หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 นิวตรอน

เจมส์ แชดวิค ค้นพบอนุภาคนิวตรอนในปี ค.ศ. 1932 จากปฏิกิริยาของอนุภาคอัลฟากับเบริลเลียม เกิดอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า และเป็นอนุภาคพื้นฐานของสสาร ใช้สัญญลักษณ์ n หรือ ${}^{1}_{0}n$ มีมวลประมาณ 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ 1.674 92 x 10^{-24} กรัม มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงเนื่องจากเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้สามารถเดินทางผ่านอากาศได้หลายเมตรโดยไม่ทำให้เกิดอิออนแพร์ และเดินทางไปได้ไกลกว่าอนุภาคอื่น ๆ เนื่องจากไม่เกิดแรงคูลอมบ์ขัดขวางเมื่อเดินทางผ่านวัตถุ นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะแตกตัวให้อนุภาคโปรตอน (${}^{1}_{1}H$) อนุภาคอิเล็กตรอน (${}^{0}_{-1}e$) และอนุภาคแอนติ นิวตริโน ($\bar{\upsilon}$) พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา 0.78 MeV อนุภาคนิวตรอนอิสระมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที การแตกตัวของอนุภาคนิวตรอนอิสระเป็นไปตามสมการที่ (2.1)

$$ {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{0}_{-1}e + \bar{\upsilon} + 0.78\ \text{MeV} \qquad \text{..... (2.1)} $$

2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source)

ต้นกำเนิดนิวตรอน แบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactor) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerators) และไอโซโทปรังสี (Radioisotope)

2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นต้นกำเนิดที่ให้ความเข้มนิวตรอนสูง ทำให้ได้ภาพถ่ายรังสีด้วยนิวตรอนที่มีคุณภาพดีและใช้เวลาในการถ่ายภาพไม่นานนัก

นิวตรอนที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัว (fission) เมื่อนิวตรอนชนกับอะตอมของยูเรเนียม-235 ทำให้นิวเคลียสแตกออกเป็น 2 ส่วน พร้อมทั้งเกิดอนุภาคที่มีประจุ รังสีแกมมาและนิวตรอนพลังงานสูง นิวตรอนพลังงานสูงนี้ เมื่อชนกับตัวกลางที่เป็นวัสดุหน่วงความเร็วนิวตรอนพลังงานจะลดลงจนเป็นเทอร์มัลนิวตรอน และจะชนอะตอมยูเรเนียมทำให้เกิดปฏิกิริยาฟิชชันต่อเนื่องจนเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่

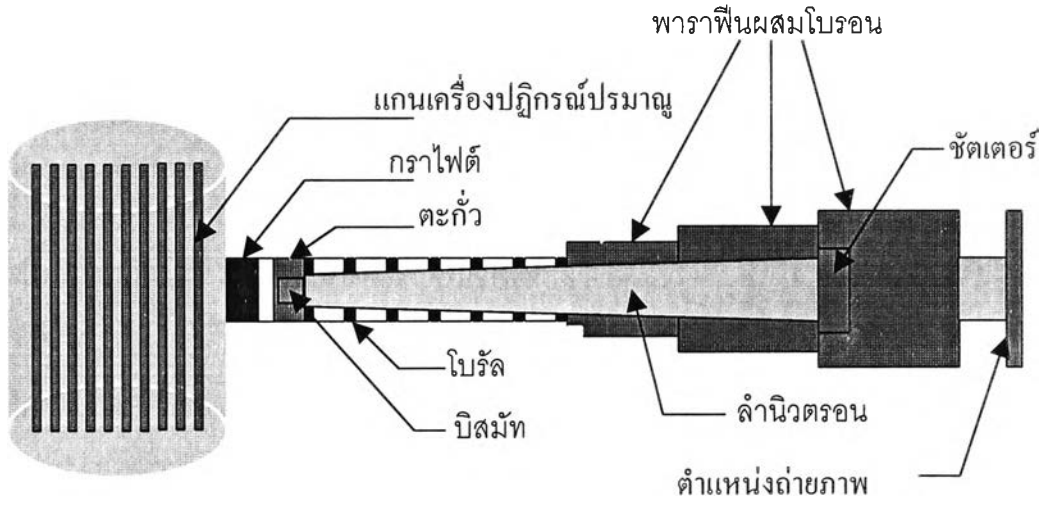
วัสดุหน่วงนิวตรอนทำจากวัสดุเบา เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน เบริลเลียม เป็นธาตุที่มีขนาดของนิวเคลียสใกล้เคียงกับนิวตรอน ทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงานได้มากในการชนแบบกระเจิงหลาย ๆ ครั้ง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูจะให้นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 MeV ซึ่งเป็นนิวตรอนเร็ว แล้วลดพลังงานจนเป็นนิวตรอนช้าที่มีพลังงานประมาณ 0.03 eV โดยใช้ตัวหน่วงนิวตรอน ซึ่งเป็นพลังงานที่เหมาะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ทำได้โดยการสอดวัสดุดูดกลืนนิวตรอนในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในการดูดกลืนนิวตรอนเพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่สำหรับปรับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากปฏิกิริยาแตกตัวของยูเรเนียม-235 จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ในการทดลองเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่กำลัง 700 กิโลวัตต์

นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแตกตัวเป็นนิวตรอนพลังงานสูง เมื่อชนเข้ากับนิวเคลียสไฮโดรเจนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำจะลดพลังงานลงกลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน แล้วจึงถูกส่งผ่านออกมาทางท่อนำนิวตรอนไปยังบริเวณที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ท่อนำนิวตรอนสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน [1]

ท่อนำนิวตรอนนี้ประกอบด้วยกราไฟต์สำหรับลดพลังงานของนิวตรอน บิสมัทสำหรับลดปริมาณรังสีแกมมา และโบรัล (Boral) ซึ่งเป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมกับโบรอนสำหรับดูดจับนิวตรอนกระเจิง ปลายด้านนอกมี ชัตเตอร์ (Shutter) สำหรับเปิดปิดท่อนำนิวตรอน เมื่อเปิดชัตเตอร์ ลำนิวตรอนที่ออกมาจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความยาว 20 เซนติเมตร

กว้าง 17 เซนติเมตร อัตราส่วนความยาวของท่อนำนิวตรอนต่อ ความกว้างช่องเปิดด้านในของท่อ (L/D ratio) มีค่าประมาณ 50 และตำแหน่งที่ใช้ในการถ่ายภาพอยู่ห่างจากปลายท่อนำนิวตรอน 95 เซนติเมตร มีค่าฟลักซ์นิวตรอน 1 x 10^5 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.2.2 **เครื่องเร่งอนุภาค** (Particle Accelerator)

เครื่องเร่งอนุภาคเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าแรงสูงเร่งลำอนุภาคที่มีประจุ เช่น โปรตอน ดิวทีรอน อัลฟา ให้มีพลังงานสูงและพุ่งชนเป้า จะมีนิวตรอนเกิดขึ้นจากการชน ในการดึงนิวตรอนออกจากอะตอมของเป้านั้น พลังงานของอนุภาคที่เข้าชนต้องสูงกว่าพลังงานศักย์ของนิวเคลียส (nuclear potential barrier) พลังงานของเป้าจะต้องเหมาะสมกับพลังงานของอนุภาคที่เข้าชนตามความสามารถที่เครื่องจะให้พลังงานได้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องเร่งอนุภาค ได้แก่

$$^{3}_{1}T + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17.6\ MeV$$

$$^{9}_{4}Be + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n + 4.3\ MeV$$

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{7}_{3}Be + ^{1}_{0}n + 2.1\ MeV$$

ความเข้มของนิวตรอนแต่ละปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์และจำนวนของอนุภาค โดยที่พลังงานจลน์ขึ้นกับความต่างศักย์ของเครื่องเร่งอนุภาค และจำนวนอนุภาคขึ้นกับกระแสของเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ ตัวอย่างของเครื่องเร่งอนุภาค ได้แก่ เครื่องผลิตนิวตรอน เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดอกราฟฟ์ และไซโคลตรอน เป็นต้น

ฟลักซ์ของนิวตรอนที่ได้จะอยู่ในระดับ 10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที แต่ให้ความเข้มไม่สม่ำเสมอ ทำให้ภาพถ่ายที่ได้อยู่ในระดับดีถึงพอใช้

2.2.3 **ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี** แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

n) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α, n) ใช้ไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น พลูโทเนียม-238 (^{238}Pu) พอโลเนียม-210(^{210}Po) ผสมกับธาตุที่นิวตรอนในนิวเคลียสมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำ เช่น เบริลเลียม โบรอน เกิดปฏิกิริยา(α, n) ปลดปล่อยนิวตรอนออกมา อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ 2.2 x 10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อ 1 คูรีของไอโซโทปรังสีที่ให้อนุภาคอัลฟา

ข) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ, n) ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา เช่น พลวง-124 (^{124}Sb) ผสมกับเบริลเลียม เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียม จะมีนิวตรอนถูกปลดปล่อยออกมา อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี ^{124}Sb-Be ประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อ 1 คูรี ของ ^{124}Sb ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้มีข้อด้อยคือมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนออกมามาก

ค) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัว (Self fission) เกิดจากนิวเคลียสแตกตัวจากปฏิกิริยาฟิชชันเอง เช่นแคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) แตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนและให้นิวตรอน 2-3 ตัวต่อการแตกตัว 1 ครั้ง อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อ 1 คูรีของ ^{252}Cf

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบต้นกำเนิดนิวตรอนสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน [2]

ต้นกำเนิดนิวตรอน	นิวตรอนฟลักซ์	ข้อดี	ข้อจำกัด
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู	10^{10} - 10^{14}	ความเข้มนิวตรอนสูง ให้ความคมชัดมาก อายุการใช้งานนาน	ราคาสูงมาก ใช้งานยาก ต้องอยู่ประจำที่
เครื่องเร่งอนุภาค	$10^7 - 10^{10}$	ความเข้มนิวตรอน ปานกลาง	ราคาสูง ใช้งานค่อนข้างยาก ความเข้มสม่ำเสมอ
ไอโซโทปรังสี	10^5 - 10^9	ขนาดเล็ก ใช้งานสะดวก ใช้นอกสถานที่ได้ ความเข้มสม่ำเสมอ	ความเข้มนิวตรอน ต่ำ ภาพถ่ายไม่ค่อย คมชัด

2.3 พลังงานของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนสามารถแบ่งประเภทได้ 3 กลุ่มใหญ่ ตามระดับพลังงานดังนี้

ก) นิวตรอนช้า (Slow neutron) หมายถึง นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0 – 1 keV แบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ คือ

- โคลด์นิวตรอน (Cold neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าเทอร์มัลนิวตรอน เกิดจากการกระเจิงติดต่อกันของเทอร์มัลนิวตรอน มักมีพลังงานน้อยกว่า 0.01 eV

- เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ พลังงานความร้อนเฉลี่ยของอะตอมตัวกลาง โดยที่พลังงานและความเร็วสัมพัทธ์ของนิวตรอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางที่วิ่งผ่าน พลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนที่พบมากที่สุด ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 0.0253 eV

- เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอนในช่วงระหว่าง 0.3 – 10 keV

- เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 1–100 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดมีการจับนิวตรอนในช่วงพลังงานนี้ได้ดี เรียกว่า Resonance absorption

ข) อินเตอร์มีเดียตนิวตรอน (Intermediate neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ช่วงระหว่าง 0.1 – 0.5 MeV

ค) นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน [3]

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0.0 eV ถึง 10^3 eV
โคลด์นิวตรอน (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

2.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อสสาร

นิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยากับสสารได้หลายแบบโดยขึ้นกับพลังงานจลน์ของนิวตรอนและชนิดของสสาร ดังนี้

ก) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมของสสารที่เพียงแค่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น คือ มีการถ่ายเทพลังงานจลน์จากนิวตรอนให้นิวเคลียสของอะตอมของสสาร แต่ระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกชนนั้นยังคงอยู่ในสภาวะปกติ (ground state) ส่วนนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยาจะกระเจิงออกมาโดยที่ทิศทางและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่พลังงานจลน์รวมของนิวตรอนและนิวเคลียสก่อนและหลังชนมีค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง อันตรกิริยาแบบนี้บางทีเรียกว่าการกระเจิงแบบโพเทนเชียล (potential scattering) อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็ว สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, n)

ข) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้ว รวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม (compound nucleus) จะมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสของอะตอมตัวกลางยังคงอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ทำให้พลังงานจลน์ของระบบหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปการปลดปล่อยรังสีแกมมา การเกิดอันตรกิริยาเช่นนี้นิวตรอนต้องมีพลังงานสูงมากพอที่จะกระตุ้นนิวเคลียสให้อยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ ดังนั้นอันตรกิริยานี้จึงต้องมีพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energy) มักเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไป เป็นอันตรกิริยาแบบดูดกลืนพลังงาน (endothermic interaction) อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการลดหรือหน่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, n'γ)

