

การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอน



นายภาณุพันธุ์ เข็มหนู

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

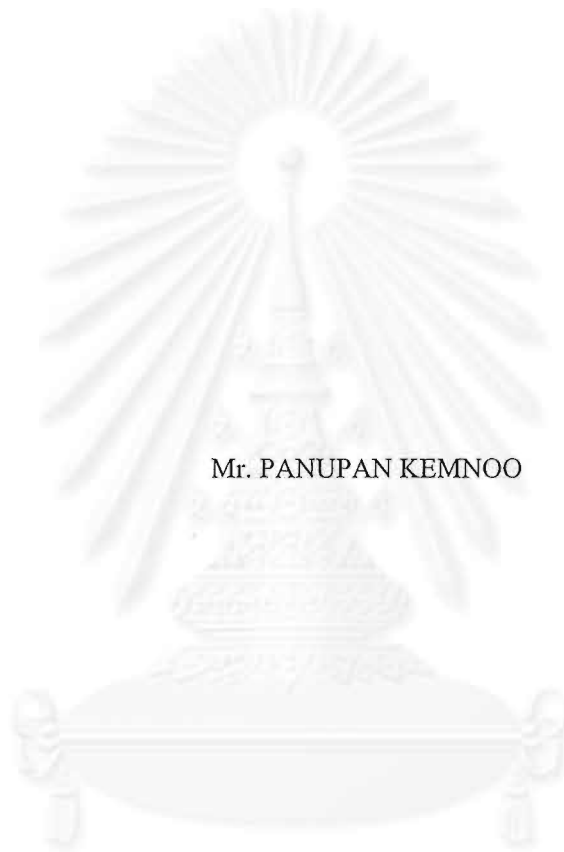
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-716-4

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๕ 1 ๙ ๒ ๖ ๓ ๖ ๒ ๗

DEVELOPMENT OF A SCANNING SYSTEM FOR NEUTRON COMPUTED  
TOMOGRAPHY



Mr. PANUPAN KEMNOO

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

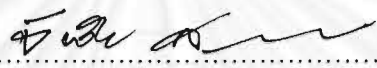
Academic year 1999

ISBN 974-333-716-4

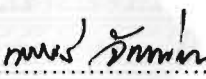
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟฟีด้วยนิวตรอน  
โดย                              นายภาณุพันธุ์ เข้มหนู  
ภาควิชา                              นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์


---

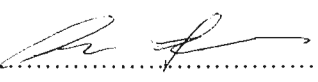
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชัย สุมิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ เค้า โทงอร่าม )

ภาณพันธ์ เข้มหนู : การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วย  
นิวตรอน. (DEVELOPMENT OF A SCANNING FOR NEUTRON COMPUTED  
TOMOGRAPHY) อ. ที่ปรึกษา : รศ.สมยศ ศรีสถิตย์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.อรรถพร  
ภัทรสุมันต์ , 73 หน้า. ISBN 974-333-716-4.

ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนที่ควบคุมโดยไมโครคอมพิวเตอร์  
ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานตรวจสอบโดยไม่ทำลายในงานอุตสาหกรรม ระบบนี้ประกอบด้วยส่วน  
สำคัญสองส่วนคือ หัววัดนิวตรอนและแท่นหมุนชิ้นงานพร้อมทั้งระบบขับเคลื่อน หัววัดนิวตรอนชนิด  
ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ LiF/ZnS(Ag) ได้ถูกออกแบบให้สแกนชิ้นงานทุก ๆ ระยะ 1  
มิลลิเมตร แท่นหมุนออกแบบให้รองรับตัวอย่างที่มีขนาดไม่เกิน 10 เซนติเมตร และหมุนด้วยมุมทีละ 7.2  
องศา เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งหมด 25 โปรไฟล์ ได้ทำการทดสอบระบบกับชิ้นงานจำนวน 9 ตัวอย่าง โดยใช้  
เทอร์มัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ที่เดินเครื่องด้วยกำลัง 700 กิโลวัตต์  
เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งชิ้นงานมีค่าประมาณ  $7.7 \times 10^7$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที  
ใช้เวลาในการสแกนแต่ละชิ้นงานประมาณ 3 ชั่วโมง ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ทำการทดสอบ ส่วน  
ใหญ่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยมีค่ารีโซลูชันประมาณ 2 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##G3971300621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: COMPUTED TOMOGRAPHY / ENDCOATED-SCINTILLATOR OPTIC  
LIGHT GUIDE / NEUTRON TRANSMISSION

PANUPAN KEMNOO : DEVELOPMENT OF A SCANNING SYSTEM FOR  
NEUTRON COMPUTED TOMOGRAPHY. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.  
SOMYOT SRISATIT, THESIS COADVISOR : ASSIST.PROF.ATTAPORN  
PATTARASUMUNT, 73 pp. ISBN 974-333-716-4

A microcomputer controlled scanning system for neutron computed tomography (CT) was developed for nondestructive of industrial specimens. The system consisted of two main parts i.e. the neutron detector and the specimen platform with their mechanical driven system. A 2 mm diameter endcoated LiF/ZnS(Ag) scintillator optic light guide was used as the thermal neutron detector which was designed to scan the specimen at 1 mm step. The specimen platform was designed to accommodate the specimen with a maximum width of 10 cm and to rotate at 7.2 degree step to obtain a total of 25 transmitted neutron intensity profiles. Nine specimens were tested using thermal neutron from the Thai Reserch Reactor TRR1/M1 operating at 700 kW. The thermal neutron flux at the specimen position was about  $7.7 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{S}$  which needed a total scanning time of about 3 hours for each specimen. The CT images of the tested specimens were mostly very satisfactory. The resolution was found to be about 2 mm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา    นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา   นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา       2542

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยดูแลให้คำปรึกษาข้าพเจ้ามาโดยตลอด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่แนะนำการใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์ เคโซ ทองอร่าม ที่ให้คำแนะนำทางด้านเครื่องมือและข้อคิดเห็นต่างๆ ของงานวิจัยมาโดยตลอด

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ คุณวิเชียร รตนธงชัย รวมทั้งบุคคลากร และ เจ้าหน้าที่กองฟิสิกส์และกองปฏิบัติการปฏิบัติทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในงานวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณธนู สนกนก ฝ่ายวิศวกรรม กองกษาปณ์ กรมธนารักษ์ ที่ช่วยเหลือและจัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นางสาวอรุณฉัตร กิตติกุล ผู้สร้างหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้ท่อนำแสงเคลื่อนปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ นายวัชรพงษ์ ปถมพานิชย์ ที่ออกแบบสร้างระบบกลเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณบัญชา อุณพานิช คุณสุพร กุลวัฒน์นันทชัย คุณจิตติกร เห็นทรัพย์ ไพบูลย์ เรืออากาศตรีนพดล นาคเงิน เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณจุรี ปัญจะผลินกุลและครอบครัว ซึ่งให้กำลังใจและความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวเสมอมา ที่ให้การสนับสนุนในทุกด้านแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎี.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน.....	4
2.1.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	4
2.1.3 พลังงานนิวตรอน.....	8
2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร.....	9
2.1.5 ภาคตัดขวางนิวตรอน.....	11
2.1.6 การลดความเข้มนิวตรอน.....	13
2.2 หลักการของ Computed Tomography.....	13
2.2.1 เทคนิคการเก็บข้อมูลโปรไฟล์.....	14
2.2.2 ทฤษฎีการสร้างภาพโทโมกราฟี.....	17
2.2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีนิวตรอน.....	17
3 การพัฒนาระบบสมแกนด้วยนิวตรอนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	22
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การพัฒนาและออกแบบสร้างระบบเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพ โทโมกราฟี.....	24
3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.4 หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพ โทโมกราฟี.....	26
3.5 ระบบวัดนิวเคลียร์.....	28
3.6 แผ่นวงจรเชื่อม โยงสัญญาณ.....	30
3.7 ระบบขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนและหมุนวัดตัวอย่าง.....	32
3.8 การเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนกับ ไมโครคอมพิวเตอร์.....	33
3.9 การเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์กับไมโครคอมพิวเตอร์.....	35
3.10 โปรแกรมควบคุมการทำงานระบบสแกน.....	37
4 วิธีดำเนินการวิจัยและผลการทดสอบ.....	38
4.1 การทดสอบเก็บข้อมูลจากระบบสแกนด้วยนิวตรอนที่พัฒนาขึ้น เพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	38
4.2 ผลของการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี.....	41
4.3 การหาค่าภาคตัดขวางของเทอร์มัลนิวตรอนจากภาพโทโมกราฟี.....	57
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	59
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	71



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ประวัติผู้เขียน.....	73



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของคั่นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ี .....	7
2.2 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน .....	8
3.1 รายละเอียดการต่อพอร์ทบนแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ.....	31
3.2 รายละเอียดการกระตุ้นสเต็มปีงมอเตอร์แบบ 2 เฟส.....	32
4.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-Value กับค่าภาคตัดขวางของตัวอย่าง.....	57



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	10
2.4	11
2.5	12
2.6	14
2.7	15
2.8	16
2.9	16
2.10	17
2.11	18
2.12	20
3.1	23
3.2	25
3.3	26
3.4	28
3.5	29
3.6	29
3.7	30
3.8	31
3.9	32
3.10	33
3.11	34
3.12	34

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แผนภาพเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์และ เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์.....	35
3.14 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลา.....	36
3.15 แผนภาพเวลาของสัญญาณจากอุปกรณ์นับรังสีและตั้งเวลา.....	36
3.16 โพลวชาร์ตแสดงการทำงานของเมนูหลัก.....	37
4.1 ระบบสแกนและหมุนวัตถุตัวอย่างซึ่งอยู่ภายในห้องกำบังรังสี.....	38
4.2 ระบบวัดนิวเคลียร์และไมโครคอมพิวเตอร์.....	39
4.3 ข้อมูลโปรไฟล์จากเทอร์มินัลนิวตรอนขณะไม่มีชิ้นงาน (Shading).....	39
4.4 ข้อมูลโปรไฟล์ขณะปิดชัตเตอร์เพื่อกำบังลำนิวตรอน (Dark current).....	39
4.5 แสดงข้อมูลโปรไฟล์จากการสแกนชิ้นงานตามเงื่อนไขต่างๆ ในโปรแกรม ควบคุมการทำงาน.....	40
4.6 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ปรับแก้ค่าแล้ว.....	41
4.7 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 1.....	42
(ข) แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของทองแดงภายในอลูมิเนียมทรงกระบอก กลวง.....	42
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 1.....	42
4.8 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 2.....	44
(ข) แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของวัตถุตัวอย่างภายในอลูมิเนียม ทรงกระบอก.....	44
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 2.....	44
4.9 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 3.....	45
(ข) แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของวัตถุตัวอย่างภายในอลูมิเนียม ทรงกระบอก.....	45
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 3.....	46
4.10 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 4.....	47
(ข) แผนภาพการวางตำแหน่งของแท่งเหล็กภายในอลูมิเนียมทรงกระบอก.....	47
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 4.....	47

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 5.....	49
(ข) แผนภาพการวางตำแหน่งของสลิทเหล็กขนาดต่างๆ ในอลูมิเนียม ทรงกระบอก.....	49
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 5.....	49
4.12 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 6.....	50
(ข) แผนภาพแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม.....	50
(ค) แผนภาพการวางตำแหน่งของแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยมภายในอลูมิเนียม ทรงกระบอก.....	50
(ง) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 4.....	51
4.13 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 7.....	52
(ข) แผนภาพตัวอย่างที่ 7 แสดงตำแหน่งของรูที่เจาะภายในในอลูมิเนียม ทรงกระบอกตัน.....	52
(ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 7.....	52
4.14 วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 1.....	53
4.15 แสดงด้านหน้าและโครงสร้างภายในของหลอดทวิคูณแสง.....	54
4.16 ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 1.....	54
4.17 วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2.....	55
4.18 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูล.....	56
4.19 โครงสร้างภายในชุดเกียร์.....	56
4.20 ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2.....	56
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cross-section และค่า CT-Value.....	57

# บทที่ 1

## บทนำ



### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคนิวเคลียร์ เป็นวิธีที่แพร่หลายที่สุดวิธีหนึ่งในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการตรวจสอบหาสิ่งบกพร่องภายในชิ้นงาน สำหรับควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน หรือการตรวจสอบวัสดุในหีบห่อที่ปิดทึบ ซึ่งการประยุกต์ทางรังสีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของวัสดุชิ้นงาน ก็เป็นอีกวิธีที่ให้ผลที่แม่นยำและรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา หรือรังสีนิวตรอน ซึ่งวิธีการตรวจสอบเหล่านี้จะได้ภาพแบบระนาบสองมิติ แต่ในบางครั้งการตรวจสอบยังจำเป็นต้องทราบรายละเอียดเพิ่มเติม เช่น ต้องการทราบขนาดและตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในชิ้นงาน ดังนั้น เทคนิคที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุชิ้นงานหรือที่นิยมเรียกว่า ภาพโทโมกราฟี (Tomography) เป็นการสร้างภาพตัดขวางของวัตถุ จากการถ่ายภาพทีละภาพในแนวระนาบแบบสองมิติแล้วทำการหมุนวัตถุตัวอย่างไปเป็นมุมน้อย ๆ จนได้ภาพของวัตถุครบรอบหรืออย่างน้อย 180 องศา แล้วนำไปคำนวณสร้างภาพตัดขวางออกมา แต่การตรวจสอบโดยใช้รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถที่จะตรวจสอบวัสดุที่มีองค์ประกอบของธาตุหนักและธาตุเบาวางซ้อนอยู่ด้วยกัน ดังนั้น จึงได้ศึกษาและพัฒนาาระบบสร้างภาพโทโมกราฟีโดยอาศัยหลักการส่งผ่านรังสีนิวตรอน และประมวลผลข้อมูลวัดรังสีจากอุปกรณ์นับวัดรังสีนิวตรอน ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งเมื่อได้ข้อมูลแล้วสามารถนำมาสร้างภาพได้รวดเร็ว เนื่องจากไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีใช้ในปัจจุบันมีขีดความสามารถสูงและใช้เวลาในการประมวลผลสั้น จึงทำให้สร้างภาพโทโมกราฟีได้รวดเร็ว ดังนั้น การตรวจสอบขนาดและตำแหน่งของวัสดุด้วยวิธีการสร้างภาพโทโมกราฟี จะสามารถช่วยให้เห็นภาพในแนวตัดขวางของวัสดุนั้นได้โดยใช้หลักการทะลุผ่านรังสีนิวตรอน ซึ่งหลักการนี้จัดระบบวัดรังสีให้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนอยู่ตรงข้ามกับหัววัดรังสี โดยมีวัตถุหมุนอยู่ตรงกลาง และนำผลจากการทะลุผ่านของรังสีนิวตรอนไปประมวลผลและสร้างภาพต่อไป

หัววัดรังสีในงานวิจัยนี้ เป็นหัววัดเทอร์มัสนิวตรอนฟลักซ์โดยใช้ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ สร้างโดย คุณอรุณฉัตร กิตติกุล ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี นำมาพัฒนาต่อ โดยเพิ่มส่วนบังคับลำนิวตรอนบริเวณส่วนปลายของท่อนำแสงปลาย เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพโทโมกราฟีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นและในงานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์กลเพื่อใช้ในการสแกนข้อมูลโปรไฟล์ร่วม

ทั้งโปรแกรมควบคุมการทำงานที่สร้างขึ้นโดย คุณวัชรพงษ์ ปดมพานิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี มาประยุกต์ใช้งาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สแกนเก็บข้อมูล โพรไฟล์จากระบบส่งผ่านนิวตรอน  
ลำแคบสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์กลสำหรับสแกนเก็บข้อมูล โพรไฟล์ ด้วยการขับเคลื่อน  
ชิ้นงานผ่านลำนิวตรอน
- 1.3.2 พัฒนาโปรแกรมควบคุมการสแกนเก็บข้อมูล โพรไฟล์สำหรับการสร้างภาพโทโม  
กราฟีบนไมโครคอมพิวเตอร์
- 1.3.3 จัดระบบวัดนิวตรอนลำแคบและออกแบบระบบบังคับลำนิวตรอนที่เหมาะสม
- 1.3.4 ทดสอบเก็บข้อมูล โพรไฟล์ของวัตถุที่มีองค์ประกอบของธาตุเบา เพื่อแสดงภาพ  
โทโมกราฟีบนไมโครคอมพิวเตอร์

## 1.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดระบบวัดนิวตรอนที่ได้จากการส่งผ่านนิวตรอนลำแคบ
- 1.4.3 ออกแบบและสร้างระบบกลในการสแกนเก็บข้อมูล โพรไฟล์
- 1.4.4 ออกแบบและสร้างระบบเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบวัดนิวตรอนกับระบบ  
ไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล โพรไฟล์
- 1.4.5 ทดสอบการเก็บข้อมูล โพรไฟล์ของชิ้นงานเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



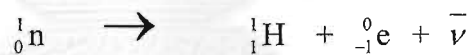
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

##### 2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน<sup>[1]</sup>

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุไฟฟ้า ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1932 โดย นาย เจมส์ แชดวิก (Jame Chadwick) ใช้สัญลักษณ์  $n$  หรือ  ${}_0^1n$  มีมวลประมาณ 1.0086654 หน่วย มวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ  $1.67492 \times 10^{-24}$  กรัม มีอำนาจทะลุทะลวงสูง เนื่องจากความเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้สามารถเดินทางผ่านอากาศได้หลายเมตร โดยไม่ทำให้เกิดไอออน แพร์ (ion pair) และเดินทางไปได้ไกลกว่าอนุภาคอื่นเนื่องจากไม่ถูกแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) ขัดขวางในการเดินทางผ่านในวัตถุ นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะแตกตัวให้ โปรตอน ( ${}_1^1H$ ) อิเล็กตรอน ( ${}_{-1}^0e$ ) และแอนตินิวตริโน ( $\bar{\nu}$ ) โดยมีครึ่งชีวิต (half life) ประมาณ 12 นาที พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาประมาณ 0.78 MeV เขียนในรูปสมการได้ดังนี้



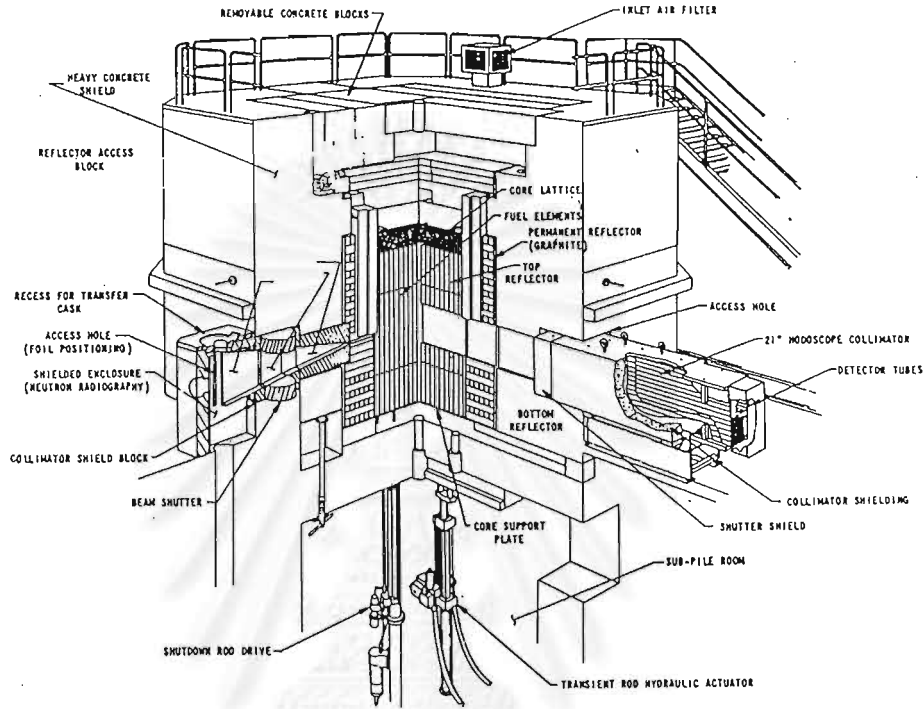
##### 2.1.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ในการผลิตนิวตรอน เพื่อนำมาใช้งานนั้นจะแบ่งได้ 3 ประเภทได้แก่

###### (1) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ( Nuclear reactor)

นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียม-235 (U-235) ในเครื่องปฏิกรณ์ นิวเคลียร์ ( Nuclear reactor ) เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) และจะให้ความเข้มข้นนิวตรอนสูงกว่าต้นกำเนิดแบบอื่น ๆ ซึ่งจะให้นิวตรอนฟลักซ์ประมาณ  $10^{10}$ - $10^{14}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ปริมาณนิวตรอนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research reactor ) สามารถควบคุมได้โดยใช้แท่งควบคุมซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีการดูดกลืนนิวตรอนสูงเพื่อหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) โดยการสอดแท่งควบคุมเข้าไปในแกนปฏิกรณ์ และปรับระยะแท่งวัสดุให้เหมาะสมเพื่อรักษากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้สม่ำเสมอ พลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าตั้งแต่ 0.0253 eV จนถึง 18 MeV ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 2 MeV นิวตรอนพลังงานสูงจะถูกลดพลังงานเป็น

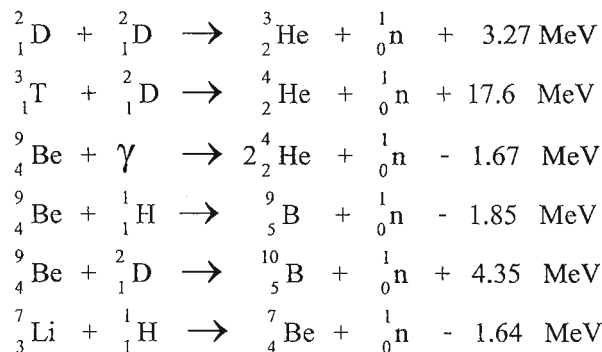
เทอร์มัลนิวตรอน โดยสารหน่วงนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เช่น น้ำ น้ำมันหนัก หรือ แกรไฟต์



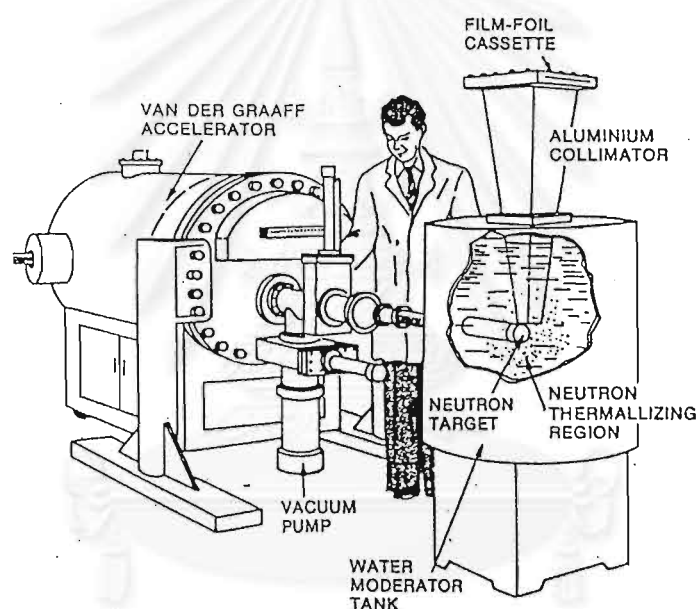
รูปที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

(2) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาค เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแรงสูงเร่งอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูงและควบคุมให้เข้าชนกับวัสดุที่เป็นเป้า (Target) ซึ่งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่ใช้ยิงกับอนุภาคที่เป็นเป้าปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



เครื่องเร่งอนุภาคหลายประเภทถูกนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron generator) เครื่องเร่งอนุภาคที่เป็นพื้นฐานของระบบ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็ว (Fast neutron generator) และอุปกรณ์สำหรับลดพลังงานนิวตรอนเร็วเพื่อห้วงนิวตรอนและบังคับลำนิวตรอนเข้าด้วยนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (neutron collimator) ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เหมาะสมกับการใช้งาน เครื่องเร่งอนุภาคที่นิยมใช้งานได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาคศักดาไฟฟ้าต่ำ (Low voltage accelerator) เครื่องเอกซเรย์พลังงานสูง (High-energy x-ray machine) เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดอกราฟฟ์ (Van de Graaff accelerator) และ เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นพลังงานสูง (High-energy linear accelerator) และไซโคลตรอน (Cyclotrons)



รูปที่ 2.2 เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอกราฟฟ์

### (3) ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (Isotopic neutron source)

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี แบ่งตามกระบวนการปลดปล่อยนิวตรอนออกมาได้ เป็น 3 ประเภทคือ

