

การถ่ายภาพนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

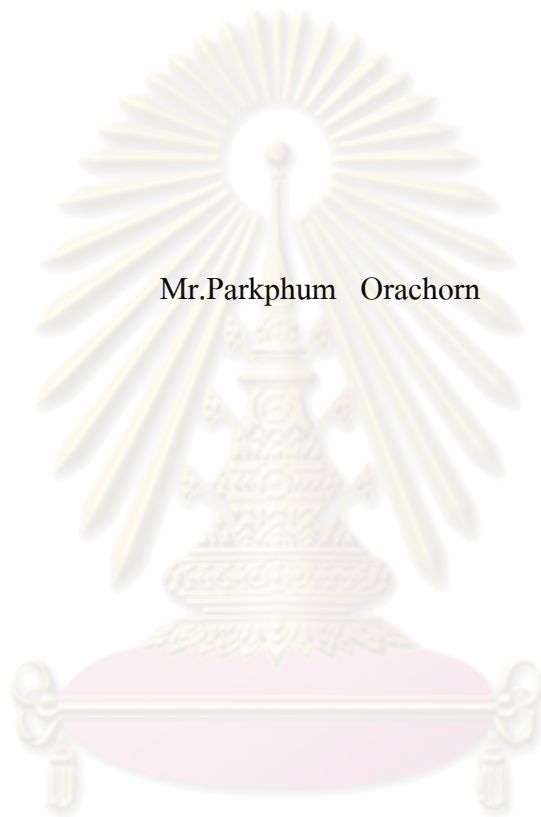
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Mr.Parkphum Orachorn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

ภาคภูมิ อรชร : การถ่ายภาพนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน. (²⁵²Cf-Based Neutron Radiography Using Neutron Imaging Plate)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :

ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ , 51 หน้า.

ได้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนจากต้นกำเนิดแคลิฟอร์เนียม-252 และใช้แผ่นบันทึกภาพสำหรับนิวตรอนแทนฟิล์ม ต้นกำเนิดนิวตรอนในขณะที่ทำการวิจัยมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ 5.75×10^6 ต่อวินาที โดยจุ่มอยู่ในน้ำระดับลึก 34 ซม. ในถังโพลิเอทิลีนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 ซม. สูง 100 ซม. ที่เติมน้ำเต็ม และใช้คอลลิเมเตอร์ยาว 30 ซม. ที่มีค่าอัตราส่วน L/D เท่ากับ 10 วางอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งให้ความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนประมาณ 4.8×10^3 ต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และอัตราส่วนแคดเมียมประมาณ 18 แผ่นบันทึกภาพที่ใช้คือ Fujifilm BAS-ND 2040 จากการวิจัยในระยะแรกพบว่า แผ่นบันทึกภาพมีความไวต่อรังสีแกมมาจากระบบผลิตเทอร์มัลนิวตรอนมาก ทำให้ได้ภาพที่มีการรบกวนจากรังสีแกมมาสูง จึงต้องออกแบบคอลลิเมเตอร์ให้มิดะกั่ว เพื่อลดทอนรังสีแกมมาที่เข้าสู่แผ่นบันทึกภาพโดยตรงจากด้านล่างของคอลลิเมเตอร์ จากนั้นได้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อตรวจสอบชิ้นงานบางชนิด เปรียบเทียบกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เทคนิคฟิล์ม และการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ผลการวิจัยพบว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 1 วันขึ้นไป ส่วนการใช้ฟิล์มไวแสง Ilford HP 5 Plus ร่วมกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE 426 ต้องใช้ระยะเวลาถ่ายภาพนานกว่า 5 เท่า ถึงแม้ว่าภาพที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพด้วยนิวตรอนมีความเข้มต่ำมาก คือ ได้ค่าความเข้มแสง (PSL) ประมาณ 0.02 ต่อตารางมิลลิเมตร แต่สามารถใช้โปรแกรมปรับภาพให้มีความสว่างและความเปรียบต่างสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานจริงยังจำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนสูงกว่าอย่างน้อย 5 ถึง 10 เท่า

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2552.....

ลายมือชื่อนิติศ..... 

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... 

##4970497721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD : NEUTRON RADIOGRAPHY / CALIFORNIUM-252 / IMAGING PLATE

PARKPHUM ORACHORN : ^{252}Cf -BASED NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON IMAGING PLATE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, 51 PP.

Neutron radiography using neutrons from ^{252}Cf source was conducted by using a neutron imaging plate as an image recorder. The neutron source emitted 5.75×10^6 neutrons per second and was submerged at 34 cm depth in a 100 cm diameter, 100 cm height polyethylene water tank. A 30 cm long neutron collimator with an L/D ratio of 10 was placed vertically to bring thermal neutrons to the specimens. The neutron flux and the cadmium ratio was found to be approximately 4.8×10^3 neutrons/cm²-s and 18 respectively. A Fujifilm BAS-ND 2040 neutron imaging plate was used. In the early stage of the research, it was found that the imaging plate was sensitive to gamma-rays from the thermal neutron production system resulting in interference to the obtained neutron images. It was therefore needed to redesign the neutron collimator by adding lead sheet to attenuate gamma-rays from reaching the imaging plate directly from the bottom part of the collimator. Neutron radiography was then carried out for inspection of some specimens in comparison to neutron radiography using film and x-ray radiography. It was found that the exposure time required for neutron radiography was about at least 1 day while using Ilford HP 5 Plus film coupled with an NE 426 neutron converter screen required 5 times longer. Even though the photostimulated light (PSL) output from the imaging plate was as low as 0.02 per mm², the image brightness and contrast could be improved by using an image processing software. However, in practice the neutron source activity needed to be increased by a factor of at least 5 – 10 times.

Department : Nuclear Technology

Field of study : Nuclear Technology

Academic year : 2009

Student's Signature: Parkphum Orachorn

Advisor's Signature: Nares Chankaw

Co-advisor's Signature: Suwit Punnachaiya

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยดูแลและให้คำแนะนำในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ที่ให้คำปรึกษา รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ผู้ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และเป็นแรงผลักดันให้สามารถดำเนินงานจนสำเร็จได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นิวตรอน.....	4
2.1.1 ชนิดของนิวตรอน.....	4
2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร.....	5
2.1.3 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron Cross Section).....	6
2.1.4 การลดพลังงานของนิวตรอน.....	9
2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	10
2.2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron Source).....	11
2.2.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron Collimator).....	12
2.2.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter Screen).....	17
2.2.4 อุปกรณ์บันทึกภาพ.....	19
2.2.5 วัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพ ของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน.....	22
3 อุปกรณ์การวิจัย.....	27
3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252.....	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	27
3.3 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Neutron Imaging Plate)	
BAS-ND 2040.....	27
3.4 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ FLA500 และเครื่องลบภาพ.....	27
3.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426.....	27
3.6 ฟิล์มบันทึกภาพ Ilford HP 5 Plus.....	27
3.7 น้ำยา Developer.....	27
3.8 น้ำยา Stop bath.....	27
3.9 น้ำยา Fixer.....	27
3.10 ตลับใส่ฟิล์ม (Film cassette).....	27
3.11 ตลับใส่แผ่นบันทึกภาพ.....	27
3.12 หัววัดนิวตรอนชนิด BF3.....	27
3.13 เครื่องวัดรังสี.....	28
3.14 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	28
3.15 แผ่นตะกั่วหนา 0.2 มิลลิเมตร.....	28
3.16 แกนอลูมิเนียมสำหรับวางคอลลิเมเตอร์.....	28
3.17 ชิ้นงานตัวอย่าง.....	28
4. วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย.....	32
4.1 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสม	
ในการถ่ายภาพ.....	32
4.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
4.1.2 ผลการวิจัย.....	33
4.1.3 วิเคราะห์ผล.....	34
4.2 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนกับ	
ความไวต่อรังสีแกมมา.....	34
4.2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
4.2.2 ผลการวิจัย.....	35
4.2.3 วิเคราะห์ผล.....	37
4.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ.....	37
4.3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการวิจัย.....	37
4.3.3 วิเคราะห์ผล.....	39
4.4 การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน	
ฟิล์ม Ilford Hp 5 และ ถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	39
4.4.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
4.4.1.1 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน.....	39
4.4.1.2 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยเทคนิคฟิล์ม	
โดยใช้ฟิล์ม Ilford HP 5 ISO400/27°	40
4.4.1.3 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบเรียลไทม์	
(Real time X-ray radiography).....	41
4.4.2 ผลการวิจัย.....	42
4.4.3 วิเคราะห์ผล.....	47
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
รายการอ้างอิง.....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ.....	7
2.2 ลำนิวตรอนกระทบเป้า.....	8
2.3 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	10
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์.....	11
2.5 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์.....	14
2.6 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคลเดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน.....	14
2.7 แผนภาพของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และความยาวของคอลลิเมเตอร์ L.....	15
2.8 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน.....	16
2.9 แสดงลักษณะการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ.....	19
2.10 แสดงลักษณะการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ.....	20
2.11 เปรียบเทียบคุณลักษณะความไวรังสีของแผ่นบันทึกภาพและ ฟิล์มถ่ายภาพรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้พลังงาน ของรังสีเบตา 1.7 MeV.....	20
2.12 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน.....	21
2.13 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์.....	21
2.14 แสดงลักษณะ Beam Purity Indicator.....	22
2.15 แสดงตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI.....	22
2.16 แสดงลักษณะ ASTM Sensitivity Indicator.....	25
2.17 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM SI.....	25
2.18 แสดงลักษณะ Test Strip B.....	26
3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่อยู่ในถังโพสิเอทีลีนบรรจุน้ำ พร้อมคอลลิเมเตอร์และคลับไสฟิล์ม.....	28
3.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	29
3.3 ฟิล์ม ilford HP5 ISO400.....	29
3.4 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ชนิด BAS-ND 2040.....	29
3.5 เครื่องอ่านภาพและเครื่องลบภาพแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน.....	29
3.6 หัวต่อ RS232 25-pin.....	30
3.7 นาฬิกาข้อมือ Adidas.....	30

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.8 ฮาร์ดดิสก์ HITACHI ขนาด 60 GB	30
3.9 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ HEUER.....	30
3.10 หัวต่อเครื่องปริ้นเตอร์.....	31
3.11 เม้าส์แบบลูกกลิ้ง.....	31
3.12 หัวต่อ 3 ทางชนิด BNC.....	31
4.1 แสดงอัตราส่วนแคดเมียมที่ระยะห่างต่างๆจากคอลลิเมเตอร์.....	34
4.2 การจัดตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนและคอลลิเมเตอร์ก่อนถ่ายภาพ.....	35
4.3 ภาพถ่ายจากคอลลิเมเตอร์ที่ไม่มีตะกั่วกำบัง.....	36
4.4 ภาพถ่ายจากคอลลิเมเตอร์ที่มีตะกั่วหนา 0.2 มิลลิเมตรกำบัง บริเวณกลาง 6 แผ่น และรอบข้างอีก 2 ชั้น.....	36
4.5 แสดงความเข้มแสงกับระยะเวลาในการถ่ายภาพที่ระยะ 4 ซม.....	38
4.6 แสดงความเข้มแสงบนโปรไฟล์ที่ตำแหน่งแบกกราวด์ของภาพ ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	38
4.7 แสดงภาพถ่ายที่ระยะเวลา 3 ซม. และ 22 ซม. (จากซ้ายไปขวา).....	39
4.8 ขั้นตอนการล้างฟิล์มขาวดำ Ilford HP 5 ISO400/27°.....	41
4.9 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบเรียลไทม์.....	41
4.10 แสดงภาพถ่ายหัวต่อ RS232 25-pin.....	42
4.11 แสดงภาพถ่ายนาฬิกาข้อมือ Adidas.....	43
4.12 แสดงภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์ ขนาด 60 GB.....	44
4.13 แสดงภาพถ่ายสายต่อปริ้นเตอร์.....	45
4.14 แสดงภาพถ่ายนาฬิกาจับเวลา.....	45
4.15 แสดงภาพถ่ายหัวต่อ 3 ทางชนิด BNC.....	45
4.16 แสดงภาพถ่ายเม้าส์.....	46

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	4
2.2 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจาก ต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด.....	9
2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงสี่ประเภท (α, n).....	12
2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	18
2.5 แสดงค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	24
2.6 แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	24
4.1 แสดงอัตราส่วนแคดเมียมที่ระยะห่างต่างๆจากคอลลิเมเตอร์.....	33
4.2 แสดงค่า PSL เฉลี่ยบริเวณแบ็กกราวนด์ ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive testing , NDT) เป็นการตรวจสอบวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุที่ถูกตรวจสอบด้วยวิธีนี้หากไม่พบข้อบกพร่องหรือพบในลักษณะที่ยอมรับได้ก็ยังสามารถนำวัสดุนั้นกลับมาใช้งานได้ ช่วยให้เกิดความปลอดภัยและประหยัดในโรงงานอุตสาหกรรม การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray radiography) และการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา (Gamma-ray radiography) ก็เป็นการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้คุณสมบัติการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา แต่ถ้านำไปตรวจสอบวัสดุที่มีส่วนประกอบของธาตุบางชนิดเช่น ไฮโดรเจน ลิเทียม โบรอน แกโดลิเนียม ฯลฯ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะให้รายละเอียดที่ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ธาตุเหล่านี้อยู่ปะปนกับธาตุอื่นๆ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงมีประโยชน์ในการตรวจสอบวัสดุอุตสาหกรรมบางชนิดที่มีส่วนประกอบเป็นพลาสติก ยาง เรซิน โพลีเมอร์ น้ำมัน น้ำ ตลอดจนองค์ประกอบธาตุเบาอื่นๆ

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในประเทศไทยยังไม่ถูกนำมาใช้งานในการตรวจสอบวัสดุ แต่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์การถ่ายภาพโดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีข้อดีคือ มีความเข้มนิวตรอนสูง แต่จะมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ไอโซโทปรังสีจึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาอย่างกว้างขวาง เพราะประหยัดค่าใช้จ่าย เคลื่อนย้ายได้ และสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพนิวตรอนคือ แคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252, ²⁵²Cf) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดแบบแตกตัวเองให้นิวตรอนออกมาอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง และการปลดปล่อยนิวตรอนสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ไอโซโทปรังสีนี้มีข้อเสียในเรื่องของความเข้มของนิวตรอนต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานและคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ไม่ดีนัก เพราะสามารถใช้ได้กับฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation) เท่านั้น ในปัจจุบันมีแผ่นบันทึกภาพ (imaging plate) ที่มีความไวสูงกว่าฟิล์มมาก และสามารถให้รายละเอียดของภาพดีเทียบเท่ากับเทคนิคการใช้ฟิล์ม จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพโดยใช้นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 เพื่อเป็นแนวทางการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Neutron imaging plate) ใช้เวลาในการ

