บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ประวัติของการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และฉากเรืองรังสี[2,9,12,13]

ฉากเรืองรังสีถูกค้นพบในวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1895 โดย Wilhelm Conrad Röntgen หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยจูเลียส-แมกซิมิลลาน (Julius-Maximillan University) ประเทศเยอรมัน ขณะทำการทดลองหลอดรังสีคาโทด เมื่อเขาเพิ่มศักดาไฟฟ้าให้กับหลอดรังสีคาโทด ส่งผลทำให้กระดาษแข็งสีดำซึ่งวางไว้บนโต๊ะทำงาน ใกล้ๆกับหลอดรังสีคาโทดเกิดการเรืองแสง ซึ่งกระดาษแข็งนั้นเคลือบผิวบางๆด้วยแบเรียมพลาติโนไซยาไนด์(Barium Platinocyanide screen) ทำให้เขาค้นพบรังสีชนิดใหม่และฉากเรืองรังสีในเวลาเดียว และในวันที่ 28 ธันวาคม ค.ศ. 1895 ผลงานของเรินเกนท์ที่ชื่อว่า "*On a New Kind of Ray:A preliminary communication*" ซึ่งเป็นบทความเกี่ยวกับรังสีชนิดใหม่ที่เขาได้ค้นพบ และเรียกว่า รังสีเอกซ์ ได้รับการยอมรับจาก Wurzburrg Physical Medical Institute ทำให้เรินเกนท์ได้รับรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ในปีค.ศ. 1901

ต่อในปีค.ศ. 1896 โทมัส เอดิสัน (Thomas Edison) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเรืองรังสีเอกซ์ ของสารฟอสฟอร์ชนิดต่างๆ และพบว่าแคลเซียมทังสเตท ($CaWO_4$) เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการเรืองรังสีได้ดีที่สุด ปีค.ศ. 1896 สารที่เอดิสันค้นพบได้กลายเป็นสารมาตรฐานที่ใช้งานรังสีวินิจฉัยในวงการแพทย์ แต่หลังจากปีค.ศ. 1903 เอดิสันได้เลิกทำงานวิจัยนี้ เนื่องจากช่างทำหลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นหนึ่งในผู้ช่วยของเอดิสัน เป็นมะเร็งที่แขนทั้งสองข้างได้เสียชีวิตลง สาเหตุเพราะเขาใช้มือของเขาเป็นตัวอย่างในการทดสอบหลอดรังสีเอกซ์เป็นประจำ แต่นักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆก็พยายามที่พัฒนาสารฟอสฟอร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จนกระทั่งปี ค.ศ. 1972 ได้มีการตีพิมพ์เกี่ยวกับการนำสารฟอสฟอร์ที่ทำมาจากออกซีซัลไฟด์ของธาตุหายากมาทำเป็นฉากเพิ่มความเข้มรังสี และได้มีการใช้สารฟอสฟอร์ชนิดนี้ในทางการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1973 เป็นต้นมา

2.2 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์[2,10,11,12]

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งมีอำนาจการทะลุทะลวงสูง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นสูง รังสีจะถูกลดทอนความเข้มในตัวกลาง เนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเลกตริก (Photoelectric effect) , คอมป์ตัน (Compton effect) และ แพร์โพรดักชัน(Pair production) ซึ่งอัตราการลดลงของรังสีในตัวกลางเป็นไปตามสมการ (2.1)

$$I = I_o e^{-\mu x} \qquad \text{.....} \quad 2.1$$

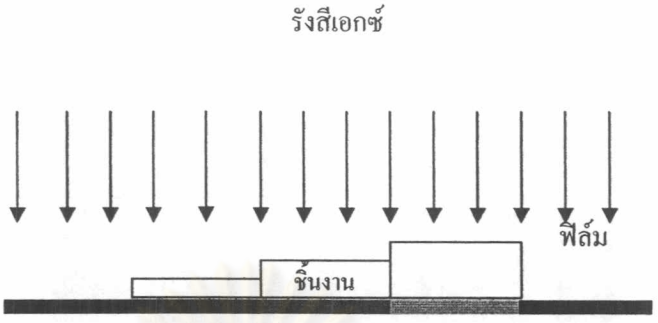
เมื่อ I คือ ความเข้มของรังสีหลังจากทะลุผ่านตัวกลาง

Io คือ ความเข้มของรังสีก่อนทะลุผ่านตัวกลาง

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ที่พลังงานใดๆ ต่อตัวกลาง

x คือ ความหนาของตัวกลาง

เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นหรือความหนาไม่เท่ากัน ส่งผลให้ความเข้มรังสีที่ผ่านออกมาไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.1 จึงนำคุณสมบัตินี้ของรังสีมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี แต่เนื่องจากตามนุษย์ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จึงมีการพัฒนาฟิล์มขึ้นมาเพื่อให้สามารถสังเกตผลที่เกิดจากรังสีได้ โดยเมื่อรังสีตกกระทบบนฟิล์ม จะทำให้ผลึกเงินโบรไมด์ในชั้นอิมัลชัน เกิดการแตกตัว เป็นเงิน(ไอออนบวก) และ โบรไมด์ (ไอออนลบ) ปริมาณของเงิน (ไอออนบวก) ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามปริมาณรังสี ที่ตกกระทบลงบนผลึกเงินโบรไมด์ ภาพที่เกิดบนฟิล์มนี้จะเกิดเป็น ภาพแฝง (latent image) คือยังไม่สามารถเห็นภาพได้ ต้องผ่านการล้างฟิล์มในห้องมืดก่อน โดยผ่านกระบวนการดีเวลอปิง (developing) เพื่อรีดิวซ์เงินไอออนบวกให้กลายเป็นโลหะเงิน ผ่านกระบวนการสต็อปบาท (stop bath) เพื่อทำให้สารละลาย ดีเวลอเปอร์ที่ค้างอยู่ให้เป็นกลาง หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการฟิกซิง(fixing) เพื่อชะล้างผลึกเงินโบรไมด์ที่ไม่ถูกรังสีออกจากแผ่นฟิล์ม นำไปล้างน้ำเพื่อชะล้างสารเคมีที่ตกค้างอยู่ แล้วนำไปแช่ในสารละลายลดความตึงผิว เพื่อไม่ให้หยดน้ำเกาะบนฟิล์ม แล้วนำฟิล์มไปผึ่งให้แห้ง เราจึงได้ภาพที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม



รูปที่ 2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสี

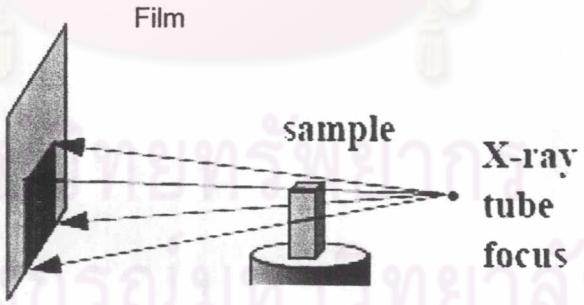
ระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิคฟิล์ม ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

ก. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

ข. ชิ้นงาน

ค. ฟิล์ม

ง. กระบวนการล้างฟิล์ม



รูปที่ 2.2 การจัดระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.2 เป็นการจัดระบบถ่ายภาพด้วยรังสีโดยมีต้นกำเนิดรังสีกับฟิล์มอยู่ด้านตรงกันข้ามและมีวัตถุอยู่ระหว่างฟิล์มและต้นกำเนิดรังสี ในการถ่ายภาพโดยทั่วไปจะจัดให้วัตถุอยู่ใกล้กับฟิล์มมากที่สุดเพื่อลดเงาที่อาจเกิดขึ้น แต่เนื่องจากฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ทำมาจากธาตุที่

มีเลขอะตอมต่ำเช่น เงิน(silver,Ag) จึงทำให้รังสีทำอันตรกิริยากับฟิล์มได้น้อย มีเพียงร้อยละ 1-2 เท่านั้นที่ทำอันตรกิริยากับฟิล์ม ส่วนอีกร้อยละ 98-99 ก็ทะลุผ่านฟิล์มไปโดยไม่เกิดประโยชน์ จึงมีการนำฉากเพิ่มความเข้มรังสี(Intensifying screen) มาใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีร่วมกับฟิล์ม เพื่อให้รังสีส่วนที่ไม่ทำอันตรกิริยากับฟิล์ม ทำอันตรกิริยากับฉากเพิ่มความเข้มรังสี แล้วมีผลต่อการเพิ่มความเข้มของฟิล์ม

2.3 ฉากเพิ่มความเข้มรังสี (Intensifying screen)[2,11,12]

ฉากเพิ่มความเข้มรังสี คือฉากที่ประกบกับฟิล์มเพื่อใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ทำหน้าที่เปลี่ยนโฟตอนให้เป็นแสงหรืออิเล็กตรอน ซึ่งมีผลทำให้เพิ่มความดำของฟิล์มเมื่อถ่ายภาพที่ปริมาณรังสีเท่ากัน โดยฉากที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่นิยมใช้ มีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่

2.3.1. ฉากตะกั่ว[3](Lead Foil screens) เมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาตกกระทบลงบนฉากชนิดนี้ ฉากจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนนี้มีผลทำให้ฟิล์มดำ ซึ่งจะมีผลต่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป ฉากชนิดนี้ทำมากจากโลหะผสมประกอบด้วยตะกั่ว(lead,Pb) ร้อยละ 94 และพลวง (antimony ,Sb) ร้อยละ 6 ฉากตะกั่วสามารถลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ประมาณ 3 เท่าและยังสามารถช่วยลดการกระเจิงของรังสีอีกด้วย

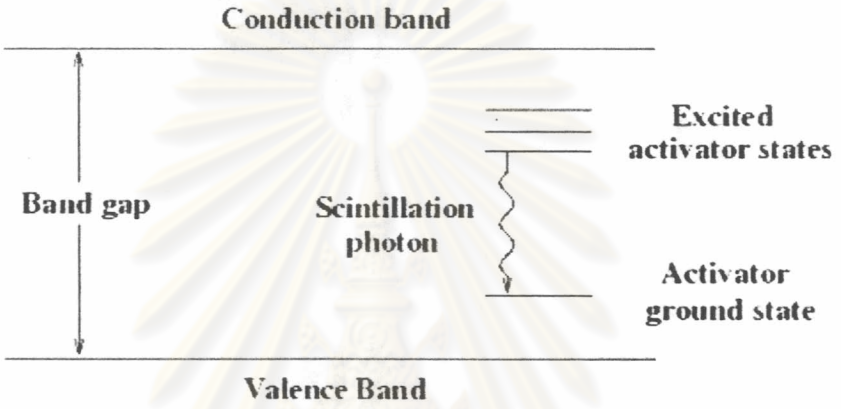
2.3.2 ฉากเรืองรังสี (Fluorescent screens) เมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาตกกระทบลงบนฉากชนิดนี้ ฉากจะปลดปล่อยแสงออกมา จะมีผลต่อรังสีที่มีพลังงานไม่เกิน 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จึงไม่ค่อยพบการใช้ฉากชนิดนี้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา ฉากเรืองรังสีทำมาจากผลึกของสารประกอบบางชนิด เช่น สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) [zinc sulphide, ZnS(Ag)] แคลเซียมทังสเตต (calcium tungstate,$CaWO_4$) หรือ แกดโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์(เทอร์เบียม) [Gadolinium oxysulphide(Terbium)] เป็นต้น ฉากชนิดนี้สามารถทำให้ลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ประมาณร้อยละ 20-98 ของเวลาในการถ่ายภาพเมื่อไม่ใช้ฉาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของฉาก พลังงานของรังสีเอกซ์ ชนิดของฟิล์ม และชิ้นงาน

