บทที่ 2
การถ่ายภาพด้วยรังสี

การถ่ายภาพด้วยรังสี อาศัยความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของรังสีในการถ่ายภาพวัสดุ ซึ่งทำให้สามารถเห็นลักษณะ และความผิดปกติที่อยู่ภายในได้ เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่ใช้กันแพร่หลายในตรวจสอบวัสดุอุตสาหกรรมมานาน เช่น การหล่อโลหะ การเชื่อมโลหะ การผลิตวัสดุต่าง ๆ การก่อสร้าง รวมทั้งการตรวจสอบอากาศยาน ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตในด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ทำให้การตรวจสอบโดยไม่ทำลายมีความสำคัญมากขึ้นตามไปด้วย เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการตรวจสอบวัสดุบางประเภทได้ดี และในบางกรณีสามารถให้ภาพที่มีรายละเอียดดีกว่ารังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เช่น ชิ้นงานที่มีส่วนประกอบเป็นธาตุเบา (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อธาตุเบาอยู่ปนกับธาตุหนัก) และสารกัมมันตรังสี เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนยังมิได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในประเทศไทย มีเพียงการศึกษาวิจัยทางด้านนี้เท่านั้น ทั้ง ๆ ที่มีประโยชน์มากถ้านำไปใช้งานให้เหมาะสม สาเหตุสำคัญน่าจะเนื่องมาจากไม่ทราบหลักการ และประโยชน์ของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน รวมทั้งยังมีปัญหาในทางปฏิบัติเพราะการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ให้ความเข้มนิวตรอนสูง เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องผลิตนิวตรอน (neutron generator) หรือต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีที่สามารถให้นิวตรอนออกมาสูงกว่าประมาณ 10^{6} นิวตรอนต่อวินาที

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

เมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อาจเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางได้ 4 แบบคือ โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟคท์ (photoelectric effect) การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering) การเกิดอิออนคู่ (pair production) และการกระเจิงแบบโคฮีเรนท์ (coherent scattering) การเกิดอันตรกิริยาเหล่านี้ทำให้รังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางไป

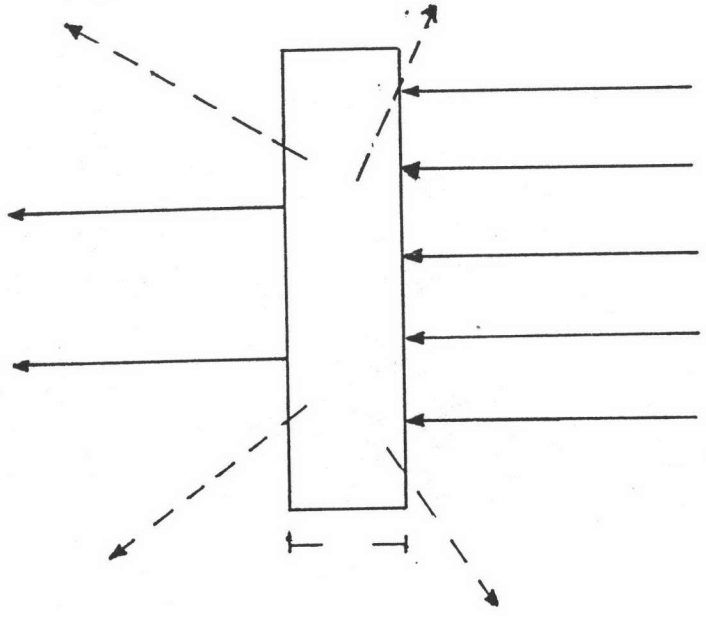
ได้มีความเข้มลดลงตามสมการดังนี้

$$I_x = I_o \exp(-\mu x) \quad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ I_x คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัสดุที่มีความหนา x ไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ

I_o คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่ตกกระทบวัสดุ

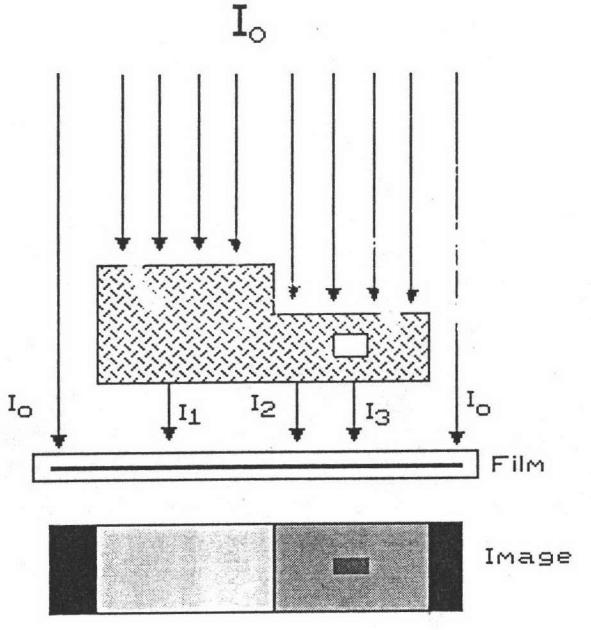
และ μ คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (attenuation coefficient) ของวัสดุที่พลังงานนั้น ๆ



$I_x = I_o \exp(-\mu x)$

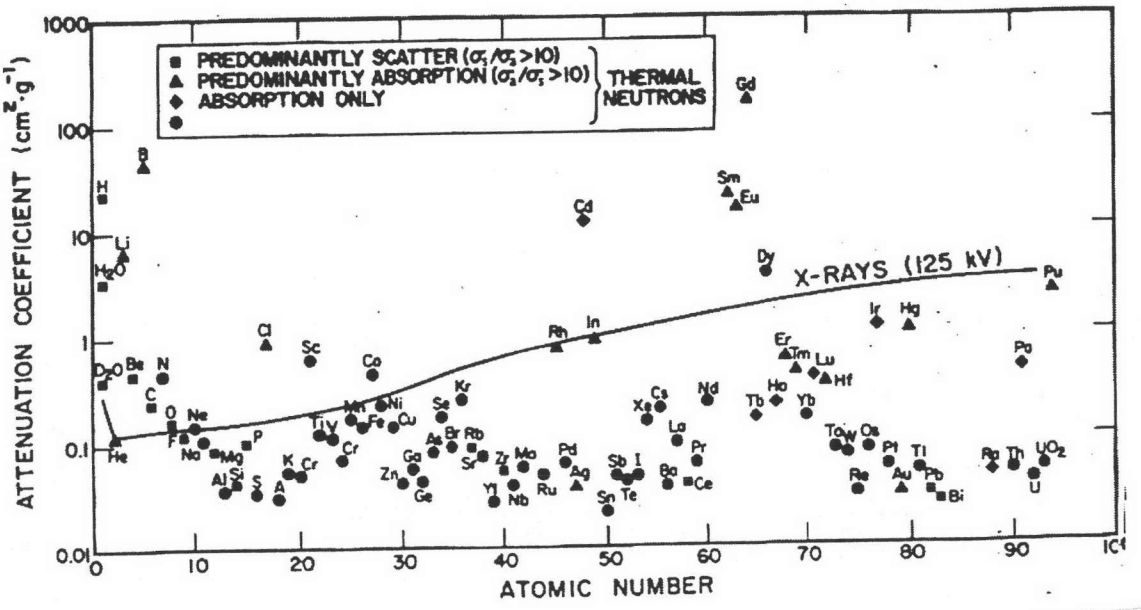
รูปที่ 2.1 แสดงการทะลุผ่านวัสดุของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา

เมื่อวัสดุมีความหนาหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านต่างกัน จะทำให้ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุไปได้แตกต่างไปด้วย ดังจะเห็นได้จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงการทะลุผ่านของรังสีผ่านชิ้นงานชิ้นหนึ่ง ที่มีความหนา x1 และ x2 นอกจากนี้ยังมีโพรงอากาศอยู่ในส่วนที่มีความหนา x2 ด้วย ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณที่รังสีผ่านมีความหนาลดลงเหลือเพียง (x2-Δx) ทำให้ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านไปได้ มีค่าเป็น I_{x1} , I_{x2} และ $I_{x2-\Delta x}$ ตามลำดับ จะได้ $I_{x2-\Delta x} > I_{x2} > I_{x1}$ เมื่อใช้ฟิล์มมาบันทึกความเข้มของรังสี ก็จะได้ภาพที่เป็นโปรเจคชัน (project) ของชิ้นงาน ซึ่งมีความดำแตกต่างกัน ตามความเข้มรังสีที่ตกกระทบฟิล์ม



