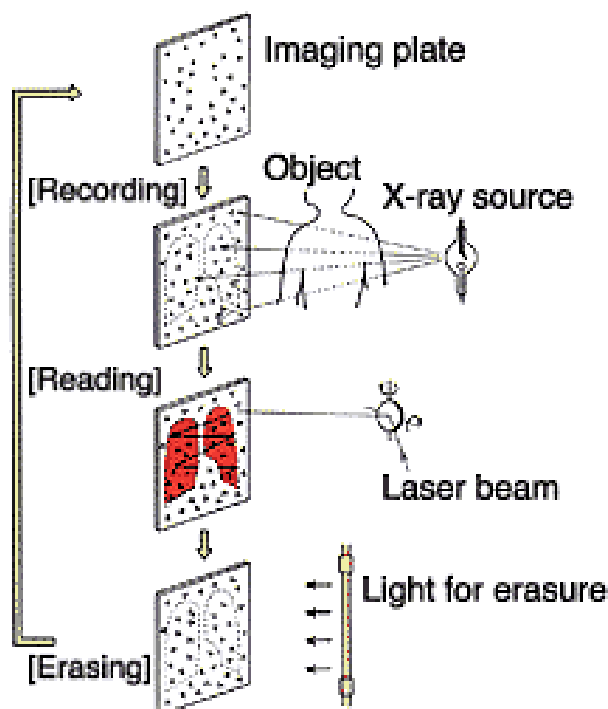
การถ่ายภาพขึ้นงานบนแผ่นบันทึกภาพ มีวิธีการคล้ายกับการถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์ม แผ่นบันทึกภาพที่ถ่ายภาพแล้วจะมีการกักเก็บปริมาณอิเล็กตรอนบริเวณกับดักอิเล็กตรอนตามความเข้มของรังสีที่ได้รับ ณ บริเวณต่างๆ จากนั้นจะนำไปสแกนด้วยแสงเลเซอร์ โดยมีตัวอ่านความละเอียดสูงเก็บรายละเอียดของแสงที่เปล่งจาก phosphor ดังรูปที่ 2-9 แผ่นบันทึกภาพที่ฉายรังสีแล้วเมื่อสแกนด้วยลำแสงเลเซอร์ PSL ที่เปล่งออกมาจะถูกอ่านและส่งผ่าน photomultiplier tube (PMT) ไปยังส่วนอ่านความเข้มแสง และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 2-9 การสแกนแผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

การอ่านความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา สามารถปรับค่าความละเอียดได้ตั้งแต่ 5 ถึง 40 pixels/mm ช่วงของความไวของสี (sensitivity range) และความไวของสีในการอ่าน (reading sensitivity) สามารถปรับค่าได้ แสงจาก PSL ที่เปล่งออกมาอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงินม่วง (400 nm) จะถูกอ่านและส่งไปยัง photo-multiplier tube (PMT) เมื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ว จะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ซึ่งปรับค่าความละเอียดความเปรียบต่าง (contrast) ได้ระหว่าง 8 - 16 bit

ส่วนของ data processing จะทำหน้าที่ประมวลข้อมูลภาพและแสดงภาพที่ปรับแต่งแล้ว (process) สามารถพิมพ์เป็นภาพสีหรือขาวดำ ภาพที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดปริมาณรังสี โดยแสดงรายละเอียดของปริมาณรังสีแต่ละจุดบนภาพได้ส่วนของ Image analysis จะทำหน้าที่ในทางวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบแผ่นบันทึกภาพ สามารถลบภาพเดิมด้วยแสง และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-10

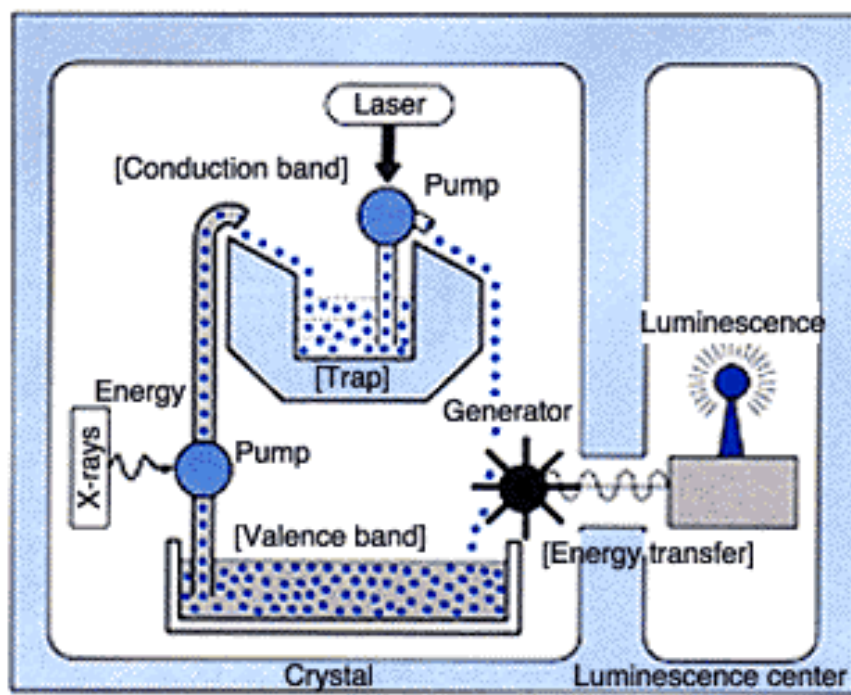


รูปที่ 2-10 กระบวนการใช้งานแผ่นบันทึกภาพประกอบด้วยการอ่าน การลบ การนำกลับมาใช้ใหม่ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

ผลึก BaFX: Eu^{2+} ($X = \text{Cl, Br or I}$) เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีโครงสร้างเป็นแบบ tetragonal เมื่อแทนที่ Ba ด้วยไอออนของ Eu^{2+} จะทำให้อยู่ในรูป solid solution เมื่อผลึกนี้ได้รับรังสี อิเล็กตรอนจะถูกจับอยู่ในโครงผลึกที่ว่าง ในส่วนไอออนของ F หรือ X ซึ่งจะทำให้เกิด color centers ขึ้นในผลึกได้ 2 ชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบของ F กับ X ส่วนชนิดของ color center สามารถหาได้จากการวัด electron spin resonance (ESR) spectrum จากการทดลองพบว่า ถ้า $X = \text{Br}$ และได้รับปริมาณ X-ray ที่เพียงพอ สเปกตรัมของ PSL จะให้แสง (visible rays) ที่สอดคล้องกับ optical density, light current, ESR intensity และ PSL intensity ของ color center นอกจากนี้ยังตรวจพบว่า ความเข้มของการเรืองสีฟ้า (blue luminescence) แปรตามจำนวนไอออนของ Eu^{2+} ขณะที่การเรืองสีแดง (red luminescence) แปรตามจำนวนไอออนของ Eu^{3+}

ผลึก BaFBr: Eu^{2+} photo-stimulable phosphor มีกลไกการเรืองแสง ดังนี้: เมื่อ Phosphor ที่เคลือบบนแผ่นบันทึกภาพถูกกระตุ้นจากการได้รับรังสีเอกซ์ ไอออน Eu^{2+} จะเปลี่ยนไปเป็นไอออน Eu^{3+} ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาอยู่ที่ conduction band และถูกจับอยู่ที่ตำแหน่งว่างใน lattices ของผลึก ที่ ตำแหน่ง Br ion ทำให้เกิด color centers ในลักษณะของ metastable state เมื่อ color center ได้รับแสงกระตุ้นอีกครั้ง อิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ จะหลุดออกเป็นอิสระไปอยู่ที่

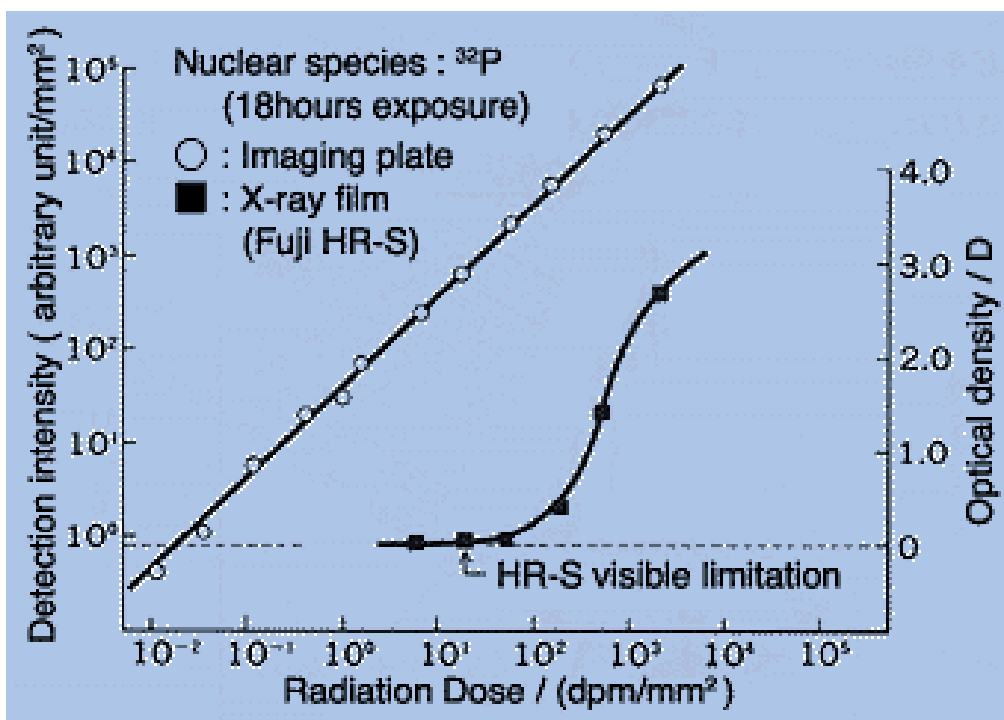
conduction band อีกครั้ง หรือทำให้ Eu^{3+} ions กลายเป็น Eu^{2+} ion ที่อยู่ในสถานะเร้า ซึ่งจะเรืองแสงในรูป PSL ออกมา กลไกการเรืองแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 กลไกการเรืองแสงของ แผ่นบันทึกภาพ (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยการดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอกซ์ ถูกจับอยู่ในช่องว่างของโครงสร้างผลึก ตรงส่วนของ halogen ion ทำให้ color center อยู่ในสถานะ metastable state และให้พลังงานรังสีออกมา เมื่อฉายด้วยแสงเลเซอร์ และ color center ดูดกลืนไว้ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นอีกจะกลับลงมารวมกับ hole ของ Eu ion ซึ่งเป็น luminescence center โดยคายพลังงานด้วยการเรืองแสงออกมา

วิธีการตรวจวัดปริมาณรังสี มีการพัฒนาขึ้นมาหลายวิธี เช่น การใช้หัววัดรังสีแบบ ionization chamber; scintillation counter, และ proportional counter แต่มีเพียงไม่กี่วิธีที่สามารถตรวจวัดภาพถ่ายของรังสี โดยแสดงเป็นภาพ 2 มิติ ได้แก่ ฟิล์มบันทึกภาพ หัววัดรังสี proportional counter แบบ 2 มิติ การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ โดยใช้ image intensifier และ X-ray TV ในวิธีการเหล่านี้ เทคนิคที่มีการใช้มากที่สุด คือ การถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์ม ข้อแตกต่างระหว่าง แผ่นบันทึกภาพ กับฟิล์ม แสดงอยู่ในรูปที่ 2-12 ในการวัดรังสีปีตาจากไอโซโทปรังสี P-32



รูปที่ 2-12 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ แผ่นบันทึกภาพ กับฟิล์มรังสีเอกซ์ทั่วไป (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558)

แกนนอนเป็นปริมาณรังสีจากตัวอย่าง P-32 ซึ่งให้รังสีบีตาพลังงาน 1.7 MeV วัดด้วย liquid scintillation counter แกนตั้งด้านซ้ายเป็นความเข้มของแสงที่เรืองจาก แผ่นบันทึกภาพ แกนตั้งด้านขวาเป็นความดำของฟิล์ม สำหรับขีดจำกัดในการมองเห็น ซึ่งเป็นการแสดงส่วนที่สามารถมองเห็นได้ในภาพ มีค่า 1/10 ของค่าปกติของ determination limit โดยแสดงคุณสมบัติที่คล้ายกันในรังสีบีตา อิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ซึ่งจะเห็นลักษณะเด่นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีชนิดอื่น

1. มีความไวสูง โดยมีความไวมากกว่าฟิล์มหลายสิบเท่า หรืออาจไวกว่าหลายพันเท่า ขึ้นกับชิ้นงานหรือตัวอย่าง
2. มี dynamic range ที่กว้าง โดยมีช่วงกว้างมากกว่า 10^4 ถึง 10^5 ซึ่งสูงกว่าการใช้ฟิล์มที่มีอยู่ในช่วง 102
3. มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า มีการเรืองแสงแปรผันโดยตรง ตามปริมาณรังสีตลอดช่วง
4. มีการแสดงรายละเอียด (spatial resolution) ได้สูง เมื่อเปรียบเทียบกับ วิธีการที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่น มีความหนาแน่นของ pixel สูงกว่า

5. ได้สัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลโดยตรงจากเครื่องอ่าน ทำให้มีกระบวนการทางคอมพิวเตอร์หรือเชื่อมโยงกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นได้สะดวก

6. ใช้ระบบการอ่านรังสีแบบ integral-type detector ทำให้การใช้ แผ่นบันทึกภาพ ในการอ่านค่าของรังสี มี detection counting errors จากรังสีความเข้มสูงน้อยกว่าวิธีการ pulse-type detectors ดังเช่นการใช้หัววัดรังสีแบบ proportional counter และ scintillation counter

7. ค่าของรังสีจากสิ่งแวดล้อมที่บันทึกอยู่ สามารถลบออกได้ก่อนจะใช้งานแผ่นบันทึกภาพ จึงสามารถนำมาใช้แทนการวัดรังสีทั่วไป ที่แสดงผลเป็นภาพ

นอกจากจะมีความไวสูง และทำให้สังเกตปริมาณรังสีออกมาเป็นภาพได้แล้ว ยังสามารถแสดงปริมาณ หรือความเข้มของรังสีในแต่ละจุดได้ด้วย

2.5.2 ชนิดของแผ่นบันทึกภาพ

ในส่วนของแผ่นบันทึกภาพที่ถูกใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นมีรายละเอียดดังตารางที่ 2-2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) ของบริษัท Fujifilm (จาก home.fujifilm.com เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2559)

IP Size	20 x 40
Pixel Size	50/100 μm
Reading Time	5 min. (50 μm)
Detection Limit	P-32 0.11 dpm/mm ² /hr
Dynamic Range	C-14 0.90 dpm/mm ² /hr
Gradation	4/5 orders of magnitude 65,536 (16 bits) / 256 (8 bit)

สามารถแบ่งชนิดของแผ่นบันทึกภาพของบริษัท Fujifilm ได้ดังต่อไปนี้

1. BAS – MS เป็นแผ่นบันทึกภาพที่ถูกออกแบบให้มีความไวสูง (High sensitivity) และมีความต้านทานต่อความชื้นหรือน้ำได้
2. BAS – SR เป็นแผ่นบันทึกภาพที่ถูกออกแบบโดยเม็ดสี สีน้ำเงิน (Blue pigment) ทำให้ภาพมีความคมชัดสูง ทนทานต่อการวัดตัวอย่างที่เปียกได้

3. BAS – TR เป็นแผ่นบันทึกภาพที่ถูกออกแบบให้เหมาะกับการวัด ^3H ไม่มีพื้นผิวชั้น Surface-protection layer ดังนั้นจึงเหมาะกับการวัดตัวอย่างที่แห้ง

4. BAS – ND เป็นแผ่นบันทึกภาพที่ถูกออกแบบให้เหมาะกับการวัดนิวตรอน โดยจะมีการเคลือบสาร Gd_2O_3 ไว้เพื่อเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนในชั้น Photo-stimulation layer

2.6 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสี, อนุภาคหรือแสงที่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี (นเรศร์ จันทน์ขาว, 2541) เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชิ้นงานเนื่องจากนิวตรอนเกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้น้อยมาก การบันทึกภาพจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีภาคตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนได้สูง เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชิ้นงาน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนได้ดี และสามารถปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิที่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีบีตา หรือรังสีแอลฟา เมื่อรังสีทุติยภูมิตกกระทบฟิล์มซึ่งประกอบอยู่กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพบนฟิล์มได้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้คือ

1. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ (Metallic Foil Neutron Converter Screen) แผ่นโลหะที่ใช้จะมีภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เมื่อนิวตรอนทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุแล้วจะมีการปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาทันที

2. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง (Light Emitting Neutron Converter Screen) เป็นฉากที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรก และมีความไวมากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron Absorber Material) และสารเรืองแสง (phosphorescent Material) สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ได้แก่ ลิเทียม - 6 และโบรอน -10 เนื่องจากให้รังสีแอลฟาพลังงานสูง ส่วนสารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์ ซึ่งให้แสงในช่วงแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

2.7 การเกิดโปรตอนรีคอยล์ (Recoiled proton)

การเกิดโปรตอนรีคอยล์ (recoiled proton) เป็นการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนแบบ fast-neutron elastic scattering ซึ่งเกิดจากอนุภาคนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนนั้นชนเข้ากับนิวเคลียสของธาตุที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน ทำให้เกิดการหลุดของรีคอยล์โปรตอนออกมา

การทำให้เกิดโปรตอนรีคอยล์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นสามารถให้เกิดขึ้นได้โดยอาศัยฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนเช่นวัสดุที่ทำจากโพลีเมอร์ได้ หลักการเหมือนกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไปคือ นิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนนั้นจะส่งผ่านอนุภาคนิวตรอนเข้าไปชนกับอนุภาคไฮโดรเจนของแผ่นโพลีเมอร์ และทำให้เกิดเป็นภาพบนแผ่นบันทึกภาพ

2.7.1 การศึกษาการเกิดโปรตอนรีคอยล์บนแผ่นฟิล์ม CR-39

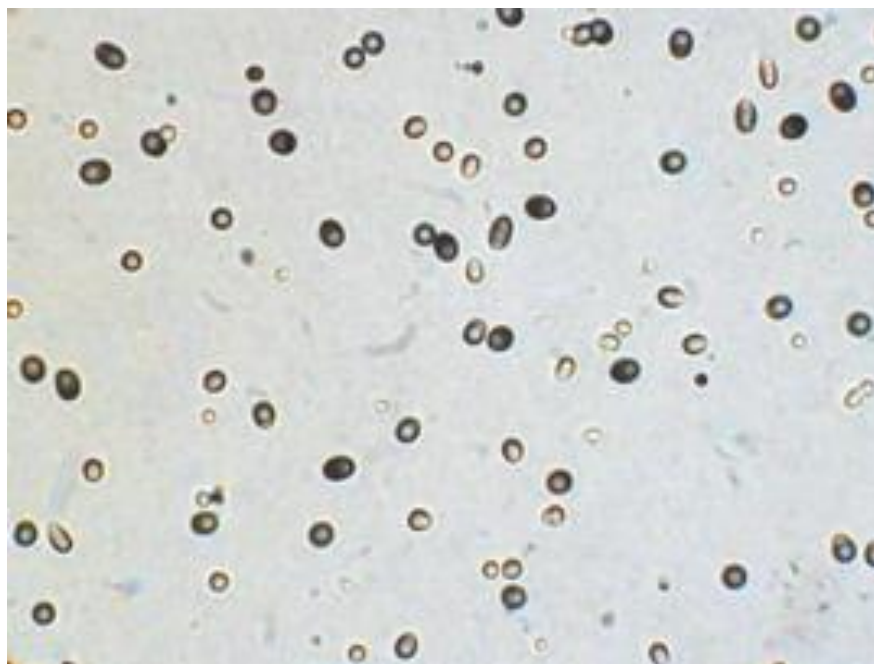
CR-39 หรือ allyl diglycol carbonate (บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2554) เป็นโพลีเมอร์แผ่นพีวีซี ปกติจะผลิตขึ้นมาสำหรับใช้ทำเลนส์แว่นตา CR-39 เป็นชื่อทางการค้าของผลิตภัณฑ์จาก PPG Industries ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดย Columbia Chemical Co Inc ให้กับแผนกเคมีของ PPG Industries มีการนำ CR-39 ไปใช้งานทางอื่นด้วย เช่น ใช้วัดรังสีนิวตรอน

CR เป็นตัวย่อของคำว่า Columbia Resin ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการใช้ CR-39 เรซินหุ้มถังเชื้อเพลิงของเครื่องบิน เนื่องจาก CR-39 สามารถประสานตัวเองได้ เมื่อถูกระแทก

CR-39 เป็นแผ่นพีวีซีแสงสามารถส่องผ่านได้ แต่ช่วงของแสงเหนือม่วง (ultraviolet) ผ่านไม่ได้ ทนต่อการขีดขีด CR-39 มีน้ำหนักครึ่งหนึ่งของกระจก มีดัชนีหักเหต่ำกว่าแก้วเล็กน้อย จึงเหมาะสำหรับเป็นวัสดุในการทำแว่นตา และแว่นกันแดด สามารถทำให้มีสีได้หลายสี โดยอาจเคลือบที่ผิวหน้าหรือเติมสีลงไปเนื้อแผ่นพีวีซี CR-39 ทนต่อตัวทำละลาย สารเคมี รังสีแกมมา สามารถใช้ได้จนถึงอุณหภูมิ 100 องศา และอยู่ที่ 130 องศา ได้นานประมาณ 1 ชั่วโมง

การนำไปใช้ในการวัดรังสี Cr-39 ที่ได้รับอนุภาคโปรตอน (recoil proton) จากการชนของนิวตรอน จะทำให้เกิดรอย (track) ของอนุภาคดังรูปที่ 2-13 ซึ่งทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยกระบวนการกัดรอย (etching process) ในสารละลายต่าง (sodium hydroxide)

รอยอนุภาคที่ขยายขนาดขึ้นแล้ว สามารถนับจำนวนได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (โดยทั่วไปใช้กำลังขยาย 100 เท่า) จำนวนรอยที่เกิดขึ้นมีค่าแปรผันตามจำนวนรังสีนิวตรอนที่เข้าชน



รูปที่ 2-13 ตัวอย่างแผ่นฟิล์ม CR-39 ที่ได้รับอนุภาคโปรตอน (recoiled proton) จากการชนของนิวตรอน (CHARGED-PARTICLE SPECTROSCOPY ON OMEGA, 2001)

2.7.2 ตัวอย่างวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูงที่ใช้ในงานวิจัย

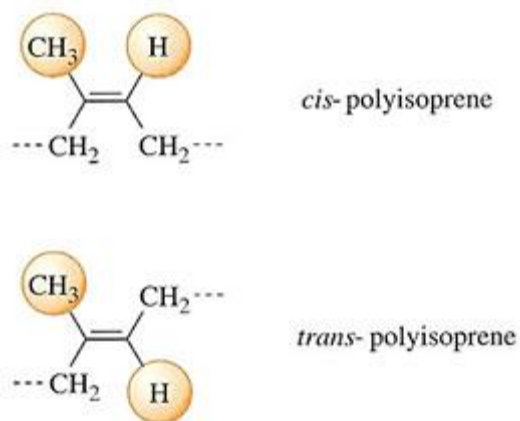
งานวิจัยได้นำ 3 วัสดุที่มีไฮโดรเจนสูงมาพิจารณาเพื่อใช้งานได้แก่ เทปผ้า, แผ่นพีวีซีและแผ่นอะคริลิกซึ่งแสดงชื่อและสูตรทางเคมีดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ตารางแสดงชื่อและสูตรทางเคมีของวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูงที่นำใช้ในการวิจัย

