

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

##### 2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ มีมวล 1.008665 หน่วยมวลอะตอม หรือ  $1.6750 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม นิวตรอนอิสระมีครึ่งชีวิต 10.6 นาที โดยสลายตัวให้โปรตอน อิเล็กตรอน และแอนตินิวตริโน นิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  ${}_0^1n$  ค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2475 เพื่ออธิบายคุณสมบัติของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการชนแผ่นเบอริลเลียม (Beryllium foil) ด้วยอนุภาคอัลฟา ซึ่งต่อมาพบว่านิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary particles) ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยโปรตอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม โดยมีอิเล็กตรอนอยู่รอบนอก

##### 2.1.2 ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ เนื่องจากเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ แต่สามารถเลือกช่วงของพลังงานในการใช้งานได้ ด้วยการลดพลังงานลงจากพลังงานตั้งต้น โดยให้ชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เรียกว่าการหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) นิวตรอนแบ่งออกได้หลายชนิดตามระดับพลังงาน หรือช่วงของพลังงาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับพลังงานของนิวตรอนแต่ละชนิด <sup>(25)</sup>

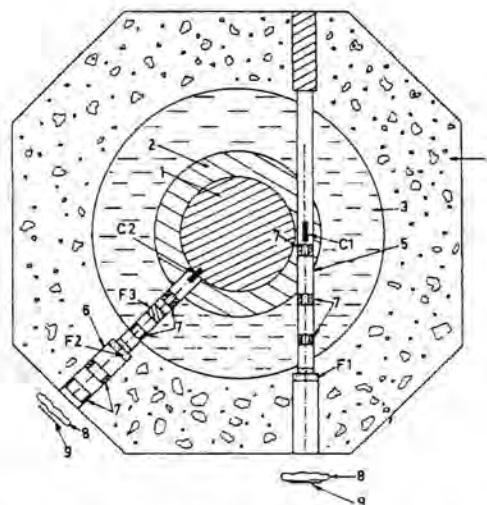
ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
โคลด์นิวตรอน	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน	0.01 - 0.3 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน	0.3 eV - 10 keV
นิวตรอนเร็ว	10 keV - 20 MeV
นิวตรอนสัมพันธภาพ	> 20 MeV

การแบ่งชนิดของนิวตรอนบางแห่งอาจแตกต่างกันออกไป เช่น โคลด์นิวตรอน (Cold neutron), เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) และอีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) เรียกรวมว่า นิวตรอนช้า (Slow neutron) หรืออาจแบ่งนิวตรอนที่มีพลังงานระหว่าง 10 keV - 100 keV ออกจากช่วงของนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) เรียกว่า นิวตรอนระดับกลาง (Intermediate neutron)

### 2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source)

ต้นกำเนิดนิวตรอน แบ่งตามลักษณะและวิธีการปลดปล่อยนิวตรอน ออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerators) และสารไอโซโทปรังสี (Radioisotopes)

(1) เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นต้นกำเนิดที่มีความเข้มของนิวตรอนสูงที่สุด นิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัว (Fission) ของยูเรเนียม-235 (U-235) มีพลังงานในช่วงตั้งแต่ระดับกิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) จนถึงมากกว่า 10 เมกกะอิเล็กตรอน โวลต์ (MeV) โดยมีพลังงานเฉลี่ย 2 เมกกะอิเล็กตรอน โวลต์ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research reactor) ส่วนใหญ่มีท่อนำนิวตรอน (Beam port) จากแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Reactor core) ไปยังตำแหน่งที่ทำการทดลอง โดยมีวัสดุหน่วงนิวตรอน (Moderator) ลดพลังงานของนิวตรอนลงให้เหมาะสมกับการทดลอง



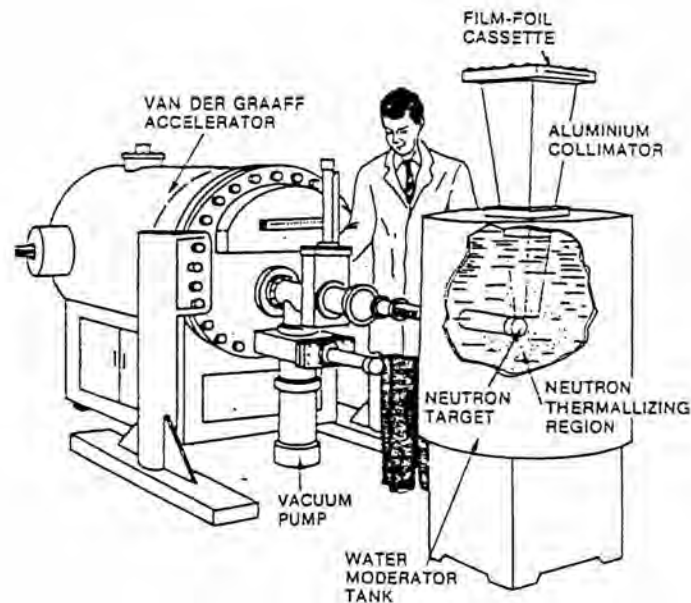
- |                 |                         |                              |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|
| 1. Reactor core | 4. Biological shield    | 7. Gamma beam collimators    |
| 2. Reflector    | 5. Tangential beam tube | 8. Object being radiographed |
| 3. Water pool   | 6. Radial beam tube     | 9. Film cassette             |

รูปที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู<sup>(29)</sup>

(2) เครื่องเร่งอนุภาค เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแรงสูง เร่งอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูงและควบคุมให้เข้าชนกับวัสดุที่เป็นเป้า(Target) ซึ่งจะปลดปล่อย นิวตรอนออกมา จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่ใช้อย่างกับอนุภาคที่เป็นเป้า

ตารางที่ 2.2 พลังงานของนิวตรอนจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของเครื่องเร่งอนุภาค <sup>(18)</sup>

อนุภาคที่ใช้อย่าง	วัสดุที่ใช้เป็นเป้า	พลังงานของนิวตรอน
คิวเทอรอน	ตรีเทียม	14 MeV
คิวเทอรอน	เบอริลเลียม	4 MeV
คิวเทอรอน	ลิเทียม	2 MeV
รังสีเอกซ์	เบอริลเลียม	1.6 MeV
รังสีเอกซ์	ยูเรเนียม	9 MeV
อิเล็กตรอน	แทนนทาลัม	1-4 MeV

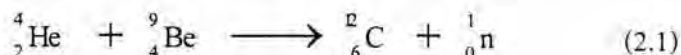


รูปที่ 2.2 เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอกราฟประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ <sup>(18)</sup>

(3) ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ แบ่งตามกระบวนการปลดปล่อย นิวตรอนออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(3.1) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา ( $\alpha, n$ ) ประกอบด้วย ไอโซโทป ริงส์ที่ปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา เช่น เรเดียม (Ra) หรือพลูโตเนียม (Pu) ผสมกับเบอริลเลียม (Be)

หรือโบรอน (B) แล้วชนิกเข้าด้วยกัน นิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมา เกิดจากปฏิกิริยา ( $\alpha, n$ ) ดังสมการที่ (2.1) อายุการใช้งานของต้นกำเนิดนิวตรอน จึงขึ้นอยู่กับครึ่งชีวิตของต้นกำเนิดรังสีอัลฟา

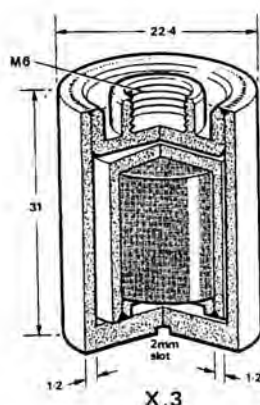


(3.2) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา ( $\gamma, n$ ) ประกอบด้วยสารไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยรังสีแกมมา เช่น พลวง-124 ( ${}^{124}\text{Sb}$ ) ผสมกับเบอริลเลียม

(3.3) ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยาแตกตัว (Fission) ได้แก่ สารไอโซโทปรังสีที่มีการแตกตัวแล้วปลดปล่อยนิวตรอนออกมาอย่างต่อเนื่อง เช่น แคลิฟอเนียม-252 ( ${}^{252}\text{Cf}$ )

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี<sup>(18)</sup>

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ปฏิกิริยา	ปริมาณนิวตรอน (นิวตรอน/วินาที/กรัม)	พลังงานของ นิวตรอน(MeV)
${}^{210}\text{Po-Be}$	138 วัน	( $\alpha, n$ )	$1.28 \times 10^{10}$	4.3
${}^{241}\text{Am-Be}$	458 ปี	( $\alpha, n$ )	$1 \times 10^7$	~4
${}^{226}\text{Ra-Be}$	1620 ปี	( $\alpha, n$ )	$1.3 \times 10^7$	~4
${}^{227}\text{Ac-Be}$	21.8 ปี	( $\alpha, n$ )	$1.1 \times 10^9$	~4
${}^{228}\text{Th-Be}$	1.91 ปี	( $\alpha, n$ )	$1.7 \times 10^{10}$	~4
${}^{124}\text{Sb-Be}$	60 วัน	( $\gamma, n$ )	$2.7 \times 10^9$	0.024
${}^{252}\text{Cf}$	2.65 ปี	แตกตัว	$2.34 \times 10^{12}$	2.3



รูปที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี  ${}^{241}\text{Am-Be}$   
(ภาพจาก Amersham Neutron Source Catalogue RS16-7)

### 2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงไม่เกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน แต่จะเกิดการชนกับนิวเคลียสของอะตอม โดยอาจเป็นการชนที่มีการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) หรือการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) นอกจากนั้น นิวตรอนอาจถูกยึดจับ (Capture) หรือถูกดูดกลืน (Absorb) โดยนิวเคลียส ซึ่งเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาแบบปลดปล่อยโปรตอน (n,p) ปฏิกิริยาแบบปลดปล่อยนิวตรอน (n,2n) ปฏิกิริยาแบบปลดปล่อยรังสีอัลฟา (n, $\alpha$ ) หรือ ปฏิกิริยาแบบปลดปล่อยรังสีแกมมา (n, $\gamma$ ) ติดตามมา

โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร สามารถแสดงเป็นปริมาณ ในรูปของความน่าจะเป็น เรียกว่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยา (Cross-section) มีค่าเป็นพื้นที่ และมีหน่วยเฉพาะเรียกว่า บาร์น (bam) โดย 1 บาร์น มีค่า  $10^{-24}$  ตารางเซนติเมตร ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละไอโซโทปของธาตุ ขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปนิวตรอนพลังงานต่ำ มีค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่านิวตรอนพลังงานสูง

เมื่อนิวตรอนผ่านเข้าไปในวัตถุตัวอย่าง อันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนลดลงตามระยะทาง ดังสมการที่ (2.2) และสามารถเขียนในรูปของสมการเอกซโปเนนเชียลได้ ดังสมการที่ (2.3)

$$-\frac{d\phi}{dx} = \phi\sigma N \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\phi$  เป็น ฟลักซ์ของนิวตรอน หรือจำนวนอนุภาคนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ( $n/cm^2 \cdot s$ )

$x$  เป็น ความหนาของวัตถุตัวอย่าง (cm)

$\sigma$  เป็น ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross-section,  $cm^2$ )

$N$  เป็น จำนวนนิวไคลด์ต่อปริมาตร ( $cm^{-3}$ ) ของธาตุในวัตถุตัวอย่าง

$$\phi = \phi_0 e^{-N\sigma x} \quad (2.3)$$

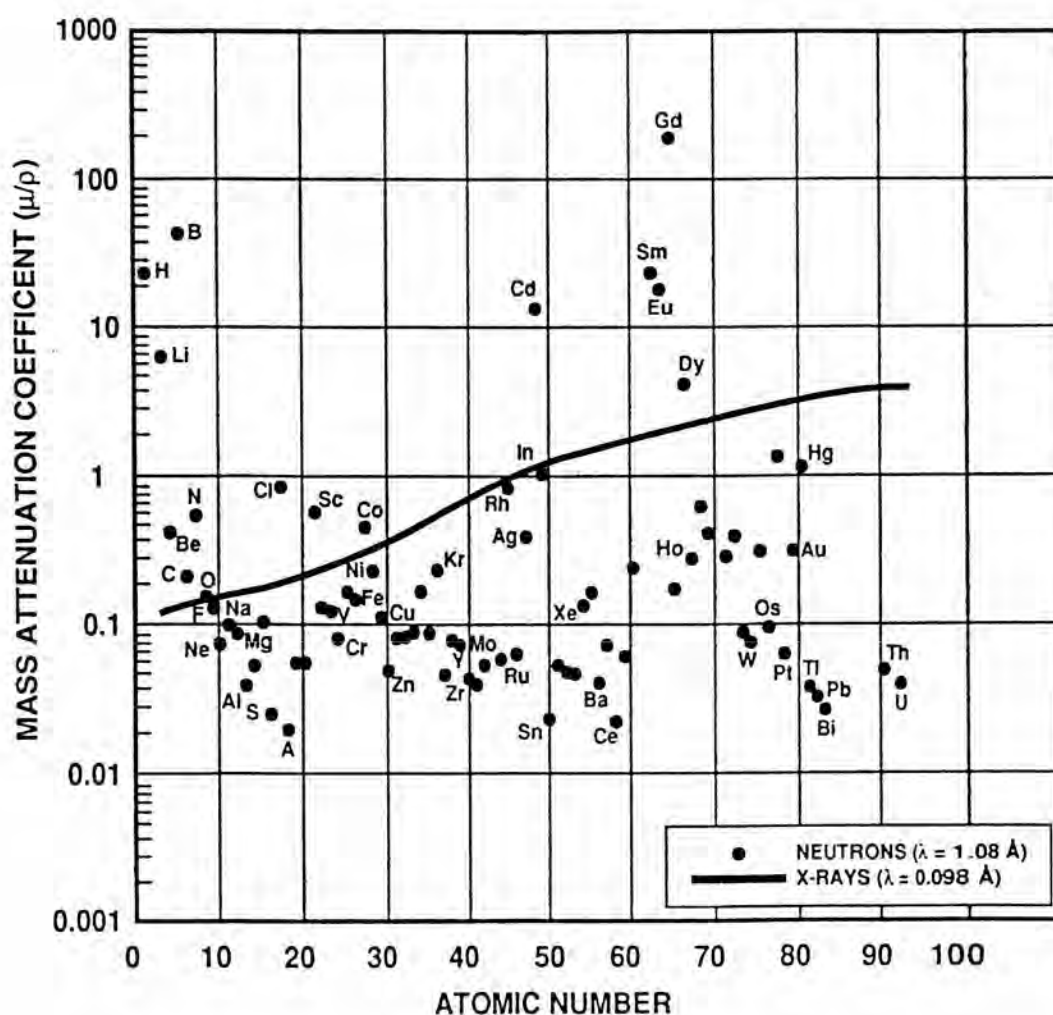
เมื่อ  $\phi$  คือความเข้มนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง ( $n/cm^2 \cdot s$ )

$\phi_0$  คือความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุตัวอย่าง ( $n/cm^2 \cdot s$ )

ผลคูณของ  $N\sigma$  เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) ใช้สัญลักษณ์  $\Sigma$  เป็นค่าแสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัตถุขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่น  $\rho$   $g/cm^3$  จะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ดังสมการที่ (2.4)

$$\mu_m = \frac{\Sigma}{\rho} \quad (2.4)$$

$\mu_m$  เป็นค่าแสดงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัสดุขนาด 1 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อหน่วยความหนาแน่น ซึ่งทำให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างวัสดุที่ต่างสถานะกัน เช่น แกสมีค่า  $\mu_m$  ต่ำกว่าของแข็งมาก จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีเอกซ์ มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกัน ขณะที่นิวตรอนมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลไม่สัมพันธ์กับเลขอะตอมของธาตุ และมีค่าแตกต่างกันมากในบางธาตุที่เลขอะตอมใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์<sup>(8)</sup>



## 2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron Radiography)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารเกิดขึ้นที่นิวเคลียสของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation) ต่อนิวตรอนขึ้นกับภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวไคลด์ของแต่ละธาตุ ซึ่งไม่สัมพันธ์กับมวลอะตอม ส่วนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเปลี่ยนแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมากับสสารเกิดขึ้นที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีจึงขึ้นกับมวลอะตอมของธาตุ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงให้รายละเอียดของภาพแตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา โดย

- นิวตรอนทำปฏิกิริยาและถูกดูดกลืนความเข้มได้ดีด้วยวัสดุเบา เช่น น้ำ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบโบรอน ลิเทียม และในธาตุหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม แกโดลิเนียม ซามาเรียม ยูโรเปียม

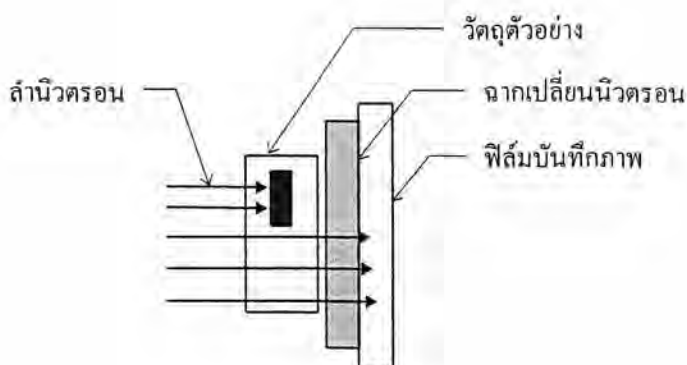
- นิวตรอนสามารถทะลุผ่านวัสดุหนักได้ดี เช่น เหล็ก ตะกั่ว ทังสเตน
- นิวตรอนมีอันตรกิริยากับไอโซโทปของธาตุเดียวกันต่างกันด้วย ทำให้การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสามารถแยกแยะไอโซโทปของธาตุได้

ด้วยข้อจำกัดบางประการของการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา เช่น ในกรณีที่ธาตุเบาอยู่บนกับหรือถูกห่อหุ้มด้วยธาตุหนัก จะไม่สามารถเห็นภาพในส่วนที่เป็นธาตุเบาได้ หรือได้ไม่ดี การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสามารถช่วยให้ภาพถ่ายรังสีในส่วนที่เป็นธาตุเบา สมบูรณ์ชัดเจนขึ้นมาก แม้จะอยู่ปะปนหรือถูกห่อหุ้มหรือบดบังด้วยธาตุหนัก

### 2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive Testing, NDT) โดยการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiography) วิธีหนึ่ง กระบวนการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน มีลักษณะเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา ดังรูปที่ 2.5

เมื่อลำนิวตรอนส่องผ่านวัตถุตัวอย่าง จะมีความเข้มเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากอันตรกิริยาการดูดกลืน (Absorption) และการกระเจิง (Scattering) ระหว่างนิวตรอนกับวัตถุ ความเข้มของนิวตรอนที่ลดลงขึ้นกับชนิดของวัสดุ และความหนาของวัสดุภายในวัตถุตัวอย่าง ภาพถ่ายที่ได้จึงแสดงโครงสร้างภายใน ตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่างออกมา



รูปที่ 2.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนส่วนใหญ่บันทึกภาพด้วยฟิล์ม ซึ่งอาจเป็นฟิล์มถ่ายรูป ฟิล์มรังสีเอกซ์ หรือฟิล์มบันทึกรอยอนุภาค (Particle track registration film) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต่างกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือแสง เนื่องจากนิวตรอนเกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้น้อยมาก การบันทึกภาพจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีภาคตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนได้สูง ได้แก่ ฉากรเปลี่ยนนิวตรอน ทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยรังสี อนุภาค หรือแสง ที่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง

### 2.2.2 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

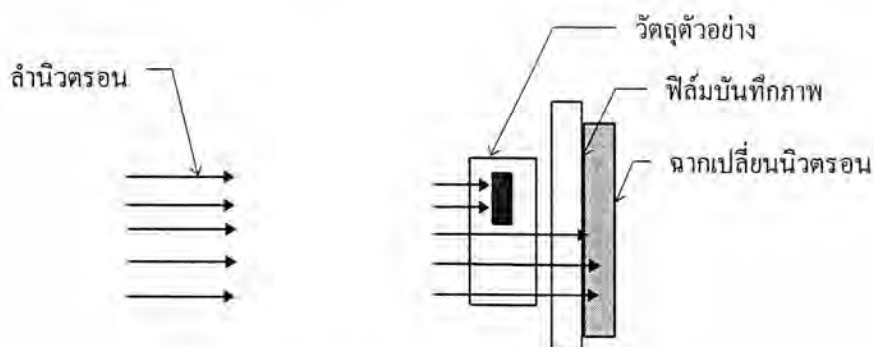
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแบ่งตามกระบวนการในการบันทึกภาพได้หลายวิธี แต่ละวิธีใช้ฉากรเปลี่ยนนิวตรอนและการบันทึกภาพที่แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีการในการถ่ายภาพขึ้นอยู่กับพลั๊กซ์ของนิวตรอน พลังงานของนิวตรอน วัตถุตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพ ความแรงของรังสีแกมมาบริเวณที่ทำการถ่ายภาพ ความเร็วที่ต้องการทราบผล และคุณภาพของภาพถ่าย

(1) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยบันทึกภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์หรือฟิล์มถ่ายรูป เป็นกระบวนการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่มีการใช้เป็นส่วนใหญในปัจจุบัน ฟิล์มที่ถ่ายแล้วนำไปล้างโดยกระบวนการล้างฟิล์มเช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ปริมาณนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่างจะแสดงเป็นความดำของฟิล์ม การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยบันทึกภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย กระบวนการถ่ายภาพ 2 วิธี ได้แก่



## (1.1) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง (Direct Method)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง เป็นการถ่ายภาพโดยประกบฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหลังฟิล์มบันทึกภาพ เพื่อไม่ให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบดบังลำนิวตรอน (Self absorption) แล้ววางไว้ด้านหลังวัตถุตัวอย่างที่ตำแหน่งของลำนิวตรอนขณะทำการถ่ายภาพ



รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง

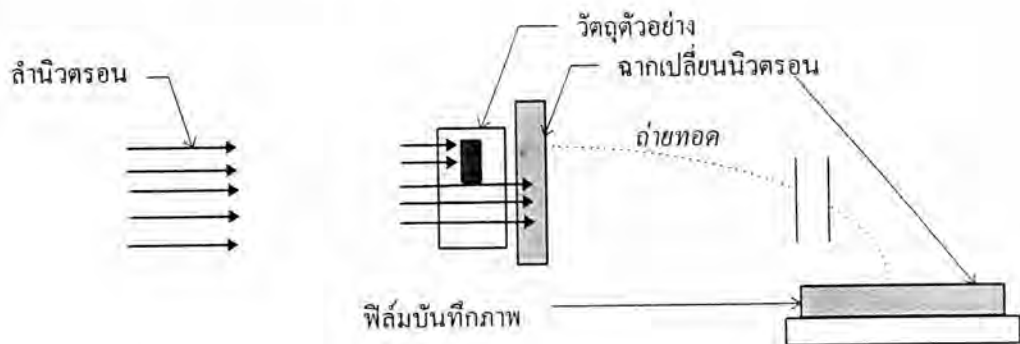
นิวตรอนที่ผ่านตัวอย่างและตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะถูกดูดกลืน แล้วฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาในทันที กระบวนการสร้างภาพแฝงบนฟิล์ม เกิดขึ้นขณะที่ทำการถ่ายภาพอยู่ในตำแหน่งของลำนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนจึงเป็นชนิดที่ปลดปล่อยรังสีออกมาแบบฉับพลัน (Prompt) เมื่อถูกกลืนนิวตรอน เช่น ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gd) ฉากโลหะแคดเมียม (Cd) และฉากเรืองแสง (Scintillator Screen)

กระบวนการเกิดภาพ เมื่อใช้ฉากโลหะแกโดลิเนียมเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน เกิดจากการที่แกโดลิเนียมดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอน (Conversion electron) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพแฝง (Latent image) ตามความเข้มของอิเล็กตรอน ฟิล์มที่ใช้บันทึกภาพได้แก่ฟิล์มรังสีเอกซ์ ส่วนกระบวนการเกิดภาพเมื่อใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเรืองแสง เกิดจากการดูดกลืนนิวตรอนของโบรอน-10 หรือลิเทียม-6 แล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาไปทำปฏิกิริยากับสังกะสีซัลไฟด์ ทำให้ปลดปล่อยแสงออกมาทำปฏิกิริยากับฟิล์ม การบันทึกภาพใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ หรือฟิล์มถ่ายรูป

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง สามารถทราบผลได้เร็ว แต่มีข้อจำกัดในกรณีตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพ หรือวัตถุตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพมีรังสีแกมมาสูง ความเข้มของรังสีจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้ความเปรียบต่างและหรือความคมชัดของภาพลดลง

## (1.2) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด (Transfer Method)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด เป็นการถ่ายภาพโดยวางเฉพะฉากเปลี่ยนนิวตรอน ไว้ด้านหลังวัตถุตัวอย่างขณะทำการถ่ายภาพ นิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่างจะทำปฏิกิริยา ทำให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีกัมมันตภาพรังสี โดยกัมมันตภาพแต่ละตำแหน่งบนฉากขึ้นกับความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง เมื่อนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนไปประกบกับฟิล์ม รังสีที่ปลดปล่อยออกมา จะทำปฏิกิริยาและสร้างภาพขึ้นบนฟิล์ม



รูปที่ 2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด

ขณะที่ทำการถ่ายภาพฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะมีกัมมันตภาพเพิ่มขึ้น ตามเวลาที่ได้รับนิวตรอน ในลักษณะของสมการเอกซ์โปเนนเชียล ดังสมการที่ (2.5)

$$A = \phi N \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.5)$$

เมื่อ	A	คือ กัมมันตภาพรังสีของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
	$\phi$	คือ ฟลักซ์ของนิวตรอนที่ตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน
	$\sigma$	คือ ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
	N	คือ จำนวนอะตอมของฉาก
	t	คือ เวลาในการถ่ายภาพ
	$\lambda$	คือ ค่าคงที่การสลายตัวของฉากเปลี่ยนนิวตรอน = $0.693/T$
		เมื่อ T คือครึ่งชีวิตของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน

กัมมันตภาพรังสีที่เหมาะสมในการทำให้เกิดภาพบนฟิล์มจึงขึ้นกับฟลักซ์ของนิวตรอน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนและเวลาในการถ่ายภาพ

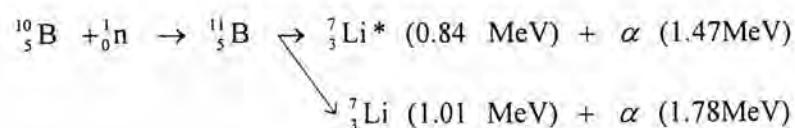
ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพได้แก่ ฉากโลหะคิสโปเซียม (Dy) ฉากโลหะอินเดียม (In) และฉากโลหะทอง (Au) เป็นต้น วัสดุที่ปลดปล่อยออกจากฉากโลหะแต่ละชนิดมีกัมมันตภาพจำกัด ตามครึ่งชีวิตของแต่ละไอโซโทป การบันทึกภาพจึงจำเป็นต้องใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิดความเร็วสูง

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพ ประกอบด้วย ขั้นตอนของการทำให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีกัมมันตภาพรังสี และการปลดปล่อยรังสี เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นบนฟิล์ม เวลาในการถ่ายภาพจึงมากกว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง แต่มีข้อดีที่สามารถถ่ายภาพได้ ในบริเวณที่มีรังสีแกมมาหรือวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสี เนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยากับรังสีแกมมา

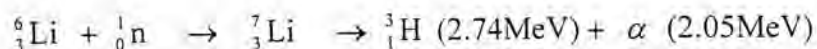
## (2) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรกเอตช์ (Track Etch Method)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรกเอตช์ มีกระบวนการถ่ายภาพ เช่นเดียวกับ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง โดยมีข้อแตกต่างกันที่ฉากเปลี่ยนนิวตรอนผลิตจากวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา เรียกว่า เกิดปฏิกิริยา  $(n, \alpha)$  การบันทึกภาพใช้ฟิล์มพลาสติก เช่น ฟิล์มไนโตรเซลลูโลส หรือฟิล์มโพลีคาร์บอเนต อนุภาคอัลฟาจะทำปฏิกิริยากับฟิล์มทำให้เกิดรอย (Track) ขนาดเล็กเป็นภาพแฝง ซึ่งสามารถทำให้มองเห็นภาพได้ เมื่อนำฟิล์มไปผ่านกระบวนการล้างกัดขยายรอย (Etching)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรกเอตช์ ประกอบด้วยวัสดุที่มีภาคตัดขวาง (Cross section) ต่อการเกิดปฏิกิริยา  $(n, \alpha)$  สูง ได้แก่ โบรอน-10 หรือลิเทียม-6 โดยโบรอนในธรรมชาติประกอบด้วยไอโซโทปของโบรอน-10 อยู่ 19.8 % ส่วนอีก 80.2 % เป็นโบรอน-11 โบรอน-10 มีภาคตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน ( $\sigma_{th}$ ) 3840 บาร์น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดไอโซโทปของลิเทียม-7 และอนุภาคอัลฟา โดย 93% ของปฏิกิริยามีนิวเคลียสของลิเทียม-7 อยู่ที่สภาวะเร้า (Excited state) แล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 0.48 MeV โดยมีพลังงานรวมของปฏิกิริยา (Q-value) 2.31 MeV ส่วนผลของปฏิกิริยาอีก 7% ทำให้นิวเคลียสของลิเทียม-7 ไปที่สภาวะพื้น (Ground state) โดยมีพลังงานรวมของปฏิกิริยา 2.79 MeV



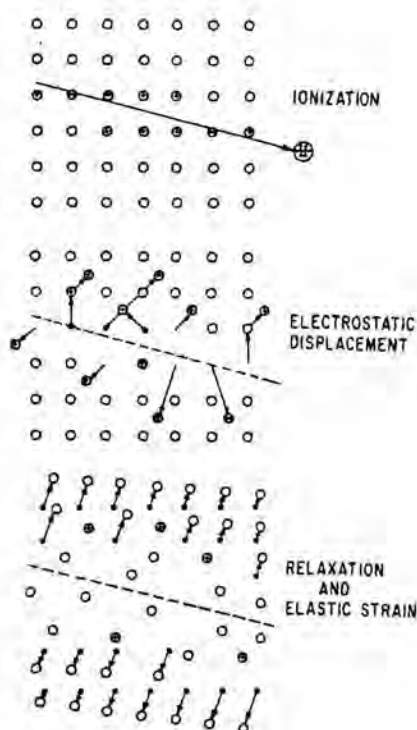
ลิเทียม-6 เป็นไอโซโทปที่มี 7.5 % ของลิเทียมในธรรมชาติ มีภาคตัดขวางต่อการดูดกลืนเทอร์มันิวตรอน 940 บาร์น เมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้ว จะปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาพลังงาน 2.05 MeV กับตรีเทียมพลังงาน 2.74 MeV



การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรกเอตซ์ ประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างภาพบนฟิล์ม (Image formation) 2 ขั้นตอน ได้แก่ การถ่ายภาพเพื่อให้เกิดรอยบนฟิล์ม (Track formation) และการล้างกัดขยายรอย (Track etching) เพื่อให้ภาพบนฟิล์มปรากฏขึ้นมา

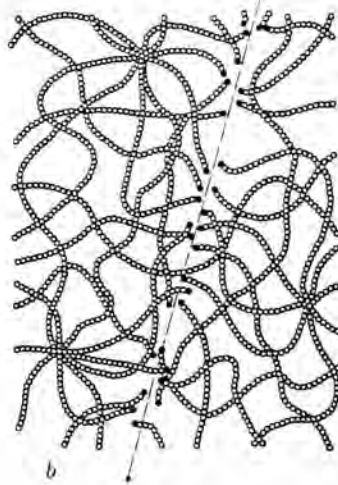
### (2.1) การเกิดรอยบนฟิล์ม

ขณะที่ทำการถ่ายภาพ นิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟาไปทำให้เกิดการแตกตัว (Ionization) ในเนื้อฟิล์ม เป็นรอยแฝง (Latent track) ขนาด 2-16 นาโนเมตร (nm) ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.8 การแตกตัวของฟิล์มจากอนุภาคอัลฟา<sup>(19)</sup>

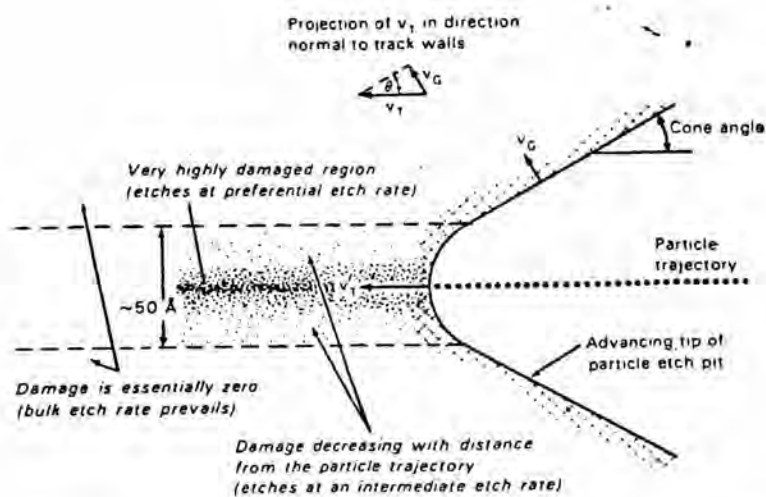
ฟิล์มพลาสติกที่ใช้บันทึกภาพเป็นสาร โพลีเมอร์ซึ่งมีโมเลกุลเป็นสายยาว (Long polymer chain) เมื่อแตกตัวจะทำให้สายโมเลกุลขาดออกจากกันเป็นสายที่สั้นลง (Shorter fragments) น้ำหนักโมเลกุลจึงต่ำลง ส่วนที่เกิดการแตกตัวเป็นรอยแฉ่งจึงละลายในตัวทำละลายได้ดีกว่าบริเวณอื่นของแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 2.9 การเกิดรอยบนฟิล์มพลาสติก <sup>(19)</sup>

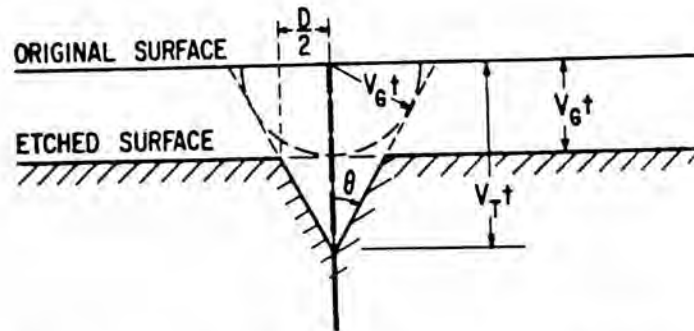
## (2.2) การล้างกัดขยายรอย

ฟิล์มที่ถ่ายภาพแล้ว เมื่อดำงัดรอยในสารละลายของด่าง เช่น สารละลายของโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การละลายหลุดออกของเนื้อฟิล์ม จะทำให้อรอยแฉ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น จนทำให้ภาพที่ถ่ายไว้ปรากฏขึ้นมา

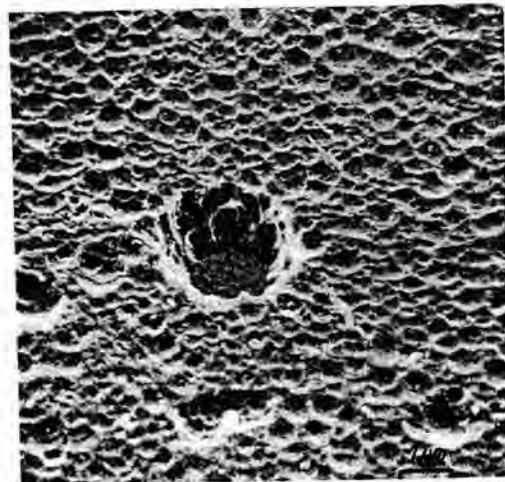


รูปที่ 2.10 การละลายของเนื้อฟิล์มในกระบวนการล้างกัดรอย <sup>(13)</sup>

ขณะที่ทำการล้างกัดรอย ทุกส่วนของฟิล์มมีการละลายออกมาตลอดเวลา โดยรอยแฝงของอนุภาคมีอัตราการละลายเร็วกว่าบริเวณอื่น จากรูปที่ 2.10 ให้อัตราการละลายของฟิล์มในทิศทางของรอยอนุภาคเป็น  $V_T$  (Track etch rate) และอัตราการละลายของฟิล์มในบริเวณอื่นเป็น  $V_G$  (General surface etch rate) รูปร่างของรอยที่เกิดขึ้นภายหลังการล้างกัดรอยขึ้นกับอัตราส่วนของ  $V_T/V_G$  อัตราการละลายตามทิศทางของรอยที่มีค่าสูง ทำให้  $V_T/V_G$  มีค่ามาก รอยของอนุภาคจะเป็นรูปกรวยแคบและยาว  $V_T/V_G$  จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1 เมื่ออัตราการละลายทุกทิศทางมีค่าเท่ากัน แสดงว่าไม่เกิดรอยของอนุภาค ตามรูปที่ 2.11 ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกตามรอยของอนุภาคมีค่า  $V_T t$  ระยะทางที่ผิวฟิล์มละลายออกบริเวณผิวทั่วไปมีค่า  $V_G t$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มแต่ละชนิด



รูปที่ 2.11 ผิวของฟิล์มที่ละลายออกในกระบวนการล้างกัดรอย<sup>(19)</sup>



รูปที่ 2.12 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวฟิล์มและรอยอนุภาคที่ผ่านการล้างกัดรอย<sup>(20)</sup>



### ข้อดีและข้อจำกัดของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรกเอตซ์

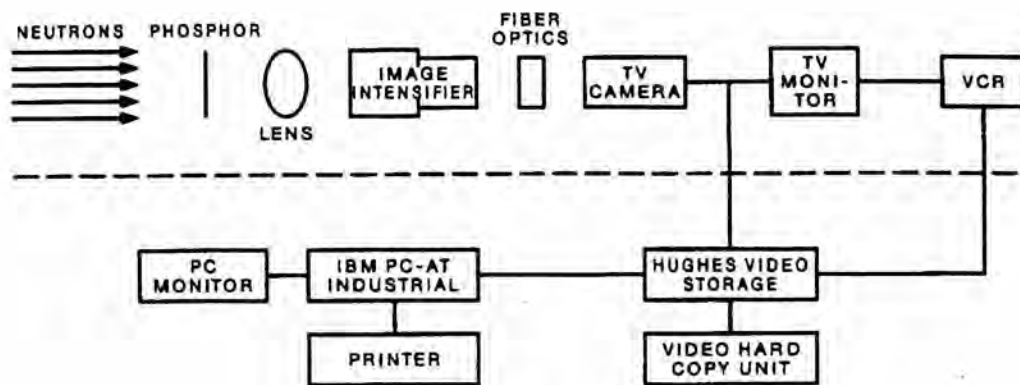
ฟิล์มที่ใช้ในการบันทึกภาพ จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรกเอตซ์ เป็นฟิล์มพลาสติกใส เมื่อผ่านการถ่ายภาพและการล้างก็ตรอยแล้ว ส่วนที่ได้รับนิวตรอนจะเป็นรอยขุ่นฝ้า ภาพถ่ายมีความเปรียบต่าง (Contrast) ค่อนข้างต่ำ จึงได้มีผู้พัฒนาวิธีดูภาพเพื่อให้ภาพที่ได้มีความเปรียบต่างสูง เช่น M. Fatini<sup>7</sup> ใช้วิธีดูภาพบนฟิล์มผ่านแผ่นกรองแสงโพลาไรซ์ N. Wada<sup>22</sup> ใช้เครื่องขยายภาพในการเพิ่มความเปรียบต่าง ทั้งนี้ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรกเอตซ์ มีข้อดีในการถ่ายภาพบางประการดังนี้

- เป็นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด และผู้ถ่ายภาพไม่ต้องได้รับรังสีจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนขณะปฏิบัติงาน
- ฟิล์มพลาสติกไม่ไวต่อแสง การบรรจุแผ่นฟิล์มกับฉากเปลี่ยนนิวตรอนลงในตลับเมื่อถ่ายภาพและการล้างฟิล์ม จึงทำได้สะดวก เนื่องจากไม่ต้องปฏิบัติงานในห้องมืด
- แผ่นฟิล์มและฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีความยืดหยุ่น สามารถวางให้แนบติดกับวัตถุตัวอย่างได้โดยตรง
- ความเข้มของฟิล์มแปรผันโดยตรงกับเวลาในการถ่ายภาพ ขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอดมีจุดอิมพัชของกัมมันตภาพของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
- ฟิล์มบันทึกภาพไม่ไวต่อรังสีแกมมา ทำให้สามารถถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสี หรือถ่ายภาพในบริเวณที่มีรังสีแกมมาสูงได้
- การอ่านฟิล์มและบันทึกภาพทำได้หลายระดับ เนื่องจากสามารถล้างฟิล์มเดิมซ้ำได้หลายครั้ง โดยเพิ่มเวลาในการล้างก็ตรอยจากน้อยไปมาก

### (3) การถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน (Dynamic Imaging Methods)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยทั่วไป ใช้เวลาในการถ่ายภาพเกินกว่า 1 วินาที การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีการเคลื่อนไหว จึงต้องลดเวลาในการถ่ายภาพลง โดยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการบันทึกภาพ

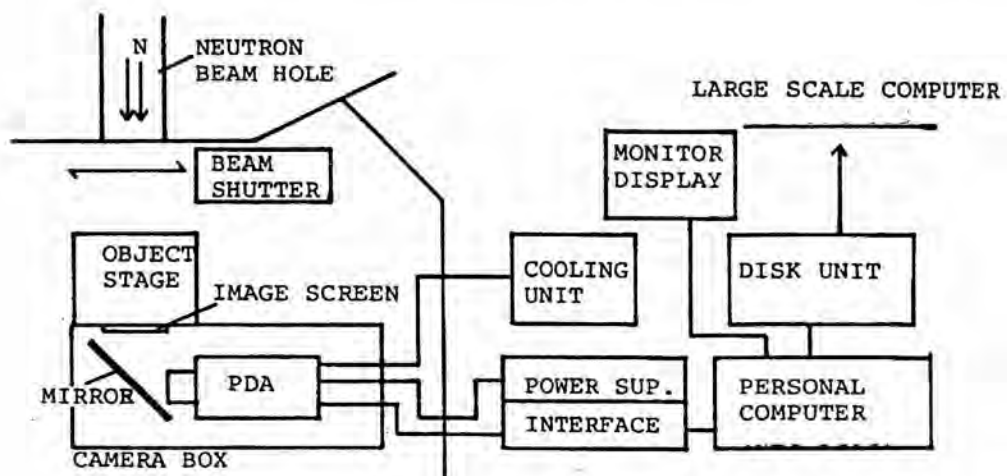
การถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอนใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแบบเรืองแสงที่มีประสิทธิภาพสูง เชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพิ่มความเข้มของภาพ (Image intensifier) เพื่อให้สามารถถ่ายและบันทึกภาพด้วยกล้องโทรทัศน์หรือกล้องวิดีโอได้



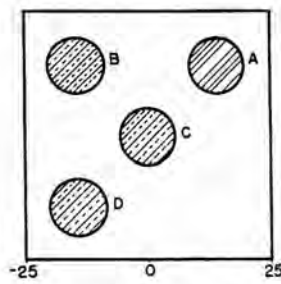
รูปที่ 2.13 แผนผังอุปกรณ์ถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน <sup>(16)</sup>

(4) การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคโทโมกราฟี (Tomography)

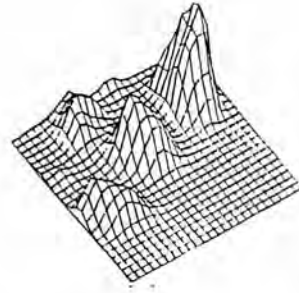
เทคนิคโทโมกราฟีที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน พัฒนามาจากการถ่ายภาพโทโมกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ กระบวนการถ่ายภาพ ประกอบด้วย การถ่ายภาพหลายๆ ภาพอย่างต่อเนื่องรอบวัตถุตัวอย่าง จากนั้นนำข้อมูลของแต่ละภาพมาประมวลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างภาพตัดขวางของวัตถุตัวอย่าง โดยจะได้ภาพโครงสร้างภายใน ตามแนวระนาบที่ต้องการ



รูปที่ 2.14 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคโทโมกราฟี <sup>(24)</sup>



A : acrylic B,C,D : copper



รูปที่ 2.15 วัตถุตัวอย่างที่ใช้ถ่ายและภาพที่สร้างขึ้นโดยเทคนิคโทโมกราฟี<sup>(24)</sup>

## 2.3 फिल्मบันทึกภาพ

### 2.3.1 ชนิดของฟิล์ม

การเลือกใช้ฟิล์มเพื่อบันทึกภาพในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ขึ้นอยู่กับชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และเวลาที่ใช้หรือความเร็วที่ต้องการในการถ่ายภาพ ฟิล์มบันทึกภาพเพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน แบ่งออกตามกระบวนการในการเกิดภาพออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มบันทึกภาพโดยกระบวนการทางเคมี และฟิล์มบันทึกภาพโดยกระบวนการทางกายภาพ

(1) ฟิล์มบันทึกภาพโดยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ ฟิล์มถ่ายรูป หรือฟิล์มรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นแผ่นโพลีเอสเตอร์ เคลือบผิวด้วยอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งเป็นเจลาติน (Gelatin) ที่มีสารประกอบของเกลือเงิน เช่น เงินโบรไมด์ ( $\text{AgBr}$ ) หรือเงินคลอไรด์ ( $\text{AgCl}$ ) ที่ไวแสง โดยทั่วไปจะเคลือบไว้ทั้งสองด้าน หนาประมาณ 0.0005 นิ้ว การที่เคลือบผิวไว้ทั้งสองด้านเพื่อให้มีสารประกอบเงินที่ไวแสงมากขึ้น ทำให้ถ่ายภาพได้เร็วขึ้น ส่วนการเคลือบไว้เป็นฟิล์มที่บางมาก เพื่อลดเวลาในการล้างฟิล์ม ทั้งในกระบวนการสร้างภาพ การคงสภาพ และการทำให้ฟิล์มแห้ง แต่มีฟิล์มบางชนิดที่เคลือบสารไวแสงไว้ด้านเดียว สำหรับใช้ในกรณีที่ต้องการภาพที่มีรายละเอียดสูง

เมื่อถ่ายภาพจะมีภาพแฝงเกิดขึ้นบนผิวฟิล์ม จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง รังสีหรือแสง หรืออิเล็กตรอนกับเกลือเงิน กลายเป็นโลหะเงิน เมื่อนำไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม ส่วนของสารประกอบเกลือเงินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะหลุดออก ทำให้เกิดเป็นภาพตามปริมาณโลหะเงินที่ติดอยู่บนฟิล์ม

(2) फिल्मบันทึกภาพโดยกระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ फिल्मพลาสติกสำหรับบันทึกรอยอนุภาค เช่น फिल्मไนโตรเซลลูโลส เมื่อทำการถ่ายภาพ หากเปลี่ยนนิวตรอนจะดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา ภาพแฝงบนฟิล์มเกิดจากอนุภาคอัลฟาผ่านเข้าไปในผิวฟิล์ม ทำให้เป็นรอยขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นของรอยตามปริมาณอนุภาคอัลฟา เมื่อนำไปผ่านกระบวนการล้างก็ตรอย ภาพจะปรากฏขึ้นเนื่องจากรอยของอนุภาคขยายขนาดขึ้น फिल्मพลาสติกที่ใช้บันทึกภาพ ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกบางชนิด<sup>(33)</sup>

วัสดุ	สารประกอบ	ชื่อทางการค้า	ความหนาแน่น	ดัชนีหักเห
cellulose nitrate	$C_5H_8O_9N_2$	CN-85	1.52	1.51
		CA-8015	1.52	
		LR-115	1.42-1.45	1.505
		Daicel		
bisphenol-A polycarbonate	$C_{12}H_{14}O_3$	Makrofol Lexan	1.29	
allyl diglycol-carbonate	$C_{12}H_{18}O_7$	CR-39 MA-ND TASTRAK	1.32	1.45

การใช้ฟิล์มพลาสติกเพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ส่วนใหญ่บันทึกภาพด้วยฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของเซลลูโลสไนเตรต ได้จากปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) และกรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งในระยะแรกใช้ผลิตวัตถุระเบิดทางการทหาร ต่อมาใช้ผลิตพลาสติกสังเคราะห์ ได้แก่ เซลลูลอยด์ ปัจจุบันการใช้งานเน้นด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตแลคเกอร์ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ การผลิตหมึกพิมพ์ กาว สี และพลาสติกไนโตรเซลลูโลสชนิดที่ใช้ผลิตวัตถุระเบิดมีความเข้มข้นของไนโตรเจนที่สูงกว่าไนโตรเซลลูโลสที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามไนโตรเซลลูโลสที่ใช้ในอุตสาหกรรมยังคงเป็นสารที่ติดไฟง่าย การขนส่งและการใช้งานจึงต้องปฏิบัติด้วยความระมัดระวัง

### 2.3.2 ความเข้มของฟิล์ม

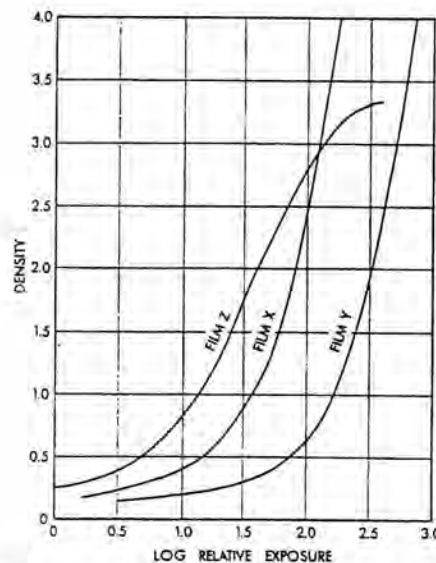
ฟิล์มที่ผ่านการถ่ายภาพและกระบวนการล้างแล้ว สามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพได้ เนื่องจากมีความแตกต่างของความเข้มหรือความดำของฟิล์มแต่ละตำแหน่ง ค่าความเข้ม

ของฟิล์มกำหนดเป็นปริมาณได้โดยใช้เครื่องอ่านความดำของฟิล์ม (Densitometer) ซึ่งจะบอกค่าความเข้มของฟิล์มตามปริมาณแสงที่ผ่านฟิล์มไปได้ ดังสมการที่ 2.6

$$D = \log \frac{I_0}{I_t} \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $D$  คือ ความเข้มของฟิล์ม  
 $I_0$  คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม  
 $I_t$  คือ ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฟิล์ม

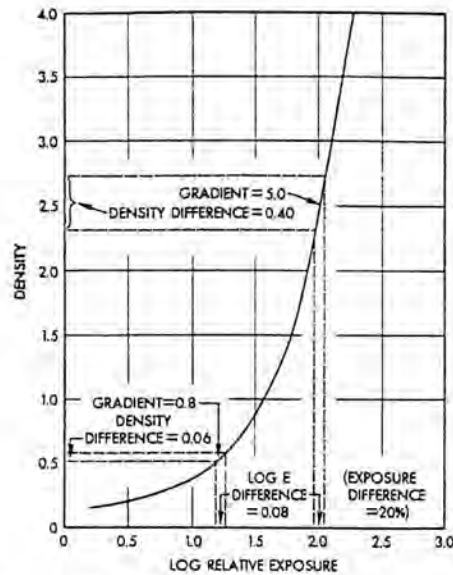
ความเข้มหรือความดำของฟิล์ม มีค่าแปรผันตามปริมาณรังสีที่ได้รับจากการถ่ายภาพ ความเข้มแสดงถึงความไวของฟิล์มในการถ่ายภาพ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของฟิล์ม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของฟิล์มกับปริมาณรังสีที่ใช้ถ่ายภาพ เรียกว่า กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม (Film characteristic curve)



รูปที่ 2.16 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม <sup>(30)</sup>

จากกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของเส้นกราฟ ถ้าถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งหมายถึงฟิล์มจะได้รับปริมาณรังสีแตกต่างกันด้วย ส่วนของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มที่มีความชันสูงจะให้ภาพที่มีความแตกต่างของความเข้มฟิล์มมากกว่า ซึ่งทำให้สังเกตุรายละเอียดของภาพถ่ายได้มากกว่าด้วย

ความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มแต่ละช่วง เรียกว่า เกรเดียนท์ (Gradient) ของความเข้มฟิล์ม มีค่าตั้งแต่ต่ำกว่า 0.1 เมื่อฟิล์มได้รับรังสีปริมาณต่ำๆ และเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า 1.0 เมื่อฟิล์มได้รับรังสีปริมาณสูงขึ้น



รูปที่ 2.17 ความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม<sup>(30)</sup>

จากกราฟในรูปที่ 2.17 เมื่อถ่ายภาพวัตถุที่มีความหนาแตกต่างกัน ทำให้รังสีที่ผ่านวัตถุไปมีความเข้มแตกต่างกัน 20% ถ้าถ่ายภาพบริเวณที่กราฟมีเกรเดียนท์ 0.8 จะได้ภาพที่มีความเข้มของฟิล์มแตกต่างกัน 0.06 แต่เมื่อถ่ายภาพบริเวณที่กราฟมีเกรเดียนท์ 5.0 จะได้ภาพที่มีความเข้มของฟิล์มแตกต่างกัน 0.40

โดยทั่วไป ถ้าเกรเดียนท์ของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มมีค่ามากกว่า 1.0 ความเปรียบต่างของภาพถ่ายจะมีค่าสูงขึ้นกว่าความเปรียบต่างของวัตถุตัวอย่าง (Object contrast) แสดงว่าฟิล์มทำหน้าที่เป็นตัวขยายความเปรียบต่าง (Contrast amplifier) แต่ถ้าเกรเดียนท์น้อยกว่า 1.0 ภาพถ่ายจะมีความเปรียบต่างน้อยกว่าความเปรียบต่างเนื่องจากวัตถุตัวอย่าง

จากกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม 3 ชนิด ในรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าฟิล์ม X และฟิล์ม Y มีเกรเดียนท์สูงขึ้นตามปริมาณรังสีที่ใช้ถ่ายภาพ ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากภาพมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อใช้เวลาถ่ายภาพมากขึ้น ส่วนฟิล์ม Z มีค่าเกรเดียนท์คงที่ในช่วงที่ฟิล์มมีความเข้ม 1.5 - 2.5 จากนั้นเกรเดียนท์จะมีค่าลดลง แสดงว่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการถ่ายภาพของฟิล์ม Z มีช่วงกว้างที่จำกัด

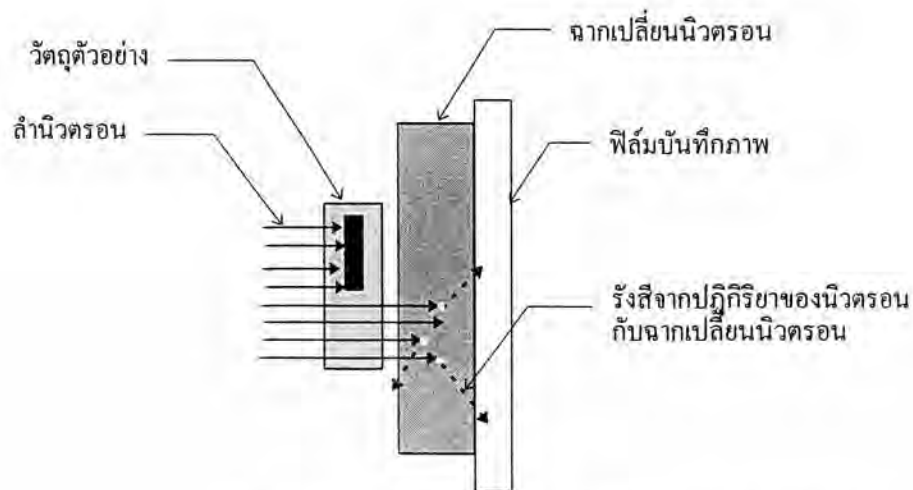


เพื่อความสะดวกในการกำหนดปริมาณรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพ ฟิล์มแต่ละชนิดที่ใช้ในการบันทึกภาพ จึงกำหนดค่าเกรเดียนท์เฉลี่ย (Average gradient) ซึ่งได้แก่ ความชันของเส้นตรงที่ต่อจุด 2 จุด บนช่วงของกราฟที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ ค่าเกรเดียนท์เฉลี่ยจึงแสดงให้เห็นความเปรียบต่างเฉลี่ยของฟิล์มบนช่วงของกราฟที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วย

#### 2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter Screen)

ฟิล์มสำหรับบันทึกภาพแต่ละชนิดที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ไม่ไวต่อนิวตรอน จึงไม่สามารถใช้บันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านตัวอย่างมาได้โดยตรง

การทำให้เกิดภาพบนฟิล์มในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของนิวตรอนให้เป็นรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีอัลฟา หรือรังสีเบต้า ตามชนิดของฉาก รังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนจึงเป็นรังสีทุติยภูมิ (Secondary radiation) ซึ่งเป็นรังสีที่สามารถทำปฏิกิริยาให้เกิดภาพบนฟิล์มได้



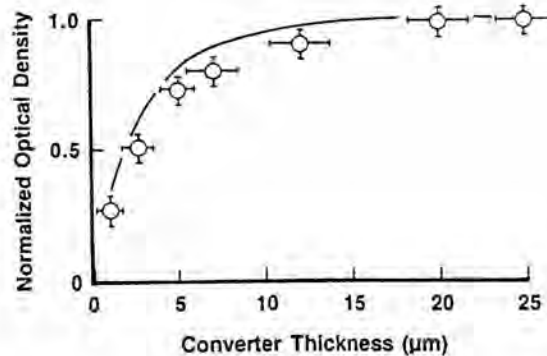
รูปที่ 2.18 กระบวนการถ่ายภาพโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน ประกอบด้วยธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางในการทำปฏิกิริยากับนิวตรอนสูง และปลดปล่อยรังสีที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี ตารางที่ 2.5 แสดงธาตุที่ใช้เป็นวัสดุในการทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน และรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากการทำปฏิกิริยากับนิวตรอน

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน<sup>(18)</sup>

วัสดุ	ปฏิกิริยา	ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน(barn)	ครึ่งชีวิต	รังสีที่ปลดปล่อย	พลังงานของรังสี (MeV)
ลิเทียม	${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	941	prompt	$\alpha$ T	2.05 2.74
โบรอน	${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$	3838	prompt	$\alpha$ Li	1.47 0.84
โรเดียม	${}^{103}\text{Rh}(n,\gamma){}^{104}\text{Rh}$ ${}^{103}\text{Rh}(n,n){}^{103\text{m}}\text{Rh}$ ${}^{103}\text{Rh}(n,\gamma){}^{104\text{m}}\text{Rh}$	1454 11	43 S 57 m 4.4 m	$\beta$ X-ray $\beta$	2.41 0.02 0.5
เงิน	${}^{107}\text{Ag}(n,\gamma){}^{108}\text{Ag}$ ${}^{109}\text{Ag}(n,\gamma){}^{110}\text{Ag}$ ${}^{109}\text{Ag}(n,g){}^{110\text{m}}\text{Ag}$	38 91 3	2.4 m 24.5 s 254 d	$\beta$ $\beta$ $\beta$	1.64,0.43 2.87 1.5
แคดเมียม	${}^{113}\text{Cd}(n,\gamma){}^{114}\text{Cd}$	20600	prompt	$\gamma$	9
อินเดียม	${}^{115}\text{In}(n,\gamma){}^{116}\text{In}$ ${}^{115}\text{In}(n,\gamma){}^{116\text{m}}\text{In}$	45 154	14 s 54 m	$\beta$ $\beta$	3.3, 0.44 1.0, 0.42
ซามาเรียม	${}^{149}\text{Sm}(n,\gamma){}^{150}\text{Sm}$ ${}^{152}\text{Sm}(n,\gamma){}^{153}\text{Sm}$	40140 206	prompt 46.7 h	$\gamma$ $\beta$	 0.8, 0.1
แกโดลิเนียม	${}^{155}\text{Gd}(n,\gamma){}^{156}\text{Gd}$ ${}^{157}\text{Gd}(n,\gamma){}^{158}\text{Gd}$	60900 254000	prompt prompt	electron electron	0.14 0.13
ดิสโพรเซียม	${}^{164}\text{Dy}(n,\gamma){}^{165}\text{Dy}$ ${}^{164}\text{Dy}(n,\gamma){}^{165\text{m}}\text{Dy}$	800 2000	2.3 h 1.26 m	$\beta$ $\beta$	1.29, 0.095 1.04, 1.108
ทอง	${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$	98.65	2.7 d	$\beta$	0.962,0.412

ประสิทธิภาพของฉากเปลี่ยนนิวตรอนในการทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีออกมา นอกจากขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้แล้ว ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เพิ่มขึ้น จะสามารถดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสีได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ฟิล์มมีความดำมากขึ้นด้วย รูปที่ 2.19 แสดงความเข้มของฟิล์มที่มีค่าสูงขึ้นไปตามความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยมีค่าอิมตัวของฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดโลหะแกโดลิเนียมที่ความหนาประมาณ 20 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.19 ผลของความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโคลิเนียมต่อความดำของฟิล์ม <sup>(22)</sup>

การใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีความหนามากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับนิวตรอนสูงขึ้น จึงสามารถลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ แต่ขณะเดียวกัน ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน ก็ทำให้ความคมชัดของภาพลดลงด้วย การเลือกความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนจึงขึ้นกับ ฟลักซ์ของนิวตรอน ความเร็วที่ต้องการในการถ่ายภาพ ความคมชัดของภาพ รวมทั้งความสะดวกในการดูแลรักษาและการใช้งานฉากเปลี่ยนนิวตรอน

## 2.5 คุณภาพของภาพถ่าย

จากกระบวนการทั้งหมดของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้ผลขั้นสุดท้ายเป็นภาพถ่ายซึ่งแสดงรูปร่างและลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการศึกษาวิเคราะห์ เทคนิคและอุปกรณ์การถ่ายภาพทุกขั้นตอนมีผลต่อภาพถ่ายที่ได้ ภาพถ่ายที่มีคุณภาพจะทำให้การศึกษาวិเคราะห์วัตถุตัวอย่าง มีความสะดวกและถูกต้องแม่นยำ

ภาพถ่ายที่มีคุณภาพ ได้แก่ ภาพถ่ายที่มีความเข้มของพื้นภาพโดยทั่วไปพอเหมาะ ส่วนของชิ้นงานมีความเปรียบต่างที่เหมาะสม ระบบการถ่ายภาพมีความไวของการถ่ายภาพ (Sensitivity) ซึ่งทำให้สามารถสังเกตรายละเอียดของภาพ (Definition) ได้สะดวก

ความไวของการถ่ายภาพ (Radiographic sensitivity) แสดงคุณภาพของภาพถ่าย โดยแสดงรายละเอียดขนาดเล็กที่สุดที่มองเห็นได้ (Detail visibility) ซึ่งขึ้นกับ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเปรียบต่างของการถ่ายภาพ (Radiographic contrast) และความคมชัดของภาพถ่าย

2.5.1 ความเปรียบต่างของการถ่ายภาพ คือ ผลต่างของความเข้มฟิล์มของ 2 ตำแหน่งบนฟิล์มบันทึกภาพเดียวกัน ซึ่งมีผลมาจากความเปรียบต่างของความเข้มรังสีที่ตกกระทบฟิล์มซึ่ง

เป็นผลมาจากความเปรียบต่างของชิ้นงาน (Subject contrast) และความเปรียบต่างของฟิล์ม (Film contrast)

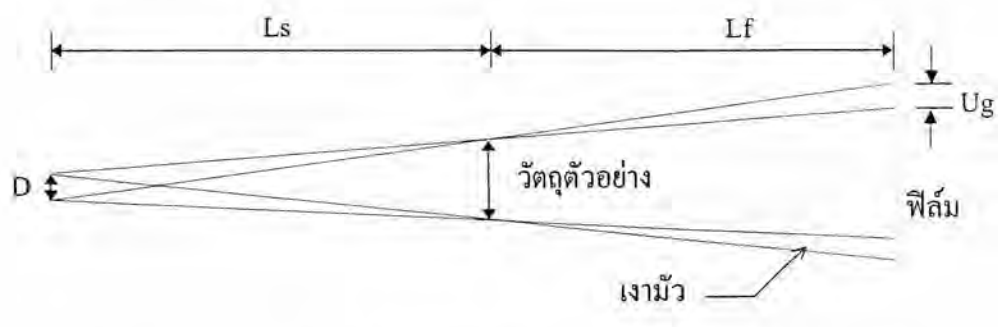
ความเปรียบต่างของความเข้มรังสีที่ตกกระทบฟิล์ม คือปริมาณรังสีที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง ซึ่งมีค่าขึ้นกับชนิดของวัสดุภายในวัตถุตัวอย่าง พลังงานของรังสี และความเข้มของรังสีที่กระเจิง (Scatter radiation)

ความเปรียบต่างของฟิล์ม มีค่าเป็นไปตามความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม ซึ่งขึ้นกับชนิดของฟิล์ม ชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และเวลาในการล้างฟิล์ม

การสังเกตรายละเอียดของภาพถ่าย จะทำได้เมื่อมีความเปรียบต่างของภาพวัตถุกับพื้นฟิล์มรอบๆ ความเปรียบต่างที่สูงขึ้น หรือฟิล์มมีความเข้มแตกต่างกันมากขึ้น ทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพได้เด่นชัดขึ้น แต่ถ้าความเปรียบต่างสูงเกินไป จะทำให้สังเกตรายละเอียดของวัตถุตัวอย่างที่หนาและบางได้ลดลง โดยส่วนของวัตถุที่หนาจะมีความเข้มของฟิล์มน้อยเกินไป ขณะที่ส่วนที่บางจะมีความเข้มของฟิล์มสูงเกินไป

2.5.2 ความคมชัดของภาพถ่าย ได้แก่ ความคมชัดของขอบของวัตถุที่ถ่ายและรอยต่อของภาพของส่วนต่างๆที่ปรากฏบนฟิล์ม ความคมชัดของภาพถ่ายมีค่าขึ้นกับชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน ชนิดของรังสี พลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน และลักษณะการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ (Geometric setup)

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ความไม่คมชัดของภาพถ่าย (Unsharpness) เนื่องจากอุปกรณ์การถ่ายภาพ ประกอบด้วย สาเหตุของความไม่คมชัดของภาพ 2 ส่วน ได้แก่ ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ (Geometric unsharpness,  $U_g$ ) และความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์บันทึกภาพ ได้แก่ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนและฟิล์ม (Inherent foil and film unsharpness,  $U_i$ )



รูปที่ 2.20 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ

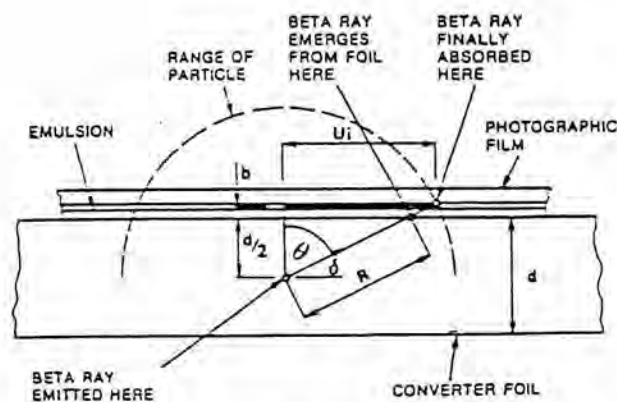
ความไม่คมชัดเนื่องจากการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพมีความสัมพันธ์กับการออกแบบอุปกรณ์ควบคุมลำนิวตรอน (Collimator) จากรูปที่ 2.20 ความกว้างของเงามัว  $U_g$  คำนวณได้จากกฎสามเหลี่ยมคล้าย ดังสมการที่ (2.7)

$$\frac{U_g}{D} = \frac{L_f}{L_s} \quad (2.7)$$

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

- เมื่อ  $U_g$  คือ ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ  
 $D$  คือ ขนาดของต้นกำเนิดนิวตรอน  
 $L_s$  คือ ระยะระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับวัตถุตัวอย่าง  
 $L_f$  คือ ระยะระหว่างวัตถุตัวอย่างกับฟิล์มบันทึกภาพ

ในกระบวนการบันทึกภาพ เมื่อนิวตรอนผ่านตัวอย่างไปยังฉากเปลี่ยนนิวตรอน อาจจะมีนิวตรอนบางส่วนที่มีทิศทางเบี่ยงเบนไปจากเดิม รังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนอาจจะมีทิศทางเฉียงออกจากจุดที่นิวตรอนเกิดปฏิกิริยากับฉากเปลี่ยนนิวตรอน ซึ่งขึ้นกับพิสัยของรังสีหรืออนุภาค ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และความหนาของฟิล์มบันทึกภาพ รูปที่ 2.21 และสมการที่ (2.10) แสดงความไม่คมชัดของภาพ (Inherent foil and film unsharpness,  $U_i$ ) ที่มีค่าแปรผันตามความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนและความหนาของชั้นอิมัลชันบนฟิล์มบันทึกภาพ



รูปที่ 2.21 ความไม่คมชัดของภาพถ่ายเนื่องจากความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และความหนาของอิมัลชันบนฟิล์มบันทึกภาพ <sup>(18)</sup>

จากรูปที่ 2.21

$$\tan\theta = \frac{U_i}{b + \frac{d}{2}} \quad (2.9)$$

หรือ 
$$U_i = \left(b + \frac{d}{2}\right) \tan\theta \quad (2.10)$$

เมื่อ  $U_i$  คือ ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนและฟิล์ม  
 $\theta$  คือ มุมของรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน  
 $b$  คือ ระยะห่างระหว่างผิวของฟิล์มกับน้ำยาเคลือบฟิล์ม  
 $d$  คือ ความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน

การลดความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนและชั้นอิมัลชันบนฟิล์มบันทึกภาพให้น้อยที่สุด สามารถลดความไม่คมชัดของภาพส่วนนี้ลงได้ แต่จะทำให้ความไวต่อนิวตรอนลดลงไปด้วย ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพให้มากขึ้น

ความไม่คมชัดของภาพถ่ายเนื่องจากอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ คำนวณได้จากผลรวมของความไม่คมชัดเนื่องจากการจัดอุปกรณ์การถ่ายภาพ และความไม่คมชัดเนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนและฟิล์มบันทึกภาพ ด้วยวิธีของคลาเซน (Klase's technique) ดังสมการที่ (2.11)

$$U_t = (U_g^3 + U_i^3)^{1/3} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $U_t$  คือ ความไม่คมชัดของภาพถ่าย

### 2.5.3 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน

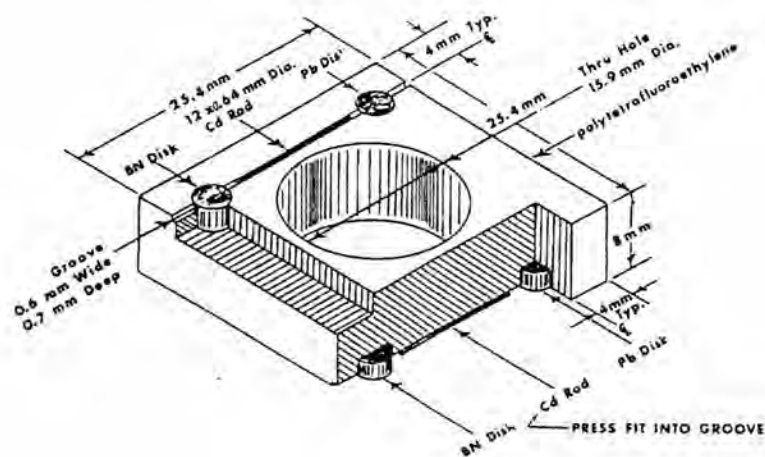
วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวัตถุตัวอย่างที่ได้รับ การออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้

#### (1) การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator

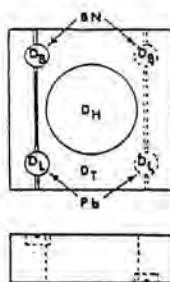
Beam Purity Indicator ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะเป็นรูกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.9 มิลลิเมตร ได้รับการ



ออกแบบมาสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว จัดทำเป็นรูปเหรียญกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร ลวดแคดเมียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร รูปที่ 2.22 แสดงวัสดุและขนาดของ Beam Purity Indicator



รูปที่ 2.22 Beam Purity Indicator<sup>(8)</sup>



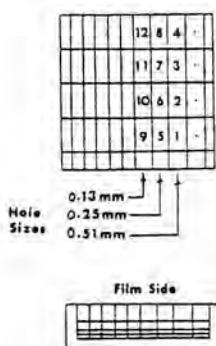
รูปที่ 2.23 ตำแหน่งที่วัดความเข้มของ Beam Purity Indicator<sup>(8)</sup>

การวิเคราะห์ทำโดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูป 2.23 โดย

- $D_B$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
- $D_L$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
- $D_H$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- $D_T$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- $\Delta D_L$  คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- $\Delta D_B$  คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น



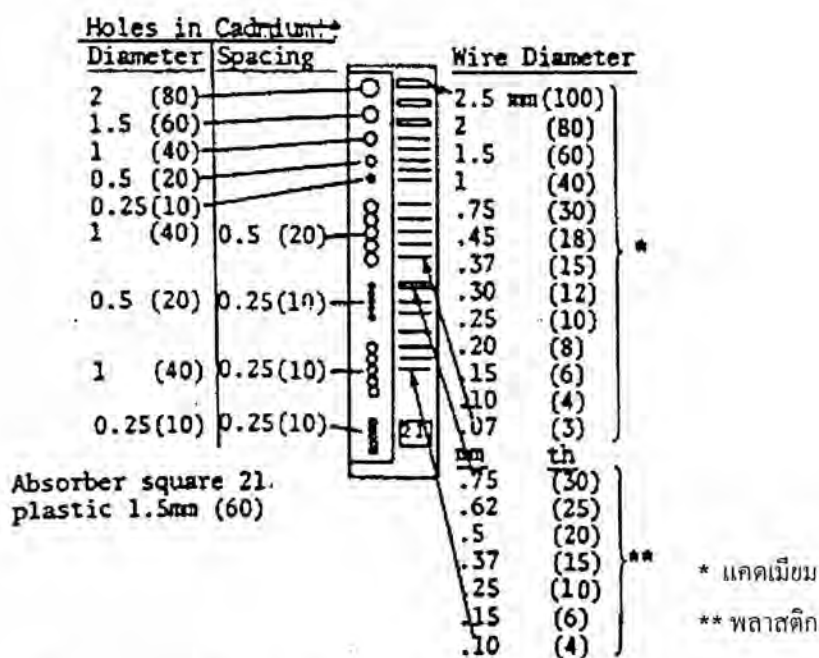
อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพผลิตจากเมทิลเมทาครีเลต (Methymethacrylate) หรือ อะครีลิกเรซิน (Acrylic resin) ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นแบนไค มีความหนา 4 ระดับ ได้แก่ ความหนา 0.64 , 1.27 , 2.54 และ 5.08 มิลลิเมตร แต่ละชั้นมีแนวของชั้นอลูมิเนียมหนา 0.013, 0.025, 0.051 0.076, 0.10, 0.13 และ 0.25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.24 เมื่อถ่ายภาพ แนวนี้จะเห็นจากภาพถ่ายเป็นช่องว่าง (Gap) ด้านหนึ่งของอุปกรณ์เจาะรูขนาด 0.13 มิลลิเมตร 0.25 มิลลิเมตร และ 0.51 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ขนาดรูของอุปกรณ์วัดความไวในการถ่ายภาพ<sup>(8)</sup>

(3) การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและวัดความไวของการถ่ายภาพด้วย

Test Strip B



รูปที่ 2.26 อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ Test Strip B<sup>(8)</sup>

Test Strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัดและความเปรียบต่างของภาพจากการสังเกตขนาดของวัสดุที่มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากรูปที่ 2.26 Test Strip B ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมและพลาสติก

แคลเซียมเป็นวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงให้ภาพถ่ายที่มีความเปรียบต่างสูง วัสดุส่วนที่เป็นแคลเซียม ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 กลุ่ม ได้แก่ ส่วนที่เจาะเป็นรูกลมมีความหนา 0.5 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างรูกลม 0.25 มิลลิเมตร ถึง 0.5 มิลลิเมตร และส่วนที่เป็นเส้นลวดมีขนาด 0.10 มิลลิเมตร ถึง 0.75 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชั้น

ส่วนของวัสดุที่เป็นพลาสติกให้ภาพถ่ายที่มีความเปรียบต่างต่ำ เป็นเส้นลวดขนาด 0.07 มิลลิเมตร ถึง 2.5 มิลลิเมตร จำนวน 13 ชั้น และ พลาสติกชั้นสี่เหลี่ยมหนา 1.5 มิลลิเมตร 1 ชั้น