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการเกิดภาพบนฟิล์มจากการถ่ายภาพรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ในช่วงของพลังงานที่เกิน 100 keV ที่ใช้กันอยู่ในการถ่ายภาพด้วยรังสีทางอุตสาหกรรมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่2.3 ที่แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 keV ซึ่งหมายความว่า ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของธาตุที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกันจะมีค่าต่างกัน

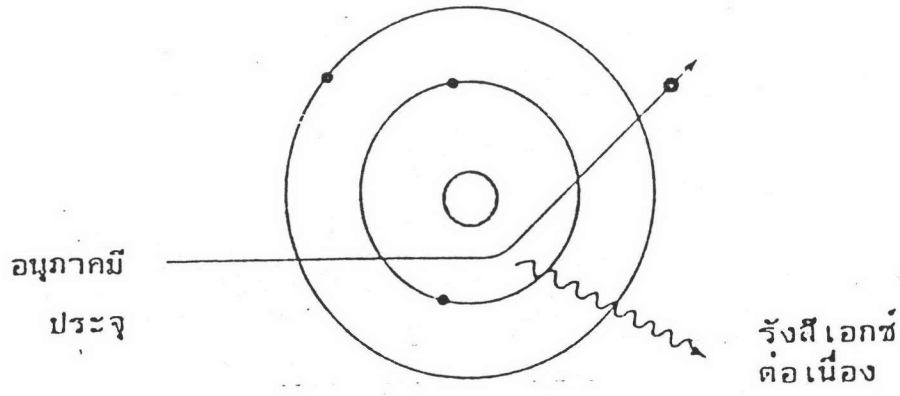


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์ และนิวตรอน กับเลขอะตอม

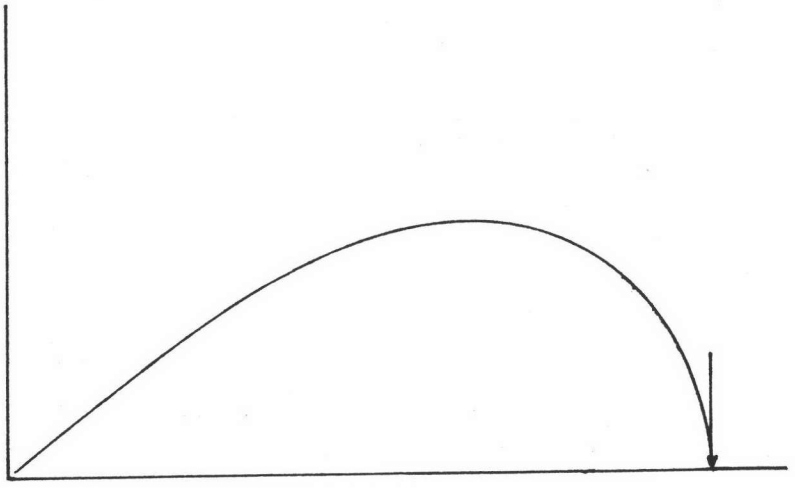
การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ต้นกำเนิดรังสี ชิ้นงาน และส่วนบันทึก หรือแสดงภาพ

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

โดยทั่วไป รังสีเอกซ์ผลิตจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งใช้หลักการของการเกิด "เบรมส์สตราห์ลุง (bremsstrahlung)" โดยการยิงอิเล็กตรอนไปยังเป้าโลหะ (Target) อิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของอะตอม ทำให้เกิดความเร่ง และ ความหน่วง พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะสูญเสียออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ การสูญเสียพลังงานนี้เป็นไปแบบ random การสูญเสียพลังงานแต่ละครั้งจึงแตกต่างกัน แต่มีค่าสูงสุดได้ไม่เกินพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งชนเป้าโลหะ รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จึงมีพลังงานแบบต่อเนื่อง จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