วัสดุ	ชื่อทางเคมี	สูตรทางเคมี
เทปผ้า (ยางธรรมชาติ)	โพลีไอโซพรีน	(C ₅ H ₈)
แผ่นพีวีซี	โพลีไวนิล คลอไรด์	(C ₂ H ₃ Cl)
แผ่นอะคริลิก	โพลีเมทิล เมทาคริเลท	(C ₅ H ₈ O ₂)

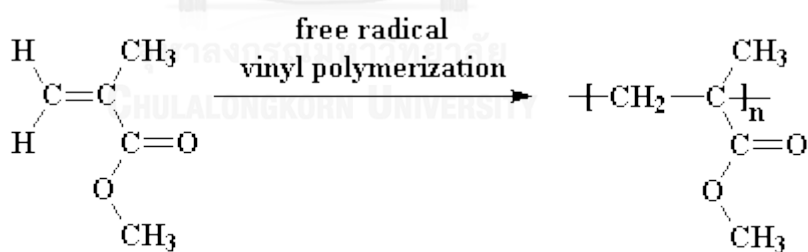
เทปผ้า [10] ประกอบด้วยส่วนประกอบสองชั้น ได้แก่ ชั้นที่ 1 คือ ผ้า บนผิวของผ้านั้น จะถูกเคลือบด้วยโพลีเอทิลีน และ ชั้นที่ 2 คือ Rubber resin หรือยางธรรมชาติที่ถูกปรับสภาพให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งยางธรรมชาติมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนสูง เป็นสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน จึงเป็นไปได้ว่าวัสดุดังกล่าวสามารถเกิด elastic scattering กับนิวตรอนพลังงานสูง และให้โปรตอนรีคอยล์ออกมา โดยยางธรรมชาตินั้นมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2-14



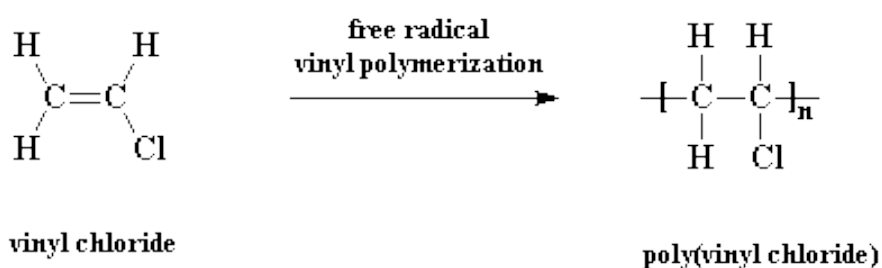
รูปที่ 2-14 โครงสร้าง monomer ของยางธรรมชาติ หรือ โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene) (จาก <http://chemispolymer.siam2web.com/> เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559)

แผ่นอะคริลิก เป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งที่ถูกขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่น อาจเป็นแผ่นใสหรือแผ่นมีสีต่างๆ นิยมใช้งานมากในภาคครัวเรือน เช่น ทำป้าย ทำเครื่องตกแต่งบ้าน ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นธาตุไฮโดรเจนเช่นกัน โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 โครงสร้าง monomer ของแผ่นอะคริลิก หรือ โพลีเมททิล เมทาคริเลท (Polymethyl methacrylate) (จาก <http://chemispolymer.siam2web.com/> เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559)

แผ่นพีวีซี หรือ โพลีไวนิลคลอไรด์ ส่วนใหญ่จะใช้ทำท่อน้ำพลาสติก อาจใช้ทำวัสดุปูพื้น ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์โทรคมนาคม อุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์ในการขนส่ง แต่ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีลักษณะเป็นแผ่นใสบาง หรือแผ่นพลาสติกใสที่ใช้สำหรับถ่ายเอกสาร มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 โครงสร้าง monomer ของแผ่นพีวีซี หรือ โพลีไวนิล คลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) (จาก <http://chemispolymer.siam2web.com/> เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2559)

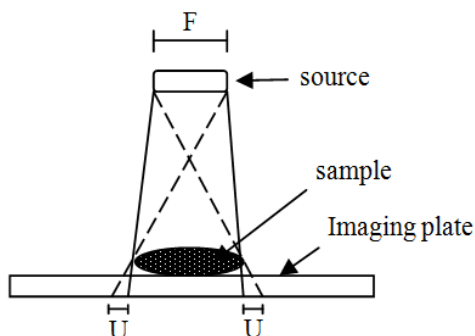
2.8 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่าย

การตรวจสอบคุณภาพ (จาก <http://lpnmrc.com> เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558) ของภาพถ่ายมีข้อดีและข้อเสียทางเทคนิคตามรายละเอียดดังตารางที่ 2-4 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2-4 ข้อดีและข้อเสียของการถ่ายภาพด้วยรังสี

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถตรวจสอบโดยไม่จำกัดชนิดของวัสดุ 2. มีหลักฐานเป็นภาพสำหรับการตรวจสอบย้อนหลัง 3. ไม่ต้องปรับเทียบเครื่องมือก่อนการตรวจสอบ 4. ตรวจสอบได้โดยไม่ต้องแปลผลจากสัญญาณ 5. ตรวจได้ทั้งพื้นผิวและใต้พื้นผิว 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องระมัดระวังด้านความปลอดภัยทางรังสีมากกว่าวิธีอื่น 2. ไม่ทราบความลึกของความไม่ต่อเนื่อง 3. ต้นทุนค่อนข้างสูง 4. ต้องเข้าถึงชิ้นงานทั้งสองด้าน 5. มีขีดจำกัดของความหนาของชิ้นงาน

2.8.1 ความไม่คมชัดเรขาคณิต (Geometric Unsharpness)



รูปที่ 2-17 การเกิดความไม่คมชัดเรขาคณิต

$$U_g = \frac{(F \times t)}{d} \quad (2)$$

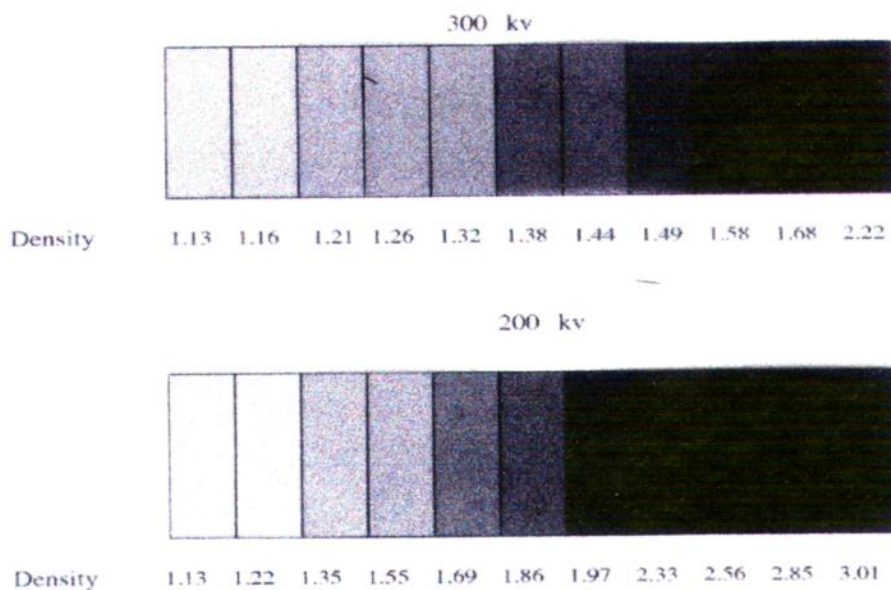
โดยที่	U_g	=	ความไม่คมชัดเรขาคณิต
	F	=	ขนาดของต้นกำเนิดรังสี
	t	=	ระยะจากผิวบนชิ้นงานถึงฟิล์ม
	d	=	ระยะจากต้นกำเนิดรังสีถึงผิวบนของชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
LONGKORN UNIVERSITY

2.8.2 ความเปรียบต่าง (Contrast)

ความเปรียบต่างหมายถึง ความแตกต่างระหว่างความเข้มของภาพถ่ายรังสีในสองบริเวณที่อยู่ติดกันเช่นบริเวณความไม่ต่อเนื่องและบริเวณปกติ ดังนั้นหากภาพถ่ายรังสีมีความเปรียบต่างดีมีผลมาจาก

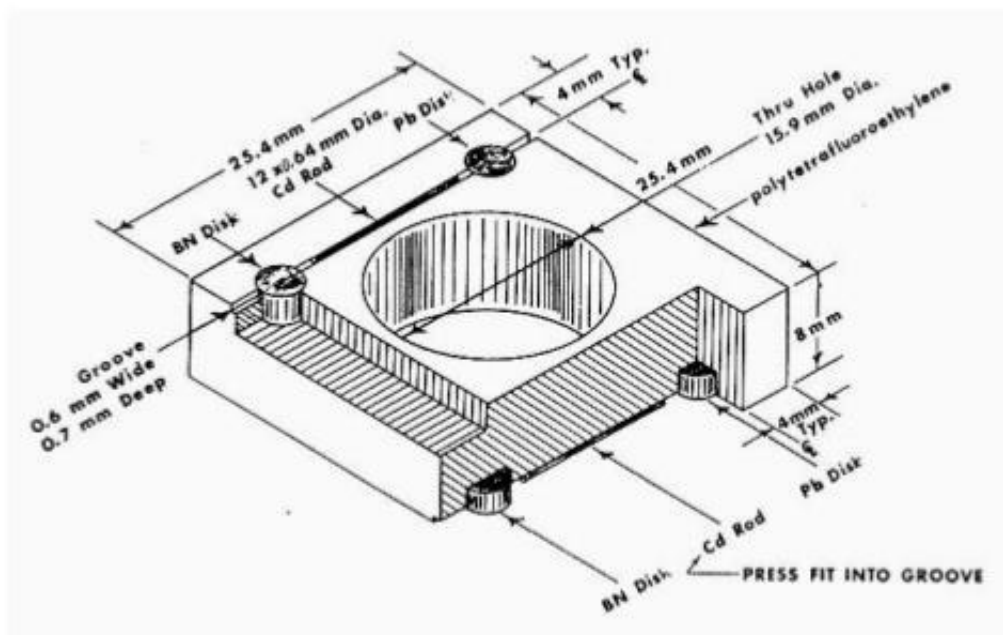
1. การใช้รังสีที่มีพลังงานเหมาะสม
2. เลือกใช้ฟิล์มที่มีคอนทราสต์
3. ใช้ฉากกรองรังสี
4. ใช้ฉากตะกั่วประกบฟิล์มเพื่อเสริมความเข้มรังสี
5. ลดการเกิดรังสีกระเจิง



รูปที่ 2-18 ภาพความเปรียบเทียบกับความเปรียบต่างโดยใช้รังสีเอกซ์ 200 และ 300 kv (จาก <http://www.nst.or.th/> เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2559)

2.8.3 วัสดุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

วัสดุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2554) เป็นวัสดุตัวอย่างที่ได้รับการออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของการถ่ายภาพวัสดุอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดแสดงดังนี้



รูปที่ 2-19 ลักษณะ Beam Purity Indicator (BPI) (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , 2554)

1) การตรวจสอบระบบถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator (BPI)

Beam Purity Indicator ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูเป็นรูวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.9 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบมาสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนนิวตรอน วัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว จัดทำเป็นเหรียญรูวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ลวดแคดเมียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2-19

การวิเคราะห์ทำได้โดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์มโดย

D_B คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์

D_L คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว

D_H คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู

D_T คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน

ΔD_L คือ ผลต่างความเข้มของฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น

ΔD_B คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มของฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

1.1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron, NC)

$$NC = D_H - \frac{(highD_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (3)$$

1.2) ปริมาณนิวตรอนกระเจิง (Effective scatter neutron content, S)

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad (4)$$

1.3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = \left(\frac{D_T - lowD_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (5)$$

1.4) ปริมาณรังสีจาก Pair production (Effective pair production content, P)

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (6)$$

2) การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole : H) ที่เจาะเป็นช่องกลมและช่องว่าง (Gap : G) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลักต่างๆ คือ อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียมและตะกั่วตั้งรูป 2-20 โดยมีความหนาขนาดของรูและช่องว่างต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-4 และ ตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

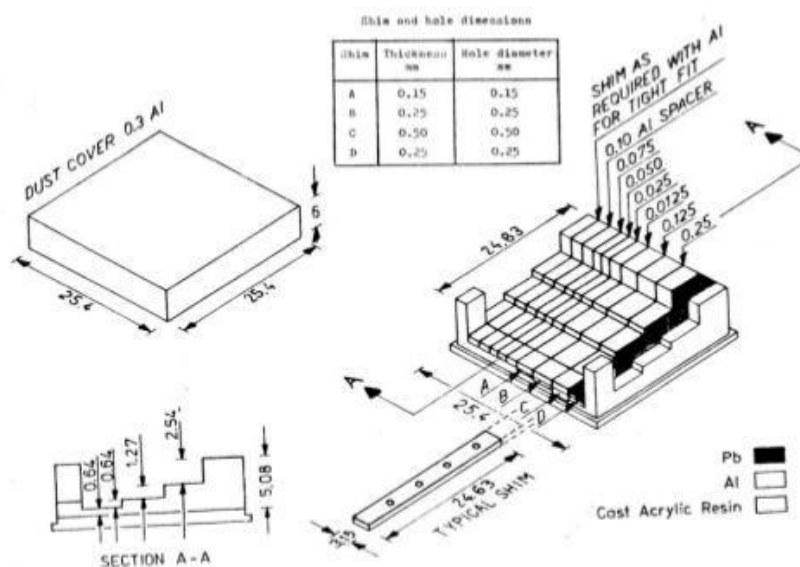
Value of G	Gap size , mm.*
1	0.25
2	0.13
3	0.10
4	0.076
5	0.051
6	0.025
7	0.013

*เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงของความหนาของภาพ ASTM SI

ตารางที่ 2-6 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI

Value of H	Gap size, mm.*	Absorber thickness, mm.
1	0.51	0.64
2	0.51	1.27
3	0.51	2.54
4	0.51	5.08
5	0.25	0.64
6	0.25	1.27
7	0.25	2.54
8	0.25	5.08
9	0.13	0.64
10	0.13	1.27
11	0.13	2.54
12	0.13	5.08

*เป็นขนาดของรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดที่มองเห็นได้ในภาพถ่าย ASTM SI



รูปที่ 2-20 ลักษณะ ASTM Sensitivity Indicator (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย , 2554)

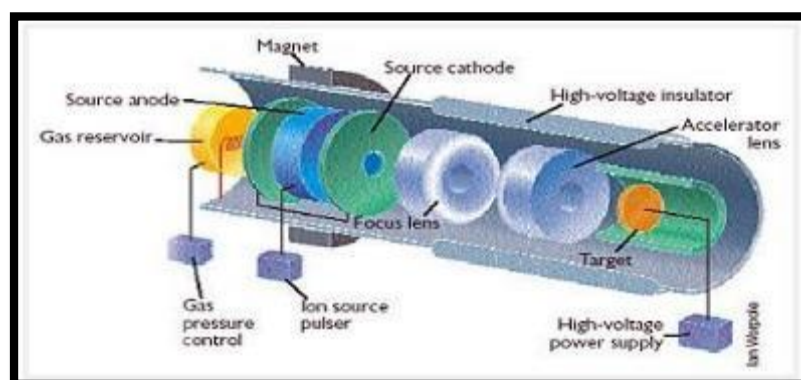
2.9 เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 (Neutron Generator model MP 320)

เครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron Generator) ([11] เข้าถึงเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2558) เครื่องกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่ผลิตโดยบริษัท Thermo Fisher Scientific มีรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 รายละเอียดของเครื่องกำเนิดนิวตรอน

Parameter	Value
Input Voltage	24 VDC +/-10% @ 5 A or 100 to 240 VAC 50 to 60 Hz
Power	Less than 75 W typical
Neutron Yield	~1 x 10 ⁸ neutrons/second (DT) ~1 x 10 ⁶ neutrons/second (DD)
Neutron Energy	14.1 MeV (DT) or 2.4 MeV (DD)
Max Accelerator Voltage	90 kV
Frequency	250 Hz to 20 kHz, continuous

Parameter	Value
Duty Cycle	5% to 100%, 5 μ sec pulse width minimum
Weight	~25 lb (11.3 kg)

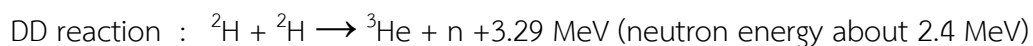


รูปที่ 2-21 ส่วนประกอบภายในของเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP 320 (McConnell , 2013)

เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 มีส่วนประกอบต่างๆภายในตัวเครื่องดังในรูปที่ 2-21 ภายในเครื่องกำเนิดนิวตรอนจะมีแก๊สดีวเทอเรียม ซึ่งหมุนเวียนอยู่ในระบบ และจะมี Gas pressure control เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของ Gas reservoir

Ion source pulser ทำหน้าที่สร้างประจุดีวเทอรอน (deuteron) จากแก๊สดีวเทอเรียม (deuterium) ที่อยู่ระหว่าง Source cathode และ Source anode และมี focus lens ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของไอออนจากทิศทาง Anode ไป Cathode

แม่เหล็กถาวรด้านนอกทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นแนวขนานผ่าน Focus lens จากนั้นไอออนจะถูกเร่งด้วย Accelerator lens เพื่อให้ชน Target ซึ่งเป็น Tritium ก่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชัน (Fusion) ให้อนุภาคนิวตรอนออกมาดังสมการ



บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การศึกษาริวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบโปรตอนรีคอยล์จากวัสดุที่นำมาใช้เป็น neutron converter screen และทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มาจากนิวตรอนเร็ว
- 2) หาดำแหน่งการวางแผ่นบันทึกภาพเพื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนให้ได้ลักษณะโปรไฟล์เรียบที่สุด
- 3) ทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นเทปผ้า แผ่นอะคริลิก และแผ่นพีวีซีเพื่อศึกษาผลของความดำโดยใช้ค่า PSL/mm² เทียบกับความหนาที่แตกต่างกันของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
- 4) การถ่ายภาพกับวัสดุตัวอย่างอะคริลิก โดยเลือกความหนาที่ได้จากข้อ 3 มาใช้เพื่อหาความคมชัดและความเปรียบต่างจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

3.1 การทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มาจากนิวตรอนเร็ว

3.1.1 ทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากแผ่นเทปผ้า

3.1.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

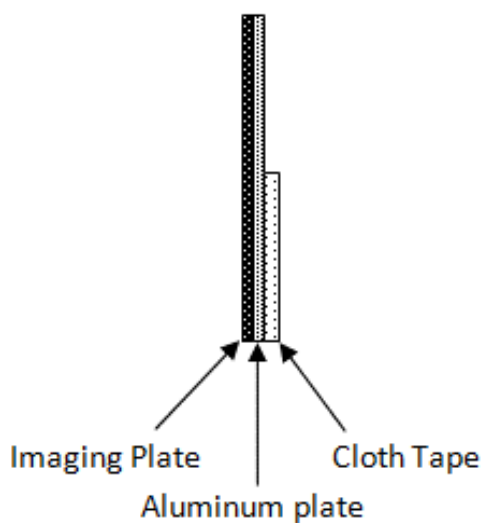
ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
2	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M รุ่น 389 มีองค์ประกอบคือ Rubber resin	
3	แผ่นบันทึกภาพ รุ่น BAS-MS ของบริษัท FUJIFILM	
4	แผ่นอะลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตร	
ถ5	เครื่องอ่านค่าความดำของแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM	

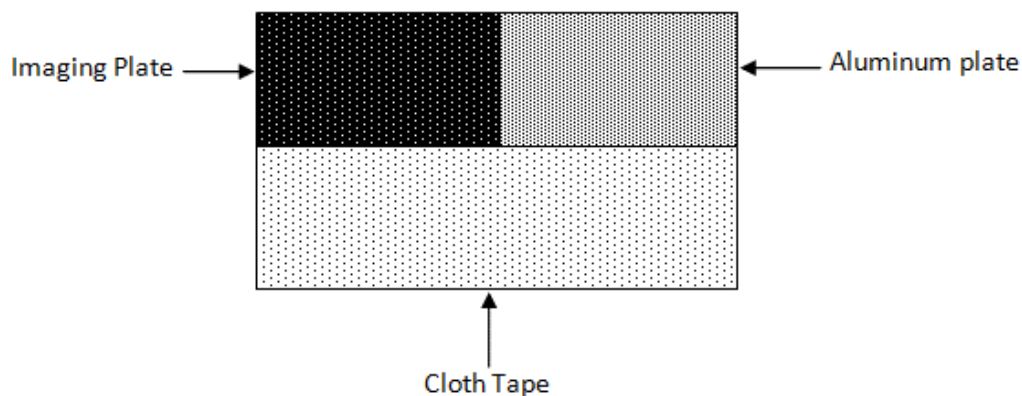
ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
6	เครื่องลบภาพถ่ายบนแผ่น บันทึกภาพ	

3.1.1.2 วิธีการทดลอง

- นำแผ่นบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมมาจัดวางตามแผนภาพในรูปที่ 3-22 และรูปที่ 3-23



รูปที่ 3-22 ภาพการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านข้าง
(side view)



รูปที่ 3-23 แผนภาพการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านหน้า
(Front view)



รูปที่ 3-24 ภาพถ่ายของการจัดวางบันทึกภาพ เทปผ้า และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวด้านหน้า

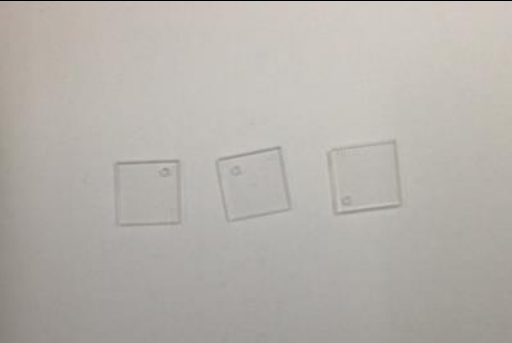



2) นำไปฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไข กระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที

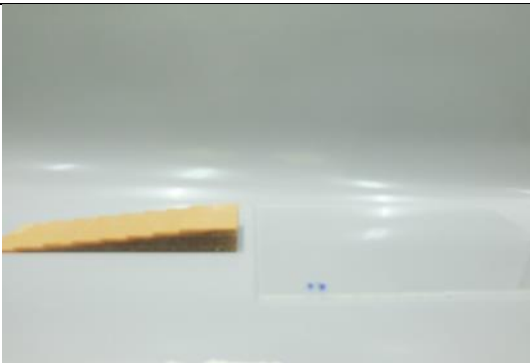

3) หลังจากฉายด้วยรังสีนิวตรอนแล้ว ได้นำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านความดำภาพด้วยเครื่องอ่านค่าความดำรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM โดยใช้โปรแกรม Image reader FLA-5000 series และการอ่านค่าที่บันทึกได้นั้น จะใช้โปรแกรม Multigaue ซึ่งจะอ่านค่าความดำได้เป็นหน่วยของ PSL

4) ผลการทดลองแสดงในข้อ 4.1

3.1.2 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่เกิดจากนิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่น CR-39

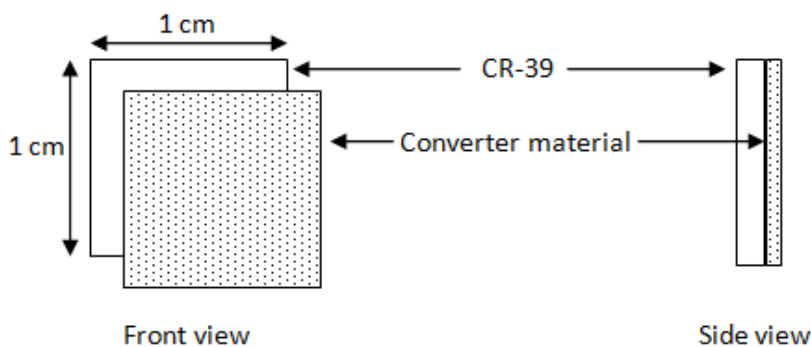
3.1.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	แผ่น CR-39 ขนาด 1x1 ซม.	
2	สารละลาย 6N NaOH 100 มิลลิลิตร	
3	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 บริษัท Thermo Fisher Scientific ซึ่งจะให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	
4	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M รุ่น 389 มีองค์ประกอบคือ Rubber resin	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
5	แผ่นอะคริลิกความหนา 1.0 มิลลิเมตร	
6	แผ่นพีวีซีความหนา 0.1 มิลลิเมตร	
7	กล้องจุลทรรศน์	