3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากไอโซโทปสลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (Alpha emitter source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาอัลฟา-นิวตรอน ( $\alpha, n$ ) เช่น เรเดียม-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) อะเมริเซียม-241 ( $^{241}\text{Am}$ ) ซึ่งเป็นธาตุหนักที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา ผสมกับเป้าที่ทำจากธาตุเบาเช่น เบริลเลียม ( $^9\text{Be}$ ) และ โบรอน ( $^{10}\text{B}$ ) จะมีคุณสมบัติ คือ มีพลังงาน

ยึดเหนี่ยวของอนุภาคนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำ ธาตุที่นำมาทำเป็นเป้าที่นิยมใช้คือ เบอริลเลียม ( ${}^9\text{Be}$ ) มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำ เพียง 1.67 MeV และจะให้นิวตรอนออกมาสูงที่สุดคือ ประมาณ 80 นิวตรอนต่อจำนวนอัลฟาที่วิ่งเข้าไป 1 ล้านตัว นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 3-4 MeV และมีความเข้มข้นนิวตรอนในช่วง  $10^5$ - $10^7$  นิวตรอนต่อกรัมต่อวินาที จากปฏิกิริยาดังนี้



คุณสมบัติของไอโซโทปรังสีที่ใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ปฏิกิริยา	ปริมาณนิวตรอน (นิวตรอน/วินาที/กรัม)	พลังงานของ นิวตรอน (MeV)
${}^{210}\text{Po-Be}$	138วัน	( $\alpha, n$ )	$1.28 \times 10^{10}$	4.3
${}^{241}\text{Am-Be}$	458 ปี	( $\alpha, n$ )	$1 \times 10^7$	~4
${}^{226}\text{Ra-Be}$	1620ปี	( $\alpha, n$ )	$1.3 \times 10^7$	~4
${}^{124}\text{Sb-Be}$	60วัน	( $\gamma, n$ )	$2.7 \times 10^9$	0.024
${}^{252}\text{Cf}$	2.65ปี	แตกตัว	$2.34 \times 10^{12}$	2.3

3.2 นิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแกมมา-นิวตรอน ( $\gamma, n$ ) เป็นการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV กับเบอริลเลียม-9 เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบอริลเลียม-9 จะทำให้นิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 (Antimony-124,  ${}^{124}\text{Sb}$ ) ให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.7 MeV ผสมกับเบอริลเลียม อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี  ${}^{124}\text{Sb-Be}$  ประมาณ  $1.3 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัมของพลวง-124 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา ( $\gamma, n$ ) มีปฏิกิริยาดังนี้



ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ ( $\gamma, n$ ) ชนิดนี้จะมีเกมมาพลังงานสูงปะปนมาและมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน แต่สามารถผลิตได้ง่ายโดยการนำไปอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เมื่อสลายตัวก็สามารถนำไปอาบรังสีนิวตรอนและนำกลับมาใช้ได้อีก

3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัวเอง ( Self fission หรือ Spontaneous fission ) เป็นต้นกำเนิดที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน แตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เช่น คาลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252,  $^{252}\text{Cf}$ ) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะให้นิวตรอนโดยเฉลี่ยครั้งละ 3.76 ตัวต่อการเกิดฟิชชัน 1 ครั้ง และมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ  $4.3 \times 10^9$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของคาลิฟอร์เนียม-252

### 2.1.3 พลังงานนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอน และชนิดของวัสดุ ดังนั้น สามารถแบ่งชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0.00 eV ถึง $10^3$ eV
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV ถึง 0.3 eV
เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	0.3 eV ถึง $10^4$ eV
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1 eV ถึง $10^2$ eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	$10^3$ eV ถึง 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	> 20 MeV

#### 2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า สามารถทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมได้โดยตรง อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับตัวกลางจะเกิดขึ้นได้หลายแบบโดยขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของตัวกลาง โดยสรุปนิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางต่างๆ ได้ดังนี้

การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) อันตรกิริยาแบบนี้จะเป็นเพียงการถ่ายเทพลังงานจลน์ของนิวตรอนให้กับนิวเคลียส ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ในสถานะปกติ (ground state) แล้วนิวตรอนจะกระเจิง (scatter) ออกมาโดยเปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป ในขณะที่พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนกับนิวเคลียสก่อนชนและหลังชนมีค่าเท่าเดิม อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า บางครั้งเรียกว่า

“ Potential scattering” สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ  $(n,n)$

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมแบบนี้มีลักษณะการชนคล้ายแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมาโดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสลดพลังงานลงสู่สถานะปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา และมีการสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา อันตรกิริยาแบบนี้มักจะต้องมีพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) คือนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยาต้องมีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสถานะกระตุ้นได้ มักจะต้องมีพลังงานตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป อันตรกิริยาแบบนี้เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Q) มีค่าเป็นลบและมีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าด้วยเช่นกัน สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้คือ  $(n,n')$

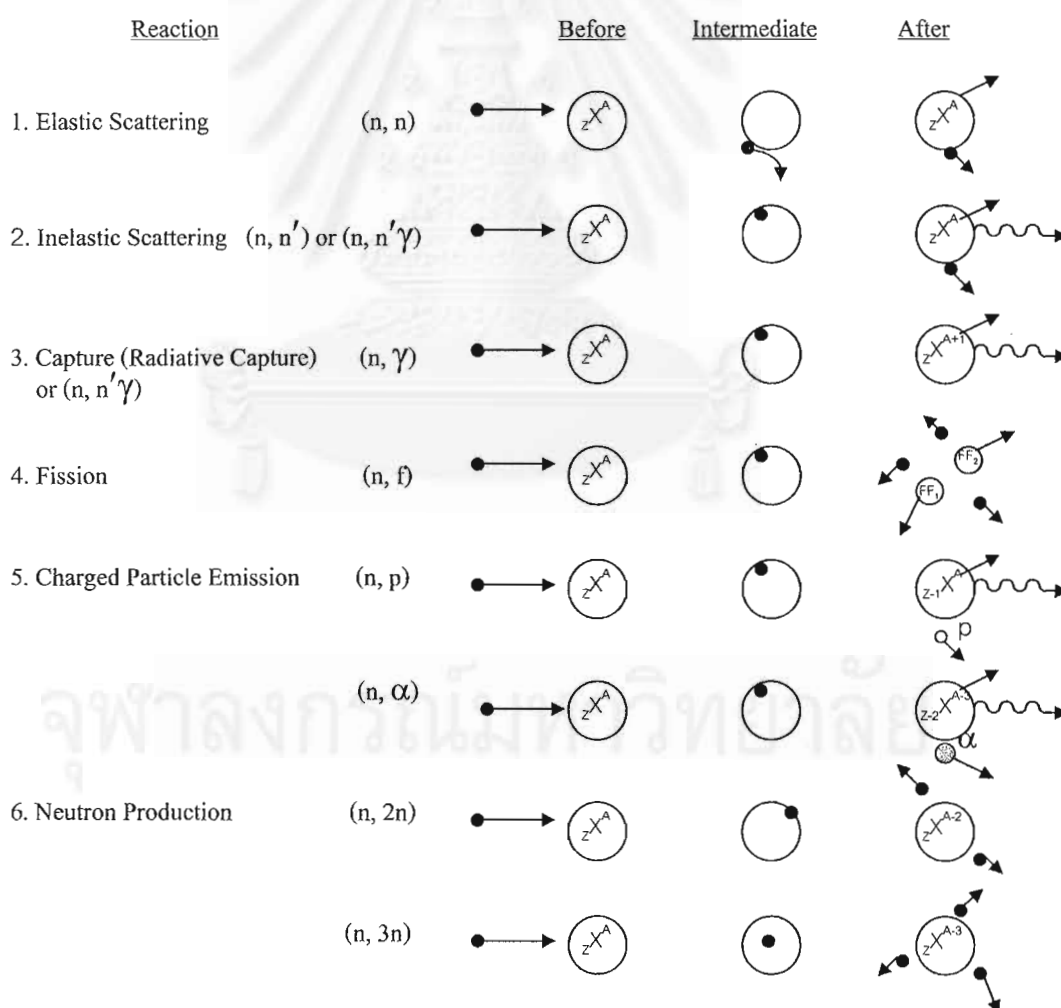
อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ radiative capture) หรืออันตรกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของตัวกลางจะถูกจับไว้ทำให้นิวเคลียสมีมวลเพิ่มขึ้น 1 และปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาหรือเรียกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Neutron capture gamma) อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน (Exothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่มีค่ามากกว่าพลังงานนิวเคลียสเดิมรวมกับนิวตรอนเสมอ สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ  $(n,\gamma)$

ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม -238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ ที่มีพลังงานนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานเริ่มต้นของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำ

ให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวเป็น 2 ส่วน ให้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีนิวตรอนใหม่ออกมา 2-3 ตัว อันตรกิริยาแบบนี้จะพบในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n,f)

ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ Charge – particle emission ) เมื่อนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 10 MeV ชนกับนิวเคลียสของตัวกลางและรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบและปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา หรืออนุภาคโปรตอน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n, α) หรือ (n, p) ตัวอย่างอันตรกิริยานี้ได้แก่  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron –producing reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้นิวตรอนมากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n,2n) ปฏิกิริยา (n,3n)



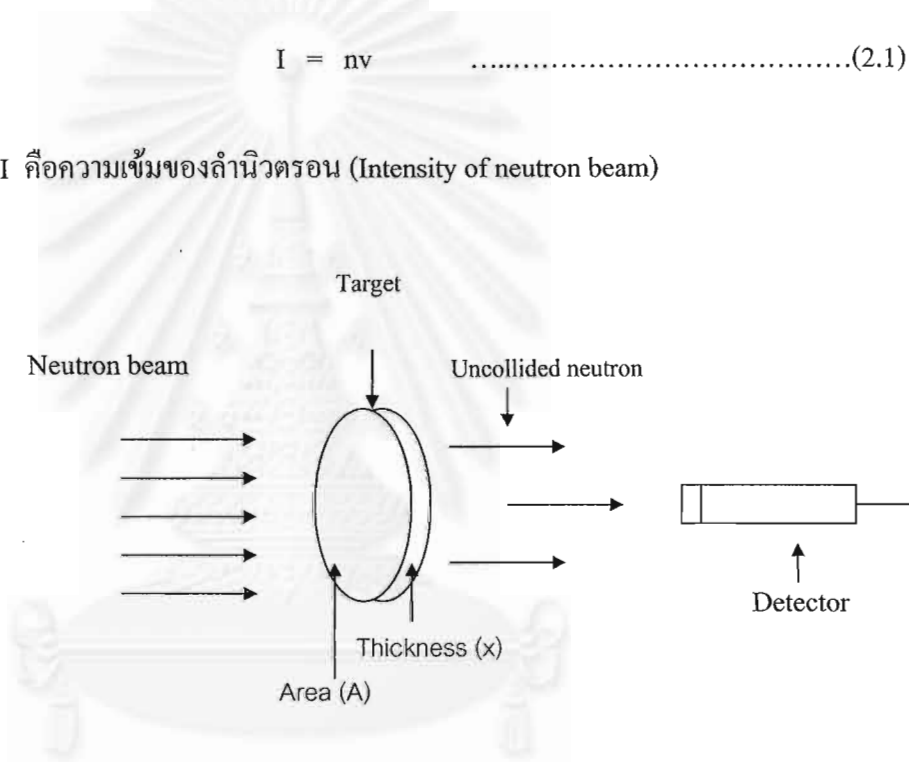
รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ

2.1.5 ภาคตัดขวางนิวตรอน (Neutron cross section)

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง นิยมอธิบาย ในเทอมของ “ภาคตัดขวาง (cross section)” อธิบายได้โดย พิจารณาแผ่นวัสดุบางชนิดหนึ่ง มีพื้นที่ หน้าตัด A มีความหนา x และมีความหนาแน่นอะตอม N อะตอมต่อหน่วยปริมาตร โดยที่มีลำ นิวตรอน (Neutron beam) ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.4 ถ้ามีนิวตรอนจำนวน n นิวตรอนต่อหน่วย ปริมาตร และมีความเร็ว v ดังนั้น

$$I = nv \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ I คือความเข้มของลำนิวตรอน (Intensity of neutron beam)



รูปที่ 2.4 ลำนิวตรอนตกกระทบเป้า

ถ้า n มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร v มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อ วินาที ดังนั้น I จะมีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (neutron / cm<sup>2</sup>-sec) จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้า พื้นที่ A ต่อวินาที เท่ากับ IA แต่จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้าไม่ได้ทำ อันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนาของเป้า และค่า ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

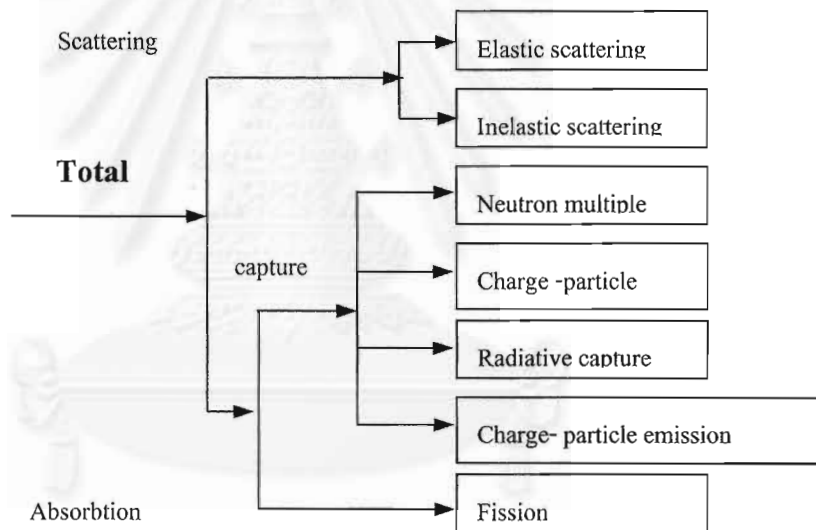
$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma Ax \dots\dots\dots(2.2)$$



$\sigma$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน นิยมใช้หน่วยเป็น บาร์น (barn) โดยที่  
 1 บาร์น (b) =  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบ ดังนั้นค่าภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมจึงมีหลายค่าเช่นเดียวกัน ถ้าให้  $\sigma_t$  เป็นภาคตัดขวางรวม (total cross section) ของนิวเคลียสชนิดหนึ่งต่อนิวตรอน จะสามารถแบ่งชนิดของค่าภาคตัดขวางได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ผลคูณ  $N\sigma$  ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\Sigma$  เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  ผลคูณของ  $N\sigma_t$  ในสมการ (2.5) จึงใช้สัญลักษณ์เป็น  $\Sigma_t$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section)



รูปที่ 2.5 แสดงชนิดของภาคตัดขวางตามอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Sigma_{mix} = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots$$

$$\Sigma_{mix} = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \dots \dots (2.3)$$

เมื่อ  $\Sigma_{mix}$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ  
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทปหรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...

2.1.6 การลดความเข้มนิวตรอน (Neutron attenuation)

เมื่อนิวตรอนวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนา  $x$  นิวตรอนจะถูกลดทอนลง และนิวตรอนที่ชนเป็นแบบล่าขนาน มีพลังงานเดียวกระทบเป้าที่มีขนาดเล็กมาก อีกด้านหนึ่งเป็นหัววัดนิวตรอนขนาดเล็กเพื่อป้องกันไม่ให้นิวตรอนที่ชน (collided neutron) หรือเกิดอันตรกิริยากับเป้าเข้าสู่หัววัด ดังนั้นนิวตรอนที่เข้าสู่หัววัดจึงเป็นนิวตรอนที่ไม่เกิดการชน (Uncollided neutron) หรือไม่เกิดอันตรกิริยากับเป้าเท่านั้น

นิวตรอนที่วิ่งผ่านตัวกลาง ความหนา  $x$  มีค่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอนเท่ากับ  $\sigma$  และมีความหนาแน่นอะตอม (atom density) เท่ากับ  $N$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มอนุภาคนิวตรอนที่ลดลงไปใน 1 วินาที เมื่อผ่านตัวกลางที่มีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรและหนา  $dx$  คือ

$$-dI(x) = \sigma_t N I_0 dx \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ  $I_0$  = จำนวนอนุภาคนิวตรอนที่วิ่งเข้าหาตัวกลางต่อหน่วยพื้นที่ในหนึ่งวินาที

การลดทอนพลังงานของนิวตรอนนั้นแตกต่างจากรังสีที่มีประจุที่ทำอันตรกิริยากับอะตอมตัวกลางแต่นิวตรอนทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง ดังนั้นสมการลดทอนพลังงานที่ได้คือ

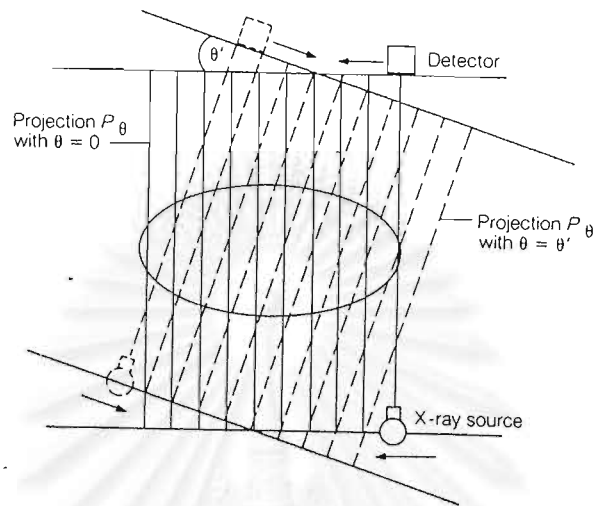
$$I_x = I_0 e^{-(N\sigma_t x)} \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ  $\sigma_t$  = ค่าภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาต่าง ๆ ของนิวตรอนต่อนิวเคลียสของตัวกลาง

2.2. หลักการของ Computed Tomography (CT)<sup>[2,3,4]</sup>

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสร้างภาพ คือ ค่าความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุออกมาในทิศทางต่าง ๆ จำนวนมาก หลักการทำงาน คือ ปล่อยลำรังสีลำแคบออกไปแล้วใช้หัววัดรังสี (Detector) ไปตั้งไว้ฝั่งตรงข้าม แล้วเคลื่อนลำรังสีและหัววัดรังสี โดยให้รังสีลำแคบตัดผ่านไปในระนาบของวัตถุ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงแบบนี้ 1 ครั้งจะได้ข้อมูล 1 โปรไฟล์ ถ้าลำรังสีลำแคบเคลื่อนที่เปลี่ยนมุมจากแนวเดิม แล้วเคลื่อนที่ตัดแนวเดิม การเคลื่อนที่จะกระทำจนครบ 180 องศา ดังรูปที่

## 2.6 ข้อมูลความเข้มรังสีทั้งหมดจะถูกนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี



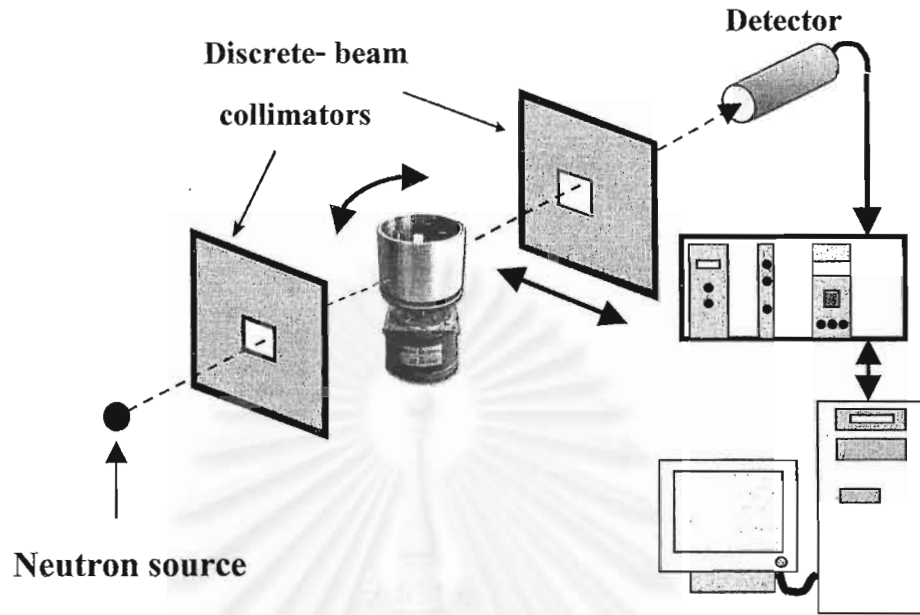
รูปที่ 2.6 รังสีนิวตรอนเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงที่มุมต่างๆ กัน

### 2.2.1 เทคนิคการเก็บข้อมูลโปรไฟล์

เทคนิคการเก็บข้อมูลโปรไฟล์เพื่อใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีซึ่งสามารถจำแนกวิธีการเป็น 3 ระบบ ได้แก่

#### 1. ระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์แบบรังสีลำแคบ (Narrow beam)

ลักษณะการทำงานของระบบสแกนแบบนี้คือ ใช้ลำรังสีลำแคบหนึ่งลำ (Single discrete beam) ใช้หัววัดรังสี 1 หัวในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสี เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลักการทำงานของสแกนนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแรกให้วัตถุเคลื่อนที่ตัดลำรังสีในลักษณะที่วัตถุเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Translation) และการหมุน (Rotation) ส่วนแบบที่สองให้หัววัดรังสีเคลื่อนที่ไปพร้อมกับต้นกำเนิดรังสีโดยที่วัตถุตัวอย่างอยู่กับที่ ลักษณะการเคลื่อนที่แบบที่สองก็เช่นเดียวกับแบบแรกคือ เคลื่อนที่แนวเส้นตรงทีละจุด หรือเรียกอีกอย่างว่าการสแกน ระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่แต่ละจุด จะเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องรับรังสีของหัววัดนั้น ข้อมูลแต่ละจุดเรียกว่า “เรย์ซัม (raysum)” เมื่อสิ้นสุดการสแกน 1 แถวจะได้ข้อมูลหลายเรย์ซัมที่เรียกว่า โปรไฟล์ (Profile) หรือ โปรเจกชัน (Projection) และหมุนไปเป็นมุมน้อยๆ ทีละองศา หรือมากกว่าจึงเริ่มสแกนและได้ข้อมูลโปรไฟล์ใหม่จนครบ 180 องศา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของระบบสแกนนี้มาใช้เก็บข้อมูลโปรไฟล์ เพื่อสร้างภาพโทโมกราฟีดังแสดงในรูปที่ 2.7



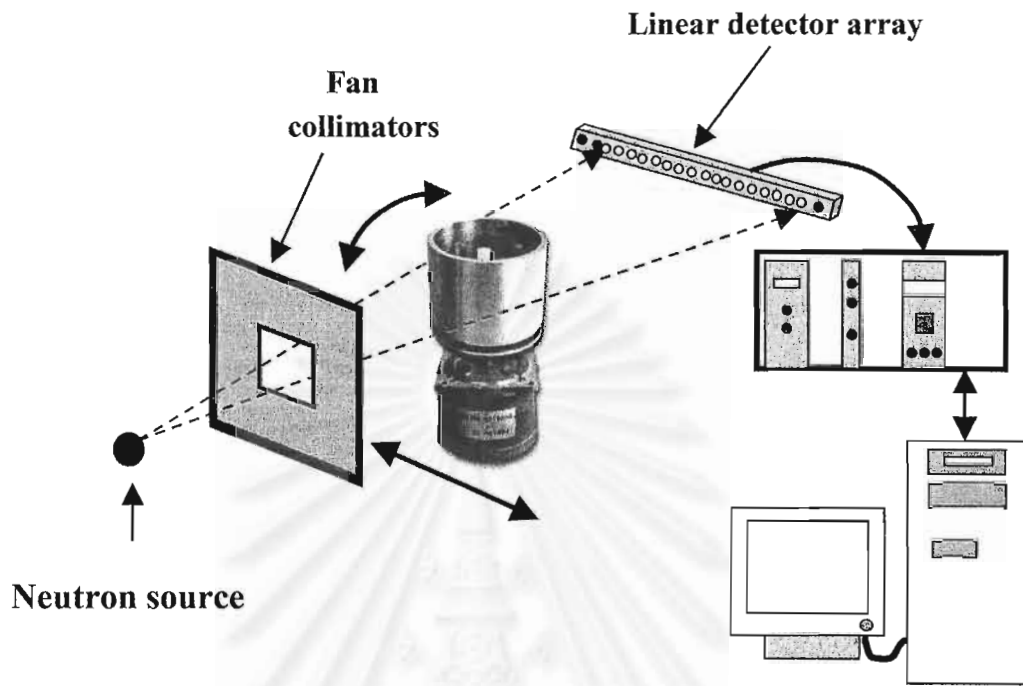
รูปที่ 2.7 การทำงานของระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ

## 2. ระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์แบบลำรังสีรูปพัด (Fan beam)

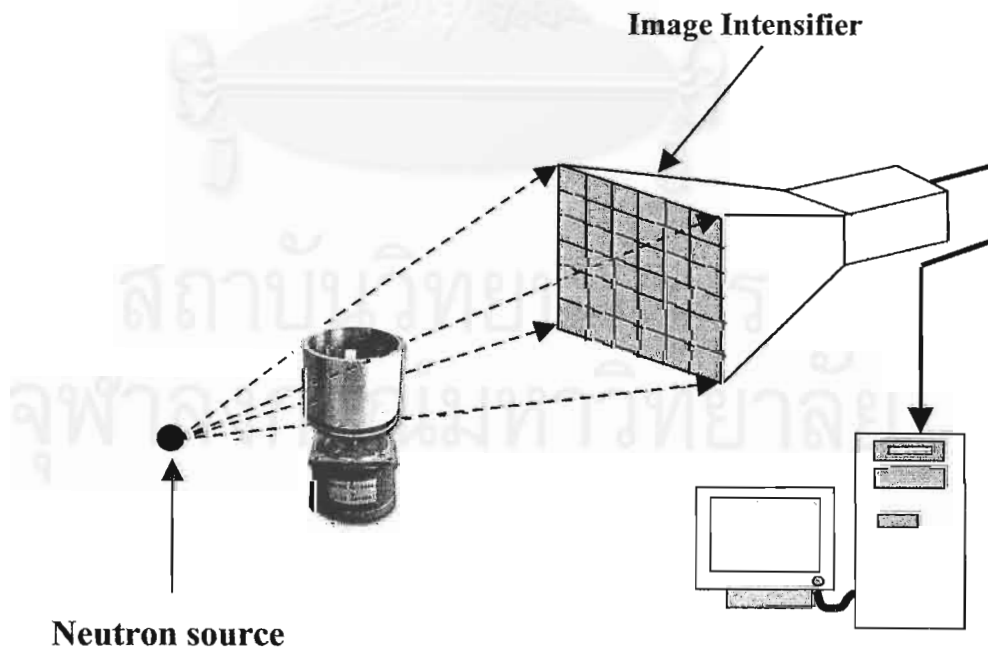
เนื่องจากระบบสแกนรังสีลำแคบ ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีมาก จึงได้มีการพัฒนาระบบสแกนลำรังสีรูปพัดขึ้นมา เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูลโดยมีลำรังสีเป็นแบบพัด (Fan beam) ใช้หัววัดรังสีแบบแถวเรียงติดกัน (Linear detector array) หลักการทำงานจะคล้ายๆ ระบบสแกนแบบแรก จะต่างกันเมื่อหมุนไปแต่ละครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยไม่ต้องสแกนเพราะสามารถเก็บข้อมูลทั้งหมดได้เลย ทำให้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยลง จึงสามารถออกแบบให้วัตถุตัวอย่างหมุนรอบตัวเอง หรือออกแบบให้หัววัดรังสีหมุนรอบวัตถุตัวอย่างไปพร้อมๆ กับต้นกำเนิดรังสีก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

## 3. ระบบเก็บข้อมูลโปรไฟล์แบบลำรังสีรูปกรวย (Cone beam)

ระบบนี้สามารถสร้างรายละเอียดของภาพได้สองระนาบ (Two dimension) คือระนาบในแนวแกนนอนกับระนาบในแนวแกนตั้ง โดยออกแบบให้ลำรังสีเป็นแบบกรวย และใช้หัววัดรังสีแบบแผ่นระนาบ ซึ่งจะมีหัววัดรังสีเรียงกันมากกว่า 1 แถว และในแต่ละแถวจะมีหัววัดรังสีอยู่หลายอัน หรืออาจใช้แผ่นเรืองแสงรับภาพ และมีกล้องโทรทัศน์จับภาพ โดยระบบสแกนแบบนี้จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์น้อยกว่าทั้งสองระบบ ซึ่งอาจเรียกระบบนี้ว่า ระบบโทรทัศน์ (Television System) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด



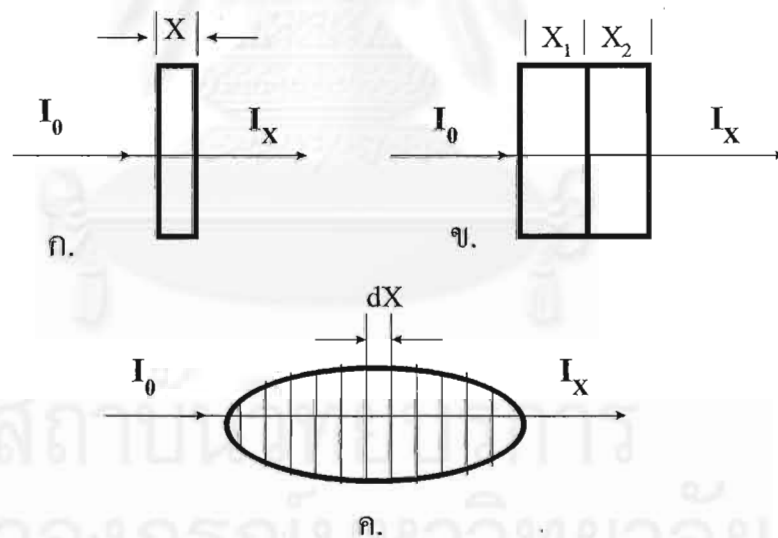
รูปที่ 2.9 แสดงการทำงานของระบบสแกนรังสีแบบลำรังสีรูปกรวย

## 2.2.2 ทฤษฎีการสร้างภาพโทโมกราฟี

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของความเข้มของลำรังสีในวัตถุ ในแนวระนาบใดระนาบหนึ่ง มาเขียนเป็นภาพจะได้ภาพที่บอกลักษณะภายในวัตถุนั้น ซึ่งภาพนี้เรียกว่า “ภาพโทโมกราฟี”

### 2.2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีนิวตรอน

รังสีนิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลางไม่มีประจุทางไฟฟ้า และเมื่อเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ ก็ตามจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับตัวกลาง ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีผลให้รังสีนิวตรอนที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้น ๆ ออกมาแล้วมีความเข้มลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.5 คือ  $I_x = I_0 \text{EXP}-(N\sigma_t X)$  เมื่อ  $I_x$  คือ ความเข้มของปริมาณรังสีนิวตรอนหลังผ่านตัวกลาง  $I_0$  คือ ความเข้มของปริมาณรังสีนิวตรอนก่อนผ่านตัวกลาง  $N\sigma_t$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาค ( Macroscopic cross section)  $X$  คือ ความหนาของตัวกลาง ปริมาณความเข้มของรังสีนิวตรอนที่เดินทางผ่านตัวกลางออกมาจะขึ้นอยู่กับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี ความหนาและชนิดของตัวกลาง ซึ่งการลดลงจะลดลงแบบเอกโปเนนเชียล ดังแสดงในเทอม  $\text{EXP}-(N\sigma_t)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีนิวตรอนที่เดินทางผ่านตัวกลาง 3 แบบ

- ตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกันตลอด
- ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกัน 2 ชนิด
- ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันหลายชนิด

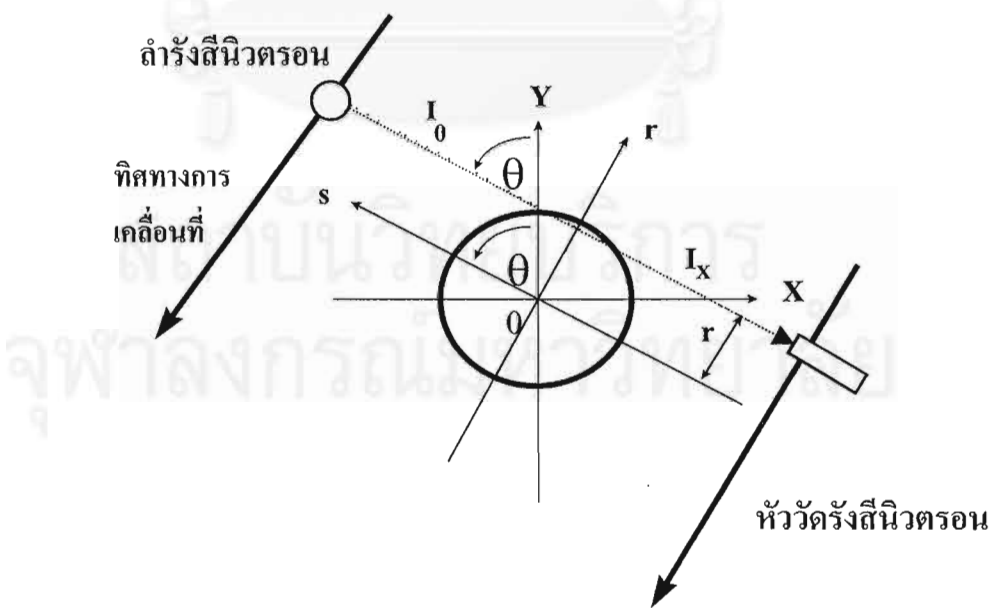
กรณีที่ว่ากลางประกอบด้วยสารสองชนิด หนา  $X_1$  และ  $X_2$  ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีนิวตรอนของตัวกลางทั้งสองเป็น  $\Sigma_{11}$  และ  $\Sigma_{12}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) จะได้ว่า

$$I_x = I_0 \text{EXP} -(\Sigma_{11} X_1 + \Sigma_{12} X_2) \dots\dots\dots(2.6)$$

แต่ถ้าตัวกลางที่มีสารประกอบหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) จำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นส่วนตัวเล็ก ๆ ขนาด  $dx$  เท่า ๆ กันจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I, I_0, \Sigma_1$  และ ความหนา  $X$  ของตัวกลางจะเป็นไปตามสมการ

$$I_x = I_0 \text{EXP} (-\int \Sigma_1 dx) \dots\dots\dots(2.7)$$

จากสมการ ที่ 2.7 เป็นสมการที่อธิบายการลดลงของรังสีนิวตรอน ที่ผ่านตัวกลางซึ่งประกอบด้วยสารหลายชนิด เทอมที่แสดงการลดลงของรังสีนิวตรอนเปลี่ยนจากการรวมกันแบบธรรมดาเป็นการอินทิเกรตตามเส้นทางลำรังสีนิวตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากการส่งผ่านรังสี

จากรูปที่ 2.11 ทุกจุดบนเส้นระนาบนี้อธิบาย ด้วยโคออร์ดิเนต ( X , Y )  
 รั้งสี่ค่าแคบพุ่งทำมุม  $\theta$  กับแกน Y โดยให้ลำรั้งสี่แทนด้วยโคออดิเนต ( r , s) และลำรั้งสี่แทนด้วย  
 โคออร์ดิเนต ( r ,  $\theta$ ) ในที่นี้พิจารณาเฉพาะลำรั้งสี่นิวตรอนลำแคบหนึ่ง ๆ เท่านั้น สมการที่อธิบาย  
 ความเข้มที่ทะลุผ่านออกมาจะคล้ายกับสมการที่ 2.7

$$I_x = I_0 \text{EXP} \left( - \int_{r,\theta} \Sigma_t (X, Y) dS \right) \dots\dots\dots(2.8)$$

โดยที่เทอมในวงเล็บหมายถึง การอินทิเกรตตามเส้นทางที่ถูกกำหนดด้วย  
 โคออร์ดิเนต ( r ,  $\theta$ ) สำหรับมุม  $\theta$  ใด ๆ มุมหนึ่งเท่านั้น สมการที่ 2.8 สามารถเขียน ได้อีกรูปแบบ  
 คือ

$$P (r, \theta) = - \ln \left( \frac{I_0}{I_x} \right) = \int_{r,\theta} \Sigma_t (X, Y) dS \dots\dots\dots(2.9)$$

เทอม P ( r ,  $\theta$ ) เป็นเทอมที่กำหนดขึ้นมีชื่อ เรียกว่าเรย์ซั่ม(Ray sum) หรือ  
 เรย์โปรเจกชัน (Ray projection) เป็นการอินทิเกรต  $\Sigma_t (X, Y)$  ตามเส้นทางของรั้งสี่ค่าแคบที่มี  
 โคออร์ดิเนต ( r ,  $\theta$ ) และที่มุม  $\theta$  ใด ๆ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรง หมายถึงการเปลี่ยนค่า r จะ  
 ได้เซตที่สมบูรณ์ของเรย์ซั่ม สำหรับมุม  $\theta$  นั้น เซตดังกล่าวนี้เรียกว่า โปรไฟล์ (Profile) หรือ โปร  
 เจกชัน ( Projection) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนต ( X , Y) และ ( r ,s) คือ

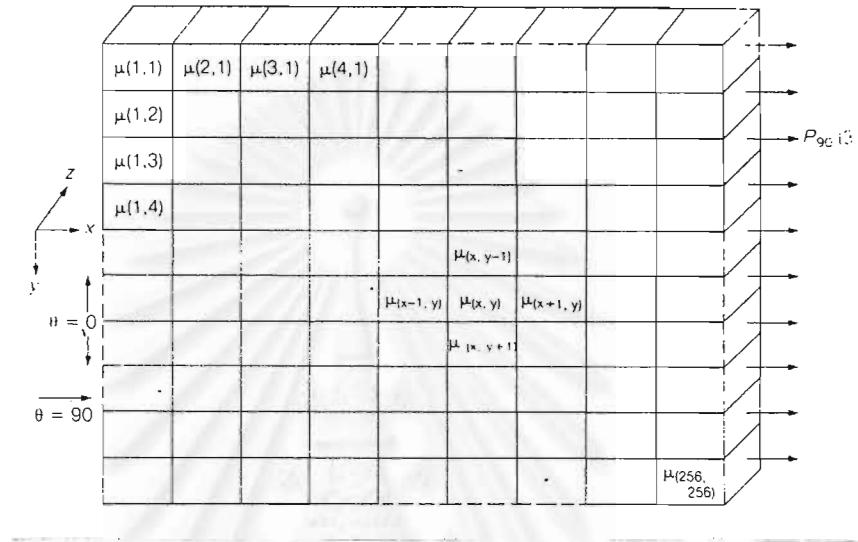
$$r = X \cos \theta + Y \sin \theta \dots\dots\dots(2.10)$$

ดังนั้น ถ้ามีวัตถุประกอบกันดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมีจำนวน 256x256 ชั้นมาประกอบกัน และ  
 เมื่อรั้งสี่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุนี้ การเก็บข้อมูลที่มุมใดมุมหนึ่ง ความเข้มของรั้งสี่นิวตรอนที่  
 ผ่านชั้นวัตถุจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$P(r,\theta) = \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$



เมื่อ  $P(r,\theta)$  คือ โปรเจกชันของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นทั้งหมดตลอดชั้นงานที่มุมใดมุมหนึ่ง เช่น ถ้ามุม 90 องศา สามารถเขียนในรูป  $P(3,90)$  นั่นคือพิจารณาเรย์ซัมที่ 3 ตลอดในทิศทางแกน Y ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 2.12 แสดงวัตถุชั้นงานที่เรียงเป็นเมตริก

เมื่อเก็บข้อมูลโปรไฟล์ จากการวัดความเข้มของรังสีนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัตถุตัวกลางที่มุมต่าง ๆ แล้วนำมาปรับแก้โปรไฟล์ด้วยค่าแบคกราวด์ (background) ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$\text{จาก } I_x = I_0 \text{ EXP } [- \int_{-\infty}^{\infty} f(X,Y) \text{ dS}]$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\ln \left[ \frac{I_0}{I_x} \right] = \int_{-\infty}^{\infty} f(X,Y) \text{ dS} = P(r,\theta)$$

สมการที่แก้ค่าแบคกราวด์แล้วคือ

$$P'(r,\theta) = \ln \left[ \frac{I_0 - B}{I_x - B} \right] \dots \dots \dots (2.11)$$

เมื่อ B คือ ข้อมูลโปรไฟล์ของค่าแบคกราวด์

และเลือกใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน Shepp-Logan จะได้โปรไฟล์ใหม่ที่เหมาะสมสำหรับนำไปคำนวณสร้างภาพตัดขวาง วิธีการคำนวณแบบนี้เรียกว่า “คอนโวลูชันฟิลเตอร์ แบคโปรเจกชัน” (Convolution filter backprojection) ซึ่งเป็นการประยุกต์ทฤษฎีฟูเรียร์ (Fourier Transform) และกฎของคอนโวลูชัน (convolution) ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$f(X,Y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_p(r,\theta) H(r-r') dr d\theta \dots\dots\dots(2.12)$$

เมื่อ  $H(r)$  = ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้แบบ Shapp-Logan

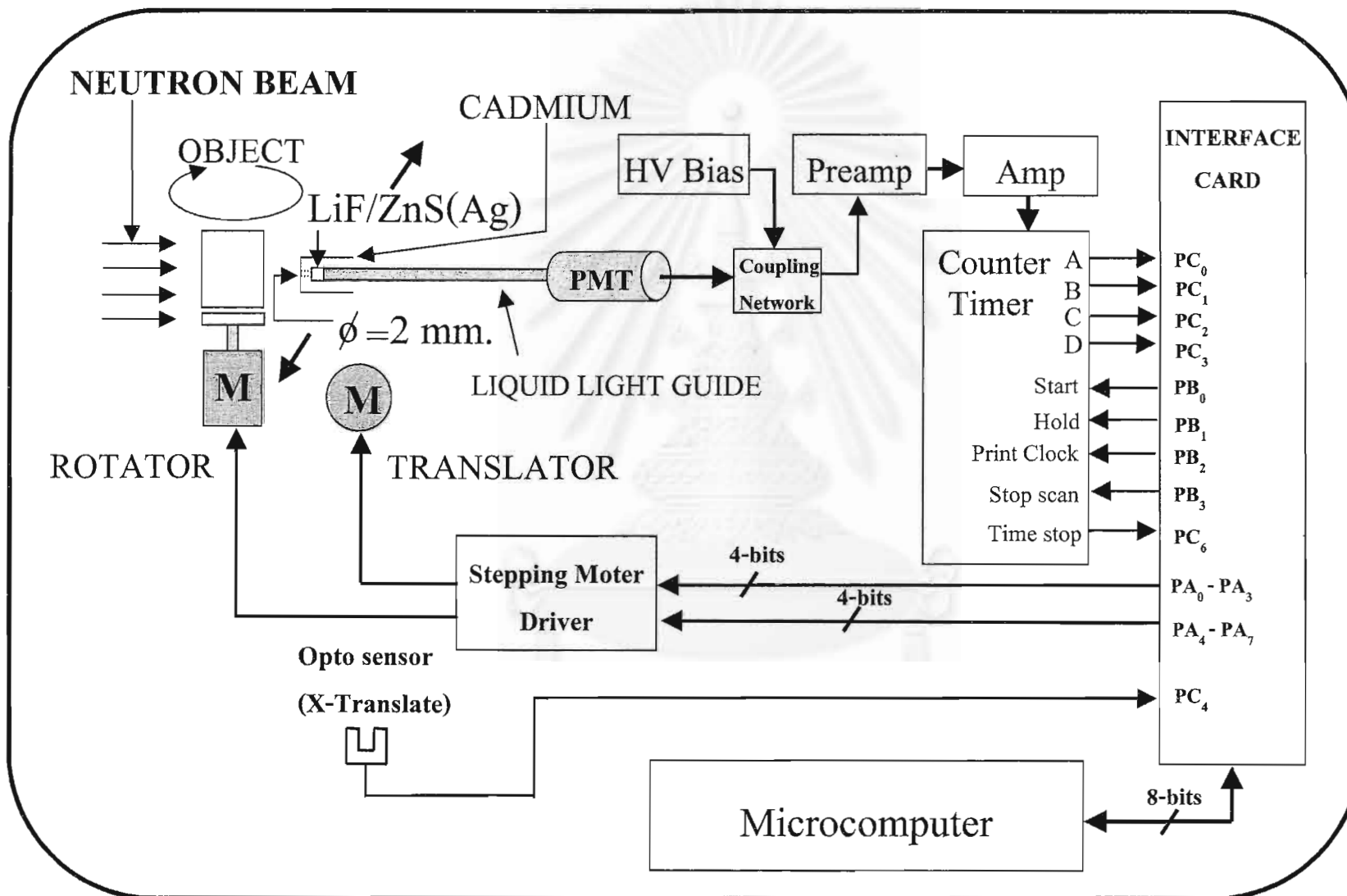


### บทที่ 3

## การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอน.

### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เทอร์มัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1) ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ
- 3.1.2 หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่นำมาใช้งานประกอบด้วย
  - 3.1.2.1 สารซินทิลเลเตอร์ (LiF/Zn(Ag)/Duro Adhesive)
  - 3.1.2.2 ท่อนำแสง เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 1.5 เมตร
  - 3.1.2.3 หลอดทวิคูณแสง
- 3.1.3 ระบบวัดนิวเคลียร์ ประกอบด้วย
  - 3.1.3.1 NIM BIN ของ CANBERRA model 2000
  - 3.1.3.2 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (High Voltage power supply) ORTEC model 556
  - 3.1.3.3 Preamp-AMP -SCA ของ ORTEC model 4890
  - 3.1.3.4 เครื่องนับสัญญาณเชิงตัวเลขและตั้งเวลานับ (Counter/Timer) ของ CANBERRA model 1772
- 3.1.4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย
  - 3.1.4.1 วงจรเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบขับเคลื่อนหัววัดรังสี กับระบบวัดนิวเคลียร์และไมโครคอมพิวเตอร์ (Interface Circuit)
  - 3.1.4.2 กล่องเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างหัววัดรังสี (Coupling Network Box)
  - 3.1.4.3 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor Driver) ของ บริษัท ETT model ET-SMC
- 3.1.5 ระบบควบคุมและแสดงผล ประกอบด้วย ไมโครคอมพิวเตอร์ IBM 80386 แสดงผลบนจอ VGA
- 3.1.6 อุปกรณ์กลสำหรับระบบกลขับเคลื่อนหัววัดรังสี
- 3.1.7 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการจัดระบบวัดรังสี

### 3.2 การพัฒนาและออกแบบสร้างระบบเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ระบบเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่พัฒนาขึ้น ได้ออกแบบให้สามารถวัดเทอร์มัลนิวตรอนที่กำเนิดจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย รวมทั้งเก็บข้อมูล และแสดงผลบนจอภาพของไมโครคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลแสดงในรูปที่ 3.1 มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

- 3.2.1 หัววัดเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้ท่อनाาแสงเคลื่อนปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ร่วมกับหลอดทวีคูณแสง
- 3.2.2 ระบบวัดนิวเคลียร์ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง Preamp-Amp-SCA ภาคนับและตั้งเวลา โดยแสดงผลของเทอร์มัลนิวตรอนที่ผ่านวัสดุชิ้นงานออกมาเป็นจำนวนนับรังสี
- 3.2.3 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ ทำหน้าที่ เชื่อมโยงสัญญาณระหว่าง ไมโครคอมพิวเตอร์ กับระบบสแกนและหมุนวัตถุตัวอย่าง รวมทั้งการโอนถ่ายข้อมูลระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์กับไมโครคอมพิวเตอร์
- 3.2.4 ระบบขับเคลื่อนทางกล ทำหน้าที่ขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอน เพื่อวัดความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนที่ผ่านวัสดุชิ้นงานออกมาและหมุนวัตถุตัวอย่างให้สัมพันธ์กับมุมตามที่ต้องการ
- 3.2.5 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ ทำหน้าที่ควบคุมการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ การหมุนวัตถุตัวอย่าง และการโอนถ่ายข้อมูลระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์และไมโครคอมพิวเตอร์

หลักการการทำงานของระบบสแกนด้วยนิวตรอนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี โดยใช้ท่อनाาแสงเคลื่อนปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ ควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ โดยเริ่มจากการควบคุมการสแกนให้หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้น โดยมีสวิทซ์แสงเป็นตัวตรวจสอบ เมื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้น หัววัดจะเริ่มทำการวัดเทอร์มัลนิวตรอนที่ส่งผ่านชิ้นงานออกมา ซึ่งเทอร์มัลนิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับสารซินทิลเลเตอร์ทำให้เกิดอนุภาคอัลฟาและแสงสีน้ำเงิน ซึ่งแสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังหลอดทวีคูณแสงโดยท่อनाาแสง หลอดทวีคูณแสงจะเปลี่ยนแสงที่ส่งมาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งผ่านวงจรคัปปลิงเพื่อต้องการเฉพาะสัญญาณพัลส์ทางนิวเคลียร์เข้าไปขยายโดยวงจรขยายส่วนหน้า และวงจรขยายหลักเพื่อให้สัญญาณมีขนาดโตพอที่จะเข้าสู่วงจรวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว ซึ่งจัดระบบ

ให้นำทุกพลังงาน และส่งผ่านไปยังวงจรนับและตั้งเวลา โดยผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณเข้าไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ เมื่อสิ้นสุดการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งนั้น ไมโครคอมพิวเตอร์จะควบคุมการสแกนให้หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งถัดไปจนครบหนึ่งโปรไฟล์ จากนั้นระบบหมุนวัตถุชิ้นงานจะหมุนวัตถุชิ้นงานไปด้วยมุมที่กำหนดและทำสแกนวัดรังสีต่อไปจนครบ 180 องศา และเก็บบันทึกข้อมูลโปรไฟล์เข้าสู่หน่วยความจำของไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างภาพโทโมกราฟีต่อไป

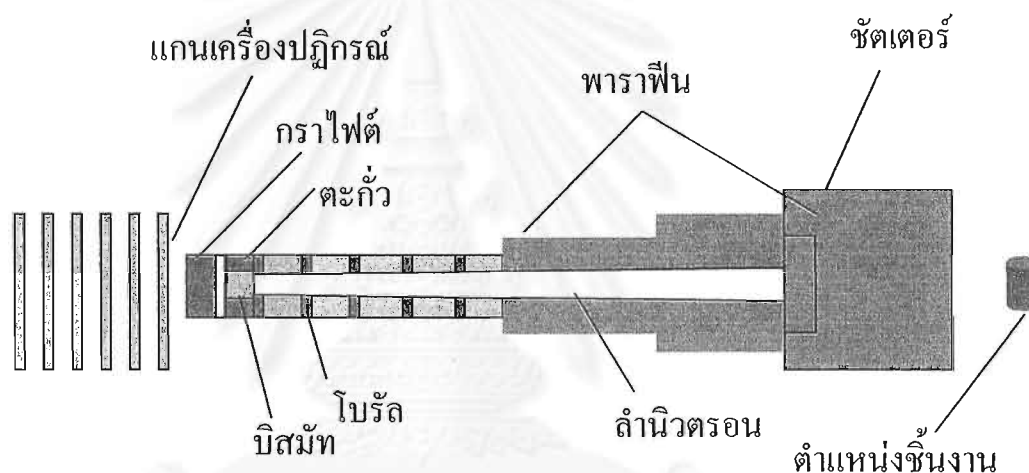
### 3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัย<sup>[5]</sup>

ต้นกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากปฏิกิริยาแตกตัว (Fission) ของยูเรเนียม-235 ในแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1) ซึ่งตั้งอยู่ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยชนิด TRIGA MARK III มีกำลังในการเดินเครื่องสูงสุด 2 เมกกะวัตต์ และในการทดลองการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ด้วยนิวตรอน ได้เดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่กำลัง 700 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1)

นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งเป็นนิวตรอนพลังงานสูงจะลดพลังงานโดยชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำ กลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอนจะถูกส่งผ่านออกมาทางท่อนำนิวตรอน (Neutron beam tube) มายังตำแหน่งที่ทำการทดลอง ซึ่งท่อนำนิวตรอนนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว มีความยาว 256 เซนติเมตร และประกอบด้วย กราไฟต์สำหรับลดพลังงานของนิวตรอน บิสมัทสำหรับลดปริมาณรังสีแกมมา และโบรล (Boral) ซึ่งเป็นโลหะผสมของอลูมิเนียมกับโบรอน สำหรับดูดจับนิวตรอนกระเจิง (scattering neutron) ปลายด้านนอกมีชัตเตอร์สำหรับเปิดและปิดท่อนำนิวตรอน อัตราส่วนความยาวของท่อนำนิวตรอนต่อความกว้างของช่องเปิดด้านในของท่อ (L/D ratio) มีค่าเท่ากับ 50 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ท่อนำนิวตรอน

ตำแหน่งที่ใช้ในการสแกนอยู่ห่างจากปลายท่อนำนิวตรอน 60 เซนติเมตร เมื่อเปิดชัตเตอร์จะมีลำนิวตรอนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 17 เซนติเมตร

#### 3.4 หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

การพัฒนาาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอน ได้นำหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่ได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี<sup>61</sup> ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถวัดเทอร์มัลนิวตรอนได้อย่างรวดเร็ว มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์ร่วมกับหลอดทวีคูณแสง โดยสารซินทิลเลเตอร์ ที่นำมาใช้งาน ประกอบด้วย สารคูคกีสันนิวตรอน สารเรืองแสง สารยึดเหนี่ยว และตัวทำละลาย ที่เป็นส่วนผสมของ ZnS(Ag)

LiF และสารยึดเหนี่ยวในอัตราส่วน 1:1.5 :0.5 หนา 1.87 มิลลิเมตร สารเคลือบชั้นนิวตรอนเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน แล้วให้รังสีอัลฟา ที่นำมาใช้คือ สารลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) เนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง

สารเรืองรังสี เมื่อถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคที่มีประจุจะให้แสงออกมา สารเรืองแสงที่นำมาใช้คือ สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) มีสูตรโมเลกุลเป็น ZnS(Ag) ปลดปล่อยแสงในช่วงแสงสีน้ำเงินออกมา มีความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร

สารยึดเหนี่ยวและตัวทำละลายที่ใช้ในงานคือกาวดูโร (duro) มีส่วนประกอบของอะซิโตน (acetone) และไอโซบิวทิลอะซิเตต (isobutyl acetate) ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทาน ไม่ละลายน้ำ ค่อนข้างใส และตัวทำละลายที่ใช้ในงานคือทินเนอร์เกรด AAA

#### ท่อนำแสง (Liquid Light Guide)

เป็นท่อนำแสงที่สามารถส่งผ่านแสงในช่วงอุลตราไวโอเล็ต และแสงที่ตามองเห็น โดยใช้หลักการสะท้อนกลับหมดภายใน ซึ่งสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 270 – 720 นาโนเมตร ซึ่งภายใน Liquid Light Guide บรรจุสารเหลวใสบริสุทธิ์ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย สำหรับปลายท่อทั้งสองข้างจะปิดด้วยแก้วซิลิกา สำหรับหน้าต่างส่งประกายแสงแล้วหุ้มด้วยโลหะกันสนิมประเภทสแตนเลส ส่วนตัวสายที่บรรจุผลึกสารเหลวจะหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อให้โค้งงอได้สะดวกชั้นนอกถัดมาจะเป็นอลูมิเนียมขดเป็นวง ส่วนชั้นนอกสุดจะเป็น PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์นำแสงคือ 5 มิลลิเมตร ส่วนความยาวของท่อนำแสงมีขนาด 1.5 เมตร ท่อนำแสงที่นำมาใช้งานมีมุมรองรับ 28 องศา แสงที่เกิดขึ้นจากสารเรืองรังสีจะปลดปล่อยออกมาและจะถูกส่งผ่าน liquid light guide เข้าไปขยายในหลอดทวีคูณแสง (Photo Multiplier Tube) ต่อไป

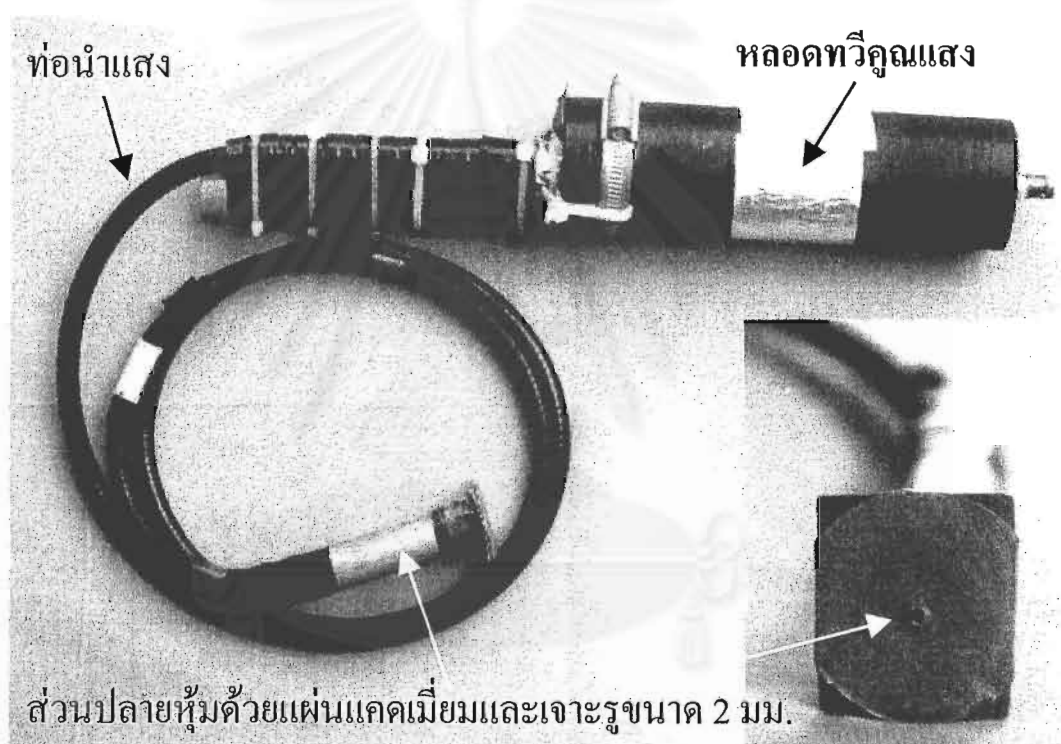
#### หลอดทวีคูณแสง

หลอดทวีคูณแสง เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่นำมาใช้งาน ซึ่งจะทำหน้าที่ เปลี่ยนประกายแสงให้เป็นอิเล็กตรอนและขยายปริมาณอิเล็กตรอนให้สูงพอที่จะสร้างสัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้า หลอดทวีคูณแสงที่ใช้มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ โฟโตแคโทดแบบกึ่งแสง (Semitransparent photocathode) โฟกัสซิ่ง อิเล็กโทรด (Focusing electrode) ไดโนด (Dynode) และแอนโนด (Anode) จากโครงสร้างภายในของหลอดทวีคูณแสง พบว่า เมื่อประกายแสงตกกระทบหลอดทวีคูณแสง โฟโตแคโทดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเนื่องจากผลของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกรวมกันสู่ไดโนด ซึ่งแผ่นไดโนดนี้จะไวต่อการเกิดเชกกันคาร์ซีมิสชัน (secondary



emission) และจัดทำมุมเพื่อให้เกิดการทวีปริมาณอิเล็กตรอน และแอนโตนจะรับประจุอิเล็กตรอนจากการทวีปริมาณ ของชุดโคโนด เพื่อสร้างเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าออกมา

ก่อนนำหัววัดเทอร์มินัลนิวตรอน มาใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ จะหุ้มปลายท่อ นำแสงด้วยแผ่นแคดเมียมหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น เนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติในการดูดกลืนเทอร์มินัลนิวตรอนได้ดี และเพื่อให้รีโซลูชันในการสแกนได้ดีขึ้น จึงเจาะรูแผ่นแคดเมียมที่หุ้มส่วนหน้าของหัววัดเทอร์มินัลนิวตรอนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเพื่อทำการบังคับลำนิวตรอนให้มีเพียงลำนิวตรอนขนานเท่านั้นที่เข้าสู่หัววัดรังสี ดังแสดงในรูปที่ 3.4

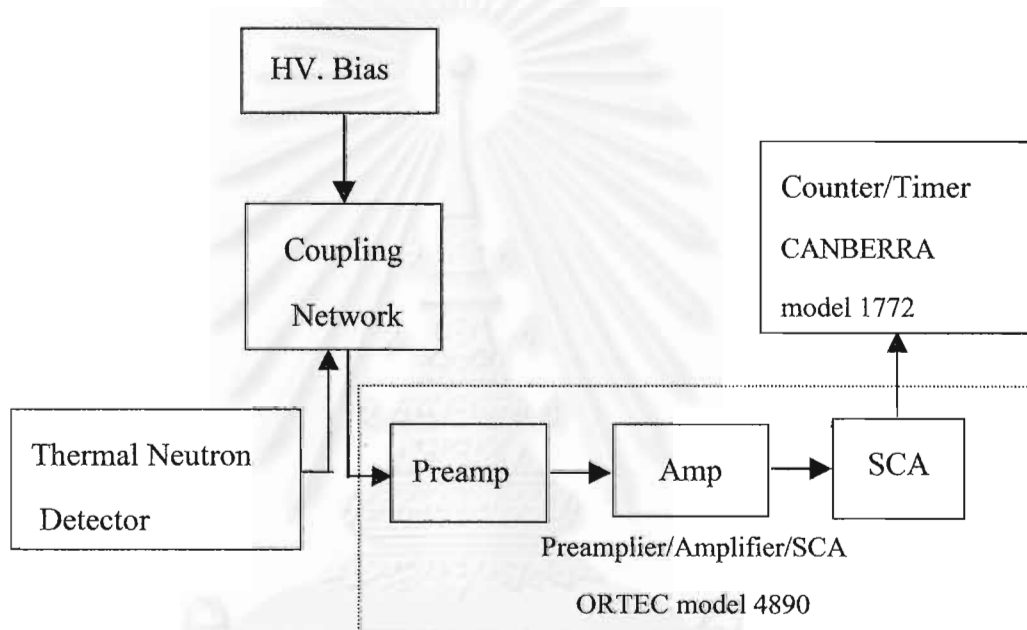


รูปที่ 3.4 หัววัดเทอร์มินัลนิวตรอนที่หุ้มปลายด้วยแผ่นแคดเมียม

### 3.5 ระบบวัดนิวเคลียร์

ระบบวัดนิวเคลียร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ระบบวัดรังสีแบบนับรวมทุกพลังงาน (integral counting) เพื่อทำการวัดรังสีให้ได้จำนวนนับมากที่สุดและใช้เวลาในการวัดน้อยที่สุด โดยหัววัดรังสีจะแปลงความเข้มของรังสีเป็นสัญญาณเชิงอนุমানแล้วส่งผ่านคัปปลิงเน็ดเวิร์ก ไปยังวงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier) เพื่อขยายสัญญาณที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสีและขยายต่อด้วยวงจร

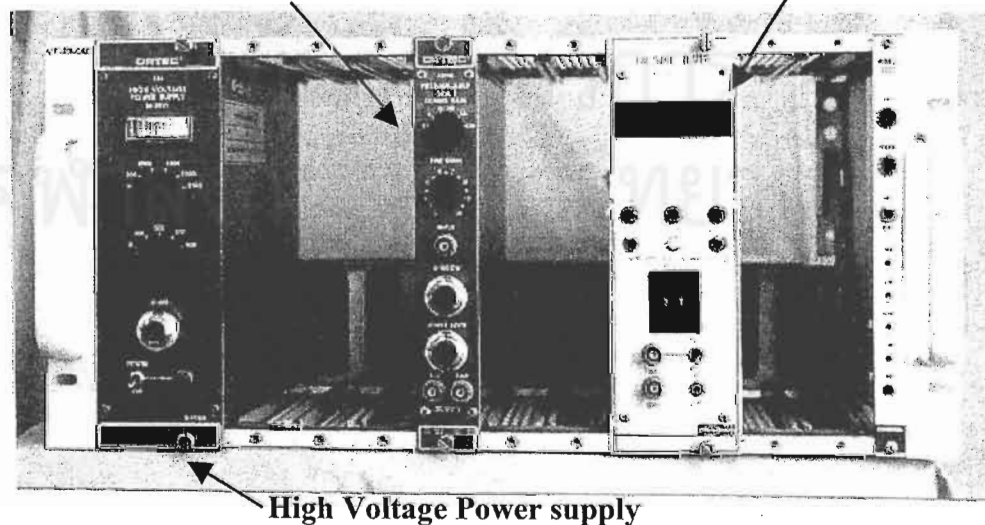
ขยายหลัก (amplifier) และสัญญาณที่ได้จากวงจรขยายหลักจะถูกส่งต่อเข้าไปในส่วนของระบบวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (Single channel analysis SCA) ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนั้นรวมอยู่ใน Preamplifier/amplifier/SCA ของ CANBERRA model 4890 แล้วเข้าสู่เครื่องนับโดยมีวงจรตั้งเวลาเป็นตัวกำหนดเวลาในการนับ (Counter/timer model 1772) โดยจะแปลงสัญญาณเชิงอนุมาณเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขเพื่อให้อยู่ในรูปสัญญาณที่สามารถบันทึกได้ในเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.5 แผนภาพส่วนประกอบของระบบวัดนิวเคลียร์

Preamp /Amp /SCA

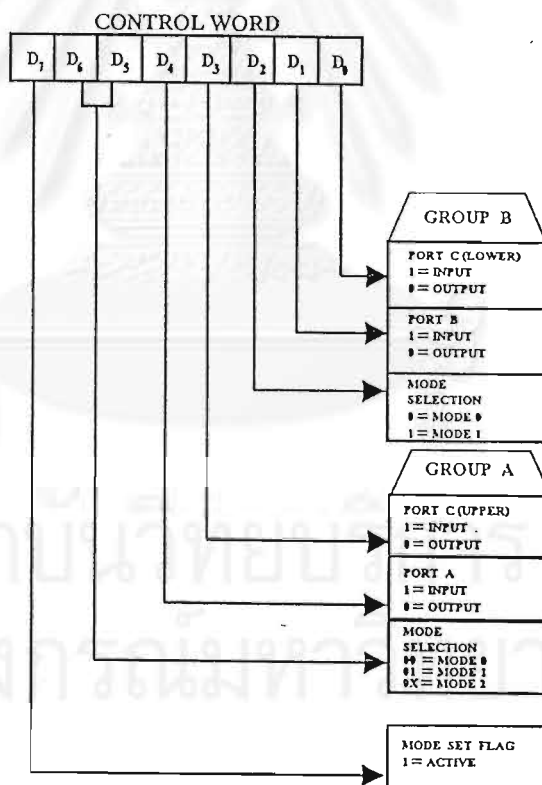
Counter/Timer



รูปที่ 3.6 ระบบวัดนิวเคลียร์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.6 แผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ

แผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ ทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณที่นำมาใช้งานนี้ประกอบด้วย ไอซีเบอร์ UMC 8255 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลผ่านทางบัสข้อมูล (Data Bus) โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยพอร์ตที่สามารถใช้เป็นอินพุต-เอาต์พุตได้จำนวน 3 พอร์ตคือ พอร์ต A (A0-A7) พอร์ต B (B0-B7) พอร์ต C (C0-C7) และบัสข้อมูลขนาด 8 บิตที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์ 1 ชุด ก่อนการใช้งานไอซี UMC 8255 ต้องทำการจัดพอร์ตให้เป็นไปตามสถานะที่ต้องการด้วยการโปรแกรมข้อมูลที่เรียกว่า รหัสควบคุม (Control Word) ผ่านทางบัสข้อมูลซึ่งมีรายละเอียดของรหัสควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงรหัสควบคุมและหน้าที่รหัสควบคุมแต่ละบิตของ UMC 8255

รหัสควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 137 (89H) โดยจะเซ็ทพอร์ต A และพอร์ต B เป็นเอาต์พุต และพอร์ต C เป็นอินพุตและเลือกโหมด 0 เป็นการต่อการทำงานแบบพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยให้พอร์ต A B C อยู่ที่แอดเดรส 768 769 770 และรหัสควบคุมอยู่ที่แอดเดรส 771 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 3.1

### CONTROL WORD

$$D_7 \ D_6 \ D_5 \ D_4 \ D_3 \ D_2 \ D_1 \ D_0$$

1	0	0	0	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

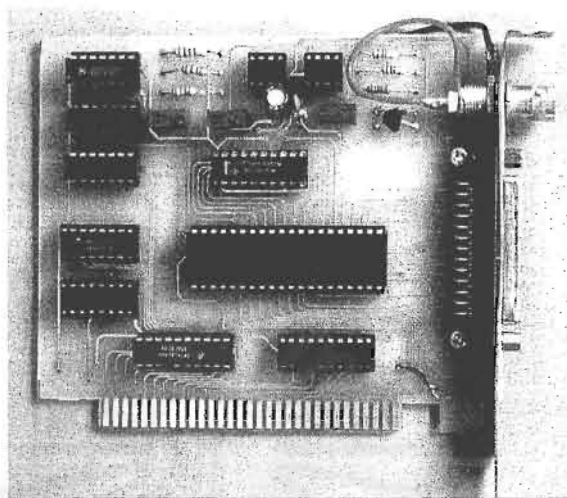
$$= 137 (89)H$$

รูปที่ 3.8 แสดงค่ารหัสควบคุม (Control Word) ของ UMC 8255 ที่โหมด 0

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการต่อพอร์ตบนแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ

หมายเลขพอร์ต	ขาสัญญาณ	ชนิดสัญญาณ	หน้าที่
768	PA0-PA3	เอาต์พุต	ควบคุมสเต็ปมอเตอร์แกน X
768	PA4-PA7	เอาต์พุต	ควบคุมสเต็ปมอเตอร์ Rotate
769	PB0	เอาต์พุต	ส่งสัญญาณ Start ไปยัง C/T
769	PB1	เอาต์พุต	ส่งสัญญาณ Hold ไปยัง C/T
769	PB2	เอาต์พุต	ส่งสัญญาณ Print clock ไปยัง C/T
769	PB3	เอาต์พุต	ส่งสัญญาณ Stop/Scan ไปยัง C/T
770	PC0-PC3	อินพุต	รับค่านับรังสีจากขา A,B,C,D จาก C/T
770	PC4	อินพุต	รับค่าเพื่อตรวจสอบจุดเริ่มต้นแกน X
770	PC6	อินพุต	รับสัญญาณ Time Stop จาก C/T

หมายเหตุ C/T = Counter/Timer ORTEC Model 1772



รูปที่ 3.9 แผงวงจรเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบขับเคลื่อนหัววัดรังสี ระบบวัดนิวเคลียร์เข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ (Interface Circuit)

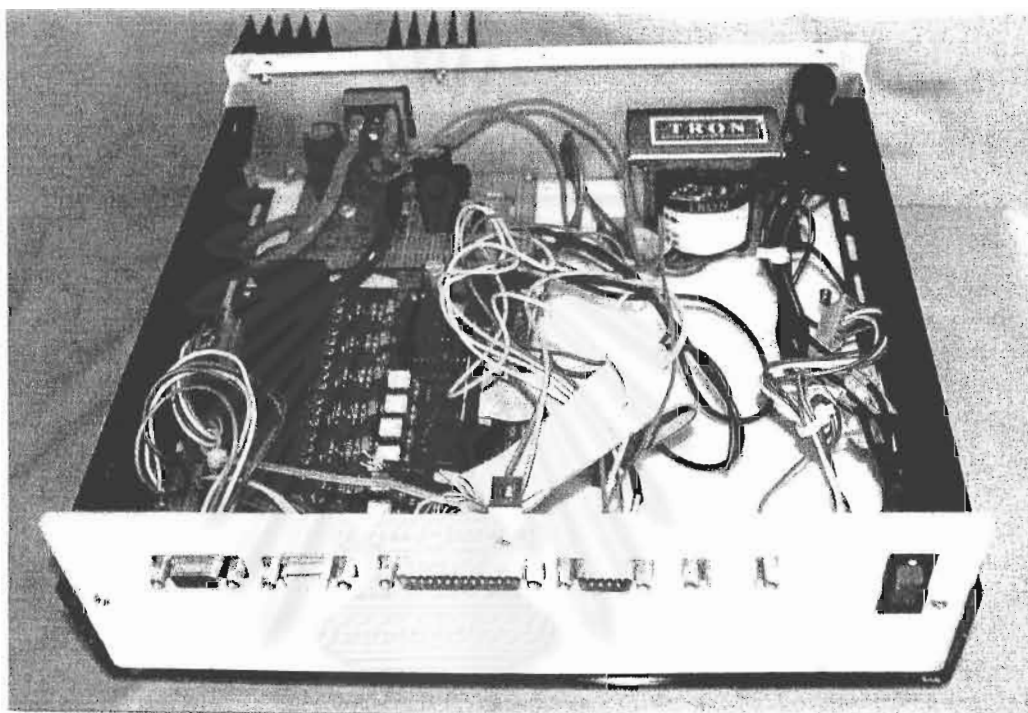
### 3.7 ระบบขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนและหมุนวัดตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนและหมุนวัดตัวอย่างที่พัฒนาจากงานวิจัยของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี<sup>[7]</sup> ประกอบด้วย สเต็ปป์มอเตอร์ และวงจรขับสเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor Driver) ซึ่งเลือกใช้สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส ใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ กินกระแส 1 แอมป์ต่อเฟส มีความละเอียดที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป จำนวน 2 ตัวโดยตัวแรกเป็นตัวขับเคลื่อนแบบ Translation ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนสเต็ปละ 1 มิลลิเมตร และตัวที่สองเป็นตัวขับเคลื่อนแบบ Rotation ซึ่งจะใช้ในการขับเคลื่อนวัดดูขึ้นงานตามองศาที่กำหนดคือ 1.8 , 3.6 , 7.2 หรือ 14.4 จนวนรอบ 180 องศา และเพื่อที่จะทำให้มีแรงบิดมากขึ้นจึงใช้การกระตุ้นทีละ 2 เฟสดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการกระตุ้นสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟส

เฟส 1	เฟส 2	เฟส 3	เฟส 4
1	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1

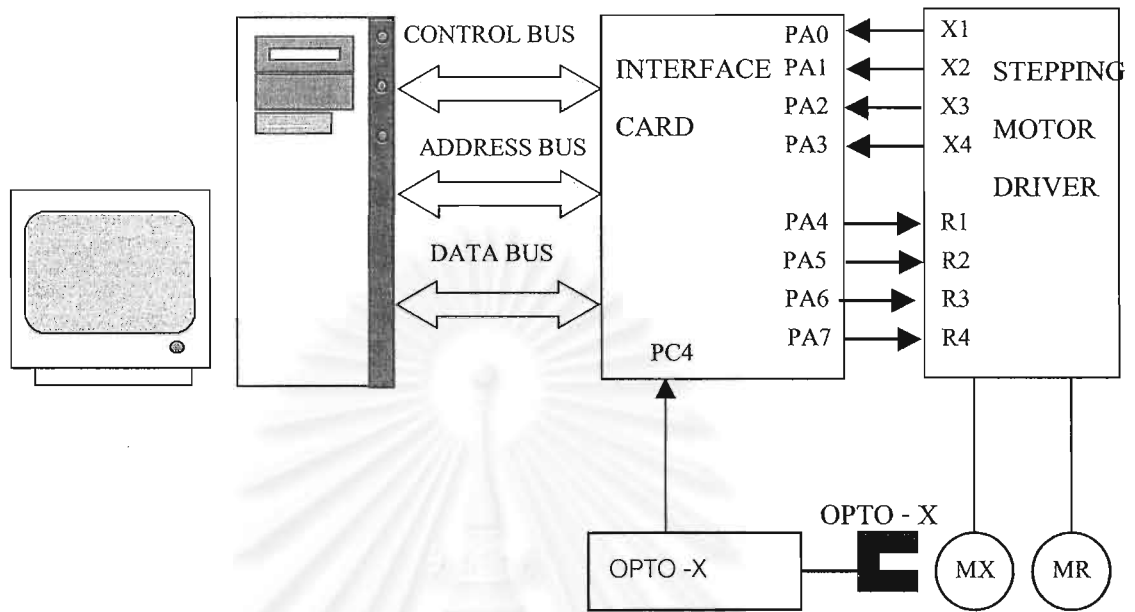
วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดที่อยู่ในสเต็ปปีงมอเตอร์ตามคำสั่งของโปรแกรมและในงานวิจัยนี้ใช้วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ ของบริษัท อีทีที รุ่น ET-SMCC ดังแสดงในรูปที่ 3.10



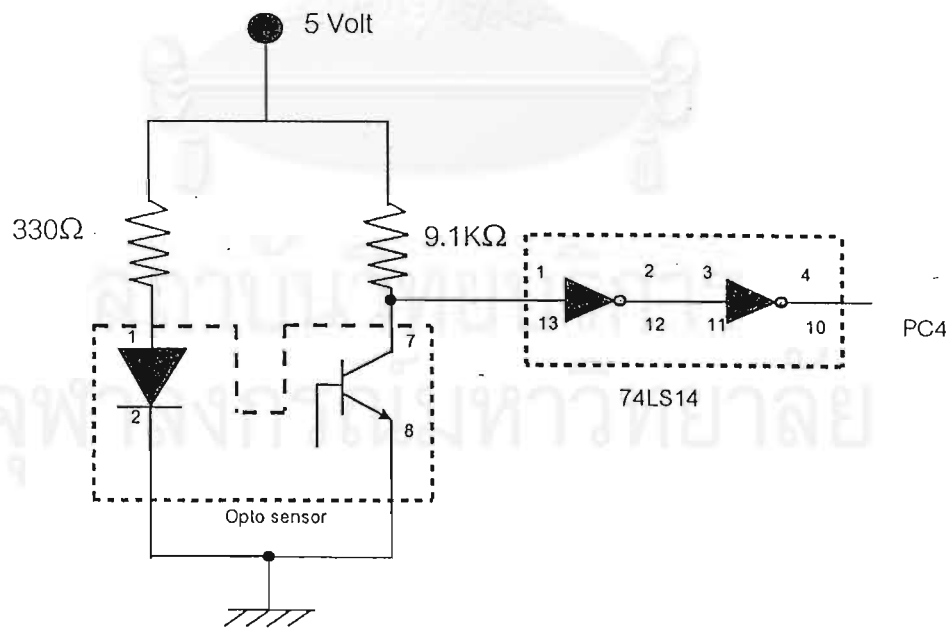
รูปที่ 3.10 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์

### 3.8 การเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มินัลวตรอนกับไมโครคอมพิวเตอร์

สัญญาณต่างๆ จากไมโครคอมพิวเตอร์จะถูกส่งผ่านแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อน โดยให้เคลื่อนที่ไปในแนวแกน X สเต็ปปีละ 1 มิลลิเมตร โดยผ่านทางพอร์ต A (A0-A3) และอีกตัวจะทำการหมุนวัตถุตัวอย่างตามมุมที่กำหนด โดยผ่านพอร์ต A (A4-A7) ของไอซี UMC 8255 ซึ่งระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีวงจรตรวจจับตำแหน่ง โดยใช้สวิทช์แสงเป็นตัวบอกตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกน X ซึ่งต่อกับวงจรเชื่อมโยงสัญญาณผ่านทางพอร์ต PC<sub>4</sub> ของ UMC 8255 เข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตแอดเดรส 770 ดังแสดงในรูปที่ 3.11



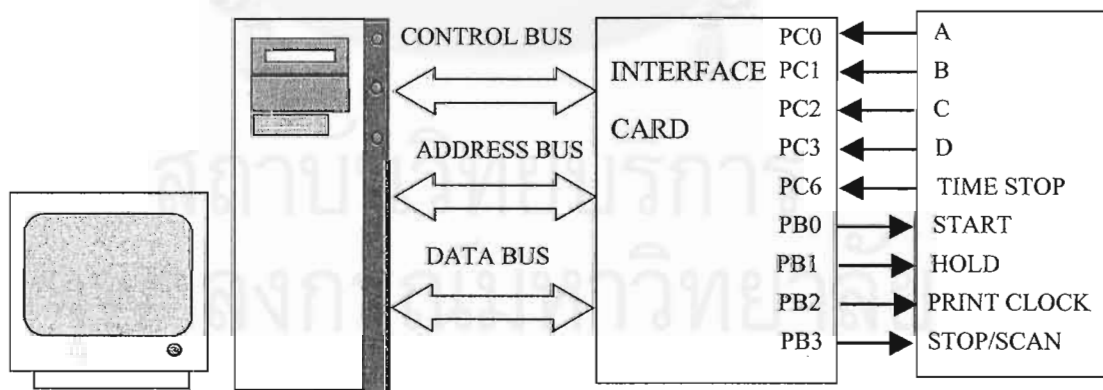
รูปที่ 3.11 แผนภาพเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างชุดขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มินัลนิวตรอน วงจรตรวจสอบ ตำแหน่งเริ่มต้นเข้ากับ ไมโครคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรสวิทช์แสงที่ใช้ในวงจรตรวจสอบตำแหน่งเริ่มต้น

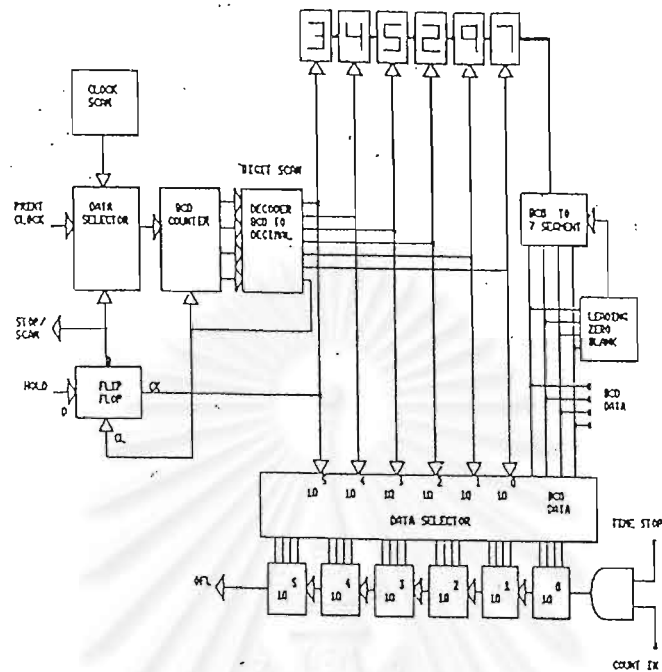
### 3.9 การเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์กับไมโครคอมพิวเตอร์<sup>[7]</sup>

เครื่องนับรังสีและตั้งเวลา จะเป็นตัวส่งข้อมูลจากระบบวัดนิวเคลียร์มายังไมโครคอมพิวเตอร์ โดยผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.13 ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของ BCD (Binary Code Decimal) จำนวน 6 หลัก ซึ่งมีลำดับการทำงานดังนี้คือ โปรแกรมควบคุมการทำงาน จะสั่งให้ไมโครคอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณลอจิก “0” ให้อุปกรณ์นับรังสีผ่านทางขา START และ HOLD เพื่อให้อุปกรณ์นับรังสีพร้อมที่จะทำงาน ขณะนับรังสีสัญญาณ TIME STOP จะมีสถานะเป็นลอจิก “1” เมื่อสิ้นสุดการนับรังสีตามเวลาที่ตั้งไว้ อุปกรณ์นับรังสีจะส่งสัญญาณลอจิก “0” และไมโครคอมพิวเตอร์จะบังคับให้สัญญาณ HOLD มีสถานะเป็นลอจิก “1” เพื่อให้สัญญาณ STOP/SCAN เปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก “1” ด้วย ในช่วงเวลานี้ไมโครคอมพิวเตอร์จะเริ่มอ่านข้อมูล โดยส่งสัญญาณ PRINT CLOCK ทีละ 1 ลูกจำนวน 6 ลูก เพื่อเลื่อนตำแหน่งในการอ่านข้อมูลตัวเลข BCD ทั้ง 6 หลัก จากหลักนัยสำคัญสูง ( $10^5$ )มายังหลักนัยสำคัญต่ำ ( $10^0$ ) และเมื่ออ่านข้อมูลหลักสุดท้ายครบแล้ว สัญญาณ STOP /SCAN และ HOLD จะเปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก “0” เป็นการสิ้นสุดการอ่านข้อมูลในแต่ละครั้ง เพื่อให้อุปกรณ์นับรังสีพร้อมที่จะทำการนับและส่งข้อมูลในช่วงเวลาต่อไป ซึ่งแผนภาพการทำงานและแผนภาพเวลาของสัญญาณจากอุปกรณ์นับรังสีดังแสดงในรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15

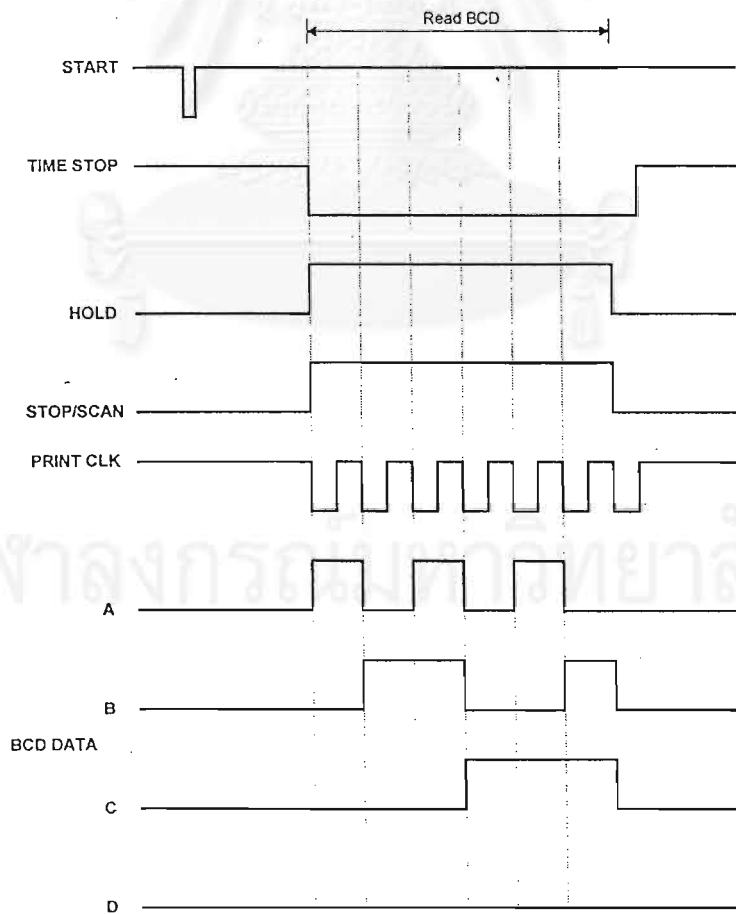


รูปที่ 3.13 แสดงการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์และเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์





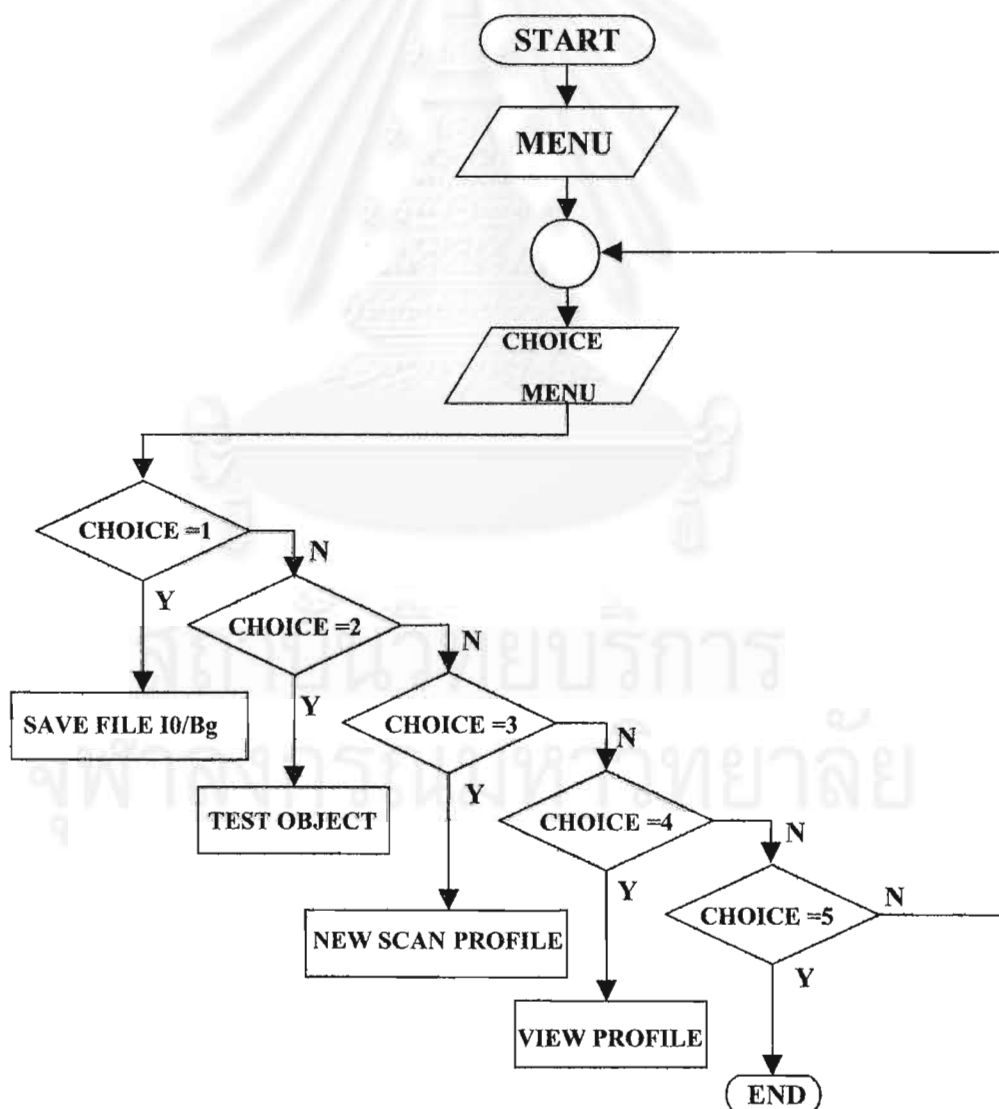
รูปที่ 3.14 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์นับรหัสและตั้งเวลา



รูปที่ 3.15 แผนภาพเวลาของสัญญาณจากอุปกรณ์นับรหัสและตั้งเวลา

### 3.10 โปรแกรมควบคุมการทำงานระบบสแกน

การทำงานของระบบต่างๆ ของระบบจะสอดคล้องกันได้ โดยใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานผ่านแผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ เพื่อควบคุมการโอนถ่ายข้อมูลระหว่างระบบวัดนิวเคลียร์กับไมโครคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่นำมาใช้งานได้พัฒนาจากงานวิจัยของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี<sup>[7]</sup> ซึ่งในส่วนของเมนูหลัก ประกอบด้วยเมนูสำหรับเลือกโปรแกรมน้อย ได้แก่ โปรแกรมบันทึกขณะไม่มีชิ้นงาน (I<sub>0</sub>) และแบคกราวด์ (Bg) โปรแกรมทดสอบการหมุนของชิ้นงาน โปรแกรมเริ่มต้นการสแกน โปรแกรมเรียกข้อมูลที่ได้นบันทึกไว้มาแสดงบนจอภาพไมโครคอมพิวเตอร์และ การจบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3. 16



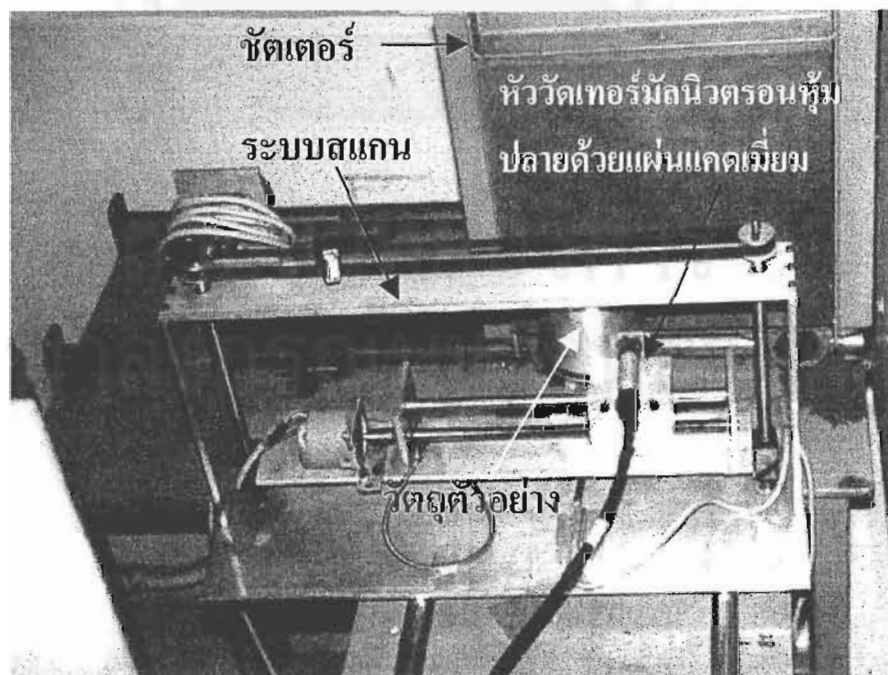
รูปที่ 3.16 โฟลวชาร์ตแสดงการทำงานของเมนูหลัก

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัยและผลการทดสอบ

#### 4.1 การทดสอบเก็บข้อมูลจากระบบสแกนด้วยนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นเพื่อการคำนวณสร้างภาพ โทโมกราฟี

ในการทดลองเก็บข้อมูลของวัตถุชิ้นงาน ได้ใช้เทอร์มัลนิวตรอนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์  
ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1) ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เครื่องที่กำลง 700 กิโลวัตต์ โดย  
ให้ระบบสแกนและหมุนวัตถุตัวอย่างอยู่ในห้องกำบังรังสี วัตถุชิ้นงานห่างจากปากท่อนำ  
นิวตรอน 60 เซนติเมตร และจัดให้หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนสแกนเก็บข้อมูลความเข้มของเทอร์มัล  
นิวตรอนที่ตำแหน่งความเข้มสูงที่สุดของลำนิวตรอนซึ่งพบว่า สูงจากพื้นโต๊ะประมาณ 13  
เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนระบบวัดนิวเคลียร์และไมโครคอมพิวเตอร์อยู่นอกห้อง  
กำบังรังสี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการทดลองนี้ได้จัดระบบวัดนิวเคลียร์ ให้แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้า  
จ่ายศักดาที่ 800 โวลต์ และที่ Preamp-Amp-SCA ปรับ Course gain เท่ากับ 8 Fine gain เท่ากับ 10  
Lower level เท่ากับ 0.3 และ Window เท่ากับ 10

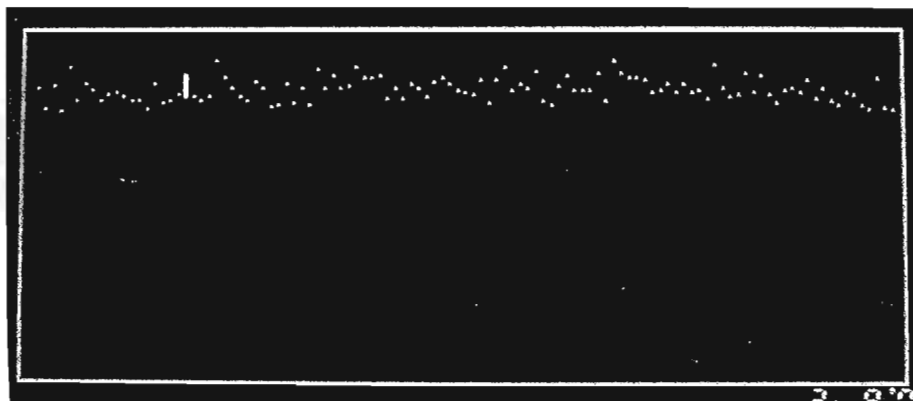


รูปที่ 4.1 ระบบสแกนและหมุนวัตถุตัวอย่างซึ่งอยู่ในห้องกำบังรังสี



รูปที่ 4.2 ระบบวัดนิวเคลียร์และไมโครคอมพิวเตอร์

จากการทดลองได้ปรับระบบสแกนให้เคลื่อนที่ในแนวระนาบครั้งละ 1 มิลลิเมตรและหมุนวัตถุตัวอย่างไปด้วยมุมทีละ 7.2 องศาจนครบ 180 องศา ซึ่งจะได้จำนวนโปรไฟล์ 25 โปรไฟล์ โดยในขั้นตอนแรกเมื่อจัดระบบแล้วเปิดชุดเตอร์เพื่อสแกนข้อมูลโปรไฟล์จากเทอร์มินัลนิวตรอนขณะไม่มีชิ้นงานจำนวน 1 โปรไฟล์โดยจำนวนเรย์ซั่มขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ( $I_0$ ) ข้อมูลที่ได้เรียกว่า “Shading” ดังแสดงในรูปที่ 4.3

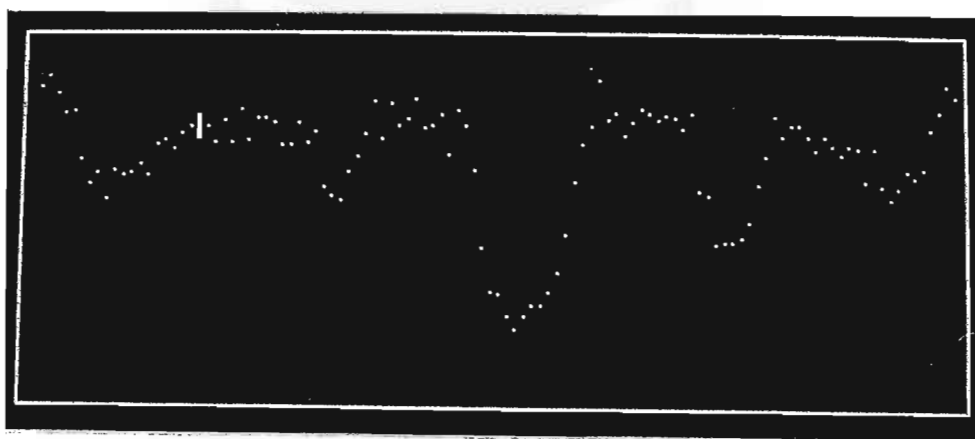


รูปที่ 4.3 ข้อมูลโปรไฟล์จากเทอร์มินัลนิวตรอนขณะไม่มีชิ้นงาน (Shading)

ขั้นตอนต่อไปปิดชัตเตอร์เพื่อกำบังลำนิวตรอนแล้วทำการสแกนข้อมูลโปรไฟล์ซึ่งเป็นการสแกนเก็บข้อมูลแบคกราวด์ (background) เราเรียกว่า “Dark Current” โดยมีจำนวนเรย์ซั้มเท่ากับกรณีแรก ข้อมูลที่ได้ดังแสดงในรูป 4.4 จากนั้นนำวัตถุชิ้นงานมาติดตั้งบนระบบหมุนตัวอย่าง และเปิดชัตเตอร์เพื่อทำการสแกนข้อมูลโปรไฟล์ของชิ้นงานตามเงื่อนไขต่างๆ ในโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Data) ซึ่งข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ข้อมูลโปรไฟล์ขณะปิดชัตเตอร์เพื่อกำบังลำนิวตรอน (Dark Current)



รูปที่ 4.5 แสดงข้อมูลโปรไฟล์จากการสแกนชิ้นงานตามเงื่อนไขต่างๆ ในโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ข้อมูลที่ได้จากการสแกนนี้ยังไม่สามารถนำไปคำนวณสร้างภาพได้ จะต้องนำข้อมูลที่นำมาทำปรับแก้ข้อมูล (Correct data) โดยพิจารณาข้อมูลเฉพาะช่วงที่สนใจนำมาแก้ข้อมูลโดยใช้สมการดังนี้คือ

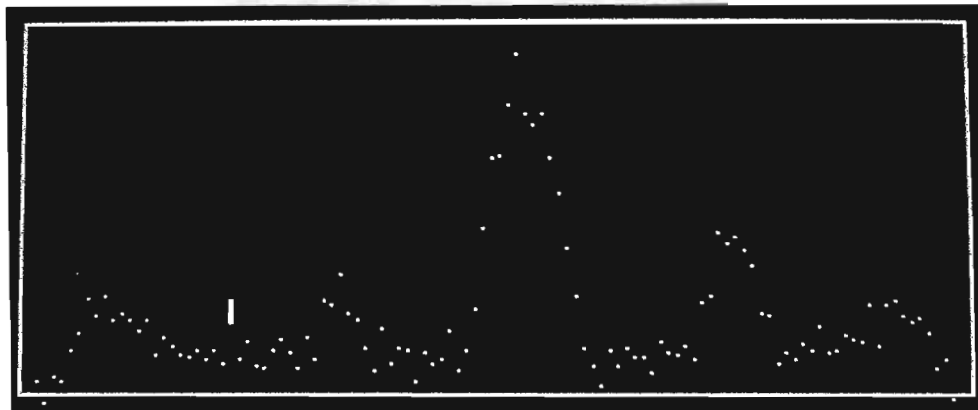
$$P'(\theta, X) = \ln \frac{I_0 - B}{I - B}$$

เมื่อ  $P'(\theta, X)$  หมายถึง โปรไฟล์ปรับแก้แล้ว

$I_0$  หมายถึง ข้อมูลโปรไฟล์เมื่อไม่มีวัตถุชิ้นงาน (Shading)

$B$  หมายถึง ข้อมูลโปรไฟล์ของแบคกราวด์ (Dark Current)

ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6

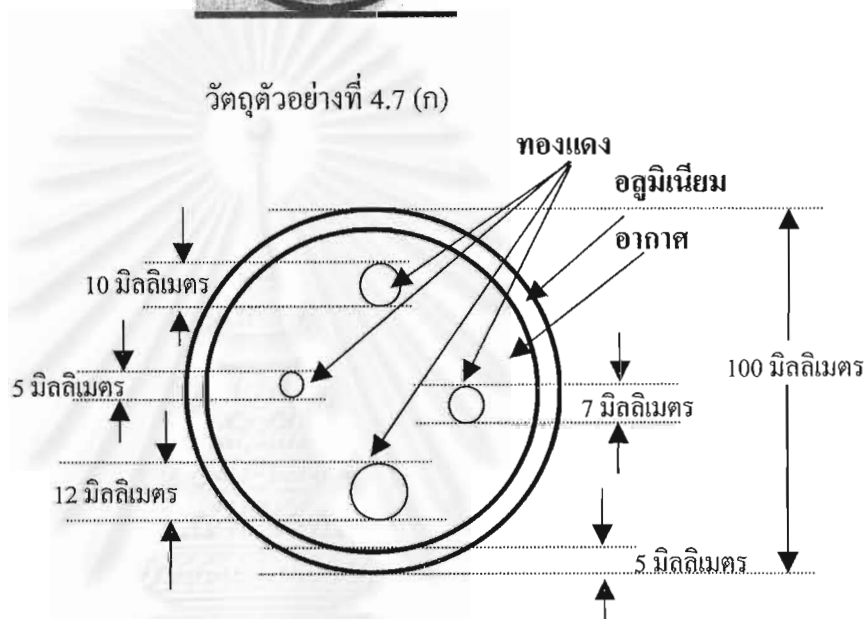
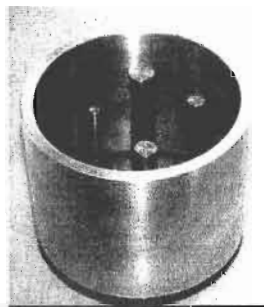


รูปที่ 4.6 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ปรับแก้ค่าแล้ว

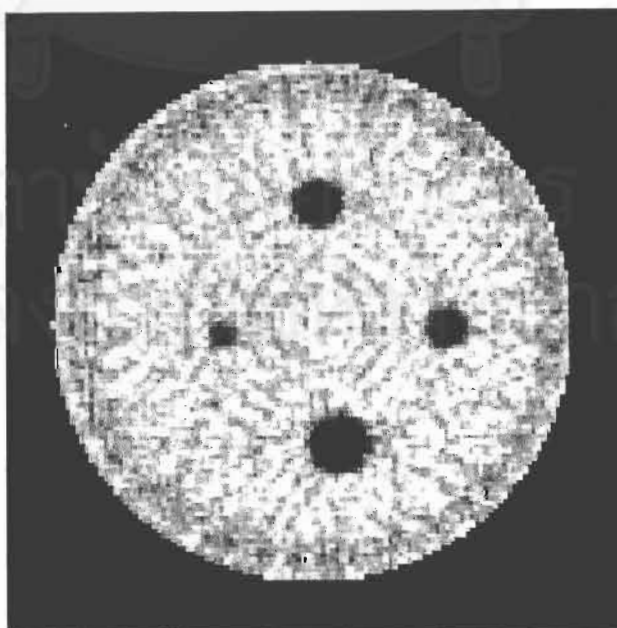
#### 4.2 ผลของการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ผลจากการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการสแกนชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 9 ชิ้นที่มีรูปร่างและวัสดุภายในที่แตกต่างก็นำมาคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ดังนี้

วัตถุตัวอย่างที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) ซึ่งประกอบด้วยท่ออลูมิเนียมกลมทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ขอบวงแหวนหนา 5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุแท่งทองแดงกลมทรงกระบอกตันจำนวน 4 แท่งมีขนาดดังนี้คือ 5, 7, 10 และ 12 มิลลิเมตร โดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข)



รูปที่ 4.7 (ข) แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของทองแดงภายในอลูมิเนียมทรงกระบอกกลวง



รูปที่ 4.7 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 1

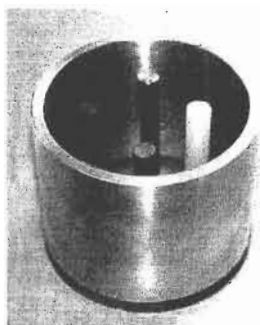
รูปที่ 4.7 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 1 เมื่อสแกนด้วยมุม 7.2 องศา 120 เรย์ซัม จำนวน 25 โปรไฟล์ โดยมีการเคลื่อนที่ต่อจุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 3 วินาทีต่อเรย์ซัม ซึ่งเมื่อเก็บข้อมูลทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 3.3 ชั่วโมงต่อ 1 ชิ้นงาน

ภาพจากรูปที่ 4.7 (ค) จะเห็นว่ามีความซับซ้อนซึ่งทำด้วยอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตรซึ่งจางมากเมื่อเทียบกับแท่งทองแดงขนาดต่างกันทั้งหมด 4 แท่ง แม้ว่าแท่งทองแดงที่เล็กที่สุดซึ่งมีขนาดเท่ากับขอบชิ้นงานก็ยังคงมีความเข้มมากกว่า เนื่องจากทองแดงมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนสูงกว่าอลูมิเนียม จึงทำให้เทอร์มินัลนิวตรอนทะลุผ่านแท่งทองแดงเข้าสู่หัววัดเทอร์มินัลนิวตรอนได้น้อยกว่าอลูมิเนียม ดังนั้น ภาพที่เห็นภายในอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกจะเป็นจุดดำกลมจำนวน 4 จุด ซึ่งสามารถระบุรูปร่างและตำแหน่งของชิ้นงานได้ชัดเจน แต่ทั้งนี้ เนื่องจากมุมที่หมุนเปลี่ยนไปที่ละ 7.2 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ค่อนข้างโตจึงทำให้ภาพของแท่งทองแดงไม่กลมเท่าที่ควร โดยเฉพาะแท่งทองแดงที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งมีการกระเจิงของนิวตรอนจึงทำให้ความคมชัดลดลง

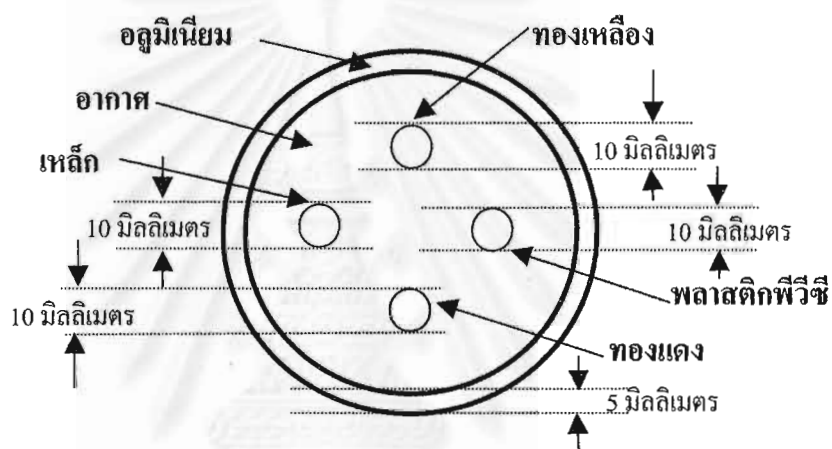
วัตถุตัวอย่างที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งประกอบด้วยท่ออลูมิเนียมกลมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ขอบวงแหวนหนา 5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุวัตถุหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ ทองเหลืองทองแดง เหล็ก และแท่งพลาสติกพีวีซี มีรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรอย่างละ 1 แท่ง โดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) รูปที่ 4.8 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 4.8 (ค) พบว่าจะเห็นขอบชิ้นงานซึ่งทำจากอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร และวัตถุตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ซึ่งมีขนาดเท่ากันคือ 10 มิลลิเมตรแต่ขนาดของภาพที่ได้จากการสร้างภาพโทโมกราฟีไม่เท่ากันเนื่องจาก ค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนไม่เท่ากัน จึงทำให้เทอร์มินัลนิวตรอนสามารถผ่านบริเวณขอบของชิ้นงานได้ง่าย ภาพที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าทองเหลืองซึ่งเป็นโลหะผสมจะมีขนาดเล็กกว่าทองแดง เหล็กและพลาสติกพีวีซี โดยเฉพาะพลาสติกจะมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานทั้งหมด เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติในการดูดกลืนเทอร์มินัลนิวตรอนได้ดี จึงทำให้เทอร์มินัลนิวตรอนเดินทางผ่านเข้าไปสู่หัววัดเทอร์มินัลนิวตรอนได้น้อย เมื่อสร้างภาพโทโมกราฟีจึงพบว่าพลาสติกพีวีซีมีความเข้มมากที่สุด แต่รูปร่างของชิ้นงานที่สร้างไม่เป็นรูปทรงกลมเนื่องจากมุมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีจำนวนน้อยและมีอาทิแฟกเกิดมาก เนื่องจากนิวตรอนส่วนใหญ่ถูกจับที่พลาสติกจึงทะลุผ่านไปสู่หัววัดได้น้อย สาเหตุที่ทำให้ภาพมีรอยสีดำเพราะเนื่องจากการกระเจิงของนิวตรอนและจำนวนโปรไฟล์อาจน้อยไป

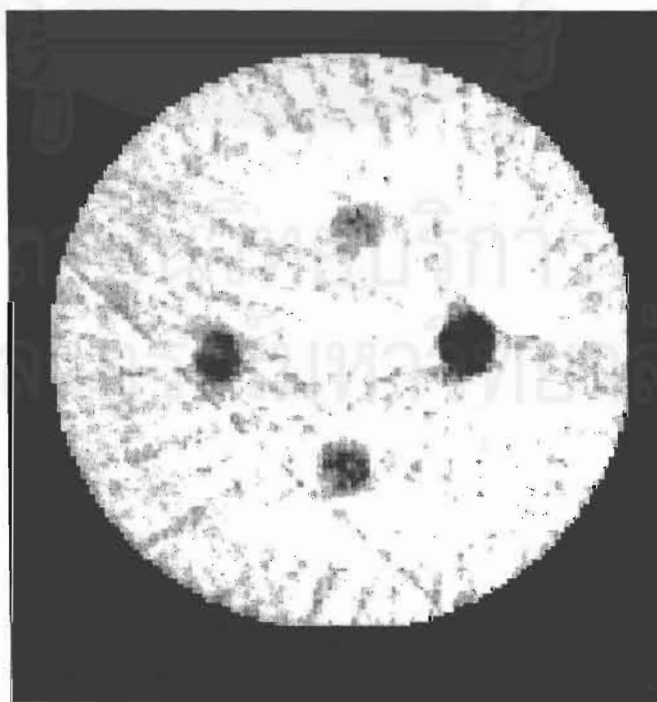




รูปที่ 4.8 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 2

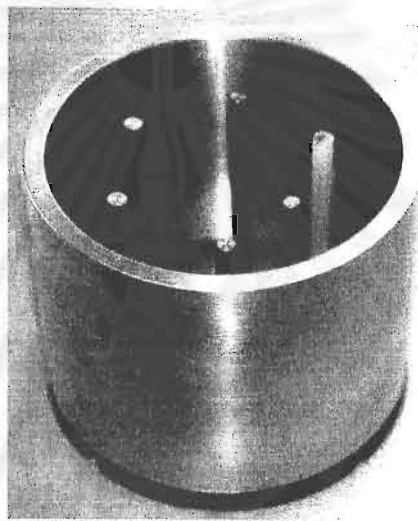


รูปที่ 4.8 (ข) แผนภาพการวางตำแหน่งของวัตถุตัวอย่างภายในอลูมิเนียมทรงกระบอกกลวง

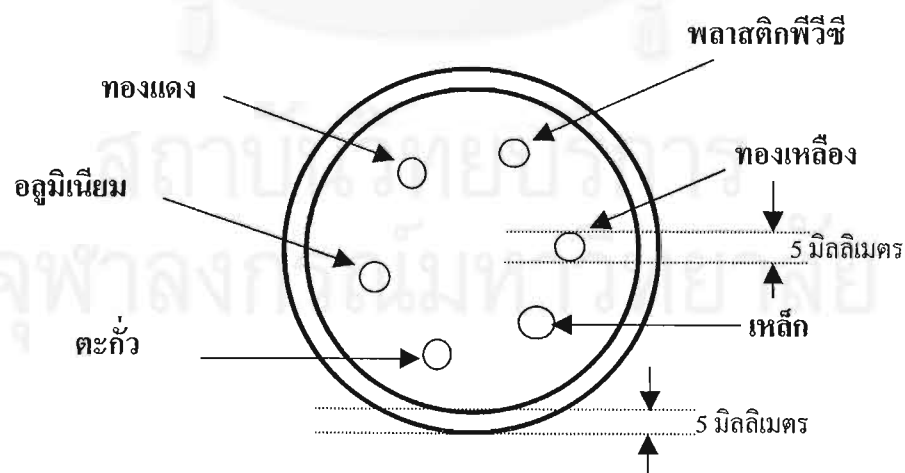


รูปที่ 4.8 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 2

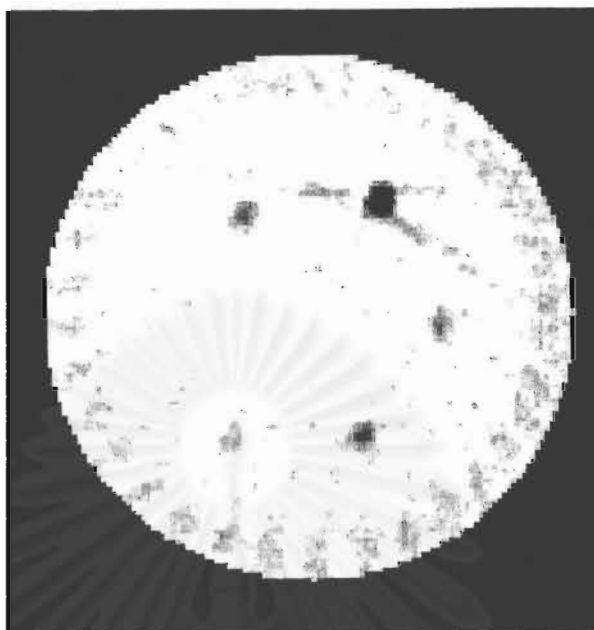
วัตถุตัวอย่างที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) ซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ขอบวงแหวนหนา 5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุวัสดุตัวอย่างทรงกระบอกตัน ทั้งหมดจำนวน 6 แห่งแต่ละแห่งมีขนาด 5 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบไปด้วย ทองเหลือง พลาสติกพีวีซี ทองแดง อลูมิเนียม ตะกั่ว และเหล็กโดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) รูปที่ 4.9 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.9 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 3



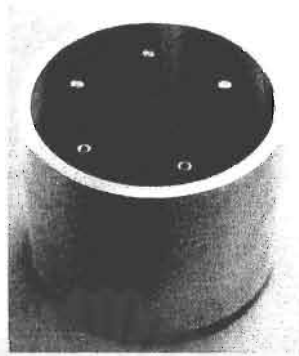
รูปที่ 4.9 (ข) แสดงการวางตำแหน่งของวัตถุตัวอย่างภายในขอบอลูมิเนียมทรงกระบอก



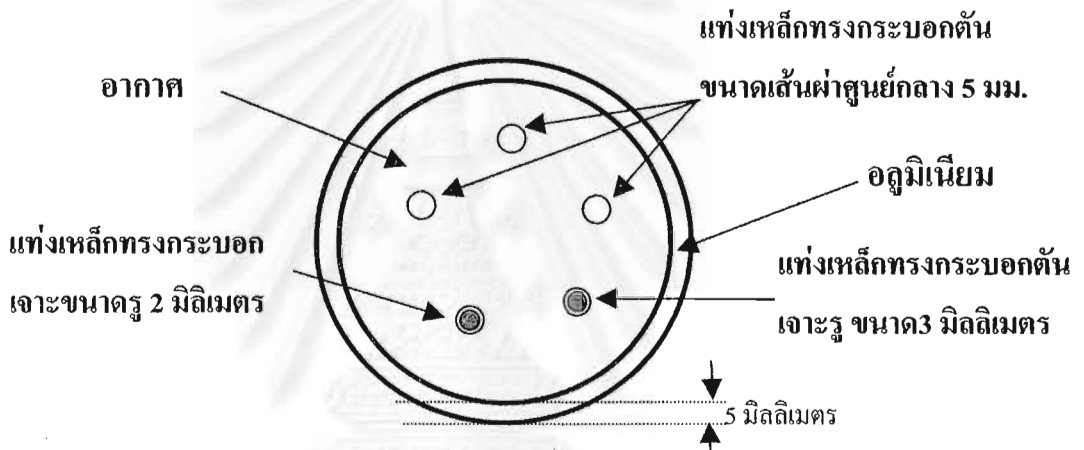
รูปที่ 4.9 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 3

จากรูปที่ 4.9 (ก) พบว่าเห็นขอบชิ้นงานซึ่งทำจากอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร และภายในขอบอลูมิเนียมจะเห็นจุดที่มีความเข้มต่างกัน 5 จุด เนื่องจากเป็นวัสดุที่มี ค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนต่างกันจึงทำให้ความเข้มที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยเรียงจากความเข้มมากที่สุดได้แก่ พลาสติก เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง ตะกั่ว ซึ่งจากภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้น ไม่พบแท่งอลูมิเนียมทรงกลมเนื่องจากอลูมิเนียมมี ค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนต่ำกว่าวัสดุทุกชนิดในชิ้นงานนี้ จึงทำให้เทอร์มินัลนิวตรอนทะลุผ่านแท่งอลูมิเนียมได้หมด และจากการทดลองนี้ทำให้ทราบข้อจำกัดของชิ้นงานว่าถ้าใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า 5 มิลลิเมตร

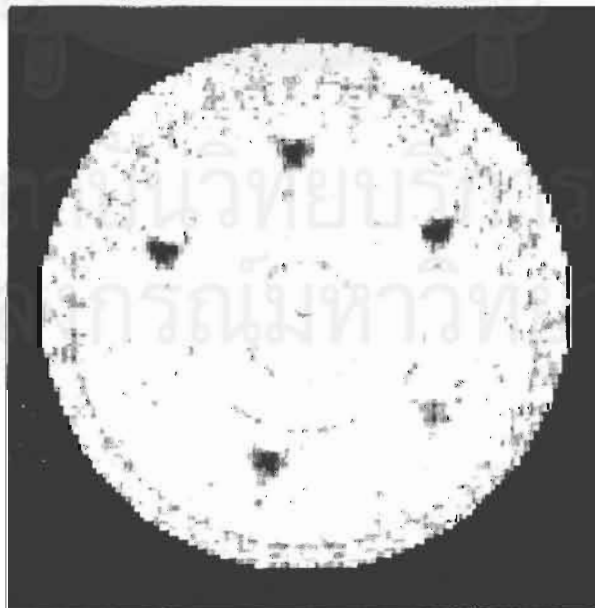
**วัสดุตัวอย่างที่ 4** ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ขอบวงแหวนหนา 5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุเหล็กทรงกระบอกตัน จำนวน 5 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลาง จำนวน 2 แท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) รูปที่ 4.10 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 4 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.10 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 4.10 (ข) แผนภาพการวางตำแหน่งของแท่งเหล็กภายในขอบอคูมิเนียมทรงกระบอก



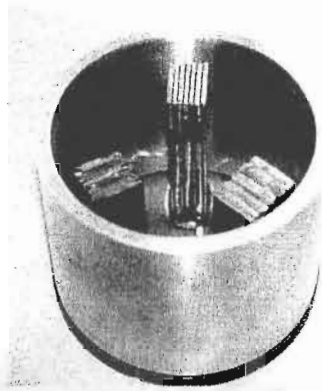
รูปที่ 4.10 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 4

จากรูปที่ 4.10 (ค) พบว่าจะเห็นขอบชิ้นงานที่ทำจากอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร และภายในจะพบจุดเชื่อมจำนวน 3 จุดซึ่งเป็นของแท่งเหล็กตันที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และอีก 2 จุดมีความเข้มต่างกัน เนื่องจากแท่งเหล็กทั้ง 2 แท่ง เจาะรูขนาด 2 และ 3 มิลลิเมตร ซึ่งจากภาพที่ได้พบว่าไม่สามารถเห็นรูที่เจาะไว้ทั้ง 2 ขนาด เนื่องจากพื้นหน้าตัดของหัววัดรังสีที่เปิดรับลำนิวตรอนมีขนาดค่อนข้างโตเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูที่เจาะ จึงเห็นเพียงตำแหน่งและรูปร่างของแท่งเหล็กเท่านั้น

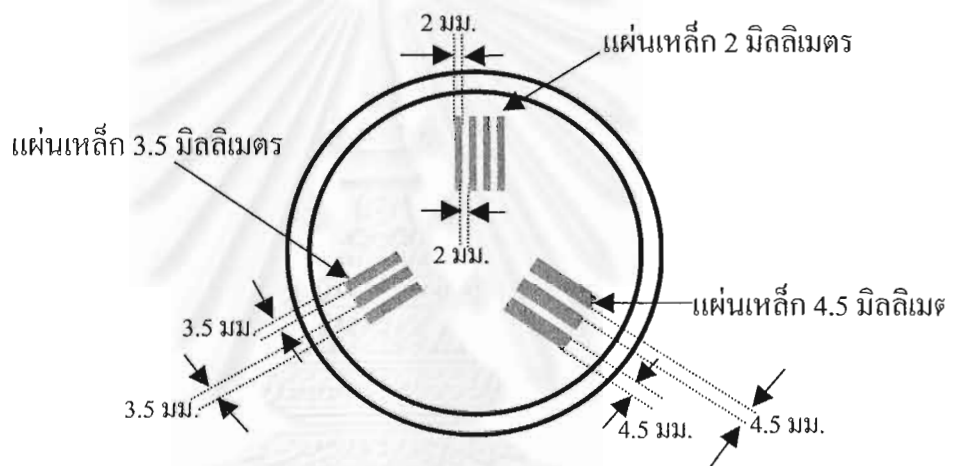
**วัตถุตัวอย่างที่ 5** ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) ซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 100 มิลลิเมตร ขอบวงแหวนหนา 5 มิลลิเมตร ภายในบรรจุแผ่นเหล็ก ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 3 ขนาด คือ หนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 19 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น หนา 3.5 มิลลิเมตร กว้าง 18.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น และหนา 4.5 มิลลิเมตร กว้าง 17.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น ซึ่งแผ่นเหล็กในแต่ละขนาดจะวางห่างกันตามความหนาของแผ่นเหล็ก โดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) รูปที่ 4.11 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 5 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 4.11 (ค) จะเห็นขอบของอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตรอยู่ด้านบนนอกแต่ไม่ค่อยชัดเจนนัก เพราะ นิวตรอนมีการกระเจิงที่แผ่นเหล็กจึงทำให้เกิดอาทิแฟกภายในภาพ และภายในสามารถเห็นรูปทรงของแผ่นเหล็กทั้ง 3 ขนาด เมื่อสร้างภาพโทโมกราฟีแล้วพบว่าสามารถมองเห็นขนาดและรูปร่างของแผ่นเหล็กได้ดีพอสมควร แม้กระนั้นแผ่นเหล็กที่มีระยะห่าง 2 มิลลิเมตรก็ยังสามารถแยกแยะได้แต่รายละเอียดของภาพยังไม่ดีนักเพราะเทอร์มัลนิวตรอนมีการกระเจิงค่อนข้างมาก ดังนั้นเราจึงสามารถบอกได้ว่าระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นมาสามารถให้ภาพโทโมกราฟีที่มีค่ารีโซลูชัน (resolution) ประมาณ 2 มิลลิเมตร

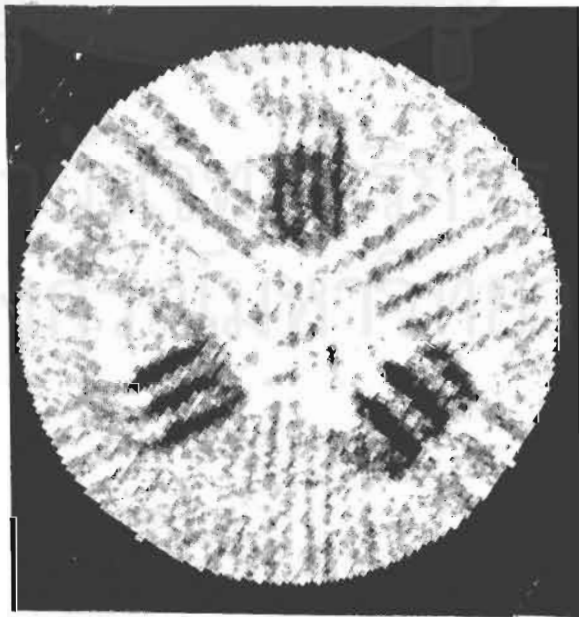
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11(ก) รูปวัตถุตัวอย่างที่ 5

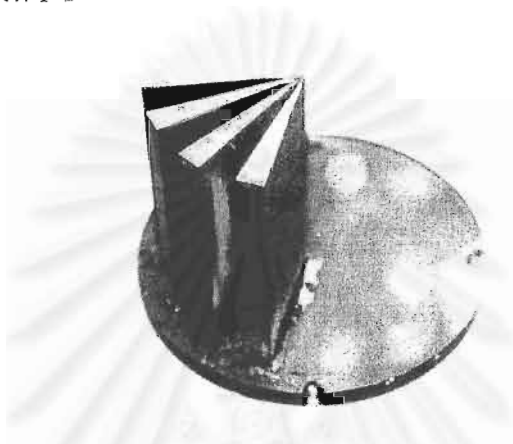


รูปที่ 4.11 (ข) แผนภาพตำแหน่งของแผ่นเหล็กขนาดต่าง ๆ ภายในขอบอลูมิเนียมทรงกระบอก

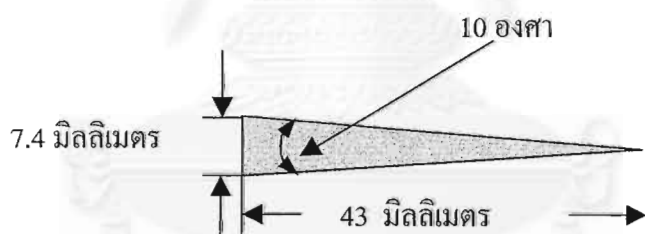


รูปที่ 4.11 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 5

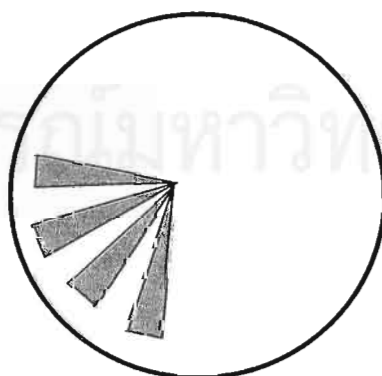
วัตถุตัวอย่างที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) เป็นแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยมจำนวน 4 แท่ง ซึ่งมียอดแหลม 10 องศา สูง 43 มิลลิเมตร ฐานกว้าง 7.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 4.12 (ข) และวางห่างกันตามขนาดของแท่งชิ้นงาน โดยมีการจัดวางตำแหน่งบนฐานพลาสติกใส ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ค) รูปที่ 4.11 (ง) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 6 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1



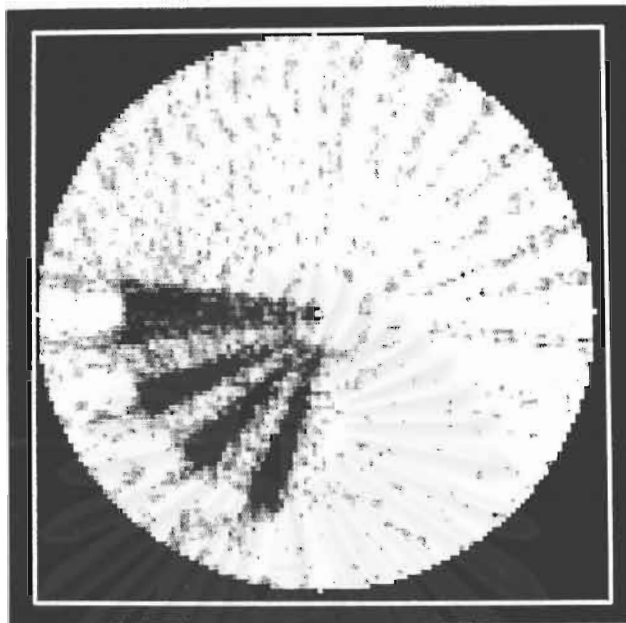
รูปที่ 4.12 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 6



รูปที่ 4.12 (ข) แผนภาพแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.12 (ค) แผนภาพการจัดวางตำแหน่งของแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม

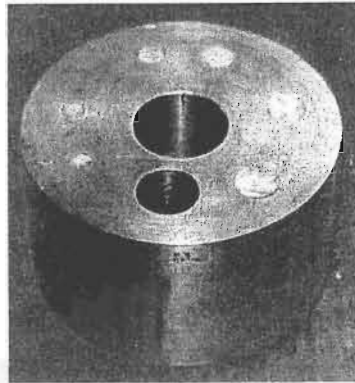


รูปที่ 4.12 (ง) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 6

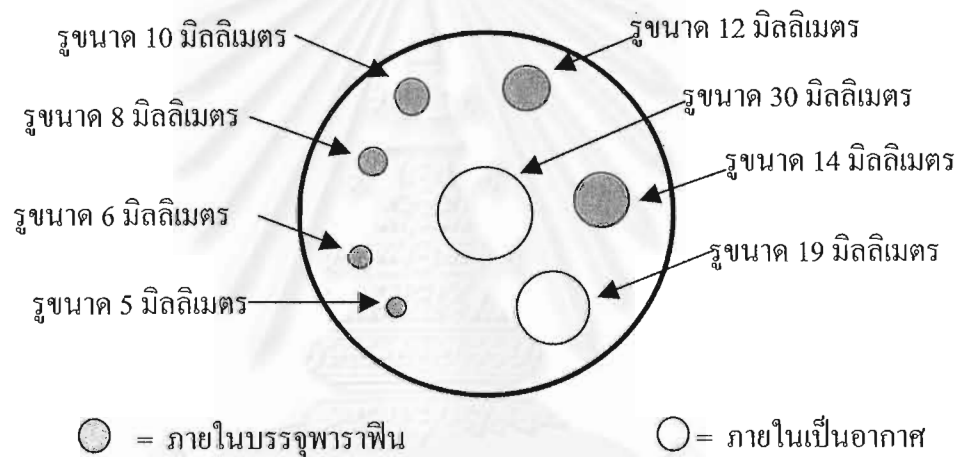
จากรูปที่ 4.12 (ง) พบว่าสามารถเห็นรายละเอียดของแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยมได้ชัดเจน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมตรงตามลักษณะของวัตถุ โดยมีสีเข้มสุดในส่วนด้านนอกและเริ่มจางเป็นสัดส่วนตามความหนาของเหล็ก ซึ่งส่วนปลายแหลมเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากมีการกระเจิงของนิวตรอนภายในวัตถุตัวอย่างซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้มากนัก

วัตถุตัวอย่างที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) ซึ่งเป็นท่ออลูมิเนียมทรงกระบอกตัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดต่าง ๆ ดังนี้คือ 5 , 6 , 8 ,10 ,12 ,14 มิลลิเมตร บรรจุพาราฟินไว้ภายใน ยกเว้นรูขนาด 19 และ 30 มิลลิเมตร โดยมีการจัดวางตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ข) รูปที่ 4.13 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 7 เมื่อใช้เงื่อนไขในการสแกนเหมือนกับวัตถุตัวอย่างที่ 1

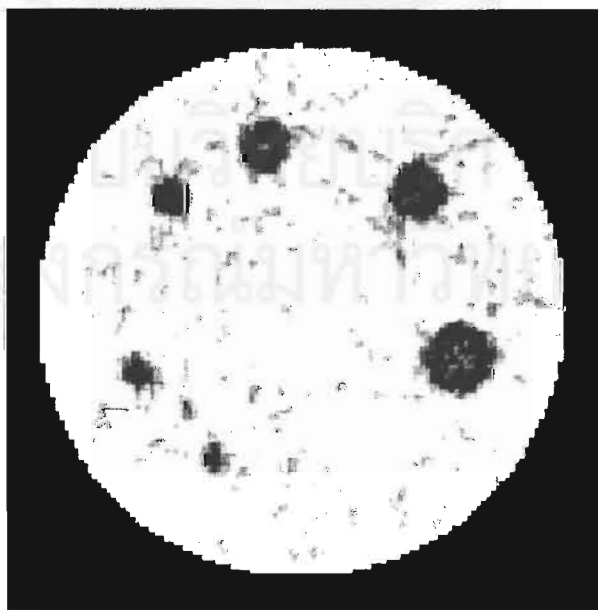




รูปที่ 4.13 (ก) วัตถุตัวอย่างที่ 7



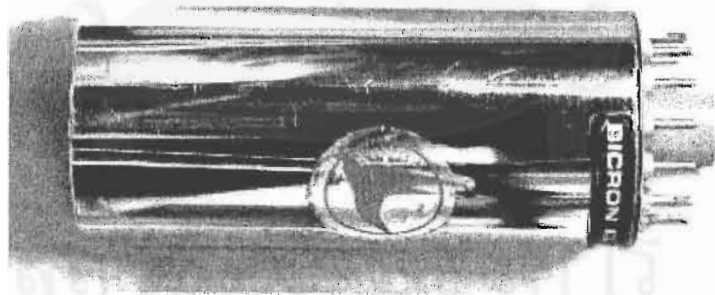
รูปที่ 4.13 (ข) แผนภาพตัวอย่างที่ 7 แสดงตำแหน่งของรูที่เจาะภายในอุโมงค์ทรงกระบอกตัน



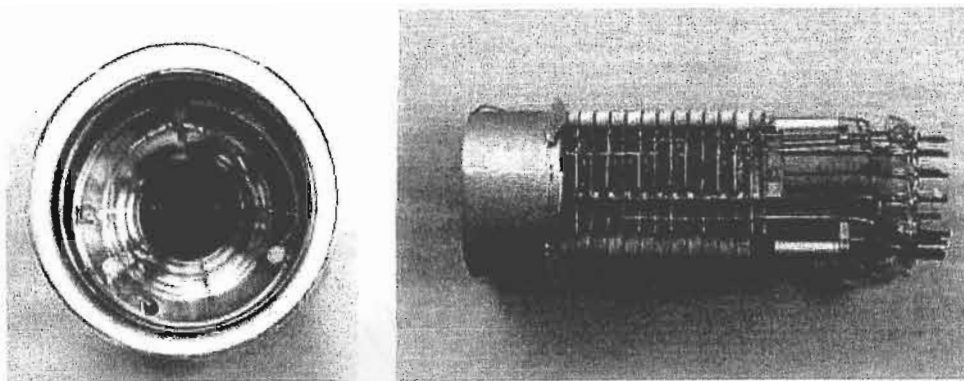
รูปที่ 4.13 (ค) ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 7

จากรูปที่ 4.13 (ค) เป็นภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานตัวอย่างที่ 7 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมสีดำเข้มจำนวน 6 จุดซึ่งเรียงกันตามขนาดของรูที่เจาะไว้และจุดสีดำเข้มที่เกิดขึ้นเนื่องจากภายในรูบรรจุพาราฟินไว้ เพราะว่าพาราฟินมีคุณสมบัติในการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี จึงทำให้เทอร์มัลนิวตรอนทะลุผ่านไปยังหัววัดเทอร์มัลนิวตรอนได้น้อยแต่รูที่ไม่ได้บรรจุพาราฟินซึ่งมี 2 ขนาดคือ 19 และ 30 มิลลิเมตรไม่สามารถเห็นรายละเอียดได้เนื่องจากภายในช่องว่างเป็นอากาศ เทอร์มัลนิวตรอนทะลุผ่านได้มาก และประกอบกับอลูมิเนียมมี ภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จึงไม่สามารถได้รายละเอียดที่ชัดเจน โดยระหว่างอากาศกับอลูมิเนียมในภาพไม่มีความแตกต่างกัน

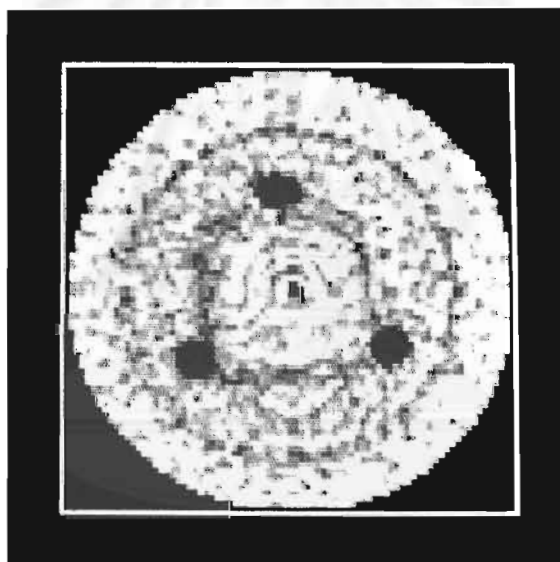
วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมชิ้นที่ 1 ที่เลือกมาทดสอบนี้เป็น หลอดทวิคูณแสง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58 มิลลิเมตร ด้านหน้าเป็นกระจกใส ส่วนด้านหลังสุดเป็นอลูมิเนียม ถัดเข้าไปเป็นวัสดุลดแรงกระแทก และมีโครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นเพลท 13 แผ่นเรียงซ้อนกัน โดยมีเซรามิกเป็นตัวกั้นระหว่างเพลทแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อสแกนด้วยมุม 7.2 องศา 80 เรย์ซัม จำนวน 25 โปรไฟล์ โดยมีการเคลื่อนที่ต่อจุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาในเก็บข้อมูล 3 วินาทีต่อเรย์ซัม ซึ่งเมื่อเก็บข้อมูลทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 2.3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.15 แสดงด้านหน้า และ โครงสร้างภายในของหลอดทวิคูณแสง

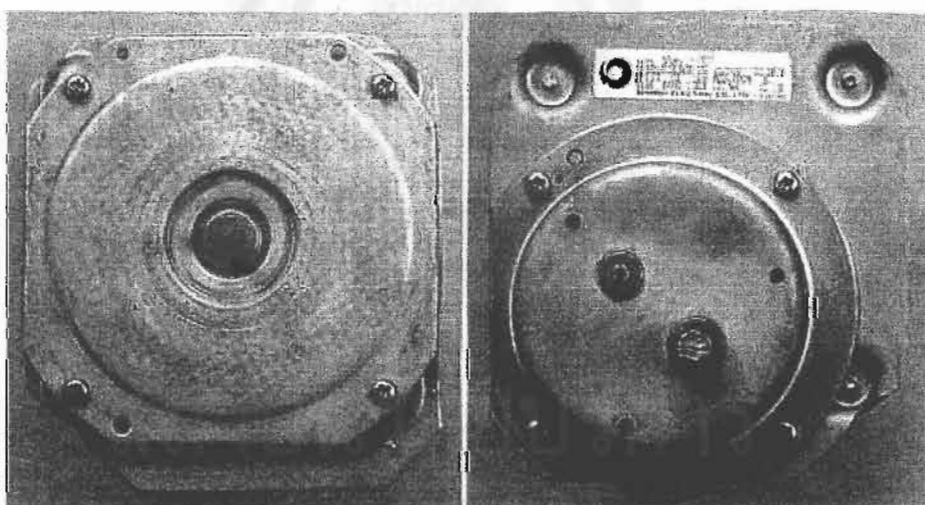


รูปที่ 4.16 ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 4.16 เป็นภาพโทโมกราฟีของตัวอย่างชิ้นงานอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งจะเห็นส่วนขอบวงกลมซึ่งเป็นส่วนของวัสดุกันกระแทกและภายในจะเห็นจุดกลมสีดำเข้มจำนวน 3 จุดซึ่งเป็นเซรามิกที่ใช้กั้นระหว่างแผ่นเพลทภายในถัดเข้าไปสามารถเห็นขอบของแผ่นเพลทมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมตรงตามลักษณะของเพลทแต่รายละเอียดภายในไม่สามารถบอกได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาความเปรียบต่าง (contrast) ของความดำที่ปรากฏของเซรามิก กับส่วนขอบซึ่งมีอุณหภูมิเย็น วัสดุกันกระแทก และแผ่นเพลท พบว่าเซรามิกมีการลดทอนเทอร์มัลนิวตรอนได้มากกว่าวัสดุอื่นๆ ส่วน

แผ่นเพลทเหล็กแม้ว่าจะมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนมากกว่าอลูมิเนียม แต่เนื่องจากมีลักษณะที่บางจึงทำให้เห็นความดำที่ไม่แตกต่างกัน

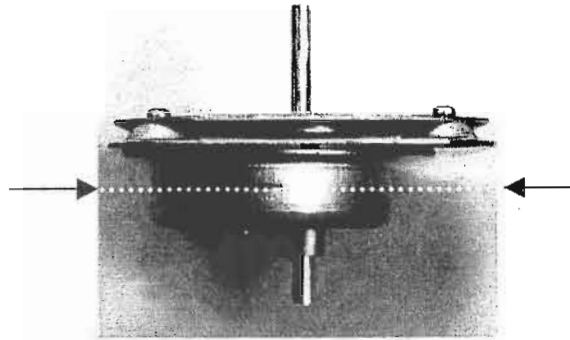
วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมชิ้นที่ 2 ที่เลือกมาทดสอบคือ ชุดเกียร์ของเซอร์โวมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และตำแหน่งที่ใช้ในการเก็บข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.18 ชุดเกียร์ที่นำมาทดสอบมีอัตราทด 1/32.9 ซึ่งมีโครงสร้างภายนอกเป็นเหล็กกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 73.5 มิลลิเมตรและภายในมีเฟือง 2 ตัวโดยตัวแรกเป็นเฟืองเหล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง 41 มิลลิเมตร มีแกนกลางเป็นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.8 มิลลิเมตร และมีแผ่นรองเป็นทองแดง ส่วนตัวที่สองเป็นเฟืองพลาสติกพีวีซี มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 39.6 มิลลิเมตรใช้ทองเหลืองยึดกับแกนเหล็ก ขนาด 4.7 มิลลิเมตร ซึ่งโครงสร้างภายในดังแสดงในรูปที่ 4.19 รูปที่ 4.20 เป็นภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2 เมื่อสแกนด้วยมุม 7.2 องศา 93 เรย์ซัม จำนวน 25 โปรไฟล์ โดยมีการเคลื่อนที่ต่อจุดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 3 วินาทีต่อเรย์ซัม ซึ่งเมื่อเก็บข้อมูลทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 2.6 ชั่วโมง



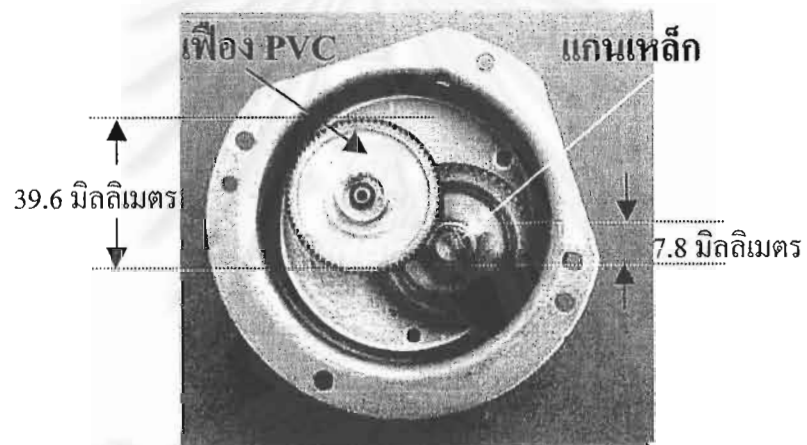
(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

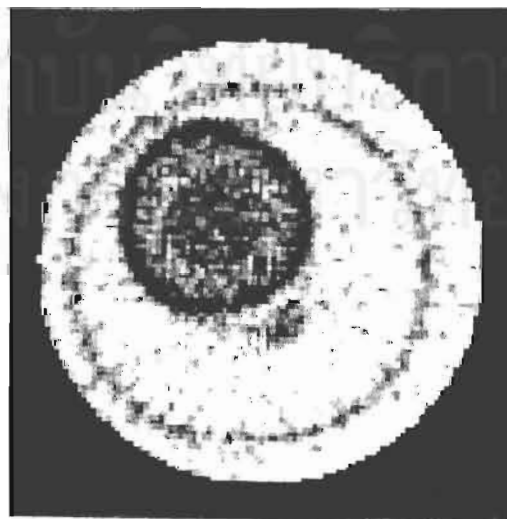
รูปที่ 4.17 วัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งของแนวที่ใช้ในการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์



รูปที่ 4.19 โครงสร้างภายในของชุดเกียร์ของเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 4.20 ภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานทางอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2

จากรูปที่ 4.20 เป็นภาพโทโมกราฟีของตัวอย่างชิ้นงานอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ 2 ซึ่งในตำแหน่งที่เก็บข้อมูลจะเห็นขอบของชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กและตำแหน่งของวัสดุภายในคือ เฟืองพีวีซีและแกนเหล็กของเฟืองเหล็กซึ่งภายในเฟืองพีวีซีจะเห็นขอบเฟืองซึ่งหนากว่าส่วนบริเวณของตัวเฟืองมีความเข้มมากกว่าและเห็นส่วนที่เป็นแกนทองเหลืองและเหล็กมีความเปรียบต่างน้อยกว่าอยู่ตรงกลางเฟืองพีวีซีและอีกจุดคือแกนเหล็กของเฟืองเหล็กมีความเปรียบต่างน้อยกว่าพีวีซีเนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนของเหล็กมีค่าน้อยกว่าพลาสติก

#### 4.3 การหาค่าภาคตัดขวางของเทอร์มินัลนิวตรอนจากภาพโทโมกราฟี

จากภาพโทโมกราฟีในรูปที่ 4.8 (ค) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าภาคตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าได้ โดยนำภาพโทโมกราฟีดังกล่าวมาอ่านค่า CT-Value และหาค่าภาคตัดขวางของวัตถุบางตัวที่ทราบค่าแล้วมาสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-Value และค่าภาคตัดขวางของวัตถุ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1

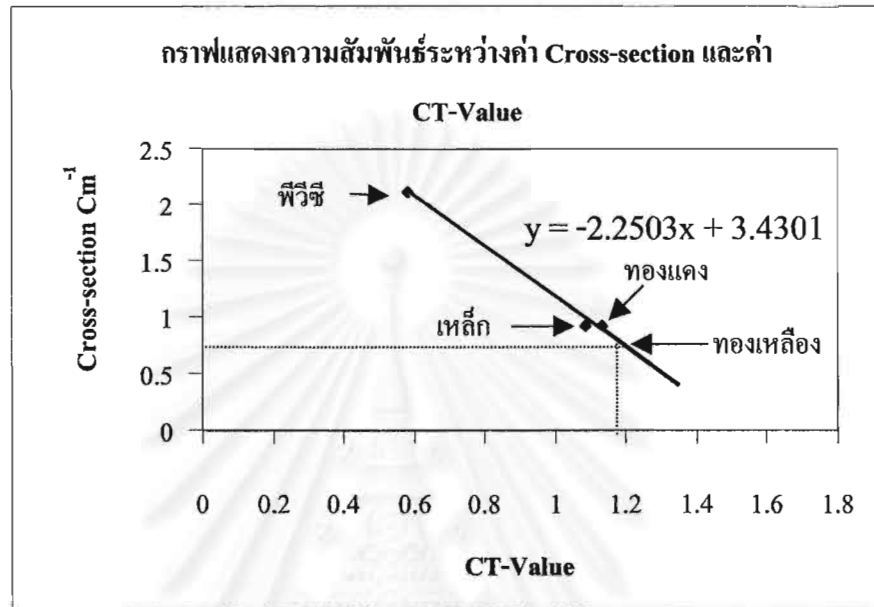
ตารางที่ 4.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT- Value กับค่าภาคตัดขวางของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	CT-Value	ค่าภาคตัดขวาง ( $\text{Cm}^{-1}$ )
พลาสติก พีวีซี	0.584	2.12
เหล็ก	1.0878	0.933
ทองแดง	1.1337	0.924
ทองเหลือง	1.1891	0.7542*

0.7542\* ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT- Value กับค่าภาคตัดขวางของตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.1 เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-Value และค่าภาคตัดขวางมาสร้างกราฟจะสามารถหาค่าภาคตัดขวางของวัตถุตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าภาคตัดขวางได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อนำค่า CT-Value ของทองเหลืองไปแทนค่าในสมการ  $Y = -2.250.X + 3.4301$  จะได้ค่าภาคตัดขวางเท่ากับ 0.7542 และจากการคำนวณค่าภาคตัดขวางของทองเหลืองซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงและสังกะสีโดยกำหนดให้มีอัตราส่วน 1:1 จะได้ค่าประมาณ 0.67 ซึ่งค่าที่ได้มีความผิดพลาดหลายสาเหตุ เช่น อัตราส่วนผสมระหว่างทองแดงและสังกะสีที่ใช้ในการคำนวณซึ่งเป็นค่าที่

ประมาณขึ้น และอีกสาเหตุคือ พลังงานของนิวตรอนที่ได้จากการทดลองอาจไม่เฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนเพียงอย่างเดียว โดยอาจมีนิวตรอนพลังงานอื่นที่หัวคินิวตรอนสามารถวัดได้



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cross-section และค่า CT-Value

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบสแกนด้วยเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนโดยใช้ท่อनाแสงเคลือบปลายด้วยซิงทิลเลเตอร์เป็นหัววัดรังสี ควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครคอมพิวเตอร์ โดยผ่านวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ และจัดเก็บข้อมูลโปรไฟล์ไว้ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งพอสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 หัววัดเทอร์มัลนิวตรอนที่นำมาใช้งานมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซิงทิลเลเตอร์ ร่วมกับหลอดทวีคูณแสง โดยสารซิงทิลเลเตอร์ที่นำมาใช้งานคือ ZnS(Ag) LiF และสารซึดเหนี่ยว เมื่อทำปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอนจะให้แสงสีน้ำเงิน ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และส่งผ่านท่อนำแสงเข้าสู่หลอดทวีคูณแสง เพื่อเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เข้าสู่ระบบวัดนิวเคลียร์

5.1.2 ระบบกลขับเคลื่อนหัววัดเทอร์มัลนิวตรอน

พิถีการเคลื่อนที่ ระยะเคลื่อนที่ในแนวระดับ 14 เซนติเมตร

ความเร็วในการเคลื่อนที่ ในแนวระดับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

5.1.3 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมระบบ โปรแกรมที่ควบคุมระบบการทำงาน เขียนด้วยภาษา Quick BASIC เวอร์ชัน 4.5 ซึ่งจะควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัดเทอร์มัลนิวตรอน ด้วยความละเอียด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ควบคุมการหมุนวัตถุตัวอย่างที่มุม 7.2 องศาต่อสเต็ป และ ควบคุมการส่งผ่านข้อมูลจากระบบวัดนิวเคลียร์กับไมโครคอมพิวเตอร์ โดยผ่านทางวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ

#### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

5.2.1 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 1 พบว่าภาพที่ได้มีความเปรียบต่างชัดเจนดี จึงสามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของแท่งทองแดงได้ชัดเจน เนื่องจาก



ค่าภาคตัดขวางของการคูกกลืนนิวตรอนของทองแดงสูงกว่าของออลูมิเนียมและอากาศ แต่เนื่องจากมุมที่ใช้หมุนวัตถุตัวอย่างที่เปลี่ยนไปที่ละ 7.2 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ค่อนข้างโต จึงทำให้ภาพโทโมกราฟีของแท่งทองแดงไม่กลมตามลักษณะความเป็นจริง

5.2.2 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 2 พบว่า ภาพที่ได้จะเห็นความเปรียบต่างของวัตถุชิ้นงานที่อยู่ภายในออลูมิเนียมทรงกระบอกได้ดี เพราะค่าภาคตัดขวางของการคูกกลืนนิวตรอนของวัตถุตัวอย่างไม่เท่ากัน โดยจุดเข้มที่สุดคือ พลาสติกพีวีซี เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติในการคูกกลืนเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี จึงทำให้นิวตรอนส่วนใหญ่ถูกดูดจับที่พลาสติก เทอร์มัลนิวตรอนจึงทะลุผ่านไปสู่หัววัดได้น้อย

5.2.3 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 3 จะเห็นว่าวัตถุตัวอย่างภายในออลูมิเนียมกลวงไม่ครบตามความเป็นจริง เนื่องจาก ออลูมิเนียมมีค่าภาคตัดขวางการคูกกลืนนิวตรอนต่ำ จึงทำให้เทอร์มัลนิวตรอนทะลุผ่านไปได้ดี ดังนั้นจึงทำให้ทราบข้อจำกัดว่า ถ้าวัสดุที่เป็นออลูมิเนียมจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า 5 มิลลิเมตร และจากภาพโทโมกราฟี จุดที่เข้มที่สุดคือ พลาสติก เพราะค่าภาคตัดขวางการคูกกลืนนิวตรอนมีค่าสูงกว่าวัสดุอื่นๆ ภายในชิ้นงาน ส่วนวัสดุอื่นๆ จะมีความเข้มแตกต่างกันไปขึ้นกับค่าภาคตัดขวางการคูกกลืนนิวตรอนในแต่ละวัสดุ ส่วนรูปร่างอาจไม่กลมตามความเป็นจริงเนื่องจากมุมที่ใช้ในการหมุนวัตถุมีขนาดโต มีอาทิแฟลคเกิดขึ้นมาก

5.2.4 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 4 พบว่า จะสามารถระบุตำแหน่งของแท่งชิ้นงานได้ แต่ไม่สามารถเห็นรายละเอียดของแท่งชิ้นงานที่มีการเจาะรูไว้ เนื่องจากหัววัดรังสีที่เปิดรับลำนิวตรอนมีขนาดโต เมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางที่เจาะรูไว้

5.2.5 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 5 พบว่า สามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของชิ้นงานภายในออลูมิเนียมทรงกระบอกได้ แต่เนื่องจากเกิดการกระเจิงของนิวตรอนที่แผ่นเหล็กจึงทำให้เกิดอาทิแฟลคขึ้นภายในจำนวนมาก ซึ่งจากภาพโทโมกราฟีที่ได้สามารถแยกแยะระยะห่างระหว่างแผ่นเหล็ก 2 มิลลิเมตรได้แต่ไม่ดี เนื่องจากผลของการกระเจิงของนิวตรอนและมุมที่หมุนโตเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดวัตถุ จึงสรุปได้ว่า ระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ภาพโทโมกราฟีที่มีค่ารีโซลูชันประมาณ 2 มิลลิเมตร

5.2.6 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 6 พบว่า ภาพโทโมกราฟีที่ได้สามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยมได้ดี ซึ่งความเปรียบต่างที่ได้ของชิ้นงาน จะแสดงให้เห็นความหนา บาง ของวัสดุ ซึ่งส่วนปลายแหลมจะเห็นไม่ชัด เนื่องจากการกระเจิงของนิวตรอนภายในแท่งเหล็กรูปสามเหลี่ยม

5.2.7 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างที่ 7 พบว่า สามารถระบุตำแหน่งของรูที่บรรจุพาราฟินได้อย่างชัดเจน เพราะว่าพาราฟินมีคุณสมบัติในการดูดกลืนนิวตรอนได้ดี แต่รูที่ไม่ได้บรรจุพาราฟินซึ่งเป็นอากาศภายใน ไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจาก เทอร์มัลนิวตรอนทะลุผ่านอลูมิเนียมและอากาศได้ดี จึงไม่สามารถแยกแยะรายละเอียดบริเวณที่เป็นช่องว่างภายในชิ้นงานได้ ซึ่งภาพโทโมกราฟีที่สร้างได้พบว่า ถ้ารูที่บรรจุพาราฟินมีขนาดเล็กจะไม่สามารถบอกลักษณะที่แท้จริงได้เนื่องจากมุมที่ใช้ในการหมุนวัตถุมีขนาดค่อนข้างโตและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดรังสีใกล้เคียงกับขนาดวัตถุ

5.2.8 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานอุตสาหกรรมที่ 1 พบว่า สามารถเห็นส่วนขอบของชิ้นงานและจุดเชื่อม 3 จุด คือ เซรามิก เนื่องจากเซรามิกมีการลดทอนเทอร์มัลนิวตรอนได้มากกว่าวัสดุอื่นภายในชิ้นงาน และจะเห็นขอบสีเหลืองของแผ่นเพลทภายในแต่ไม่สามารถเห็นรายละเอียดบนแผ่นเพลท เนื่องจากเป็นแผ่นเหล็กที่มีขนาดบางและรูที่ยังค้ำลำนิวตรอนที่มีขนาดค่อนข้างโต

5.2.9 จากการเปรียบเทียบวัตถุและภาพโทโมกราฟีของวัตถุตัวอย่างชิ้นงานอุตสาหกรรมที่ 2 พบว่า สามารถระบุตำแหน่งและรูปร่างของชิ้นงานได้ดี เนื่องจากภายในชิ้นงานประกอบด้วยส่วนที่เป็นพลาสติกพีวีซีและเหล็ก ซึ่งพลาสติกมีคุณสมบัติในการดูดซับนิวตรอนได้ดี จึงเห็นตำแหน่งของเฟืองพลาสติกแต่ไม่สามารถเห็นรายละเอียดของฟันเฟือง เนื่องจากฟันเฟืองมีขนาดเล็กและใกล้เคียงกับระยะสแกน

ภาพโทโมกราฟีวัตถุตัวอย่างที่ได้ทั้งหมดพบว่า เทคนิคการสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยนิวตรอนมีลักษณะเด่นๆ คือเป็นระบบที่สามารถสแกนวัตถุตัวอย่างได้ทันทีเนื่องจากมีโปรแกรมควบคุมเพื่อตรวจสอบการหมุนวัตถุตัวอย่างและสามารถระบุตำแหน่งวัตถุตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของพลาสติกอยู่ภายในได้ค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากพลาสติก ซึ่งมีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เทอร์มัลนิวตรอนจึงทะลุผ่านไปสู่อุปกรณ์วัดรังสีได้น้อยภาพโทโมกราฟีที่ได้มาจึงมีความเปรียบต่างสูง

จากภาพโทโมกราฟีที่สร้างได้ในรูป 4.8 (ค) สามารถนำมาประยุกต์หาค่าภาคตัดขวางของเทอร์มัลนิวตรอนจากภาพโทโมกราฟี โดยนำภาพโทโมกราฟีที่ได้มาทำการอ่านค่า CT-Value และหาค่าภาคตัดขวางของวัตถุบางตัวที่ทราบค่าแล้ว และนำมาหาความสัมพันธ์จากกราฟที่สร้างขึ้น จะได้ค่าภาคตัดขวางของทองเหลืองเท่ากับ 0.7542 และจากการคำนวณค่าภาคตัดขวางของทองเหลืองซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงและสังกะสีโดยกำหนดให้มีอัตราส่วน 1: 1 จะได้ค่าประมาณ 0.67 โดยค่าภาคตัดขวางที่ได้จากการทดลองมีความผิดพลาดจากหลายสาเหตุ เช่น การกำหนดอัตราส่วนของทองแดงและสังกะสี ซึ่งเป็นค่าที่ประมาณ อีกสาเหตุหนึ่งคือ พลังงานของนิวตรอนจากการ

ทดลองอาจไม่เฉพาะเทอร์มัลนิวตรอนเพียงอย่างเดียว โดยอาจมีนิวตรอนพลังงานอื่นที่หัววัดนิวตรอนสามารถวัดได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนี้ ยังมีขีดจำกัดในการใช้งานอยู่ ซึ่งหากสามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ดังนี้

- 5.2.1 ควรปรับปรุงระบบสแกนให้เป็นระบบสแกนรูปพัดและเปลี่ยนมาใช้หัววัดรังสีแบบ linear detector array ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการเก็บข้อมูลลง เนื่องจากช่วงเวลาในการใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนมีจำกัดและในการเก็บข้อมูลจะใช้เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมงต่อ 1 ชิ้นงาน
- 5.2.2 ควรปรับปรุงหัววัดรังสีให้มีความไวเพิ่มมากขึ้น โดยใช้โบรอนเอนริชเพื่อเพิ่มสารโบรอนให้มากกว่าธรรมชาติ เนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนสูงกว่าสารลิเทียมฟลูออไรด์ เพื่อลดปริมาณเทอร์มัลฟลักซ์ที่ต้องการและมีผลทำให้สามารถลดขนาดของส่วนบังกับลำนิวตรอนให้มีขนาดเล็กลง ภาพโทโมกราฟีที่ได้จะมีความละเอียดสูงขึ้น รวมทั้งลดเวลาในการเก็บข้อมูลลงอีกด้วย

## รายการอ้างอิง

1. ทิพาพร อติกานต์กุล. การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
2. ชีรวัฒน์ ประกอบผล. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลด้วยเทคนิคโทรทัศนส์สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
3. มงคล วรรณประภา. การพัฒนาระบบสแกนด้วยรังสีแกมมาเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
4. สมยศ ศรีสถิตย์ , อรรถพร ภัทรสุนันต์. การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย. สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรม คณะวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร, 2538.
5. วิเชียร รตนธงชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีโอ-10. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
6. อรุณัตร์ กิตติกุล. การพัฒนาระบบวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยใช้ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
7. วีชรพงษ์ ปถมพานิชย์. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้เส้นใยนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- ฐิติกร เห็นทรัพย์ไพฑูริย์. การพัฒนาระบบสแกนด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาเพื่อแสดงภาพสองมิติของคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ธีรพงษ์ ประทุมศิริ. การส่งประกายแสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม)ผ่านเส้นใยแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- นพดล นาคเงิน. การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- มานัส มงคลสุข. พื้นฐานทางฟิสิกส์ของ CT และ MRI. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ไพศาลศิลป์ การพิมพ์, 2532.
- วิเชียร รตนรงค์ชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีโอ-10. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- สุพร กุลวัฒน์นัซชัย. การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

### ภาษาอังกฤษ

- Charton, J.S. Radioisotope Technique for Problem Solving in Industrial Process. London: Leonard Hill A member of blackie Group Bishopbriggs, 1986.
- Domanus, J.C. Practical Neutron Radiography. New York : Kluwer academic publishers, 1992
- Fujine S. Collected Papers of Reserch Activities on Neutron Radiography in Japan. Research Reactor Institute: Kyoto University, 1990.

Knoll Glenn F. Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley& Sons,  
company, 1979.

Lamarh, John. R. Introduction to Nuclear Engineering. New York: Addison - Wesley publishing  
company, 1975.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วงจร Interface ระหว่างอุปกรณ์ ระบบวัดนิวเคลียร์ เข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



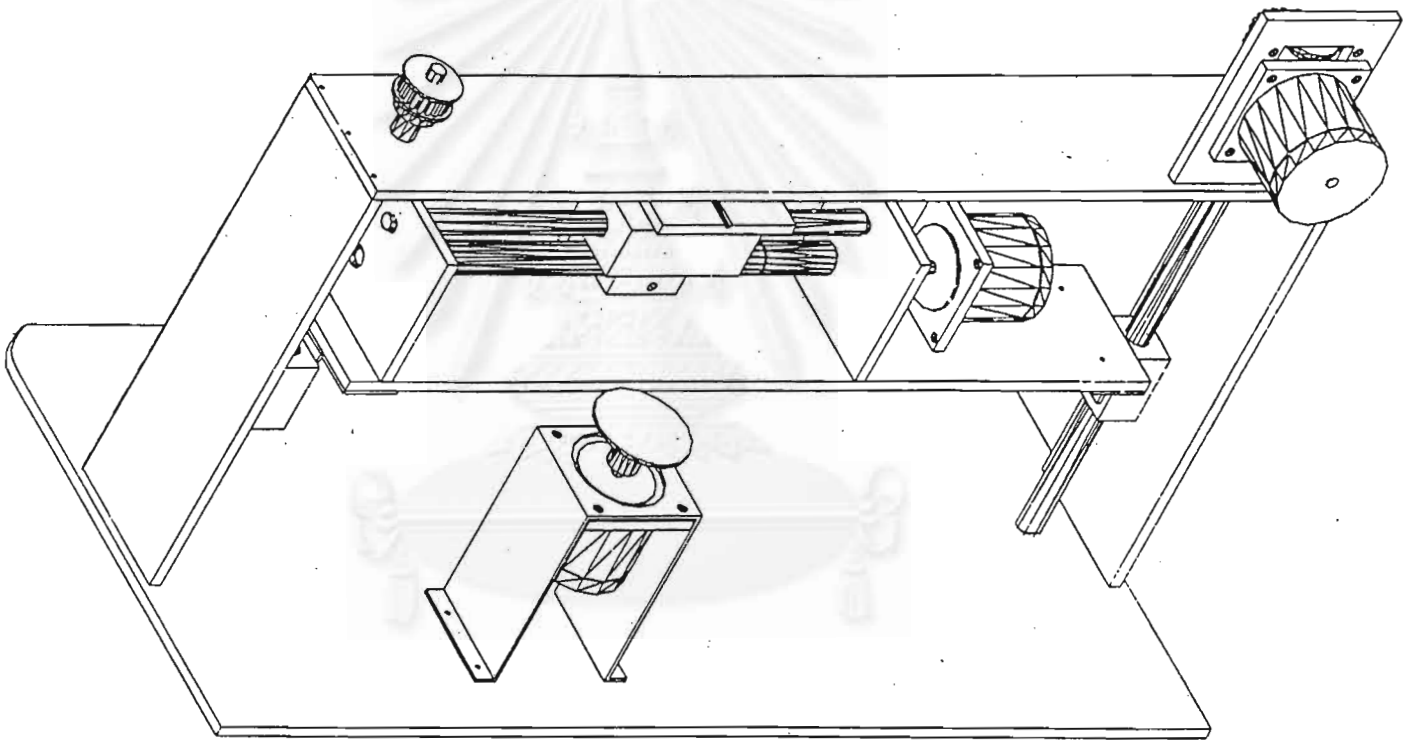




ภาคผนวก ข

แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

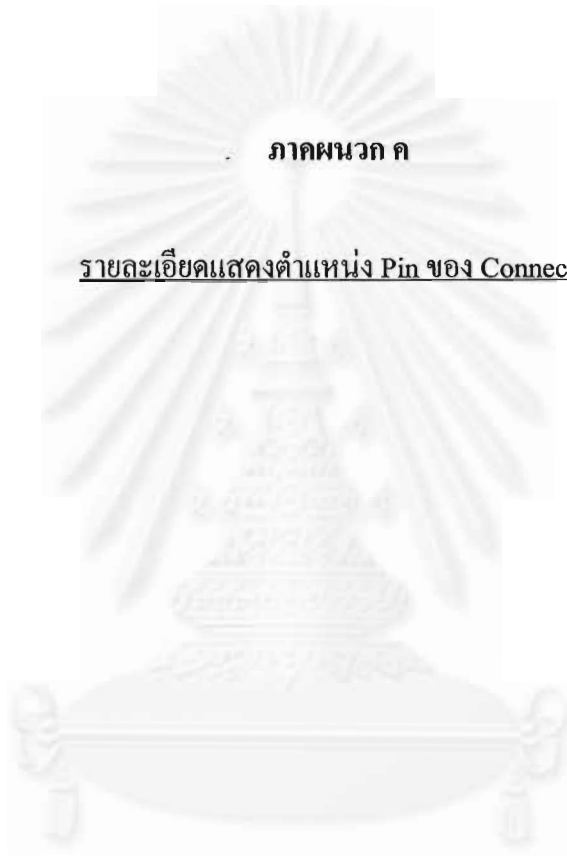


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.1 ภาพไอโซเมตริกของอุปกรณ์

ภาคผนวก ค

รายละเอียดแสดงตำแหน่ง Pin ของ Connector



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**INTERFACE CARD**

Pin ที่ 1 คือ PA <sub>0</sub>	→	Motor X
Pin ที่ 2 คือ PA <sub>1</sub>	→	Motor X
Pin ที่ 3 คือ PA <sub>2</sub>	→	Motor X
Pin ที่ 4 คือ PA <sub>3</sub>	→	Motor X
Pin ที่ 5 คือ PA <sub>4</sub>	→	Motor Rotate
Pin ที่ 6 คือ PA <sub>5</sub>	→	Motor Rotate
Pin ที่ 7 คือ PA <sub>6</sub>	→	Motor Rotate
Pin ที่ 8 คือ PA <sub>7</sub>	→	Motor Rotate
Pin ที่ 9 คือ PB <sub>0</sub>	→	Start
Pin ที่ 10 คือ PB <sub>1</sub>	→	Hold
Pin ที่ 11 คือ PB <sub>2</sub>	→	Print Clock
Pin ที่ 12 คือ PC <sub>6</sub>	→	Time Stop
Pin ที่ 13 คือ PC <sub>7</sub>		
Pin ที่ 14 คือ PB <sub>7</sub>		
Pin ที่ 15 คือ PB <sub>6</sub>		
Pin ที่ 16 คือ PB <sub>5</sub>		
Pin ที่ 17 คือ PB <sub>4</sub>		
Pin ที่ 18 คือ PB <sub>3</sub>	→	Stop/Scan
Pin ที่ 19 คือ PB <sub>3</sub>		
Pin ที่ 20 คือ PB <sub>3</sub>	→	a
Pin ที่ 21 คือ PB <sub>3</sub>	→	b
Pin ที่ 22 คือ PB <sub>3</sub>	→	c
Pin ที่ 23 คือ PB <sub>3</sub>	→	d
Pin ที่ 24 คือ PC <sub>4</sub>	→	Opto
Pin ที่ 25 คือ PC <sub>5</sub>		

**Counter/Timer 1772**

Pin ที่ 1 คือ	c
Pin ที่ 2 คือ	d
Pin ที่ 3 คือ	Stop/Scan
Pin ที่ 4 คือ	Print Clock
Pin ที่ 5 คือ	Gnd
Pin ที่ 6 คือ	+5V
Pin ที่ 7 คือ	Hold
Pin ที่ 8 คือ	Time Stop
Pin ที่ 9 คือ	b
Pin ที่ 10 คือ	a
Pin ที่ 11 คือ	
Pin ที่ 12 คือ	
Pin ที่ 13 คือ	
Pin ที่ 14 คือ	
Pin ที่ 15 คือ	Start

## ประวัติผู้เขียน

นายภาณุพันธุ์ เข้มหนู เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2514 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรม-  
ศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ เมื่อปี 2538 จากนั้นเข้าศึกษาต่อ ที่ภาค  
วิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2539



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย