

บทที่ 2

กระบวนการแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซเรย์ทางจอภาพ

การถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นเทคนิคการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย (NDT) ที่มีบทบาทสูง ในงานด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ไม่ว่าจะเป็นงานในสาขาใดที่ต้องการมองเห็น โครงสร้างภายในหรือสิ่งบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในวัสดุตัวอย่าง โดยไม่ต้องกระทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนสภาพ สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ได้เริ่มนำเสนอในทางฟิสิกส์การแพทย์ครั้งแรกในการประชุมวิชาการ Physio-Medical Society of Würzburg เมื่อ เดือนมกราคม ค.ศ. 1896 หลังจากที่ Prof. Wilhelm Conrad Röntgen ค้นพบรังสีเอกซ์ในเดือนพฤศจิกายน 1895^[3] ต่อมาได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้าน การตรวจสอบวัสดุทางอุตสาหกรรมและได้รับการพัฒนามาตลอด โดยเฉพาะการออกแบบกระบวนการในการแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์ทางจอภาพแทนการถ่ายภาพลงบนฟิล์ม ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคทางการกำเนิดภาพและการสร้างสัญญาณภาพตลอดจนการประมวลสัญญาณด้วยระบบคอมพิวเตอร์

2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

2.1.1 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ที่มีพลังงานจลน์ในตัว ไม่มีมวล และไม่มีประจุ สามารถทะลุวัสดุต่างๆ ได้ดี มีแหล่งกำเนิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอนุภาคบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ตามทฤษฎีควอนตัมมีลักษณะคล้ายก้อนพลังงานเรียกว่า “ โฟตอนรังสีเอกซ์ ” จึงมีพฤติกรรมคล้ายอนุภาค โดยพลังงานของโฟตอนมีค่า^[4]

$$E = h\nu \quad \dots(2.1)$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานของโฟตอน (eV)
	h	คือ	ค่าคงที่ของ Planck (4.135×10^{-15} eV.s)
	ν	คือ	ความถี่ของคลื่น (Hz)
	c	คือ	ความเร็วแสง (2.998×10^{10} cm/s)
	λ	คือ	ความยาวคลื่น (cm)

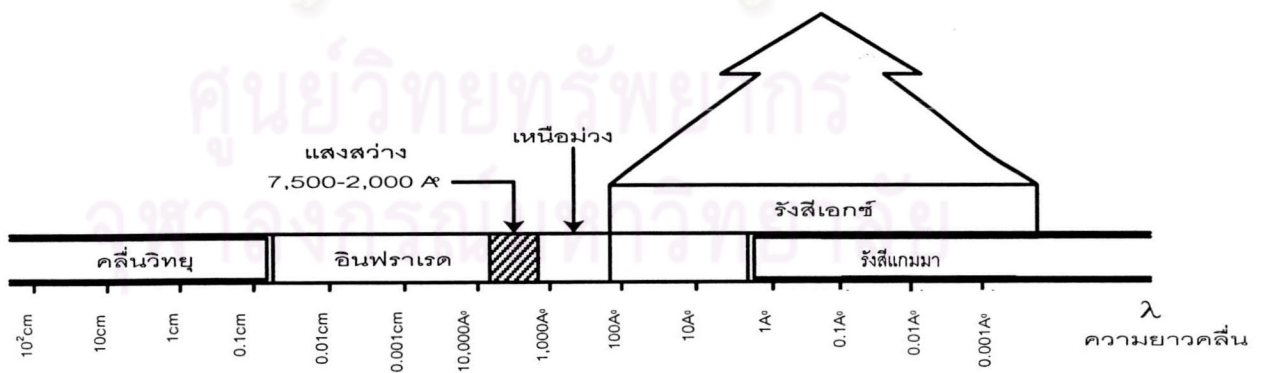
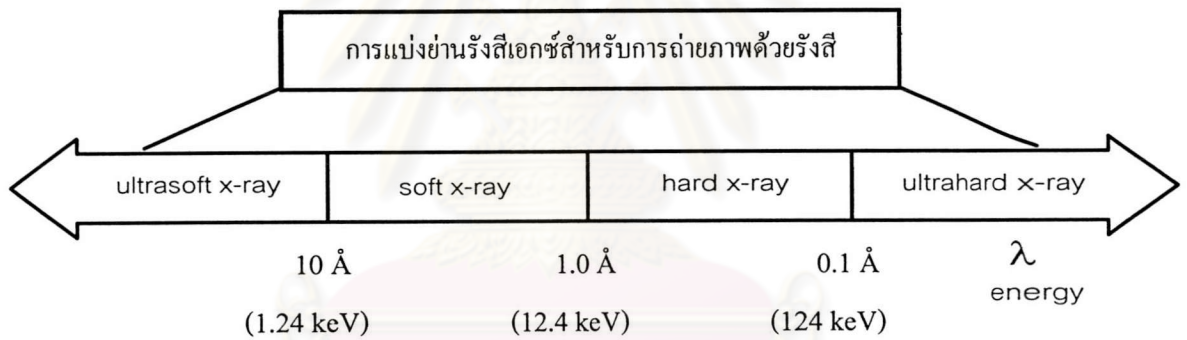
ในงานด้านการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ได้มีการจัดแบ่งช่วงของรังสีเอกซ์ไว้ตามลักษณะการใช้งานด้านต่างๆดังนี้

ก. รังสีเอกซ์พลังงานสูงมาก (ultrahard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1 Å (124 keV) ขึ้นไป

ข. รังสีเอกซ์พลังงานสูง (hard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1.0 Å ถึง 0.1 Å (12.4 keV ถึง 124 keV)

ค. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 10 Å ถึง 1 Å (1.24 keV ถึง 12.4 keV)

ง. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำมาก (ultrasoft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 10 Å (1.24 keV) ลงมา



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์^[5]

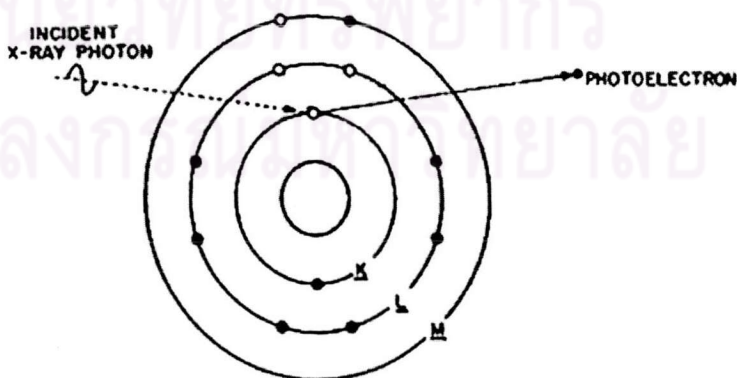
เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนผ่านเข้าไปในวัสดุหรือสสารใดๆจะทำอันตรกิริยากับอะตอมของโครงสร้างของวัสดุนั้น และสูญเสียพลังงานไปภายในวัสดุนั้น โดยมีโอกาสเกิดอันตรกิริยาสำคัญได้ 4 แบบ คือ^[6]

- ก. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect ; PE)
- ข. การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering ; C)
- ค. แพร์โปรดักชัน (Pair Production ; PP)
- ง. การกระเจิงแบบเรย์เลย์ (Rayleigh scattering ; R)

ก. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นอันตรกิริยาที่เกิดเมื่อโฟตอนเคลื่อนผ่านเข้าไปในวัสดุ และถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในโครงสร้างอะตอม มีผลให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจร (K, L, M, \dots) ของอะตอมได้รับพลังงานเพิ่มสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส (binding energy) และหลุดพ้นจากวงโคจรไป โฟตอนหายไป ดังแผนภาพรูปที่ 2.2 อิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้เรียกว่า “โฟโตอิเล็กตรอน” มีพลังงานเป็น

$$E_e = h\nu - E_b \quad \dots(2.3)$$

- เมื่อ E_e คือ พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน
 $h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน
 E_b คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของโฟโตอิเล็กตรอนในชั้นโคจร



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก^[4]

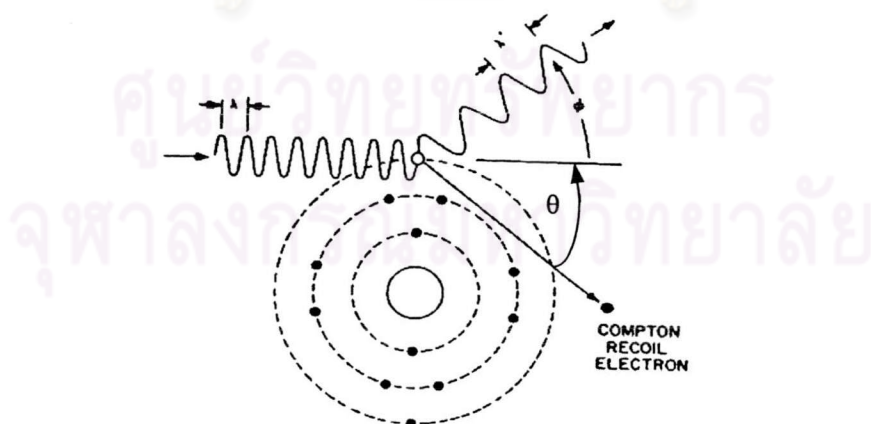
ผลที่ตามมาคือภาวะไม่สมดุลในวงโคจรที่พร้อมจำนวนอิเล็กตรอน ทำให้อะตอมปรับภาวะสมดุลโดยอิเล็กตรอนในชั้นโคจรถัดไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่า จะลดระดับพลังงานลงให้เท่ากับพลังงานในชั้นโคจรที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปเพื่อเข้าแทนที่ โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” (characteristic x-ray) ซึ่งจะมีค่าพลังงานเฉพาะชั้นพลังงานของอะตอมของธาตุนั้น การแทนที่ในชั้นโคจรจะเกิดตามลำดับชั้นจนกว่าอะตอมจะอยู่ในภาวะสมดุล การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะมีโอกาสเกิดได้ดีกับอะตอมธาตุหนัก และจะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงขึ้น

ข. การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนของอะตอมในวงโคจรชั้นนอกหรืออิเล็กตรอนอิสระในแถบนำไฟฟ้า หลังการทำอันตรกิริยาโฟตอนจะสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอนบางส่วน มีผลให้อิเล็กตรอนและโฟตอนหลังการถ่ายโอนพลังงานกระเจิงออกจากกันทำมุม θ และ ϕ ตามลำดับ ดังแผนภาพรูปที่ 2.3 อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกไปเรียกว่า “รีคอยส์อิเล็กตรอน” และโฟตอนกระเจิง (scattered photon) จะมีพลังงานเป็น

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu(1 - \cos \phi)}{0.511}} \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ $h\nu'$ คือ พลังงานของโฟตอนกระเจิง

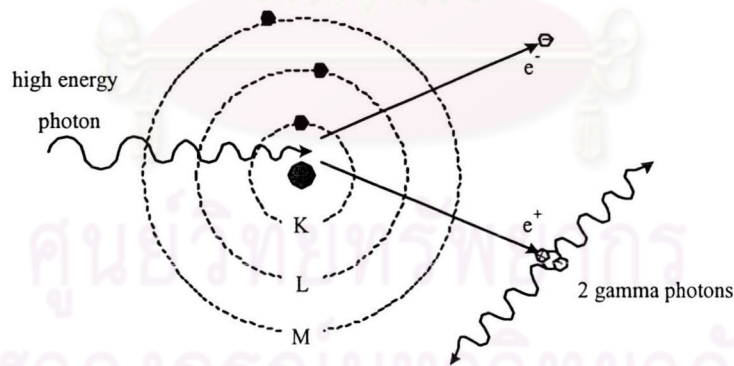
$h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน



รูปที่ 2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน^[4]

การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะมีโอกาสเกิดได้ดีกับอะตอมธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ และถ้าโฟตอนกระเจิงมีพลังงานสูงพอที่จะถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรให้มีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวก็จะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนและเกิดการสูญเสียพลังงานของโฟตอนกระเจิงภายในอะตอมวัสดุได้อีก

ค. การเกิดเพอร์โฟลัดกชัน เป็นอันตรกิริยาของโฟตอนที่มีพลังงานสูงเกินกว่าค่าสมมูลมวลนิ่งของอิเล็กตรอนสองเท่า หรือ 1.02 MeV เคลื่อนฝ่าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรชั้นต่าง ๆ เข้าทำอันตรกิริยาบริเวณสนามคูลอมบ์ใกล้นิวเคลียส มีผลให้พลังงานของโฟตอนสูญหายไป และเกิดมวลคู่ของอิเล็กตรอนที่รับประจุในสนามไฟฟ้าบวกและลบ คือ โพสิตรอนและอิเล็กตรอนตามลำดับ โดยอนุภาคทั้งสองจะแบ่งรับพลังงานจากโฟตอนไป แต่เนื่องจากโพสิตรอนไม่สามารถจะอยู่อิสระได้ ดังนั้นหลังการถ่ายโอน พลังงานจากตัวมันออกไปจะเกิดการสลายมวล (annihilation) ด้วยการจับอิเล็กตรอนให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานสมมูลมวลของอิเล็กตรอน (0.511 MeV) 2 ตัว ทำมุม 180° ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดเพอร์โฟลัดกชัน^[4]

ง. การกระเจิงแบบเรย์เลย์ เป็นอันตรกิริยาที่โฟตอนพลังงานต่ำทำอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุ และมีผลเพียงทำให้อะตอมเกิดการสั่น แต่พลังงานอะตอมไม่เปลี่ยนแปลง โฟตอนไม่สูญเสียพลังงานเพียงแต่เปลี่ยนทิศทางไปเท่านั้น

2.1.2 การลดทอนของปริมาณรังสีเอกซ์ในวัสดุ

จากอันตรกิริยาของโฟตอนกับวัสดุจะเห็นว่าโฟตอนมีโอกาสทำอันตรกิริยากับอะตอมของวัสดุ และสูญเสียพลังงานไปได้ใน 3 ลักษณะคือ ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการเกิดแพร์โพดักชัน โอกาสของการเกิดการสูญเสียพลังงานของโฟตอนจากอันตรกิริยาแต่ละชนิด จึงเปรียบเสมือนพื้นที่หน้าตัด (cross-section) ของการรองรับอันตรกิริยาชนิดต่างๆ ดังนี้

$$\sigma = \sigma_{PE} + \sigma_C + \sigma_{PP} \quad \dots(2.5.ก)$$

ซึ่งมีผลให้เกิดการลดทอนปริมาณรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient ; μ) พื้นที่หน้าตัด ในการรับรองอันตรกิริยาในวัสดุแต่ละชนิดจะให้ความสามารถให้เกิดอันตรกิริยามากน้อยเพียงใดขึ้น กับความหนาแน่นของอะตอมและโอกาสในการเกิดอันตรกิริยา ($N\sigma$) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น^[6]

$$\mu = \tau(\text{photoelectric}) + \sigma(\text{compton}) + k(\text{pair production}) \quad \dots(2.5.ข)$$

ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนโฟตอนมักจะแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้^[7]

1. ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient หรือ total attenuation coefficient, μ) มีหน่วยเป็น cm^{-1}
2. ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient , μ_m)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{cm}^2/\text{g}$$

3. ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงอะตอม (atomic absorption coefficient ; μ_a)

$$\mu_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N} = \frac{\mu}{N} \quad \text{cm}^2/\text{atom}$$

เมื่อ N คือ เลขอะโวกาโดร (6.02×10^{23} atom/mol)

A คือ น้ำหนักอะตอม (g/mol)

ρ คือ ความหนาแน่นของธาตุ (g/cm^3)

n คือ จำนวนอะตอมต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย (atom/cm^3)

N/A คือ จำนวนอะตอมต่อน้ำหนัก (atom/g)

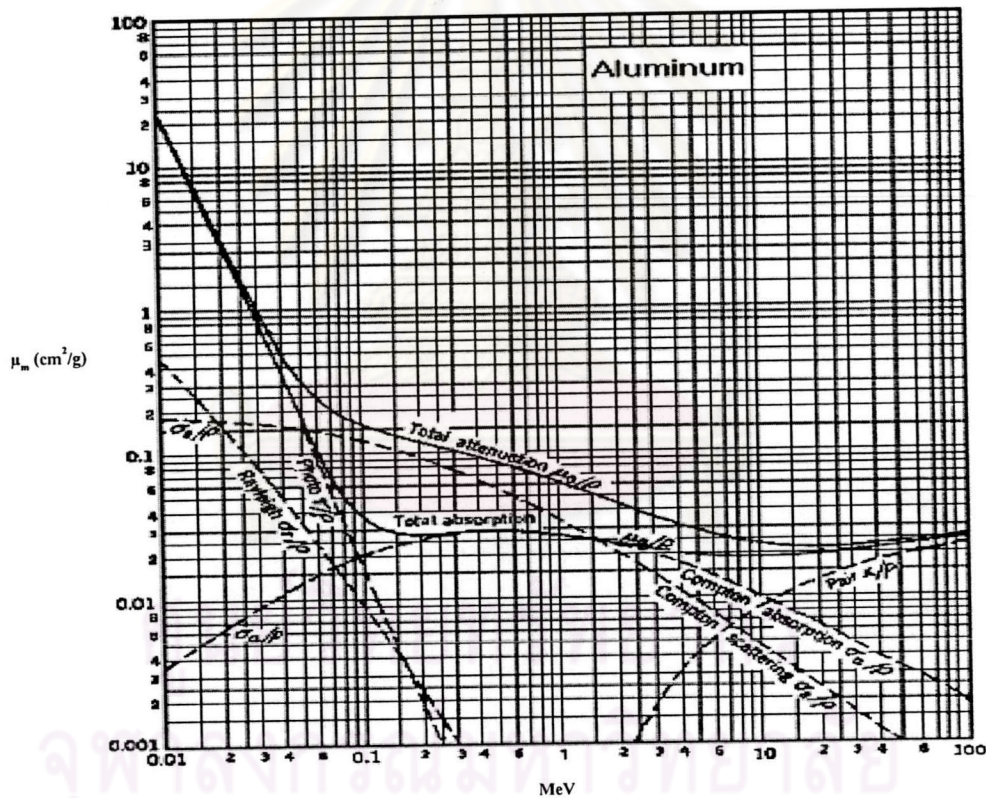
4. ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนโมลาร์ (molar absorption coefficient, μ_{mol})

$$\mu_{\text{mol}} = (\mu/\rho)/A \quad \text{cm}^2/\text{mol}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณรังสีทั้ง 4 ชนิดจะเป็นดังนี้

$$\mu = \mu_m \rho = \mu_a \rho (N/A) = \mu_{\text{mol}} \rho / A \quad \dots(2.6)$$

โอกาสในการสูญเสียพลังงานจากอันตรกิริยาแต่ละชนิดของโฟตอนในวัสดุใด ๆ จะขึ้นกับเลขอะตอมและส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในวัสดุของนั้นรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของอลูมิเนียมกับพลังงานของโฟตอน



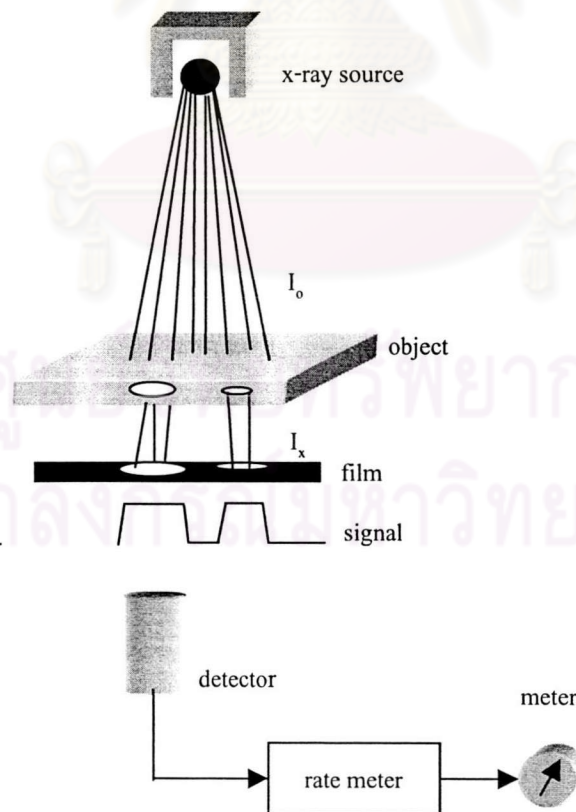
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับพลังงานของโฟตอนในอลูมิเนียม^[7]

2.1.3 องค์ประกอบของการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์อาศัยคุณสมบัติในการทะลุทะลวงของรังสีเอกซ์ผ่านเนื้อวัสดุอันเป็นผลจากพฤติกรรมการทำอันตรกิริยาของโฟตอนรังสีเอกซ์กับวัสดุ ทำให้โฟตอนส่วนหนึ่งสูญเสียพลังงานและสูญหายไป ส่วนที่เหลือจะผ่านออกมายังเครื่องวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่บริเวณต่างๆ ปริมาณความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มรังสีเริ่มต้นตามกฎหมายของแลมเบอร์ต (Lambert's law) ดังนี้^[4]

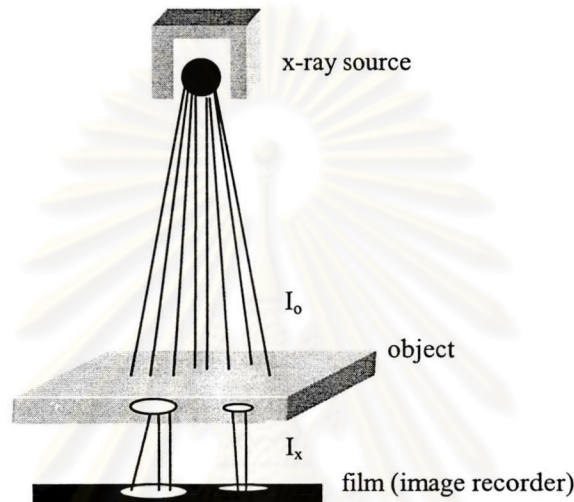
$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots(2.7)$$

- เมื่อ I_x คือ ปริมาณความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุโดยไม่ทำอันตรกิริยาใด ๆ ในเนื้อวัสดุ
 I_0 คือ ปริมาณความเข้มรังสีที่ตกกระทบวัสดุ
 μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณรังสี (cm^{-1})
 x คือ ความหนาของวัสดุ (cm)



รูปที่ 2.6 แผนภาพการวัดปริมาณรังสีเอกซ์หลังผ่านเนื้อวัสดุที่บริเวณต่าง ๆ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.6 สามารถจัดองค์ประกอบของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ได้ดังรูปที่ 2.7 โดยการจับอุปกรณ์บันทึกภาพถ่ายรังสีเอกซ์แทนบริเวณการวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี อุปกรณ์บันทึกภาพถ่ายรังสีดั้งเดิมใช้แผ่นฟิล์มถ่ายรูป (photographic film) ปริมาณรังสีส่งผ่านที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มจะทำให้เกิดภาพแฝง (latent image) บนสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นเซลลูลอสเมื่อผ่านกระบวนการล้างฟิล์มจะได้ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นภาพ negative

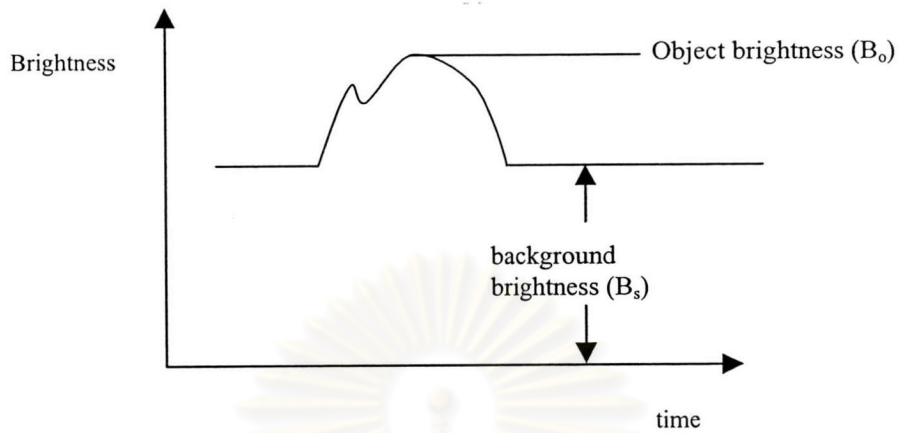


รูปที่ 2.7 องค์ประกอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพด้วยรังสีจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อภาพถ่ายรังสีอันได้แก่ ความคมชัด (sharpness) ความเปรียบต่าง (contrast) และการบิดเบือนภาพ (distortion)

- ก. ความเปรียบต่างของรายละเอียดภาพเกิดจากความแตกต่างของปริมาณความเข้มรังสีในเชิงสัญญาณภาพ (brightness) ที่บริเวณต่างๆ อันเป็นผลจากความแตกต่างของเนื้อวัสดุ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงาน (μ) ตามสมการที่ 2.7 ซึ่งขึ้นกับพลังงานของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ ดังนั้น การเลือกพลังงานที่เหมาะสมจะทำให้ได้ภาพที่มีความเปรียบต่างดี ในรูปที่ 2.8 ความเปรียบต่างในเชิงสัญญาณได้นิยามไว้ดังนี้^[8]

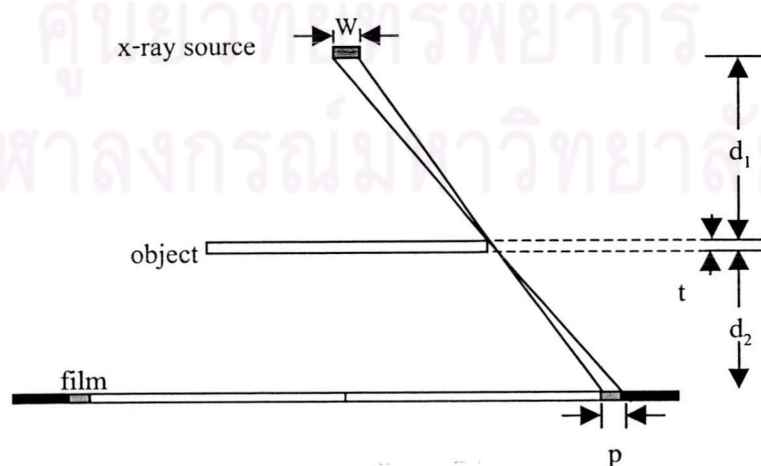
$$\text{contrast} = \frac{B_0 - B_s}{B_s} \quad \dots(2.8)$$



รูปที่ 2.8 แสดงความเปรียบต่างในเชิงสัญญาณภาพ^[6]

ความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสีจะมีผลให้ระดับความเข้มรังสีหรือความสว่างของสัญญาณภาพเพิ่มขึ้นแต่จะไม่ช่วยให้ความเปรียบต่างดีขึ้น ถ้าเป็นการถ่ายภาพด้วยเทคนิคฟิล์มบันทึกภาพจะเป็นการช่วยให้เวลาในการถ่ายภาพ (exposure time) ลดลง

ข. ความคมชัดของภาพ เมื่อพิจารณาการจัดวางอุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยรังสีตามปัจจัยทางเรขาคณิตจะพบตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเงาซ้อน (penumbra, p) คือขนาดของจุดโฟกัส (W) ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับวัตถุ (d_1) และระยะห่างระหว่างวัตถุกับฟิล์ม (d_2) กับฟิล์มดังแผนภาพในรูปที่ 2.9 และสมการที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าการเกิดเงาซ้อนมีผลให้ภาพมีขนาดความคมชัด



รูปที่ 2.9 แผนภาพเชิงเรขาคณิตของการจัดอุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์^[9]

จากแผนภาพเรขาคณิตในรูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เป็นตัวแปรดังกล่าวมาแล้วให้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$p = w \frac{(d_2 + t)}{d_1} \quad \dots(2.9)$$

เมื่อ p คือ ขนาดของขอบเงาซ้อนที่ทำให้ภาพมัว

w คือ ขนาดของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

t คือ ความหนาของวัสดุชิ้นงาน

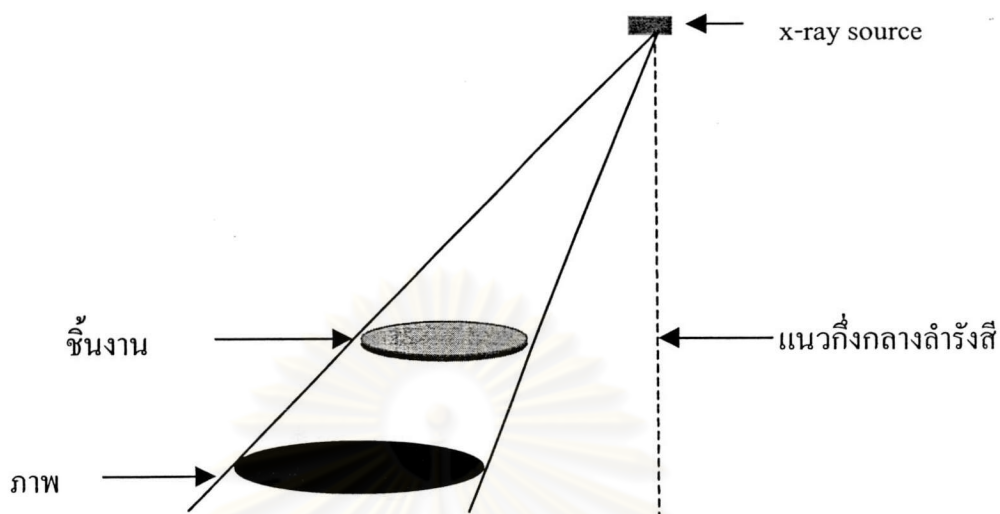
d_2 คือ ระยะระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม

d_1 คือ ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน

ดังนั้นจากสมการที่ 2.9 จะเห็นว่าการลดขนาดของเงาซ้อน (p) สามารถปรับตัวแปรใน สมการเพื่อให้ได้ความคมชัดของภาพสูงได้ 3 กรณีคือ

1. ลดระยะห่างระหว่างวัสดุฟิล์ม (d_2) ให้น้อยที่สุด คือวัสดุทดสอบกับฟิล์มสัมผัสกันจะได้ขนาดภาพกับขนาดวัสดุเท่ากัน
2. เพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับวัสดุทดสอบ (d_1) จะมีผลให้ต้องเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีมากขึ้นเนื่องจากปริมาณรังสีเริ่มต้น (I_0) ลดลง
3. ลดขนาดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสี (w) ซึ่งจะต้องใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีโฟกัสเล็กมาก (microfocus x-ray source) มีราคาสูงแต่สามารถจะจัดระบบถ่ายภาพให้มีกำลังขยายของภาพวัสดุได้โดยเพิ่มระยะห่างระหว่างวัสดุทดสอบกับฟิล์ม

ค. การบิดเบือนของภาพ ปัจจัยทางเรขาคณิตอีกประการหนึ่งในการจัดต้นกำเนิดรังสีกับแนวทำมุมผ่านสิ่งบกพร่องที่จะถ่ายภาพเพื่อหลีกเลี่ยงการซ้อนกันของบริเวณสิ่งบกพร่องมักจะทำให้เกิดการบิดเบือนของภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นการจัดวางตำแหน่งต้นกำเนิดรังสีและชิ้นงานทดสอบจะต้องวางแผนให้ถูกต้อง



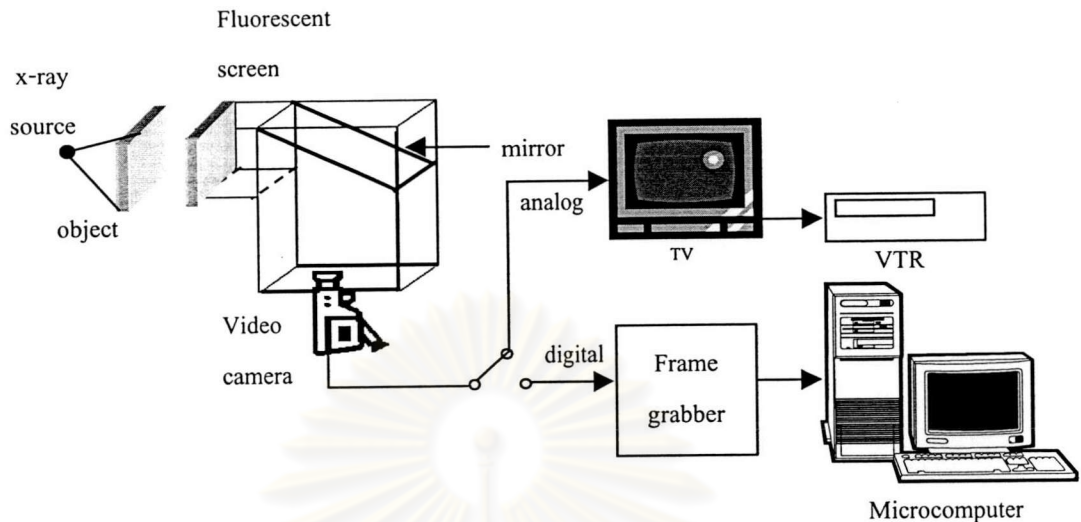
รูปที่ 2.10 แสดงการบิดเบือนของภาพถ่ายรังสีเนื่องจากแนวกึ่งกลางลำรังสีไม่ตั้งฉากกับชิ้นงานและฟิล์ม^[9]

2.1.4. การแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์บนจอภาพ

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ดั้งเดิมจะรู้ผลการถ่ายภาพได้จะต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์มไม่สามารถเห็นภาพได้ทันที (real time) จึงได้มีการพัฒนาระบบแสดงภาพทางจอภาพซึ่งให้ผลดีในแง่ของความสะดวก รวดเร็ว และสามารถปรับแต่งคุณภาพของภาพได้ และไม่ต้องพึ่งพากระบวนการในห้องมืด เทคนิคการสร้างสัญญาณภาพบนจอภาพแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ คือ การสร้างภาพโดยใช้ฉากเรืองรังสี (fluoroscopy) การสร้างภาพด้วยระบบสแกน (scanning system) 2 มิติ การสร้างภาพด้วยหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง (one dimensional detector) ด้วยระบบสแกนมิติเดียว และสร้างภาพด้วยหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งทั่วพื้นที่ (two dimensional detector)

ก. การสร้างสัญญาณภาพโดยใช้ฉากเรืองรังสี

หลักการสร้างสัญญาณภาพโดยใช้ฉากเรืองรังสีอาศัยกระบวนการเปลี่ยนภาพรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนฉากเรืองรังสีให้เป็นแสงสว่าง แล้วใช้กล้องวิดีโอทัศน์ (video camera) จับภาพเพื่อสร้างสัญญาณภาพ และส่งสัญญาณภาพผสม (composite video) แสดงผลทางจอโทรทัศน์หรือส่งให้แผ่นวงจรแปลงสัญญาณภาพ (image frame grabbers) สร้างสัญญาณภาพเชิงเลขให้คอมพิวเตอร์แสดงผลทางจอภาพดังแสดงการทำงานในแผนภาพรูปที่ 2.11



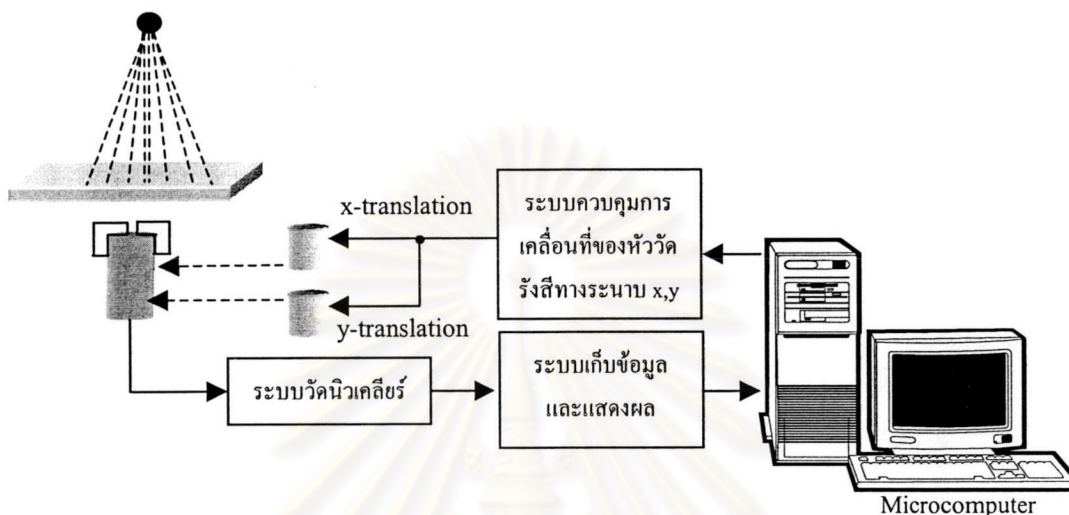
รูปที่ 2.11 แผนภาพระบบแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์โดยใช้ฉากเรืองรังสี

ระบบแสดงภาพโดยใช้ฉากเรืองรังสีจะมีข้อดีในแง่ความเร็วในการแสดงภาพสูง สามารถเห็นภาพเคลื่อนไหวได้ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการล้างฟิล์ม แต่มีข้อจำกัดดังนี้

1. ความละเอียดของภาพขึ้นกับเกรนของฉากเรืองรังสี ซึ่งไม่สามารถทำให้ละเอียดเท่ากับฟิล์มได้ และยังมีผลต่อความเปรียบต่างภาพ นอกจากนี้ความหนาของวัสดุฐานเคลือบสารเรืองรังสีทำให้เกิดความหนาของฉากเรืองรังสี มีผลให้ระยะวัตถุห่างจากสารเรืองรังสีเกิดภาพเงาซ้อนขึ้น
 2. มีความไวต่อยกกว่า ในกรณีที่ปริมาณรังสีจากชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง การใช้ฉากเรืองรังสีจะให้ปริมาณรังสีต่ำทำให้กล้องวิดีโอไม่สามารถแสดงภาพได้ ต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มความเข้มแสง (image intensifier)
 3. ฉากเรืองรังสีจะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรังสีเป็นแสงได้ดี เมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์สูงกว่า 50 keV ทำให้ไม่สามารถใช้กับการถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) ได้
- ข. การสร้างสัญญาณภาพโดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์

การแสดงผลภาพโดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์อาศัยหลักการสแกนของหัววัดรังสี เช่น หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล หรือ หัววัดรังสีซินทิลเลชันที่จัดช่องบังคับรังสีตามความละเอียดจุดภาพให้เคลื่อนที่บนพื้นที่ระนาบ x-y ของวัตถุที่ต้องการแสดงผลภาพเพื่อสร้างสัญญาณภาพผ่านระบบวัดนิวเคลียร์และ

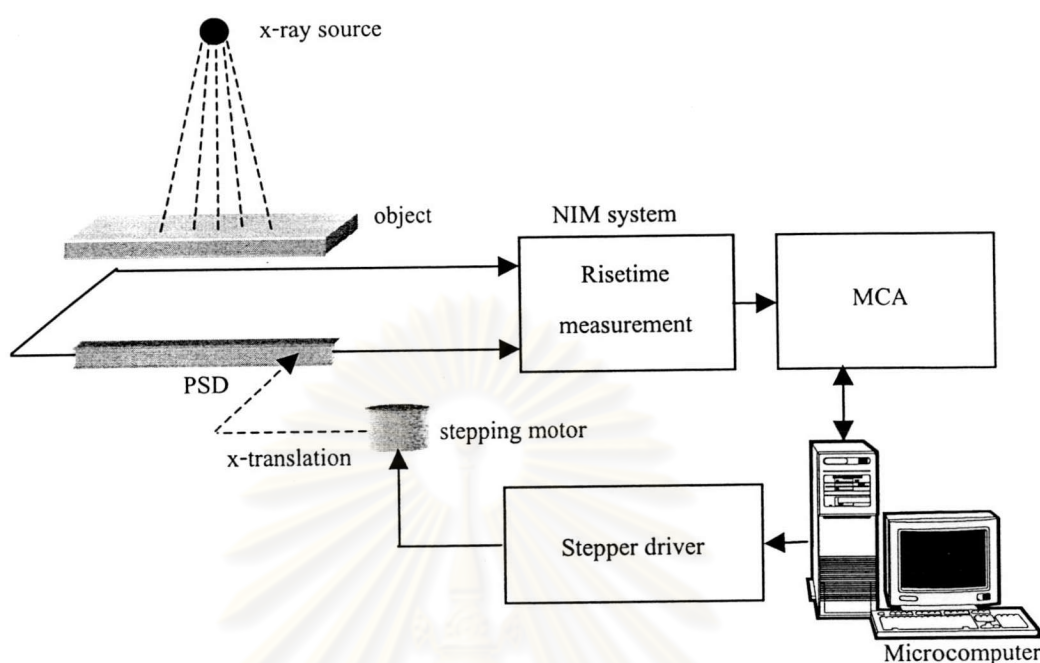
ระบบเก็บ ข้อมูลเพื่อแสดงภาพบนจอภาพของไมโครคอมพิวเตอร์ ข้อเสียของระบบการสร้างภาพโดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์คือ การเก็บข้อมูลในการสร้างสัญญาณภาพช้าเนื่องจากต้องสแกนหัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์

ค.การแสดงผลภาพโดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งตามแนว

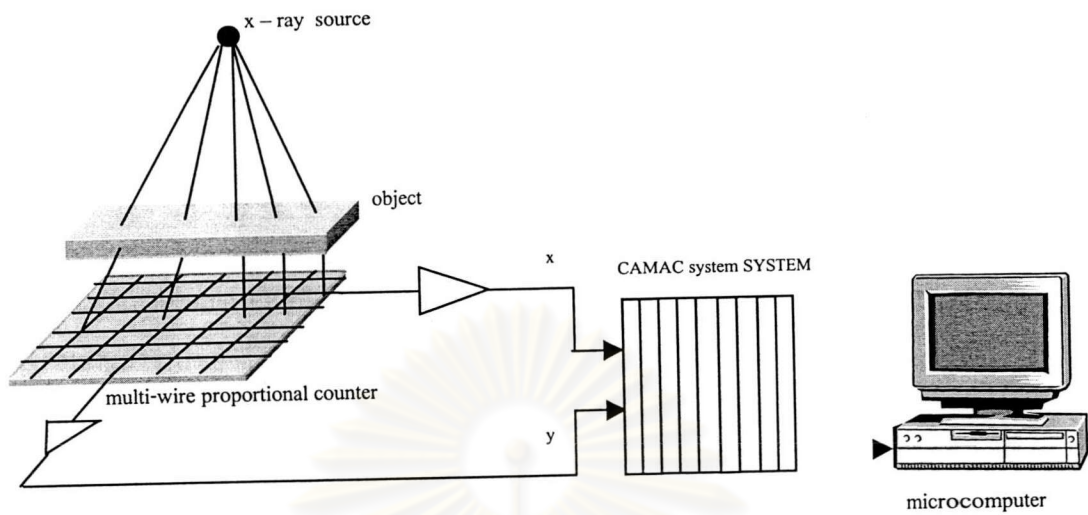
การแสดงผลภาพถ่ายโดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งตามแนว มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งซึ่งสามารถสร้างสัญญาณภาพได้ 1 ข้อมูลโปรไฟล์ (one dimensional detector) และระบบสแกนมิติเดียวสำหรับสแกนวัตถุในการสแกนเพื่อเก็บข้อมูลภาพ การสร้างสัญญาณภาพถ่ายรังสีโดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งจึงใช้เวลาในการเก็บข้อมูลสัญญาณภาพน้อยกว่าการเก็บข้อมูลโดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์ทั่วไป เนื่องจากการสแกนวัตถุภาพเพียงมิติเดียว จากแผนภาพในรูปที่ 2.13 ข้อมูลสัญญาณตำแหน่งจากหัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งจะผ่านระบบวัดแบบโรสส์ไทม์ซึ่งสามารถจัดระบบวัดด้วยโมดูลวัดตามมาตรฐาน NIM ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณตำแหน่งของรังสีเป็นสัญญาณภาพการสั่งงานเพื่อควบคุมการสแกนวัตถุ และสร้างสัญญาณภาพควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.13 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งตามแนว

ง. การแสดงภาพโดยใช้หัววัดรังสีแบบไวต่อตำแหน่งทั้งพื้นที่

การแสดงภาพถ่ายรังสีเอกซ์ด้วยหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งทั้งพื้นที่ (two dimensional detector) อาศัยหลักการของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งตามแนวมาจัดโครงสร้างเป็นแอโนดขนานกันหลายเส้น (multiwire anode) ตามแนวความละเอียดตำแหน่งแกนตั้งและแกนนอนหรือใช้หัววัดชนิดไวต่อตำแหน่งทั้งพื้นที่ชนิดสารเรืองรังสีหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่อรังสีตกกระทบหัววัดรังสีจะได้สัญญาณตำแหน่งตามหลักการวัดตำแหน่งด้วยเทคนิคสัดส่วนประจุ (charge ratio)^[4] สัญญาณที่วัดได้จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณภาพด้วยระบบวัดนิวเคลียร์ความไวสูงมาตรฐาน CAMAC สั่งให้คอมพิวเตอร์แสดงภาพทางจอแสดงผล ดังแสดงระบบวัดในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบแสดงภาพรังสีเอกซ์โดยใช้หัววัดรังสี

2.2 หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดไวต่อตำแหน่ง (Position Sensitive Detector ; PSD)

2.2.1 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล

หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลเป็นหัววัดรังสีที่มีตัวกลางวัดรังสีเป็นก๊าซ มีโครงสร้างทั้งแบบบรรจุก๊าซชนิดกึ่งตัน และแบบก๊าซไหล ออกแบบให้ทำงานในย่านพรอพอร์ชันแนล ซึ่งใช้ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดสูง ดังในรูปที่ 2.15 เมื่อรังสีผ่านช่องรับรังสี (window) เข้าทำอันตรกิริยากับก๊าซผสมในหัววัดรังสีจะเกิดการไอออไนซ์ปฐมภูมิขึ้น และภายใต้สนามไฟฟ้าสูงนี้ ทำให้อิเล็กตรอนจากการไอออไนซ์ปฐมภูมิ (primary ionization) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและมีพลังงานจลน์สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนซ์ทุติยภูมิ (secondary ionization) เกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ ซึ่งเรียกว่า Townsend avalanche ดังแสดงในรูปที่ 2.16 อัตราส่วนระหว่างปริมาณคู่อิออนที่เกิดจากการไอออไนซ์ทั้งหมดต่อปริมาณคู่อิออนจากไอออไนซ์ปฐมภูมิ เรียกว่า ค่าทวีปริมาณของก๊าซ (gas multiplication ; M) หรือ gas gain^[10]

$$M = \frac{\text{ปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นภายในหัววัดรังสีทั้งหมด}}{\text{ปริมาณไอออนที่เกิดจากการไอออไนซ์ปฐมภูมิอย่างเดียว}} \quad \dots(2.10)$$

ปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นในหัววัดรังสีทั้งหมด (Q) สามารถคำนวณได้จากสมการ^[10]

$$Q = M \cdot n_{av} \cdot q = \frac{ME}{W} \cdot q \quad \dots(2.11)$$

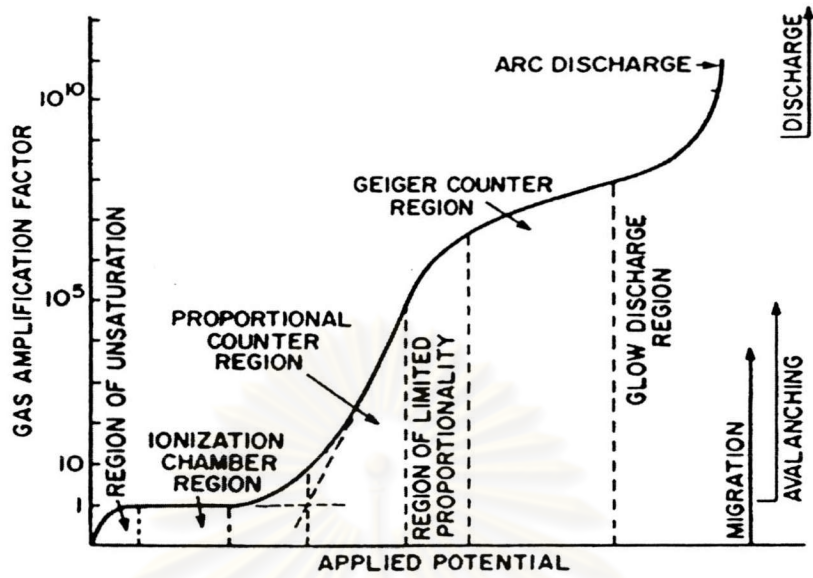
- เมื่อ Q คือ ปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นในหัววัดรังสีทั้งหมด
 E คือ พลังงานของรังสีที่ผ่านเข้าไปในหัววัดรังสี
 n_{av} คือ จำนวนไอออนเฉลี่ยที่เกิดขึ้น
 W คือ พลังงานที่ใช้ในการกำเนิดคู่อิออน 1 คู่
 q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

การออกแบบหัววัดบรรจุก๊าซชนิดพรอพอร์ชันแนลจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่าง ๆ ได้แก่สนามไฟฟ้า ค่าทวีปริมาณของก๊าซและแรงดันก๊าซ เป็นต้น สมการทั่วไปในการออกแบบคือ^[10]

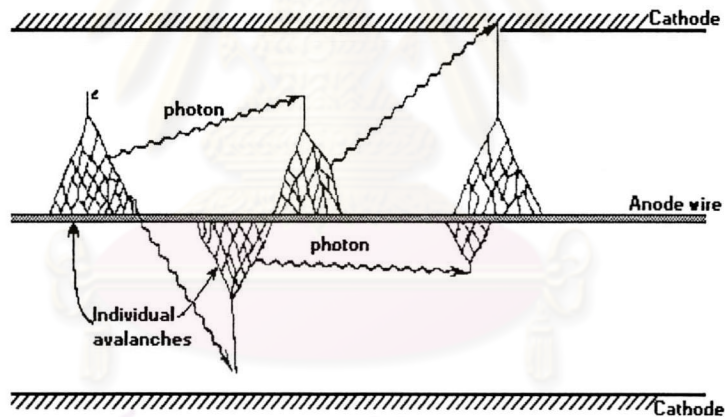
$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \cdot \frac{\ln 2}{\Delta V} \left(\ln \frac{V}{pa \ln(b/a)} - \ln K \right) \quad \dots(2.12)$$

- เมื่อ V คือ ศักดาไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้แอโนดและแคโทด
 a คือ รัศมีของเส้นลวดแอโนด
 b คือ รัศมีของแคโทด
 p คือ ความดันก๊าซที่บรรจุ
 K คือ ค่าต่ำสุดของอัตราความเข้มสนามไฟฟ้าต่อความดันก๊าซ (ε/ρ) ที่เป็นจุดก่อนเกิดการทวีปริมาณไอออน

ศูนย์วิจัยและพัฒนา
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 ช่วงการทำงานของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล

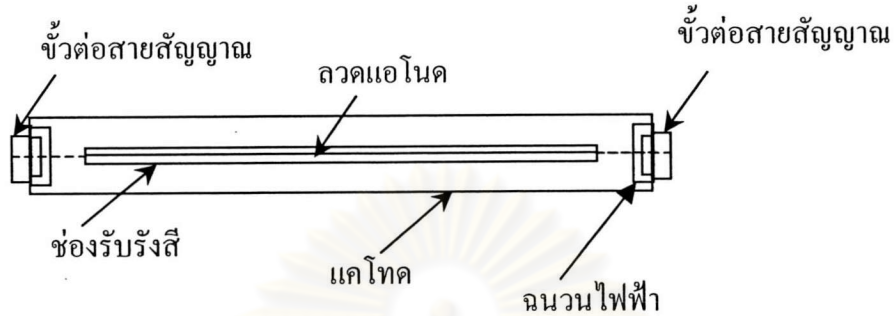


รูปที่ 2.16 การเกิดอะวอลานซ์ (Townsend avalanche)^[10]

2.2.2 โครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง

หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่งตามแนว มีโครงสร้างคล้ายหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหล ต่างกันที่เส้นแอนโอดมีความต้านทานต่อระยะสูงมากตั้งแต่ 8 kΩ/mm ขึ้นไป ทำด้วยเส้นไฟเบอร์ควอทซ์เคลือบด้วยไพโรไลติกคาร์บอน (pyrolytic carbon) และมีขั้วสัญญาณออกที่ปลายสองด้านเพื่อวัดความแตกต่างของขนาดสัญญาณหรือเวลาการเคลื่อนที่ของกลุ่มประจุไฟฟ้าจาก

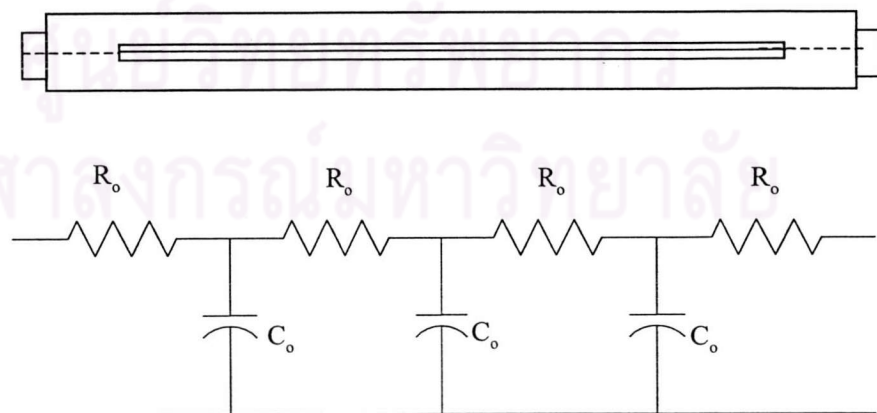
ตำแหน่งของการไอออไนซ์ของรังสีบนความยาวเส้นลวดแอโนดซึ่งโครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่งแสดงในรูปที่ 2.17



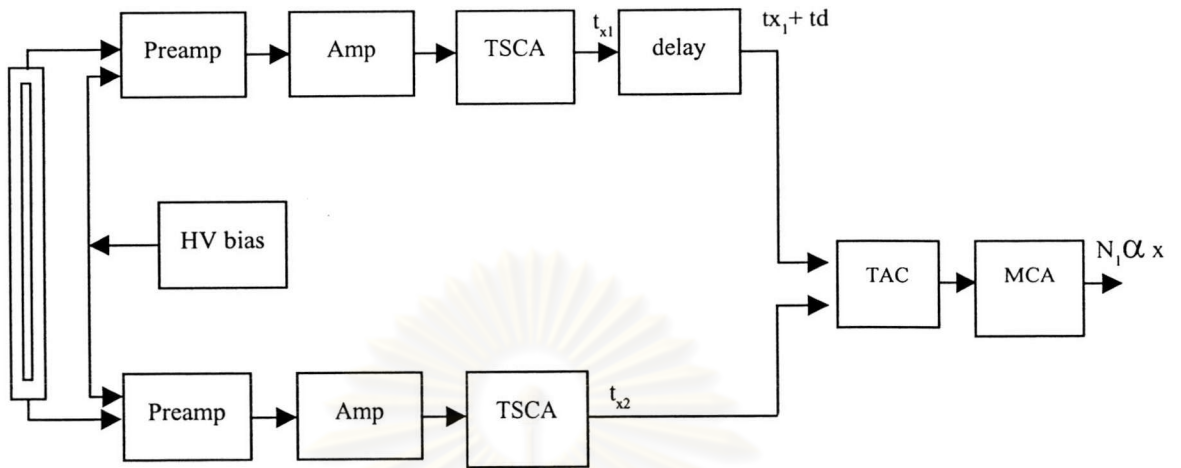
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง

2.2.3 การวัดตำแหน่งแบบไรส์ไทม์

การวัดตำแหน่งแบบไรส์ไทม์ (rise time method) หรือวัดเวลาขาขึ้นเป็นการจัดระบบวัดตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบบนตำแหน่งของเส้นแอโนด โดยพิจารณาวงจรสมมูลของวงจรไฟฟ้าที่เสมือนมีการเคลื่อนที่ของประจุบนสายส่งสัญญาณ วงจรสมมูลของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่งที่จัดระบบวัดตำแหน่งแบบไรส์ไทม์แสดงในรูปที่ 2.18 ตลอดระยะทางตามแนวนานระหว่างแอโนดและแคโทดประกอบด้วยค่า RC ซึ่งสร้างค่าคงที่เวลาในการแพร่ประจุ (charge propagation)



รูปที่ 2.18 แผนภาพสมมูลทางวงจรไฟฟ้าของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่งสำหรับการวัดแบบไรส์ไทม์



รูปที่ 2.19 แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมชนิดสัญญาณ 2 ทาง^[11]

วิธีการวัดด้วยเทคนิคโรสโทมเพื่อวัดตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบบนเส้นลวดแอโนดแต่ละตำแหน่งสามารถจัดระบบวัดได้ดังแผนภาพรูปที่ 2.20 เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง และการจัดระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมจะมีความสัมพันธ์ตามสมการการวัดเวลาข้างขึ้นดังนี้^[10]

$$t_{x1} \cong k - \frac{1}{2} R_0 C_0 (L - x)^2 - C_0 R_0 (L - x) + t_0 \quad \dots(2.13)$$

$$t_{x2} \cong k - \frac{1}{2} R_0 C_0 x^2 - C_0 R_0 x + t_0 \quad \dots(2.14)$$

k คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณและความยาวของหัววัดรังสี

t_0 คือ เวลารวมรวมประจุในหัววัด

ค่าความแตกต่างของเวลา (Δt_x) ระหว่าง t_{x1} หลังจากผ่านดีเลย์ (t_d) และ t_{x2} หาได้จาก

$$\Delta t_x = t_{x1} - t_{x2} \cong Sx - A + t_d \quad \dots (2.15)$$

$$S = R_0(C_0L + 2C_0) \quad \dots(2.16)$$

$$A = \frac{1}{2}R_0C_0L^2 + R_0C_0L \quad \dots(2.17)$$

$$t_d = A \quad \dots(2.18)$$

$$\Delta t_x \cong Sx \quad \dots(2.19)$$

- เมื่อ C_c คือ ความจุของโหลด
 C_0 คือ ความจุที่กระจายบนหัววัดรังสี
 L คือ ความยาวของหัววัดรังสี
 R_0 คือ ความต้านทานของแอมโอมิเตอร์
 S คือ ความไวในการแจกแจงตำแหน่ง

สัญญาณคาบเวลาจากอุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นขนาดสัญญาณจะส่งไปยังอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง โดยที่ค่าแชนแนลแอดเดรสของอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องและสัญญาณคาบเวลามีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$N_x = G\Delta t_x = GSx \quad \dots(2.20)$$

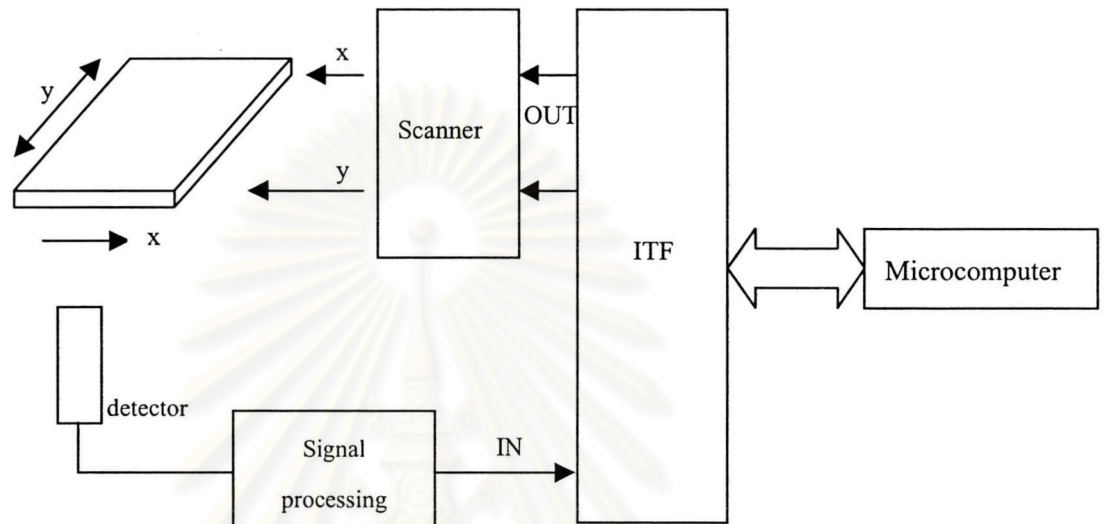
- เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของอุปกรณ์แปลงผันเวลา (TAC)
 S คือ ความไวในการแจกแจงตำแหน่ง (spatial sensitivity)

2.3 การควบคุมระบบสแกนสร้างภาพด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

2.3.1 หลักการควบคุมระบบสแกนสร้างสัญญาณภาพ

หลักการสร้างสัญญาณภาพจากเทคนิคการสแกนเพื่อแสดงภาพบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ระบบส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่งการสแกนบนระนาบ x, y ของ

วัสดุทดสอบซึ่งอาจจะสแกนวัสดุทดสอบหรือหัวอ่านสัญญาณก็ได้ ระบบแปลงสัญญาณภาพเชิงตัวเลข และระบบเชื่อมโยงสัญญาณกับไมโครคอมพิวเตอร์ (interfacing system ; ITF) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพของระบบสแกนสร้างภาพด้วยไมโครคอมพิวเตอร์พื้นฐาน

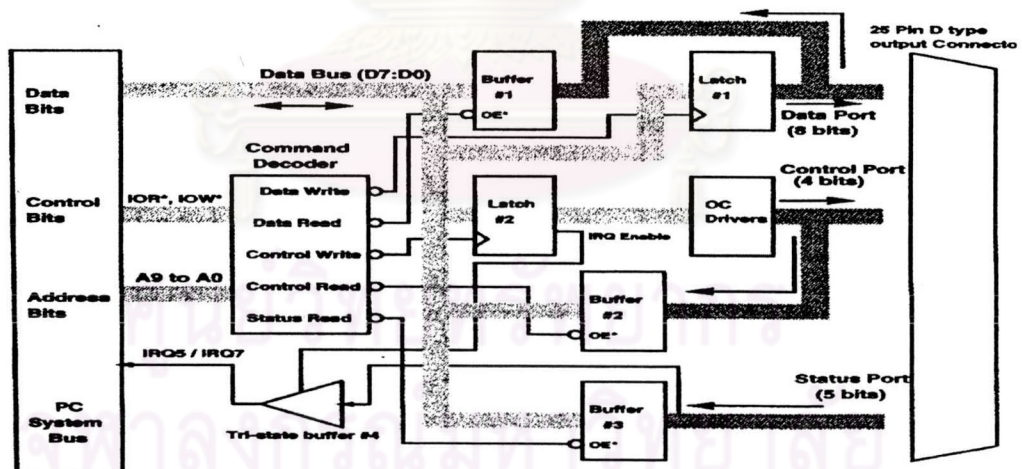
ในการเชื่อมโยงสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณควบคุมข้อมูลเข้าและออกตามการทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอมพิวเตอร์ ทำได้โดยกระบวนการติดต่อผ่านไมโครคอมพิวเตอร์ทางระบบ I/O ซึ่งมี 2 วิธีหลักคือ การติดต่อผ่านช่องสัญญาณ (slot) บนเมนบอร์ด (main board) และการติดต่อผ่านทางพอร์ตสัญญาณมาตรฐาน อันได้แก่ พอร์ตอนุกรม (serial port) USB และ RS-232 หรือพอร์ตขนาน (parallel port) IEEE488 หรือ พอร์ตเครื่องพิมพ์ (printer port) อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการควบคุมโดยอาศัยการติดต่อผ่านช่องสัญญาณบนเมนบอร์ดมักประสบปัญหาเรื่อง การปรับเปลี่ยนระบบช่องสัญญาณของผู้ผลิตทำให้ระบบเดิมล้ำสมัยไม่มีช่องสัญญาณรองรับในระยะยาว ดังนั้นจึงนิยมพัฒนาระบบควบคุมผ่านทางพอร์ตสื่อสารมาตรฐานกันเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะพอร์ตที่ใช้งานได้สะดวกและง่ายต่อการออกแบบและติดตั้งระบบ คือ พอร์ตเครื่องพิมพ์

2.3.2 โครงสร้างของพอร์ตเครื่องพิมพ์^[11]

พอร์ตเครื่องพิมพ์เป็นพอร์ตขนาน ที่สามารถถ่ายทอข้อมูลได้ครั้งละ 8 บิต ทำให้มีอัตราการสื่อสารข้อมูลที่สูงกว่าแบบอนุกรม RS-232 ประมาณ 8 -10 เท่า ซึ่งมีความเร็วในการสื่อสารข้อมูลเกือบเท่ากับการติดต่อกับระบบบัสทางช่องสัญญาณบนเมนบอร์ดโดยตรง อีกทั้งหัวต่อที่ใช้เป็นหัวต่อสายชนิด DB-25 ซึ่งหาได้สะดวก มีช่องสัญญาณเพียงพอในการประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ พอร์ตเครื่องพิมพ์มีช่องสัญญาณต่างๆ ดังนี้คือ

1. สัญญาณบัสข้อมูลทางออก 8 เส้น ใช้รีจิสเตอร์ข้อมูล (data register) ควบคุมการทำงาน
2. สัญญาณบัสข้อมูลทางเข้า 5 เส้น ใช้รีจิสเตอร์สถานะ (status register) ควบคุมการทำงาน
3. สัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอก 4 เส้น ใช้รีจิสเตอร์ควบคุม (control register) เป็นตัวควบคุมการทำงาน

แผนภาพรูป 2.21 แสดงระบบบัสและการทำงานภายในของพอร์ตเครื่องพิมพ์ สำหรับรายละเอียดของช่องสัญญาณรีจิสเตอร์ควบคุมแสดงในตารางที่ 2.1



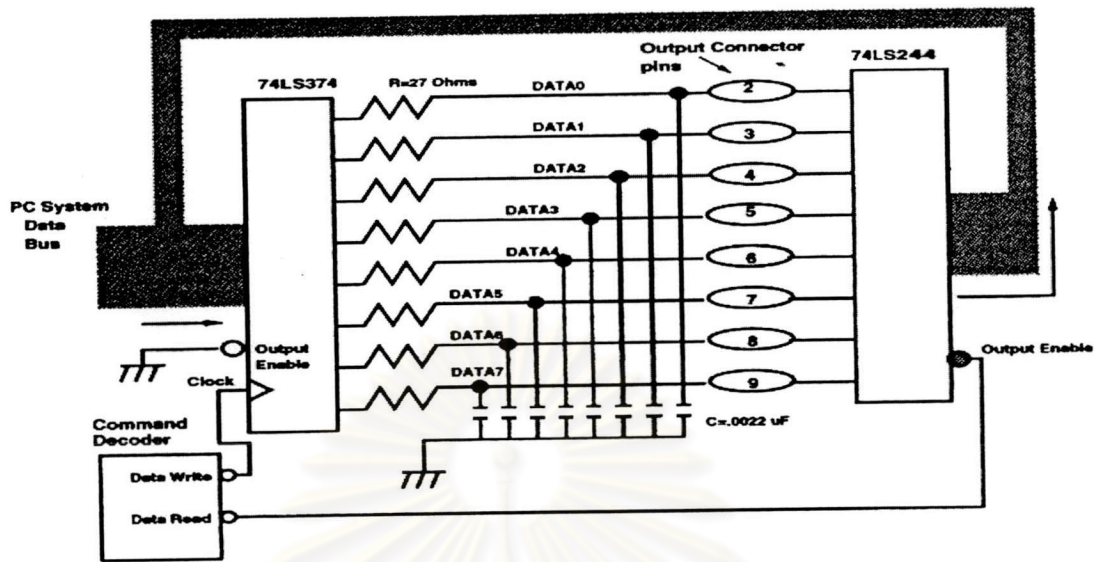
รูปที่ 2.21 ระบบบัสภายในของพอร์ตเครื่องพิมพ์^[11]

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญญาณที่ใช้กับพอร์ตเครื่องพิมพ์^[12]

Group	EPP Signal Name	In / Out	Signal Description
Control	NWRITE	Out	Active low. Indicates a write operation High for a read cycle.
	NDATASTB	Out	Active low.Indicates a Data_Read or Data_Write operation is in process.
	NADDRSTB	Out	Active low.Indicates an Address_Read or Address_Write operation is in process.
	NRESET	Out	Active low.Peripheral reset.
Status	NINTR	In	Peripheral interrupt.Use to generate an interrupt to the host.
	NWAIT	In	Handshake signal.When low it indicates that that is OK to start a cycle (assert a strobe), when high it indicates that it is OK to end the cycle (de-assert a strobe).
	User defined	In	Can be used differently by each peripheral.
	User defined	In	Can be used differently by each peripheral.
	User defined	In	Can be used differently by each peripheral.
Data	AD[8:1]	Bi-Di	Bi-directional address/data lines.

2.3.3 พอร์ตข้อมูล (data port)

เมื่อคอมพิวเตอร์จะทำการรับส่งข้อมูล ข้อมูลที่ต้องการรับเข้าหรือส่งออกจะมาจากบัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์ผ่าน ไปยัง ไอซีซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และแก้ไขข้อมูลตามลำดับ ในพอร์ตเครื่องพิมพ์แบบ EPP (Enhanced Paralle Port ;EPP) พอร์ตข้อมูลสามารถใช้รับส่งข้อมูลได้โดยอาศัยการกำหนดโปรโตคอลสำหรับส่งผ่านข้อมูลดังนี้คือ ไชเคิลการเขียนหรืออ่านข้อมูล และไชเคิลสำหรับการเขียนหรืออ่านแอดเดรส ดังแสดงในภาคผนวก ง.

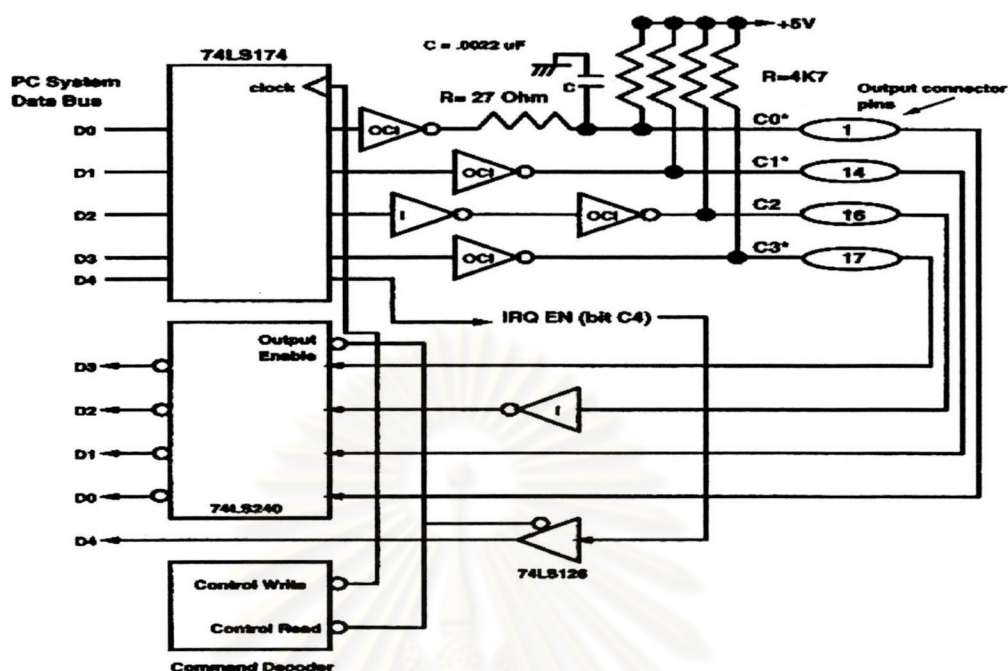


รูปที่ 2.22 วงจรภายในของพอร์ตข้อมูล^[12]

2.3.4 พอร์ตควบคุม (control port)

พอร์ตควบคุมเป็นพอร์ตที่ใช้สำหรับส่งหรือรับคำสั่งควบคุมจากอุปกรณ์ภายนอก จากรูปที่ 2.22 การควบคุมการอ่านและเขียนข้อมูลกับพอร์ตควบคุม คอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลมาที่ขา control write และ control read เนื่องจากเอาต์พุตของพอร์ตควบคุมเป็นแบบทรานซิสเตอร์เปิดขาคอลเลกเตอร์ (open collector) ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถใช้พอร์ตนี้ในการอ่านสัญญาณอินพุตจากภายนอกได้ด้วย โดยก่อนที่จะอ่านค่าจะต้องทำให้ขาที่พอร์ตที่ต้องการอ่านมีค่าลอจิก “1” เสียก่อน

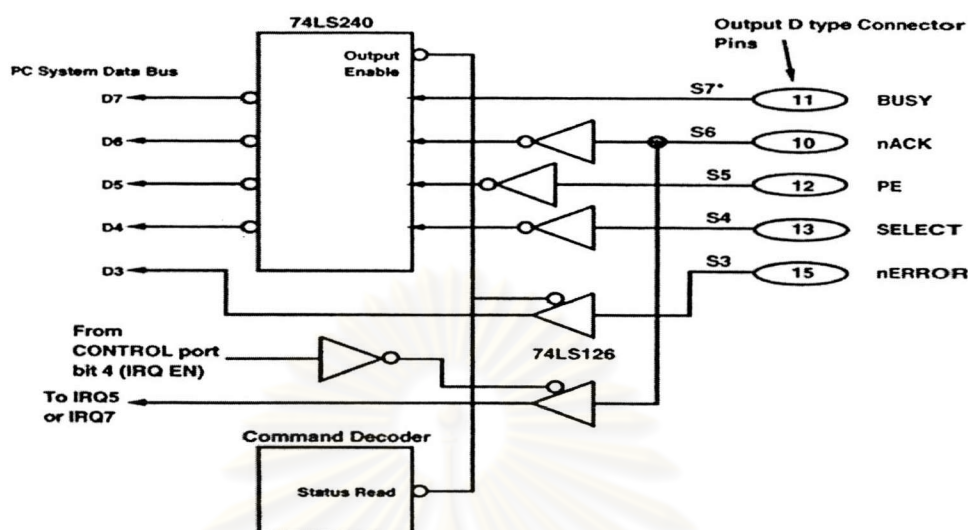
ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.23 วงจรภายในของพอร์ตควบคุม^[12]

2.3.5 พอร์ตสถานะ (status port)

พอร์ตสถานะเป็นพอร์ตที่คอมพิวเตอร์ใช้สำหรับการอ่านค่าสถานะจากอุปกรณ์ภายนอก สัญญาณสถานะมี 5 สัญญาณ ได้แก่ S3,S4,S5,S6 และ S7 สำหรับบิต S7 แตกต่างจากบิตอื่นคือไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นเมื่อข้อมูลผ่านออกจากเอาต์พุตไอซีไตรสเตทจะต้องมีการกลับสถานะ (invert) บิต 7 เสมอ นอกจากนี้ในการใช้งานสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากขอบขาขึ้นของขา S6 สามารถกำหนดค่าได้จากพอร์ตควบคุมของบิต 4 แสดงรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงวงจรภายในของพอร์ตสถานะ^[12]

2.3.6 การใช้พอร์ตเครื่องพิมพ์ในการเชื่อมโยงกับอุปกรณ์ภายนอก

การใช้พอร์ตเครื่องพิมพ์มีลักษณะเช่นเดียวกับอินพุต เอาต์พุตโดยทั่วไป ก็คือต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการติดต่อด้วย แอดเดรสของเครื่องพิมพ์แบ่งเป็น 3 ตำแหน่งคือ แอดเดรสรีจิสเตอร์ข้อมูล รีจิสเตอร์สถานะ และรีจิสเตอร์ควบคุม โดยแอดเดรสนี้มีทั้งหมด 3 ชุด สำหรับพอร์ตขนาน 3 ชุด คือ LPT1 LPT2 และ LPT3 แอดเดรสของพอร์ตขนานดังในตารางที่ 2.2 เมื่อต้องการติดต่อกับพอร์ตเครื่องพิมพ์ในตำแหน่งใด ก็ให้ส่งค่าข้อมูลออกไปที่พอร์ตเครื่องพิมพ์ในตำแหน่งที่ต้องการติดต่อกับ

ตารางที่ 2.2 แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน

Port	LPT1:PC	LPT2:PC	LPT3:AT
DATA	3BCh	379h	278h
STATUS	3BDh	379h	279h
CONTROL	3BEh	379h	27Ah