ถ่ายภาพน้อยกว่าการถ่ายภาพโดยใช้แก๊สโคลิเนียมกับฟิล์มแต่ให้คุณภาพของภาพทัดเทียมกัน ดังนั้นหากใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนกับต้นกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 จะช่วยให้เกิดประโยชน์กับงานในด้านอุตสาหกรรมในโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจาก Cf-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาเทคนิคและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจาก Cf-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน
2. ทดสอบและปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้และเปรียบเทียบกับเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้กันอยู่ทั่วไป
3. ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นวัสดุอุตสาหกรรม หรือ วัสดุทั่วไป

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาเทคนิคและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจาก Cf-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน
3. ทดสอบและปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้และเปรียบเทียบกับเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้กันอยู่ทั่วไป
4. ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นวัสดุอุตสาหกรรม หรือ วัสดุทั่วไป
5. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจาก Cf-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายในงานด้านต่าง ๆ ได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Heinz von Seggern , 1998 , Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of present understanding , ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ (imaging plate) บันทึกภาพจากรังสีเอกซ์ และนำไปอ่านภาพด้วยเลเซอร์ He-Ne และข้อมูลที่ได้จะถูกส่งผ่านหลอดทวีคูณแสง(photomultiplier) และA/D converter เพื่อนำไปแสดงข้อมูลบนจอ

2. R.Pugliesi a , E.Lehmann b , 2005 , Neutron-induced electron radiography using an imaging plate , ได้ทำการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ (imaging plate) โดยการใช้นิวตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอน และบันทึกภาพที่ได้ ผลปรากฏว่าได้ภาพที่มีคุณสมบัติดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-ray film)

3. ศราวุธ ใจเย็น , 2002 , การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252 , ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบถ่ายภาพนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดแคลิฟอร์เนียม-252 และบันทึกภาพโดยฟิล์มไวแสง พบว่านิวตรอนให้ภาพถ่ายในส่วนของยางและพลาสติกได้ดีกว่าภาพจากรังสีเอกซ์

4. E.H. Lehmann¹, M. Jaggi¹, D. Kramer², H. Kolbe³ , High Resolution Neutron Imaging Using the Imaging Plate Technology , ได้ใช้เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ FLA-8000 from FUJI เพื่อทดสอบความละเอียดของภาพถ่ายนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนจาก NEUTRA ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 300 วินาที ซึ่งให้รายละเอียดของภาพดีกว่า BAS-2500

5. C D Gregory, J Howe, C Courtois, D M Chambersa), I Hall, N C Woolsey , 2004 , Comparison of imaging plate, CCD, and film detectors , ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแผ่นบันทึกภาพ ฟิล์ม และ CCD พบว่า กล้อง CCD มีขีดจำกัดในขนาดของพิกเซลที่ 27 μm ส่วนแผ่นบันทึกภาพ และฟิล์มให้ขนาดของพิกเซลที่ 5 μm ซึ่ง CCD ให้ signal-to-noise ratio และมีความไวสูงกว่า แต่แผ่นบันทึกภาพและฟิล์มให้รายละเอียดของภาพดีกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2475 ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นฟอโลเนียม (Polonium foil) มารวมไว้กับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยออกจากฟอโลเนียมเข้าชนกับแผ่นเบริลเลียม มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาซึ่งเรียกว่า อนุภาคนิวตรอน อนุภาคนิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย 1_0n มีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ 1.67492×10^{-27} กิโลกรัม มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา และอนุภาคแอนตินิวตริโน โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที

2.1.1 ชนิดของนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้แต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ด้วยการหน่วงนิวตรอน (Neutron Moderation) ซึ่งเป็นการลดพลังงานของนิวตรอนจากพลังงานตั้งต้น โดยการให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ แกรไฟต์ และโพลีเอทิลีน เป็นต้น อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งอาจมีช่วงพลังงานที่เหลื่อมกัน

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน[1]

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0 eV – 10^3 eV
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV – 0.3 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	0.3 eV – 10^4 eV
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1eV – 10^2 eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	10^3 eV – 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	>20 MeV

2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงสามารถเข้าทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียส อันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.2.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) การชนแบบนี้ นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สภาวะปกติ (Ground state) แล้วนิวตรอนกระเจิงออกมาโดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สถานะพื้น การชนแบบนี้เป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนมีค่าคงที่ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, n)

2.1.2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การชนแบบนี้จะมีลักษณะการชนคล้ายแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชน กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound Nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา การชนแบบนี้ไม่ยืดหยุ่นเป็น Threshold Reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, n')

2.1.2.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture) อันตรกิริยานี้ นิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound Nucleus) ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติ จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า “Captured Gamma – rays หรือ Neutron Captured Gamma – ray” ซึ่งอาจมี 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน (Neutron activation analysis : NAA) สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, γ)

2.1.2.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, f)

2.1.2.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge - Particle Emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด แล้วรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ จากนั้นจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 และปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดนิวตรอนและการกำบังรังสีนิวตรอน

2.1.2.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron - Producing Reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยานี้จะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา $(n, 2n)$ ปฏิกิริยา $(n, 3n)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reaction	Before	Intermediate	After
Elastic Scattering	(n,n)		
Inelastic Scattering (n,n') or (n,n',γ)	(n,n')		
Capture (Radiative Capture) (n,γ) or $(n,n'\gamma)$	(n,γ)		
Fission	(n,f)		
Charged Particle Emission	(n,p)		
	(n,α)		
Neutron Production	$(n,2n)$		
	$(n,3n)$		

รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ [1]

2.1.3 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron Cross Section)

ภาคตัดขวางของนิวตรอน คือ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง การที่อันตรกิริยาแบบใดจะเกิดขึ้นได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสและพลังงานของนิวตรอน ค่าภาคตัดขวางรวม (Total Cross Section : σ_t) ของนิวเคลียสชนิดหนึ่งคือผลรวมของภาคตัดขวางรวมของนิวเคลียสต่ออันตรกิริยาทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ นั่นคือ

$$\sigma_t = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} + \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} + \dots \quad (2.1)$$

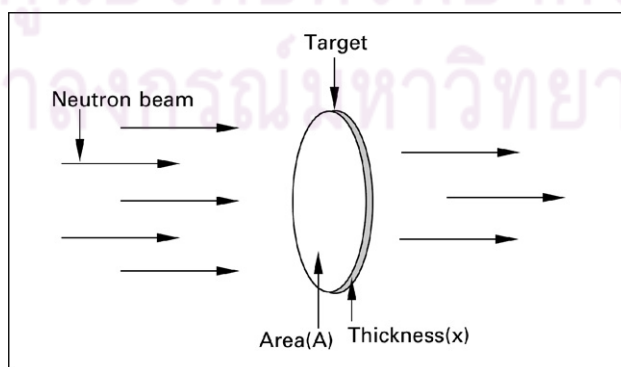
- เมื่อ $\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น
 $\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น
 $\sigma_{(n,\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน
 $\sigma_{(n,\alpha)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา
 $\sigma_{(n,p)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน
 $\sigma_{(n,f)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแตกตัว

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรก คือ ภาคตัดขวางการกระเจิง (Scattering Cross Section : σ_s) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สองคือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน (Absorption Cross Section : σ_a) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของอันตรกิริยาอื่นๆ นอกเหนือจากอันตรกิริยาในกลุ่มแรก

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}\Sigma_{mix} &= \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \\ \Sigma_{mix} &= N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots\end{aligned}\quad (2.2)$$

Σ_{mix} คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุผสม
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 N_1, N_2, N_3, \dots คือ ความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 คำนวณการชนเป้า[1]

2.1.4 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้ มีพลังงานในช่วง 2 MeV ถึง 14 MeV ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการพลังงานในช่วง 0.01 ถึง 10 keV เท่านั้น จึงจำเป็นต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้สารหน่วงนิวตรอน (Neutron Moderator) ที่เหมาะสม ซึ่งมีภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ เบริลเลียม โพลีเอทิลีน

นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด ทำให้ลดพลังงานลงได้โดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอน จะทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วงนิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มข้นนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (Thermalization Factor)” โดย

$$\text{เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm}^2\text{-s)}} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด[1]

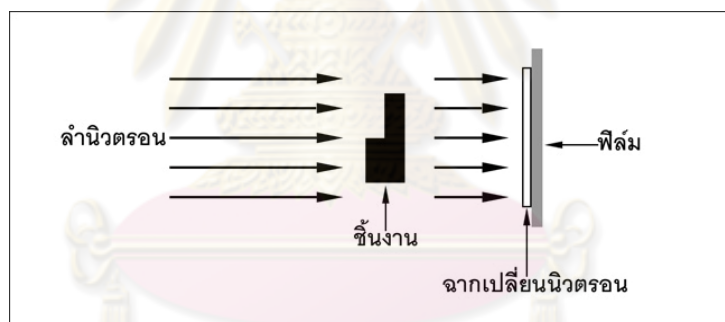
พลังงานนิวตรอน	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์
0.024 MeV	$^{124}\text{Sb-Be}$	$^9\text{Be}(\gamma, n)\text{Be}$	50
2 MeV	^{252}Cf	self fission	100
4.5 MeV	$^{241}\text{Am-Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$	200
6.5 MeV*	เครื่องเร่งอนุภาค	$^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$	300
14 MeV**	เครื่องเร่งอนุภาค	$^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$	650

หมายเหตุ * เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 2.8 MeV

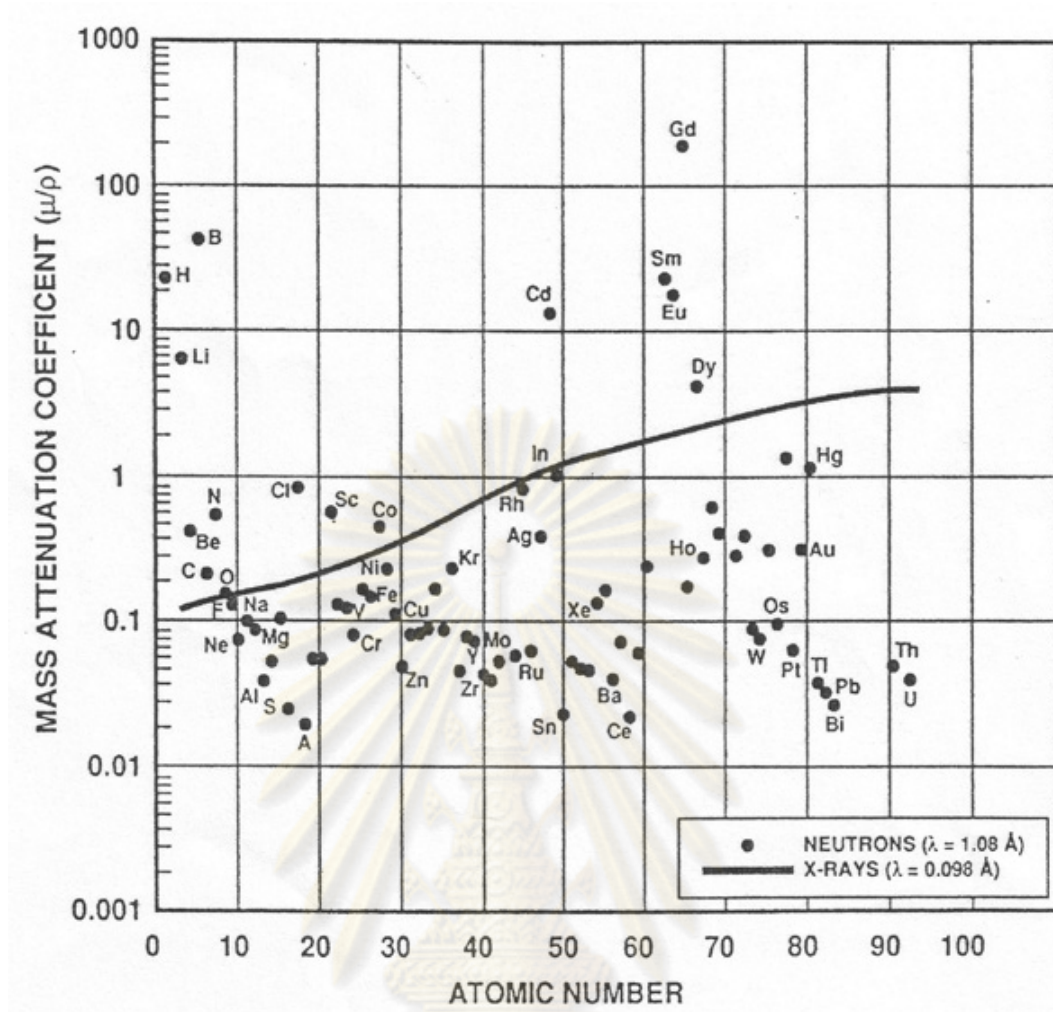
** เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 150 MeV

2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive : NDT) วิธีหนึ่ง อาศัยหลักการส่งผ่านนิวตรอนผ่านชิ้นงานแล้วทำการบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมา โดยมีลักษณะการจัดวางดังรูปที่ 2.3 ความเข้มของนิวตรอนที่ลดลงขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของวัสดุในชิ้นงาน ภาพที่ถ่ายได้จึงแสดงโครงสร้างภายในตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชิ้นงานออกมา ซึ่งมีลักษณะกระบวนการคล้ายกันกับวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา แต่ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่ใช้ในการถ่ายภาพ (สูงกว่า 100 keV) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุ แต่สำหรับรังสีนิวตรอน สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนจะไม่ขึ้นตามเลขอะตอม แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนซ้ำที่พลังงาน 0.0253 eV และของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 125 keV กับเลขอะตอมของธาตุ ดังนั้นภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยนิวตรอนจึงแตกต่างกับของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ทำให้ได้ภาพในส่วนที่เป็นธาตุคนละชนิดแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.3 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน[1]
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์ [1]