2.3.3 ฉากฟลูออโรเมทัลลิก (Fluorometallic screens) เป็นฉากที่ผสมระหว่างฉากตะกั่วและฉากเรืองรังสี โดยมี 2 ชั้น ชั้นหนึ่งเป็นฉากเรืองรังสีชนิดละเอียด(เพื่อไม่ให้เสียรายละเอียดของภาพมากนัก และอีกชั้นหนึ่งเป็นฉากตะกั่ว ฉาบอยู่บนแผ่นกระดาษแข็ง หรือพลาสติก ฉากชนิดนี้สามารถลดเวลาถ่ายภาพได้ 7-9 เท่า สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไป

และสามารถลดเวลาในการถ่ายภาพได้ 2-9 เท่า เมื่อใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูงและรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60

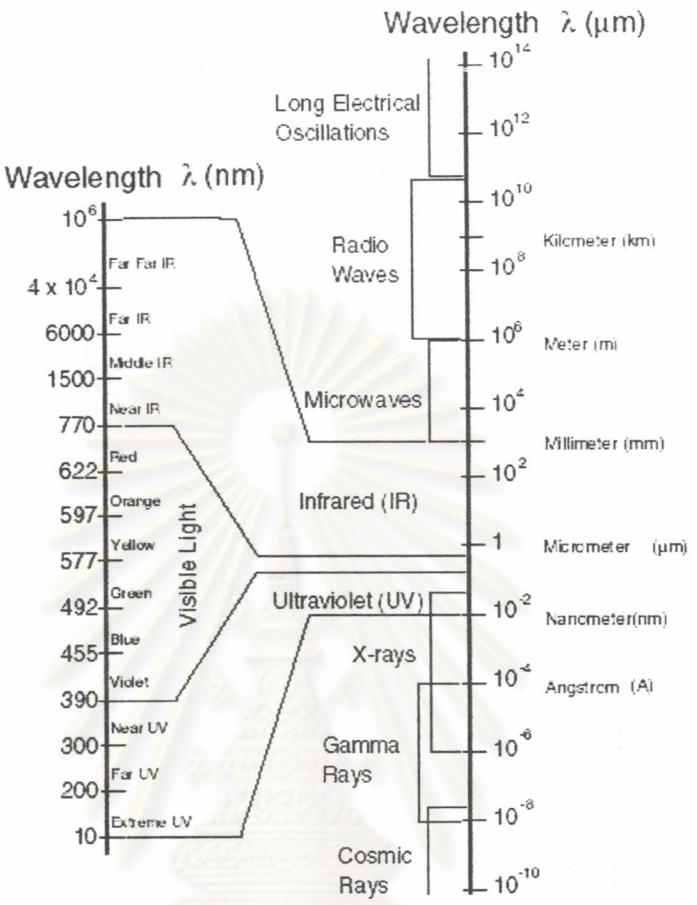
2.4 ฉากเรืองรังสี[12,13]

2.4.1 การเกิดการเรืองรังสี



รูปที่ 2.3 การเกิดการเรืองรังสีในผลึกที่มีสารเจือปน

จากรูปที่ 2.3 เมื่อผลึกของสารเรืองรังสีได้รับรังสี จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์(valence band) ได้รับการกระตุ้นให้ไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน(conduction band) ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดช่องว่างขึ้น (hole) คู่อิเล็กตรอนกับโฮลที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า เอกซ์ไซตอน (exciton) ซึ่งการเกิดเอกซ์ไซตอนนี้ จะทำให้บริเวณแถบคอนดักชันเกิดเป็นชั้นบางๆ เกิดขึ้นเรียกว่าแถบเอกซ์ไซตอน (exciton band) อิเล็กตรอนจะถูกกักอยู่บริเวณนี้ อิเล็กตรอนพยายามจะกลับไปอยู่แถบวาเลนซ์โดยปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังรูปที่ 2.4



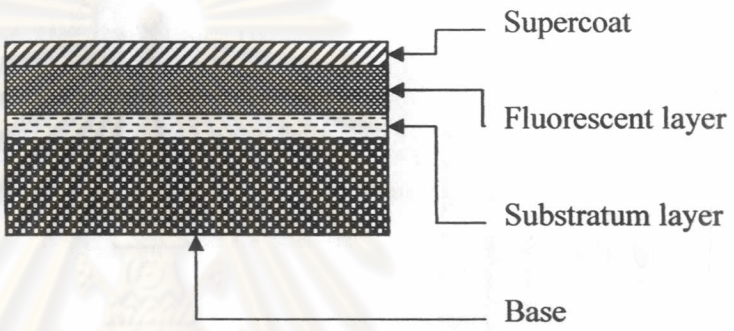
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

ผลึกที่บริสุทธิ์จะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาในช่วงที่ตามองไม่เห็น ดังนั้นการที่เติมสารเจือปน(activator) ลงไปเพียงเล็กน้อย จะทำให้บริเวณช่องว่างพลังงานเกิดมีระดับพลังงานขึ้น เนื่องจากสารที่เติมไปทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่มายังระดับพลังงานที่เพิ่มเข้าไปนี้ โดยที่โฮลจะอยู่ที่สถานะพื้นของระดับพลังงานของ สารเจือปน ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มายังสถานะกระตุ้นของแอคติเวเตอร์ แล้วอิเล็กตรอนก็ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา เพื่อจะลดพลังงานลงกลับสู่สถานะพื้น จึงทำให้เกิดแสงขึ้น การเกิดแสงนี้เรียกว่า ลูมิเนสเซนส์(Luminescence) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

ก. ฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence) คือ การที่สารหรือวัตถุใดๆ เปล่งแสงออกมาภายในเวลา 10^{-8} วินาที เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง อนุภาค หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ และเมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง อนุภาค หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารหรือวัตถุนั้นจะไม่เปล่งแสง

ข. ฟอสฟอเรสเซนส์ (Phosphorescence) คือ การที่สารหรือวัตถุใดๆเปล่งแสงออกมา เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง อนุภาค หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ และเมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง อนุภาค หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารหรือวัตถุนั้นก็ยังคงเปล่งแสงต่อเนื่อง

2.4.2 โครงสร้างของฉากเรืองรังสี



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของฉากเรืองรังสี

ก. ชั้นโปรเทคทีฟ (Protective layer) มีความหนาประมาณ 5-10 μm เป็นชั้นบนสุดของฉากเรืองรังสี เพื่อป้องกันรอยขีดข่วน และความชื้นที่จะเกิดแก่ชั้นเรืองรังสี ซึ่งต้องมีความโปร่งแสงและมีความหนาน้อยๆ เพื่อลดความไม่คมชัดของภาพ