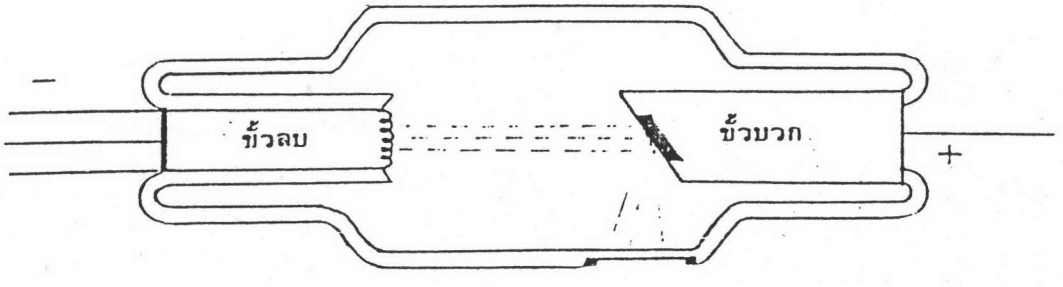


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) แผนภาพแสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง
จากการเร่งอิเล็กตรอนเข้าชนเป้าโลหะ
(ข) ลักษณะของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.5 ลักษณะทั่วไปของหลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์เป็นหลอดแก้วสูญญากาศเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ของไส้หลอด และทำให้อิเลคตรอนเคลื่อนตัวได้ง่ายที่ตัวหลอดประกอบด้วยขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathode) ที่ขั้วบวกมี target ประกอบติดอยู่ และมีช่องระบายความร้อน ขั้วลบเป็นที่ติดตั้งไส้หลอด (filament) และมี focusing cup ครอบอยู่ด้วยการทำงานของหลอดรังสีเอกซ์พอจะอธิบายเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ขั้วลบเป็นแหล่งเกิดอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากการป้อนกระแสไฟเข้าไปยังไส้หลอด เมื่อไส้หลอดซึ่งทำจากทังสะเตน ได้รับความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุทังสะเตนหลุดออกมาเป็นอิสระอยู่รอบ ๆ ไส้หลอด (เรียกว่า "thermionic emission") ปริมาณของอิเล็กตรอนสามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณของกระแสไฟเป็นมิลลิแอมแปร์

2. เมื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ โดยให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage) เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนตัวจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูง โดยทั่วไปรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าอย่างต่ำประมาณ 50 กิโลโวลต์

3. focusing cup ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนตัวในทิศทางที่ต้องการ

4. target ประกอบติดอยู่ที่ขั้วบวก ส่วนมากทำจาก ทังสะเตน ทองแดงโซเดียม สาเหตุที่ใช้ทังสะเตน เพราะว่าเป็นธาตุที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งผลิตรังสีได้มากและคุณสมบัติอีกประการหนึ่งคือ ทนความร้อนสูง เมื่ออิเล็กตรอนพุ่งชนเป้าโลหะด้วยความเร็วสูง จะเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องออกมา พลังงานสูงสุดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวก-ขั้วลบ ส่วนความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้กับไส้หลอดทังสะเตน

การใช้หลอดรังสีเอกซ์ มีข้อได้เปรียบรังสีแกมมาตรงที่สามารถเปิด-ปิดได้ รวมทั้งสามารถปรับพลังงานและความเข้มได้ นอกจากนี้ยังมีขนาดของจุดโฟกัสเล็กกว่าขนาดของต้นกำเนิดรังสีแกมมา จึงทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมากกว่า

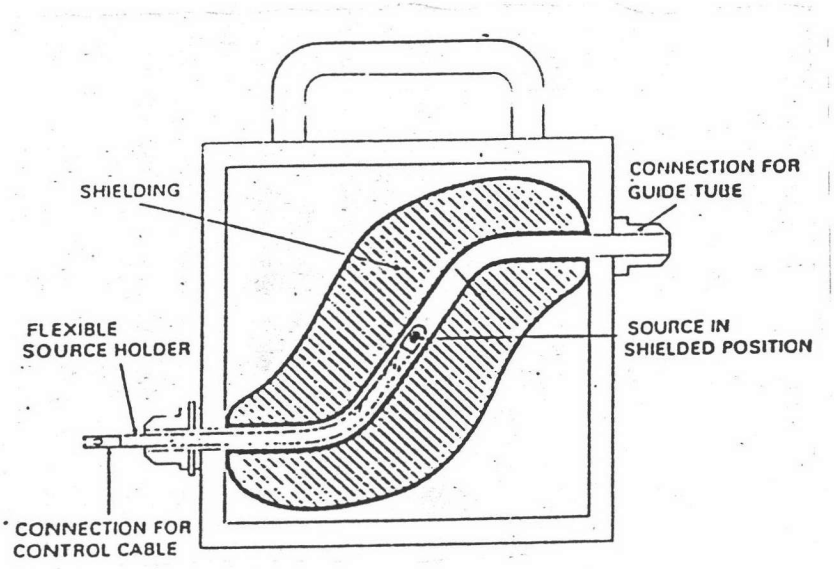
ตารางที่ 2.1 พลังงานสูงสุดของรังสีเอกซ์กับความหนาของชิ้นงานที่สามารถถ่ายภาพได้

ศักดาไฟฟ้าสูงสุดของเครื่อง (กิโลโวลต์)	ความหนาสูงสุดของเหล็กที่สามารถถ่ายภาพได้ (นิ้ว)
150	1.5
250	3
400	4
1,000	6
2,000	8
24,000	20

<u>ต้นกำเนิดรังสีแกมมา</u> รังสีแกมมาที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ได้มาจากไอโซโทปรังสีของธาตุบางชนิด ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่นิยมใช้ในงานถ่ายภาพด้วยรังสีทางอุตสาหกรรม มี 3 ชนิด คือ โคบอลต์-60 (^{60}Co) อิริเดียม-192 (^{192}Ir) และ ซีเซียม-137 (^{137}Cs) ซึ่งแต่ละชนิดให้รังสีแกมมาพลังงานต่างกันจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดและความหนาของชิ้นงาน คุณสมบัติที่สำคัญของต้นกำเนิดรังสีแกมมาทั้งสามชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่นิยมใช้

ชนิดต้นกำเนิดรังสีแกมมา	ครึ่งชีวิต	พลังงานของรังสีแกมมา (keV)	ความหนาสูงสุดของเหล็กที่สามารถถ่ายภาพได้ (นิ้ว)
^{60}Co	5.26 ปี	1173 , 1332	0.9
^{137}Cs	30 ปี	662	0.6
^{192}Ir	74 วัน	296 - 612	0.3



รูปที่ 2.6 ลักษณะต้นกำเนิดรังสีแกมมา สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี

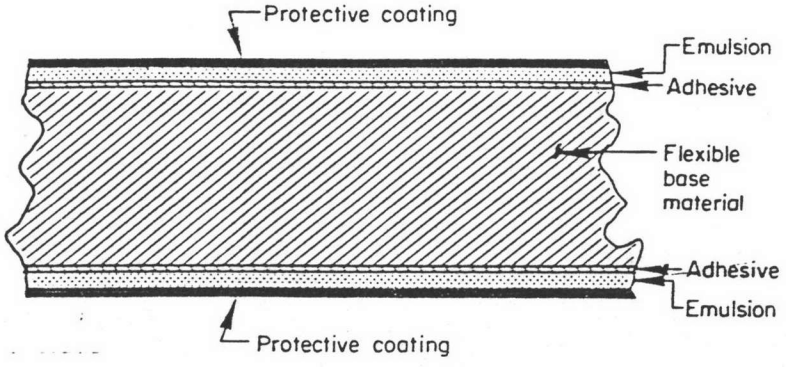
ชิ้นงาน

ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา รังสีจะผ่านเข้าไปยังชิ้นงาน แล้วส่วนที่ทะลุผ่านออกไปยังอีกด้านหนึ่ง ที่มีอุปกรณ์รับภาพอยู่ ซึ่งอาจเป็นฟิล์มหรือฉากเรืองรังสีพร้อมระบบแสดงผลทางจอภาพ ลักษณะความหนาและธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชิ้นงานจะมีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่จะได้ ลักษณะชิ้นงานที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนอาจทำให้บางส่วนบดบังกันจนไม่สามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพได้ ความหนาของชิ้นงานมีผลต่อความคมชัด (sharpness) ของภาพ พลังงาน และความเข้มของรังสีที่ต้องใช้ ส่วนองค์ประกอบของชิ้นงานมีผลกระทบต่อคุณภาพของภาพที่จะได้มากเช่นกัน ธาตุเบาที่ถูกห่อหุ้ม หรือ ถูกบดบังด้วยธาตุหนัก อาจไม่สามารถมอง

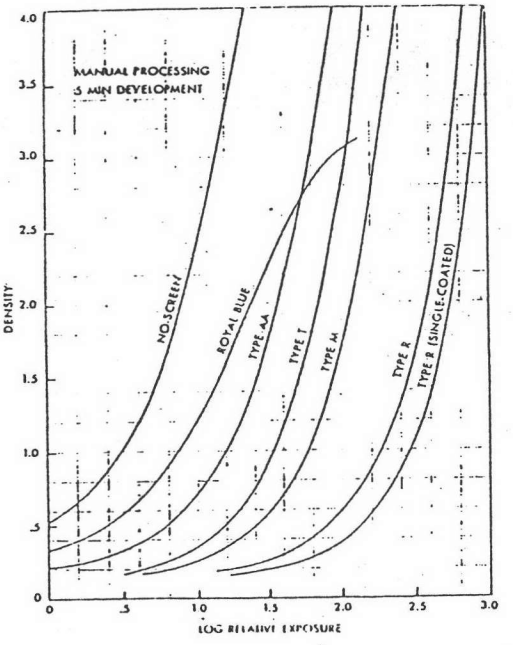
เห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ชิ้นงานบางชนิด มีสัมประสิทธิ์การกระเจิง (scattering coefficient) สูง เช่น ชิ้นงานที่เป็นคอนกรีต ความคมชัด และความเปรียบต่าง (contrast) ของภาพไม่ดี

อุปกรณ์รับภาพ

โดยทั่วไปมักใช้ฟิล์มในการรับและบันทึกภาพถ่ายด้วยรังสี บริเวณที่มีรังสีตกกระทบมากจะมีความดำมากกว่าบริเวณที่มีรังสีตกกระทบน้อยลง ตามลำดับ ชนิดของฟิล์มมีความแตกต่างกันในด้านความเร็วของฟิล์ม (film speed) และความละเอียดของเม็ดเงินโบรไมด์ในชั้นอิมัลชัน (emulsion) ฟิล์มสามารถจำแนกอย่างกว้าง ๆ ออกเป็น 3 ประเภท ตามความเร็วของฟิล์ม คือ ฟิล์มความเร็วสูง กลาง และต่ำ โดยที่มีความละเอียดของเม็ดเงินโบรไมด์หยาบ ปานกลาง และละเอียด ตามลำดับ การใช้ฟิล์มความเร็วสูง จะใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้น แต่อาจสูญเสียรายละเอียดของภาพไปบ้าง นอกจากนี้ ฟิล์มแต่ละชนิด ยังให้ภาพที่มีความเปรียบต่างแตกต่างกัน ซึ่งผู้ใช้สามารถพิจารณาได้จากความชัน (slope) กราฟลักษณะเฉพาะของฟิล์ม (film characteristic curve) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะภาพตัดของฟิล์ม ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และแกมมา



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟลักษณะเฉพาะของฟิล์มโกดักที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ภาพที่มีคุณภาพดีจะต้องมีคุณสมบัติสำคัญ 4 ประการ คือ มีความดำพอเหมาะ มีความคมชัดสูง มีความเปรียบต่างสูงและมีความบิดเบือน (distortion) น้อย

- ความดำของภาพ สามารถควบคุมได้จากค่าเอกซ์โพเซอร์ (exposure) ที่ใช้ในการถ่ายภาพ สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ค่าเอกซ์โพเซอร์เป็นผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ไส้หลอด (ขั้วลบ) ของหลอดรังสีเอกซ์ (เป็น "มิลลิแอมแปร์ (mA)") กับเวลาในการถ่ายภาพ เช่น มิลลิแอมแปร์-นาที ส่วนการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา เป็นผลคูณของความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี (เป็น "คูรี (Ci)") กับเวลา เช่น คูรี-นาที , คูรี-วินาที ที่ค่า mA คงที่ค่าหนึ่ง การปรับความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ จะทำให้ทั้งพลังงาน และความเข้มของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นด้วย

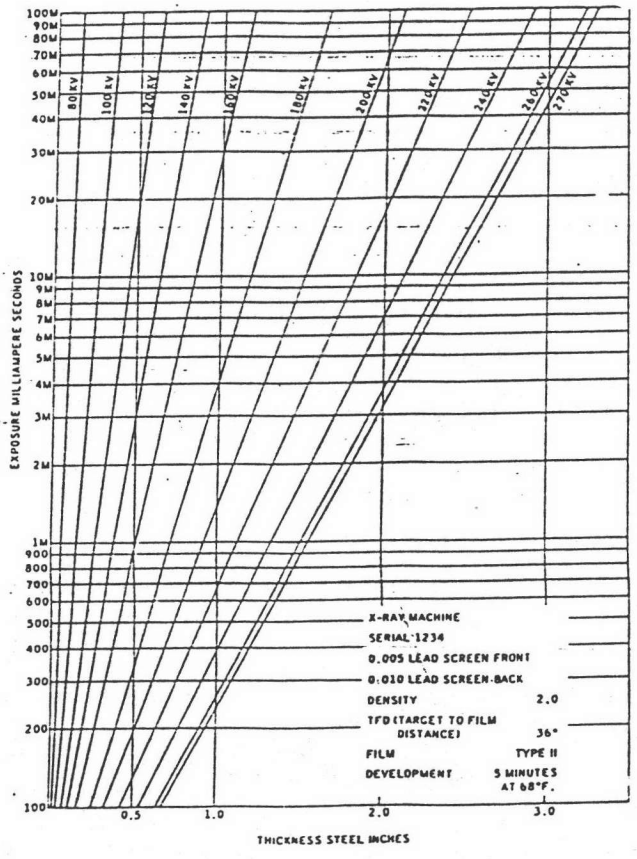
- ความคมชัด ขึ้นอยู่กับขนาดจุดโฟกัส (focal spot) ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ หรือขนาดของต้นกำเนิดรังสีแกมมา ความหนาของชิ้นงาน ชนิดของฟิล์มที่ได้ และการจัดวางต้นกำเนิดรังสี ชิ้นงาน และฟิล์ม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

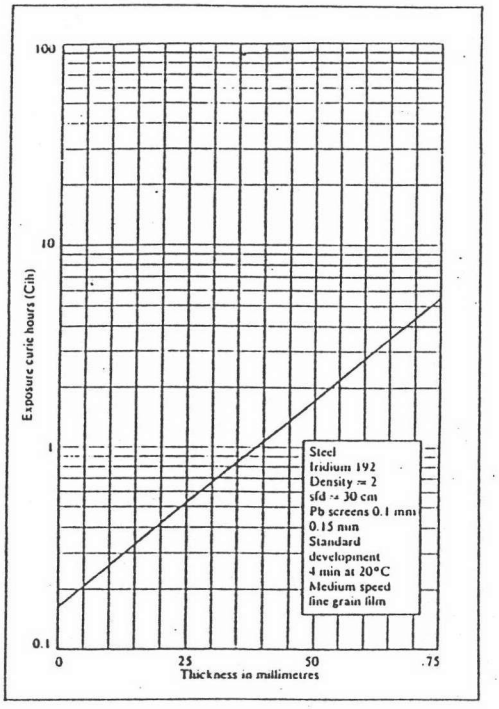
- ความเปรียบต่าง ขึ้นอยู่กับพลังงานรังสีที่ใช้ ส่วนประกอบ และความแตกต่างของความหนาของชิ้นงานแต่ละส่วน รวมทั้งชนิดของฟิล์มที่ใช้ และการควบคุมการกระเจิงของรังสีในขณะทำการถ่ายภาพ

- ความบิดเบือน หมายถึง ความแตกต่างของภาพที่ได้กับชิ้นงาน ซึ่งจะต้องเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันที่สุด สามารถควบคุมได้ โดยการจัดวางต้นกำเนิดรังสี ชิ้นงาน และ ฟิล์มบันทึกภาพให้เหมาะสม กล่าวคือ แนวกึ่งกลางลำรังสี ควรอยู่ในแนวตั้งฉากกับกึ่งกลางของชิ้นงานและฟิล์ม

ในทางปฏิบัตินิยมใช้กราฟเอกซ์โพเชอร์ (exposure curve) ในการหาค่าเอกซ์-โพเชอร์ที่เหมาะสมกับความหนา และชนิดของวัสดุอื่น ๆ สามารถเทียบเป็นความหนาของเหล็กได้ โดยใช้ตารางที่ 2.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟเอกซ์โพเชอร์ สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี

(ก) รังสีเอกซ์

(ข) รังสีแกมมา

ตารางที่ 2.3 ค่า Steel Equivalence Thickness (SET) ของวัสดุบางชนิด

	X-RAYS KV							GAMMA RAYS		
	50	100	150	220	400	1000	2000	Ir 192	Cs-137	Co-60
MAGNESIUM	0.6	0.6	0.05	0.08				0.22	0.22	0.22
ALUMINUM	1.0	1.0	0.12	0.18				0.34	0.34	0.34
TITANIUM		8.0	0.63	0.71	0.71	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
STEEL		12.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
COPPER		18.0	1.6	1.4	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
ZINC			1.4	1.3	1.3	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0
BRASS			1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
LEAD			14.0	12.0		5.0	2.5	4.0	3.2	2.3