3.1.2.2 วิธีการทดลอง

1) นำแผ่น CR-39 จำนวน 3 แผ่น แต่ละแผ่นประกบด้วยเทปผ้า แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิก นำไปฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไข กระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที โดยหันหน้าด้านที่มีฉากรับนิวตรอน (converter screen) เข้าหาเครื่องกำเนิดนิวตรอนดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3-25

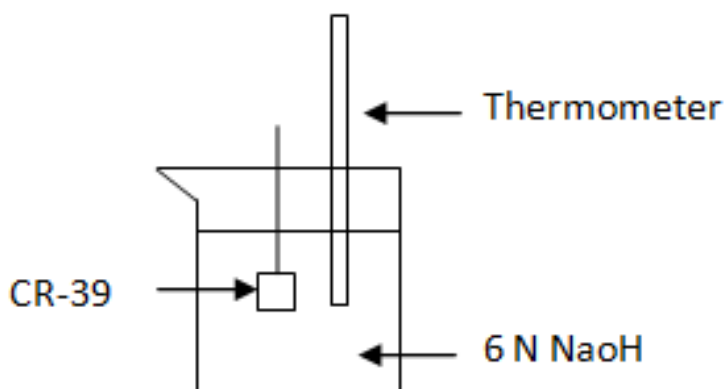


รูปที่ 3-25 แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของ CR-39 เมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอน

2) หลังจากฉายด้วยนิวตรอนเสร็จ ได้นำแผ่น CR-39 ออกมาเพื่อเตรียมการกัดรอยต่อไป

3) เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 6N โดยทำการชั่ง NaOH น้ก 24 กรัม ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายลงในบีกเกอร์ นำไปควบคุมอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส

4) นำแผ่น CR-39 ที่ผ่านการฉายนิวตรอนตามข้อ 1 มากัดรอยอนุภาค ด้วยการจุ่มลงในสารละลาย 6 N NaOH ที่เตรียมไว้ โดยแขวนแผ่น CR-39 ในบีกเกอร์ ให้ผิวของแผ่นสัมผัสสารละลายทั่วทั้งแผ่นไม่มีส่วนใดที่แตะพื้นหรือขอบของบีกเกอร์ ดังแผนภาพรูปที่ 3-26



รูปที่ 3-26 แผนภาพการกัดรอยด้วยสารละลาย 6 N NaOH บนแผ่น CR-39

5) แช่สารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที โดยทั้งนี้จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการกัตรอยอนุภาค

6) นำ CR-39 ขึ้นจากสารละลาย NaOH และล้างแผ่น CR-39 ที่กัตรอยแล้วด้วยน้ำกลั่น ตามด้วย Methyl Alcohol จากนั้นให้ปล่อยแผ่น CR-39 ให้แห้งทั้งแผ่น โดยการทิ้งไว้หนึ่งวัน ห้ามเช็ดให้แห้งโดยเด็ดขาด

7) นำมาส่องดูขนาดรอยอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยก่อนจะส่องดูรอยนั้น ได้นำ CR-39 เช็ดด้วยแอลกอฮอล์และใช้กระดาษเช็ดแผ่นฟิล์มเพื่อลบรอยต่างๆที่เกิดเป็นคราบจากการล้างในขั้นตอนที่ 5 จากนั้นนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งการใช้งานกล้องจุลทรรศน์จะใช้ควบคู่กับโปรแกรม MotiC Image plus 2.0


8) เก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Image J





9) ผลการทดลองแสดงในข้อ 4.2




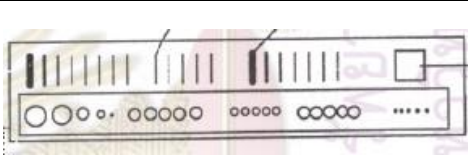
3.1.3 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มีผลมาจากนิวตรอนเร็วด้วยแผ่นบันทึกภาพ

การทดสอบในหัวข้อ 3.1.3 นี้ทำขึ้นเพื่อยืนยันว่าผลที่เกิดบนแผ่นบันทึกภาพนั้นมาจากนิวตรอนเร็วจริง เนื่องจากการปล่อยอนุภาคนิวตรอนจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนนั้นมีทั้งนิวตรอนพลังงานต่ำและพลังงานสูง

3.1.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M รุ่น 389 มีองค์ประกอบคือ Rubber resin	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
2	แผ่นบันทึกภาพ รุ่น BAS-MS ของบริษัท FUJIFILM	
3	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 บริษัท Thermo Fisher Scientific ซึ่งจะให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	
4	แผ่นตะกั่วสำหรับกำบังรังสี	
5	เครื่องอ่านค่าความดำของแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
6	เครื่องถ่ายภาพบนแผ่นบันทึกภาพ	
7	Beam purity indicator	
8	ASTM sensitivity indicator	
9	Test strip B	

3.1.3.2 วิธีการทดลอง

1) นำแผ่นตะกั่วซ้อนกันให้ได้ความหนา 10 มิลลิเมตร เพื่อกำบังรังสีเอกซ์โดยนำไปวางระหว่างเครื่องกำเนิดนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ที่ตำแหน่งห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 cm สูงจากพื้น 70 cm

2) นำแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ประกอบด้วยเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรทั่วทั้งแผ่น นำไปวาง ณ ตำแหน่งที่ถ่ายภาพ นำ Beam purity indicator , ASTM sensitivity indicator และ test strip b วางไว้หน้าเทปกาวเพื่อถ่ายภาพ

3) ทำการฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไขกระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที

4) หลังจากฉายด้วยรังสีนิวตรอนแล้ว ได้นำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านด้วยเครื่องอ่านค่าความดำรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM บันทึกค่าที่อ่านได้ในหน่วยของ PSL

5) นำแผ่นบันทึกภาพที่อ่านค่าเสร็จแล้วไปฉายด้วยแสงของเครื่องลบภาพเพื่อจะได้นำแผ่นบันทึกภาพกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง



6) นำไปถ่ายภาพใหม่อีกครั้งโดยนำแผ่นตะกั่วในข้อ 1 ออก





7) ผลการทดลองเป็นไปตามข้อ 4.3

3.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพนิวตรอน

เนื่องจากในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้น ไม่สามารถรู้ได้ว่าทิศทางของลำนิวตรอนที่เคลื่อนที่จากเครื่องกำเนิดนิวตรอนครอบคลุมพื้นที่บริเวณใด จึงต้องมีการทดลองถ่ายภาพเพื่อหาตำแหน่งที่ให้คุณภาพของภาพถ่ายที่ดีที่สุดที่ตำแหน่งนั้น โดยการศึกษาของภาพถ่ายนิวตรอนจากการอ่านค่า PSL ที่ได้มาจากการอ่านผลของแผ่นบันทึกภาพ ออกมาเรียบและคงที่ที่สุด

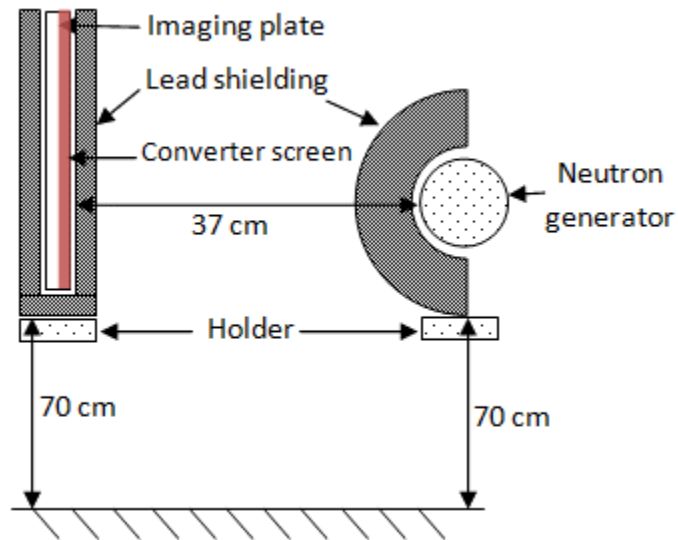
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M รุ่น 389 มีองค์ประกอบคือ Rubber resin	
2	แผ่นบันทึกภาพ รุ่น BAS-MS ของบริษัท FUJIFILM	

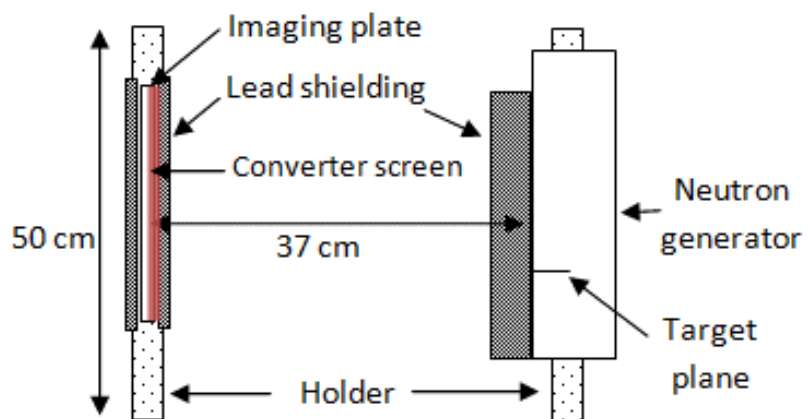
ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
3	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 บริษัท Thermo Fisher Scientific ซึ่งจะให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	
4	แผ่นตะกั่วสำหรับกำบังรังสี	
5	เครื่องอ่านค่าความดำของแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM	
6	เครื่องลบภาพถ่ายบนแผ่นบันทึกภาพ	

3.2.2 วิธีการทดลอง

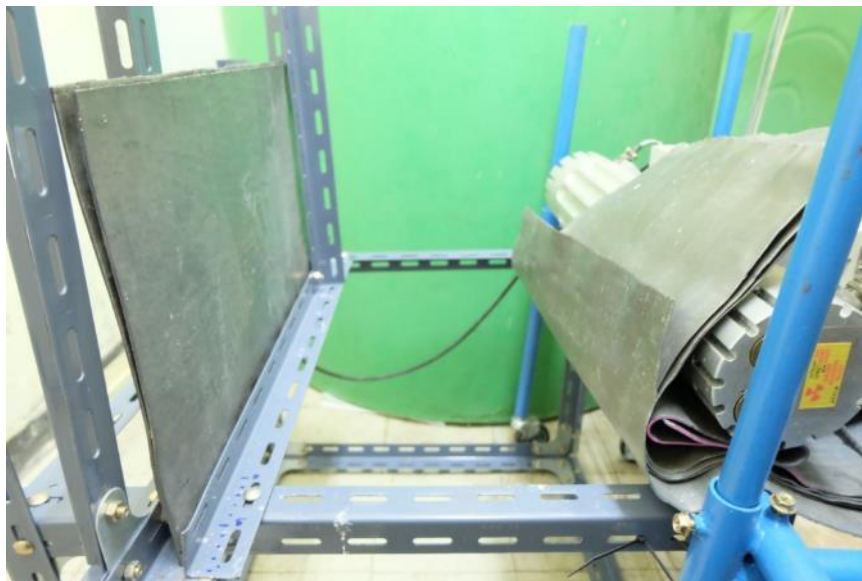
1) นำแผ่นตะกั่วความหนา 10 มิลลิเมตร กำบังรังสีเอกซ์โดยนำไปวางระหว่างเครื่องกำเนิดนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS และติดตั้งอุปกรณ์ในการถ่ายภาพดังรูป แผนภาพในรูปที่ 3-27 และ รูปที่ 3-28



รูปที่ 3-27 แผนภาพการจัดวางการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้านข้าง (side view)



รูปที่ 3-28 แผนภาพการจัดวางการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้านบน (top view)



รูปที่ 3-29 ภาพถ่ายในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

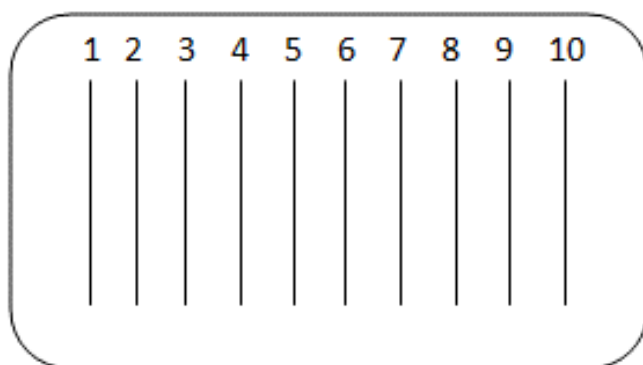
2) นำแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ประกบด้วยเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรทั่วทั้งแผ่น นำไปวาง ณ ตำแหน่งใดๆเพื่อทำการฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไข กระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที

3) หลังจากฉายด้วยรังสีนิวตรอนแล้ว ได้นำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านด้วยเครื่องอ่านค่าความดำรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM โดยใช้โปรแกรม Image reader FLA-5000 series และการอ่านค่าที่บันทึกได้นั้น จะใช้โปรแกรม Multiguage ซึ่งจะอ่านค่าความดำได้เป็นหน่วยของ PSL และนำมาพล็อตรูปเพื่อดูความเรียบของโปรไฟล์ทั้งแนวแกนตั้งและแกนนอน แสดงดังรูปที่ 3-30 และ รูปที่ 3-31

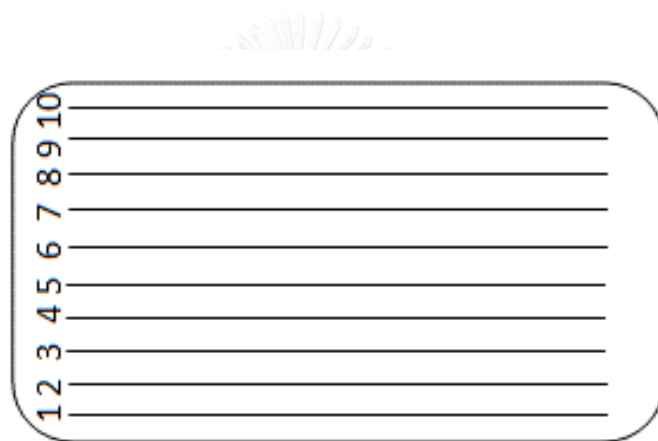
4) นำแผ่นบันทึกภาพที่อ่านค่าเสร็จแล้วไปฉายด้วยแสงของเครื่องลบภาพเพื่อจะได้นำแผ่นบันทึกภาพกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง

5) ทำตามข้อ 2-4 โดยเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับวางแผ่นเพื่อหาข้อมูลโปรไฟล์ที่เรียบที่สุด

6) ผลการทดลองแสดงในข้อที่ 4.4



รูปที่ 3-30 รูปแบบการอ่านค่า PSL บนแผ่นบันทึกภาพในแนวตั้ง



รูปที่ 3-31 รูปแบบการอ่านค่า PSL บนแผ่นบันทึกภาพในแนวนอน

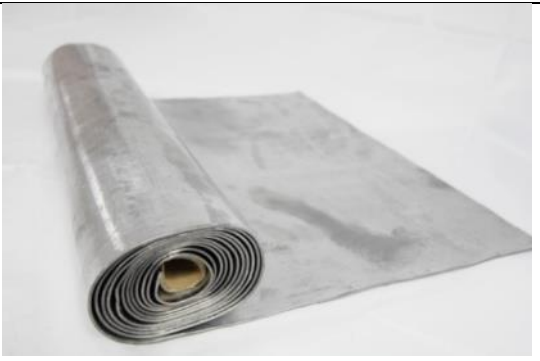

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยความหนาที่แตกต่างกันของเทปผ้า แผ่นอะคริลิก และแผ่นพีวีซี

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M รุ่น 389 มีองค์ประกอบคือ Rubber resin	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
2	แผ่นฟิวซีความหนา 0.10 มิลลิเมตร	
3	แผ่นอะคริลิก	
4	แผ่นบันทึกภาพ รุ่น BAS-MS ของบริษัท FUJIFILM	
5	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
6	แผ่นตะกั่วสำหรับกำบังรังสี	
7	เครื่องอ่านค่าความดำของแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM	
8	เครื่องลบภาพถ่ายบนแผ่นบันทึกภาพ	

3.3.2 วิธีการทดลอง





- 1) นำแผ่นตะกั่วซ้อนกันให้ได้ความหนา 10 มิลลิเมตร กำบังรังสีเอกซ์โดยนำไปวางระหว่างเครื่องกำเนิดนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ที่ตำแหน่งห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 cm สูงจากพื้น 70 cm
- 2) นำแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ประคบด้วยเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรทั่วทั้งแผ่น นำไปวาง ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อทำการฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไข กระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที
- 3) หลังจากฉายด้วยรังสีนิวตรอนแล้ว ได้นำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านด้วยเครื่องอ่านค่าความดำรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM บันทึกค่าที่อ่านได้ในหน่วยของ PSL
- 4) นำแผ่นบันทึกภาพที่อ่านค่าเสร็จแล้วไปฉายด้วยแสงของเครื่องลบภาพเพื่อจะได้นำแผ่นบันทึกภาพกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง
- 5) ทำตามข้อ 2-4 โดยค่อยๆเพิ่มความหนาของแผ่นเทปผ้า
- 6) เปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นพีวีซีและแผ่นอะคริลิกทำตามข้อ 2-5 โดยเปลี่ยนความหนาดังตารางที่ 3-8
- 7) ผลการทดลองแสดงในข้อ 4.5





ตารางที่ 3-8 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการวิจัย

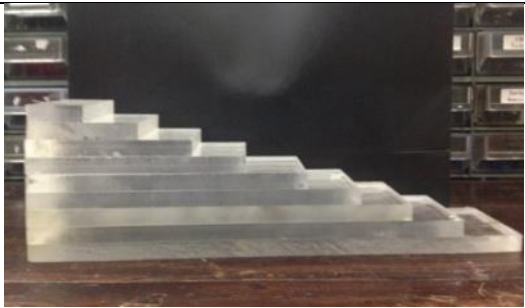
ชนิดฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ความหนา (เซนติเมตร)					
	เทปผ้า	0.27	0.81	1.35	1.89	2.35
แผ่นพีวีซี	0.5	1	1.5	2	2.5	3
แผ่นอะคริลิก	1	2	2.5	3	4	5

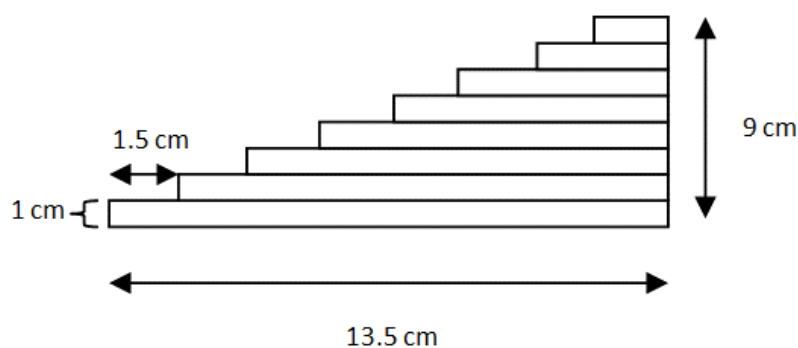
3.4 การถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้วัสดุตัวอย่างเพื่อหาความเปรียบต่าง (contrast) และความคมชัด (sharpness)

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
1	เทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ยี่ห้อ 3M	
2	แผ่นพีวีซีความหนา 1 มิลลิเมตร	
3	แผ่นอะคริลิก	
4	แผ่นบันทึกภาพ รุ่น BAS-MS ของบริษัท FUJIFILM	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
5	เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ให้นิวตรอนพลังงาน 2.4 MeV สำหรับปฏิกิริยา DD reaction และ 14.1 MeV สำหรับปฏิกิริยา DT reaction	
6	แผ่นตะกั่วสำหรับกำบังรังสี	
7	เครื่องอ่านค่าความดำของแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM	
8	เครื่องลบภาพถ่ายบนแผ่นบันทึกภาพ	

ลำดับที่	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	รูปวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
9	ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาเป็นขั้น ทำจากแผ่นอะคริลิก ตัวอย่างที่ 1 มีลักษณะเป็นขั้น ความหนาตั้งแต่ 1 - 9 เซนติเมตร	



รูปที่ 3-32 รายละเอียดความหนาของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว
(ขนาด 5 x 13.5 ซม.)

หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้ชิ้นงานมาตรฐานที่ในการหาคุณภาพของภาพถ่ายด้วย Beam purity indicator (BPI) หรือ Sensitivity indicator ได้ เนื่องจากทั้งสองชิ้นงานนั้นเหมาะกับการใช้ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอน ดังนั้นจึงได้จัดทำชิ้นงานตัวอย่างขึ้นมาใหม่เพื่อการศึกษาคุณภาพของภาพ โดยออกแบบให้เป็น step wedge ที่ทำมาจากอะคริลิกแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3-32

3.4.2 วิธีการทดลอง

- นำแผ่นตะกั่วซ้อนกันให้ได้ความหนา 10 มิลลิเมตร กำบังรังสีเอกซ์โดยนำไปวางระหว่างเครื่องกำเนิดนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ที่ตำแหน่งห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 cm สูงจากพื้น 70 cm

- 2) นำตัวอย่างในรูปที่ 32 วางไว้ด้านหน้าของของแผ่นบันทึกภาพ
- 3) นำแผ่นบันทึกภาพ BAS-MS ประคบด้วยเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรทั่วทั้งแผ่น ในทุกๆครั้งของการถ่ายภาพ ให้นำเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรติดที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้งเพื่อใช้ในการนอร์มัลไลซ์ นำแผ่นบันทึกภาพไปวาง ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อทำการฉายด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ที่เงื่อนไข กระแส (current) 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที
- 4) หลังจากฉายด้วยรังสีนิวตรอนแล้ว ได้นำแผ่นบันทึกภาพมาอ่านด้วยเครื่องอ่านค่าความดำรุ่น FLA-5100 ของบริษัท FUJIFILM บันทึกค่าที่อ่านได้ในหน่วยของ PSL
- 5) นำแผ่นบันทึกภาพที่อ่านค่าเสร็จแล้วไปฉายด้วยแสงของเครื่องลบภาพเพื่อจะได้นำแผ่นบันทึกภาพกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง
- 6) ทำตามข้อ 2-4 โดยค่อยๆเพิ่มความหนาของแผ่นเทปผ้า
- 7) เปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นพีวีซีและแผ่นอะคริลิกทำตามข้อ 2-5 โดยเปลี่ยนความหนาดังตารางที่ 3-9
- 8) ผลการทดลองแสดงในข้อ 4.6

ตารางที่ 3-9 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ความหนา (เซนติเมตร)					
	เทปผ้า	0.27	0.81	1.35	1.89	2.35
แผ่นพีวีซี	0.5	1	1.5	2	2.5	3
แผ่นอะคริลิก	1	2	2.5	3	4	5

บทที่ 4

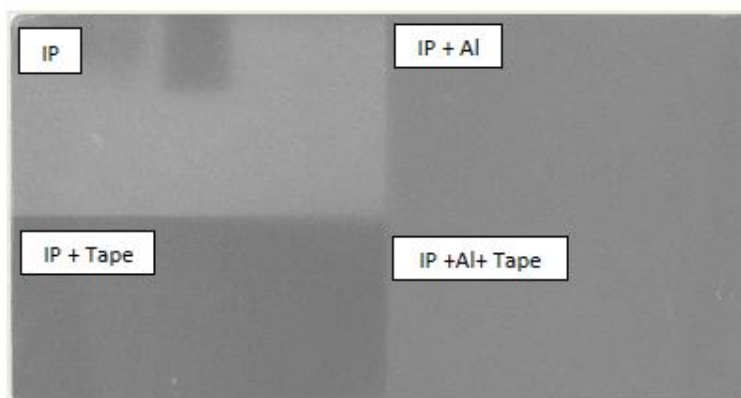
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทที่ 4 เป็นการอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 โดยหัวข้อ ดังนี้

- 1) ทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เป็นเทปผ้า
- 2) การพิสูจน์อนุภาคที่ประจุที่เกิดขึ้นว่าเป็นโปรตอน โดยใช้แผ่น CR-39 ร่วมกับเทปผ้า แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิก
- 3) การทดสอบผลของโปรตอนรีคอยล์ที่มาจากอันตรกิริยากับนิวตรอนเร็วจากแผ่นบันทึกภาพ
- 4) การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพนิวตรอน
- 5) การสรุปเกี่ยวกับความดำที่เกิดขึ้นบนแผ่นบันทึกภาพฟรังส์เอกซ์ ที่เกิดขึ้นจากการใช้เทปผ้า แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิก เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนเมื่อใช้ความหนาเพิ่มขึ้น
- 6) การสรุปเกี่ยวกับการหาความคมชัดและความแปรียบต่างโดยใช้วัสดุที่ทำจากอะคริลิกเป็นตัวอย่างในการทดสอบ

4.1 ทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เป็นเทปผ้า

จากทำการทดสอบการเกิดอนุภาคที่ประจุเป็นส่วนๆ โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมมากำบังการเกิดประจุที่เกิดขึ้นจากแผ่นเทปผ้า สามารถสรุปผลได้ดังนี้



รูปที่ 4-33 ภาพที่ได้จากการอ่านด้วยเครื่องอ่านความดำแผ่นบันทึกภาพเพื่อทดสอบการเกิดอนุภาคที่มีประจุจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน

*เทปความหนา 0.27 มิลลิเมตร, แผ่นอะลูมิเนียม 2 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4-33 พบว่า ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อพิสูจน์อนุภาคที่มีประจุโดยใช้เทปผ้าเป็นตัวทดสอบ พบว่า สามารถแยกความดำออกเป็น 4 ส่วนได้ดังนี้

- 1) ส่วน IP หรือส่วนที่เกิดความดำขึ้นจากรังสีนิวตรอนโดยไม่มีฉากเปลี่ยนนิวตรอน
- 2) ส่วน IP + Al คือ ส่วนที่เกิดความดำขึ้นจากการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน
- 3) ส่วน IP + Tape คือส่วนที่เกิดความดำขึ้นจากการใช้เทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน
- 4) ส่วน IP + Al + Tape คือส่วนที่เกิดความดำขึ้นจากการใช้เทปผ้าและแผ่นอะลูมิเนียมเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยที่แผ่นอะลูมิเนียมถูกวางอยู่ระหว่างเทปผ้าและแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์

ตารางที่ 4-10 ผลจากอนุภาคที่มีประจุซึ่งมีผลต่อความดำ

ค่า PSL/mm ² บนแผ่นบันทึกภาพ			
IP	ส่วน IP + Al	IP + Tape	IP + Al + Tape
31.34	87.43	146.66	84.32

จากข้อมูลในตารางที่ 4-10 พบว่า ความดำที่สูงที่สุดคือความดำที่เกิดขึ้นโดยมีการใช้เทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าน่าจะเป็นอนุภาคที่มีประจุซึ่งหลุดออกมาจากเทปผ้าจึงทำให้เกิดความดำขึ้น เนื่องจากเทปผ้าชิ้นนั้นมีส่วนประกอบเป็นยางธรรมชาติซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนสูง นิวตรอนพลังงานสูงสามารถทำให้เกิดการหลุดของโปรตอน (recoiled proton) ขึ้นได้

ในการวิจัยส่วนนี้ได้นำแผ่นอะลูมิเนียมมาใช้ ซึ่งเป็นสิ่งที่สามารถทดสอบอนุภาคที่มีประจุได้วิธีหนึ่งโดยอาศัยเรื่องเกี่ยวกับอำนาจการทะลุทะลวงของนิวตรอน เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมนั้นสามารถกั้นอนุภาคที่มีประจุแอลฟาและบีตาได้ แต่ไม่สามารถกั้นรังสีเอกซ์ แกมมาและนิวตรอนได้ ดังนั้นเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมไปกั้นขวางระหว่างเทปผ้าและแผ่นบันทึกภาพ จะพบว่า อนุภาคที่ออกมาจากเทปผ้าชิ้นนั้นไม่สามารถปรากฏความดำขึ้นบนแผ่นบันทึกภาพได้เลย ความดำที่เกิดขึ้นจากแผ่นอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวนั้น หากดูจากรูปที่ 4-33 และค่า PSL แล้วจะพบว่ามีความใกล้เคียงกันทั้ง 2 ส่วนที่มีแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ และยังพบอีกว่ามีความดำสูงขึ้นหากเทียบกับส่วนที่มีเพียงแค่แผ่นบันทึกภาพ แสดงว่าแผ่นอะลูมิเนียมสามารถทำให้เกิดประจุ ทำให้เกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพได้เช่นเดียวกัน ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่อะลูมิเนียมสามารถถูก activate เป็นสารกัมมันตรังสีและให้อิเล็กตรอนออกมานั่นเอง

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากเทปผ้าชิ้นนี้อาจจะเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไม่ อาจจะเป็นผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะทำการพิสูจน์โดยดูจากการกัตรอยอนุภาคโดยใช้แผ่น CR-39 ซึ่งหากเป็นอนุภาคที่มีประจุจริงหรือเป็นโปรตอนรีคอยล์อย่างทีคาดเดาไว้ จะสามารถ

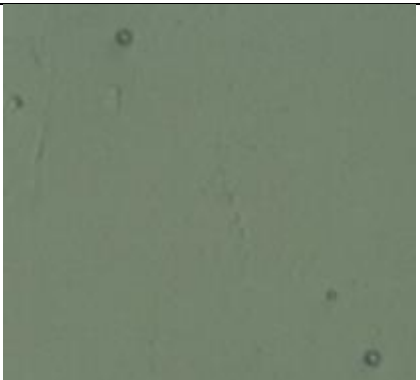
เห็นรอยอนุภาคโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ แต่หากเป็นผลจากการเกิดจากรังสีเอกซ์ที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นจะไม่สามารถเห็นรอยอนุภาคบนแผ่น CR-39 ได้

4.2 ทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์โดยใช้แผ่น CR-39 ร่วมกับเทปผ้า, แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิก

วิธีพิสูจน์โดยใช้แผ่น CR-39 ใช้ในการกัตรอยอนุภาคอาศัยการเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนเร็วทำได้โดยใช้เทปผ้า , แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิกติดทับบนแผ่น CR-39 ขนาด 10 x 10 มิลลิเมตร ก่อนนำไปฉายนิวตรอนเร็วที่ระยะห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำแผ่น CR-39 ที่ผ่านการฉายด้วยลำนิวตรอนเร็วแล้วมาอ่านผลด้วยกล้องจุลทรรศน์สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4-11 ดังนี้

ตารางที่ 4-11 ปริมาณและรูปรอยการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์

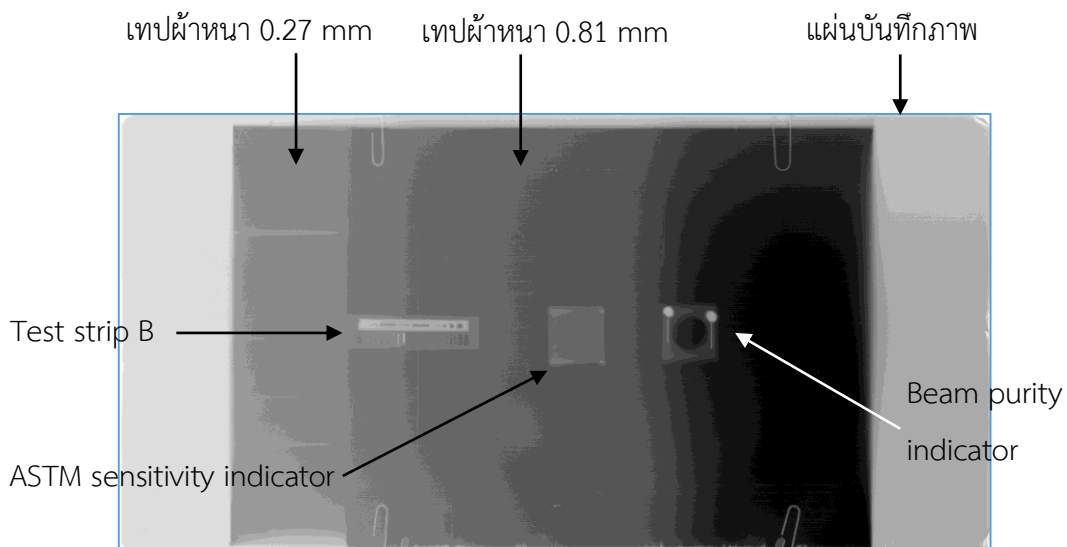
ชนิดฉากเปลี่ยน	ปริมาณอนุภาค (จำนวนอนุภาค/mm ²)	ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์
เทปผ้า (หนา 0.27 mm)	1.1328×10^5	
แผ่นพีวีซี (หนา 0.1 mm)	5.5692×10^4	

ชนิดฉากเปลี่ยน	ปริมาณอนุภาค (จำนวนอนุภาค/mm ²)	ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์
อะคริลิก (หนา 1.0 mm)	6.0412×10^4	

เมื่อนำภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์ไปอ่านปริมาณอนุภาคด้วยโปรแกรม Image J จะพบว่า อนุภาคที่เกิดขึ้นจากวัสดุทั้งสามชนิดซึ่งได้แก่ เทปผ้า, แผ่นพีวีซี และแผ่นอะคริลิกนั้นเป็นอนุภาคของโปรตอนจริงโดยดูจากลักษณะของอนุภาคที่เกิดขึ้น [3] จึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคที่หลุดออกมาจากการทำอันตรกิริยาด้วยนิวตรอนเร็วจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนคือโปรตอน และจากข้อมูลในตารางยังพบว่า เทปผ้า นั้นให้ปริมาณของโปรตอนมากที่สุด คือ 1.1328×10^5 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร ลำดับต่อมา คือ แผ่นอะคริลิก ปริมาณอนุภาค คือ 6.0412×10^4 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร และน้อยที่สุด คือ แผ่นพีวีซี ปริมาณอนุภาคคือ 5.5692×10^4 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร

4.3 ผลการทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ที่มีผลมาจากอันตรกิริยานิวตรอนเร็วจากแผ่นบันทึกภาพ

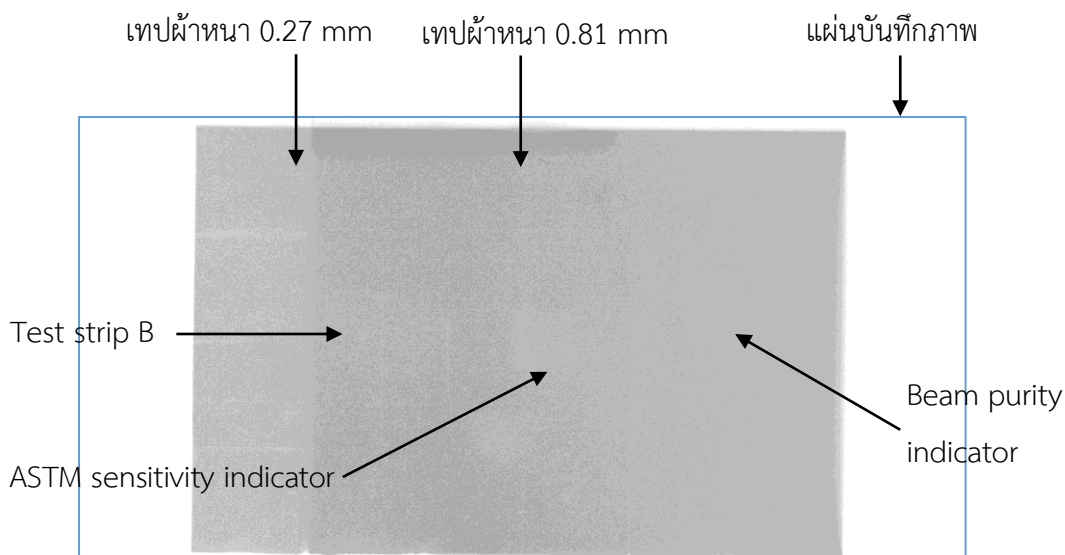
จากการทดสอบการเกิดโปรตอนรีคอยล์ว่าเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาจากนิวตรอนเร็ว นั้นยืนยันโดยนำตัวอย่างที่ใช้สำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนพลังงานต่ำอย่าง Beam Purity indicator , ASTM sensitivity indicator และ test strip b มาใช้ ผลการทดลองแสดงในภาพรูปที่ 4-34



รูปที่ 4-34 ภาพที่เกิดจากการถ่ายภาพโดยไม่ใช่แผ่นตะกั่วกำบังรังสีเอกซ์

จะเห็นว่าภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลจากรังสีเอกซ์และรังสีนิวตรอนที่ทำอันตรกิริยากับวัสดุตัวอย่างมาตรฐานทั้ง 3 ชนิด ส่วนที่อยู่ริมขอบของภาพเกิดขึ้นจากผลของรังสีกับแผ่นบันทึกภาพโดยไม่มีเทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนทำให้ไม่มีผลจากการเกิดโปรตอนรีคอยล์ ส่วนที่เกิดความดำขึ้นคือตำแหน่งที่มีการติดทับของเทปผ้าบนแผ่นบันทึกภาพ จากรูปที่ 4-34 ยังสังเกตเห็นอีกว่าลักษณะลำนิวตรอนและรังสีเอกซ์ที่ออกมามีทำมุมเอียงไปทางขวา โดยที่เมื่อวางตำแหน่งถ่ายภาพตรงกลางของเครื่องกำเนิดนิวตรอนแล้ว กลับให้ความดำสูงมากในช่วงริมขอบขวาของเทปผ้าหนา 0.81 มิลลิเมตร

จากนั้น ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยนำแผ่นตะกั่วที่ใช้กำบังรังสีเอกซ์กำบังที่เครื่องกำเนิดนิวตรอน โดยที่ตำแหน่งของการวางชิ้นงานมาตรฐานในการถ่ายยังคงเหมือนในภาพที่ 4-34 ได้ภาพดังรูปที่ 4-35

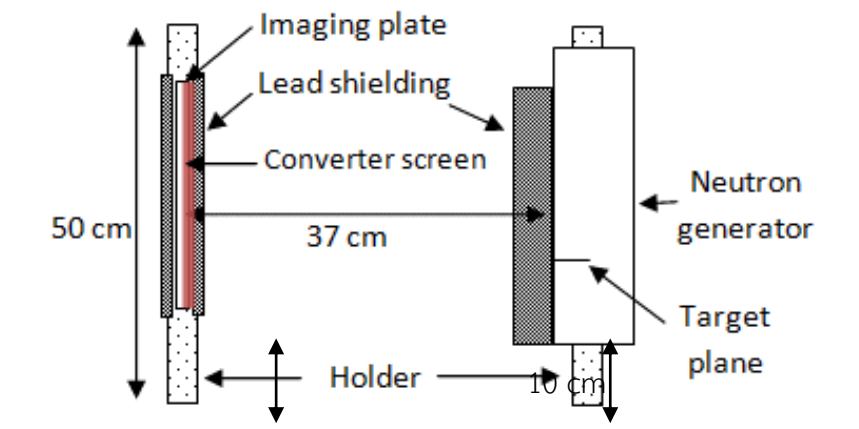


รูปที่ 4-35 ภาพที่เกิดจากการถ่ายภาพโดยใช้แผ่นตะกั่วกำบังรังสีเอกซ์

จากภาพที่ 4-35 จะเห็นว่าภาพที่เกิดขึ้นเมื่อกำบังรังสีเอกซ์ออกด้วยแผ่นตะกั่วแล้วนั้น จะมีเพียงรังสีนิวตรอนเท่านั้นที่เข้าทำอันตรกิริยากับแผ่นบันทึกภาพ โดยส่วนสีเทาที่เกิดขึ้นในรูปเป็นส่วนที่ใช้แผ่นเทปผ้าทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน แสดงว่าเทปผ้าที่ใช้นั้นเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนทำให้เกิดโปรตรอนรีคอยล์จริง และจากภาพยังสามารถบอกได้ว่าผลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลที่เกิดจากนิวตรอนเร็ว เพราะบนภาพไม่สามารถเห็นภาพของวัสดุมาตรฐานที่ใช้สำหรับตรวจสอบภาพของนิวตรอนพลังงานต่ำได้ แสดงว่านิวตรอนพลังงานต่ำไม่ทำอันตรกิริยากับเทปผ้า ถ้ามีผลจากนิวตรอนพลังงานต่ำที่ควร จะเห็นภาพวัสดุบนแผ่นบันทึกภาพด้วย จึงสรุปได้ว่าผลที่เกิดขึ้นจากเทปผ้าที่ใช้นั้นเป็นผลที่มาจากนิวตรอนเร็ว

4.4 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพนิวตรอน

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทุกครั้งจำเป็นต้องกำหนดลักษณะการจัดวางชิ้นงานให้เหมือนกันเพื่อควบคุมปริมาณนิวตรอนโดยอาศัยการดูค่าความดำที่อ่านได้เป็นหลักซึ่งก็คือค่า PSL โดยในแต่ละตำแหน่งจะให้ค่า PSL ต่างกันและมีความเรียบของข้อมูลโปรไฟล์หรือลักษณะโปรไฟล์ไม่เหมือนกัน แผ่นบันทึกภาพ ตะกั่วที่ติดกับแผ่นบันทึกภาพ และฉากเปลี่ยนนิวตรอน ที่จะถูกวางห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนให้คงที่ที่ 37 เซนติเมตร(เนื่องจากในห้องที่วางเครื่องกำเนิดนิวตรอนมีพื้นที่ค่อนข้างจำกัด) จากผลการทดลองโดยเลื่อนไปทางซ้ายและขวา และทำการเก็บข้อมูลนำมาพล็อตเป็นโปรไฟล์



รูปที่ 4-36 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ

จากการอ่านค่าโปรไฟล์ด้วยโปรแกรมของเครื่องสแกนจากบริษัทฟูจิฟิล์ม เมื่อค่าข้อมูลโปรไฟล์ตามหัวข้อที่ 3.2 ระยะเริ่มต้นถ่ายภาพทำโดยการวางแผ่นบันทึกภาพห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 เซนติเมตร , ห่างจากตำแหน่ง target plane ระยะ 10 เซนติเมตร และ สูงจากพื้น 70 เซนติเมตร ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 การลักษณะข้อมูลโปรไฟล์เพียงบางเส้นที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วทั้งแนวตั้งและแนวนอนบนแผ่นบันทึกภาพ โดยทำการเลื่อนระยะจากปลายขอบเครื่องกำเนิดนิวตรอนในแนวแกนตั้ง 10 เส้น และแนวแกนนอน 10 เส้น

- ค่า PSL บนเส้นที่ 2
- ค่า PSL บนเส้นที่ 4
- ค่า PSL บนเส้นที่ 6
- ค่า PSL บนเส้นที่ 8

ลำดับ	ระยะห่าง (cm)	ลักษณะของโปรไฟล์แกนนอน	ลักษณะของโปรไฟล์แกนตั้ง
1	10		
2	11		
3	12		
4	13		

ลำดับ	ระยะห่าง (cm)	ลักษณะของโปรไฟล์แกนนอน	ลักษณะของโปรไฟล์แกนตั้ง
5	14		
6	15		
7	17		
8	20		

จากตารางที่ 4-12 จะเห็นได้ว่า ระยะการอ่านค่า PSL ไม่มีผลต่างกันมากนักในแนวแกนตั้ง (ลากเส้นจากบนลงล่าง) ซึ่งหมายความว่า ค่าความต่ำจะมีค่าใกล้เคียงกัน ให้ความเรียบของโปรไฟล์มากกว่าหากเทียบกับการอ่านค่า PSL ในแกนแนวนอน (ลากเส้นจากซ้ายไปขวา) ซึ่งในแนวแกนนอน

นั้น ส่วนที่ให้ค่า PSL ใกล้เคียงกันและลักษณะโปรไฟล์เรียบที่สุด คือ วางแผ่นบันทึกภาพในตำแหน่งที่ห่างจากขอบเครื่องกำเนิดนิวตรอน 11 - 13 เซนติเมตร

ดังนั้นระยะที่เหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในงานวิจัยเพื่อการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพ คือ การวางแผ่นบันทึกภาพห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน 37 เซนติเมตร , ห่างจากตำแหน่ง target plane ระยะ 11 เซนติเมตร และ สูงจากพื้น 70 เซนติเมตร ตลอดทั้งการวิจัย จะไม่มีการเคลื่อนย้ายเครื่องและตำแหน่งการถ่ายภาพ

4.5 ทดสอบการถ่ายภาพโดยใช้เทปผ้า, แผ่นพีวีซี, และแผ่นอะคริลิก เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยอาศัยการอ่านผลด้วยค่า PSL/mm²

เมื่อพิสูจน์ได้ว่าเกิดอนุภาคที่มีประจุจากวัสดุที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนคืออนุภาคโปรตอนจริง ในส่วนของการวิจัยนี้จึงได้นำวัสดุ 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ 1) แผ่นพีวีซี 2) เทปผ้า และ 3) แผ่นอะคริลิก มาประยุกต์ใช้ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยการหาความหนาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ โดยค่อยๆเพิ่มความหนาของวัสดุแต่ละชนิด หลังจากนั้นนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว จะนำมาหาค่าความดำต่อตารางมิลลิเมตร (PSL/mm²) และนำผลมาเปรียบเทียบกัน สามารถอธิบายเป็นหัวข้อได้ดังนี้

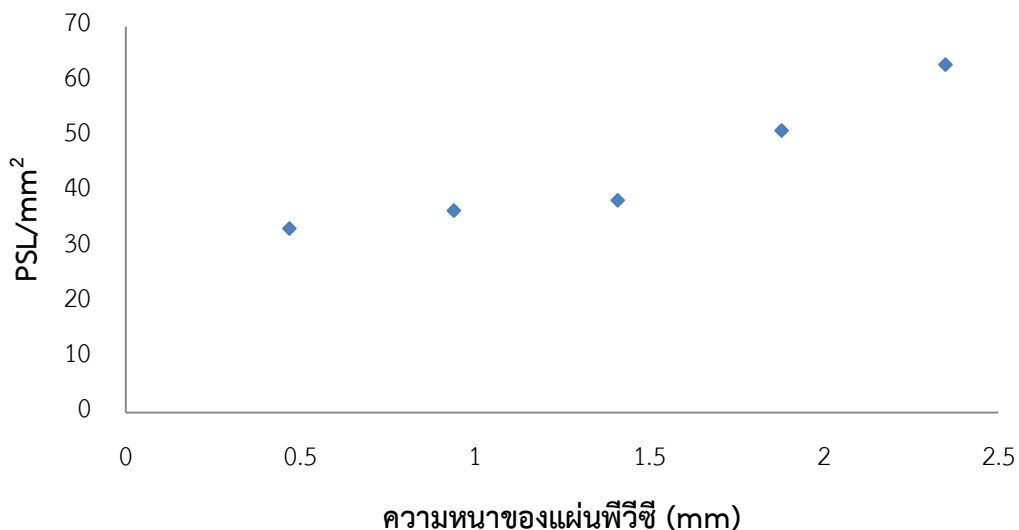
4.5.1 ผลจากการใช้แผ่นพีวีซีเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำจากแผ่นพีวีซีนั้นทำได้โดยการประกบทีละชั้นซ้อนกัน เพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยแผ่นพีวีซีหนึ่งชั้นมีความหนา 0.1 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดที่ความหนาต่างกัน 6 ระดับ สามารถให้ค่าความดำของแต่ละความหนา ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อความดำ

ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (mm)	ค่าความดำ (PSL/mm ²)
0.5	33.49
1.0	36.66
1.5	38.54
2.0	51.13
2.5	63.17

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 13 ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm² ดังรูปที่ 4-37



รูปที่ 4-37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm²

จากกราฟรูปที่ 4-37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm² พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพีวีซีมากขึ้น ค่าความดำที่ได้นั้นก็สูงขึ้นตามความหนาของแผ่นพีวีซีที่ใช้ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน และมีแนวโน้มที่ยังมีค่าสูงได้เรื่อยๆหากมีการเพิ่มความหนา

4.5.2 ผลจากการใช้เทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

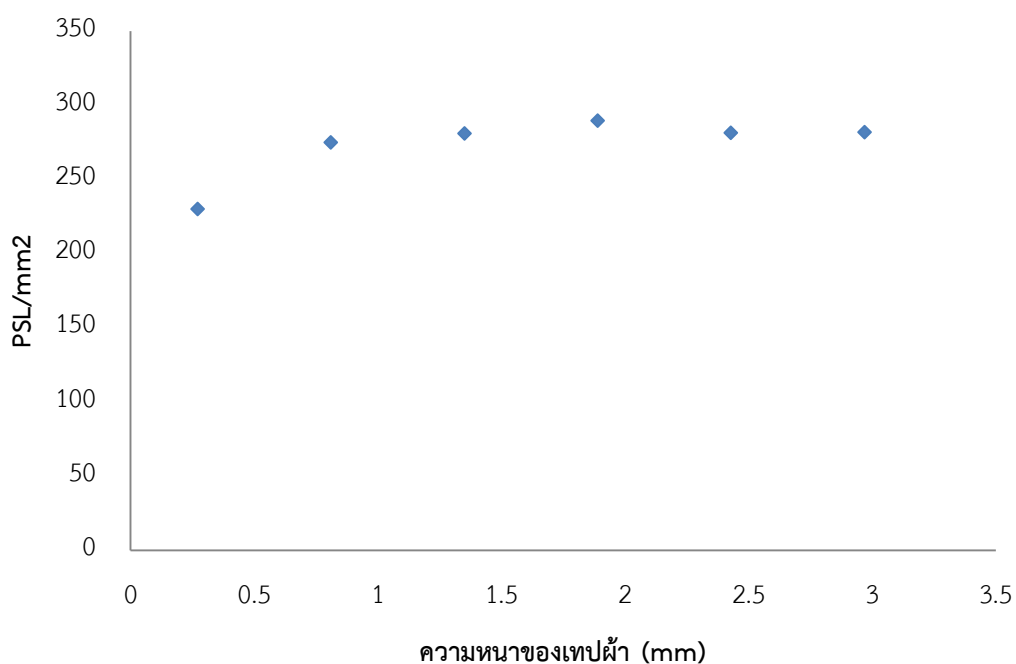
ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำจากเทปผ้านั้นทำโดยการติดซ้อนทับทีละชั้นเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยเทปผ้าหนึ่งชั้นมีความหนา 0.27 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดทั้งหมด 6 ความหนาต่างกัน 6 ระดับสามารถให้ค่าความดำของแต่ละความหนาดังผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เทปผ้า) ที่มีผลต่อความดำ

ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (mm)	ค่าความดำ (PSL/mm ²)
0.27	229.92
0.81	274.88
1.35	280.74

ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (mm)	ค่าความดำ (PSL/mm ²)
1.89	289.51
2.43	281.51
2.97	281.71

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4-14 ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm² จะได้ผลดังรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm²

จากกราฟรูปที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm² พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของเทปผ้ามากขึ้น ค่าความดำที่ได้นั้นก็สูงขึ้นตามความหนาของเทปผ้าที่ใช้เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน และมีแนวโน้มที่ค่าความดำจะคงที่เมื่อความหนามากกว่า 2 มิลลิเมตรขึ้นไป

4.5.3 ผลจากการใช้แผ่นอะคริลิกเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

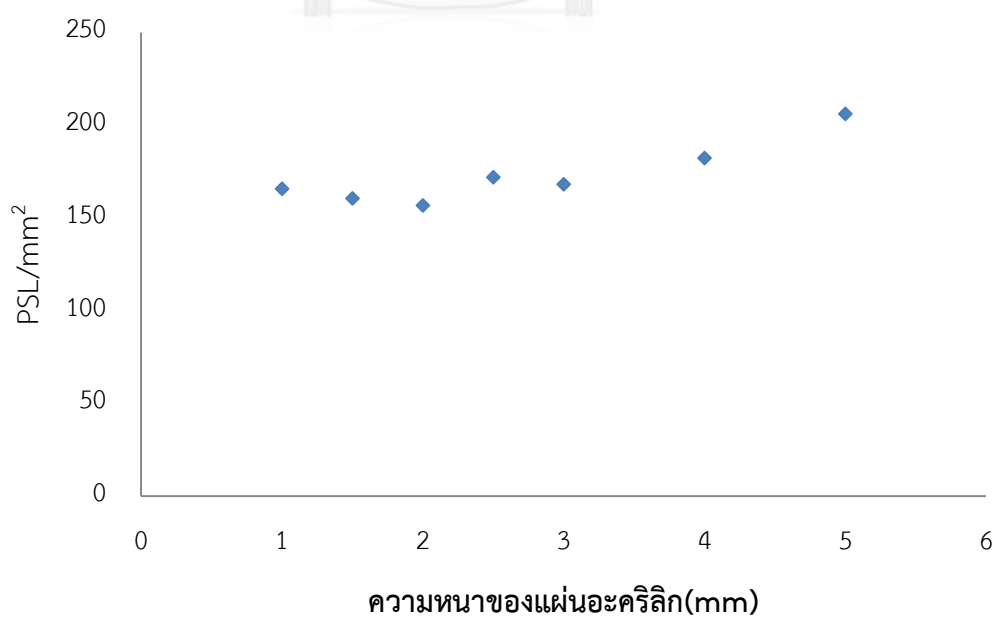
การเปลี่ยนความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนจากแผ่นอะคริลิกทำได้โดยการติดซ้อนทับทีละชั้นเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยแผ่นอะคริลิกหนึ่งชั้นมีความหนา 1 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ได้

ทำการวัดความหนาต่างกัน 7 ระดับ สามารถให้ค่าความดำของแต่ละความหนาได้ดังผลการทดลองในตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นอะคริลิก) ที่มีผลต่อความดำ

ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (mm)	ค่าความดำ (PSL/mm ²)
1	165.77
1.5	160.67
2	156.84
2.5	162.12
3	168.2
4	182.49
5	206.39

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4-15 ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิกและค่า PSL/mm² ดังรูปที่ 4-39

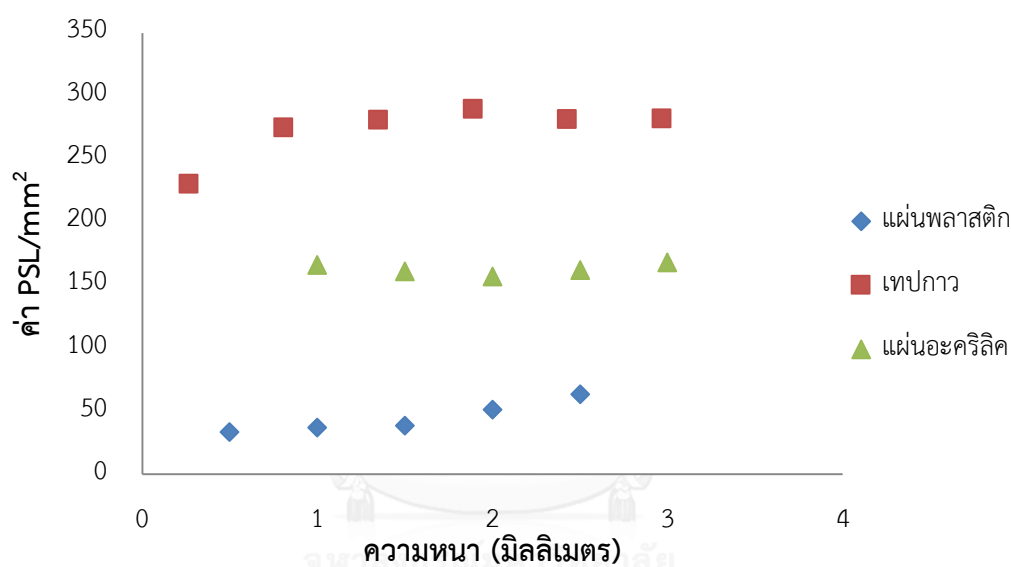


รูปที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิกและค่า PSL/mm²

จากรูปที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิกและค่า PSL/mm² พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นอะคริลิกมากขึ้นจะมีช่วงที่ความดำของภาพถ่าย จะไม่เพิ่มขึ้นในช่วงความหนา 1 – 2.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าความดำที่ได้นั้นก็สูงขึ้นตามความหนาของแผ่นอะคริลิกที่ใช้เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน และอาจจะสูงเพิ่มขึ้นได้อีกหากมีการเพิ่มความหนา

4.5.4 ผลการเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิดที่ใช้ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

เมื่อนำค่า PSL ของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน จะได้ผลการเปรียบเทียบความดำของภาพดังรูปที่ 4-40



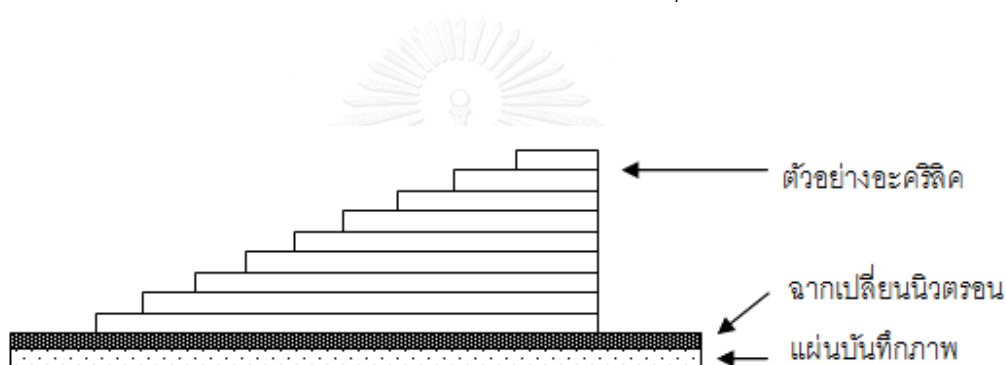
รูปที่ 4-40 การเปรียบเทียบค่า ความหนาที่มีผลต่อค่า PSL/mm² ของวัสดุ 3 ชนิด

รูปที่ 4-40 แสดงความหนาที่มีผลต่อค่าความดำของวัสดุ 3 ชนิด จะเห็นว่า เทปกาวให้ความดำสูงที่สุด รองลงมา คือ แผ่นอะคริลิก และแผ่นพีวีซี คือ ลำดับสุดท้าย ซึ่งหากเปรียบเทียบก็เป็นไปตามผลที่ได้จากการอ่านค่าอนุภาคบนแผ่น CR-39 จะเห็นว่าผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน คือ เทปกาวจะให้ความดำสูงที่สุดและให้จำนวนอนุภาคโปรตอนสูงสุด

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันทั้งหมดพบว่า หากเพิ่มความหนาของวัสดุที่นำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน ความดำหรือค่า PSL/mm² นั้นก็จะให้ค่าสูงขึ้นตาม โดยทั้งสามวัสดุมีผลค่าความดำเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน และพบว่าเทปกาว คือ วัสดุที่ให้ค่าความดำสูงที่สุดเมื่อเทียบปริมาณความหนาที่ใกล้เคียงกันกับอีกสองตัวอย่าง

4.6 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่นพีวีซี, เทปผ้า, และแผ่นอะคริลิก เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนโดยใช้ผลค่า PSL/mm² เมื่อนำมาถ่ายด้วยตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1 – 9 เซนติเมตร

เมื่อทดลองการหาความหนาที่มีผลต่อปริมาณความดำแล้ว ในหัวข้อนี้จึงได้ทำตัวอย่างขึ้นมา โดยขึ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทำขึ้นมาจากแผ่นอะคริลิกความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 9 เซนติเมตร มีลักษณะเป็น step-wedge เหตุผลที่ใช้ตัวอย่างเป็นแผ่นอะคริลิกเนื่องมาจากต้องการอาศัยจำนวนโปรตอนที่อยู่ในตัวอย่างนั้นในหลอดทอนพลังงานของนิวตรอนและทำให้เกิดความดำที่แตกต่างไปตามความหนาที่ไม่เท่ากัน จากนั้นทำการศึกษาผลของความหนาฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีผลต่อความหนาตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย โดยแบ่งการวิจัยทั้งหมดเป็นหัวข้อต่างๆตามชนิดของวัสดุดังนี้



รูปที่ 4-41 การวางชิ้นงานตัวอย่างในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

4.6.1 ผลความเปลี่ยนแปลงค่า PSL เมื่อใช้แผ่นพีวีซี, เทปผ้า, และแผ่นอะคริลิก มาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน

- ผลจากการใช้แผ่นพีวีซีเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ตารางที่ 4-16 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm²

ความ หนา พีวีซี	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ซม.)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.5	54.87	55.27	57.6	58.78	56.79	55.13	54.53	53.97	54.78
1	55.18	57.31	57.82	57.47	57.08	56.75	55.67	53.17	51.35
1.5	91.73	80.5	82.79	83.71	85.1	85.22	84.37	83.92	86.03
2	82.06	82.81	84.24	84.06	83.55	83.51	81.92	80.02	77.21
2.5	81.53	78.69	76.81	73.86	71.82	68.47	67.17	63.17	55.59

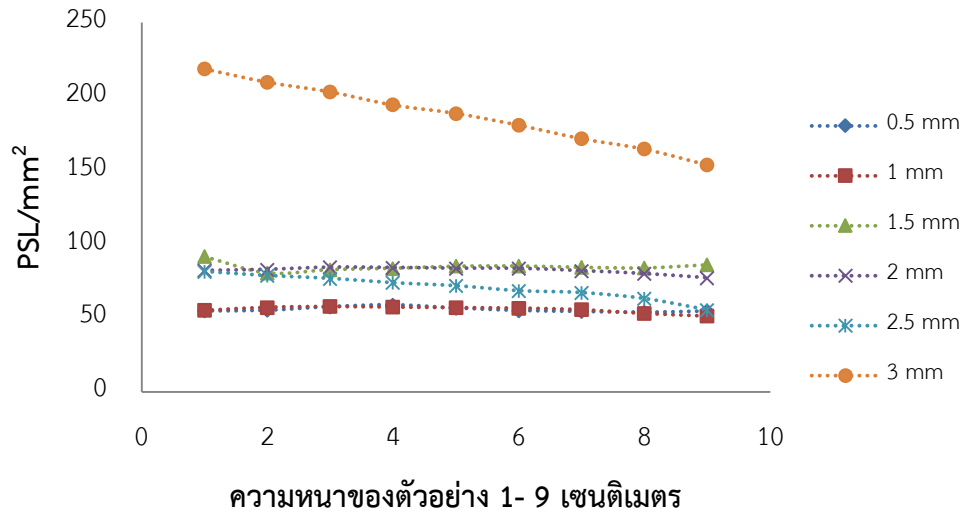
ความ หนา พีวีซี	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ชม.)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	218.6	209.6	203.0	194.2	188.5	180.5	171.4	164.3	153.6

ตารางที่ 4-17 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (แผ่นพีวีซี) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร

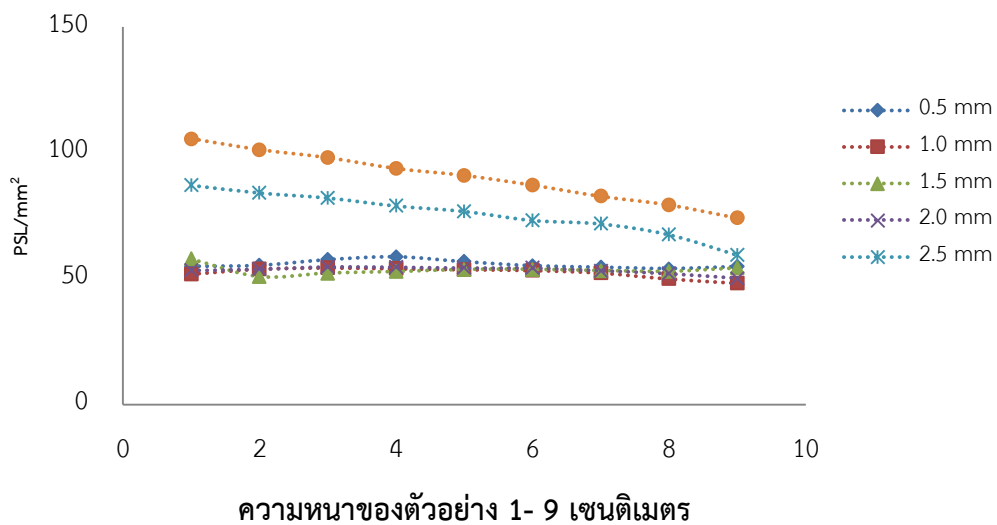
ความ หนา พีวีซี	เทป ผ้า 0.27 มม	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ชม.)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	56.88	54.87	55.27	57.60	58.78	56.79	55.13	54.53	53.97	54.78
2	60.54	51.84	53.85	54.32	54.00	53.63	53.32	52.30	49.96	48.25
2.5	90.22	57.83	50.75	52.20	52.78	53.65	53.73	53.19	52.91	54.24
3	87.57	53.30	53.79	54.72	54.60	54.27	54.24	53.21	51.98	50.15
4	53.19	87.19	84.15	82.14	78.98	76.80	73.22	71.83	67.55	59.45
5	117.8	105.57	101.24	98.06	93.79	91.03	87.19	82.78	79.36	74.20

*ค่า PSL/mm² ของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร ที่นำมาเทียบคือ 56.88

เมื่อนำค่าในตารางที่ 4-16 และตารางที่ 4-17 ไปพล็อตกราฟจะได้ความสัมพันธ์ของความหนาและความดำของแผ่นพีวีซีเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4-42 และรูปที่ 4-43 ดังนี้



รูปที่ 4-42 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร





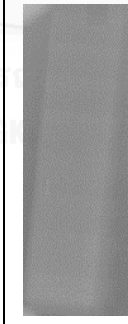
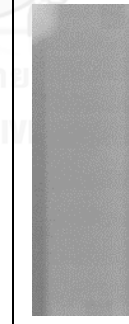
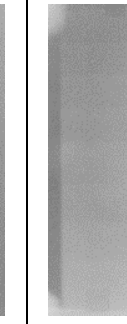
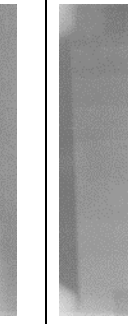
รูปที่ 4-43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพีวีซีและค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4-42 คือค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ ค่าที่ได้ออกมานั้นเป็นข้อมูลดิบ ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องที่อ่านค่าออกมาโดยอัตโนมัติ ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแต่ละครั้งจึง

ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง จึงต้องนำมาทำการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความดำของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรที่ถูกติดเอาไว้ในตำแหน่งอ้างอิงเดิมทุกครั้งในการถ่ายภาพ และจะได้ผลแสดงออกมาดังรูปที่ 4-43

จากรูปที่ 4-43 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของฉากรเปลี่ยนนิวตรอน ความหนาที่ 2.5 และ 3 มิลลิเมตรมีค่าความดำที่สูงขึ้นหากเทียบกับความหนาของฉากรเปลี่ยนนิวตรอนที่ความหนาน้อยกว่า และจากการใช้ตัวอย่างในการถ่ายภาพพบว่า หากความหนาของตัวอย่างมากขึ้น ค่าความดำจะลดลง เนื่องจากในตัวอย่งนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนสูง ทำให้เกิดการหน่วงพลังงานของนิวตรอน ปรากฏความดำของภาพน้อยลงนั่นเอง ซึ่งภาพจริงที่ได้จากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพจะแสดงไว้ในตารางที่ 18

ตารางที่ 4-18 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้แผ่นพีวีซีเป็นฉากรเปลี่ยนนิวตรอน

ฉากรเปลี่ยนนิวตรอน	ความหนาฉากรเปลี่ยนนิวตรอน (เซนติเมตร)					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
แผ่นพีวีซี						

- ผลจากการใช้เทปผ้าเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ตารางที่ 4-19 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เทปผ้า) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm²

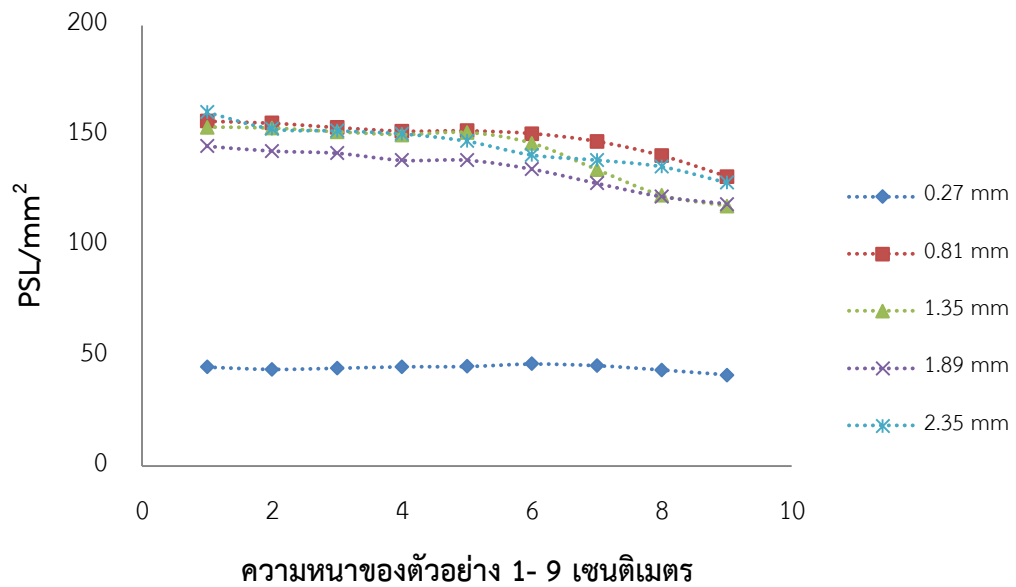
ความ หนา เทป ผ้า	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ซม.)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.27	45.1	44.05	44.58	45.24	45.39	46.54	45.79	43.78	41.52
0.81	156.71	155.81	153.84	152.19	152.33	151.09	147.51	140.99	131.51
1.35	153.95	153.49	151.79	150.52	151.5	146.63	134.67	122.98	118.21
1.89	145.43	143.21	142.22	138.98	139.01	134.93	128.45	122.34	119.09
2.35	160.78	153.23	152.34	150.97	147.63	141.33	139.04	136.02	128.77

ตารางที่ 4-20 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน(เทปผ้า) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์
ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร

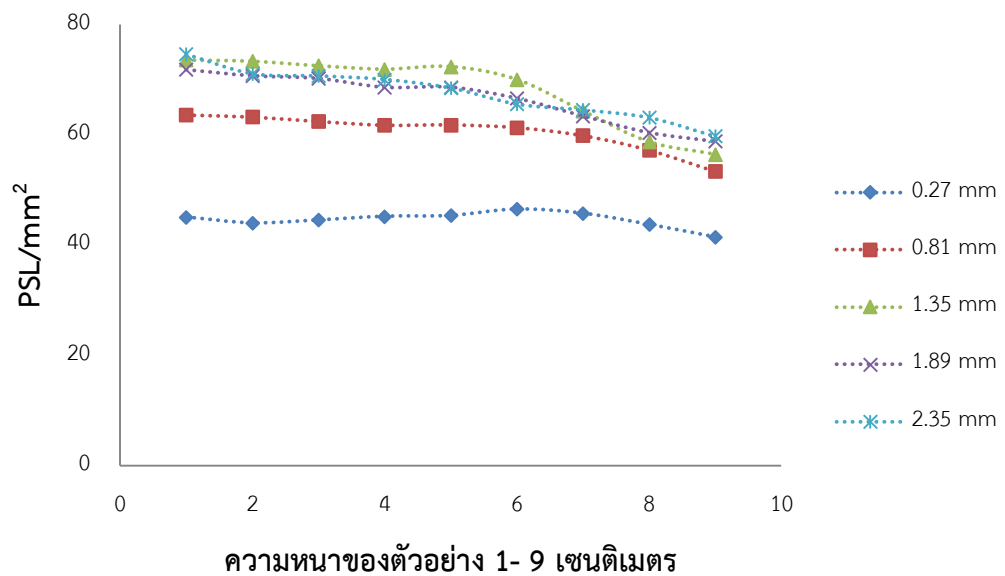
ความ หนา เทป ผ้า	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ซม.)									
	เทปผ้า 0.27 มม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.27	54.46	45.10	44.05	44.58	45.24	45.39	46.54	45.79	43.78	41.5
0.81	134.12	63.63	63.27	62.47	61.80	61.85	61.35	59.90	57.25	53.4
1.35	113.93	73.59	73.37	72.56	71.95	72.42	70.09	64.37	58.79	56.5
1.89	110.21	71.86	70.77	70.28	68.68	68.69	66.68	63.47	60.45	58.8
2.35	117.32	74.63	71.13	70.72	70.08	68.53	65.61	64.54	63.14	59.7
5	54.46	45.10	44.05	44.58	45.24	45.39	46.54	45.79	43.78	41.5

*ค่า PSL/mm² ของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรที่นำมาเทียบคือ 54.46

เมื่อนำค่าในตารางที่ 4-19 และตารางที่ 4-20 ไปพล็อตกราฟจะได้ความสัมพันธ์ของความ
หนาและความดำของแผ่นฟิรซีเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4-44 และรูปที่ 4-45 ดังนี้



รูปที่ 4-44 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร



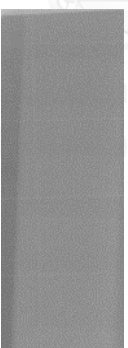
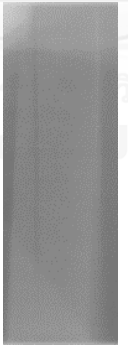
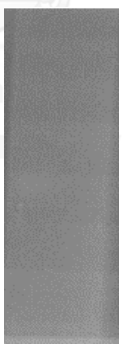

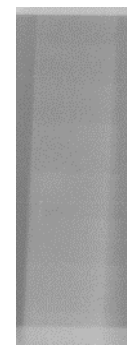
รูปที่ 4-45 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเทปผ้าและค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4-44 คือค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ ค่าที่ได้ออกมาเป็นข้อมูลดิบ ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องที่อ่านค่าออกมาอัตโนมัติ ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแต่ละครั้งจึงไม่

สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง จึงต้องนำมาทำการนอร์มัลไลซ์กับค่าความดำของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรที่ถูกติดเอาไว้ในตำแหน่งอ้างอิงเดิมทุกครั้งในการถ่ายภาพ และจะได้ผลแสดงออกมา ดังรูปที่ 4-45

จากรูปที่ 4-45 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของเทปผ้าที่ทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะมีค่าไม่ ค่อยแน่นอนซึ่งอาจจะเป็นที่ผลที่เกิดจากการอ่านค่าอัตโนมัติของเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ แต่ผลก็ ยังคงเป็นไปในทางเดียวกันกับการใช้แผ่นพีวีซี คือที่ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนมากขึ้นความดำ ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และการใช้ตัวอย่างในการถ่ายภาพพบว่า หากความหนาของตัวอย่าง เพิ่มขึ้น ค่าความดำจะลดลงเนื่องมาจากในตัวอย่งนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนสูง ทำให้กลับกลายเป็นการ หน่วงพลังงานของนิวตรอน ปรากฏความดำของภาพน้อยลงนั่นเอง ซึ่งภาพจริงที่ได้จากเครื่องอ่าน แผ่นบันทึกภาพจะแสดงไว้ในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้เทปผ้าเป็น ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ชนิดฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ความหนาฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เซนติเมตร)				
	0.27	0.81	1.35	1.89	2.35
เทป					

- ผลจากการใช้แผ่นอะคริลิกเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ตารางที่ 4-22 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน (อะคริลิก) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm²

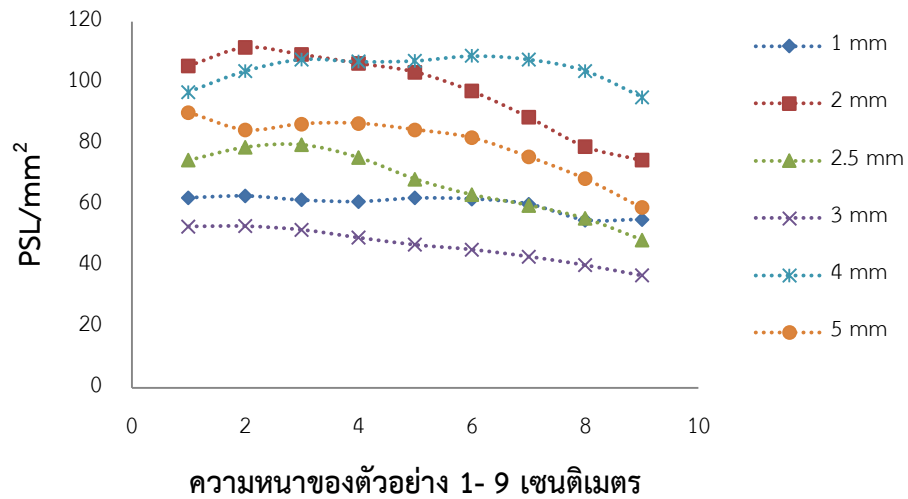
ความ หนา แผ่น อะคริลิก	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ชม.)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	62.38	62.97	61.61	61.12	62.25	62.01	60.33	55.09	55.28
2	105.53	111.53	109.25	106.38	103.53	97.26	88.76	79.12	74.65
2.5	74.65	78.93	79.76	75.58	68.51	63.4	59.92	55.56	48.59
3	52.92	53.01	51.83	49.28	46.94	45.39	43.1	40.31	36.91
4	97.02	103.86	107.71	106.94	107.24	108.81	107.7	103.95	95.35
5	90.25	84.56	86.53	86.68	84.61	81.97	75.77	68.56	59.12

ตารางที่ 4-23 ผลความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน(อะคริลิก) ที่มีผลต่อค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์
ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร

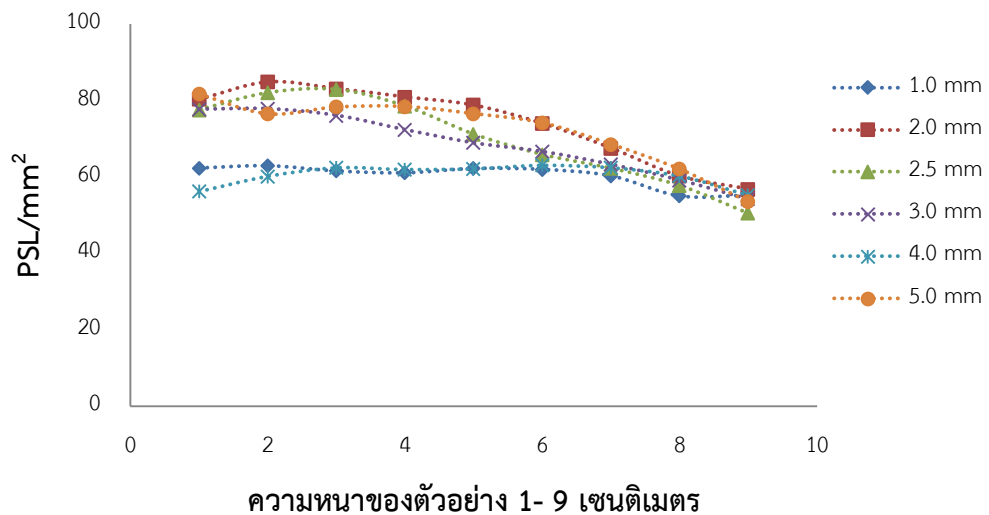
ความ หนา แผ่น อะคริลิก	เทป ผ้า 0.27 มม	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ชม.)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	52.79	62.38	62.97	61.61	61.12	62.25	62.01	60.33	55.09	55.28
2	69.32	80.37	84.93	83.20	81.01	78.84	74.07	67.59	60.25	56.85
2.5	50.77	77.62	82.07	82.93	78.59	71.24	65.92	62.30	57.77	50.52
3	35.93	77.75	77.88	76.15	72.40	68.97	66.69	63.32	59.23	54.23
4	91.04	56.26	60.22	62.46	62.01	62.18	63.09	62.45	60.28	55.29
5	58.3	81.72	76.57	78.35	78.49	76.61	74.22	68.61	62.08	53.53

*ค่า PSL/mm² ของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรที่นำมาเทียบคือ 52.79

เมื่อนำค่าในตารางที่ 4-23 และตารางที่ 4-24 ไปพล็อตกราฟจะได้ความสัมพันธ์ของความหนาและความดำของแผ่นพีวีซีเปรียบเทียบบันดั่งแสดงในรูปที่ 4-46 และรูปที่ 4-47 ดังนี้



รูปที่ 4-46 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาของอะคริลิกและค่า PSL/mm² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร


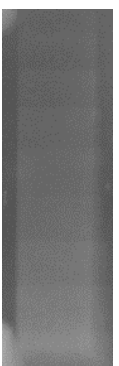
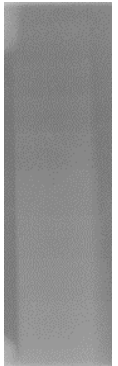
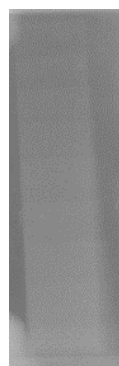
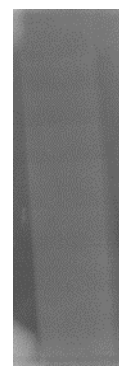



รูปที่ 4-47 การเปรียบเทียบระหว่างความหนาของอะคริลิกและค่า PSL/mm² ที่นอร์มัลไลซ์ค่า PSL ด้วยผลอ้างอิงของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตร เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างความหนา 1- 9 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4-46 คือค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ ค่าที่ได้ออกมานั้นเป็นข้อมูลดิบ ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องได้ทำการอ่านอัตโนมัติ ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแต่ละครั้งจึงไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง จึงต้องนำมาทำการนอร์มัลไลซ์กับค่าความดำของเทปผ้าความหนา 0.27 มิลลิเมตรที่ถูกต้องเอาไว้ในตำแหน่งอ้างอิงเดิมทุกครั้งในการถ่ายภาพ และจะได้ผลแสดงออกมา ดังรูปที่ 4-47

จากรูปที่ 4-47 พบว่า การเพิ่มความหนาของแผ่นอะคริลิกไม่มีความสัมพันธ์ที่คงที่ดังเช่นการใช้เทปผ้าและแผ่นพีวีซีเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยที่ความหนาสูงสุดไม่ได้ให้ผลมากที่สุดอย่างวัสดุสองชนิดที่ทำการวิจัยที่ผ่านมาแต่หากเปรียบเทียบโดยการใช้อย่างในการถ่ายภาพพบว่า หากความหนาของตัวอย่างมากขึ้น ค่าความดำจะลดลงเนื่องจากในตัวอย่งนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนสูง ทำให้กลับกลายเป็นการหน่วงพลังงานของนิวตรอน ปรากฏความดำของภาพน้อยลงนั้นเช่นเดียวกับวัสดุทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งภาพจริงที่ได้จากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพจะแสดงไว้ในตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วของตัวอย่างความหนา 1 – 9 เซนติเมตร โดยใช้อะคริลิกเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ชนิดฉาก เปลี่ยน นิวตรอน	ความหนาฉากเปลี่ยนนิวตรอน (เซนติเมตร)					
	1	2	2.5	3	4	5
แผ่นอะคริลิก						

4.6.2 การหาค่าความคมชัด (Sharpness)

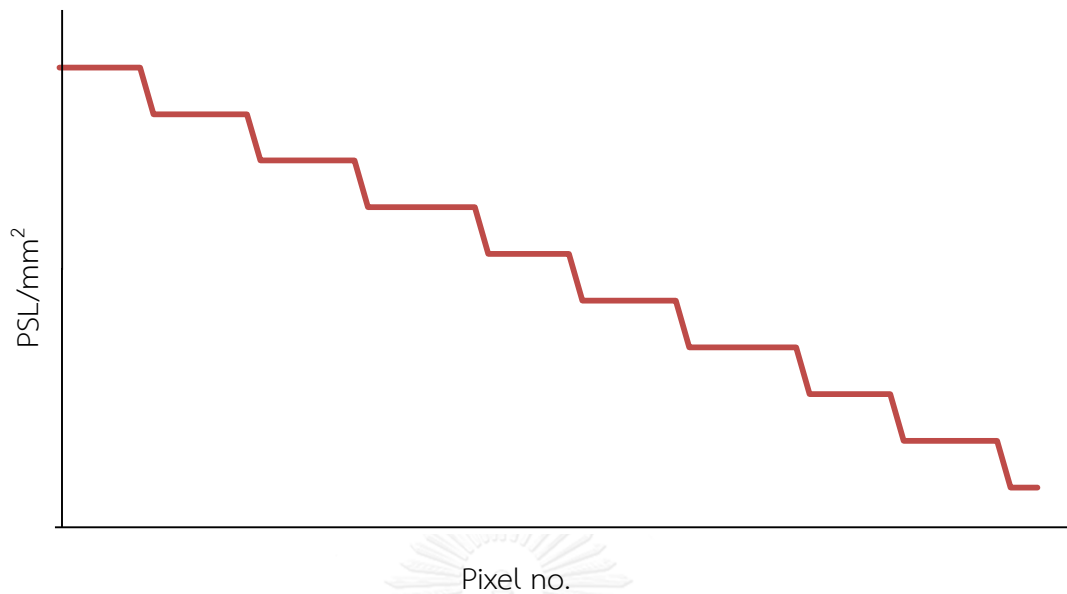
ผลการทดลองในหัวข้อ 4.5.1 พบว่าเทปผ้าที่ 2.35 มิลลิเมตร แผ่นอะคริลิกที่ 2 มิลลิเมตร และแผ่นพีวีซีที่ 3 มิลลิเมตร ให้ความดำที่สูงที่สุดในการถ่ายภาพ ดังนั้นในการหาค่าความเปรียบต่าง นั้นจึงได้เลือกเพียงความหนา 3 ค่านี้เพื่อนำมาทำการศึกษาวิจัยต่อ



รูปที่ 4-48 การหาค่า sharpness ในช่วงที่เปลี่ยนชั้นความหนาของตัวอย่าง 1-9 เซนติเมตร

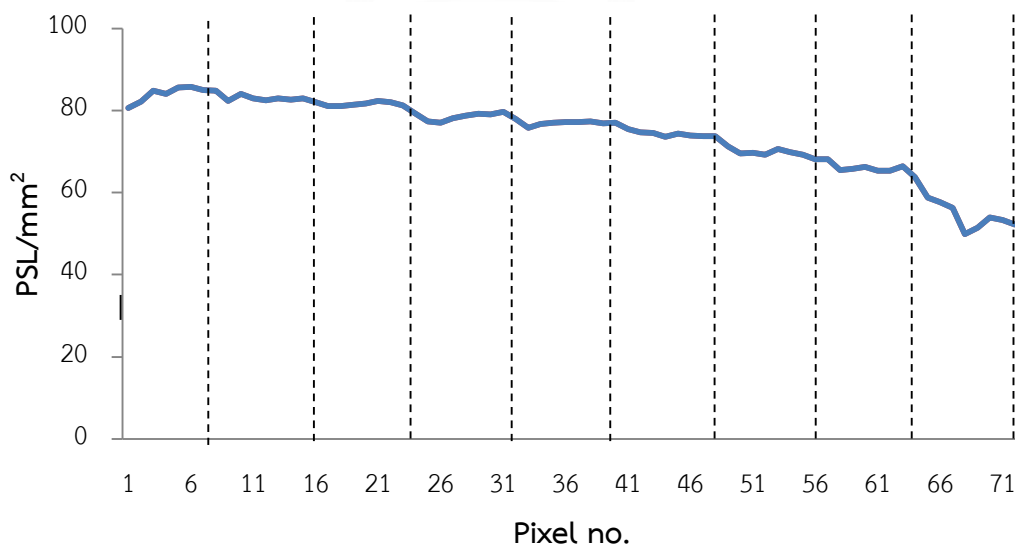
การหาค่าความเปรียบต่างนั้น สามารถพิจารณาจากลักษณะโปรไฟล์ของความชัน โดยที่ลักษณะการหานั้นทำได้โดยการวัดค่า PSL ในแต่ละจุด ในแต่ละชั้นความหนาของชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-48 นี้

ในแต่ละช่องเล็กนั้นจะมีค่า PSL เฉลี่ย และทุกๆ 8 เส้นจะเป็นค่า PSL ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นไป 1 เซนติเมตร ซึ่งหากว่าผลของค่า PSL มีการเปลี่ยนแปลงจริง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า PSL/mm² ควรจะได้ดังรูปที่ 4-49

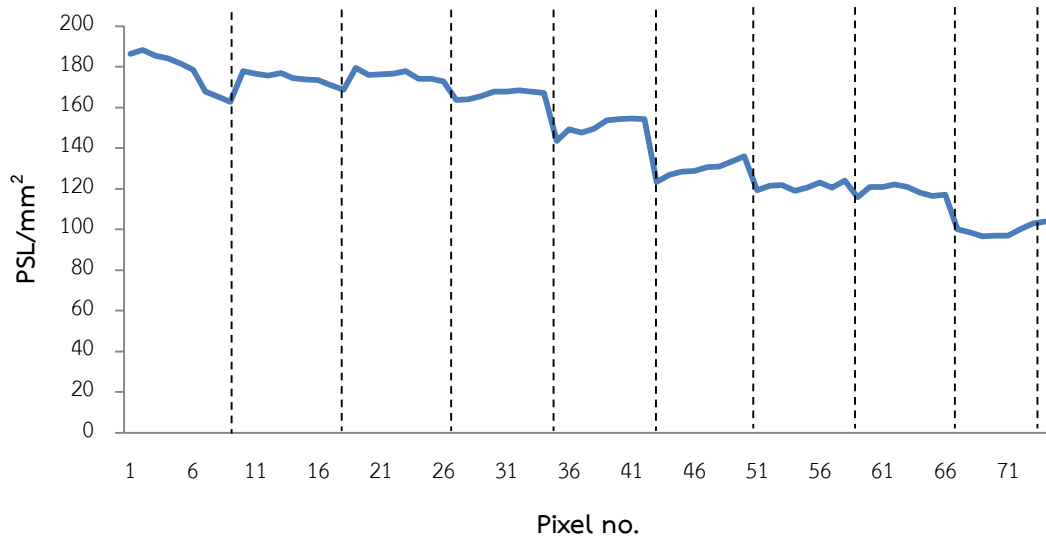


รูปที่ 4-49 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า PSL/mm² ที่คาดหวังว่าจะได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

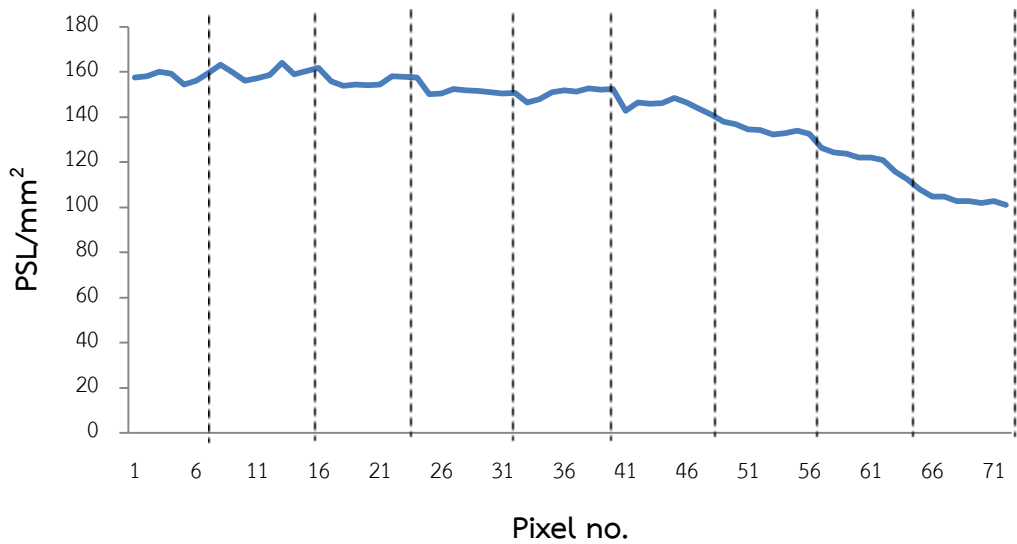
และเมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็น เทปผ้า แผ่นพีวีซีและแผ่นพลาสติก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-50



รูปที่ 4-50 ค่า PSL/mm² ของเทปผ้าเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร



รูปที่ 4-51 ค่า PSL/mm² ของแผ่นพีวีซีเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร

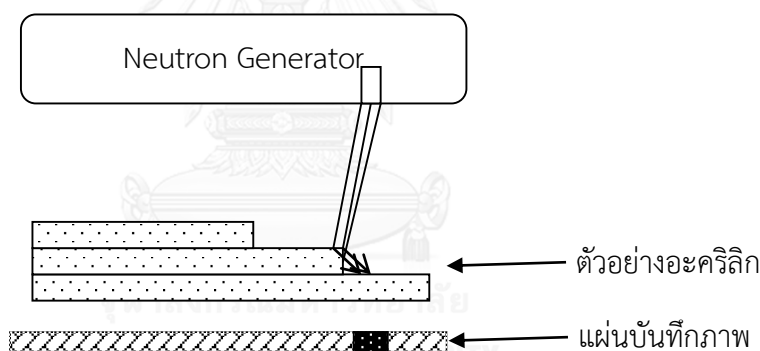


รูปที่ 4-52 ค่า PSL/mm² ของแผ่นอะคริลิกเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่างความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตร

*ตำแหน่งเส้นประ คือ ตำแหน่งที่ step-wedge มีการเปลี่ยนแปลงความหนา

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-50 ถึง 4-52 พบว่า เมื่อทดสอบ 3 ตัวอย่างในการนำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน เมื่อถึงจุดที่ 8 ที่ความหนาของตัวอย่างมีความแตกต่างไปทุก 1 เซนติเมตร ค่า PSL นั้นจะมีความเปลี่ยนแปลง โดยที่ค่า PSL จะลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะรูปที่ 4-51 จะเห็นว่าแผ่นพีวีซีนั้นให้ความเปรียบต่างชัดเจนที่สุดโดยทุกๆที่ความหนาตัวอย่างเปลี่ยน 1 ซม. ค่า PSL ที่ได้นั้นจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด(ดูจากความชันของโปรไฟล์) แตกต่างจากเทปผ้าและแผ่นอะคริลิกที่มีค่า PSL ไม่แตกต่างกันมากนัก(ความชันน้อย) ทำให้บอกรายละเอียดของภาพได้น้อยกว่า

เนื่องจากทุกๆ 8 จุด (จุดที่ทำการวัดค่า PSL ดูจากรูปที่ 4-51) จะมีการเปลี่ยนระดับชั้นความหนา ดังนั้นในความเป็นจริงแล้วค่า PSL ควรลดลงทุกครั้งที่ความหนาลดลง 1 เซนติเมตร แต่จากโปรไฟล์ที่ได้ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4-51 กราฟแสดงค่า PSL/mm² ของแผ่นพีวีซีเมื่อใช้หาความคมชัดของชิ้นงานตัวอย่าง จะเห็นว่ามีส่วนที่ความด้อยคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนา จากนั้นจะค่อยๆลดระดับความต่ำลงมา ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการกระเจิงของอนุภาคที่ทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนามีแนวโน้มที่น่าจะลดลงกลับมีค่าเพิ่มขึ้น การเกิดการกระเจิงของอนุภาคบนชิ้นงานตัวอย่างอธิบายได้โดยรูปที่ 4-53



รูปที่ 4-53 การเกิดการกระเจิงบนตัวอย่างอะคริลิกที่ใช้ถ่ายภาพ

จากรูปที่ 4-53 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความต่ำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความต่ำจะลดลงแต่การกระเจิงของอนุภาคกับขอบของตัวอย่างอะคริลิกก็มีผลต่อความต่ำบนแผ่นบันทึกภาพด้วยเช่นกัน ทำให้ส่วนที่ได้รับการกระเจิงนั้นมีความต่ำที่สูงขึ้นมาก เนื่องจากมีอนุภาคโปรตอนไปทำอันตรกิริยากับแผ่นบันทึกภาพมาก จึงทำให้ความต่ำมีการเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่จะลดระดับความต่ำลงมาตามความหนาปกติ ซึ่งในกรณีนี้ เกิดขึ้นจากการวางตัวอย่างเยื้องกับจุดที่ทำการปล่อยอนุภาคนิวตรอนซึ่งเป็นลักษณะของ Cone beam ทำให้เกิดความไม่คมชัดขึ้นที่ขอบทำการแก้ไขได้ด้วยการวางชิ้นงานและแผ่นบันทึกภาพให้ห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนให้มาก และหากใช้ parallel beam น่าจะทำให้เกิดความคมชัดของขอบมากขึ้นเนื่องจากมีการกระเจิงของอนุภาคน้อยลงนั่นเอง

นอกจากนี้หากสังเกตจากข้อมูลโปรไฟล์ของการหาความคมชัดแล้ว ยังพบว่าช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความดำที่ค่อนข้างดีที่สุดอยู่ในช่วงกึ่งกลางของ step-wedge หรือช่วงความหนา 4-6 เซนติเมตร อาจเนื่องจากผลมาจากการวางตำแหน่งการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในตำแหน่งที่มีความเหมาะสมของพลังงานนิวตรอน พอดีเนื่องจากไม่ทราบทิศทางการปล่อยของนิวตรอน ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยนิวตรอนเร็วคือ ช่วงกึ่งกลางของแผ่นบันทึกภาพนั่นเอง

4.6.3 การหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast)

การหาค่าความเปรียบต่างทำได้โดยการนำ ผลต่างของความดำเทียบกับความหนาของตัวอย่าง ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยการเลือกบริเวณการเปลี่ยนแปลงค่า PSL ตัวอย่างในแต่ละความหนาที่ดีที่สุด คือ ใช้เทปผ้าความหนา 2.35 มิลลิเมตร, แผ่นอะคริลิก 2 มิลลิเมตร และแผ่นพีวีซี 3 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่า PSL ดังตารางที่ 4-25 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4-25 ค่า PSL/mm² เมื่อใช้ถ่ายภาพตัวอย่างด้วยนิวตรอนเร็ว โดยใช้เทปผ้า, แผ่นพีวีซี และอะคริลิกความหนา 2.35 มิลลิเมตร, 3 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ชนิดฉากรับ เปลี่ยน	ค่า PSL/mm ² เมื่อผ่านความหนาตัวอย่าง (ซม.)									
	เทปผ้า 0.27 มม.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เทปผ้า 2.35 มม.	160.7	153.2	152.3	150.9	147.6	141.3	139.0	136.0	128.7	153.6
แผ่นพีวีซี 3 มม	218.6	209.6	203.0	194.2	188.5	180.5	171.4	164.3	153.6	118.2
อะคริลิก 2 มม	105.5	111.5	109.2	106.3	103.5	97.26	88.76	79.12	74.65	74.65

ในการหาค่าความเปรียบต่างนั้นทำโดยเลือกค่า PSL/mm² ในช่วงความหนาที่แตกต่างกันมา คำนวณ โดยอาศัยสมการดังนี้

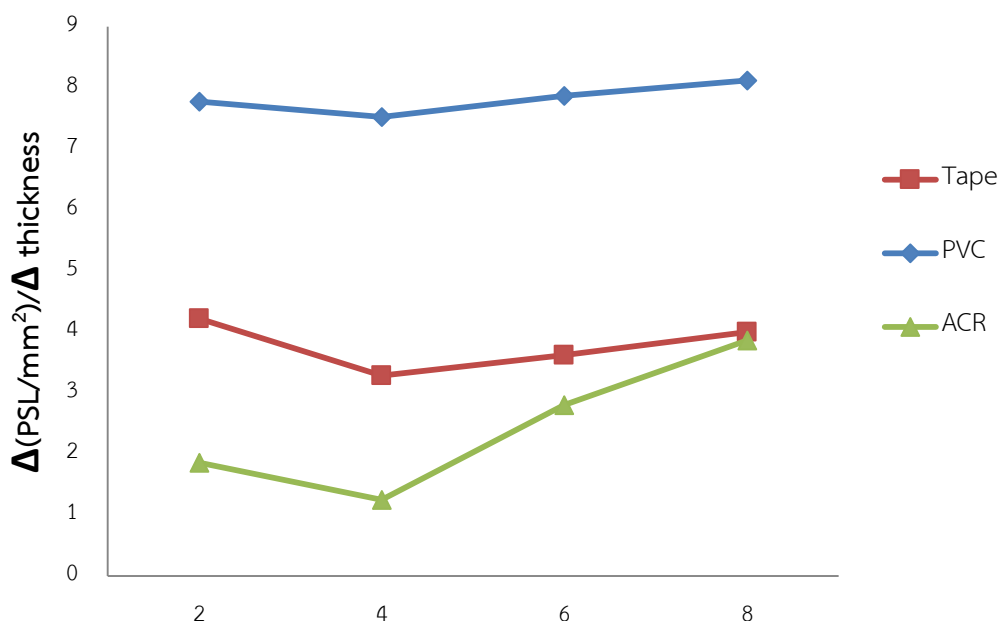
$$contrast = \frac{\Delta psl}{\Delta thickness}$$

ได้เลือกจำนวนข้อมูลตัวอย่างละ 4 ข้อมูลจากจำนวนข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณหาความเปรียบต่าง ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-26 โดยทุกข้อมูลทำการเปรียบเทียบความเปรียบต่างที่ความหนา 1 ซม. คือ ความแตกต่างความหนาเท่ากับสอง หมายถึงเทียบความหนา 3 ชั้นและ 1 ชั้น, ความแตกต่างความหนาเท่ากับหก หมายถึงเทียบความหนาชั้นที่ 7 และชั้นที่ 1

ตารางที่ 4-26 ผลการหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast)

เทพฟ้า				
ความแตกต่างความ ดำ (Δpsl)	8.44	13.15	21.74	32.01
ความแตกต่างความ หนา ($\Delta thickness$)	2	4	6	8
contrast	4.22	3.28	3.62	4.00
แผ่นพีวีซี				
ความแตกต่างความ ดำ (Δpsl)	15.55	30.1	47.19	64.96
ความแตกต่างความ หนา ($\Delta thickness$)	2	4	6	8
contrast	7.77	7.52	7.86	8.12
แผ่นอะคริลิก				
ความแตกต่างความ ดำ (Δpsl)	3.72	5	16.77	30.88
ความ แตกต่างความหนา ($\Delta thickness$)	2	4	6	8
contrast	1.86	1.25	2.79	3.86

จากตารางที่ 4-26 จะเห็นว่า ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ให้ความคมชัดสูงสุดคือ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เป็นแผ่นพีวีซี ลำดับต่อมาคือเทปกาวและอะคริลิก



รูปที่ 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Contrast และความแตกต่างความหนา

ความเปรียบเทียบที่ดีควรมีค่าสูง ยังมีค่าสูงเท่าไรแสดงว่ามีค่าความเปรียบเทียบที่ดีเท่านั้น และต้องมีอัตราส่วนความเปรียบเทียบที่แน่นอนในแต่ละชั้นความหนา หมายความว่าไม่ว่าจะนำความหนาชั้นใดมาเปรียบเทียบกันค่าที่ได้นั้นควรมีค่าใกล้เคียงกันเสมอ จากรูปที่ 4-54 จะเห็นว่าค่าความเปรียบเทียบของแผ่นพีวีซีมีค่าสูงที่สุดและหากดูอัตราส่วนความเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าที่อยู่ที่ประมาณ 7 ซึ่งหมายความว่าไม่ว่าจะเทียบความหนาที่ชั้นใดก็ตาม ค่าความเปรียบเทียบที่คิดอัตราออกมาได้นั้นจะมีค่าเท่ากับ 7 เสมอ ซึ่งต่างจากแผ่นเทปกาวและอะคริลิกที่มีความเปรียบเทียบต่ำกว่าแผ่นพีวีซี และมีอัตราความเปรียบเทียบไม่คงที่ จึงทำให้แผ่นพีวีซีเหมาะที่จะนำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่สุด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อถ่ายภาพร่วมกับแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์นั้น แผ่นพีวีซีมีความเหมาะสมที่สุดที่ความหนา 3 มิลลิเมตร เพราะแผ่นพีวีซีสามารถทำให้เห็นความเปรียบเทียบและความคมชัดสูงกว่าวัสดุอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพนิวตรอนเร็ว โดยทำการทดลองจัดระบบการถ่ายภาพจากเครื่องกำเนิดรังสีนิวตรอน แผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำมาจากวัสดุ 3 ชนิดที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูง ได้แก่ เทปผ้า, แผ่นพีวีซี, และแผ่นอะคริลิก ได้ข้อสรุปในการทำวิจัยและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1 การทดสอบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนทั้ง 3 ชนิดเป็นโปรตอนรีคอยล์

เมื่อนำแผ่นฟิล์ม CR-39 ติดด้วยเทปผ้า, แผ่นพีวีซี, และแผ่นอะคริลิก และนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว ณ เงื่อนไขการทดลอง กระแส (current) เครื่องกำเนิดนิวตรอนที่ 70 ไมโครแอมแปร์ , ความต่างศักย์ (high voltage) 90 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการฉายรังสีนิวตรอน 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มดังกล่าวมากัดรอยอนุภาคด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 6 N และนำไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 100 เท่า พบว่ามีรอยของอนุภาคของโปรตอน และจากการตรวจสอบความหนาแน่นของจำนวนรอยหรือจำนวนโปรตอนต่อพื้นที่ พบว่า เทปผ้า นั้นให้ปริมาณของโปรตอนต่อพื้นที่ 1.1328×10^5 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร (ที่ความหนาเทปกาว 0.27 มม.) แผ่นอะคริลิก มีปริมาณอนุภาคคือ 6.0412×10^4 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร (ที่ความหนาอะคริลิก 1.0 มม) และแผ่นพีวีซี ปริมาณอนุภาค 5.5692×10^4 จำนวนอนุภาค/ตารางมิลลิเมตร (ที่ความหนาแผ่นพีวีซี 0.1 มม.) และยืนยันด้วยการถ่ายภาพชิ้นงานทดสอบนิวตรอนพลังงานต่ำว่าโปรตอนรีคอยล์ที่เกิดขึ้นมาจากนิวตรอนเร็ว

5.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการให้ค่า PSL ต่อพื้นที่ของวัสดุที่นำมาทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ความหนาต่างๆกัน

เมื่อนำวัสดุทั้ง 3 ชนิดมาใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนและจัดการทดลองโดยการถ่ายภาพโดยไม่มีการถ่ายภาพด้วยชิ้นงานตัวอย่างนั้น โดยทำการเพิ่มความหนาของฉากนิวตรอนพบว่า ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำจากเทปผ้า นั้นให้ค่า PSL สูงสุดที่ 281.71 PSL/mm² ที่ความหนา 2.35 มม. แผ่นพีวีซีให้ค่า PSL สูงสุดที่ 168.2 PSL/mm² ที่ความหนา 3 มม. และแผ่นอะคริลิกให้ค่า PSL สูงสุดที่ 63.14 PSL/mm² ที่ความหนา 2 มม. โดยค่า PSL มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สำหรับเทปกาวในช่วงแรกที่มีความหนาเพิ่มขึ้นก่อนจะมีค่า PSL ค่อนข้างคงที่หรือลดลงในช่วงความหนาที่เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากองค์ประกอบของวัสดุที่นำมาทำเทปกาว พีวีซี และอะคริลิก มีความแตกต่าง

กัน ในส่วนที่ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำมาจากเทปผ้าที่ถูกเคลือบด้วยโพลีเอทิลีนและตัวเนื้อเยื่อที่ทำมาจากยางพารา ล้วนแต่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจนทั้งหมด อาจจะทำให้เกิดความอึดตัวของปริมาณไฮโดรเจน ทำให้ค่า PSL ค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มความหนามากกว่า 2 มม.ขึ้นไป ในส่วนของแผ่นพีวีซีและแผ่นอะคริลิกที่ถึงแม้ว่าจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นเดียวกัน แต่ยังมีองค์ประกอบชนิดอื่นรวมอยู่ด้วย นั่นก็คือ ออกซิเจนและคลอรีน ความแตกต่างของสัดส่วนของไฮโดรเจนนี้จะเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนให้ค่า PSL แตกต่าง ย ความหนาที่ใกล้เคียงกัน

5.3 วัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

เมื่อนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่ความหนาซึ่งให้ค่า PSL สูงสุดมาทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนร่วมกับการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างที่ทำจากอะคริลิกความหนาตั้งแต่ 1-9 เซนติเมตรด้วยนิวตรอนเร็ว พบว่าค่าความเปรียบต่างที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความหนาต่างกันมากขึ้นค่าความเปรียบต่างก็สูงต่างกันมากเช่นเดียวกัน และหากพิจารณาที่ความคมชัดของภาพจะพบว่า วัสดุที่นำมาเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนทั้ง 3 ชนิดนั้นมีช่วงของความคมชัดที่ดีที่สุดอยู่ในช่วงความหนาของ step-wedge ที่ 4-6 เซนติเมตรของแผ่นอะคริลิก ในการเปรียบเทียบความคมชัดในภาพรวมพบว่าแผ่นพีวีซีให้ความคมชัดได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ โดยดูจากการที่ลักษณะความชันของข้อมูลโปรไฟล์ของค่า PSL ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าโปรไฟล์ ค่า PSL ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นความหนาของ Step-wedge ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าแผ่นพีวีซีที่ความหนา 3 มม. เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ทำจากเทปผ้าและอะคริลิก

5.4 ตำแหน่งของ step-wedge ที่ให้ค่าความคมชัดสูงสุด

ช่วงที่ให้ค่าความคมชัดสูงสุดของภาพที่ถ่ายได้คือ ช่วงที่ step-wedge มีความหนาตั้งแต่ 4-6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ชิ้นงานตัวอย่างอยู่ที่กึ่งกลางของแผ่นบันทึกภาพ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากผลของทิศทางการปล่อยอนุภาคและพลังงานของนิวตรอนเร็วเหมาะสมในช่วงของตำแหน่งนั้นๆ หรืออาจจะเป็นส่วนที่ให้พลังงานของนิวตรอนสูงที่สุด จึงทำให้นิวตรอนเร็วเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) กับตัวอย่างและฉากเปลี่ยนนิวตรอนได้ดี กว่าตำแหน่งอื่นๆของภาพ ดังนั้นภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเร็วในช่วงความหนาดังกล่าวนั้นให้ค่าความคมชัดสูงสุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆของ step-wedge

5.5 ขนาดของตัวอย่างและความเหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วว่าจะเหมาะกับการถ่ายภาพวัสดุตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากอำนาจการทะลุของนิวตรอนเร็วนั้นมีค่าสูง ทำให้ไม่สามารถถ่ายภาพวัสดุชิ้นเล็กแล้วสามารถเห็นรายละเอียด ทั้งความคมชัดหรือความเปรียบต่างได้ ซึ่งหากต้องการถ่ายภาพวัสดุชิ้นเล็กและได้คุณภาพภาพถ่ายที่ดีนั้นควรจะใช้นิวตรอนพลังงานต่ำหรือเทอร์มัลนิวตรอนจึงจะเหมาะสมกว่า แต่หากต้องการถ่ายภาพชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ นิวตรอนพลังงานต่ำอาจจะมีพลังงานการทะลุไม่เพียงพอ จึงไม่สามารถเห็นรายละเอียดภายในได้ การใช้นิวตรอนเร็วอาจจะมีข้อได้เปรียบในส่วนนี้ แต่ในด้านเรื่องคุณภาพของภาพที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีค่าเปรียบต่างและความคมชัดไม่ดีเมื่อเทียบกับการใช้นิวตรอนพลังงานต่ำ

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ทำการตรวจสอบคุณภาพภาพถ่ายด้วยชิ้นงานขนาดเล็ก หากสามารถทำการทดลองถ่ายภาพชิ้นงานขนาดใหญ่ด้วยนิวตรอนเร็วได้ จะทำให้สามารถทราบถึงความแตกต่างของคุณภาพของภาพถ่ายจากชิ้นงานขนาดใหญ่และเล็ก ว่ามีคุณภาพแตกต่างกันในเรื่องของความคมชัด ความเปรียบต่างมากน้อยเพียงใด
2. สาเหตุที่ทำให้ภาพมีความไม่คมชัด อาจเนื่องจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็วที่ให้ลำรังสีไม่สมมาตรและปริมาณนิวตรอนไม่เท่ากันทั่วทั้งบริเวณครอบคลุมพลังงานออกมาไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง ดังนั้นถ้าสามารถหาวิธีการหรือควบคุมคุณภาพลำนิวตรอนจากกำเนิดรังสีนิวตรอนได้ น่าจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ความหนาของชิ้นงานตัวอย่างก็มีผลต่อการกระเจิงของโปรตอนบนชิ้นงาน ทำให้ความคมชัดของบริเวณขอบที่มีความเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นไม่ชัดเจน สามารถแก้ไขได้ด้วยการจัดวางชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งตรงกลางการปล่อยอนุภาคนิวตรอนเร็ว และควรจะหาตำแหน่งวางชิ้นงานในการถ่ายภาพให้ห่างจากเครื่องกำเนิดนิวตรอนให้เหมาะสม แต่จะต้องให้ความเข้มของนิวตรอนที่มาถึงชิ้นงานนั้นมีค่าไม่ต่ำจนเกินไป
3. ชิ้นงานที่นำมาทำการวิจัยควรมีความหนา-บางแตกต่างกันมาก เพื่อให้เห็นความเปรียบต่างที่ชัดเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เพียงตัวอย่างเป็น step-wedge ที่มีความหนาต่างกันเพียงชั้นละ 1 เซนติเมตร ทำให้รูปที่ถ่ายออกมามีความแตกต่างของความดำไม่มากทำให้ค่าความเปรียบต่างน้อย ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรมีการเพิ่มขนาดความหนาของ step-wedge ที่ต่างกันมากขึ้น เพื่อตรวจสอบระดับความหนาที่ต่างกันมากขึ้นมีผลเพียงใดต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเปรียบต่าง

4. ห้องที่ทำการวิจัยมีขนาดเล็กเกินไป ทำให้ไม่เหมาะกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็ว เนื่องจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเร็วนั้นต้องอาศัยระยะห่างในการวางชิ้นงานกับเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็วให้มากพอที่จะทำให้ภาพที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าความคมชัดที่ดีขึ้น การปรับปรุงการจัดวางระบบการถ่ายภาพให้มีระยะห่างดังกล่าวมากยิ่งขึ้นน่าจะมีผลให้คุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ดีขึ้นกว่าเดิม

5. ควรจะมีการพิสูจน์ว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากนิวตรอนเร็วจริง วิธีที่ทำได้คือการใส่แผ่นแคดเมียม (Cd) เข้าไปในตำแหน่งระหว่างชิ้นงานที่ต้องการถ่ายภาพและฉากเปลี่ยนนิวตรอน เพื่อกำบังอันตรกิริยาของเทอร์มัลนิวตรอนที่มีผลกับชิ้นงาน

6. แผ่นบันทึกภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ชนิด BAS-MS ซึ่งเป็นแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ที่มี Sensitivity สูง ทำให้หากเมื่อมีการเปลี่ยนของเวลาและตำแหน่งในการถ่ายภาพ จะมีผลทำให้ค่า PSL ของภาพถ่ายในแต่ละครั้งนั้นเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการใช้แผ่นบันทึกภาพชนิด BAS-SR ซึ่งเป็นแผ่นบันทึกภาพรังสีเอกซ์ที่มี resolution สูง ทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายแผ่นบันทึกภาพ จะยังสามารถทำให้ภาพถ่ายที่ได้นั้นให้ความมีความเปรียบต่างได้สูงขึ้นเนื่องจากมีความสามารถในการแยกแยะความละเอียดสูง

รายการอ้างอิง

1. Chankow, N., *Neutron Radiography*, in *Nondestructive Testing Methods and New Applications*, D.M. Omar, Editor., InTech.
2. Mikerov, V., V. Samosyuk, and S. Verushkin, *Detectors based on imaging plates for fast neutron radiography*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2005. **542**(1-3): p. 192-196.
3. Khan, M.A.H. and M.S. Chowdhury, *Studies on recoil proton tracks in NTA films with the $T(d, n)He-4$ reaction*. Radiation Measurements, 2003. **37**(6): p. 589-594.
4. MA Qingli, T.S., ZOU Jiwei, *Energy and angular distribution of recoil proton of fast neutron in scintillation fiber: a simulation study*. Nuclear Science and Technique, 2009. **20**: p. 42-45.
5. Kim, K.H., R.T. Klann, and B.B. Raju, *Fast neutron radiography for composite materials evaluation and testing*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 1999. **422**(1-3): p. 929-932.
6. Sanami, T., *Fast-neutron profiling with an imaging plate*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001. **458**: p. 720-728.
7. Lima, C.T.S., V.R. Crispim, and W.M.S. Santos, *Gadolinium sheet converter for neutron radiography*. Applied Radiation and Isotopes, 2007. **65**(12): p. 1381-1385.
8. อัครวาทินบุญ, เ., การเกิดรอยทางอนุภาคโปรตอนในพลาสติกพอลิคาร์บอเนตโดยการฉายนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน *Am-Be*. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นิวเคลียร์ ครั้งที่ 12, 2554.
9. บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. *Imaging Plate*. 18 กุมภาพันธ์ 2558]; Available from: <http://www.nst.or.th/article/article143/article1439.htm>.
10. 3M. *Duct Tape*. 2016 12 กุมภาพันธ์ 2558]; Available from: <http://solutions.3m.com/wps/portal/3M>.

11. Scientific, T. *Neutron Generator Model MP320*. 20 พฤศจิกายน 2557]; Available from: <https://www.thermofisher.com/>





ภาคผนวก

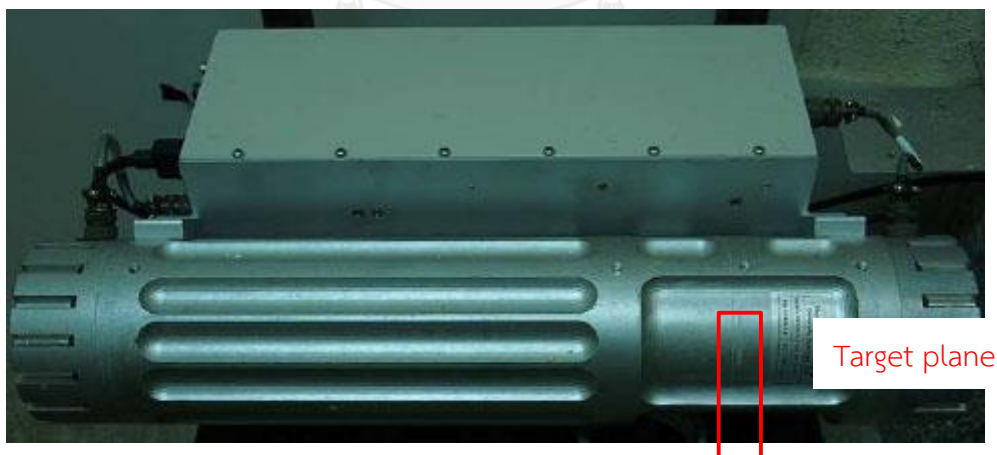
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอน

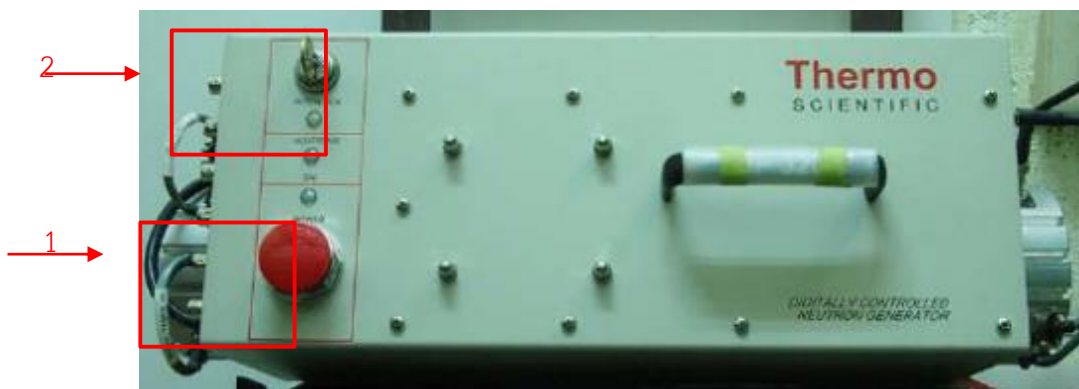
เครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 จะมีลักษณะภายนอกดังภาพที่แสดงในรูปที่ 55 และมีส่วนประกอบต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ ภาพผนวก-55 ภาพลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP 320



รูปที่ ภาพผนวก-56 บริเวณด้านหลังของเครื่องกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ ภาพผนวก-57 บริเวณด้านหน้าของเครื่องกำเนิดนิวตรอน

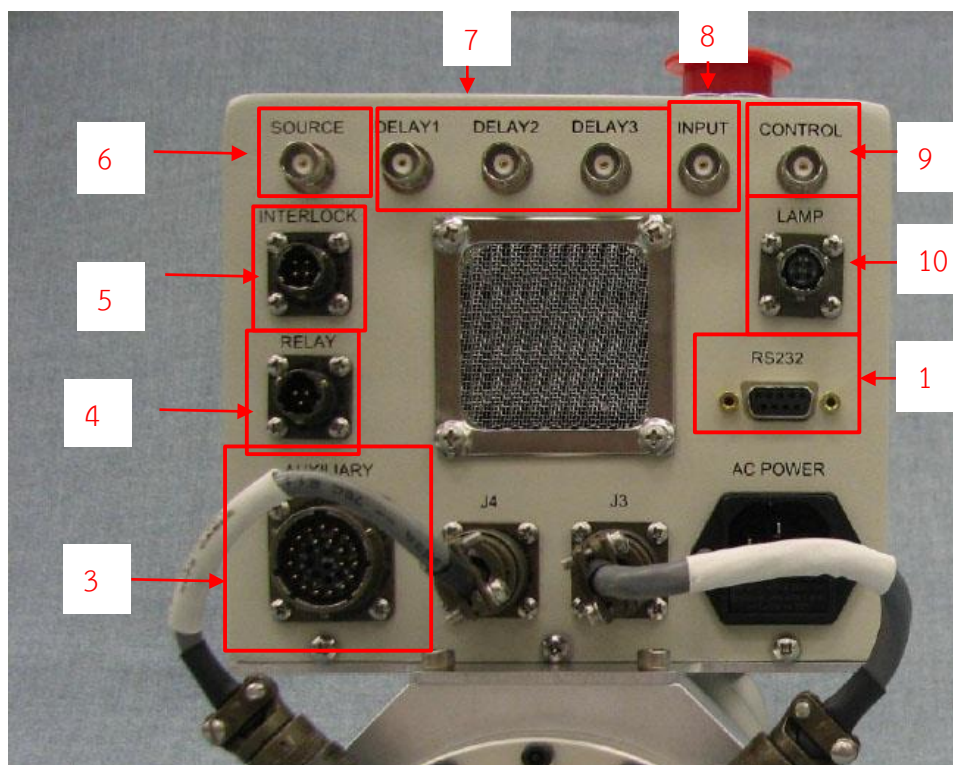
จากรูปที่ 56 แสดงบริเวณด้านหลังของเครื่องกำเนิดนิวตรอนจะมีลักษณะเป็นท่อ ซึ่งด้านในบรรจุแก๊ส Deuterium และมี Tritium สำหรับใช้เป็น Target เอาไว้ ซึ่งบนเครื่องนั้นจะบอกตำแหน่งที่ Target อยู่เรียกว่า Target plane

จากรูปที่ 57 แสดงบริเวณด้านหน้าของเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 ของบริษัท Thermo Fisher Scientific ซึ่งจะมีส่วนที่ใช้งานหลักๆดังนี้

หมายเลข 1 ปุ่ม POWER ใช้สำหรับการเปิด - ปิดเครื่องกำเนิดนิวตรอน

หมายเลข 2 กุญแจ Interlock ใช้สำหรับการเปิด - ปิดเครื่องกำเนิดนิวตรอนเช่นเดียวกัน

ซึ่งผู้ใช้ต้องทำการตรวจสอบก่อนการใช้งานทุกครั้งว่าปุ่ม Power และ กุญแจ Interlock นั้นอยู่ในสถานะห้ามใช้งานหรือไม่



รูปที่ ภาพผนวก-58 บริเวณด้านข้างเครื่องกำเนิดนิวตรอน

จากรูปที่ 58 จะแสดงส่วนของบริเวณด้านข้างเครื่องกำเนิดนิวตรอนจะมีช่องสำหรับเชื่อมต่อสายสัญญาณ ซึ่งสามารถอธิบายส่วนต่างๆได้ดังนี้

หมายเลข 3 AUXILIARY Connector เป็นขั้วต่อไฟฟ้าที่สามารถต่อได้ทั้ง DC power , interlocks และ warning lamp การเชื่อมต่อในช่องนี้สามารถลดจำนวนสายที่ต่อเข้าสู่ระบบให้ลดลงได้

หมายเลข 4 RELAY Connector ใช้เชื่อมต่อกับไฟแสดงสถานะเครื่องกำเนิดนิวตรอน

หมายเลข 5 INTERLOCK Connector จะใช้สาย Interlock ดังแสดงในรูปที่ 59 เชื่อมต่อกับกล่องสวิตช์ Interlock ดังแสดงในรูปที่ 59 ซึ่งกล่องสวิตช์ Interlock จะควบคุมในส่วนการจ่ายกระแสไฟฟ้าศักย์สูง สามารถสังเกตการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จากไฟแสดงสถานะเดินเครื่องกำเนิดนิวตรอน ซึ่งหากมีการกระพริบแสดงว่ายังมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ แต่หากไม่

กระพริบแสดงว่าเครื่องกำเนิดนิวตรอนหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว ก่อนที่จะเข้าไปปรับบริเวณ
ตัวเครื่องควรตรวจเช็คด้วยการกดปุ่มเพื่อหยุดการทำงานทุกครั้ง



รูปที่ ภาพผนวก-60 สายเชื่อมต่อสัญญาณ Interlock



รูปที่ ภาพผนวก-59 กล่องสวิตช์ Interlock

หมายเลข 6 SOURCE Connector ใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ต้องการหา Neutron pulse

หมายเลข 7 DELAY 1 – 3 Connector ใช้สำหรับเชื่อมต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

หมายเลข 8 INPUT Connector จะเชื่อมต่อเมื่อต้องการจะใช้เครื่องให้กำเนิดนิวตรอนมากกว่าสองเครื่องขึ้นไป โดยที่ใช้ source เดียวกัน

หมายเลข 9 CONTROL Connector เป็นสัญญาณที่ใช้ Hardware ในการควบคุม เครื่องกำเนิดนิวตรอน

หมายเลข 10 LAMP Connector ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับไฟแสดงสถานะเดินเครื่อง กำเนิดนิวตรอนดังแสดงในรูปที่ 61 หากมีการใช้เครื่องให้กำเนิดนิวตรอนจะเกิดการกระพริบของ หลอดไฟเพื่อแจ้งให้ผู้ใช้งานรู้ว่าเครื่องดำเนินการอยู่

หมายเลข 11 RS232 Connector คือสายสัญญาณชนิด RS232 ดังแสดงในรูปที่ 62 ใช้สำหรับการเชื่อมต่อกับ PC ดังแสดงในรูปที่ 63 เพื่อเป็นตัวควบคุมการสั่งการมาที่เครื่องกำเนิด นิวตรอน



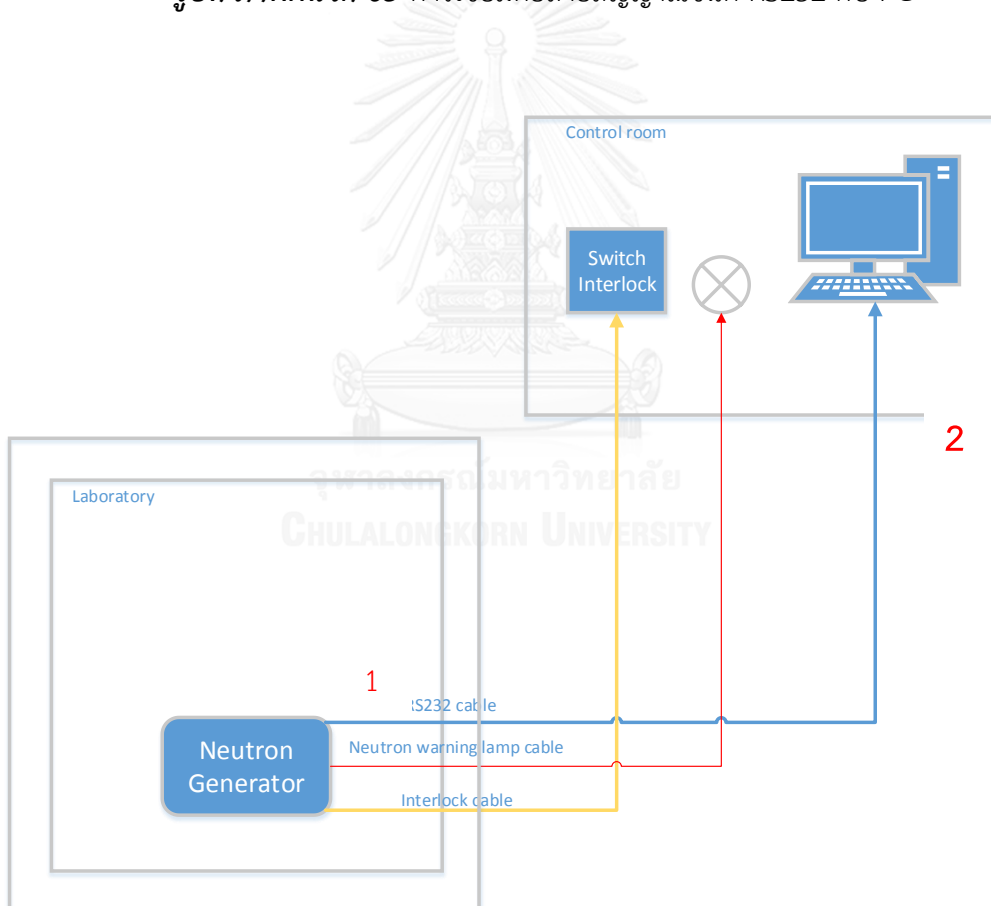
รูปที่ ภาพผนวก-61 ไฟแสดงสถานะการเดินเครื่องกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ ภาพผนวก-62 ไฟแสดงสถานะการเดินเครื่องกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ ภาพผนวก-63 การเชื่อมต่อสายสัญญาณชนิด RS232 กับ PC



รูปที่ ภาพผนวก-64 การเชื่อมต่อสายสัญญาณจากห้องปฏิบัติการไปยังห้องควบคุม

ในการทำงานโดยใช้เครื่องกำเนิดนิวตรอนนั้นจะมีความทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. ส่วนของห้องปฏิบัติการที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดนิวตรอน และ 2. คือส่วนของห้องควบคุมที่ผู้ปฏิบัติการจะสั่งการในส่วนนี้

การเชื่อมต่อจากห้องปฏิบัติการมายังห้องควบคุมนั้นจะต้องใช้สายเชื่อมต่อ 3 สายซึ่งแสดงในรูปที่ 64 ได้แก่

1. สาย RS232 ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์
2. สายเชื่อมต่อไฟแสดงสถานะเครื่องกำเนิดนิวตรอน
3. สายเชื่อมต่อสวิตช์ Interlock

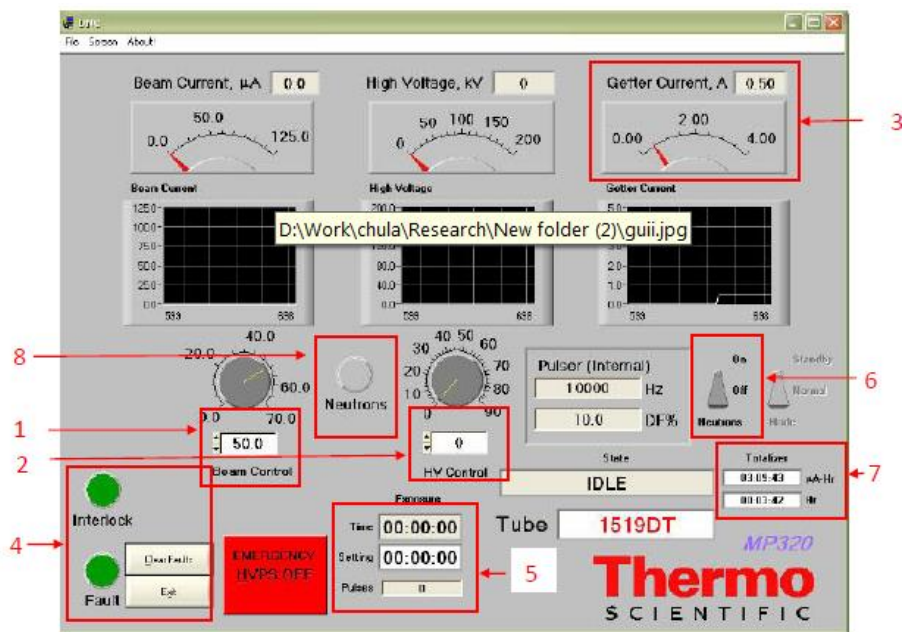
ขั้นตอนการใช้งาน

ในการใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอนรุ่น MP320 นั้นจะต้องมีการติดตั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับการตั้งค่าในการวัดข้อมูล โดยโปรแกรมที่ใช้นั้นมีชื่อว่า โปรแกรม “DNCII” โปรแกรมนี้ถูกผลิตมาจากบริษัท Thermo Fisher Scientific เช่นเดียวกับบริษัทที่ผลิตเครื่องและแผ่นโปรแกรมจะถูกแนบมากับตัวเครื่องกำเนิดนิวตรอน จึงสามารถที่จะติดตั้งในทันที



รูปที่ ภาพผนวก-65 ภาพของหน้าจอคอมพิวเตอร์หลังจากที่ทำการติดตั้งโปรแกรม DNCII

หลังจากลงโปรแกรม DNCII เรียบร้อยแล้ว หน้าจอคอมพิวเตอร์จะปรากฏ Icon ภายในวงกลมสีแดงที่แสดงดังรูปที่ 65 ผู้ใช้งานสามารถดับเบิลคลิกเพื่อเปิดใช้งานโปรแกรม หลังจากนั้นหน้าจอจะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมมีรายละเอียดดังรูปที่ 66



รูปที่ ภาพผนวก-66 รายละเอียดต่างๆของหน้าต่างโปรแกรม DNCII

จากหน้าต่างโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 66 สามารถอธิบายส่วนต่างๆได้ดังนี้

1. Beam Current (μA) คือการปรับค่ากระแสที่ใช้งานตั้งแต่ 0 - 70 μA (ค่า Default ของโปรแกรม คือ 60.0 μA) โดยคลิกที่เครื่องหมายลูกศรที่อยู่ด้านข้างเพื่อปรับตั้งค่าหรือพิมพ์ตัวเลขลงไปช่องได้เลย
2. High Voltage (kV) การปรับตั้ง High Voltage สามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 0 - 90 kV โดยคลิกที่เครื่องหมายลูกศรที่อยู่ด้านข้างเพื่อปรับตั้งค่าหรือพิมพ์ตัวเลขลงไปช่องได้เลย
3. Getter Current (A) ใช้สำหรับวัดค่ากระแสที่ใช้งานจริงว่ามีปริมาณการใช้กระแสเท่าไรโดยค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

4. การตั้งเวลาในการดำเนินเครื่อง ทำได้โดยใส่ตัวเลขในช่อง Setting หากไม่ต้องการใช้งานตั้งเวลาในการทำงาน ผู้ใช้ต้องใส่ 0:00:00 ในช่อง setting และโปรแกรมจะแสดงเวลาที่เครื่องทำงานจากช่อง Time

5. ไฟแสดงสถานะของโปรแกรม ในกรณีที่ไฟแสดงสถานะของโปรแกรมเป็นสีแดง ต้องกด ปุ่ม Clear Faults เพื่อให้โปรแกรมตรวจสอบสถานะความพร้อมของเครื่องก่อน หากกดแล้วยังเป็นสีแดงอยู่ให้ตรวจสอบที่ปุ่ม Interlock และการเชื่อมต่อสายสัญญาณต่างๆ เมื่อเครื่องพร้อมใช้งาน ไฟแสดงสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว

6. สวิตซ์ On – Off สำหรับเปิด – ปิดการทำงานของเครื่องกำเนิดนิวตรอน

7. แสดงเวลาที่เครื่องกำเนิดนิวตรอนถูกใช้งานมาทั้งหมด

8. ไฟแสดงสถานะเครื่องให้กำเนิดนิวตรอน หากมีการดำเนินเครื่องอยู่จะกะพริบเป็นสีแดง

การใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอน

เมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ติดตั้งโปรแกรม DNCII ในการใช้งานและเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องกำเนิดนิวตรอนแล้ว ผู้ใช้สามารถเริ่มการใช้งานเครื่องกำเนิดนิวตรอนได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. ผู้ใช้ต้องตั้งค่ากระแส , High Voltage และเวลาที่ใช้ในการดำเนินเครื่องที่หน้าต่างโปรแกรม DNCII

2. กดสวิตซ์ที่ ON ที่หน้าต่างโปรแกรม DNCII เครื่องจะใช้เวลาสักครู่เพื่อเร่งปฏิกิริยา

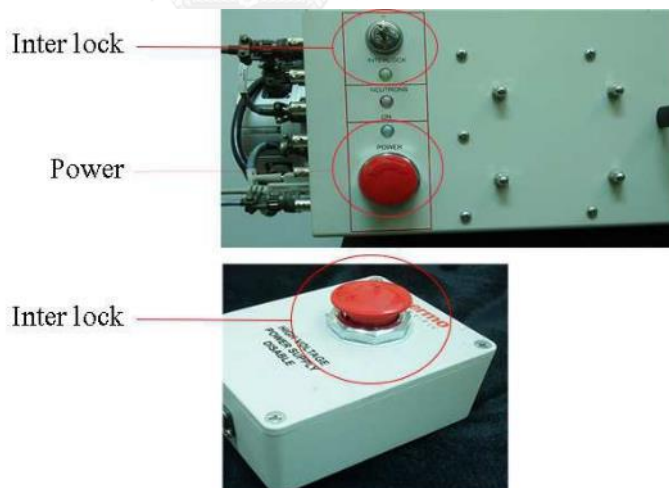
3. เมื่อเครื่องทำงานแล้ว ไฟแสดงสถานะนิวตรอนที่หน้าต่างโปรแกรมจะกะพริบตลอดเวลา ให้รอจนกว่าเครื่องจะหยุดทำงานในเวลาที่ผู้ใช้กำหนด โดยสังเกตจากไฟแสดงสถานะนิวตรอนหยุดกะพริบ

4. กดสวิตช์ Interlock เพื่อให้ตัวเครื่องหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า แล้วผู้ใช้จึงสามารถเข้าสู่ ส่วนของห้องปฏิบัติการ

หากเมื่อใช้งานเสร็จแล้ว ผู้ใช้ต้องดำเนินการปิดเครื่อง สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. กดสวิตช์ Interlock ให้อยู่ในสถานะห้ามใช้เครื่อง เครื่องจะทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า
2. ปิดโปรแกรม DNCII ซึ่งหน้าต่างโปรแกรมจะแจ้งว่า จะปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าศักย์สูง ให้ตอบตกลง
3. ปิดสวิตช์ Power ที่เครื่องกำเนิดนิวตรอน และปิดกุญแจ Interlock ให้อยู่ในสถานะห้ามใช้งาน
4. ถอดสายสัญญาณต่างๆ เก็บให้เรียบร้อย

ข้อควรระวังในการใช้งาน



รูปที่ ภาพผนวก-67 สวิตช์ Power ของเครื่องกำเนิดนิวตรอน , สวิตช์ Interlock และกุญแจ Interlock

ก่อนที่จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือใช้เครื่องกำเนิดนิวตรอน ทุกครั้งควรตรวจสอบ Power, สวิตช์ Interlock และกุญแจ Interlock ดังแสดงในรูปที่ 65 ให้อยู่ในสถานะห้ามใช้งาน ก่อนทุกครั้ง เพื่อความปลอดภัยในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน หรือเหตุการณ์ไม่คาดคิดต่างๆ

กรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน หรือต้องการหยุดเครื่องทันที สามารถกด สวิตช์ Interlock ได้เลย ระบบจะทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าศักย์สูง แล้วให้สังเกตไฟสัญญาณเตือน ว่าดับสนิทแล้ว จึงเข้าไปที่บริเวณเครื่องได้

มาตรการความปลอดภัยในการใช้งาน

ในระหว่างการปฏิบัติงานนั้น ผู้ปฏิบัติงานควรจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณรังสีที่บริเวณปฏิบัติงานซึ่งได้แก่

1. เครื่องวัดรังสีชนิดทกพาชนิด OSL (Optically Stimulated Luminescence) เป็นอุปกรณ์วัดที่รังสีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายใน OSL สามารถสะสมการเปลี่ยนแปลงนั้นได้ จะต้องนำไปผ่านกระบวนการแปลผลตามคุณสมบัติของเครื่องวัดเมื่อต้องการทราบค่าปริมาณรังสีสะสมที่ได้รับมา

2. เครื่องสำรวจรังสี (Survey meter) จะใช้เพื่อตรวจสอบในทุกครั้งที่ปฏิบัติงาน เพื่อจะได้รับทราบเหตุฉุกเฉินหรือเหตุผิดปกติในขณะทำงาน ซึ่งสามารถป้องกันอันตรายจากรังสีได้ ทั้งต่อผู้ที่ทำงานกับรังสีและบุคคลภายนอก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ณัฐนันท์ จันทร์กลิ่น เกิดเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ.2533 จบการศึกษาปริญญาตรีจาก คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อที่คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ติดต่อ nattanan_janklan@live.com