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

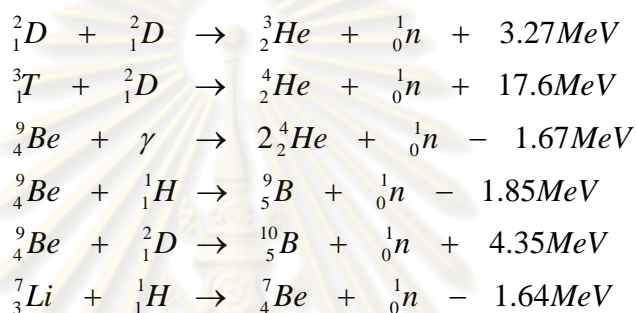
2.2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron Source) ที่ใช้ในการถ่ายภาพแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มของนิวตรอนสูงสุด โดยนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวของ ยูเรเนียม-235 พลังงานของนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวมีค่าประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งมีน้ำเป็นตัวนำพลังงานของนิวตรอน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ดีและมีการใช้แพร่หลายสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในปัจจุบัน เพราะสามารถนำนิวตรอนเข้าในช่วงความเข้มสูง 10^7 ถึง 10^8 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีมาใช้ในการถ่ายภาพ จึงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้น โดยให้ความคมชัดของภาพสูง

2.2.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในการเร่งอนุภาคที่มีประจุหรือนิวเคลียสชนิดหนึ่งให้มีพลังงานสูงเพื่อไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งที่เป็นเป้า(Target) ทำให้ปลดปล่อยนิวตรอนออกมา เครื่องเร่งอนุภาคที่เป็นพื้นฐานของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็ว (Fast Neutron Generator) และอุปกรณ์สำหรับหน่วงนิวตรอนเร็ว เพื่อหน่วงนิวตรอนภายในนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ปฏิกริยาที่สำคัญได้แก่



2.2.1.3 ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope neutron source) ได้แก่

2.2.1.3.1 ประเภท (α, n) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (α, n) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น เรเดียม-226 พลูโทเนียม-238 อะเมริเซียม-241 นำมาผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เบริลเลียม-9 เนื่องจากมีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดประเภทนี้ประมาณ 2.2×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n) [2]

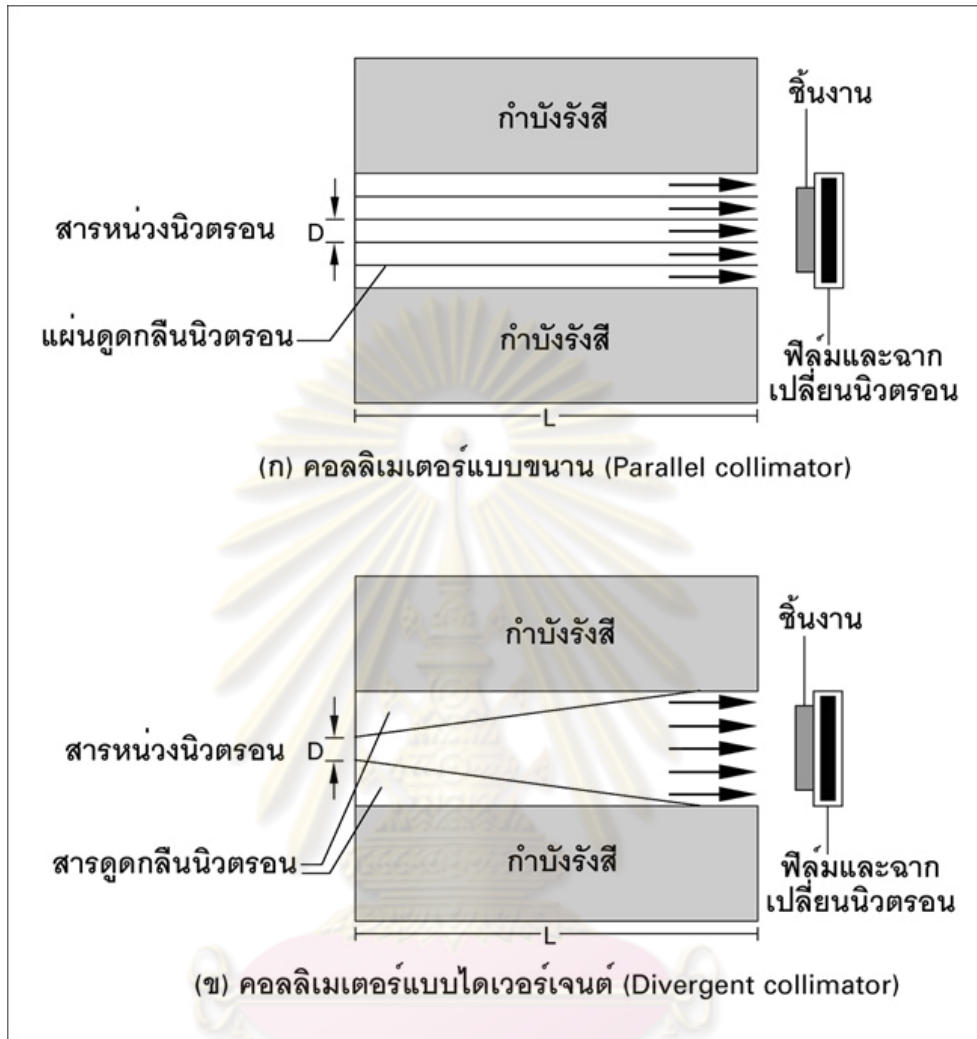
Neutron Source	Half Life	Neutron Yield($n.s^{-1}g^{-1}$)	Neutron Energy(MeV)
${}^{210}\text{Po-Be}$	138 วัน	1.28×10^{10}	4.3
${}^{241}\text{Am-Be}$	458 ปี	1×10^7	~ 4
${}^{226}\text{Ra-Be}$	1,620 ปี	1.3×10^7	~ 4
${}^{227}\text{Ac-Be}$	21.8 ปี	1.1×10^9	~ 4
${}^{228}\text{Th-Be}$	1.91 ปี	1.7×10^{10}	~ 4

2.2.1.3.2 ประเภท (γ, n) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา (γ, n) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ผสมกับเบริลเลียมเมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียม-9 จะมีนิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV จะได้อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของพลวง-124 ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันนัก เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน

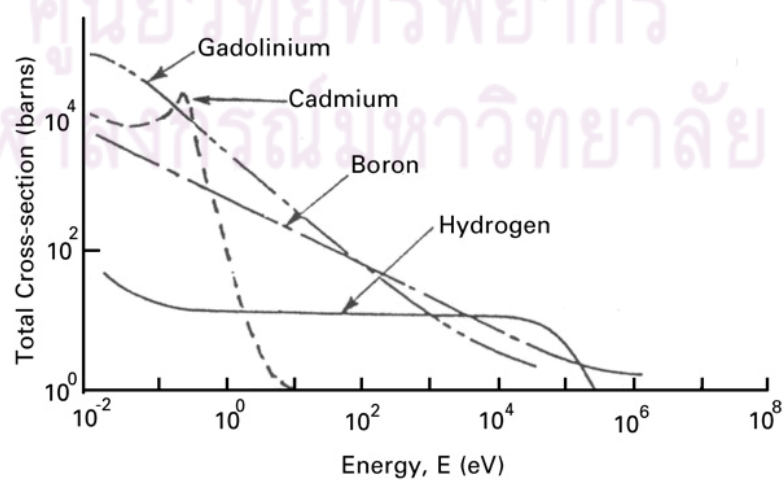
2.2.1.3.3 ประเภทแตกตัวเอง (Self Fission หรือ Spontaneous Fission) ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิด ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 มีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 สูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) คือประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของแคลิฟอร์เนียม-252 นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้ เช่น พลูโทเนียม-236 พลูโทเนียม-238 ยูเรเนียม-238 แคลิฟอร์เนียม-254 เป็นต้น

2.2.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron Collimator)

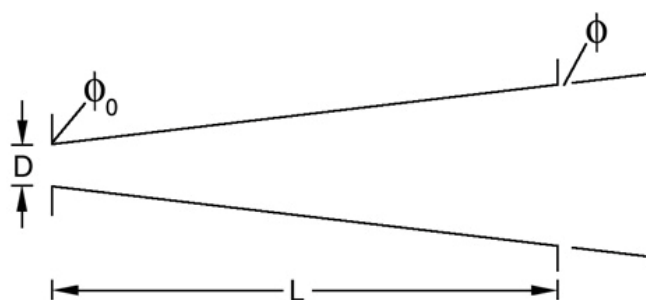
เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำลำนิวตรอนจากระบบแหล่งพลังงานนิวตรอนออกมาใช้ในการถ่ายภาพ ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อาจมีลักษณะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 5 แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เรียกว่า “ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (Divergent collimator)” โดยที่ผนังของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ จะผสมด้วยสารดูดจับนิวตรอน เช่น โบรอน ลิเทียม แคลเดเมียม แกโดลิเนียม เพื่อดูดจับนิวตรอนไม่ให้เข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้าง และผนังด้านในของคอลลิเมเตอร์อาจจับด้วยสารดูดจับนิวตรอนเพื่อดูดจับนิวตรอนในคอลลิเมเตอร์ที่ชนผนังไม่ให้กระเจิงกลับเข้าไปในคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่วิ่งออกมาตามแนวแกนในลักษณะลำแสงที่บานออกวิ่งไปกระทบชิ้นงาน โดยภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคลเดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์



รูปที่ 2.6 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน



รูปที่ 2.7 แผนภาพของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และความยาวของคอลลิเมเตอร์ L

จากรูปที่ 2.7 นิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) ที่ปลายท่อบังคับลำนิวตรอนตรงตำแหน่งซึ่งงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าคอลลิเมเตอร์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบวงกลม

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.5)$$

ดังนั้นสมการ (2.4) สามารถเขียนได้เป็น

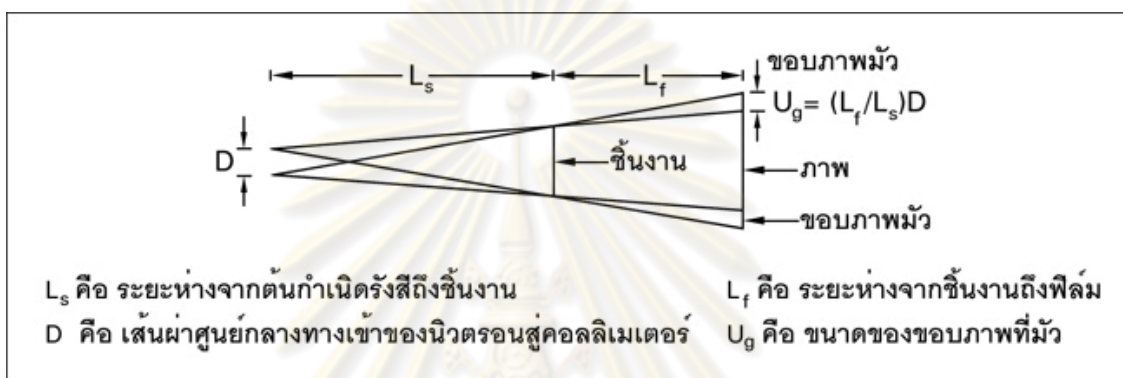
$$\phi = \frac{\phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\phi_0 \left(\frac{D}{L}\right)^2}{16} \quad (2.6)$$

L/D เรียกว่า “อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ (Collimator Ratio)” เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละคอลลิเมเตอร์ อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทางเข้าและทางออกของคอลลิเมเตอร์ เป็น

$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\phi_0}{\phi} = 16 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) จะเห็นได้ชัดว่านิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกจะลดลง เมื่อคอลลิเมเตอร์มีความยาว (L) เพิ่มขึ้น และ ขนาดของทางเข้า (D) ลดลง

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ระยะเวลาสั้น จำเป็นต้องให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบวัตถุมีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของคอลลิเมเตอร์ และเพิ่มขนาดทางเข้าของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายลดลง



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน[1]

จากรูปที่ 8 จะได้

$$U_g = \frac{D}{L_s} L_f \quad (2.8)$$

โดยปกติจะวางฟิล์มติดกับชิ้นงาน ทำให้ $L_f \gg L_s$ และ $L_s \approx L$ ดังนั้นสมการ (5) สามารถเขียนได้เป็น

$$U_g = \left(\frac{D}{L} \right) L_f \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่า ขนาดของขอบภาพที่มัว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ L/D โดยที่ขนาดของขอบภาพที่มัวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพถ่ายนิวตรอนที่คมชัด จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์และวางวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพให้อยู่ชิดกับฟิล์มบันทึกภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) หรือ ลดขนาดทางเข้าของนิวตรอน (D) ซึ่งทั้งสองกรณีนี้มีผลทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์ลดลง จึงต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น

2.2.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter Screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอน ทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสี อนุภาค หรือแสง ที่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชิ้นงาน เนื่องจากนิวตรอนเกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้น้อยมาก การบันทึกภาพจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มี ภาวตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนได้สูง เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของ นิวตรอนที่ผ่านชิ้นงาน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนได้ดี และ สามารถปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ (Secondary Radiation) ที่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสี แกมมา รังสีบีตา หรือรังสีแอลฟา เมื่อรังสีทุติยภูมิตกกระทบฟิล์มซึ่งประกบอยู่กับฉากเปลี่ยน นิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพบนฟิล์มได้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้ คือ

- ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ (Metallic Foil Neutron Converter Screen) แผ่นโลหะที่ใช้จะมีภาวตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียส ของธาตุแล้วจะมีการปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาทันที ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ ปฏิกิริยา (n, γ) วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนแสดงดังตารางที่ 2.4

- ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง (Light Emitting Neutron Converter Screen) เป็นฉากที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรก และมีความไวมากที่สุด ซึ่ง ประกอบด้วย สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron Absorber Material) และสารเรืองแสง (Phosphorescent Material) สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ลิเทียม-6 และ โบรอน-10 เนื่องจาก ให้รังสีแอลฟาลังงานสูง ส่วนสารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) ซึ่งให้แสงในช่วง แสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับ ฟิล์มเอกซ์เรย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

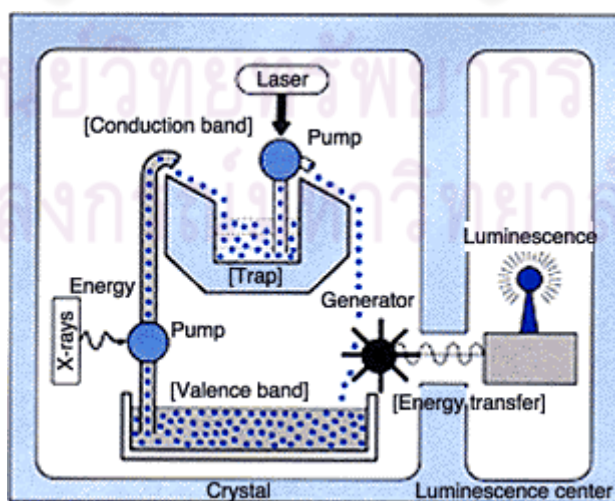
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน[2]