ข. ชั้นเรืองรังสี (Fluorescent layer) มีความหนาประมาณ 100-200 μm ประกอบด้วยสารฟอสฟอร์และสารยึดเหนี่ยว (Binder) เป็นชั้นที่จะทำให้เกิดแสงเรืองเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสี ซึ่งสารฟอสฟอร์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ -

- มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีที่ดี
- มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรังสีเอกซ์ไปเป็นแสงได้ดี
- ให้แสงออกมาในช่วงที่อุปกรณ์รับแสงสามารถรับได้ดี
- ให้แสงออกมาอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 10^{-8} วินาที)
- ไม่มี แสงค้างอยู่หลังจากที่ทำการหยุดฉายรังสี (afterglow)
- กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในชั้นเรืองรังสี

ค. ชั้นซับสตราตัม (Substratum Layer) มีความหนาประมาณ 10-20 μm เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ยึดชั้นเรืองรังสีกับฐานของฉาก แต่ในบางกรณีก็ไม่มีชั้นนี้ เนื่องจากได้รวมเข้าไว้ในเรืองรังสีแล้ว

ง. ชั้นฐาน (Base) มีความหนาประมาณ 200-400 μm ทำหน้าที่เป็นส่วนที่รองรับชั้นต่างๆของฉากเรืองรังสี ส่วนมากจะทำมาจากโพลีเอสเทอร์ และ พลาสติก บางครั้งชั้นซับสตราตัม ก็ถูกรวมกับชั้นฐานด้วย

2.4.3 สารฟอสฟอร์ที่นิยมใช้ในฉากเรืองรังสี

สารฟอสฟอร์ คือ ผลึกของเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ซึ่งจะปลดปล่อยแสงเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสี สารฟอสฟอร์ที่นิยมใช้ในฉากเรืองรังสีแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก. แคลเซียมทังสเตท (Calcium Tungstate, $CaWO_4$) เริ่มผลิตสำหรับการพาณิชย์ครั้งแรกที่ประเทศอังกฤษและเยอรมันในปีค.ศ.1896 และเริ่มผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อปี ค.ศ. 1912 ผลึกแคลเซียมทังสเตทที่นำมาใช้ทำฉากเพิ่มความเข้ม ต้องเป็นผลึกที่ปราศจากสารเจือปนจึงจะมีคุณสมบัติในการเรืองรังสีที่ดี แคลเซียมทังสเตทเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์จะให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง โดยสเปกตรัมนี้มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน คือ มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 350-580 นาโนเมตร โดยให้ความยาวคลื่นที่ 430 นาโนเมตรมากที่สุด ซึ่งฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จะต้องไวต่อความยาวคลื่นในช่วงนี้

ข. Rare earth screen เป็นฟอสฟอร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นใหม่ โดยมีส่วนประกอบเป็นออกไซด์ของธาตุที่หาได้ยาก ได้แก่ ธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ (เลขอะตอมตั้งแต่ 57-71) รวมไปถึงสแกนเดียม (Sc เลขอะตอม 21), อิทเทรียม (Y เลขอะตอม 39) เมื่อผลึกบริสุทธิ์ของออกไซด์ของธาตุที่หายาก ได้รับการกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่มองไม่เห็น ดังนั้นจึงต้องใส่สารเจือปนเล็กน้อยเพื่อให้ผลึกสามารถปลดปล่อยสเปกตรัมออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่ตาเปล่าสามารถมองเห็นได้ เช่น ผลึกของแกดโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ (เทอร์เบียม) (Gd_2O_2S:Tb) และแลนทานัมออกซีโบรไมด์ (ทูเลียม) (LaOBr:Tm)

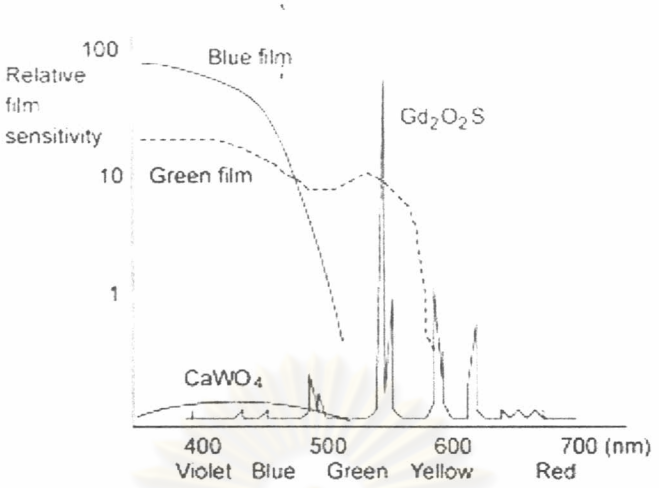
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติบางประการของสารฟอสฟอร์ชนิดต่างๆ

PHOSPHOR	EMISSION EFFICIENCY %	EMISSION COLOR	EMISSION PEAK(nm)	EFFECTIVE ATOMIC#	ABSORPTION EDGE (kv)	SPECIFIC GRAVITY
$CaWO_4$	5.0	Blue	425	61.8	69.48	6.1
ZnS:Ag	19.0	Blue	450	26.7	9.66	3.9
$BaSO_4$:Eu	6.0	Violet	380	45.5	37.38	4.5
BaFCl:Eu	13.0	Violet	390	49.3	37.38	4.7
Y_2O_2S:Tb	18.0	Bl/white	420	34.9	17.04	4.9
LaOBr:Tb	17.0	Bl/white	420	49.3	38.92	6.3
LaOBr:Tm	11.0	Blue	360,460	49.3	38.92	6.3
$YTaO_4$:Tm	8.0	Blue	360,460	59.8	67.42	7.5
$YTaO_4$:Nb	8.5	Blue	410	59.8	67.42	7.5
Gd_2O_2S:Tb	16.0	Green	545	59.5	50.22	7.3
La_2O_2S:Tb	12.5	Green	545	52.6	38.92	6.5
ZnCdS:Ag	19.0	Green	530	38.4	9.66/26.70	4.8
CsI:Na	13.0	Blue	420	54.0	35.95/33.16	4.5

2.4.4 คุณสมบัติของฉากเรืองรังสีแกดโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์(เทอร์เบียม)[13]

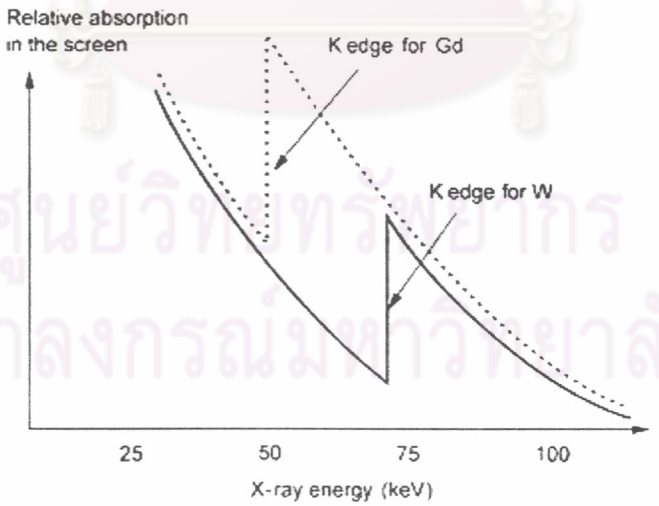
ก. ให้แสงออกมาในช่วงแสงสีเขียว โดยมีความยาวคลื่นเท่ากับ 545 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ตรงกับการตอบสนองของฟิล์มที่ใช้สำหรับถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากแคลเซียมทังสเตทและแกดโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์(เทอร์เบียม) โดยเปรียบเทียบกับการตอบสนองต่อแสงของฟิล์ม

ข. มีค่า K-absorption เท่ากับ 50.22 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ดูดกลืนโฟตอนของวัตถุใดๆ จะมีค่าลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้น K จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนวัตถุนั้นๆเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอกซ์ในทังสเตนและแกดโดลิเนียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน[3,4,11]

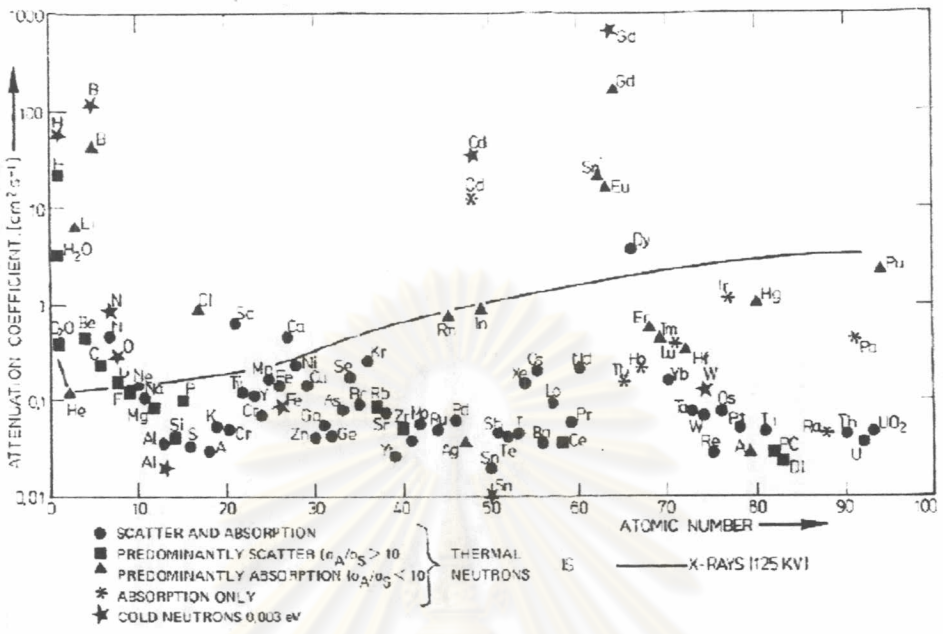
2.5.1 ประวัติการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

นิวตรอนถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1932 โดย Chadwick เขาได้ตั้งสมมติฐานขึ้นจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์คนอื่นๆ ที่ได้ทดลองนำรังสีแอลฟาให้ทำปฏิกิริยากับธาตุเบริลเลียม (beryllium,Be) จะให้อนุภาคชนิดหนึ่งออกมา ซึ่งไม่ใช่อนุภาคที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ เขาจึงเรียกอนุภาคนี้ว่านิวตรอน(มาจากภาษาลาติน neuter แปลว่า neither ซึ่งแปลว่าไม่ใช่ทั้งสองอย่าง)

ในปี 1935 Kallman และ Kuhn ได้ทำการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค แต่ภาพถ่ายที่ได้มีคุณภาพไม่ดีนัก ทั้งยังไม่สามารถกำหนดปริมาณรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพได้ ทั้งสองจึงได้พยายามพัฒนาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนด้วยวิธีต่างๆ จนสามารถหาวิธีการที่ทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีคุณภาพที่ดี แต่ผลงานนี้ยังไม่ได้ตีพิมพ์ เนื่องจากเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1948 จึงได้มีการตีพิมพ์หลักการเบื้องต้นของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนซึ่งมีใช้มาจนถึงปัจจุบัน

การพัฒนาของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้ในระหว่างสงครามและหลังสงครามนั้น ได้มีการเพิ่มความเข้มของนิวตรอนฟลักซ์ให้มีความหลากหลาย และสามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ แต่ก็ยังไม่ได้นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จนกระทั่งปีค.ศ. 1956 Thewlis และ Derbyshire จึงได้มีการพัฒนาการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู นี่ถือว่าเป็นครั้งแรกที่มีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โดยใช้ลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบกราไฟต์ BEPO กำลัง 6 เมกาวัตต์ ซึ่งให้ภาพที่มีคุณภาพที่ดี

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนอาศัยหลักการเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์คือการส่งผ่านนิวตรอนผ่านวัสดุแล้วบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมา แต่สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของนิวตรอนไม่เรียงตามเลขอะตอม แม้แต่สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของนิวตรอนของไอโซโทปของธาตุเดียวกันก็มีค่าต่างกันไป ดังรูปที่ 2.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนและรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นกับธาตุที่มีเลขอะตอมต่างๆ



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของธาตุที่มีเลขอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนของธาตุจะกระจัดกระจาย ไม่เรียงตามเลขอะตอม ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุจะเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$I_x = I_0 e^{(-\Sigma X)} \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ I_x คือ ความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ

I_0 คือ ความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบวัสดุ

Σ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนของวัสดุที่พลังงานนั้นๆ มีหน่วยเป็น ซม.$^{-1}$ (cm^{-1})

X คือ ความหนาของวัสดุ เป็น เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

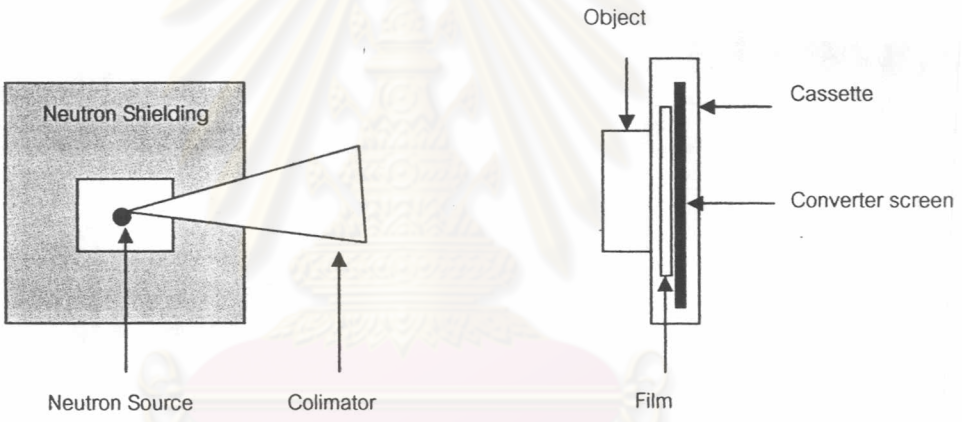
ระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังนี้

ก. ระบบผลิตนิวตรอนช้า ประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็ว และตัวหน่วงนิวตรอนทำหน้าที่ลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า

ข. นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (neutron collimator) เป็นท่อนำลำนิวตรอนช้าออกมากจากระบบผลิตนิวตรอนช้า

ค. ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (neutron converter screen) ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาให้เป็นแสง รังสี หรืออนุภาคที่เหมาะสมกับฟิล์มหรืออุปกรณ์บันทึกภาพ

ง. ฟิล์มหรืออุปกรณ์บันทึกภาพ ทำหน้าที่บันทึกภาพหรือแสดงภาพซึ่งสอดคล้องกับความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาได้



รูปที่ 2.9 การจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

2.5.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimater)

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำลำนิวตรอนจากระบบหน่วงพลังงานนิวตรอน (neutron moderation system) ของต้นกำเนิดนิวตรอนออกมาใช้ในการถ่ายภาพ ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อาจมีลักษณะแตกต่างกันออกดังแสดงในรูปที่ 2.10 แต่ที่นิยมใช้กันมากก็คือ นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีลักษณะรูปกรวยที่เรียกว่า "ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (divergent collimater)" ซึ่งมีลักษณะปลายด้านหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลม ผนังของคอลลิเมเตอร์ทำจากสารดูดจับนิวตรอน เช่น โบรอน ลิเทียม แคดเมียม แกดโดลิเนียม เพื่อดูดจับนิวตรอนไม่ให้เข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้างและผนังด้านในของคอลลิ

เมเตอร์จะฉาบด้วยสารดูดจับนิวตรอน เพื่อดูดจับนิวตรอนในคอลลิเมเตอร์ที่ชนผนังไม่ให้กระเจิงกลับไปในคอลลิเมเตอร์ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ได้ลำนิวตรอนที่วิ่งออกมาจากท่อบังคับลำนิวตรอนในลักษณะบานออก วิ่งไปกระทบชิ้นงาน จากรูปที่ 2.10(ก) นิวตรอนฟลักซ์(ϕ) ที่ปลายท่อบังคับลำนิวตรอนตรงตำแหน่งชิ้นงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\Phi = \frac{\Phi_0 A}{4\pi L^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.3)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนในตัวหน่วงนิวตรอน ซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าสู่คอลลิเมเตอร์ ถ้าหน้าตัดมีลักษณะกลม

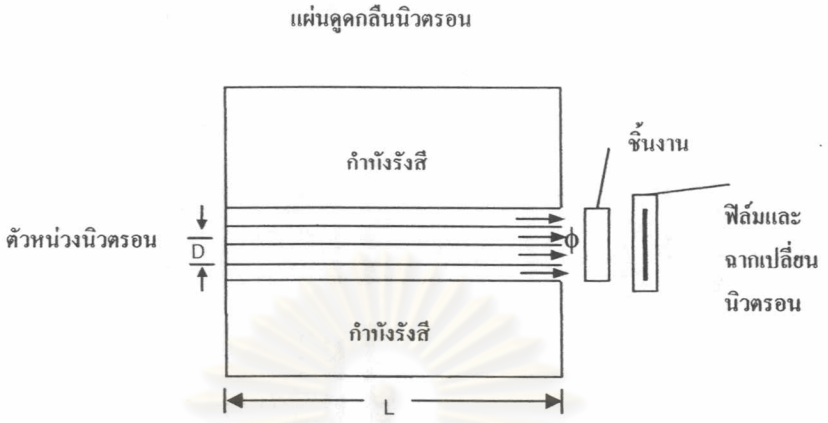
$$A = \frac{\pi D^2}{4} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.4)$$

จะได้ $$\Phi = \frac{\Phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\Phi_0}{16}\left[\frac{D}{L}\right]^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.5)$$

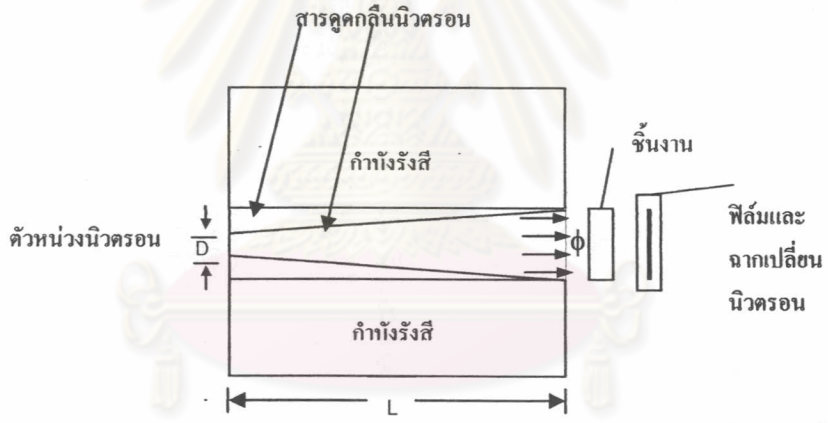
$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\Phi_0}{\Phi} = 16\left[\frac{L}{D}\right]^2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 จะเห็นได้ว่านิวตรอนฟลักซ์ลดลงเมื่อท่อบังคับลำนิวตรอนมีความยาว (L) เพิ่มขึ้นและเมื่อทางเข้าของนิวตรอน(D) มีขนาดเล็กลง ในการถ่ายภาพเพื่อให้เวลาในการถ่ายภาพสั้น จำเป็นต้องใช้นิวตรอนฟลักซ์ที่มีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของท่อบังคับลำนิวตรอน และ/หรือเพิ่มขนาดทางเข้าของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายน้อยลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) คอลลิเมเตอร์แบบโซลเลอร์



(ข) คอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์

รูปที่ 2.10 ลักษณะของท่อบังคับลำนิวตรอนแบบโซลเลอร์และไดเวอร์เจนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (converter screen)[3]

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มจึงไม่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์ม ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงจำเป็นจะต้องมีฉากเปลี่ยนนิวตรอน เพื่อเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นแสงหรือรังสีที่เหมาะสม ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ

ก. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ โดยแผ่นโลหะที่ใช้ทำฉากชนิดนี้จะต้องเป็นโลหะที่มีภาคตัดขวางดูดกลืนนิวตรอนสูง ปฏิกิริยาที่สำคัญสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนประเภทนี้คือ ปฏิกิริยา (n,γ) สามารถแบ่งฉากประเภทนี้ได้เป็น 2 ชนิด

- ชนิดที่ให้รังสีออกมาทันที (prompt radiation) ฉากชนิดนี้จะปลดปล่อยอนุภาคหรือรังสีออกมาทันทีที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน ได้แก่ ฉากโลหะแกดโดลิเนียม (gadolinium, Gd) และแคดเมียม (cadmium, Cd) แกดโดลิเนียมธรรมชาติมีภาคตัดขวางนิวตรอนประมาณ 48,000 บาร์น (barn) ไอโซโทป ^{155}Gd และ ^{157}Gd ซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติร้อยละ 14.7 และ 15.7 โดยอะตอม มีภาคตัดขวางนิวตรอนสูงถึง 58,000 บาร์น และ 240,000 บาร์น ตามลำดับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^{155}Gd(n,\gamma)^{156}Gd$ และ $^{157}(n,\gamma)^{158}Gd$ เป็นไอโซโทปที่เสถียร แต่เนื่องจากรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นทันที (prompt gamma-ray) มีพลังงานต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 100 กิโลอิเล็กตรอนโวล์ต และเกิดอินเทอร์นัลคอนเวอร์ชัน (internal conversion) ทำให้ได้คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนที่มีพลังงานประมาณ 70-80 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ออกมา ซึ่งมีพิสัยในโลหะแกดโดลิเนียมประมาณ 10-15 ไมครอน ซึ่งคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนมีผลต่อการบันทึกภาพมากกว่ารังสีแกมมาฉากแกดโดลิเนียมเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนแบบแผ่นโลหะที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางนิวตรอนสูงมาก, ให้รังสีและอนุภาคอออกมาทันทีเมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอน, จำนวนรังสีแปรผันตรงกับเวลา, ไม่มีไอโซโทปรังสีเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับนิวตรอน และให้คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ทำให้ภาพที่ได้คมชัด

- ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว ฉากโลหะชนิดนี้เป็นธาตุเมื่อทำอันตรกิริยากับนิวตรอนจะเกิดเป็นไอโซโทปรังสี รังสีและอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ด้วยเหตุนี้ฉากชนิดนี้จึงสามารถใช้ในการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอดได้ด้วย กล่าวคือ สามารถถ่ายภาพชิ้นงานโดยนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนประกบกับชิ้นงานก่อน แล้วจึงนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีรังสีไปประกบกับฟิล์มภายหลัง วิธีถ่ายทอดนี้มีประโยชน์ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นวัสดุกัมมันตรังสี

ข. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปล่อยแสง (Light emitting neutron converter screen) ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสงนำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรกและเป็นฉากที่มีความไวในการถ่ายภาพมากที่สุด ประกอบด้วยพื้นฐาน 2 ชนิด คือ สารดูดกลืนนิวตรอน

และสารเรืองแสง สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ได้แก่ ลิเทียม-6 โบรอน-10 เนื่องจากดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีแอลฟาพลังงานสูง แต่มีพิสัยต่ำ

สารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) [ZnS (Ag)] ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ภายหลังการกระตุ้นด้วยรังสีแอลฟาจากลิเทียม-6 หรือ โบรอน-10 ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้กับฟิล์มรังสีเอกซ์

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนานำธาตุหายาก (rare earth element) มาผลิตฉากเปลี่ยนนิวตรอน เช่น $Gd_2O_2S(Tb)$ หรือ GOS ซึ่งดูดกลืนนิวตรอนได้สูงกว่าฉากที่ใช้ลิเทียมเป็นสารดูดกลืนนิวตรอน จึงให้รายละเอียดของภาพสูง แต่มีข้อจำกัดคือมีความไวต่ำกว่าฉาก NE และฉากชนิดนี้มีความไวต่อรังสีแกมมา

ค. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรก-เอตช์ (Tract-etch neutron converter screen) เป็นฉากที่นำคุณสมบัติของการดูดกลืนนิวตรอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคอัลฟาของโบรอน-10 และลิเทียม-3 ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) และลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) เมื่อดูดกลืนนิวตรอนแล้ว จะให้อนุภาคอัลฟา จากปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^7Li$ และ $^6Li(n,\alpha)^3H$ เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านฟิล์มบางของวัสดุบางชนิด เช่น ไมกา แก้ว และพลาสติก จะเกิดรอยอนุภาค และเมื่อนำวัสดุนั้นไปรอยขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม ทำให้เห็นภาพถ่ายทางรังสีชัดเจนขึ้น

2.6 คุณภาพของภาพถ่ายรังสี[1]

2.6.1 ความไว (sensitivity) หมายถึงความสามารถของการถ่ายภาพด้วยรังสี ที่สามารถหารอยบกพร่องเล็กได้ โดยปกติแล้วนิยมใช้บอกเป็นร้อยละของความหนาของชิ้นงาน

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ นำตัวชี้บอกคุณภาพของภาพถ่าย (imgae quality indicator) หรือที่นิยมเรียกว่า IQI ไปวางบนชิ้นงานขณะที่ถ่ายภาพ เมื่อได้ภาพออกมา จะมีภาพ IQI ปรากฏอยู่ด้วย ทำให้เราตรวจสอบได้ว่า การถ่ายภาพแต่ละครั้งมีความไวในการตรวจหารอยบกพร่องเล็กที่สุดได้ขนาดเท่าใด IQI มีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการเหมือนกัน โดย IQI ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ IQI มาตรฐาน DIN54 109(1962) เป็นมาตรฐานของเยอรมันนี และยอมรับเป็นมาตรฐานของ ISO ด้วย มีลักษณะเป็นเส้นลวดทำด้วยโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.1-3.2 มิลลิเมตรดังตารางที่ 2.2 รวม 16 ขนาด สำหรับเลือกใช้ให้เหมาะกับชิ้นงาน

ลวดทั้ง 16 เส้น จะแบ่งออกเป็น 3 ชุด ชุดละ 7 เส้นดังนี้

- ชุดที่ 1 DIN 1/7 มีลวดหมายเลข 1 ถึง 7
- ชุดที่ 2 DIN 6/12 มีลวดหมายเลข 6 ถึง 12

-ชุดที่ 3 DIN 10/16 มีลวดหมายเลข 10 ถึง 16

ความไวในการตรวจหารอยบกพร่องของภาพถ่ายรังสี สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความไว} = \frac{\text{ขนาดเส้นลวดเล็กที่สุดที่มองเห็น}}{\text{ความหนาของชิ้นงาน}} \times 100\% \quad \text{.....(2.7)}$$

ตารางที่ 2.2 หมายเลยและขนาดของ IQI แบบเส้นลวดของ DIN54 109

หมายเลข	1	2	3	4	5	6	7	8
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	3.20	2.50	2.00	1.60	1.25	1.00	0.80	0.63
หมายเลข	9	10	11	12	13	14	15	16
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	0.50	0.40	0.32	0.25	0.20	0.16	0.125	0.100

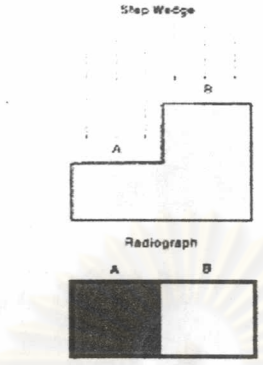
2.6.2 ความเปรียบต่าง (contrast) หมายถึง ผลต่างระหว่างความดำของภาพถ่ายทางรังสี 2 จุด ซึ่งอยู่บนฟิล์มเดียวกัน ความเปรียบต่างขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น ชนิดของฟิล์ม พลังงานของรังสีที่ตกกระทบลงบนฟิล์ม ความหนาแน่นของชิ้นงาน ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน ความไวของฉากเรืองรังสี กระบวนการล้างฟิล์ม และอื่นๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Contrast} = \frac{I_1 - I_2}{(I_1 + I_2)/2} \quad \text{.....(2.8)}$$

เมื่อ I_1 คือ ค่าความดำบนฟิล์มที่มีค่ามากกว่า

I_2 คือ ค่าความดำบนฟิล์มที่มีค่าน้อยกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ความเปรียบต่างของภาพถ่ายทางรังสี

2.6.3 แฟคเตอร์ความเข้ม (intensification factor, IF) คือ อัตราส่วนที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างเอกซ์โพเชอร์ในการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยไม่ใช้ฉากเรืองรังสีต่อเอกซ์โพเชอร์ที่ใช้ฉากเรืองรังสี ที่ทำให้ฟิล์มมีความดำเท่ากัน สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.9 ค่าที่ได้จะสามารถบอกถึงความเร็วในการถ่ายภาพด้วยรังสีของระบบถ่ายภาพที่ใช้ฟิล์มและฉากเรืองรังสี เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ฉากเรืองรังสี

$$IF = \frac{\text{exposure without screen}}{\text{exposure with screen}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.9)$$

2.6.4 รีโซลูชัน (Resolution) คือ ความสามารถในการแยกแยะรายละเอียดของภาพถ่ายด้วยรังสี ประเมินจากขอบภาพของตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ระหว่างความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำ ขอบภาพที่ได้จะไม่คมชัดหรือมัว ซึ่งเมื่อสแกนด้วยเครื่องอ่านความดำอัตโนมัติ จะได้กราฟความชันระหว่างตัวกลางทั้งสอง ระยะห่างระหว่างความต่างของความดำที่ 25% กับ 75% คือค่ารีโซลูชันของภาพนั่นเอง