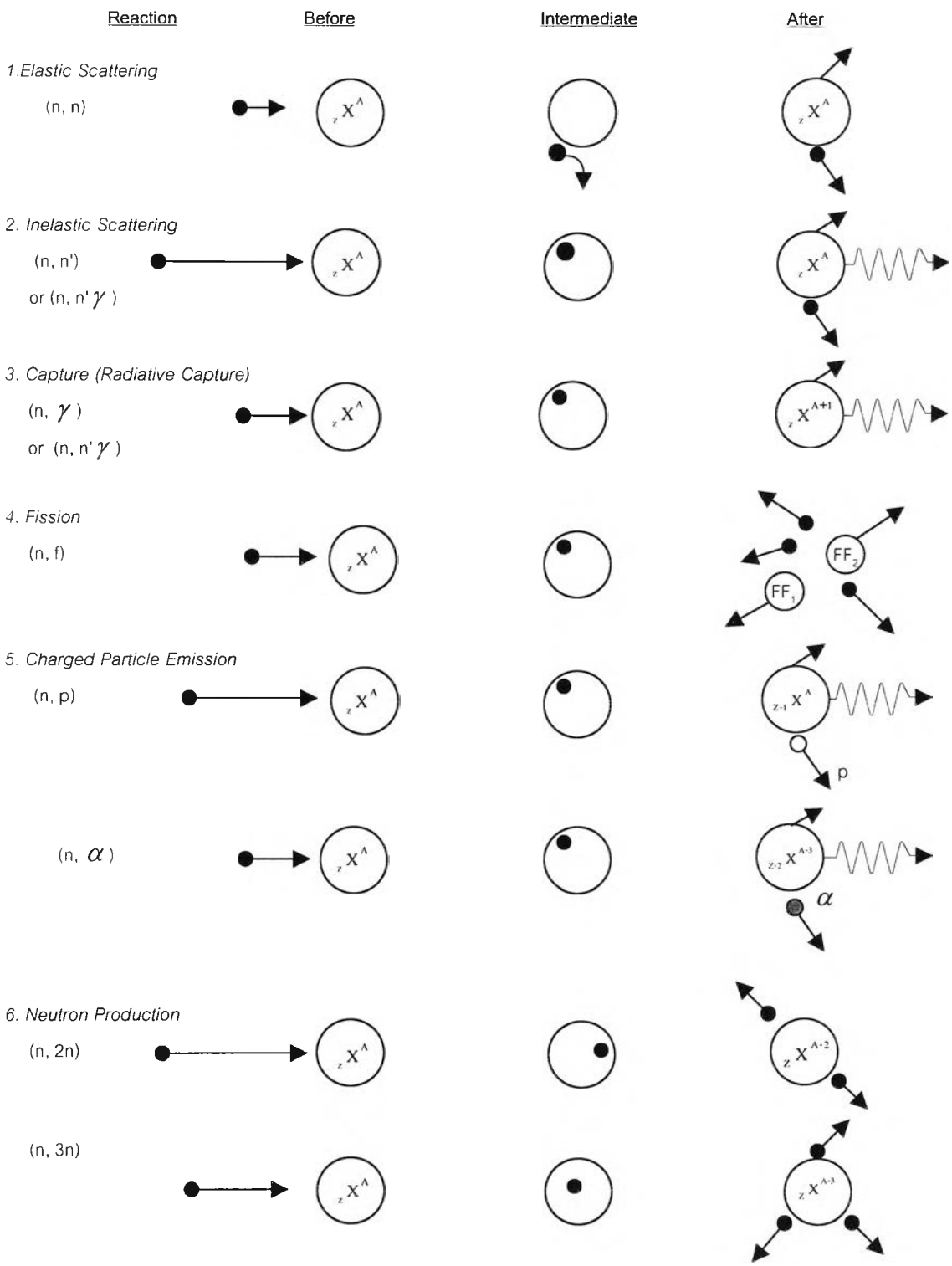
ค) อันตรกิริยาการจับนิวตรอน (Neutron capture) หรือ อันตรกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) หรือ เรดิเอทิฟแคปเจอร์ (Radiative capture) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแล้วถูกจับไว้กลายเป็นนิวเคลียสที่มีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีการปล่อยรังสีแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่า หรือเรียกว่าการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (Neutron captured gamma – rays) เป็นอันตรกิริยาแบบคายพลังงาน (exothermal interaction) เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิมรวมกับของนิวตรอนอิสระเสมอ หรือมวลของนิวเคลียสเดิมรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระนั้นมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิค

นิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA) สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, γ)

ง) ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) หรือปฏิกิริยาแตกตัว เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 หรือ พลูโตเนียม-239 เป็นต้น แล้วรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะเกิดการแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีเลขมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิมพร้อมกับมีนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมาด้วย อันตรกิริยาแบบนี้มีความสำคัญมากในการเกิดพลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, f)

จ) อันตรกิริยาการปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged particle emission) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิดแล้วรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสรวม จากนั้นนิวเคลียสรวมจะปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา อนุภาคโปรตอน ส่วนนิวเคลียสของธาตุเดิมนั้นกลายเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่ไป สัญลักษณ์ของอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, α) หรือ (n, p) ตัวอย่างของอันตรกิริยาแบบนี้คือ $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ ซึ่งจะมีความสำคัญมากในเรื่องการวัดนิวตรอน และการกำบังนิวตรอน และ $^{14}N(n, p)^{14}C$ เป็นต้น

ฉ) ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับนิวตรอนพลังงานสูงและเป็นแบบดูดกลืนพลังงาน ผลของอันตรกิริยาแบบนี้ทำให้ได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว สัญลักษณ์ของการเกิดอันตรกิริยาแบบนี้ คือ (n, 2n) หรือ (n, 3n)



รูปที่ 2.2 แผนภาพอันตรกิริยาของนิวตรอนต่อสสาร [1]

2.5 **ภาคตัดขวางนิวตรอน** (Neutron cross section)

เมื่อนิวตรอนวิ่งเข้ามาทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลาง โอกาส (Probability) ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 6 แบบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดนิวเคลียสของตัวกลางนั้นและพลังงานของนิวตรอน สามารถอธิบายเชิงปริมาณได้ในเทอมของ " ภาคตัดขวาง(cross section) " แบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

ก) **ภาคตัดขวางจุลภาค** (Microscopic cross section; σ) หมายถึง ค่าที่บอกถึงโอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \qquad \text{.....(2.2)}$$

โดยที่ σ_t คือ ภาคตัดขวางรวม (microscopic total cross section)

σ_s คือ ภาคตัดขวางของการกระเจิง (microscopic scattering cross section) เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยา (n, n) และอันตรกิริยา (n, n'γ) ดังสมการ (2.3)

$$\sigma_s = \sigma_{(n,\,n)} + \sigma_{(n,\,n'\gamma)} \qquad \text{.....(2.3)}$$

$\sigma_{(n,\,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,\,n'\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

σ_a คือ ภาคตัดขวางของการดูดกลืน (microscopic absorption cross section) เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาการดูดกลืนนิวตรอน ดังสมการ (2.4)

$$\sigma_a = \sigma_{(n,\,\gamma)} + \sigma_{(n,\,\alpha)} + \sigma_{(n,\,p)} + \sigma_{(n,\,f)} \qquad \text{.....(2.4)}$$

$\sigma_{(n,\,\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,\,\alpha)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา

$\sigma_{(n, p)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n, f)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาฟิชชัน

ข) ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section; $\sum$) หมายถึง โอกาสที่นิวตรอนจะเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางต่อระยะทางหน่วยเป็น ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) ใช้กับตัวกลางที่มีความหนา คำนวณได้จากผลคูณของจำนวนนิวเคลียสของตัวกลางต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กับ ค่าภาคตัดขวางจุลภาค ดังสมการที่ (2.5)

$$\sum = N\sigma \qquad \text{.....(2.5)}$$

ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับนิวไคลด์หนึ่ง ๆ จะเปลี่ยนไปตามความเร็วของนิวตรอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยาด้วย ภาคตัดขวางของการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนจะแปรผกผันกับความเร็วของนิวตรอน

2.6 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อให้นิวตรอนทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุบางชนิดแล้วให้อนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟา แล้วอนุภาคดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับธาตุอีกชนิดแล้วเปลี่ยนเป็นแสง เพื่อทำให้เกิดความดำขึ้นบนฟิล์ม ฉากเปลี่ยนนิวตรอนมี 3 ประเภท คือ

2.6.1 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ (metallic foil neutron converter screen)

เป็นแผ่นโลหะที่มีภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนสูง เมื่อนิวตรอนทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุนั้นแล้ว จะปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาทันที และ/หรือเกิดไอโซโทปใหม่ที่เป็นไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีออกมา

ฉากโลหะที่ให้รังสีออกมาทันที ได้แก่ ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gadolinium,Gd) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ซามาเรียม (Samarium, Sm) โรเดียม (Rodium, Rh) และเงิน (silver, Ag) มักใช้ในการถ่ายภาพด้วยวิธีตรง (direct method)

ฉากโลหะที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว ได้แก่ ดิสโพรเซียม (dysprosium, Dy) อินเดียม (indium, In) ทองคำ (gold, Au) นิยมใช้ในการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอด (transfer method)

2.6.2 **ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง** (light emitting neutron converter screen)

ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเป็นแสงเพื่อให้เกิดความดำขึ้นบนฟิล์ม ประกอบด้วยสารเรืองรังสีและธาตุที่มีภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n, α) สูง ได้แก่ โบรอนและลิเทียม เมื่อนิวตรอนทำอันตรกิริยากับ ^{10}B หรือกับ ^{6}Li จะเกิดอนุภาคอัลฟาขึ้น อนุภาคอัลฟานี้เมื่อเคลื่อนที่ในสารเรืองรังสีจะทำให้เกิดแสง ดังนั้นเมื่อนิวตรอนวิ่งชนฉากเปลี่ยนนิวตรอนจึงมีแสงเกิดขึ้น ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดมีแสงนี้ ได้แก่

1) ฉาก ZnS (Ag) ผสมกับสารประกอบโบรอนหรือลิเทียม ได้แก่ ฉาก NE 426 เป็นฉากที่ใช้สารเรืองแสง ZnS (Ag) ผสมกับลิเทียม เป็นฉากที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความไวสูง

2) ฉากแก้วเรืองรังสีที่มีซีเรียม (cerium activated glass scintillation) ผสมกับลิเทียม ได้แก่ ฉาก NE 905

3) ฉากแกโดลิเนียมผสมกับสารเรืองรังสี ได้แก่ ฉากที่มีส่วนผสมเป็นแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) กับ ZnS (Ag) และฉากแกโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ (เทอร์เบียม) [gadolinium oxysulfide (terbium) : $Gd_2O_3S(Tb)$] ฉากแกโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ (เทอร์เบียม)นี้ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้ เนื่องจากเมื่อแกโดลิเนียมทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเกิดคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนขึ้นจะทำให้เกิดแสงด้วย ฉากชนิดนี้ได้แก่ Konica SRO-750 New Hi-Ortho Screen

2.6.3 **ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรค-เอตช์** (neutron converter screen for track-etch)

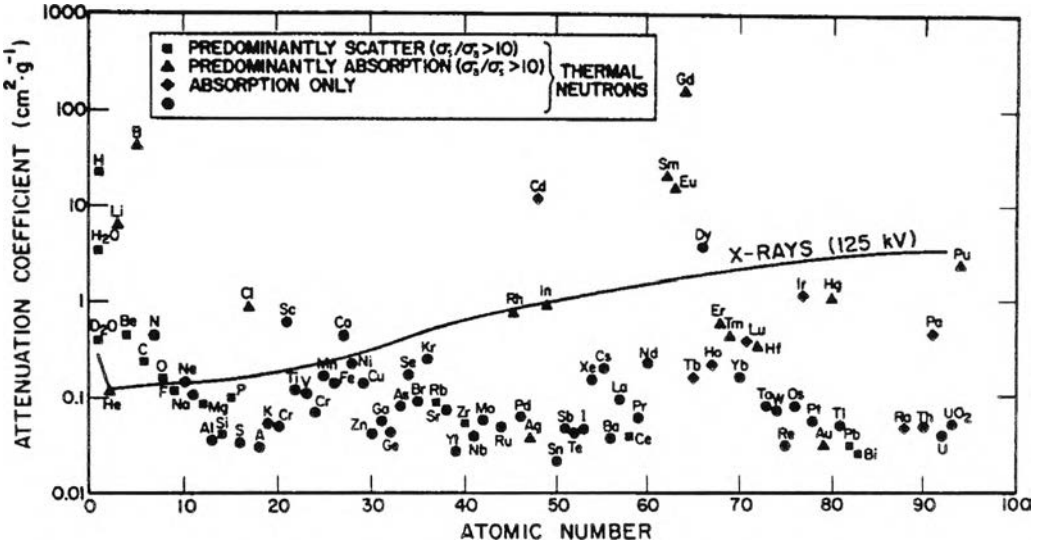
เป็นฉากที่มีสารประกอบโบรอนและ/หรือลิเทียม เมื่อเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนจะปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาออกมา แล้วใช้ฟิล์มแทรคเอตช์ เช่น เซลลูโลสไนเตรต บันทึกรอยของอนุภาคอัลฟา เมื่อนำไปล้างกัดรอย (track etching) บริเวณที่ถูกอนุภาคอัลฟาชนจะขุ่นฝ้าตามจำนวนของอนุภาคอัลฟาที่ชน ฉากประเภทนี้ ได้แก่ BN1 และ BE-10 ภาพที่ได้จะมีความคมชัดสูง

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของฉากเปลี่ยนนิวตรอนบางชนิด [3]

ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ความหนา (mm)	ประสิทธิภาพในการจับนิวตรอน	ความไม่คมชัด (μm)	ฟิล์มที่ใช้	n/γ ratio ($n.cm^{-2}.mR^{-1}$)
NE 426 (granular)	0.25	20	400	ฟิล์มเอกซเรย์	5×10^4
NE 905 (glass)	1.0	80	400	ฟิล์มเอกซเรย์	2×10^5
Gadolinium foil	0.025	25	<100	ฟิล์มเอกซเรย์	10^4
Dysprosium foil	0.10	10	200	ฟิล์มเอกซเรย์	0

2.7 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน อาศัยหลักการส่งผ่านนิวตรอนผ่านวัสดุชิ้นงาน แล้วบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมาเป็นภาพฉาย (projection) ของชิ้นงาน ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุ เพราะอันตรกิริยาเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนของอะตอม ซึ่งธาตุเดียวกันมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากัน แต่สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของนิวตรอนบางธาตุมีค่าสูงมาก บางธาตุมีค่าต่ำไม่เรียงตามเลขอะตอม การที่สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของนิวตรอนของไอโซโทปของธาตุเดียวกันมีค่าแตกต่างกัน เป็นเพราะอันตรกิริยาของนิวตรอนเกิดกับนิวเคลียสของอะตอม ไอโซโทปของธาตุเดียวกันมีจำนวนนิวตรอนต่างกัน จึงเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนต่างกันดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 keV และนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV กับเลขอะตอมของธาตุ [3]

2.8 ลักษณะงานที่เหมาะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

จากคุณสมบัติที่ทำให้นิวตรอนต่างจากเอกซเรย์หรือรังสีแกมมาดังได้กล่าวมาแล้ว จึงแบ่งประเภทของงานที่เหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้ 4 ประเภท [4] ดังนี้

1. การตรวจสอบวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน

ในกรณีเช่นนี้จะมีปัญหาถ้าตรวจสอบด้วยรังสีเอกซ์ เพราะรังสีเอกซ์ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของวัสดุที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันได้ เช่น การแยกแยะแคดเมียมกับเงินในงานเชื่อมทองเหลือง การตรวจสอบเซรามิกในงานหล่อใบพัดเครื่องบิน (turbine blade) การตรวจงานหล่อเพื่อหาโพรงอากาศหรือความไม่สม่ำเสมอของวัสดุห่อหุ้ม (cladding materials)

2. การตรวจสอบชิ้นส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำและการตรวจวัสดุที่อยู่ในภาชนะที่มีความหนาแน่นสูง

ใช้ตรวจหาตำแหน่งไฮโดรเจนในวัสดุห่อหุ้ม หาตำแหน่งของโลหะที่เป็นของเหลวในโลหะ ตรวจหาการกัดกร่อนในชิ้นส่วนอะลูมิเนียมของเครื่องบิน

3. การตรวจสอบวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสีสูง

ในการตรวจสอบวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสีสูง มักมีรังสีแกมมารบกวน ทำให้เกิด film fogging มีความเปรียบต่างน้อย การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอดจะหลีกเลี่ยงรังสีที่ไม่ต้องการได้ มีการใช้ในการตรวจแท่งเชื้อเพลิงเพื่อหารอยร้าว ตรวจสอบแนวเชื่อมหรือรอยต่อทองเหลืองในส่วนของชิ้นงานที่เป็นกัมมันตภาพรังสี

4. ไอโซโทปของธาตุชนิดเดียวกัน

เนื่องจากไอโซโทปของธาตุเดียวกันมีการลดทอนนิวตรอนได้ต่างกัน จึงทำให้สามารถตรวจสอบธาตุที่มีทั้งการลดทอนนิวตรอนสูงมากหรือต่ำมากได้ เช่น ^{1}H กับ ^{2}H หรือ ^{235}U กับ ^{238}U

2.9 ส่วนประกอบของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ

1. <u>ระบบผลิตนิวตรอนช้า</u> มีต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วและตัวหน่วงนิวตรอน ทำหน้าที่ลดพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนให้เป็นนิวตรอนช้า

2. <u>ท่อนำนิวตรอน</u> (neutron collimator) เป็นท่อสำหรับนำนิวตรอนช้าจากต้นกำเนิดนิวตรอน เช่น จากแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

3. <u>ฉากเปลี่ยนนิวตรอน</u> (neutron converter screen) ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมา ให้เป็นแสง รังสี หรืออนุภาคที่เหมาะสมกับฟิล์มหรืออุปกรณ์บันทึกภาพ

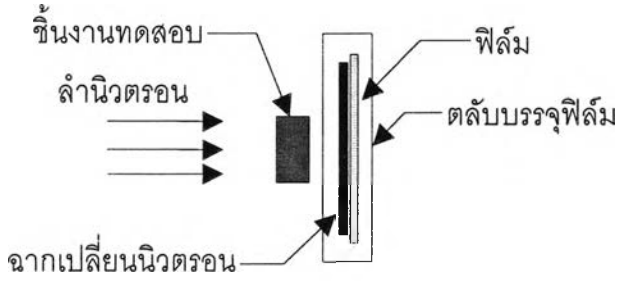
4. ฟิล์มและอุปกรณ์บันทึกภาพ ทำหน้าที่บันทึกภาพหรือแสดงภาพที่สอดคล้องกับความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมา

คุณสมบัติของนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพ ควรมีค่าฟลักซ์นิวตรอน ระดับ 10^8 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และมีค่า L/D ratio ตั้งแต่ 100 ขึ้นไป[3]

2.10 วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้ทั่วไป มี 2 วิธีคือ

1. วิธีถ่ายภาพโดยตรง (Direct Exposure Method) เป็นการถ่ายภาพโดยวางฟิล์มไว้กับตัวอย่างและฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ตำแหน่งของลำนิวตรอน ขณะทำการถ่ายภาพ ดังรูปที่ 2.4

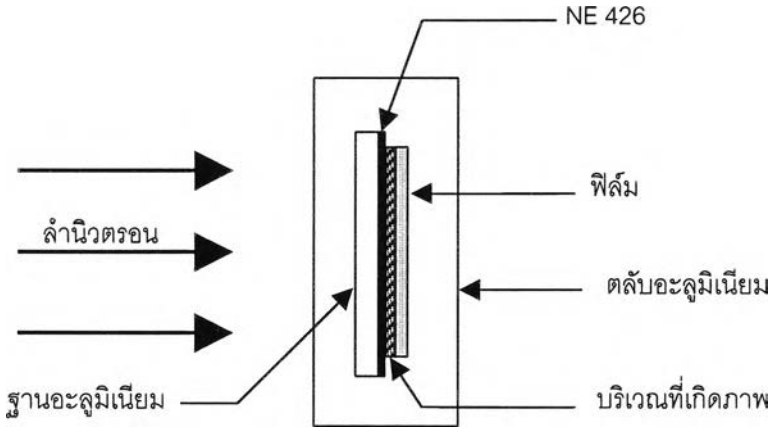


รูปที่ 2.4 การถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายตรง

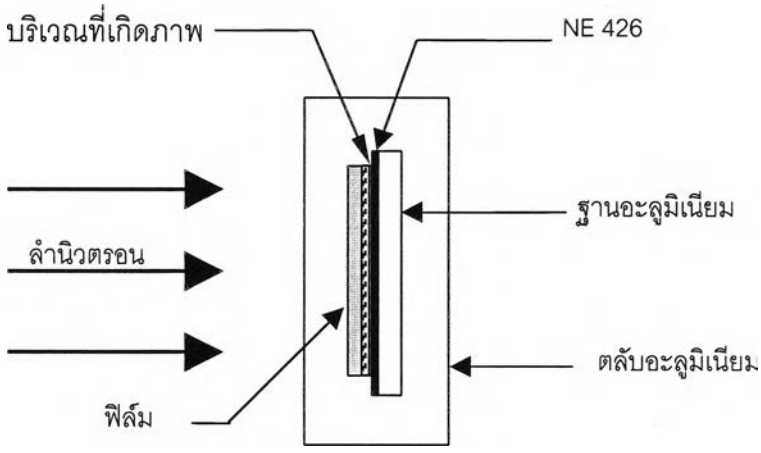
การถ่ายภาพวิธีนี้ อะตอมของฉากเปลี่ยนนิวตรอนดูดกลืนนิวตรอน แล้วคายรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีอัลฟา หรือ แสง ตามชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยคายออกมาทันทีที่ดูดกลืนนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้กับเทคนิคนี้ ได้แก่ แกโดลิเนียม (Gd) แคดเมียม (Cd) ซามาเรียม (Sm) และฉากเปลี่ยนนิวตรอนแบบปลดปล่อยแสง(scintillator screen) ซึ่งมีส่วนผสมของโบรอนหรือลิเทียมกับ Zinc Sulphide (ZnS) เช่น ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE 426 มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ^{6}LiF/ZnS (Ag) ซึ่งลิเทียม-6 เป็นไอโซโทปที่มีอยู่ 7.5% ของลิเทียมในธรรมชาติ มีภาคตัดขวางการดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอน 940 บาร์น เมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอนจะปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาพลังงาน 2.05 MeV และตริเตียมพลังงาน 2.74 MeV ดังสมการที่ (2.6) และมี ZnS (Ag) ทำหน้าที่เป็นสารดูดกลืนอัลฟาและตริเตียม แล้วเกิดแสงขึ้นบนฟิล์ม ทำให้ฟิล์มดำ

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow ^{7}_{3}\mathrm{Li} \longrightarrow ^{3}_{1}\mathrm{H}(2.74\,\mathrm{MeV}) + ^{4}_{2}\mathrm{He}(2.05\,\mathrm{MeV}) \qquad \text{.....(2.6)}$$

การถ่ายภาพทางตรงสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ที่ด้านหน้าของฟิล์มเรียกว่า Front screen method ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นิวตรอนไว้ที่ด้านหลังของฟิล์ม เรียกว่า Back screen method ทำให้เกิดความดำบนฟิล์มแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การถ่ายภาพโดยวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ที่ด้านหน้าของฟิล์ม

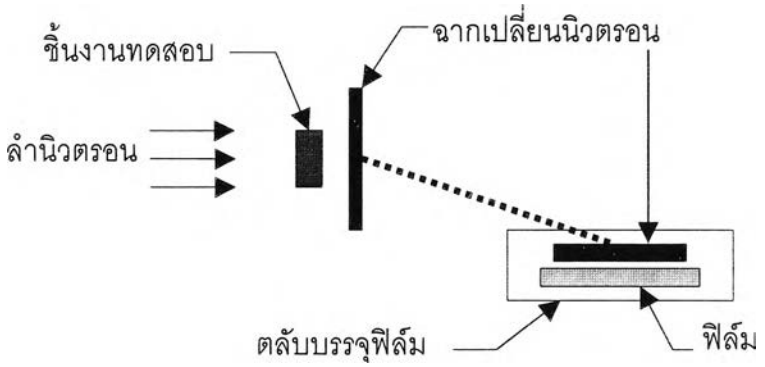


รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพโดยวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ที่ด้านหลังของฟิล์ม

ในรูปที่ 2.5 วิธีวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหน้าฟิล์ม เมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านฉากเปลี่ยนนิวตรอนซึ่งมี ^{6}Li หรือ ^{10}B เป็นสารดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีอัลฟา แต่ ^{6}Li หรือ ^{10}B นี้มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง คือ ^{6}Li มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอน 940 บาร์น และ^{10}B มีค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอน 3837 บาร์น เมื่อนิวตรอนผ่านชั้นความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน จึงลดลงมาก ทำให้นิวตรอนที่จะทำให้เกิดภาพขึ้นบนชั้นอิมัลชันของฟิล์มมีจำนวนน้อย ในรูปที่ 2.6 เมื่อวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหลังฟิล์ม นิวตรอนสามารถ

เคลื่อนที่สู่ผิวหน้าของฟิล์มโดยไม่เกิดการลดทอน วิธีนี้จึงทำให้ฟิล์มเกิดความดำได้มากกว่าวิธีวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหน้าฟิล์ม

2. <u>การถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอด</u> (Transfer Method) วิธีนี้ไม่ได้วางฟิล์มไว้ที่ตำแหน่งของลำนิวตรอน แต่ใช้วิธีการทำให้แผ่นฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีกัมมันตภาพรังสีแล้วทำ autoradiography โดยนำมาประกบกับแผ่นฟิล์มในภายหลัง ภาพที่ได้เกิดจากการคายรังสี (decay) ของกัมมันตภาพของฉากเปลี่ยนนิวตรอน วิธีนี้มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอด

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฉากเปลี่ยนนิวตรอน [3]

ธาตุ	ค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอน (บาร์น)	อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น	ครึ่งชีวิตของไอโซโทปใหม่	ชนิดของรังสีและพลังงานที่เกิดขึ้น
$^{6}_{3}Li$	945	n, α	เกิดขึ้นทันที	α 2.05 MeV T 2.74 MeV
$^{10}_{5}B$	3837	n, α	เกิดขึ้นทันที	α 1.47 MeV Li 0.84 MeV
$^{Nat}_{64}Gd$	46000	n, γ	เกิดขึ้นทันที	β 70 keV (main)
$^{Nat}_{66}Dy$	950	n, α	2.3 ชั่วโมง	β 1.28 MeV(max)
$^{Nat}_{49}In$	191	n, γ	54 นาที	β 1.00 MeV(max)

หอสมุดกลาง ... วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

ลักษณะของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนที่ดี คือ มีความคมชัด มีความเปรียบต่างสูง มีความดำพอเหมาะ และมีความบิดเบือนน้อยที่สุด

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน ได้แก่ ปัจจัยทางเรขาคณิต (geometry factor) คุณสมบัติของลำนิวตรอน ชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และชนิดของฟิล์ม ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อภาพถ่ายนิวตรอน [2]

ปัจจัย	ผลที่มีต่อภาพถ่าย
1. ปัจจัยทางเรขาคณิต	
-ค่า L/D ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์	-ความคมชัดและเวลาในการถ่ายภาพ
-ระยะชิ้นงานถึงฟิล์ม	-ความคมชัดและเวลาในการถ่ายภาพ
-ความแนบสนิทกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน	-ความคมชัดและเวลาในการถ่ายภาพ
-แนวกึ่งกลางลำนิวตรอนตั้งฉากกับชิ้นงานและฟิล์ม	-ความบิดเบือนของภาพ
-รูปร่าง ขนาด และชนิดวัสดุของชิ้นงาน	-ความคมชัดและความเปรียบต่าง
2. คุณสมบัติของลำนิวตรอน	
-ค่าอัตราส่วนแคดเมียม และพลังงานของนิวตรอน	-ความเปรียบต่าง
-การปะปนเปื้อนของรังสีแกมมา	-ความเปรียบต่าง
-ความเข้มของนิวตรอน	-ความดำของภาพ
3. ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	
-ความหนา	-ความคมชัด
-ชนิดของฉาก	-ความคมชัดและความเปรียบต่าง
4. ชนิดของฟิล์มและกระบวนการล้างฟิล์ม	
-ความเร็วของฟิล์ม	-ความคมชัด
-ความเปรียบต่างของฟิล์ม	-ความเปรียบต่างของภาพ
-กระบวนการล้างฟิล์ม	-ความเปรียบต่างของภาพ

2.12 การลดความเข้มนิวตรอน

เมื่อลำนิวตรอนผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร ทำให้ความเข้มของนิวตรอนลดลงตามระยะทางแบบเอกซ์โพเนนเชียล ขึ้นกับความหนาและสมบัติของวัตถุนั้น ดังสมการที่ (2.7)

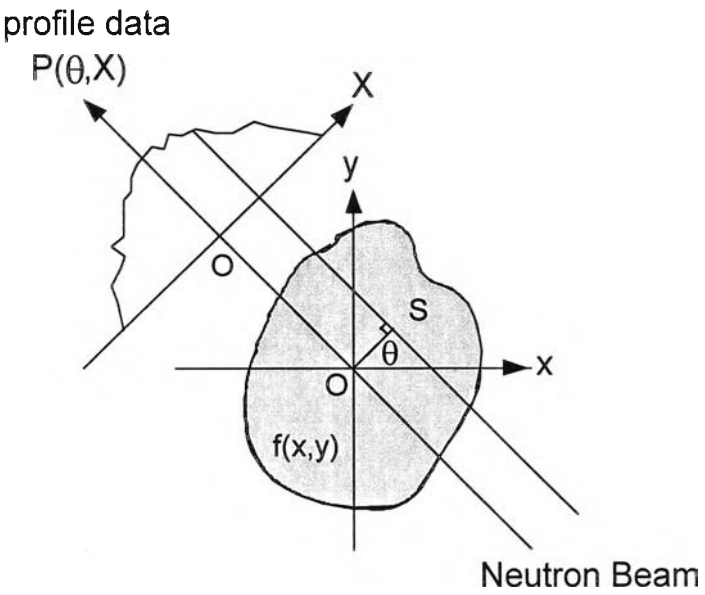
$$I = I_0 e^{(-\Sigma x)} \qquad \text{.....(2.7)}$$

เมื่อ I_0 และ I คือ ความเข้มของนิวตรอนก่อนและหลังทะลุผ่านตัวกลางตามลำดับ

Σ คือ ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) ของนิวตรอน ที่พลังงานใด ๆ ต่อวัตถุตัวกลาง

x คือ ความหนาของตัวกลาง

2.13 หลักการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี [5]



รูปที่ 2.8 แผนภาพการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ [5]

การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นต้องใช้ข้อมูลโปรไฟล์ที่พิจารณาจากคุณสมบัติการทะลุผ่านของนิวตรอนต่อวัตถุ โดยหมุนวัตถุด้วยมุมทีละน้อย ๆ ถ่ายภาพวัตถุด้วยนิวตรอนแต่ละระนาบของการหมุนจนครบ 180 องศาเป็นอย่างน้อย ข้อมูลความดำที่อ่านได้โดยเครื่องสแกนอ่านความดำบนฟิล์มเอกซเรย์ของแต่ละภาพเรียกว่า " ข้อมูลโปรไฟล์ (profile data) "

หรือ " ข้อมูลโปรเจกชัน (projection data) " รูปที่ 2.8 แสดงหลักการของการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ โดยกำหนดให้วัตถุวางบนระนาบ (x, y) และมีจุด O เป็นจุดหมุนแนวแกนของวัตถุหมุนทำมุม θ กับแนวแกน X นิวตรอนลำขนานจากต้นกำเนิดนิวตรอน ทะลุผ่านวัตถุถึงแผ่นฟิล์มด้วยระยะทาง s การลดลงของความเข้มของนิวตรอนเป็นไปตามสมการที่ (2.8) ดังต่อไปนี้

$$I = I_0 \exp\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)ds\right] \qquad \text{.....(2.8)}$$

โดยฟังชัน f(x, y) คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) นิวตรอนของวัตถุที่พลังงานนั้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนระนาบ (x, y) และจากสมการที่ (2.8) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.9) ดังต่อไปนี้

$$P(\theta, X) = \ln\left[\frac{I_0}{I}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)ds \qquad \text{.....(2.9)}$$

ในที่นี้ $P(\theta, X)$ คือข้อมูลโปรไฟล์ที่มุม ซึ่งข้อมูลแต่ละจุดบนแนวแกน X ของวัตถุที่เกิดจากลำนิวตรอนตัดผ่าน เรียกว่า " เรย์ซัม(ray-sum) "

ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการสแกนอ่านความดำบนแผ่นฟิล์มนั้น ยังไม่สามารถนำไปเป็นข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ จึงต้องมีการปรับแก้ค่าใหม่ (data correction) ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลโปรไฟล์ที่มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนของวัตถุอย่างแท้จริง โดยการปรับแก้ค่าจากความแรงรังสีพื้นฐาน (background, B) ดังสมการที่ (2.10)

$$P'(\theta, X) = \ln\left[\frac{I_0 - B}{I - B}\right] \qquad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อประยุกต์ทฤษฎีของการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) และการคอนโวลูชัน (convolution) จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จึงเขียนรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.11) ดังต่อไปนี้

$$f(x,y) = \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P'(\theta, X)\cdot H(X - X')dX'd\theta \qquad \text{.....(2.11)}$$

โดยฟังชัน H(X) คือ ฟิลเตอร์ฟังชัน (filter function) ในที่นี้เลือกใช้ฟิลเตอร์ฟังชันของ Shepp & Logan วิธีการคำนวณแบบนี้เรียกว่า "คอนโวลูชัน ฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน" (convolution filter backprojection)

2.14 วิธีการกรองด้วยฟิลเตอร์ฟังชันของ Shepp-Logan [5]

สำหรับการกรองข้อมูลด้วยฟิลเตอร์ฟังชันนั้น เป็นการนำข้อมูลโปรไฟล์แต่ละโปรไฟล์มาปรับด้วยการคำนวณจากสมการของ Shepp-Logan ดังต่อไปนี้

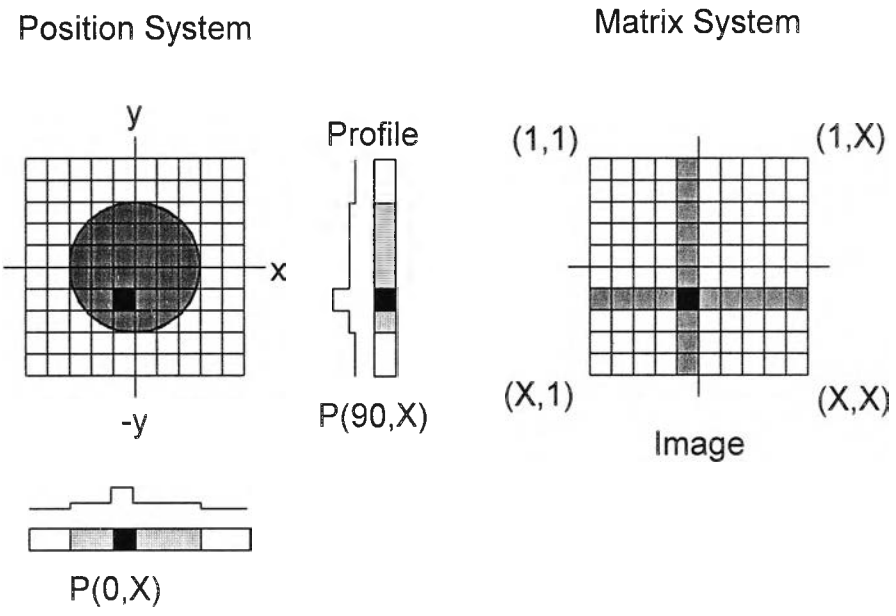
$$H(X) = 2/[\pi^2 d(1-4X^2)] \quad \text{.....} (2.12)$$

เมื่อ d คือระยะระหว่างเรย์ซัม (ในที่นี้เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร) และ X คือเลขจำนวนเต็มได้แก่ 0, $\pm$1, $\pm$2,.... ดังนั้นเมื่อปรับข้อมูลโปรไฟล์ P(θ, X) ด้วยการคูณด้วยสมการที่ (2.12) แล้วจึงนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยวิธีแบคโปรเจคชันต่อไป

2.15 วิธีการแบคโปรเจกชัน (backprojection) [5]

เมื่อเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากการวัดความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัตถุตัวกลางที่มุมต่าง ๆ แล้วนำมาปรับแก้โปรไฟล์ด้วยค่าแบคกราวด์ (background) และเลือกใช้ฟิลเตอร์ฟังชันของ Shepp-Logan จะได้โปรไฟล์ใหม่ที่เหมาะสำหรับนำไปคำนวณสร้างภาพตัดขวาง การที่จะสร้างเป็นภาพนั้นมีกระบวนการที่ค่อนข้างจะซับซ้อนและยุ่งยากพอสมควร เพื่อให้เกิดความเข้าใจพอสังเขป พิจารณารูปที่ 2.9 จากรูปทางด้านซ้ายมือจะเห็นวัตถุตัวอย่างวางอยู่บนระนาบ (x, y) โดยจุดหมุนวางทับจุดกำเนิดของระนาบ ที่ขีดตารางของระนาบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้านล่างมีลำนิวตรอนทะลุผ่านวัตถุโดยทำมุม 0 องศากับแนวแกนหมุนของวัตถุ ด้านขวามีลำนิวตรอนทะลุผ่านวัตถุทำมุม 90 องศากับแนวแกนหมุนของวัตถุ ดังนั้นจึงได้ข้อมูลโปรไฟล์ของแต่ละมุมเป็น P(0, X) และ P(90, X) ตามลำดับ เรียกรูปทางด้านซ้ายมือนี้ว่า" ระบบโพสิชัน (position system) " พิจารณารูประนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสทางด้านขวามือซึ่งแบ่งเป็นตารางที่มีขนาดและจำนวนเท่ากันกับรูปทางขวามือ แต่ละจุดบนระนาบกำหนดตำแหน่งโดยเรียงลำดับจากมุมบนด้านซ้าย เริ่มจาก (1, 1) สุดขอบทางด้านขวาที่จุด (1, X) สุดขอบซ้ายด้านล่างที่จุด (X, 1) และสุดขอบทางด้านขวาล่างที่จุด (X, X) ในที่นี้ X หมายถึง จำนวนเรย์ซัมในหนึ่งโปรไฟล์ เมื่อนำข้อมูลเรย์ซัมแต่ละจุดที่ตรงกัน ณ มุมต่าง ๆ มารวมกันก็จะเกิดเป็นภาพขึ้นมา ระบบที่ทำให้เกิดเป็นภาพโทโมกราฟีทางด้าน

ขวามือเรียกว่า " ระบบเมตริก (metrix system) " ดังนั้นวิธีแบคโปรเจกชันจึงเป็นการแปลงจากระบบโพสิชันไปเป็นระบบเมตริกนั่นเอง



รูปที่ 2.9 แผนภาพวิธีการแบคโปรเจกชัน (backprojection) [5]