วัสดุ	ปฏิกิริยา	ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน (barn)	ครึ่งชีวิต	รังสีที่ปลดปล่อย	พลังงานของรังสี (MeV)
ลิเทียม	${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	935	stable	α	4.7
โบรอน	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	3,873	stable	α	2.3
โรเดียม	${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104}\text{Rh}$	144	43 s	β	2.41
	${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104\text{m}}\text{Rh}$	11	4.4 m	β	0.5
เงิน	${}^{107}\text{Ag}(n, \gamma){}^{108}\text{Ag}$	44	2.4 m	β	1.64, 0.43
	${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110}\text{Ag}$	110	24.5 s	β	2.87
	${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110\text{m}}\text{Ag}$	3	254 d	β	1.5
แคดเมียม	${}^{113}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}\text{Cd}$	20,000	stable	γ	9
อินเดียม	${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116}\text{In}$	45	14 s	β	3.3, 0.44
	${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116\text{m}}\text{In}$	154	54 m	β	1.0, 0.42
ซามาเรียม	${}^{149}\text{Sm}(n, \gamma){}^{150}\text{Sm}$	41,500	stable	γ	
	${}^{152}\text{Sm}(n, \gamma){}^{153}\text{Sm}$	210	46.7 h	β	0.8, 0.1
แกโดลิเนียม	${}^{155}\text{Gd}(n, \gamma){}^{156}\text{Gd}$	58,000	stable	Electron	0.14
	${}^{157}\text{Gd}(n, \gamma){}^{158}\text{Gd}$	240,000	stable	Electron	0.13
ดิสโพรเซียม	${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165}\text{Dy}$	800	2.3 h	β	1.29, 0.095
	${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165\text{m}}\text{Dy}$	2,000	1.26 m	β	1.04, 1.108
ทอง	${}^{197}\text{Au}(n, \gamma){}^{198}\text{Au}$	98.8	2.69 d	β	0.962, 0.412

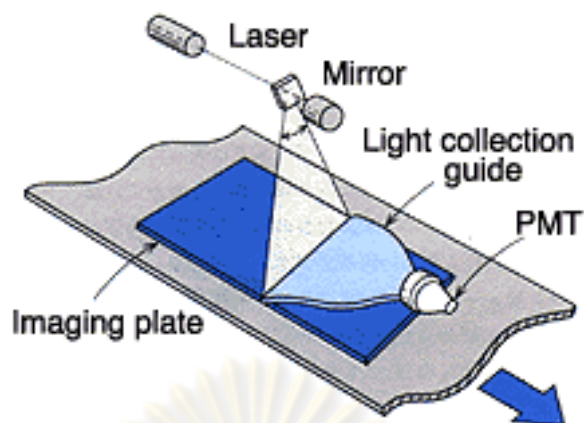
2.2.4 อุปกรณ์บันทึกภาพ

- फिल्मเอกเรย์ หรือ फिल्मถ่ายภาพ เป็นอุปกรณ์บันทึกภาพที่นิยมบันทึกภาพ โดยสามารถใช้ได้กับจากเปลี่ยนนิวตรอนประเภทแผ่นโลหะ และประเภทปลดปล่อยแสง ความคมชัดของภาพขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดเงินโบรไมด์ (Silver Bromide : AgBr) ที่จับอยู่บนผิวแผ่นฟิล์ม ส่วนความเปรียบต่างขึ้นอยู่กับความชันของกราฟลักษณะเฉพาะฟิล์ม นอกจากนี้กระบวนการล้างฟิล์มยังมีผลต่อความเปรียบต่างของภาพด้วย โดยกระบวนการล้างฟิล์มเป็นกระบวนการของปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ผลึกเงินโบรไมด์ที่ถูกรังสีหรือแสงเปลี่ยนเป็นโลหะเงินสีดำ และชะล้างเงินโบรไมด์ที่ไม่ถูกรังสีหรือแสง

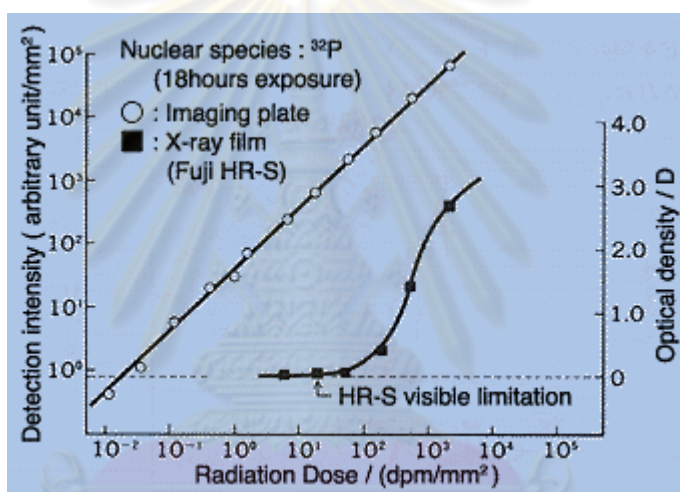
- แผ่นบันทึกภาพสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน จะใช้ Gd_2O_3 ผสมกับผลึก BaFBr(Eu) เคลือบอย่างสม่ำเสมอบนฐานรองโพลิเอสเตอร์ที่มีความยืดหยุ่น โดย Gd_2O_3 จะทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเป็นคอนเวอชันชันอิเล็กตรอน และจะถ่ายเทพลังงานให้กับผลึก BaFBr(Eu) ซึ่งจะเก็บพลังงานนี้ไว้ในระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อใช้แสงเลเซอร์ชนิด He-Ne ความยาวคลื่นประมาณ 633 นาโนเมตร จากหลอดกำเนิดแสงเลเซอร์ สแกนผ่านแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแล้ว จะทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานนั้นถูกปลดปล่อยออกมา พร้อมให้โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร กระบวนการนี้เรียกว่า การกระตุ้นการเกิดแสง (Photo Stimulate Luminescence) แสงที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกเก็บไว้และนำไปสร้างภาพในลักษณะที่เป็นดิจิทัลต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ[3]



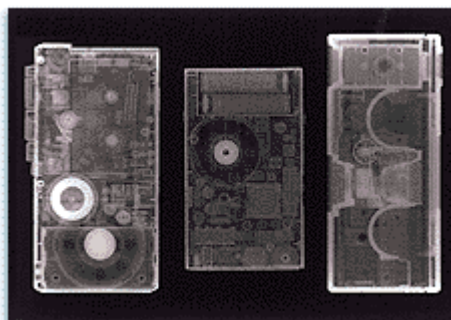
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบคุณลักษณะความไวรังสีของแผ่นบันทึกภาพและฟิล์มถ่ายภาพรังสีโดยใช้ต้น

กำเนิดฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้พลังงานของรังสีเบตา 1.7 MeV [3]

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน

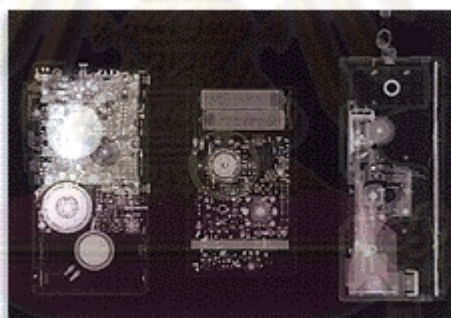
Neutron Generator : TRIGA-II 100 kW, Nuclear reactor, Rikkyo University

Irradiation : Thermal neutron , Fluence : 1.4×10^8 neutron/cm² (100 kW)

Time : 90 msec

Imaging Plate : BAS-ND

Scanner : BAS-5000



รูปที่ 2.13 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์

X-ray Generator : KXO50G, Invertor, Komazawa, Junior College

Irradiation : Acceleration Voltage 150 kV , 260 mA

Time : 71 msec

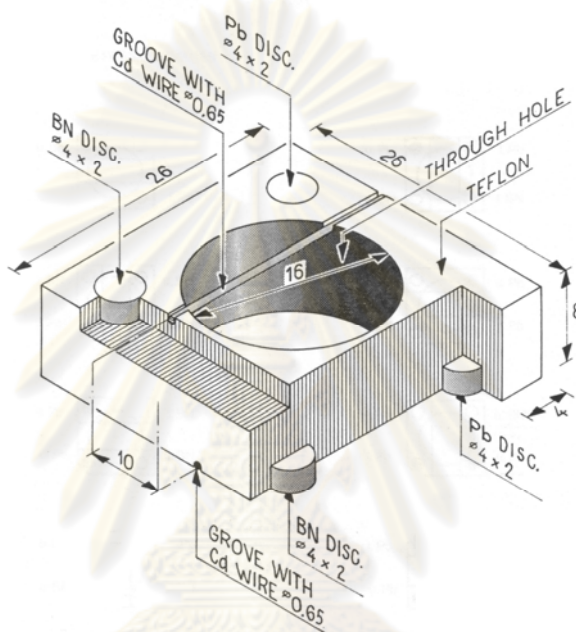
Filter : 1.5 mm Al + 0.1 Cu

Imaging Plate : BAS-SR

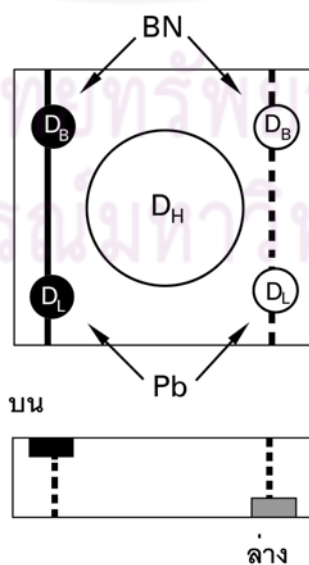
Scanner : BAS-5000 [2]

2.2.5 วัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวัตถุตัวอย่างที่ได้รับการออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ Beam Purity Indicator[1]



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI [1]

- การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator (BPI)

Beam Purity Indicator ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตรหนา 8 มิลลิเมตร ตรงกลางจะเป็นรูปกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.9 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบมาสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว จัดทำเป็นรูปเหรียญกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ลวดแคดเมียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.14

การวิเคราะห์ทำได้โดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูปที่ 2.15 โดย

- D_B คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
- D_L คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
- D_H คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- D_T คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- ΔD_L คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- ΔD_B คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มของฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

- 1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron, NC)

$$NC = \frac{D_H - (high D_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (2.10)$$

- 2) ปริมาณนิวตรอนกระเจิง (Effective scatter neutron content, S)

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

- 3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = \left(\frac{D_T - low D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

- 4) ปริมาณรังสีจาก Pair production (Effective pair production content, P)

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

- การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole : H) ที่เจาะเป็นช่องกลม และช่องว่าง (Gap : G) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลักต่างๆ คือ อะครีลิคเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียม และตะกั่ว โดยมีความหนาขนาดของรูและช่องว่างต่างๆ กัน โดยแสดงดังตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

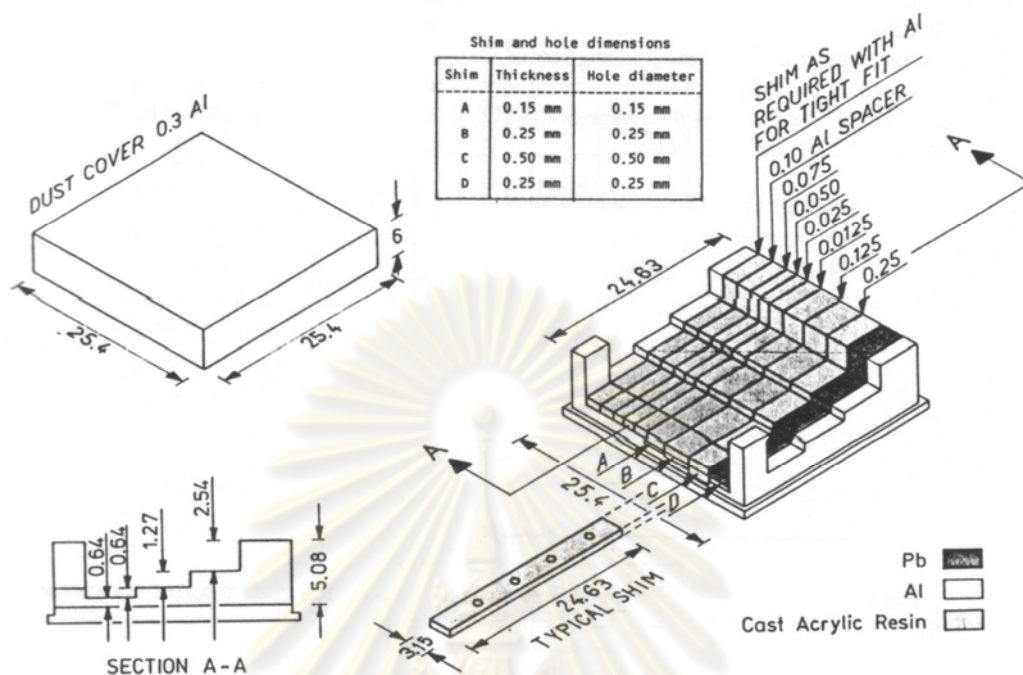
ตารางที่ 2.5 แสดงค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

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

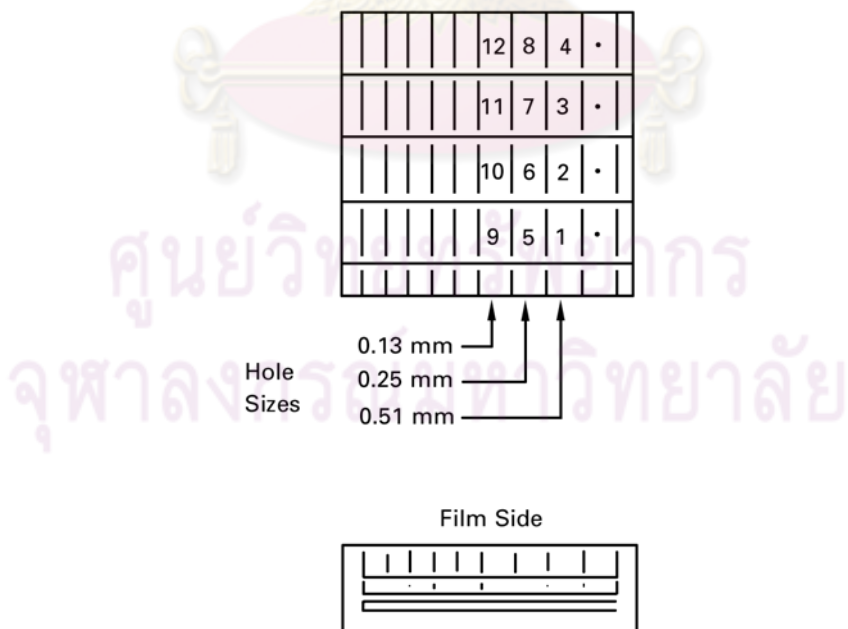
* เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงความหนาของภาพ ASTM SI ตารางที่ 2.6 แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI [1]

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

* เป็นขนาดของรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลางมากที่สุดที่มองเห็นได้ในภาพถ่าย ASTM SI



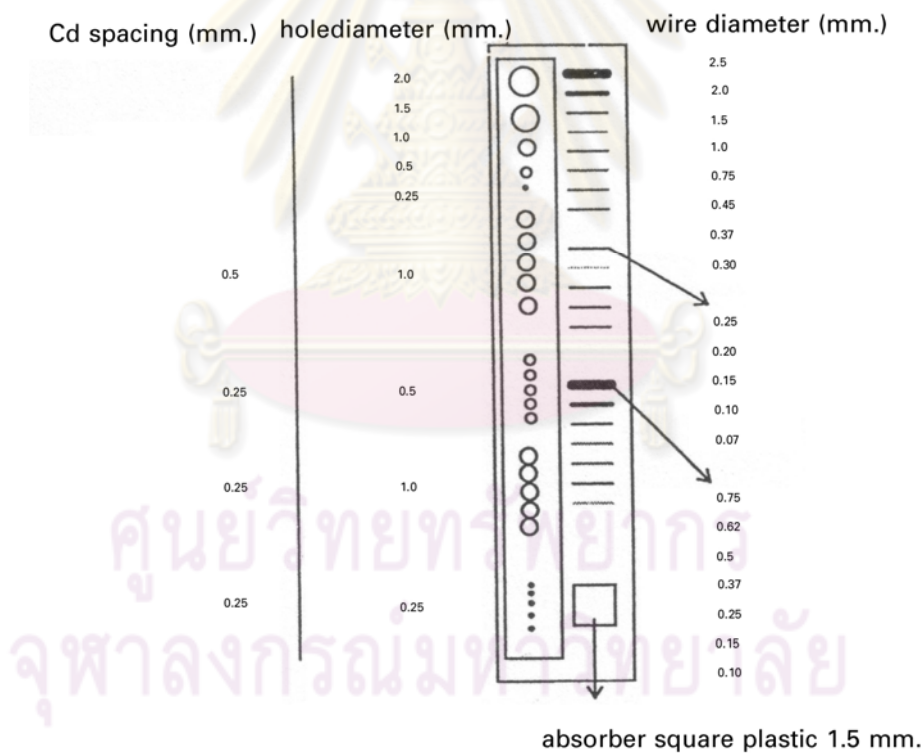
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ ASTM Sensitivity Indicator [2]



รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM SI [2]

- การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไวของการถ่ายภาพด้วย Test strip B

Test strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัดและความเปรียบต่างของภาพจากขนาดของวัตถุที่มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตรเป็นฐาน แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตรเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 มิลลิเมตร 1 ชุด และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0, 0.5, 1.0, 0.25 มิลลิเมตร ขนาดละ 5 รู ขนาดของรูที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ คือ รีโซลูชันของภาพ เส้นพลาสติกยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 13 เส้น ได้แก่ 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.45, 0.37, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.07 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้นำมาพิจารณา รีโซลูชันและความเปรียบต่างของภาพ เส้นแคดเมียมความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งนำมาพิจารณาความเปรียบต่างของภาพ



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ Test Strip B [2]

บทที่ 3

อุปกรณ์การวิจัย

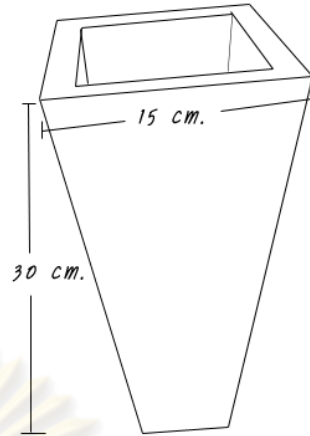
อุปกรณ์การวิจัย ประกอบด้วย

- 3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 20 ไมโครกรัม บรรจุอยู่ปลายท่อและจุ่มอยู่ในถังพลาสติกสองถังซ้อนกัน ถังนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 ซม. สูง 122 ซม. (ปริมาตร 1,500 ลิตร) ถังในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 ซม. สูง 105 ซม. (ปริมาตร 1,000 ลิตร) เพื่อความปลอดภัยในกรณีถึงรั่ว ถังในบรรจุน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นสารหน่วงนิวตรอนและกำบังรังสี
- 3.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ติดตั้งที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
- 3.3 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Neutron Imaging Plate) BAS-ND 2040 ผลิตโดยบริษัทฟูจิฟิล์ม ขนาด 20x40 ซม.
- 3.4 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ FLA500 และเครื่องลบภาพ ผลิตโดย บริษัทฟูจิฟิล์ม พร้อมโปรแกรม Image Reader และ โปรแกรม Image Gauge
- 3.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 ซึ่งเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเรืองแสง ผลิตโดยบริษัท NE Technology ประเทศอังกฤษ มีส่วนผสมเป็นลิเทียมฟลูออไรด์และสังกะสีซัลไฟด์ (LiF/ZnS)
- 3.6 ฟิล์มบันทึกภาพ Ilford HP 5 Plus ผลิตโดยประเทศอังกฤษ เป็นฟิล์มขาวดำ ขนาด 10 x 12.7 ซม. ซึ่งความไวแสงปกติ คือ ISO 400/27° แต่สามารถเพิ่มความไวแสงให้เป็น ISO800 ได้ด้วยกระบวนการล้างภาพ
- 3.7 น้ำยา Developer ยี่ห้อ Ilford ผลิตโดยบริษัท Ilford
- 3.8 น้ำยา Stop bath ในการทดลองใช้น้ำประปา
- 3.9 น้ำยา Fixer ยี่ห้อ Ilford ของบริษัท Ilford
- 3.10 คลับใส่ฟิล์ม (Film cassette) คลับใส่ฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์ขึ้นจากแผ่นโลหะอะลูมิเนียม ขนาด 33x33x0.8 ซม.
- 3.11 คลับใส่แผ่นบันทึกภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์ขึ้นจากแผ่นโลหะอะลูมิเนียม ขนาด 22 x 40 x 0.5 ซม.
- 3.12 หัววัดนิวตรอนชนิด BF₃

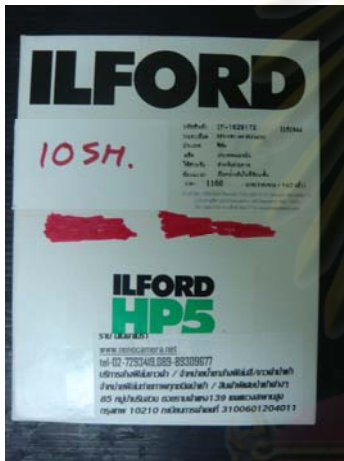
- 3.13 เครื่องนับวัดรังสีLudlum ซึ่งมีเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว เครื่องวัดรังสี วงจรตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าสัณยสูงอยู่ในตัวเครื่องแล้ว
- 3.14 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ที่ผลิตจาก โพลีเอทิลีน ผสมกับกรดบอริก โดยมีอัตราส่วนของโพลีเอทิลีนเท่ากับ 10 และมี L/D เท่ากับ 10 ความกว้างของช่องที่ให้นิวตรอนผ่านเท่ากับ 3 ซม.
- 3.15 แผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 1 x 3 เมตร หุ้มรอบคอลลิเมเตอร์ 2 ชั้น และตัดเป็นชิ้นเพื่อวางตรงกลางของคอลลิเมเตอร์ ขนาด 9x9 จำนวน 6 แผ่น
- 3.16 แกนอลูมิเนียมสำหรับวางคอลลิเมเตอร์ ยาว 120 ซม.
- 3.17 ชิ้นงานตัวอย่าง
- หัวต่อ 25-pin RS232
 - นาฬิกาข้อมือ Adidas
 - ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk drive) ขนาดเล็ก หน่วยความจำ 60 GB ผลิตโดยบริษัท HITACHI รุ่น HTS514060G9AT00 ขนาด 2.5 นิ้ว
 - นาฬิกาจับเวลาฮีท้อ HEUER
 - หัวต่อปรีนเตอร์
 - เม้าส์แบบลูกกลิ้งพร้อมหัวต่อ DB-9
 - หัวต่อแบบ 3 ทาง ชนิด BNC



รูปที่ 3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่อยู่ในถังโพลีเอทิลีนบรรจุน้ำ พร้อมคอลลิเมเตอร์และตลับใส่ฟิล์ม



รูปที่ 3.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์หุ้มด้วยตะกั่วหนา 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ฟิล์ม ilford HP5 ISO400

รูปที่ 3.4 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ชนิด BAS-ND 2040



รูปที่ 3.5 เครื่องอ่านภาพและเครื่องลบภาพแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน



รูปที่ 3.6 หัวต่อ RS232 25-pin



รูปที่ 3.7 นาฬิกาข้อมือ Adidas



รูปที่ 3.8 ฮาร์ดดิสก์ HITACHI ขนาด 60 GB



รูปที่ 3.9 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ HEUER

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 หัวต่อปริ้นเตอร์



รูปที่ 3.11 เมาส์แบบลูกกลิ้งและหัวต่อแบบ DB-9



รูปที่ 3.12 หัวต่อแบบ 3ทางชนิด BNC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ

4.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ โดยใช้หัววัดชนิด BF₃ ซึ่งเป็นหัววัดนิวตรอน และ เครื่องวัดรังสีซึ่งมีเครื่องตั้งเวลาและแหล่งจ่ายไฟอยู่ในตัว ทำการวัดนิวตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเริ่มจากบริเวณชิดกับคอลลิเมเตอร์เพื่อหาอัตราส่วนแคดเมียม (Cd ratio) โดย

ก. จัดระบบวัดนิวตรอน โดยใช้หัววัด BF₃ และเครื่องนับวัดที่มีแหล่งจ่ายไฟและตัวตั้งเวลาอยู่ในตัวอยู่แล้ว

ข. วัดรีเลทีฟฟลักซ์ (Relative Flux) โดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มี L/D เท่ากับ 10 และขนาดของรูที่ให้นิวตรอนเข้าเท่ากับ 3x3 ซม. โดยใช้เวลาในการวัด 2 นาที

ค. เปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ตั้งแต่ 0-15 ซม. จากคอลลิเมเตอร์ โดยเปลี่ยนตำแหน่งครั้งละ 1 ซม.

ง. นำแผ่นแคดเมียม มาหุ้มหัววัด แล้วทำการวัดเช่นเดียวกับในข้อ ค.

จ. คำนวณอัตราส่วนแคดเมียมโดย

$$\text{อัตราส่วนแคดเมียม} = \frac{\text{จำนวนนับนิวตรอนเมื่อไม่มีแคดเมียมปิด}}{\text{จำนวนนับนิวตรอนเมื่อมีแผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตรปิด}}$$

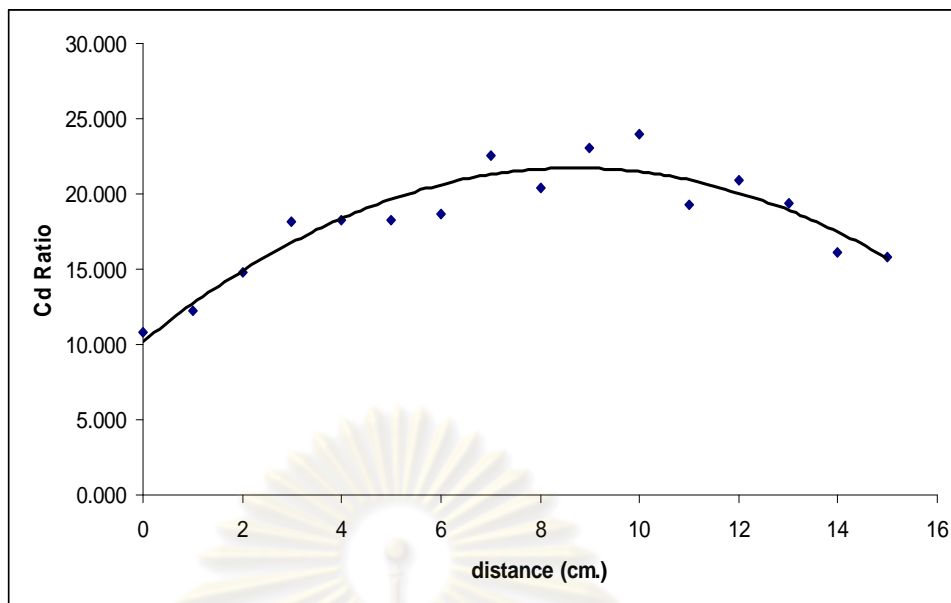
ฉ. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคดเมียมที่คำนวณได้กับตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

4.1.2 ผลการวิจัย

จากการวัดนิวตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยหัววัด BF₃ โดยใช้เวลาในการวัดที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นเวลา 2 นาที ได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ระยะจาก Colli (cm.)	ค่ารีเลทีฟฟลักซ์ ที่ เวลา 2 นาที	ค่ารีเลทีฟฟลักซ์ที่ เวลา 2 นาที เมื่อมี แผ่น Cd บัง	CdRatio
0	12838	1191	10.779
1	10852	886	12.248
2	10311	699	14.751
3	8143	448	18.176
4	6444	353	18.255
5	5487	301	18.229
6	4266	229	18.629
7	3163	140	22.593
8	2383	117	20.368
9	2117	92	23.011
10	1653	69	<u>23.957</u>
11	1236	64	19.313
12	940	45	20.889
13	719	37	19.432
14	515	32	16.094
15	396	25	15.840

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนแคดเมียมที่ระยะห่างต่างๆจากคอลลิเมเตอร์



รูปที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนแคดเมียมที่ระยะห่างต่างๆจากคอลลิเมเตอร์

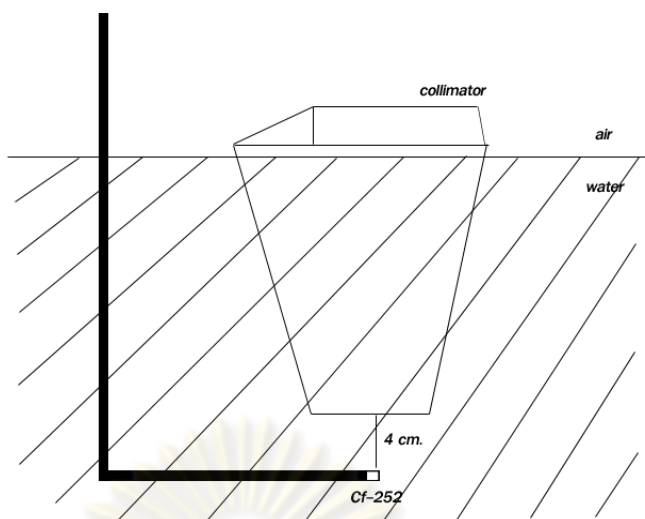
4.1.3 วิเคราะห์ผลการวัดอัตราส่วนแคดเมียม เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ

จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนแคดเมียมที่วัดได้สูงสุดอยู่ที่ระยะ 10 ซม. ซึ่งมีค่าอัตราส่วนแคดเมียมเท่ากับ 23.957 แต่เนื่องจากค่ารีเลทีฟลักซ์ มีค่า 1,653 ซึ่งมีค่าน้อยมากและทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน จึงเลือกใช้ตำแหน่งที่ระยะ 4 ซม. ซึ่งมีค่าอัตราส่วนแคดเมียมเท่ากับ 18.255 และมี ค่ารีเลทีฟลักซ์เท่ากับ 6,444 ซึ่งมีค่ามากกว่าตำแหน่ง 10 ซม. ประมาณ 4 เท่า ทำให้ลดเวลาในการถ่ายภาพได้มาก

4.2 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนกับความไวต่อรังสีแกมมา

4.2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ก. จัดระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 และนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ดังภาพ



รูปที่ 4.2 การจัดตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนและคอลลิเมเตอร์ก่อนถ่ายภาพ

ข. ถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างโดยในงานวิจัยนี้ใช้ หัวต่อแยก 3 ทางชนิด BNC และ แผ่นตะกั่ว ขนาด 2x2.5 ตร.ซม. และหนา 0.2 ซม. เป็นวัตถุตัวอย่าง และใช้เวลาในการถ่ายภาพ 3 ชม.

ค. นำแผ่นบันทึกภาพไปอ่านจากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ FLA-5100 ของบริษัทฟูจิฟิล์ม โดยใช้ ความละเอียดของภาพที่ 10 ไมโครเมตรซึ่งเป็นความละเอียดสูงสุด โดยสแกนภาพที่ได้ผ่านโปรแกรม Image Reader Version 4 แล้วลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำมาถ่ายภาพในครั้งต่อไป

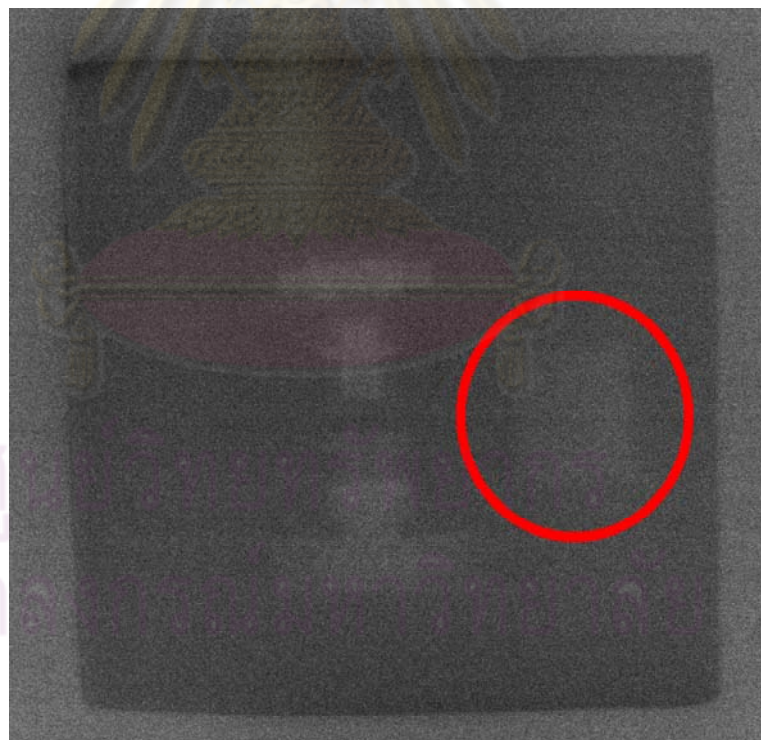
จ. เพิ่มแผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร 2 ชั้นรอบคอลลิเมเตอร์และ บริเวณกลางคอลลิเมเตอร์ จะทำการเพิ่มแผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร ขนาด 9x9 ตร.ซม. ทีละแผ่นจนทำให้ภาพตัวอย่างที่ได้มองไม่เห็นตะกั่วที่เป็นวัตถุตัวอย่าง

4.2.2 ผลการวิจัย

จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น พบว่า แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวต่อรังสีแกมมา ที่มาจาก prompt gamma ในน้ำ ทำให้ภาพถ่ายที่ได้เป็นภาพถ่ายที่ปนกันระหว่างภาพถ่ายจากนิวตรอน และภาพถ่ายจากรังสีแกมมา และเมื่อใช้แผ่นตะกั่วเพื่อลดทอนรังสีแกมมาพบว่า ต้องใช้แผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตรหุ้มรอบคอลลิเมเตอร์เป็นจำนวน 2 ชั้น และแผ่นตะกั่วขนาด 9x9 ตร.ซม. หนา 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 6 แผ่นวางบริเวณกลางคอลลิเมเตอร์ จะทำให้ภาพที่ได้มีภาพจากรังสีแกมมารบกวนน้อยมาก



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากคอลลิเมเตอร์ที่ไม่มีตะกั่วกำบัง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากคอลลิเมเตอร์ที่มีตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตรกำบังบริเวณกลาง 6 แผ่น และรอบข้างอีก 2 ชั้น

4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองใช้ตะกั่วกำบังเพื่อลดทอนรังสีแกมมาจาก prompt gamma ใน น้ำ

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตะกั่วกำบังรังสีแกมมา ภาพถ่ายที่ได้จะมีภาพจากรังสีแกมมาปะปนน้อยมาก แต่จะทำให้เบ้กราวนค์ของภาพลดลง เนื่องจากปริมาณรังสีที่ทำอันตรกิริยากับแผ่นบันทึกภาพลดลงแต่สามารถลดการกวนของรังสีแกมมาได้

4.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ

4.3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองนี้ได้ทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพเพื่อให้ได้ความดำที่พอเหมาะและความเปรียบต่างที่ดี จึงได้ทำการทดลองโดย

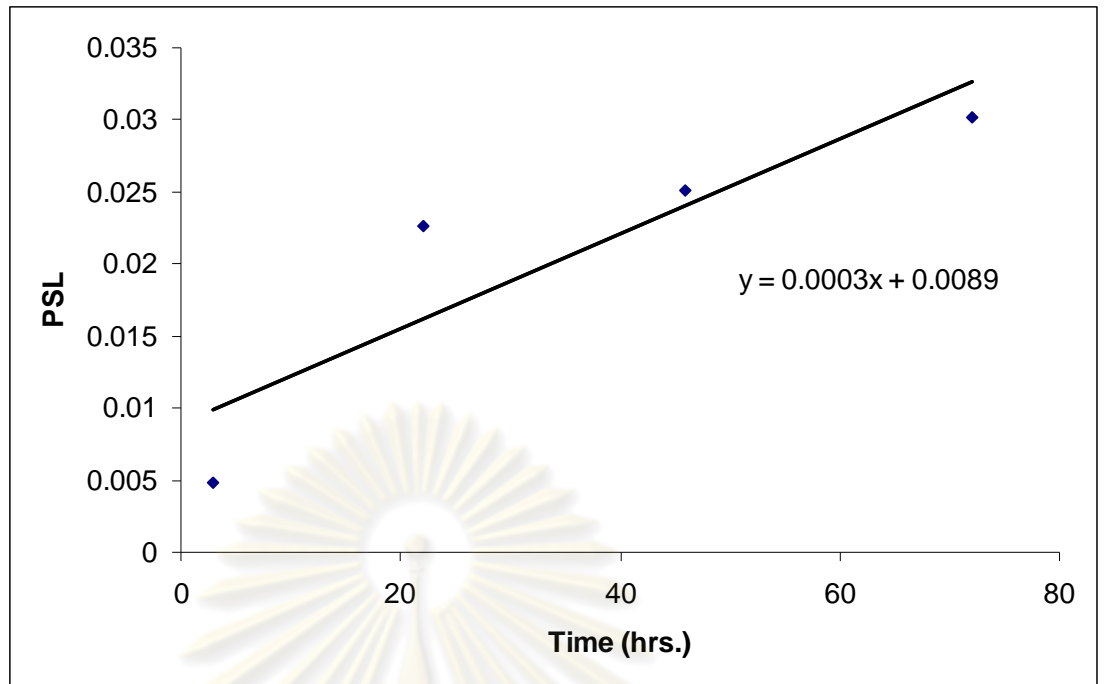
ก. จัดระบบการทดลองโดยใช้คอลลิเมเตอร์ที่มีแผ่นตะกั่วกำบังเพื่อลดการรบกวนของรังสีแกมมาจาก prompt gamma โดยใช้แผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร หุ้มรอบคอลลิเมเตอร์ 2 ชั้น และแผ่นตะกั่วหนา 1.5 มม. ขนาด 9x9 ตร.มม. จำนวน 6 แผ่น วางบริเวณกลางคอลลิเมเตอร์ และระยะห่างระหว่างปลายคอลลิเมเตอร์กับต้นกำเนิดรังสีเท่ากับ 4 ซม.

ข. ทดลองถ่ายภาพที่เวลาต่าง ๆ กัน โดยใช้เวลาในการถ่าย 3 ซม. 22 ซม. 46 ซม. และ 70 ซม. ตามลำดับ และเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงบริเวณเบ้กราวนค์ของแต่ละภาพ

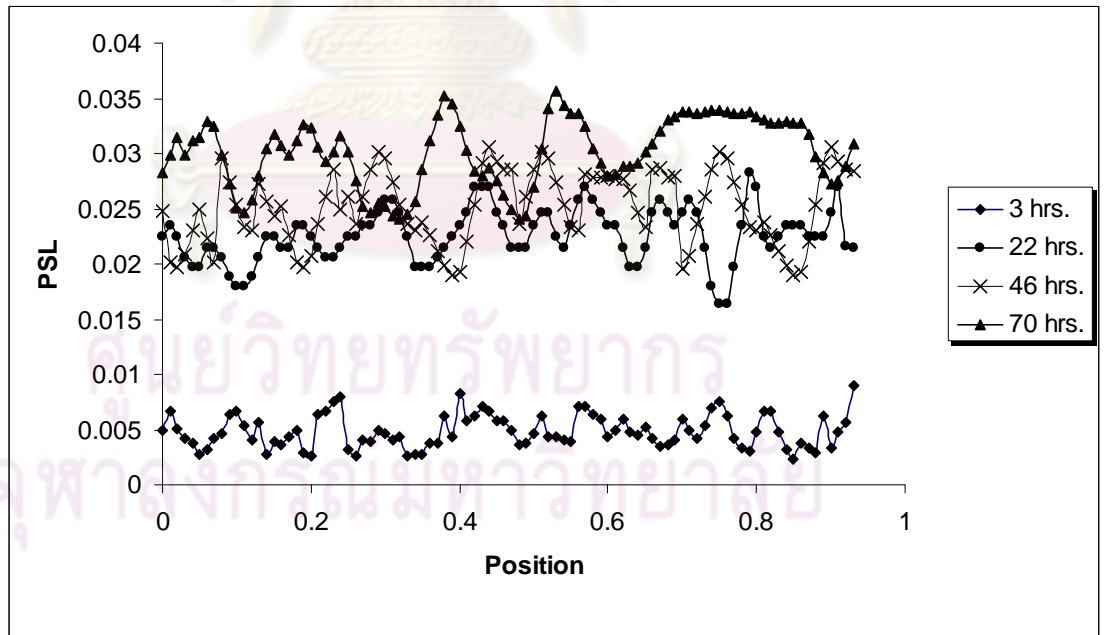
ค. นำแผ่นบันทึกภาพไปอ่านจากเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ FLA-5100 ของบริษัทฟูจิฟิล์ม โดยใช้ความละเอียดของภาพที่ 10 ไมโครเมตรซึ่งเป็นความละเอียดสูงสุด โดยสแกนภาพที่ได้ผ่านโปรแกรม Image Reader Version 4 แล้วลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 15 นาที ก่อนนำมาถ่ายภาพในครั้งต่อไป

4.3.2 ผลการวิจัย

เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เวลาในการถ่ายภาพต่าง ๆ กัน แล้วนำภาพที่ได้มาอ่านค่าความเข้มแสงบริเวณเบ้กราวนค์ของแต่ละภาพ พบว่าได้กราฟแสดงดังกราฟที่ 4.2



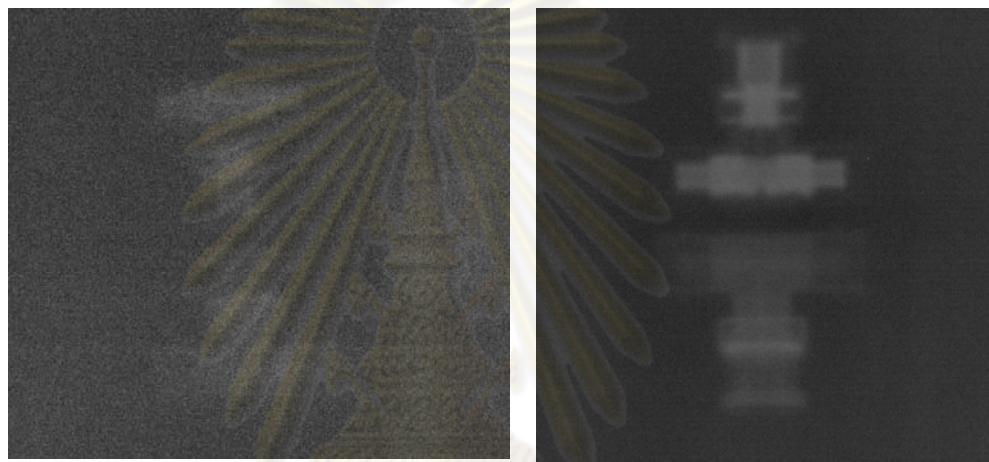
รูปที่ 4.5 แสดงความเข้มแสงกับระยะเวลาในการถ่ายภาพที่ระยะห่างจากปากคอลลิเมเตอร์ 4 ซม.



รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มแสงบนโปรไฟล์ที่ตำแหน่งแบกกราวนด์ของภาพที่ระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลา (hrs.)	ค่า PSL เฉลี่ย
3	0.004843
22	0.022599
46	0.025145
70	0.030194

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า PSL เฉลี่ยบริเวณเบ้ากราวนด์ ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายที่ระยะเวลา 3 ชม. และ 22 ชม. (จากซ้ายไปขวา)

4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ

จากการทดลองในการหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพนิวตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพ พบว่าความเข้มแสงมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับเวลาในการถ่ายภาพ โดยเมื่อใช้เวลาถ่ายภาพนานขึ้นก็จะทำให้มีความเข้มแสงมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะได้ค่า PSL เฉลี่ยที่ได้ของการถ่ายภาพดังตารางที่ 4.2 ซึ่งระยะเวลาในการถ่ายภาพที่ 22 ชม. และ 70 ชม. ให้ค่า PSL เฉลี่ยใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพ 22 ชม. เพื่อความสะดวกในการทดลองและเพียงพอต่อการเห็นรายละเอียดภายในชิ้นงานดังรูปที่ 4.7 แต่ในการใช้งานจริงสามารถลดเวลาในการถ่ายได้ ด้วยการเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดนิวตรอน

4.4 การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ฟิล์ม Ilford Hp 5 และถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

4.4.1 วิธีดำเนินการวิจัย

4.4.1.1 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

ก. จัดเตรียมระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้คอลลิเมเตอร์ที่หุ้มด้วยแผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร 2 ชั้น และภายในคอลลิเมเตอร์กำบังรังสีแกมมาด้วยแผ่นตะกั่วขนาด 9x9 ตร.ซม. จำนวน 6 แผ่น และใช้ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ถึงปลายคอลลิเมเตอร์เท่ากับ 4 ซม. ใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพ 22 ชม.

ข. นำชิ้นงานที่ต้องการถ่ายติดกับตลับใส่แผ่นบันทึกภาพด้วยเทปใสซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชิ้นงานตัวอย่างคือ นาฬิกาข้อมืออาดิดาส , หัวต่อ 25-pin RS232 , ฮาร์ดดิสขนาด 60 GB ของบริษัท HITACHI , หัวต่อ BNC , แม่สัแบบลูกกลิ้งพร้อมสายต่อแบบขนาน , สายต่อเครื่องปรีนแบบขนาน , นาฬิกาจับเวลา HEUER

ค. นำแผ่นบันทึกภาพใส่ซองกระดาษบาง แล้วสอดเข้าตลับใส่แผ่นบันทึกภาพโดยให้ด้านหน้าของแผ่นบันทึกภาพอยู่ด้านเดียวกับชิ้นงาน

ง. นำตลับใส่แผ่นบันทึกภาพพร้อมชิ้นงานวางคว่ำลงในคอลลิเมเตอร์ในระบบถ่ายภาพที่เตรียมไว้ดังข้อ ก.

จ. หลังจากครบ 22 ชม. นำชิ้นงานและแผ่นบันทึกภาพออกจากระบบถ่ายภาพ นำแผ่นบันทึกภาพที่ได้ออกจากซองกระดาษบางแล้วนำไปอ่านภาพด้วยเครื่องอ่านภาพ FLA-5100 ของบริษัทฟูจิ ใช้ความละเอียดสูงสุดที่ 10 ไมโครเมตร และทำการเลือกบริเวณที่ต้องการอ่านภาพ โดยใช้โปรแกรม Image Reader แล้วนำไฟล์ภาพที่ได้มาแปลงให้เป็นไฟล์ขนาดเล็กลงด้วยโปรแกรม Image Gauge

ฉ. นำแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนไปทำการลบภาพ ด้วยเครื่องลบภาพ เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปถ่ายกับชิ้นงานตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป

4.4.1.2 การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยเทคนิคฟิล์มโดยใช้ฟิล์ม Ilford HP 5 ISO400/27°

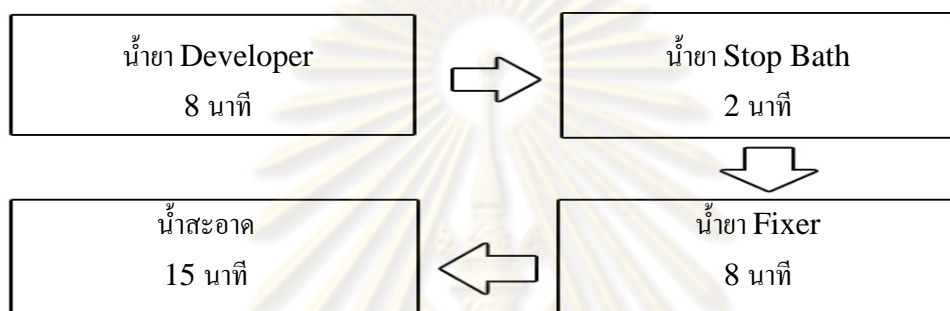
ก. จัดเตรียมระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้คอลลิเมเตอร์ที่หุ้มด้วยแผ่นตะกั่วหนา 1.5 มิลลิเมตร 2 ชั้น และภายในคอลลิเมเตอร์กำบังรังสีแกมมาด้วยแผ่นตะกั่วขนาด 9x9 ซม. จำนวน 6 แผ่น และใช้ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ถึงปลายคอลลิเมเตอร์เท่ากับ 4 ซม. ใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพ 5 วัน

ข. นำชิ้นงานที่ต้องการถ่ายติดกับตลับใส่ฟิล์มด้วยเทปใสซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชิ้นงานตัวอย่างคือ นาฬิกาข้อมืออาดิดาส , หัวต่อ 25-pin RS232 , ฮาร์ดดิสขนาด 60 GB ของบริษัท

HITACHI , หัวต่อ BNC , เม้าส์แบบลูกกลิ้งพร้อมสายต่อแบบขนาน , สายต่อเครื่องปรี้นแบบขนาน , นาฬิกาจับเวลา HEUER

ค. นำฟิล์มไปโพลดใส่กลับใส่ฟิล์มในห้องมืดโดยให้มุมหยักของฟิล์มอยู่ด้านบนบนขวาแล้วให้ใช้ด้านหน้าของฟิล์มอยู่ด้านเดียวกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 ปิดกลับใส่ฟิล์มแล้วนำไปถ่ายภาพเป็นเวลา 5 วัน

ง. นำฟิล์มที่ได้ไปล้างฟิล์มในห้องมืด โดยใช้น้ำยา Developer และ Fixer จากบริษัท Ilford และใช้น้ำประปาแทนน้ำยา Stop Bath

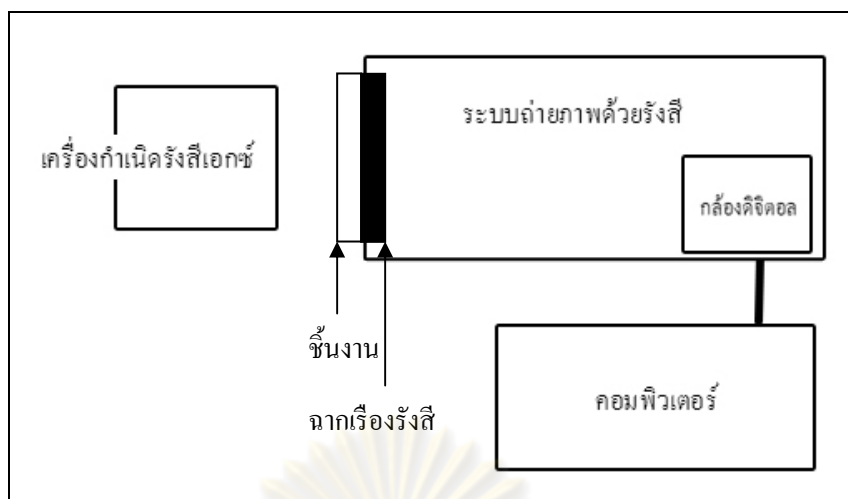


รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการล้างฟิล์มขาวดำ Ilford HP 5 ISO400/27°

จ. นำภาพที่ได้ไปฝั่งให้แห้งและนำกล้องดิจิตอลมาถ่ายภาพเพื่อเก็บเป็นไฟล์ดิจิตอลและสะดวกในการนำไปใช้งาน

4.4.1.3 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบเรียลไทม์ (Real time X-ray radiography)

ก. จัดเตรียมระบบโดยใช้เครื่อง x-ray ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี และระบบถ่ายภาพแบบ Real time โดยใช้กล้องดิจิตอลเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และระบบถ่ายภาพด้วยรังสีที่พัฒนา ร่วมจากภาควิชานิวเคลียร์และกรมศิลปากร ตั้งรูป



รูปที่ 4.9 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบเรียลทาม

ข. นำชิ้นงานที่ต้องการถ่ายภาพไปวางไว้บริเวณหน้าระบบถ่ายภาพด้วยรังสี ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ 80 ซม. และใช้ความต่างศักย์ 80kV กระแส 35 mA เวลาในการถ่ายภาพ 30 วินาที

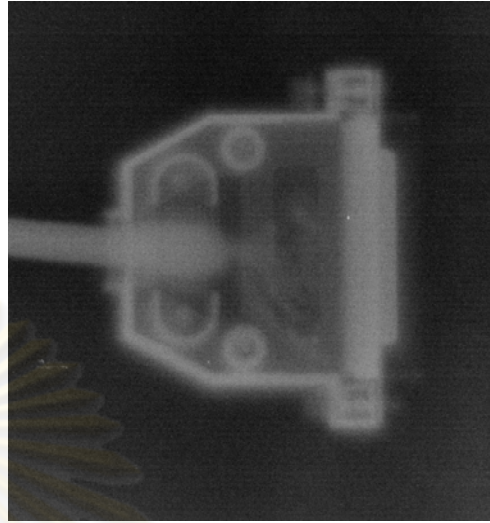
4.4.2 ผลการวิจัย

เมื่อนำภาพที่ได้ทั้งการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพและการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มและการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบเรียลทามมาเปรียบเทียบกันพบว่า ภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายด้วยนิวตรอนจะเห็นรายละเอียดของส่วนที่เป็นธาตุเบาซึ่งแตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือแกมมาที่ให้รายละเอียดของส่วนที่เป็นธาตุนหนักแทน

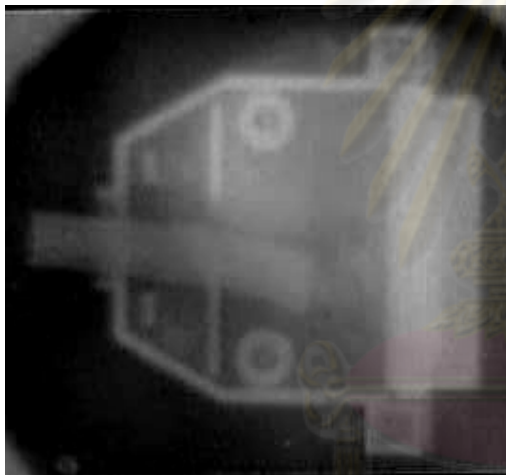
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



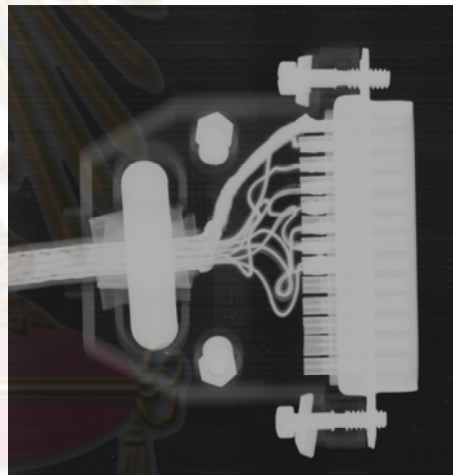
ก.



ข.



ค.



ง.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายหัวต่อ RS232 25-pin

ก. หัวต่อ RS232 25-pin

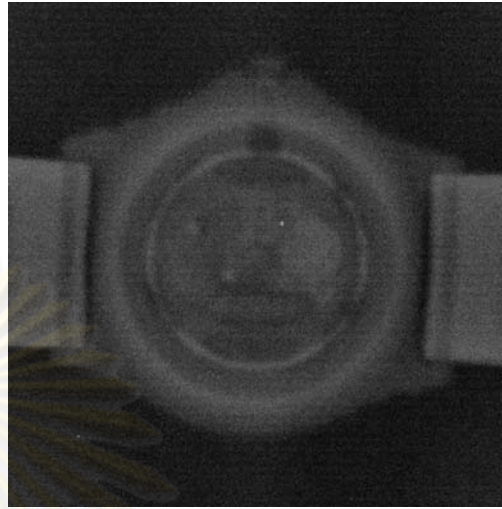
ข. ภาพถ่ายนิวตรอนจากแผ่นบันทึกภาพ

ค. ภาพถ่ายนิวตรอนจากฟิล์ม

ง. ภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์



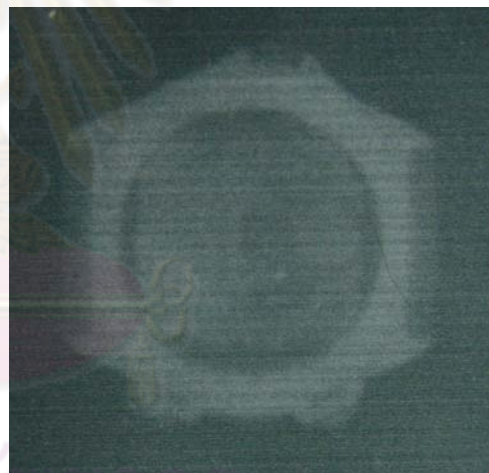
ก.



ข.



ค.



ง.

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายนาฬิกาข้อมือ adidas

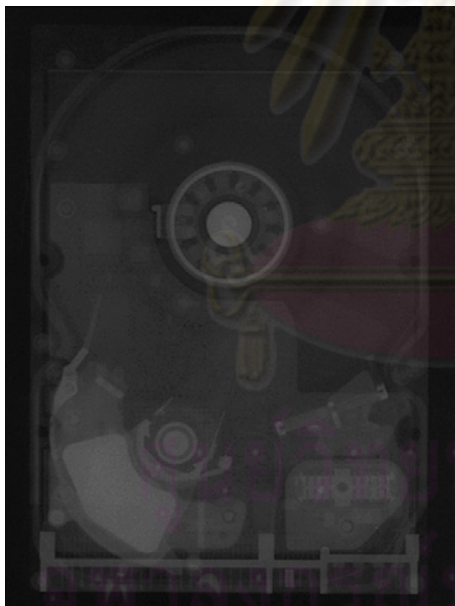
- ก. นาฬิกาข้อมือ adidas
- ข. ภาพถ่ายนิวตรอนจากแผ่นบันทึกภาพ
- ค. ภาพถ่ายนิวตรอนจากฟิล์ม
- ง. ภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์



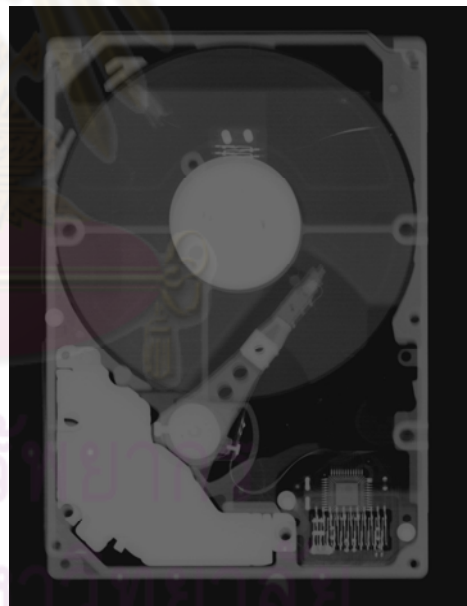
ก.



ข.



ค.



ง.

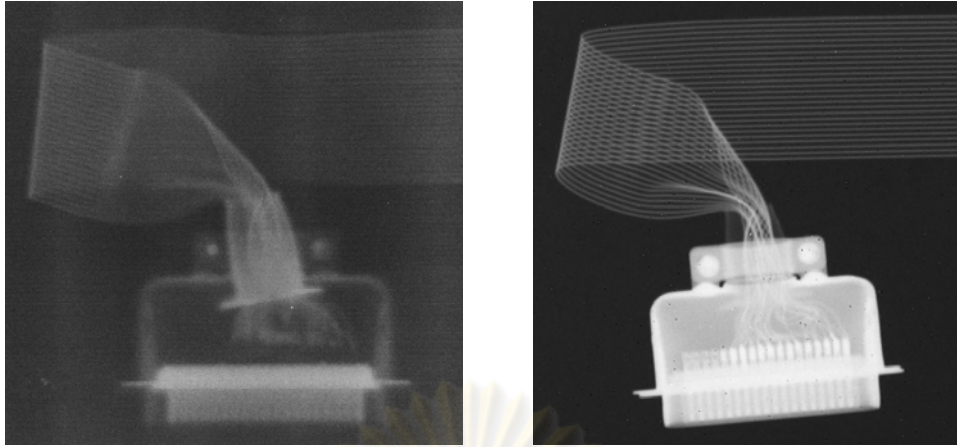
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์ ขนาด 60 GB

ก. ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 60 GB

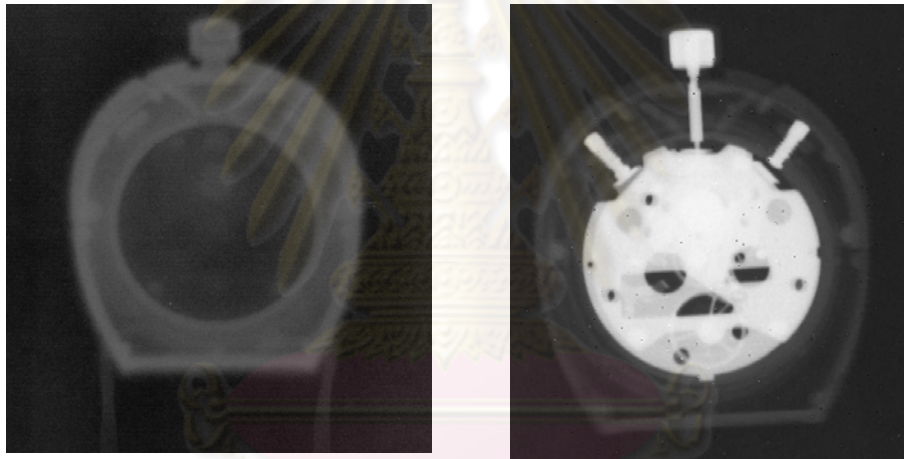
ข. ภาพถ่ายนิวตรอนจากแผ่นบันทึกภาพ

ค. ภาพถ่ายนิวตรอนจากฟิล์ม

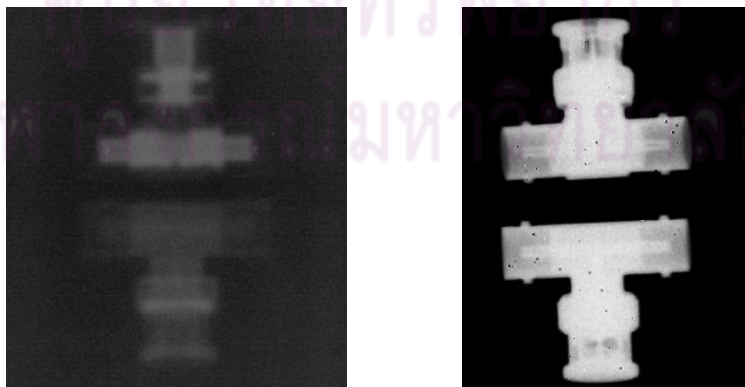
ง. ภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์



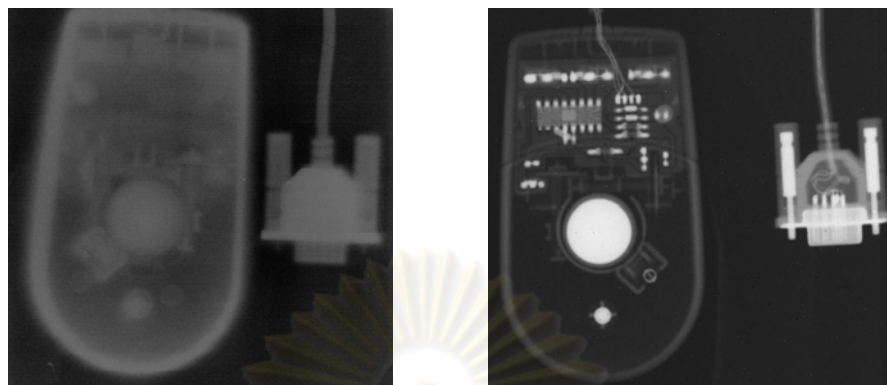
รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายสายต่อปรีนเตอร์แบบขนาน
 ช้าย : แผ่นบันทึกภาพ , ขวา : รังสีเอกซ์



รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายนาฬิกาจับเวลา
 ช้าย : แผ่นบันทึกภาพ , ขวา : รังสีเอกซ์



รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายหัวต่อ BNC
 ช้าย : แผ่นบันทึกภาพ , ขวา : รังสีเอกซ์



รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายมือถือ
ซ้าย : แผ่นบันทึกภาพ , ขวา : รังสีเอกซ์

4.4.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนกับภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์แสดงรายละเอียดของภาพที่ต่างกัน ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนแสดงรายละเอียดของส่วนที่เป็นพลาสติกและธาตุเบาส่วนภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ให้ภาพที่แสดงส่วนของเหล็กทองแดงหรือส่วนที่เป็นธาตุหนัก

ภาพถ่ายจากฮาร์ดดิสก์และหัวต่อ RS232 25-pin และนาฬิกาข้อมือด้วยนิวตรอนแสดงส่วนต่างๆที่เป็นพลาสติกส่วนเอกซ์เรย์แสดงให้เห็นถึงเส้นลวดและอุปกรณ์ในแผงวงจร ส่วนภาพถ่ายนิวตรอนสำหรับหัวต่อเครื่องปรีนแบบขนานแสดงให้เห็นถึงตัวหุ้มสายไฟ และส่วนที่พลาสติกภายใน ส่วนภาพรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นถึงสายไฟภายใน

ภาพถ่ายนาฬิกาจับเวลาด้วยนิวตรอนแสดงให้เห็นตัวเรือนภายนอกและโครงพลาสติกด้านใน ส่วนภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์แสดงแผงกลไกภายในซึ่งรวมไปถึงเฟืองและสปริง

ภาพถ่ายนิวตรอนสำหรับหัวต่อ BNC 2 ชนิดแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในที่ต่างกันอย่างชัดเจนในด้านของส่วนประกอบที่เป็นพลาสติก ส่วนภาพถ่ายรังสีเอกซ์ไม่สามารถแยกได้เนื่องจากส่วนประกอบที่เป็นธาตุหนักของหัวต่อ 2 ชนิดนี้มีความคล้ายกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์และวัสดุอุตสาหกรรมบางชนิดได้เพื่อการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่างได้ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยคือ ประหยัดค่าใช้จ่าย สะดวกในการใช้งานและเคลื่อนย้าย และยังมีข้อดีกว่าเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์ม คือ สะดวกในการใช้งานโดยไม่ต้องล้างฟิล์มในห้องมืดหรือใช้ความเชี่ยวชาญในการล้างฟิล์ม โดยงานวิจัยในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การเลือกตำแหน่งในการถ่ายภาพเพื่อให้ได้ภาพที่มีความดำและความเปรียบต่างเหมาะสมพบว่า ตำแหน่งที่ให้อัตราส่วนแควมสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 10 ซม.จากปลายคอลลิเมเตอร์เท่ากับ 23.957 แต่เนื่องจากค่ารีเลทีฟฟลักซ์ มีค่า 1,653 ซึ่งมีค่าน้อยมากและทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน จึงเลือกใช้ตำแหน่งที่ระยะ 4 ซม. ซึ่งมีค่าอัตราส่วนแควมเท่ากับ 18.255 และมีค่ารีเลทีฟฟลักซ์เท่ากับ 6,444 ซึ่งมีค่ามากกว่าตำแหน่ง 10 ซม. ประมาณ 4 เท่า ทำให้ลดเวลาในการถ่ายภาพได้มากและภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดและความเปรียบต่างใกล้เคียงกัน

5.1.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพสามารถลดลงได้จากงานวิจัยนี้ที่ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 22 ซม. โดยการเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งค่าความเข้มแสงที่อ่านได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นทำให้ง่ายต่อการเลือกใช้เวลาที่เหมาะสม

5.1.3 ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 พบว่าภาพถ่ายที่ได้มีการรบกวนของรังสีแกมมาจาก Prompt gamma ซึ่งสามารถลดทอนได้ด้วยการใช้แผ่นตะกั่วบังรอบคอลลิเมเตอร์

5.1.4 ระยะเวลาในการอ่านภาพเมื่อเลือกความละเอียดสูงสุดที่ 10 ไมโครเมตร อยู่ที่ประมาณ 20-30 นาที และใช้เวลาในการลบภาพ 10-15 นาที ทำให้ช่วยลดเวลาในการปฏิบัติงานได้เนื่องจากไม่ต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์มในห้องมืด และในขณะที่อ่านภาพเรายังสามารถเตรียมชิ้นงานต่อไปที่จะถ่ายได้ ช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการทำงาน

5.1.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนสามารถช่วยในการตรวจสอบรอยบกพร่องของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของธาตุเบาได้ดี ซึ่งหากนำไปถ่ายด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาจะไม่สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องดังกล่าวได้เนื่องจากรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาให้รายละเอียดของภาพในส่วนที่เป็นธาตุหนัก

5.1.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Cf-252 โดยใช้แผ่นบันทึกภาพมีข้อดีกว่าแบบฟิล์มที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันคือ ประหยัดเวลาในการถ่ายและไม่ต้องใช้ทักษะในการล้างฟิล์ม และยังมีข้อดีกว่าการใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ในเรื่องความสะดวกในการเคลื่อนย้าย แต่ภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะดีกว่าเนื่องจากมีความเข้มของนิวตรอนพลังงานต่ำมากกว่าต้นกำเนิดรังสีมาก และใช้เวลาในการถ่ายสั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนควรใช้สารหน่วงนิวตรอนที่มีความเข้มข้นของธาตุที่ใช้หน่วงพลังงานของนิวตรอนสูง เช่น โพลีเอทิลีนที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งจะช่วยให้ได้ความเข้มสูงสุดของนิวตรอนช้า

5.2.2 ในการถ่ายภาพโดยไม่ใช้รังสีแกมมาและนิวตรอนพลังงานสูงรบกวนภาพถ่ายนั้น อาจทำได้โดย การถ่ายภาพปกติซึ่งภาพนี้จะเป็นภาพที่เกิดจากรังสีแกมมา นิวตรอนพลังงานสูง และนิวตรอนพลังงานต่ำ จากนั้นทำการถ่ายภาพโดยใช้แผ่นแคดเมียมบังด้านหน้าชิ้นงาน ซึ่งภาพนี้จะเป็นจะเป็นภาพที่เกิดจากรังสีแกมมา และนิวตรอนพลังงานสูงซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ จากนั้นจึงใช้โปรแกรมนำภาพถ่าย 2 ภาพมาลบกัน ก็จะช่วยให้ได้ภาพถ่ายที่มากจากนิวตรอนพลังงานต่ำเพียงอย่างเดียว และไม่ต้องหุ้มตะกั่วเพราะตะกั่วที่หุ้มทำให้ลำบากในการเคลื่อนย้ายเนื่องจากมีน้ำหนักมาก

5.2.3 คอลลิเมเตอร์ที่ใช้ถ่ายภาพมีขีดจำกัดของภาพอยู่ที่ 11x11 ซม. ดังนั้น หากต้องการถ่ายภาพวัสดุอุตสาหกรรมหรือชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ทำได้ด้วยการถ่ายภาพทีละส่วนแล้วจึงนำมาต่อกันโดยใช้โปรแกรมตัดต่อภาพ

5.2.4 ควรเลือกใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีความแรงรังสีสูงเพื่อช่วยลดเวลาในการถ่ายภาพ

รายการอ้างอิง

1. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
2. ศราวุธ ใจเย็น , การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252 . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2545 .
3. บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (Neuclear society of Thailand articles), อิมเมจิงเพลท [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.nst.or.th/article/article143/article1439.htm> [18 เมษายน 2551]
4. Heinz von Seggern , Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of present understanding. journal , Department for Electronic Materials Darmstadt University Germany, 1998 .
5. เทอดศักดิ์ ขาวผ่อง , วรภา เชาว์ศิครพันธุ์ , การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน [ออนไลน์] . แหล่งที่มา : <http://www.nst.or.th/nr-web/nr-article-3.htm> [18 เมษายน 2551]
6. C D Gregory, J Howe, C Courtois, D M Chambers), I Hall and N C Woolsey , Comparison of imaging plate, CCD, and film detectors . journal ,Department of Physics, University of York, Heslington, York, YO10 5DD, UK , 2004 .
7. R.Pugliesi and E.Lehmann , Neutron-induced electron radiography using an imaging plate . journal , Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares Cidade Universita´ria, Saõ Paulo SP, Brazil , 2004.

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาคภูมิ อรชร เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2527 จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย