

เครื่องเอกซเรย์

X-ray Machine

รศ.ดร.เพชรกร หาญพานิชย์

ภาควิชารังสีวิทยา

คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความต้านทาน	ชนิดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องเอกซเรย์	ขบวนการเกิดรังสีเอกซเรย์ในหลอดเอกซเรย์
หม้อแปลงไฟฟ้า	รีปเปิล	ฮิวเอฟแฟค
หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ	หลอดเอกซเรย์	ชุดควบคุมการทำงาน
ไดโอดและวงจรเรกติไฟเออร์	อัตราความร้อนของหลอดเอกซเรย์	ข้อควรระวังในการใช้งานและการจัดซื้อเครื่องเอกซเรย์

วัตถุประสงค์

- เพื่อให้ทราบความรู้พื้นฐานทางไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า และ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานในเครื่องเอกซเรย์
- เพื่อให้ทราบถึงส่วนประกอบและหน้าที่ของชิ้นส่วนต่างๆที่สำคัญของหลอดและเครื่องเอกซเรย์
- เพื่อให้ทราบถึงการใช้งานและแนวทางในการดูแลบำรุงรักษาเครื่องเอกซเรย์

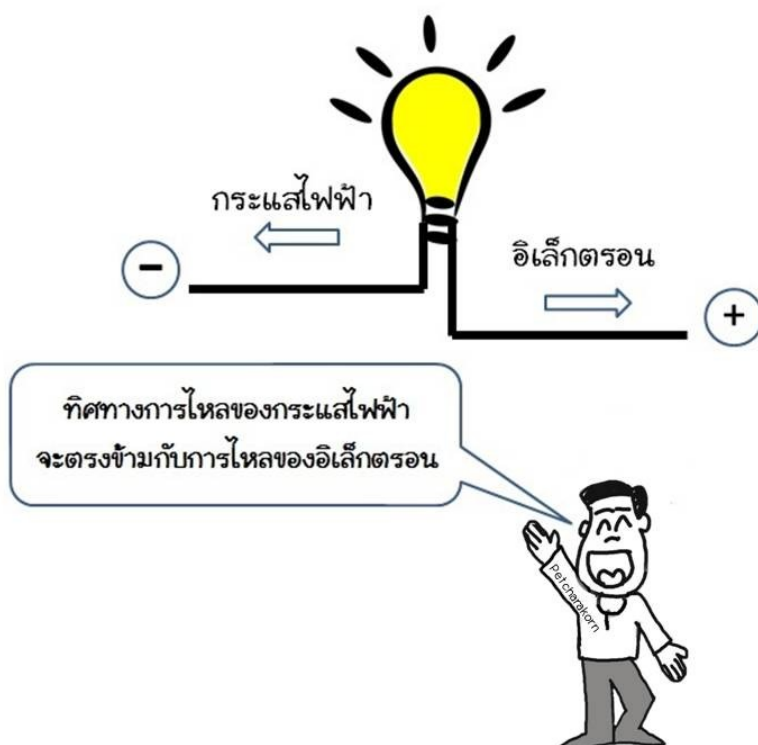
เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ.2438 (หรือ ค.ศ.1895) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (wilhem conrad roentgen) ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ ในขณะที่กำลังทดลองว่า อาจจะมีรังสีบางอย่างสามารถผ่านสารทึบแสง โดยทดสอบผลกระทบของการปล่อยประจุไฟฟ้าแรงสูงในหลอดแก้วสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้นที่ผิวของขั้วลบและเร่งให้อิเล็กตรอนไปชนขั้วบวก ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่หลอดแก้ว ซึ่งเขาสังเกตเห็นกระดาศที่เคลือบด้วยสารแบเรียม พลาตินไซยาไนด์ (barium platinocyanide) เกิดการเรืองแสง (luminescent) ขึ้น ทั้งๆที่หลอดแก้วถูกห่อหุ้มด้วยกระดาศทึบ ทำให้เขาคิดว่าจะต้องมีรังสีชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ทะลุทะลวงหลอดแก้วแล้วไปกระทบกระดาศดังกล่าว เขาจึงตั้งชื่อจำลองให้กับรังสีชนิดนี้ว่า **รังสีเอกซ์ (x-ray)** ตัวอักษร เอกซ์ หมายถึง ตัวที่ไม่ทราบค่าทางคณิตศาสตร์ ต่อมาได้พบว่า รังสีนี้มีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์และมีการผลิตเครื่องเอกซเรย์มาถ่ายภาพประกอบการวินิจฉัยและรักษาโรคทางการแพทย์จนถึงปัจจุบัน (ramsdale and horton 1982; kropp 2008; hall and giaccia 2012)

ดังนั้น ถ้าหากนักรังสีการแพทย์ นักรังสีเทคนิค รวมถึงผู้สนใจได้เรียนรู้ ได้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับส่วนประกอบและการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องเอกซเรย์ ก็จะเป็นประโยชน์ในการทำงาน ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลดีสำหรับการสร้างภาพทางการแพทย์ได้ต่อไป

กระแสไฟฟ้า (electric current) แรงดันไฟฟ้า (voltage) และความต้านทาน (resistance)

กระแสไฟฟ้า คือ การไหลของประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า ในตัวนำที่เป็นของแข็ง เช่น โลหะตัวนำไฟฟ้า การไหลของอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปหาขั้วบวก แต่...ทิศทางของกระแสไฟฟ้า จะตรงข้ามกับการไหลของอิเล็กตรอน กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้านั้น กำหนดได้จากปริมาณของประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดใดๆ ในเส้นลวดใน 1 วินาที มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (ampere ; A)

เครื่องเอกซเรย์ในการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น เครื่องเอกซเรย์ทั่วไป (general x-ray) เครื่องเอกซเรย์ฟัน (dental x-ray) เครื่องเอกซเรย์เต้านม (mammography) เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (computed tomography ; CT scan) แต่ละเครื่องจะมีการออกแบบหรือกำหนดให้สามารถเลือกใช้กระแสไฟฟ้าในการสร้างภาพที่แตกต่างกัน หน่วยของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทำงาน คือ มิลลิแอมแปร์ (milliampere ; mA) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 50-1,500 มิลลิแอมแปร์



การไหลของกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปหาขั้วลบ
อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบไปหาขั้วบวก

แรงดันไฟฟ้า คือ กระแสไฟฟ้าเกิดจากการที่มีอิเล็กตรอนไหลในสายไฟ การที่อิเล็กตรอนไหลหรือเคลื่อนที่ได้ นั่นจะต้องมีแรงมากระทำต่ออิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไหล

ศักย์ไฟฟ้า เป็นอีกคำหนึ่งที่คล้ายกับแรงดันไฟฟ้า จะหมายถึง ระดับไฟฟ้า เช่น ลูกกลมที่มีประจุไฟฟ้าบวกมีศักย์ไฟฟ้าสูง ส่วนลูกกลมที่มีประจุไฟฟ้าลบ จะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น ลูกกลมบวกและ ลูกกลมลบ จึงมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า **ความต่างศักย์ไฟฟ้า**



ศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า หมายถึง แรงที่สร้างให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระตลอดเวลา กระแสไฟฟ้าจึงไหลตลอดเวลา แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ อาจเกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย และเซลล์เชื้อเพลิง

หน่วยของแรงดันไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือ แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า มีหน่วยเดียวกัน คือ โวลต์ (voltage ; V)

แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ คือ แรงดันที่ทำให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ไหลผ่านเข้าไปในความต้านทาน 1 โอห์ม

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล มีการเคลื่อนไหวยของอิเล็กตรอนในสายไฟ และอิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของเส้นลวดในสายไฟ เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟมีคุณสมบัติการไหลต่างกัน เพราะมีอะตอมที่แตกต่างกันเป็นตัวต้านทานการไหล

ความต้านทานไฟฟ้า เป็นสมบัติเฉพาะของวัตถุในการที่จะขวาง หรือ ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านวัตถุนั้นๆไป หน่วยของความต้านทานไฟฟ้า คือ โอห์ม (ohm)

ความต้านทาน 1 โอห์ม คือ ความต้านทานของเส้นลวด ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ 1 แอมแปร์ เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์

วัตถุแต่ละชนิดยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้แตกต่างกัน วัตถุที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ง่าย เรียกว่า **ตัวนำไฟฟ้า (conductor)** เช่น ทองแดง เงิน อะลูมิเนียม สารละลายของกรดเกลือ กรดกำมะถันและน้ำเกลือ ฯลฯ สำหรับวัตถุที่ไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ หรือ ไหลผ่านได้ยาก เรียกว่า **ฉนวนไฟฟ้า (insulator)** เช่น ไม้ พลาสติก ยาง แก้ว และกระดาษแข็ง ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีวัตถุอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า เรียกว่า **สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)** เป็นวัตถุที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และสามารถควบคุมการไหลผ่านได้ เช่น คาร์บอน ซิลิคอน และเจอร์เมเนียม ฯลฯ **สารตัวนำยิ่งยวด (superconductor)** เป็นวัตถุที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้โดยไม่มี ความต้านทาน ณ จุดที่มีอุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งมีการสร้างวัสดุนำไฟฟ้าพิเศษแบบนี้ในเครื่องสร้างภาพเอ็มอาร์ (magnetic resonance image ; MRI) คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวนำขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ ชนิดของวัตถุ วัตถุต่างชนิดกันจะมีความต้านทานที่แตกต่างกัน ระยะความยาวของตัวนำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุตัวนำ หรืออุณหภูมิของวัตถุ เมื่ออุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้าหนึ่งๆ เปลี่ยนไป จะมีผลให้ความต้านทานของตัวนำนั้นเปลี่ยนตามไปด้วย

กฎพื้นฐานวงจรไฟฟ้า กล่าวว่า... เมื่ออุณหภูมิของตัวนำคงที่ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ จะเป็นปริมาณโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของตัวนำนั้น เมื่อ กระแสไฟฟ้า (I) ที่ผ่านตัวนำซึ่งมี ความต่างศักย์ (V) ระหว่างปลายทั้งสองด้าน โดยมีค่าความต้านทานของตัวนำ (R) เป็นค่าคงที่ จะเขียนความสัมพันธ์ได้ตาม กฎของโอห์ม คือ

$$V = IR$$

ไฟฟ้าที่เราใช้กันทั่วไปตามบ้านเรือนอาคารสถานที่ต่างๆ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประกอบกิจการต่างๆนั้น บางส่วนกระแสไฟฟ้าจะผลิตด้วยเครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง เรียก **ไดนาโม (dynamo)** ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ เราต้องใส่พลังงานกลหรือแรงหมุนให้แก่ไดนาโมก่อน แล้วไดนาโมจะเปลี่ยนแรงนั้นเป็นพลังงานไฟฟ้า ไดนาโมจะทำงานตรงกันข้ามกับมอเตอร์

คือ **มอเตอร์ (motor)** ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยที่มอเตอร์ทำงานโดยเราต้องใส่พลังงานไฟฟ้าเข้าในมอเตอร์ก่อน แล้วมอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้านั้นเป็นพลังงานกล คือเกิดแรงหมุนเพื่อนำไปทำงานต่างๆ

ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานที่จ่ายให้แก่เครื่องเอกซเรย์ หลอดเอกซเรย์ วงจรไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆที่อยู่ภายในเครื่องเอกซเรย์ เมื่อพูดถึงกระแสไฟฟ้าก่อนอื่นควรทำความรู้จักกับชนิดของไฟฟ้า ได้แก่

ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current ; DC) เป็นไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ตลอดเวลา มีทิศทางคงที่ไหลไปในทิศทางเดียวกันตามระยะเวลา แหล่งกำเนิดของไฟฟ้าชนิดนี้ ได้แก่ แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย ไดนาโม ไฟฟ้ากระแสตรง

ไฟฟ้ากระแสสลับ (alternating current ; AC) เป็นไฟฟ้าที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปตามอาคาร บ้านเรือน มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างต่อเนื่องกันและทิศทางของกระแสจะเปลี่ยนกลับไปมาในคาบเวลาที่กำหนด

ถ้าแรงเคลื่อนหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นสัญญาณคลื่นเดียว กระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ เรียก **ไฟฟ้าเฟสเดียว (single phase)** แต่... ถ้ามีขดลวด 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะทำมุม 120 องศาต่อกัน แต่ละคลื่นจะเกิดตามหลังกัน 120 องศา เรียกไฟฟ้าแบบนี้ว่า **ไฟฟ้าสามเฟส (three phases)** กระแสไฟฟ้าที่ใช้ตามบ้านเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จะเปลี่ยนแปลงอยู่ในระหว่างสายในลักษณะลูกคลื่น (sinusoidal wave shape) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าความถี่ของกระแสเป็น 60 รอบต่อวินาที (cycles per second) หรือ เฮิรตซ์ (hertz ; Hz) ก็จะมีการเคลื่อนที่ 60 ลูกคลื่นต่อเวลา 1 วินาที (ประเทศไทยจะมีความถี่ไฟฟ้าเป็น 50 เฮิรตซ์) ไฟฟ้าสามเฟสจะเดินตามสายสามสาย ส่วนใหญ่จะใช้กันตามโรงงานหรือสถานพยาบาลที่มีขนาดใหญ่ๆ สำหรับเครื่องเอกซเรย์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง

เนื่องจากในไฟฟ้ากระแสสลับ มีความแตกต่างของค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่คงที่ จะแตกต่างกันตามช่วงเวลาที่ยาวไป ซึ่งจะแตกต่างจากไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าเพียงค่าเดียวดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นสามารถหาค่าพลังงานของไฟฟ้ากระแสสลับ ณ ที่เวลาหนึ่งได้เรียกว่า **รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root mean square ; rms)** หรือ effective หรือ dc-equivalent ดังสมการ

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$$

ตัวอย่างที่ 1 ไฟฟ้ากระแสสลับมีความต่างศักย์ไฟฟ้า 163 v_{peak} โวลต์age จงหาค่า v_{rms} มีค่าเท่าใด

$$\begin{aligned}\text{จากสมการที่ 1 } v_{\text{rms}} &= 163/1.414 \\ &= 115 \text{ v}\end{aligned}$$

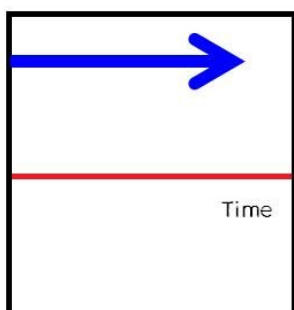
ตัวอย่างที่ 2 ถ้าเครื่องใช้ไฟฟ้าต้องการใช้ไฟ 220 v จงหาค่า v_{peak}

$$\begin{aligned}\text{จากสมการที่ 1 } v_{\text{peak}} &= 220 \times 1.414 \\ &= \pm 311 \text{ v}\end{aligned}$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในที่ต่างๆ

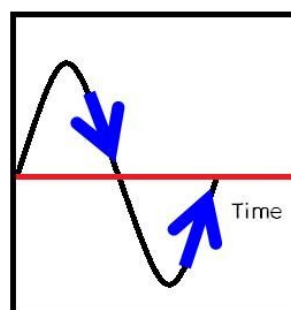
v_{rms}	v_{peak}
115	162 (usa)
220	311 (europe)
240	339 (uk)

ไฟฟ้ากระแสตรง
(direct current : DC)



ไฟฟ้ากระแสตรง
ค่าคงที่ตลอดเวลา
มีทิศทางการไหลไปในทิศทาง
เดียวกันตามระยะเวลา

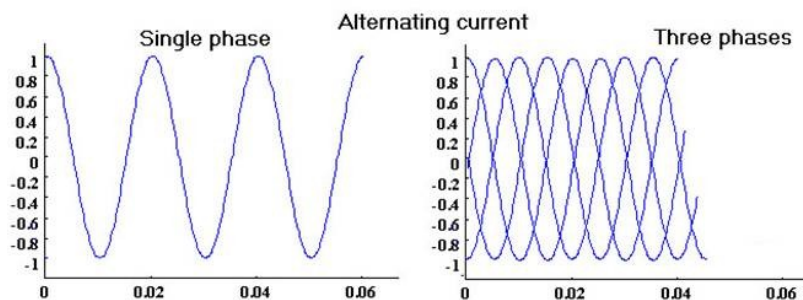
ไฟฟ้ากระแสสลับ
(alternating current : AC)



ไฟฟ้ากระแสสลับ
ค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง
ตามเวลาและทิศทางของกระแส
จะเปลี่ยนกลับไปมา
ในคาบเวลาที่กำหนด



ไฟฟ้าชนิดสามเฟส
จะมีแรงดันไฟฟ้าคงตัวมากกว่าไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว
และ การกระเพื่อมของกระแส หรือ ริปเปิล (ripple)
น้อยกว่าไฟฟ้าชนิดเฟสเดียว



หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเปลี่ยนหรือแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าหรือขนาดของกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดต่ำลง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับรูปแบบขดลวดที่วางบนแกนเหล็ก การกำหนดจำนวนรอบของขดลวด หรือขนาดของสายไฟที่ใช้ทำขดลวด เป็นต้น

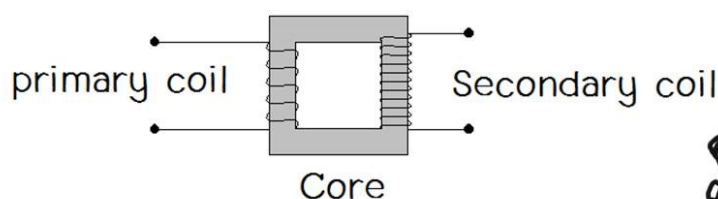
การแปลงแรงดันไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าเครื่องเอกซเรย์ จะมีการแปลงจากแรงดันไฟฟ้าต่ำขึ้นไปสู่แรงดันไฟฟ้าสูง (step-up transformer) หรือ แรงดันไฟฟ้าสูงลดลงไปสู่แรงดันไฟฟ้าต่ำ (step-down transformer) ซึ่งผู้ควบคุมเครื่องเอกซเรย์ จะกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้งานให้สอดคล้องกับการถ่ายภาพรังสีที่มีขนาด หรือ ความหนาที่แตกต่างกัน เครื่องเอกซเรย์ทั่วไป ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า อยู่ในช่วง 40,000 ถึง 150,000 โวลต์ หรือ 40 ถึง 150 กิโลโวลต์ (Kilovolt ; kV) สำหรับเครื่องเอกซเรย์เต้านม อยู่ในช่วง 20 ถึง 40 กิโลโวลต์ เครื่องเอกซเรย์ฟัน อยู่ในช่วง 60 ถึง 120 กิโลโวลต์ เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ อยู่ในช่วง 80 ถึง 140 กิโลโวลต์

การแปลงกระแสไฟฟ้า ทำโดยการส่งผ่านหรือถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าจากขดลวดหนึ่งไปยังอีกขดลวดหนึ่ง โดยใช้ขดลวดซึ่งมีฉนวนอย่างดีหุ้มขดลวดที่วางอยู่ใกล้กัน อาจใช้แกนเป็นอากาศหรือพันขดลวดรอบแกนเหล็กซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กวางซ้อนกัน การพันจะพันขดละแกนหรือพันรอบบน

แกนเดียวกัน ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าเข้า เรียกว่า **ขดลวดปฐมภูมิ (primary coil)** ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำออก เรียกว่า **ขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil)** เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าในขดลวดปฐมภูมิจะเกิดสนามแม่เหล็กกรอบขดลวด มีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะกระแสไฟฟ้า ขดลวดทุติยภูมิถูกสนามแม่เหล็กตัดก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น มีลักษณะเดียวกับกระแสในขดลวดปฐมภูมิ อัตราส่วนของกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิต่อกระแสในขดลวดปฐมภูมิเท่ากับอัตราส่วนของจำนวนรอบของขดลวดในขดลวดทุติยภูมิต่อจำนวนรอบในขดลวดปฐมภูมิ ดังสมการ $v_p/v_s = n_p/n_s$

เมื่อกำหนดให้

v_p	=	ความต่างศักย์ในขดลวดปฐมภูมิ
v_s	=	ความต่างศักย์ในขดลวดทุติยภูมิ
n_p	=	จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ
n_s	=	จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ



หม้อแปลงไฟฟ้า
ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มหรือลด
แรงดันไฟฟ้า



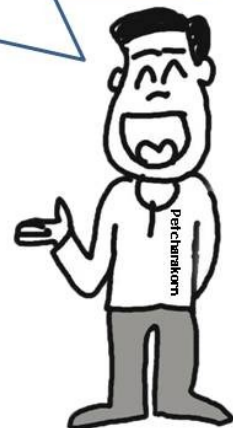
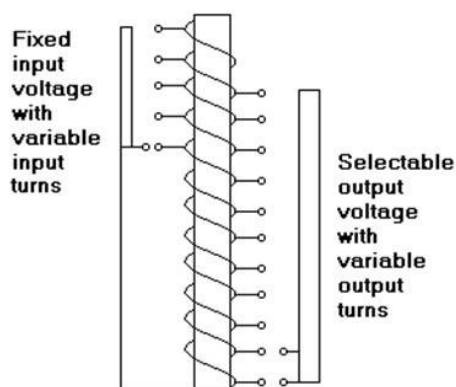
การแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ำให้เป็นแรงดันไฟฟ้าสูง จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ มีจำนวนน้อยกว่า จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

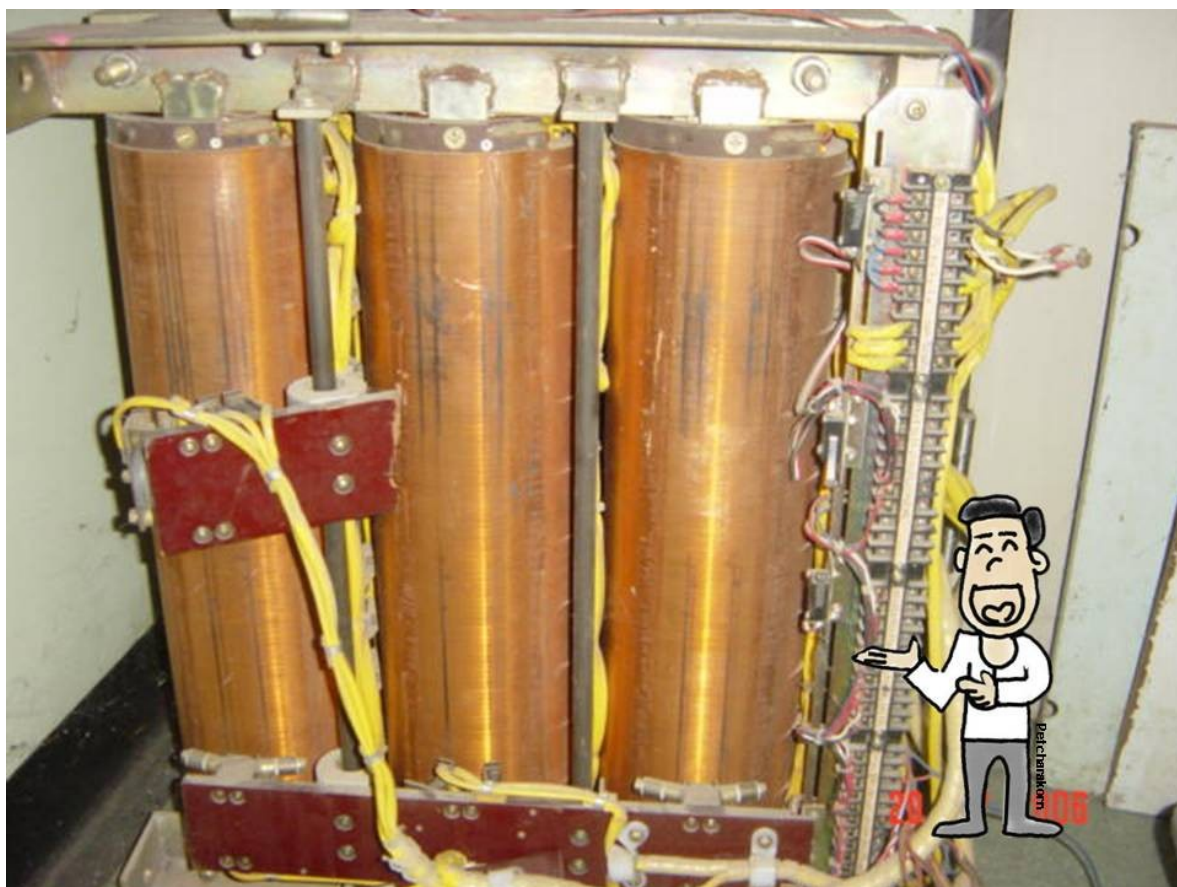
หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ (autotransformer)

เครื่องเอกซเรย์บางชนิดจะมีหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดพิเศษที่เรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบให้สามารถควบคุมการแปลงแรงดันไฟฟ้าในวงจร ให้สูงขึ้นหรือลดลง ตามที่กำหนดไว้ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานในการถ่ายภาพ

หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ มีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป คือ ประกอบด้วยแกนของแท่งโลหะทรงกระบอก พันลวดรอบด้วยขดลวดที่มีจำนวนรอบแตกต่างกันแล้วต่อตามจุดต่างๆของขดลวด แล้วต่อไปยังปุ่มโลหะที่มีแท่งโลหะอีกแท่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เพื่อให้มาสัมผัสหรือแตะกับปุ่มเหล่านี้ ช่วยนำกระแสไฟฟ้าสูงหรือลดต่ำลงไปตามค่าที่กำหนดไว้ตามจำนวนของขดลวด ขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กจะทำหน้าที่เป็นทั้งขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิสามารถที่จะให้แรงดันไฟฟ้าขนาดต่างกัน ออกทางขดลวดทุติยภูมิ ตามจุดที่ต่อทำไว้เป็นระยะ

**หม้อแปลงอัตโนมัติ มีตำแหน่งสัมผัสหลายตำแหน่ง
ช่วยนำกระแสไฟฟ้าสูงหรือต่ำ
ไปตามค่าที่กำหนดไว้ตามจำนวนของขดลวดที่สัมผัส**

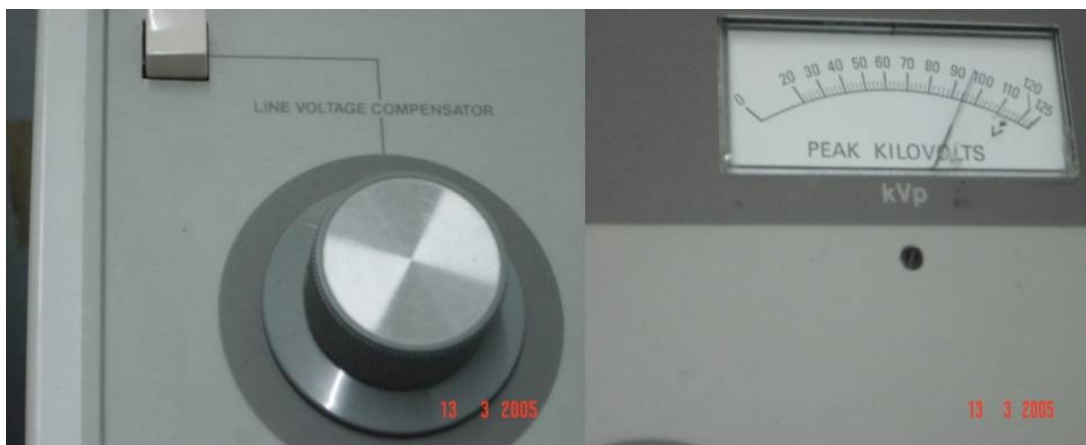




ตัวอย่าง หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ ที่ถอดออกมาจากเครื่องเอกซเรย์ทั่วไป

เครื่องเอกซเรย์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้ใช้ไฟ 220 โวลต์ แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ให้กับอยู่ทั่วไป บางครั้งอาจจะมีแรงดันไม่คงที่ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือลดต่ำลงแตกต่างกันไปจากระดับแรงดันปกติได้ ดังนั้นในเครื่องเอกซเรย์บางเครื่อง บริษัทผู้ผลิตจะออกแบบอุปกรณ์สำหรับการใช้ในการปรับแต่งค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่องเอกซเรย์ หรือที่เรียกว่า **line** หรือ **main voltage compensator** โดยอุปกรณ์นี้มักจะเป็นส่วนที่อยู่ก่อนหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งใช้หลักการคล้ายๆ กับหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ ทำหน้าที่ช่วยปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าเครื่อง ให้ตรงค่าคงที่ที่ได้กำหนดไว้ เพื่อช่วยควบคุมหรือกำหนดให้การผลิตพลังงานของรังสีเป็นไปตามที่ต้องการ

หากไม่มีการตรวจสอบ ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับปกติหรือไม่ ก่อนใช้เครื่องเอกซเรย์ประจำวัน อาจทำให้พลังงานรังสีที่ปลดปล่อยออกมาไม่ถูกต้องตามความต้องการ จะส่งผลต่อคุณภาพของรังสีที่ทะลุทะลวงอวัยวะ ส่งผลให้คุณภาพของภาพที่ถ่ายอาจไม่ดีเท่าที่ควร ปัจจุบันทางผู้ผลิตมักจะติดตั้งวงจรอัตโนมัติดังกล่าว เพื่อควบคุมหรือป้องกันความผิดพลาดของการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ในขณะการใช้งาน (Angerstein and Gursky 1975; Chen et al. 2008; Aichinger et al. 2012)

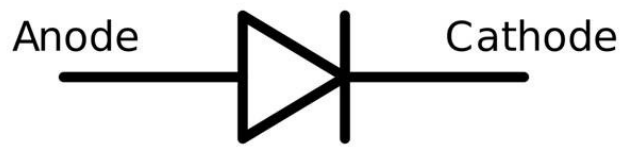


Line voltage compensator
ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบและปรับแต่งค่า
แรงดันไฟฟ้า สำหรับเครื่องเอกซเรย์บางรุ่น



ไดโอดและวงจรเรกติไฟเออร์ (diode and rectifier circuit)

ไดโอด เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้า โดยจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวและกั้นการไหลในทิศทางตรงกันข้าม อาจกล่าวว่า ไดโอด เป็น วาล์ว (valve) แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เปิดปิดกระแสไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งจะคล้ายกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งจากขั้วลบของหลอดเอกซเรย์ไปขั้วบวกได้ทางเดียว เมื่อถูกทำให้มีความต่างศักย์จากขั้วลบไปบวก แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนวิ่งย้อนกลับจากขั้วบวกมายังขั้วลบ ไดโอด มีทั้งชนิดเป็นหลอดสุญญากาศหรือสารกึ่งตัวนำ

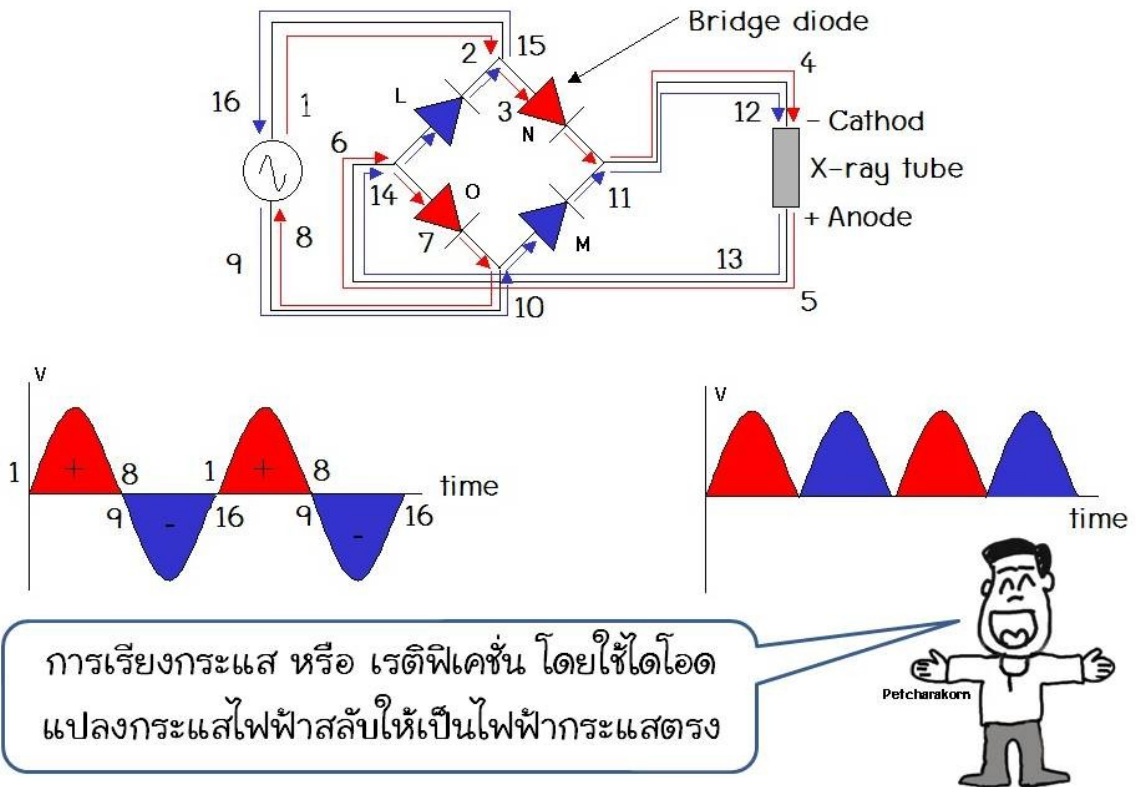


ไดโอด เป็นอุปกรณ์ควบคุมทิศ
ทางการไหลของกระแสไฟฟ้า
ไหลในทิศทางเดียว
เช่น จาก Anode ไป Cathode
(+) (-)

ในเครื่องเอกซเรย์โดยส่วนใหญ่แล้วใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ สำหรับในการใช้งานแล้ว จะต้องทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางที่ต้องการและพลังงานคงที่มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ จึงต้องมี **การเรียงกระแส** หรือ เรียกว่า **เรกติฟเคชั่น (rectification)** โดยการเรียงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการเรียงกระแสไฟฟ้าสลับช่วงค่าลบมาทำให้เกิดประโยชน์

ไดโอด ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับไปกลับมาระหว่างค่าลบและค่าบวก

Full wave rectifier circuit

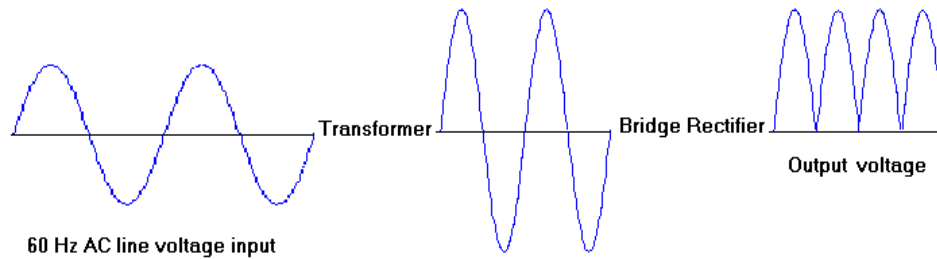


ตัวอย่าง การเรียงกระแส ในวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (full wave rectifier circuit) แบบบริดจ์ (bridge) แปลงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่ใช้ไดโอด 4 ตัว กระแสไหลจากวงจร เริ่มจากการไหลช่วงที่เป็นบวก (+) คือจาก (1) ไป (2) ผ่าน (3) ที่ ไดโอด (N) ไป (4) เข้าหลอดเอกซเรย์และออกมา (5) ไป (6) ผ่าน (7) ที่ ไดโอด (O) และ ไหลไป (8) ต่อมาเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางจากบวกมาเป็นลบ (-) เริ่มจากจาก (9) ไป (10) ผ่านไดโอด (M) ไป (11) และ (12) เข้าหลอดเอกซเรย์อีกครั้ง ออกมาที่ (13) ไป (14) ผ่านไดโอด (L) ไป (15) และ (16) ทำให้สามารถนำช่วงคลื่นที่มีค่าเป็นลบกลายเป็นบวก และสามารถนำกระแสช่วงที่เป็นลบมาใช้งานได้ จากนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนทิศอีกครั้งก็กลับไปเริ่มต้นที่ 1-8 อีกครั้ง และ 9-16 สลับกันไปเรื่อยๆ

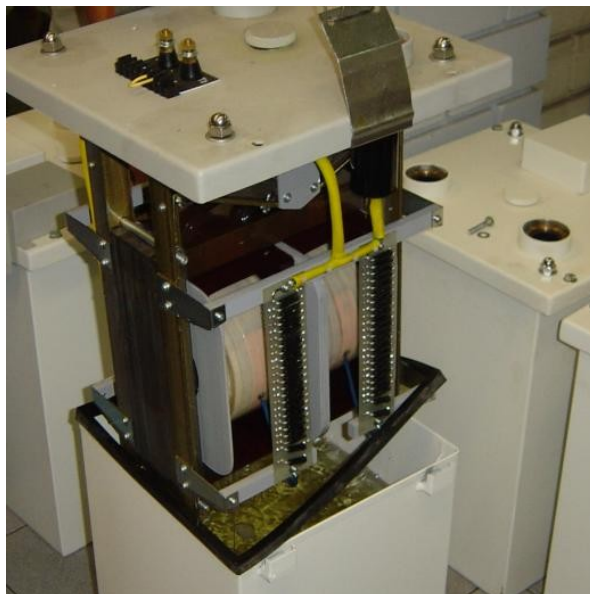
ชนิดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องเอกซเรย์

โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องเอกซเรย์ที่ใช้กันจะมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าเฟสเดียว (single phase x-ray generator) เป็นเครื่องที่ใช้ไฟฟ้าเฟสเดียว มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ เครื่องที่มีขนาดเล็ก ต้องวงจรตีไฟเออร์ จำนวนไม่มาก ทำให้เครื่องเอกซเรย์ชนิดนี้มีราคาถูก

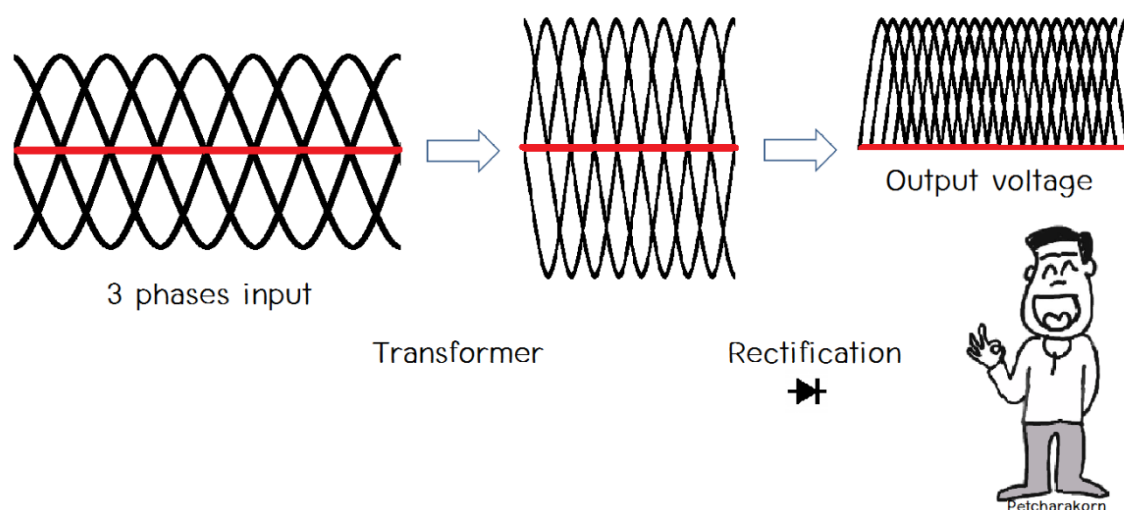


รูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าเฟสเดียว ที่ผ่านขบวนการแปลงไฟฟ้าจากความถี่ต่ำเป็นความถี่สูง การเรียงกระแสจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่เครื่องเอกซเรย์



ตัวอย่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องเอกซเรย์ ภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าและต่อวงจรการเรียงกระแส

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าสามเฟส (three phase x-ray generator) กระแสไฟฟ้าสามเฟส จะมีแรงดันระหว่างเฟสเท่ากับ 240 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ แรงดันระหว่างสายเท่ากับ 415 โวลต์ หรือ 380 โวลต์ แรงดันของแต่ละเฟสต่างกัน 120 องศา เป็นเครื่องที่ใช้ไฟฟ้าสามเฟส มีพลังงานสูงกว่าเครื่องที่ใช้ไฟฟ้าเฟสเดียว ต้องวงจรเรกติไฟเออร์หลายตัว เพื่อทำให้มีความแตกต่างของการกระเพื่อมของกระแส หรือ ริปเปิล (ripple) น้อยลง

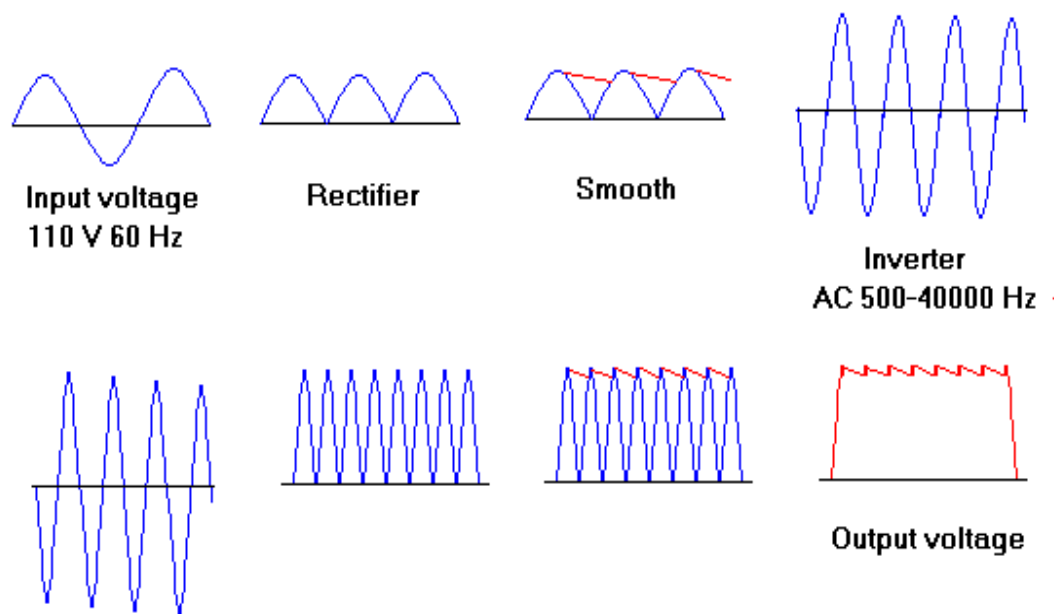


เครื่องเอกซเรย์ที่มีการแปลงไฟฟ้าสามเฟสให้มิกำลังไฟให้สูงขึ้นด้วยหม้อแปลง แล้วผ่านการเรียงกระแสสลับ เพื่อแปลงช่วงค่ากลับมาใช้ ทำให้มีการกระเพื่อมของกระแสลดลง

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าชนิดคงที่ (constant potential generator) เป็นเครื่องที่ใช้ไฟฟ้าสามเฟสต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง ผ่านการแปลงไฟฟ้าด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ โดยทำให้พลังงานไฟฟ้ามีค่าคงที่ มีค่าการกระเพื่อมของกระแสน้อยลง เพื่อช่วยให้พลังงานที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง แต่มีข้อจำกัด คือ อุปกรณ์ที่ใช้กำเนิดไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่ ราคาวัสดุบำรุงรักษาค่อนข้างสูง

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดความถี่ปานกลางและสูง (medium and high frequency generator) เครื่องที่ใช้ไฟฟ้าสามเฟสต่อเข้ากับวงจรเรกติไฟเออร์เข้าอุปกรณ์เก็บประจุ (capacitors) แล้วแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ที่สูงขึ้นต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อขยายพลังงานให้มากขึ้น แล้วทำการแปลงไฟด้วยวงจรเรกติไฟเออร์และตัวเก็บประจุซ้ำ ทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสใกล้เคียงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าชนิดคงที่ เครื่องชนิดนี้ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถทำให้พลังงานที่ใช้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากและมีขนาดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเล็กลง ในวงจรจะมีอุปกรณ์ที่สำคัญที่ควรทราบอีกตัว คือ ตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้า

2 แผ่น วางขนานกัน มีระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองเท่ากันพอประมาณ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าตัวเก็บประจุจะเก็บประจุไฟฟ้าโดย ประจุลบจะไปจับที่แผ่นโลหะที่เป็นบวก และ ประจุบวกจะไปจับแผ่นโลหะ ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ระยะเวลาหนึ่ง แล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมาตามระยะเวลาที่กำหนด และเป็นส่วนของอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องเอกซเรย์ เช่น เป็นส่วนเก็บประจุไฟฟ้าในเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ อุปกรณ์ตั้งเวลาอัตโนมัติ วงจรปรับค่าความต่างศักย์ในราบเรียบ (smoothing) เป็นต้น

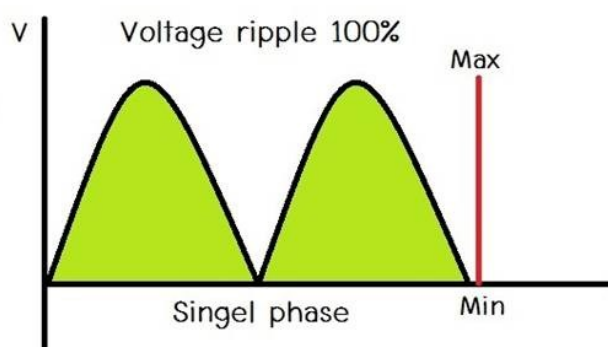


การแปลงไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดความถี่ปานกลางและสูง ไฟฟ้าความถี่สูงที่ผ่านการแปลงเข้าสู่เครื่องเอกซเรย์

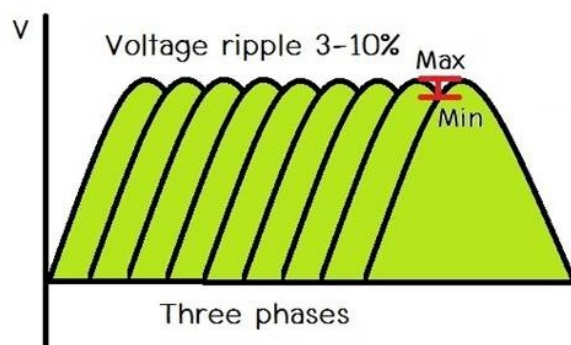
การกระเพื่อมของกระแส หรือ ริปเปิล (ripple)

หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าสลับในวงจรตามช่วงเวลาต่างๆ โดยเกี่ยวข้องกับค่าความแตกต่างของความต่างศักย์ หรือกระแสที่มีค่าสูงที่สุด (V_{max}) กับค่าที่น้อยที่สุด (V_{min}) ร้อยละแรงดันริปเปิล หาได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$\text{Voltage ripple (\%)} = [(V_{max} - V_{min}) / V_{max}] \times 100$$



เครื่องที่มีค่าร้อยละริปเปิลน้อย
มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่
ระบบไฟมีความเสถียรมากกว่า
เครื่องที่มีค่าร้อยละริปเปิลสูง



เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดไฟฟ้าเฟสเดียว และ ชนิดสามเฟส มีการกระเพื่อมของกระแสที่แตกต่างกัน

สำหรับเครื่องเอกซเรย์ที่มีค่าการกระเพื่อมของกระแส หรือ ริปเปิลที่สูง จะมีผลให้การจ่ายไฟไม่เสถียรหรือพอเพียงต่อความต้องการไฟฟ้าของอุปกรณ์ เช่น ถ้าหากกระแสที่จ่ายให้กับหลอดเอกซเรย์ไม่คงที่ ขบวนการผลิตรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นหลอดเอกซเรย์เกิดขึ้นไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นผู้ผลิตส่วนใหญ่ มักจะออกแบบวงจรต่างๆในเครื่องเอกซเรย์ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่รักษาระดับกระแสไฟฟ้าให้คงที่ เพื่อทำให้เครื่องสามารถผลิตรังสีเอกซ์ที่ออกมาอย่างมีคุณภาพ และปริมาณที่เหมาะสมต่อการทะลุทะลวงอวัยวะที่ทำการตรวจ หรือมากระทบอุปกรณ์รับภาพและการสร้างภาพออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพดี (Wolbarst et al. 2013; Zoetelief 2013)

หลอดเอกซเรย์

หลอดเอกซเรย์เป็นแหล่งกำเนิดรังสีของเครื่องเอกซเรย์ เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างแพง หลอดเอกซเรย์ของเครื่องเอกซเรย์แต่ละชนิดจะมีรูปร่างหรือขนาดที่แตกต่างกัน หลอดเอกซเรย์ที่ดีควรเป็นหลอดที่มีคุณสมบัติที่ผลิตรังสีเอกซ์ได้ดี มีการระบายความร้อนที่ดี มีความแข็งแรงทนทาน หลอดเอกซเรย์ที่ใช้ในงาน อาจแบ่งออกเป็นส่วนประกอบอย่างง่าย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนประกอบภายนอกและส่วนประกอบภายใน แต่ละส่วนจะมีประกอบต่างๆที่สำคัญดังนี้

1. ส่วนประกอบภายนอก (external structure)

1.1 ส่วนยึดหลอดเอกซเรย์ หลอดเอกซเรย์เป็นส่วนที่มีน้ำหนักมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีส่วนที่รองรับที่มั่นคงแข็งแรง สามารถรองรับน้ำหนักได้เป็นอย่างดี เครื่องเอกซเรย์แต่ละชนิดจะมีส่วนที่ยึดหลอดแตกต่างกันออกไปตามชนิดการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งสามารถแบ่งส่วนยึดหลอดเอกซเรย์ออกได้ 3 ชนิดดังนี้

1.1.1 ชนิดยึดติดเพดาน (ceiling support) เป็นส่วนยึดที่ออกแบบโดยมีรางยึดติดกับเพดานและมีฐานยึดหลอดตั้งฉากกับราง ที่ยึดหลอดชนิดนี้มักออกแบบสำหรับห้องตรวจที่มีพื้นที่กว้าง หรือห้องเอกซเรย์ที่ต้องการให้หลอดเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ เช่น เลื่อนขึ้น-ลง เลื่อนด้านซ้าย-ขวา เลื่อนตามแนวขนาดกับเตียงเอกซเรย์ ทำให้สะดวกสำหรับการถ่ายภาพผู้ป่วยห้องอุบัติเหตุฉุกเฉิน ผู้ป่วยที่นอนบนเตียงเอกซเรย์ หรืออยู่บนรถนั่ง

1.1.2 ชนิดตั้งพื้น (floor mount system) เป็นส่วนยึดที่ออกแบบโดยมีฐานยึดติดกับพื้น หรือยึดติดกับเครื่องเอกซเรย์แบบเคลื่อนที่ (mobile x-ray) แกนยึดแบบนี้ทำให้หลอดเอกซเรย์เคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวขึ้นลงสูงต่ำ หรือออกแบบให้มีแกนอีกส่วนช่วยย่นหลอดเอกซเรย์เข้า-ออก และทำให้สามารถหมุนเพื่อถ่ายภาพในมุมต่างๆได้สะดวกขึ้น ที่ยึดหลอดแบบนี้เหมาะสำหรับห้องตรวจที่มีพื้นที่จำกัด ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์หรือทำหน้าที่ป้องกันอันตรายจากรังสี แต่จะไม่สะดวกในการใช้งานสำหรับถ่ายภาพรังสีของกระดูกที่ต้องเอียงมุมของหลอดเอกซเรย์ในลักษณะต่างๆ หรือไม่เหมาะสำหรับผู้ป่วยที่ประสบอุบัติเหตุ เป็นต้น

1.1.3 ชนิดฟลูออโรสโคปี (fluoroscopy) ซีอาร์ม (c-arm) หรือ ยูอาร์ม (u-arm) เป็นส่วนยึดที่ออกแบบโดยมีฐานยึดติดหลอดในตำแหน่งบริเวณใต้เตียงเอกซเรย์ หลอดจะอยู่ตรงกันข้ามกับหลอดอิมเมจอินเทนซีไฟเออร์ (image intensifier tube) และมักจะมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีที่มีลักษณะเป็นม่านทำด้วยตะกั่วช่วยป้องกันอันตรายจากรังสีแก่ผู้ปฏิบัติงาน นิยมใช้กับการตรวจระบบหลอดเลือด หัวใจ หรือ ใช้ในห้องผ่าตัด เนื่องจากมีลักษณะแกนยึดเป็นรูปตัวซี หรือยู ทำให้มีความสะดวกสำหรับการหมุนในมุมต่างๆ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

แกนส่วนยึด
หลอดเอกซเรย์
มีหลายรูปแบบ



แกนยึดหลอดเอกซเรย์แบบต่างๆ

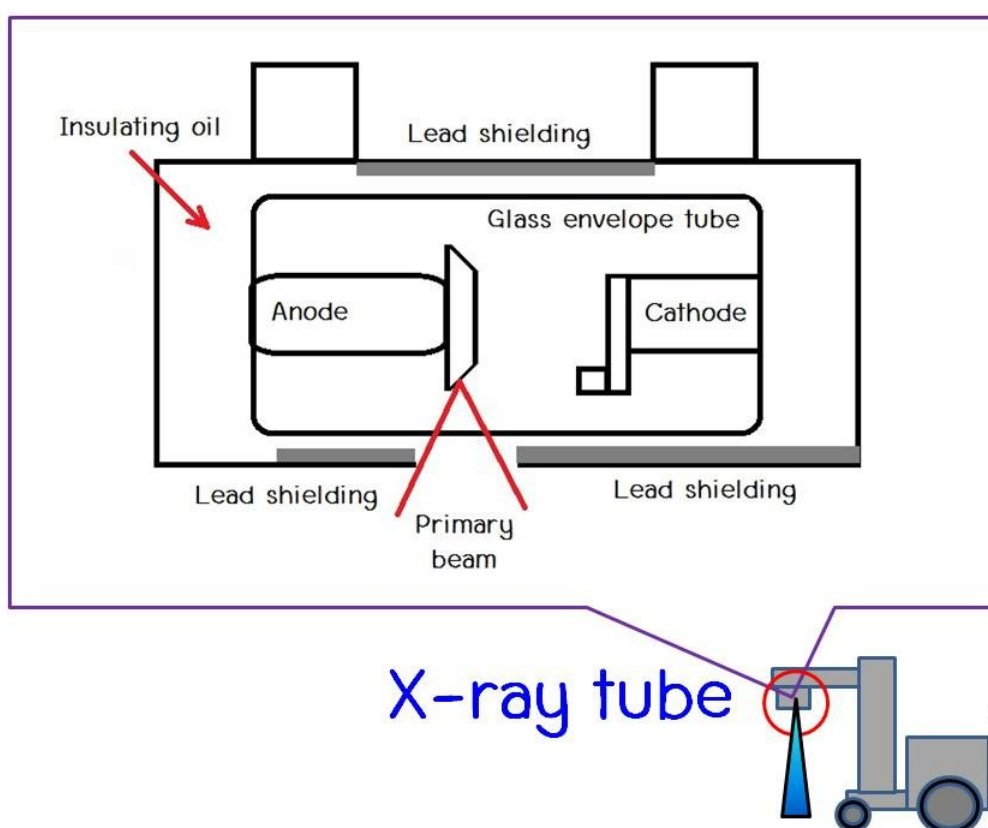
(ก) ชนิดติดเพดาน (ข) ชนิดตั้งพื้น (ค) ชนิดฟูลออร์โรสโคป ซีอาร์เอ็ม

(ง) ชนิดที่ติดกับเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่

1.2 เรือนหุ้มหลอด (tube shielding) ส่วนนี้เป็นส่วนที่ห่อหุ้มอุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ภายในของหลอดเอกซเรย์ โดยส่วนใหญ่จะทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งแรง คงทน เพื่อช่วยป้องกันการกระแทกกระเทือนของอุปกรณ์ภายในขณะปฏิบัติงาน และป้องกันไม่ให้รังสีจากภายในที่อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ต้องการรั่วออกสู่ภายนอกทำอันตรายต่อผู้ป่วยและเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน และต้องมีระบบช่วยในการระบายความร้อนออกจากหลอดได้ดี โดยเรือนหุ้มหลอดนี้จะมีช่องเปิดเพียงช่องเดียว บริเวณด้านหน้าเพื่อให้รังสีออกในทิศทางและตามพื้นที่ที่เลือกไว้เท่านั้น ในการประกันและควบคุมคุณภาพของหลอดเอกซเรย์ ควรมีการตรวจการรั่วไหลของรังสีที่ออกจากหลอดเอกซเรย์ โดยมาตรฐานที่กำหนด คือ ไม่ควรมีรังสีรั่วออกมาจากหลอดเอกซเรย์ เมื่อปิดกันรังสีด้วยแผ่นตะกั่วกำบังรังสี หรือ คอลลิเมเตอร์ (collimators) แล้ว วัดปริมาณรังสีที่ระยะ 1 เมตร ต้องมีปริมาณไม่เกิน 100 มิลลิเร็นต์เกนต่อชั่วโมง (mR/hr) ซึ่งโดยทั่วไปควรจะน้อยกว่า 30 มิลลิเร็นต์เกนต่อชั่วโมง การตรวจสอบควรใช้พลังงานสูงสุดที่เครื่องใช้งาน (Blinov et al. 1992; Gray et al. 2008)

2. ส่วนประกอบภายใน (internal structure) ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญดังนี้

2.1 หลอดห่อหุ้ม (x-ray tube envelope) ทำด้วยวัสดุทนความร้อน เช่น แก้วไพเรก (pyrex glass) หรือ เซรามิก (seramic) หรือ โลหะ (metal) หลอดมักจะออกแบบให้มีรูปคล้ายทรงกระบอก ภายในจะเป็นที่อยู่ของขั้วลบ (cathode) และขั้วบวก (anode) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ ภายในหลอดนี้จะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ เพื่อทำให้ควบคุมจำนวนและอัตราเร่งของอิเล็กตรอนได้อย่างอิสระ ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนวิ่งช้าลงจากการชนโมเลกุลของอากาศและยังเป็นการป้องกันการเกิดออกซิไดเซชัน (oxidation) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หลอดเอกซเรย์ชำรุดได้ นอกจากนี้เรือนหุ้มหลอดควรแข็งแรง ทนทาน และมีระบบระบายความร้อนที่ดี



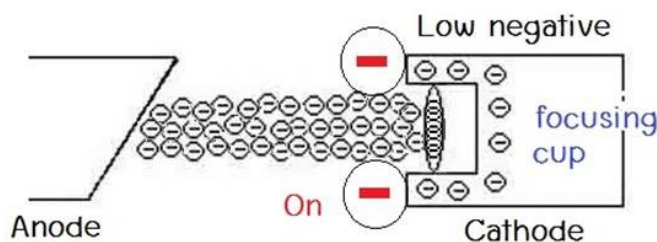
ส่วนประกอบของหลอดเอกซเรย์ บริเวณภายในเรือนหุ้มหลอดมีส่วนของแผ่นตะกั่ว (lead shielding) ปิดกัน เพื่อกำบังไม่ให้อิเล็กตรอนวิ่งออกจากหลอดเอกซเรย์สู่ภายนอก ระหว่างเรือนหุ้มหลอดกับหลอดแก้วสุญญากาศ จะมีน้ำมันชนิดพิเศษ (insulating oil) ที่มีส่วนช่วยในการระบายความร้อน หลอดห่อหุ้มเป็นหลอดที่ทนความร้อน มักจะออกแบบให้มีรูปคล้ายทรงกระบอก ภายในจะเป็นที่อยู่ของขั้วลบ (cathode) และขั้วบวก (anode)

2.2 ขั้วลบ (cathode) เป็นจุดกำเนิดของอิเล็กตรอนที่ไปชนเป้า (target) ของขั้วบวก ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ที่พุ่งออกจากหลอดเอกซเรย์ ขั้วลบ ประกอบด้วย **ไส้หลอด (filament)** ทำด้วยโลหะทนความร้อน เช่น ทังสเตน (tungsten) ไส้หลอด นี้จะถูกทำให้มีลักษณะเป็นเกลียว คล้ายไส้ของหลอดไฟฟ้า การทำให้เป็นเกลียวจะช่วยทำให้มีจำนวนพื้นที่ในการผลิตอิเล็กตรอนได้จำนวนมาก

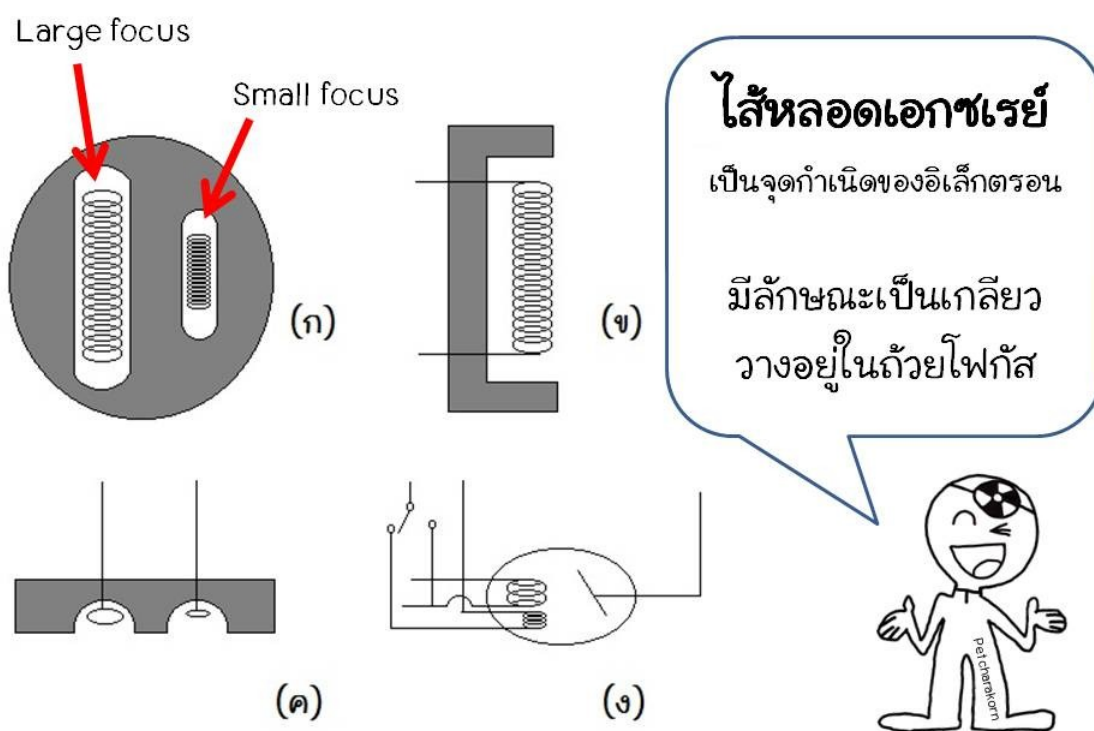
ไส้หลอด จะจัดเรียงกันอยู่ใน **ถ้วยโฟกัส (focusing cup)** หรือบางครั้งเรียก แคโทดบล็อก (cathode clock) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำด้วย นิเกิล (nickel) เมื่อใช้งานตัวถ้วยโฟกัสจะต้องทำให้มีประจุเป็นลบเหมือนกับอิเล็กตรอนที่จะปล่อยออกไป เมื่อมีประจุลบเหมือนกันนั้น จะเกิดแรงผลักระหว่างถ้วยโฟกัสกับลำอิเล็กตรอน แรงผลักระหว่างนี้ทำให้สามารถควบคุมหรือบีบลำของอิเล็กตรอนที่จะพุ่งออกจากไส้หลอดไปยังเป้าหมาย คือ ขั้วบวก ได้ตามต้องการ



ไส้หลอด มีลักษณะเป็นเกลียว
วางอยู่ในถ้วยโฟกัส (focusing cup)
ถ้วยโฟกัสทำหน้าที่บีบลำของอิเล็กตรอน
จากขั้วลบ (cathode) ไปขั้วบวก (anode)



เครื่องเอกซเรย์ที่ใช้กันแต่ละชนิด อาจมีไส้หลอดได้หลายไส้ แต่ละไส้จะมีขนาดที่แตกต่างกันได้ เช่น เครื่องเอกซเรย์ฟัน หรือ เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ขนาดเล็ก จะมีไส้หลอดเพียงขนาดเดียว เครื่องเอกซเรย์ทั่วไป จะมีไส้หลอดสองไส้ สองขนาด เป็นต้น ไส้หลอดขนาดเล็ก (small focus) หรือ ขนาดโฟคอลสปอตส์ (focal spot size) มีขนาดประมาณ คือ 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตร ไส้หลอดขนาดใหญ่ (large focus) ขนาดโฟคอลสปอตส์ มีขนาดประมาณ คือ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร



ส่วนประกอบของขั้วลบ สีเทา คือ ถ้วยโฟกัส

ไส้หลอด มีลักษณะเป็นเกลียว คือ ไส้หลอดขนาดใหญ่ และ ไส้หลอดขนาดเล็ก

(ก) ภาพด้านตรงในถ้วยโฟกัส ไส้หลอดขนาดใหญ่ และ ไส้หลอดขนาดเล็ก

(ข) ภาพด้านข้างถ้วยโฟกัส และ ไส้หลอดขนาดใหญ่

(ค) ภาพด้านบนถ้วยโฟกัส ไส้หลอดขนาดใหญ่ และ ไส้หลอดขนาดเล็ก

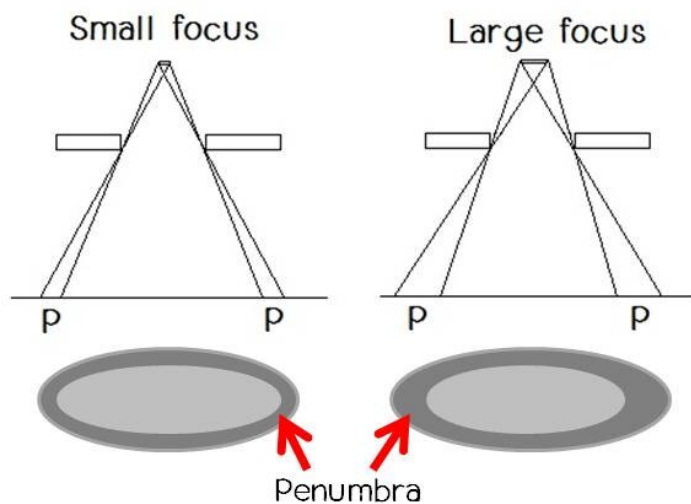
(ง) วงจรควบคุมไส้หลอดใหญ่และเล็กที่เชื่อมกับหลอดเอกซเรย์

Tube Type	Insert Type	Focal Spot
E7239X	RAD-8	1.0-2.0
E7242X	RAD-74	0.6-1.5
E7834X	RAD-12	0.6-1.2
E7813X	RAD-13	1.0-2.0
E7252X	RAD-14	0.6-1.2
E7251X	RAD-21	0.6-1.2

ตัวอย่าง
Focal spot size (mm)
จากผู้ผลิตหลอดเอกซเรย์



ในการถ่ายภาพรังสี จะเลือกใช้ไส้หลอดได้ที่ละหนึ่งไส้หลอดเท่านั้น โดยต้องเลือกใช้ขนาดใดขนาดหนึ่ง ในการปฏิบัติงาน ถ้าต้องการถ่ายภาพให้ได้รายละเอียดภาพสูง หรือ ถ่ายภาพอวัยวะที่มีขนาดเล็ก เช่น กระดูกยางค์แขนหรือขา ควรเลือกใช้ไส้หลอดที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากการถ่ายภาพที่เลือกใช้ ไส้หลอดขนาดเล็กนั้นภาพที่ปรากฏจะมีเงามัว (penumbra) น้อยกว่าการใช้ไส้หลอดขนาดใหญ่ สำหรับการถ่ายภาพอวัยวะที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาหลายๆ เช่น ช่องท้อง ลำตัว กระดูกสันหลัง หรือ เมื่อต้องการใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพที่สั้น ในการถ่ายภาพที่ต้องการให้ผู้รับบริการกลับหายใจ ควรเลือกใช้ไส้หลอดที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น



P : Penumbra คือ พื้นที่เงามัวที่เกิดในภาพ
การถ่ายภาพที่เลือกใช้ ไล์หลอดขนาดเล็ก
ภาพที่ปรากฏมีเงามัวน้อยกว่า การใช้ไล์หลอดขนาดใหญ่



Small focus ☒
Large focus ☐



อวัยวะที่มีขนาดเล็ก เช่น กระดูกข้อมือ
ควรเลือกใช้ small focus
อวัยวะที่มีขนาดใหญ่ เช่น ช่องท้อง
ควรเลือกใช้ Large focus



สำหรับหลอดเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคปีบางชนิด มีหลอดเอกซเรย์ที่ออกแบบมาเป็นชนิดพิเศษ จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าบริเวณถ้วยโฟกัสให้มีประจุลบจำนวนมากเป็นพิเศษ เพื่อให้ปิดกั้นลำอิเล็กตรอน คล้ายๆการเปิด-ปิด เพื่อบิลล์ของอิเล็กตรอนหลุดออกได้เป็นช่วงๆหรือตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งสามารถทำให้รังสีเอกซ์ที่ออกมาจากหลอดเกิดเป็นช่วงๆ (pulse x-ray หรือ pulse fluoroscopy) ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการลดปริมาณรังสีระหว่างการตรวจในแก่ผู้รับบริการ (Boland et al. 2000; Balter 2014; Wambani et al. 2014)

ขั้วลบมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนให้เกิดขึ้นตามจำนวนที่ต้องการ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าพลังงานต่ำจากวงจรควบคุมไส้หลอด (filament circuit) ส่งเข้าไปยังขั้วลบ ทำให้ไส้หลอดที่ขั้วลบ มีอุณหภูมิค่อยๆสูงขึ้น จนสามารถทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนก่อตัวขึ้นที่บริเวณไส้หลอดและพร้อมที่จะหลุดออกมาจากวงโคจรของวัสดุที่ทำไส้หลอดเอกซเรย์ ขบวนการนี้ เรียกว่า **เทอร์มิออนิกมิชัน (Thermionic Emission)** สาเหตุที่อิเล็กตรอนยังไม่สามารถหลุดพ้นไปจากผิวหน้าไส้หลอด เพราะแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของไส้หลอดยังมีอยู่ และเมื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วลบและขั้วบวก จะทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วลบพุ่งไปชนเป้าที่ขั้วบวกเกิดเป็นรังสีเอกซ์ (Seibert 2004; Gambini 2010)

2.3 ขั้วบวก (anode) เป็นเป้าอยู่ตรงข้ามขั้วลบ ทำหน้าที่รับลำอิเล็กตรอนที่วิ่งด้วยความเร็วสูงจากขั้วลบ เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้มาชนที่เป้า อิเล็กตรอนก็จะลดความเร็วลงหรือถูกทำให้หยุด ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือ คายพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ รังสีเอกซ์

เป้าของขั้วบวก จะทำด้วยแข็งแรงทนทาน เช่น ทังสเตน มีคุณสมบัติทนความร้อน มีจุดหลอมเหลวสูง และ สามารถระบายความร้อนได้ดี วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงจะทำให้โอกาสเกิดรังสีเอกซ์มากกว่าวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ ถึงแม้ว่าทังสเตนที่เป้าจะช่วยในการระบายความร้อน แต่บางบริษัทออกแบบและเติมส่วนผสมของสาร เช่น รีนเนียม (rhenium) หรือ กราฟไฟต์ (graphite) เข้าไปในบางส่วนของเป้า เพื่อช่วยให้เป้าสามารถระบายความร้อนออกจากตัวเองได้ดียิ่งขึ้น (Seibert 2004; Chen et al. 2008; Poludniowski et al. 2009)

สำหรับหลอดเอกซเรย์ที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสีเต้านม จะใช้รังสีเอกซเรย์ที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งวัสดุที่นำมาทำเป็นเป้าจะใช้วัสดุแตกต่างจากเครื่องเอกซเรย์ทั่วไป โดยมักจะใช้ โมลิบดีนัม (molybdenum) หรือ โรเดียม (rhodium)

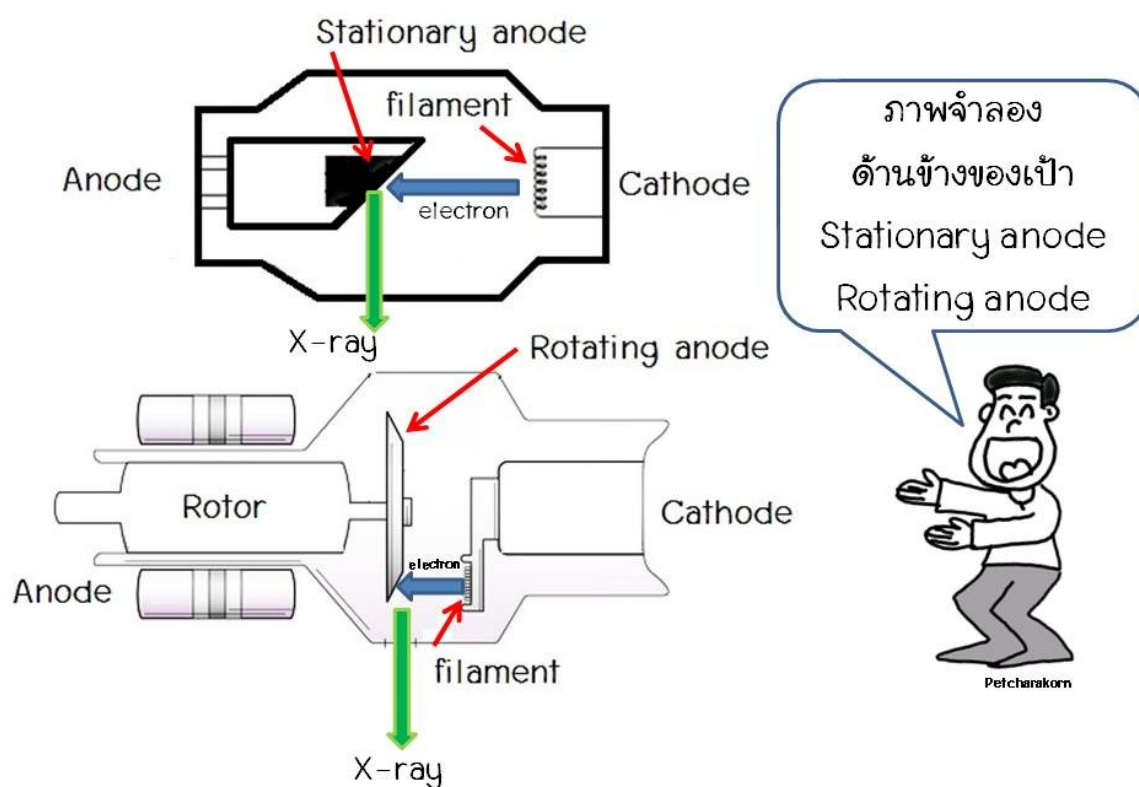
ตารางแสดงคุณสมบัติธาตุที่ใช้ทำเป้าของขั้วบวก

ธาตุ	สัญลักษณ์เคมี	เลขอะตอม	พลังงานระดับ วงโคจรเค (K-shell)	จุดหลอมเหลว
ทังสเตน	W	74	69 kev	3,400 °C
โมลิบดีนัม	Mo	42	20 kev	2,600 °C
โรเดียม	Rh	45	23 kev	3,200 °C

ลักษณะของเป้าของขั้วบวกที่ใช้กันทั่วไป มี 2 แบบ คือ

1. **ลักษณะของเป้าแบบอยู่กับที่ (stationary anode)** เป็นเป้าที่ออกแบบทรงกระบอก ปลายด้านหนึ่งมีลักษณะลาดที่เอียง ส่วนหนึ่งทางด้านลาดเอียงจะเป็นบริเวณที่รับลำอิเล็กตรอนจากขั้วลบ เป้าแบบนี้ เป็นเป้าที่อยู่นิ่ง ไม่สามารถหมุนได้ ทำด้วยทังสเตนฝังในแท่งทองแดง (copper) เป้าชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ ตำแหน่งที่เป็นส่วนที่รับลำอิเล็กตรอนจากขั้วลบ มีเพียงตำแหน่งเดียว เมื่อใช้งานแต่ละครั้ง จะมีลำอิเล็กตรอนที่วิ่งด้วยความเร็วสูงและพุ่งชน ณ ตำแหน่งเดิมๆ ซ้ำๆ และเมื่อมีการชนที่ตำแหน่งดังกล่าวบ่อยๆ ก็จะทำให้สร้างความเสียหายที่เล็ก ที่ละน้อยให้เป้าของขั้วบวก จนกระทั่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หลอดเอกซเรย์ชำรุดได้

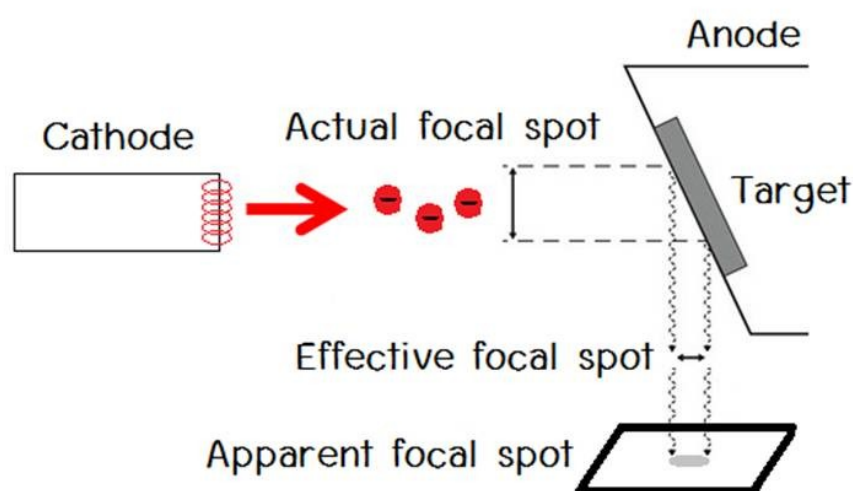
2. **ลักษณะของเป้าแบบหมุน (rotating anode)** เป็นเป้าที่ออกแบบรูปทรงกลมแบน มีอุปกรณ์ควบคุมการหมุน (rotor) ให้เป้าสามารถหมุนด้วยความเร็วสูงหลายพันรอบต่อวินาที การที่ออกแบบให้เป้ามีทรงกลม เมื่ออิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนที่เป้า ทำให้มีตำแหน่งการชนหลายตำแหน่ง ไม่ซ้ำจุดเดิมบ่อยครั้ง ลักษณะเป้าแบบนี้ จึงมีพื้นที่หรือตำแหน่งในการรับลำอิเล็กตรอนได้มากกว่าแบบเป้าอยู่กับที่ นอกจากนี้ที่ขั้วบวกจะออกแบบให้มีการระบบช่วยในการระบายความร้อนออกจากตัวเองได้ดี เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดเอกซเรย์อีกด้วย



เมื่อกล่าวถึงจุดโฟกัสในการถ่ายภาพรังสี อาจระบุการเรียกที่แตกต่างกัน คือ

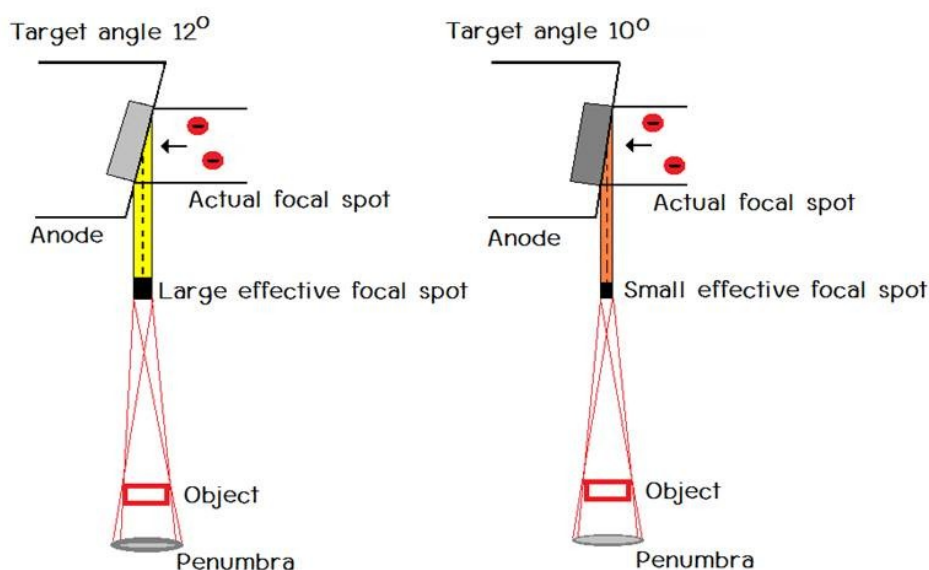
จุดโฟกัสแท้จริง (Actual focal spot หรือ real focal spot) หมายถึง บริเวณที่ลำอิเล็กตรอนพุ่งเข้าชนเป้าของหัวบวก จะเป็นส่วนที่บอกขนาดของลำอิเล็กตรอน ซึ่งจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของไส้หลอดที่ขั้วลบ

จุดโฟกัสเกิดผล หรือ จุดโฟกัสที่ปรากฏ (Effective focal spot หรือ apparent focal spot) หมายถึง พื้นที่หรือบริเวณที่ลำรังสีเอกซ์พุ่งออกจากเป้าหรือหลอดเอกซเรย์ หรือ จนกระทบกับอุปกรณ์รับภาพทำให้เกิดจุดที่ปรากฏภาพ



**ตำแหน่งเกิดแตกต่างกัน
เรียกชื่อต่างกัน**

บริเวณด้านหน้าของเป้าของหัวบวกที่รับลำอิเล็กตรอน ออกแบบให้มีลักษณะเป็นมุมเอียง เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนที่พุ่งมาจากขั้วลบเข้าชนเป้า เกิดเป็นรังสีเอกซ์ แล้วพุ่งออกไปในทิศทางที่ต้องการ มุมเอียงของเป้า จะออกแบบให้มีมุมเอียง ประมาณ 7-20 องศา มุมเอียงของเป้า มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายทางรังสี ที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดของภาพ องศาของมุมที่เอียงที่มาก จะทำให้คุณภาพของรายละเอียดของภาพลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ องศาของมุมที่เอียงที่น้อย



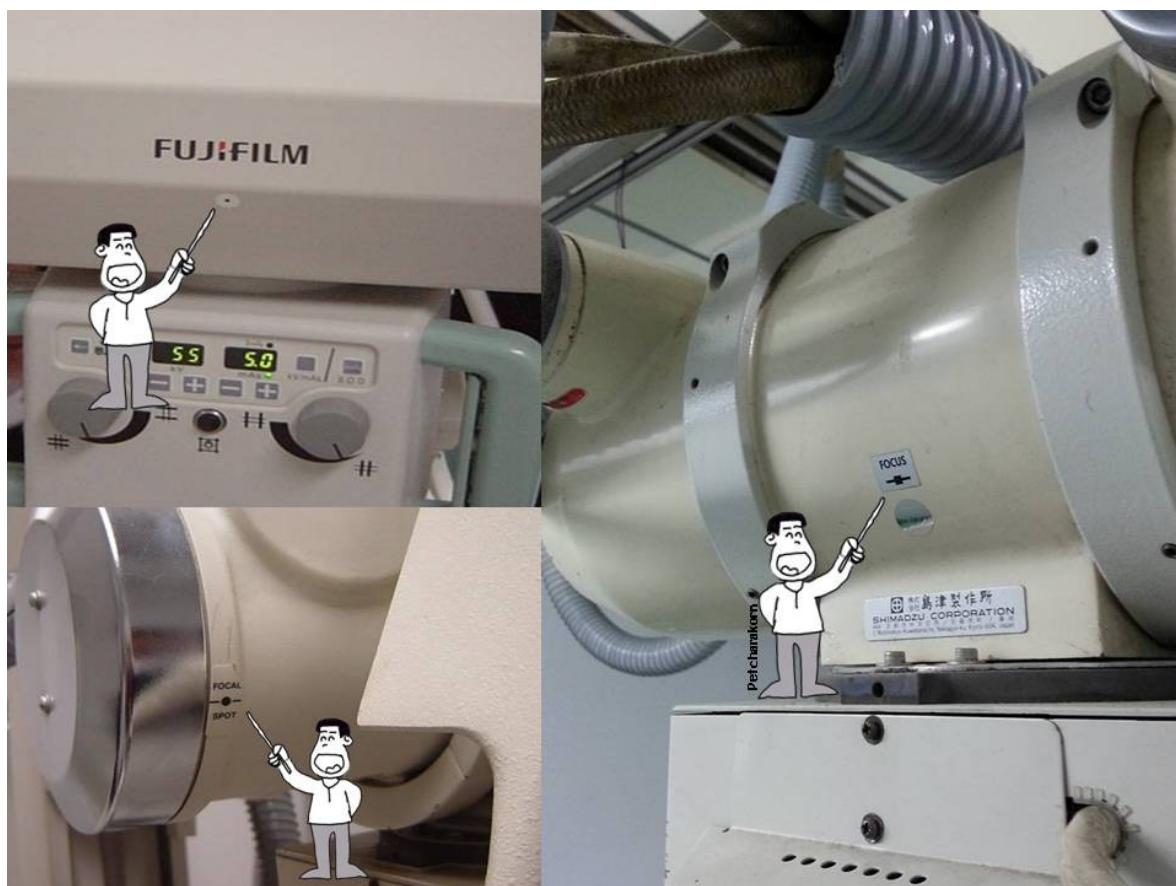
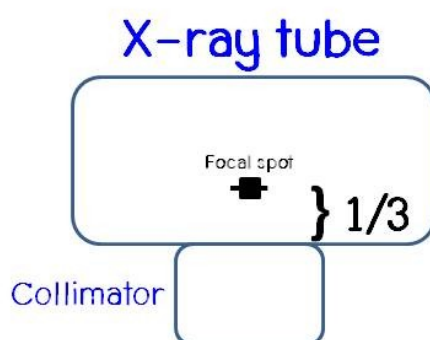
**เป้าที่มีมุมของการเอียงที่น้อย เมื่อถ่ายภาพ
ภาพที่ออกมาจะมีพื้นที่เงามัว (penumbra) น้อย**



ขนาดของลำโฟกัส (focal spot size) สามารถตรวจสอบ หรือ วัดขนาดด้วยเครื่องกล้องรูเข็ม (pin hold camera) หรือแบบทดสอบอื่นๆ เช่น slit camera , star pattern , resolution bar pattern (Everson and Gray 1987; Blinov et al. 1992)

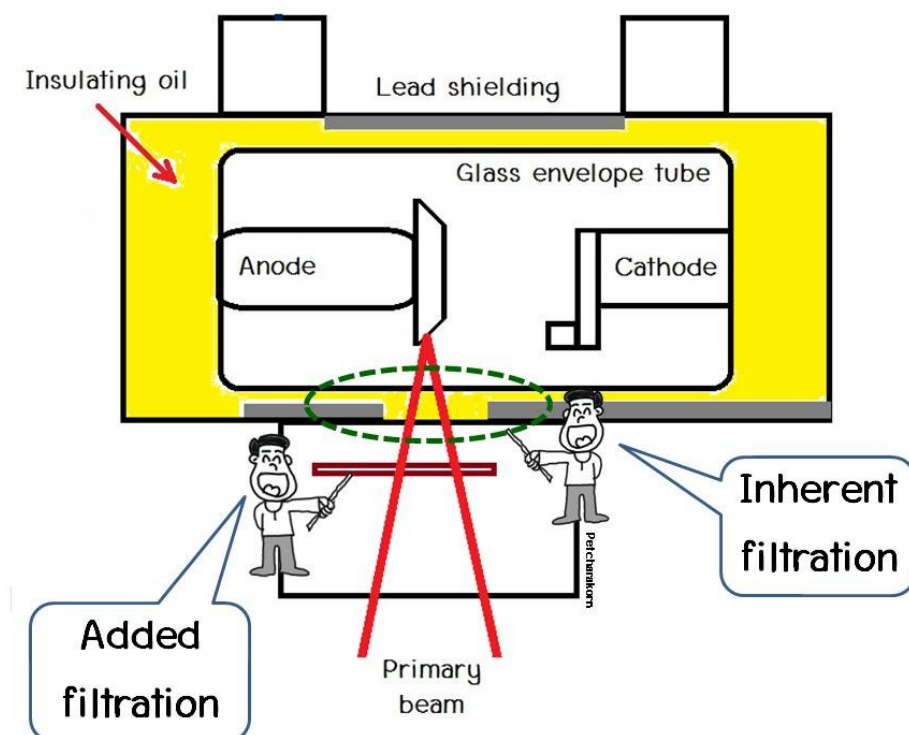
ในการถ่ายภาพรังสีประกอบการวินิจฉัยหรือการควบคุมอุปกรณ์ มักจะมีการกำหนดระยะทางระหว่างจุดโฟกัสของหลอดเอกซเรย์กับอุปกรณ์รับภาพ (focus detector distance ; FDD หรือ source image distance ; SID) ระยะทางนี้จะอยู่ระหว่าง 100 ถึง 180 เซนติเมตร บริเวณหลอดเอกซเรย์บริษัทผู้ผลิตจะมีเครื่องหมายหรือมีข้อความที่ระบุตำแหน่งของจุดโฟกัสเอาไว้ โดยหากไม่มีการระบุตำแหน่งที่ชัดเจนเอาไว้ อาจจะกำหนดตำแหน่งจุดโฟกัสโดยประมาณ คือ ตำแหน่งบริเวณจุดกึ่งกลางค่อนมาด้านล่าง บริเวณ 1/3 ทางด้านล่างของหลอดเอกซเรย์

ตำแหน่งจุดโฟกัสจะอยู่ประมาณ
บริเวณจุดกึ่งกลาง แต่ค่อนข้างมาด้านล่าง
ประมาณ $1/3$ ของหลอดเอกซเรย์



2.4 ระบบระบายความร้อน (cooling system) เมื่ออิเล็กตรอนจากหัวลบพุ่งเข้าชนเป้าที่หัวบวกในหลอดเอกซเรย์ จะเกิดรังสีเอกซ์ ประมาณ ร้อยละ 1 ที่เหลือเป็นความร้อนประมาณ ร้อยละ 99 การถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นระยะเวลานานจะมีผลต่อหลอดเอกซเรย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบการระบายความร้อน ภายในหลอดเอกซเรย์จะบรรจุน้ำมันชนิดพิเศษจะอยู่ระหว่างหลอดแก้วสุญญากาศกับเรือนหุ้มหลอดเอกซเรย์ เพื่อนำความร้อนจากหลอดแก้วผ่านออกเรือนหุ้มหลอดและระบายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก น้ำมันชนิดพิเศษในหลอดเอกซเรย์ยังช่วยในการป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรหรือช็อต (electric shock) หลอดเอกซเรย์บางรุ่นอาจมีระบบระบายความร้อนอื่นๆ เช่น พัดลมระบายอากาศ ระบบน้ำไหลเวียนนำความร้อนออกสู่ภายนอก ช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดเอกซเรย์ได้ (Iversen and Whitaker 1984; Schreiber 1990; Perry 1993)

2.5 ระบบกรองรังสี (filter system) ในหลอดเอกซเรย์จะมีช่องที่ให้รังสีออกอยู่เพียงช่องเดียว โดยชิ้นส่วนของหลอดแก้ว น้ำมันที่อยู่ในหลอด แผ่นกระจกและอื่นๆ ส่วนนี้เป็นส่วนที่ช่วยกรองรังสีเอกซ์พลังงานต่ำที่พุ่งออกมาจากเป้าที่หัวบวก เรียกการกรองรังสีแบบนี้ว่า **การกรองรังสีที่เกิดขึ้นเอง (inherent filtration)** ถึงแม้ว่าจะมีการกรองรังสีดังกล่าวแล้ว การเกิดรังสีเอกซ์สำหรับการใช้งานก็ยังคงเหลือรังสีเอกซ์พลังงานต่ำอีกหลายระดับพลังงานอยู่ จึงมีความจำเป็นต้องใส่แผ่นกรองรังสีเพิ่มเติมเข้าไป กรองรังสีแบบนี้ เรียกว่า **การกรองรังสีที่เพิ่มเข้าไป (added filtration)** การกรองทั้งสองแบบรวมกันเรียกว่า **การกรองรังสีรวม (total filtration)** (Kirchner and Leu 1977; Schardt et al. 2004; Wolbarst et al. 2013)



อัตราความร้อนของหลอดเอกซเรย์ (x-ray tube heat rating)

เมื่ออิเล็กตรอนจากขั้วลบพุ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วบวกภายในหลอดเอกซเรย์ ประมาณ ร้อยละ 1 จะเกิดรังสีเอกซ์ ส่วนที่เหลือเป็นความร้อน ประมาณ ร้อยละ 99 ในการตรวจวินิจฉัยด้วยรังสีเอกซ์ ประเภทต่างๆ เช่น การถ่ายภาพรังสีทั่วไป การถ่ายภาพรังสีเต้านม การตรวจวินิจฉัยพิเศษ (special examination) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ชนิดฟลูออโรสโคป หรือ เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ นักรังสีการแพทย์ รังสีเทคนิค ผู้ควบคุมเครื่องเหล่านี้ จะเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการกำหนดรังสี หรือ ที่เรียกทางเทคนิคว่า เอกซ์โพเชอร์แฟกเตอร์ (exposure factors) หรือ เอกซ์โพเชอร์เทคนิค (exposure techniques) ซึ่งค่าต่างๆประกอบด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้า หรือ เรียกอย่างย่อว่า เควี (kilovoltage ; kV) ค่ากระแสไฟฟ้า หรือ เรียกอย่างย่อว่า เอ็มเอ (milliampere ; mA) และระยะเวลาในการฉายรังสี รวมถึงระยะเวลาในการฉายในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

การตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่องฟลูออโรสโคปและการตรวจด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เป็นการตรวจที่ต้องฉายรังสีอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ประมาณ 5-30 วินาทีต่อครั้ง ขึ้นกับว่าตรวจอวัยวะส่วนใด การตรวจด้วยเครื่องฟลูออโรสโคปหลอดเลือดและหัวใจ บางครั้งใช้ระยะเวลาการฉายรังสีโดยรวม ตั้งแต่ 1-5 นาที การตรวจที่ใช้การฉายรังสีต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานจะมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในหลอดเอกซเรย์

ดังนั้นนักรังสีการแพทย์ รังสีเทคนิค เจ้าหน้าที่ผู้ใช้งาน ต้องทำความเข้าใจและศึกษาข้อมูลเอกสารจากทางบริษัทผู้ผลิตเกี่ยวกับ แผนภูมิข้อมูลการใช้งานในของหลอดเอกซเรย์ในการถ่ายภาพรังสี (radiographic rating chart) การระบายความร้อนจากขั้วบวกหรือจากหลอดเอกซเรย์ (anode cooling chart และ housing cooling chart) เพื่อเป็นการใช้งานที่อย่างมีประสิทธิภาพ ถูกต้องเหมาะสม รวมถึงจะเป็นการช่วยยืดอายุและรักษาหลอดเอกซเรย์ให้มีการใช้งานได้นานขึ้น

หน่วยความร้อน (heat unit ; HU) หมายถึง หน่วยของพลังงานความร้อน ในที่นี้ คือ ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากหลอดเอกซเรย์ เครื่องเอกซเรย์แต่ละชนิด การตรวจแต่ละประเภท จะเกิดความร้อนภายในหลอดเอกซเรย์ที่มีความแตกต่างกัน ขึ้นกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการกำหนดรังสีที่ใช้ รวมถึงแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าของเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

Single phase

$$HU = kVp \times mA \times \text{exposure time}^*$$

$$HU = kVp \times mAs$$

Three phase และ high frequency $HU = kVp \times mA \times \text{exposure time}^* \times 1.35$

Constant potential $HU = kVp \times mA \times \text{exposure time}^* \times 1.41$

* exposure time เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพรังสี คือ วินาที

สำหรับเครื่องเอกซเรย์ชนิด Three phase, high frequency และ constant potential generator ที่ต้องใช้ค่าตัวคูณ 1.35 หรือ 1.40 นั้น เนื่องจากเครื่องเอกซเรย์เหล่านี้มีค่ากระแสฟลักซ์ของกระแสต่ำ ทำให้เกิดมีความร้อนในหลอดเอกซเรย์สูง (Wolbarst et al. 2013)

ตัวอย่าง การคำนวณความร้อนที่เกิดขึ้นในหลอดเอกซเรย์ชนิดโฟลสเดียว และ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการกำหนดรังสีในการถ่ายภาพกระดูกสันหลัง โดยการใช้ 90 kVp 80 mAs สำหรับเครื่องเอกซเรย์ชนิด single phase จงหาว่าจะเกิดความร้อนขึ้นภายในหลอดเอกซเรย์ปริมาณเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จากสมการ single phase : HU} &= \text{kVp} \times \text{mA} \times \text{exposure time} \\ &= 90 \times 80 \\ &= 7,200 \text{ HU}\end{aligned}$$

ตัวอย่าง การตรวจด้วยเครื่องฟลูออโรสโคป ใช้เทคนิค 70 kV 1 mA ระยะเวลา 2 นาที สำหรับเครื่องเอกซเรย์ชนิด single phase จงหาว่าจะเกิดความร้อนขึ้นภายในหลอดเอกซเรย์ปริมาณเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จากสมการ single phase : HU} &= \text{kV} \times \text{mA} \times \text{exposure time} \\ &= 70 \times 1 \times (2 \times 60) \\ &= 8,400 \text{ HU}\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ การถ่ายภาพกะโหลกศีรษะ โดยการใช้ 80 kVp 120 mAs ติดต่อกันจำนวน 6 ภาพ สำหรับเครื่องเอกซเรย์ชนิด three phase จงหาว่าจะเกิดความร้อนขึ้นภายในหลอดเอกซเรย์ปริมาณเท่าไร

$$\begin{aligned}\text{จากสมการ three phase : HU} &= \text{kVp} \times \text{mA} \times \text{exposure time} \times 1.35 \\ &= 80 \times 120 \times 1.35 \\ &= 12,960 \\ \text{ถ่ายภาพจำนวน 6 ภาพ} &= 6 \times 12,960 \\ &= 77,760\end{aligned}$$

อัตราการใช้กระแสไฟฟ้า (electrical rating)

การใช้งานของหลอดเอกซเรย์เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อหลอดเอกซเรย์ ผู้ใช้งานควรที่จะศึกษาแผนภูมิข้อมูลการใช้งาน ซึ่งจะประกอบด้วยค่าต่างๆ เช่น

ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (maximum kilo voltage) และ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (maximum tube current) ความร้อนภายในหลอดเอกซเรย์ที่เกิดขึ้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า การใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าที่สูง จะทำให้เกิดความร้อนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสที่ต่ำ ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนที่สูงเกินความสามารถที่หลอดเอกซเรย์จะทนได้ ก่อนการใช้งานควรศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด จากแผนภูมิข้อมูลการใช้งานในของหลอดเอกซเรย์ในการถ่ายภาพรังสี

กำลัง (power) กำลังของเครื่องเอกซเรย์มีค่าเท่ากับ ค่าศักย์ไฟฟ้าคูณกับค่ากระแสไฟฟ้า ($\text{power} = \text{kVp} \times \text{mA}$) มีหน่วยเป็น วัตต์ (watts) หรือ กิโลวัตต์ (kilowatts) ในการใช้งานเมื่อต้องใช้ค่ากำลังที่สูง ก่อนใช้ต้องศึกษาถึงค่าของค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่หลอดเอกซเรย์สามารถทนทานได้จากแผนภูมิข้อมูลการใช้งานในของหลอดเอกซเรย์ในการถ่ายภาพรังสี เพื่อความปลอดภัยของหลอดเอกซเรย์

อัตราค่ากิโลวัตต์ (kilowatt rating) ณ เวลาที่เท่ากับ 0.1 วินาที สามารถใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีค่าของกิโลวัตต์ที่เท่ากันได้

$$\text{กำลัง} = \text{ความต่างศักย์ไฟฟ้า} \times \text{กระแสไฟฟ้า}$$

เทคนิคที่ใช้ คือ 60 kVp 500 mA จะมีกำลังเท่ากับ 30 kW

80 kVp 375 mA จะมีกำลังเท่ากับ 30 kW

100 kVp 300 mA จะมีกำลังเท่ากับ 30 kW

จากที่แสดงมานี้จะเห็นได้ว่าเป็นเทคนิคที่ต่างกัน แต่ได้กำลังเท่ากัน เหมาะสำหรับการเลือกใช้ถ่ายอวัยวะที่แตกต่างกัน เวลาในการถ่ายภาพแตกต่างกัน ส่วนจะเลือกใช้ได้หรือไม่ได้อย่างไรก็สามารถศึกษาจากแผนภูมิข้อมูลการใช้งานในของหลอดเอกซเรย์ในการถ่ายภาพรังสี

นอกจากนี้สำหรับการเลือกใช้ค่าต่างๆเมื่อต้องใช้เวลาที่สั้นในการถ่ายภาพจะคำนึงถึง

อัตราความเร็วของการหมุนของหัวบวก

ขนาดความกว้างและยาวของโฟลคอสปอลต์

ส่วนเมื่อต้องใช้เวลาที่ยาวในการถ่ายภาพจะคำนึงถึง

ไส้หลอดที่มีขนาดใหญ่

อัตราการหมุนของหลอดที่เร็ว

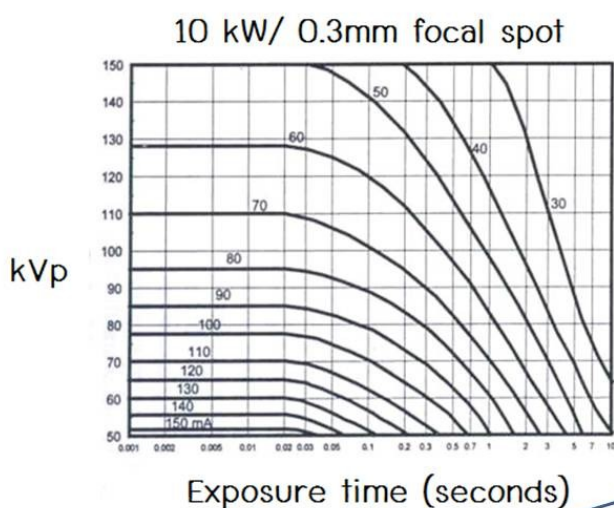
การลด mA เพิ่มเวลาในการถ่ายภาพ

การเพิ่ม kVp ลด mA และระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ

การเลือกใช้อัตราความไวของฟิล์มและสารเรืองแสงในตลับใส่ฟิล์ม

อัตราความร้อน (thermal rating) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการถ่ายภาพรังสี ประมาณ 99% และ เพียง 1% เท่านั้น ที่เป็นรังสีเอกซ์ ความร้อนที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดที่เป้าหรือหัวบงกของหลอดเอกซเรย์ ดังที่ทราบกันแล้วว่าปัจจัยที่มีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ ที่คำนวณได้จากค่าหน่วยความร้อนของเครื่องเอกซเรย์แต่ละชนิด นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการคงอยู่น้อยเพียงใดจะขึ้นกับการออกแบบการระบายความร้อนของหลอดเอกซเรย์ ดังนั้นผู้ใช้งานควรศึกษาถึงแผนภูมิการระบายความร้อน (cooling chart)

นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ได้มีบทบาทที่สำคัญต่อเครื่องเอกซเรย์มากขึ้น ดังนั้นเกี่ยวกับระบบการระบายความร้อน หรือการรักษาความปลอดภัยต่อหลอดเอกซเรย์จะมีมากขึ้น โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการคำนวณความสามารถที่หลอดสามารถทนทานได้ รวมถึงการยินยอมให้ใช้งานหรือไม่ให้ใช้งาน เมื่อเกิดความร้อนที่มีต่อหลอดเอกซเรย์



ตัวอย่างแผนภูมิ
การเลือกใช้
kVp-mA-time

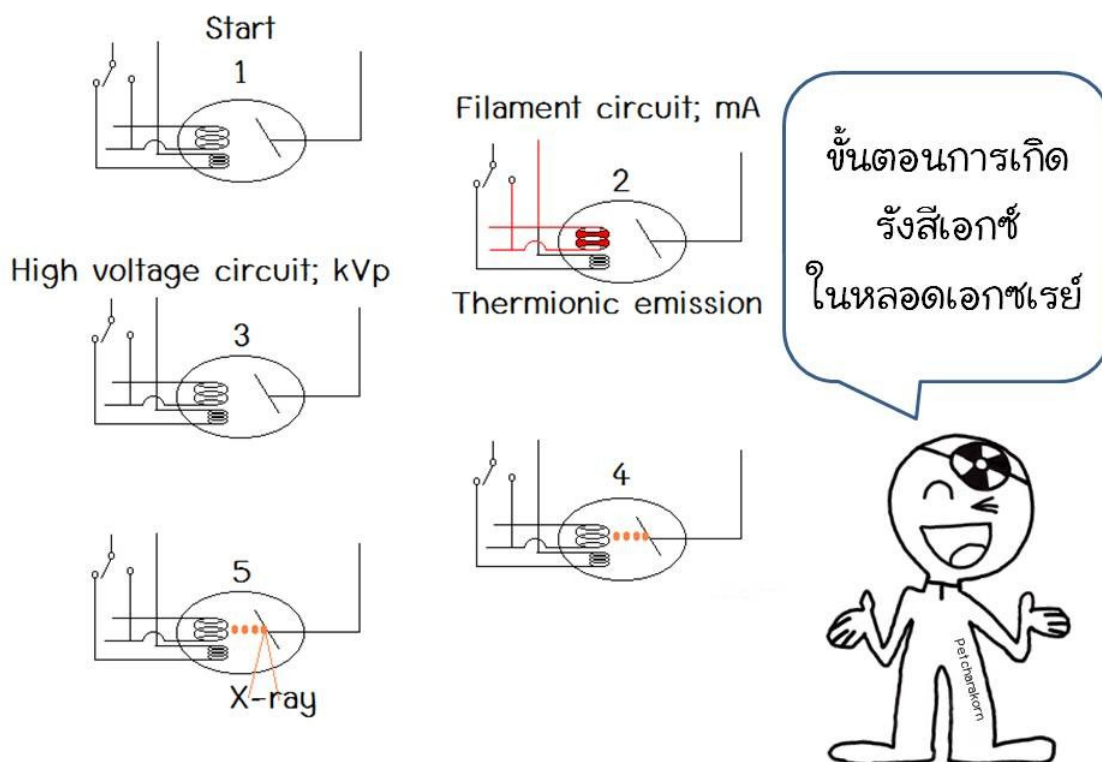
เลือกค่าสูงสุดที่ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้



ขบวนการเกิดรังสีเอกซ์เรย์ในหลอดเอกซ์เรย์

รังสีเอกซ์ที่ผลิตขึ้นจากเครื่องเอกซ์เรย์ อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อไรก็ตามที่อิเล็กตรอน ซึ่งวิ่งด้วยความเร็วสูงถูกทำให้ช้าลงหรือหยุด เมื่อนั้นจะเกิดเอกซ์เรย์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

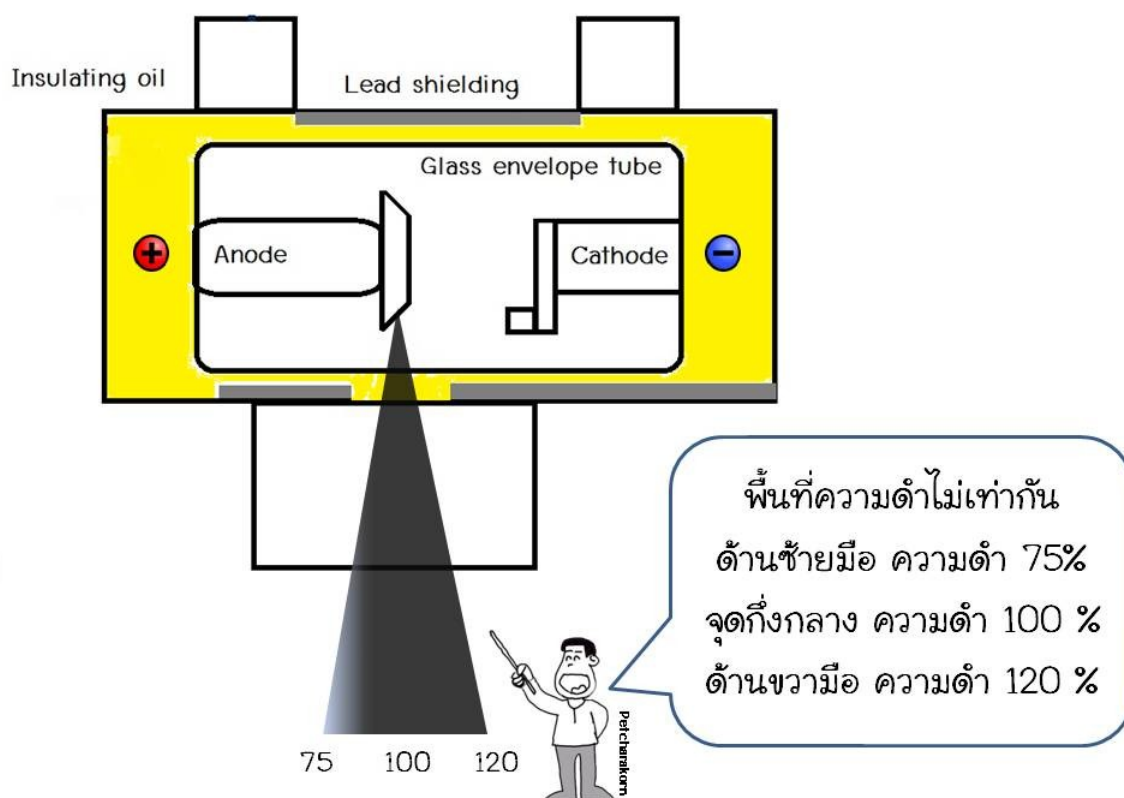
1. เริ่มต้น
2. การกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ ทำโดยการให้กระแสไฟฟ้าด้วยวงจร (filament circuit : ma) เพื่อทำให้เกิดความร้อนที่ขั้วลบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (thermionic emission) จนทำให้อิเล็กตรอนมารวมกันที่ไส้หลอด
3. การแยกอิเล็กตรอนจากขั้วลบ โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบของหลอดเอกซ์เรย์ ด้วยวงจรควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage circuit; kVp) ทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วลบวิ่งเข้าไปหาเป้าของขั้วบวกด้วยความเร็วสูง
4. การทำให้อิเล็กตรอนหยุดช้าลงหรือหยุด เมื่ออิเล็กตรอนจากขั้วลบวิ่งเข้าหาเป้าของขั้วบวกด้วยความเร็วสูงอิเล็กตรอน หากวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสแล้วเบี่ยงเบนทิศทางไปจากแนวเดิม (bremsstrahlung radiation) หรือ อิเล็กตรอนวิ่งกระทบอิเล็กตรอนของเป้าแล้วทำให้อิเล็กตรอนของเป้าหลุดออกจากวงโคจร เกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนวงต่างๆของอะตอม (characteristic x-ray)
5. เกิดเป็นรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์เรย์จะถูกทำให้ออกมาในทิศทางที่ต้องการ เพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อไป



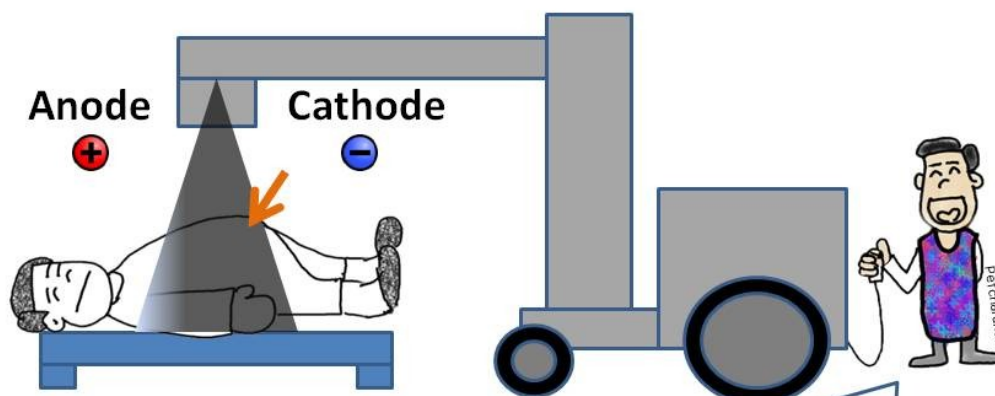
ฮิวเอฟเฟค (heel effect)

ปรากฏการณ์ที่ความเข้มของรังสีไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของลำรังสีตกกระทบ โดยจะมีความลาดเอียงทางด้านหัวบวไปหาหัวลบ ผลเกิดจากหัวบวของเป้าดูดกลืนรังสีที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณหัวลบในหลอดเอกซเรย์ ส่งผลให้ปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนแผ่นรับภาพมีความดำที่แตกต่างกัน ทำให้ภาพมีความดำไม่เท่ากัน พื้นที่ทางด้านหัวลบของหลอดเอกซเรย์จะมีความดำมากกว่าพื้นที่ทางด้านหัวบว ลักษณะความเข้มของรังสีที่ลดลง มีลักษณะคล้ายๆ กับส้นเท้า จึงเรียกว่า **ฮิวเอฟเฟค**

โดยผลที่เกิดจากฮิวเอฟเฟคจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มมุมเอียงของเป้าที่หัวบว หรือ การเลือกใช้พื้นที่ลำรังสีที่มีขนาดแคบๆ สำหรับในการปฏิบัติสามารถประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์นี้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สำหรับการถ่ายภาพอวัยวะที่มีความหนาแตกต่างกันได้ เช่น การถ่ายภาพช่องท้องสำหรับคนอ้วน เพราะบริเวณที่หนาจะอยู่ด้านปลายเท้าของผู้รับบริการ ดังนั้น ควรเลือกจัดหัวลบของหลอดเอกซเรย์ไปอยู่ในทิศทางที่มีอวัยวะหนา หรือ บางครั้งถ้าหากต้องการ ให้ลำรังสีมีความสม่ำเสมอ หรือ แก้ไขปัญหาของฮิวเอฟเฟค สามารถทำได้โดยการใช้แผ่นกรองรังสีที่มีลักษณะเป็นรูปลิ้ม โดยให้ส่วนที่หนาของลิ้มอยู่ด้านที่มีความเข้มของรังสีที่สูง เป็นต้น



แสดงปรากฏการณ์ heel effect บริเวณด้านหัวบวจะมีความเข้มของรังสีลดลงน้อยกว่าด้านหัวลบ ผลที่ตามมา คือ ทำให้ความดำที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มหรือภาพ มีความดำไม่เท่ากัน



การใช้ประโยชน์จากฮิวเอฟเฟค

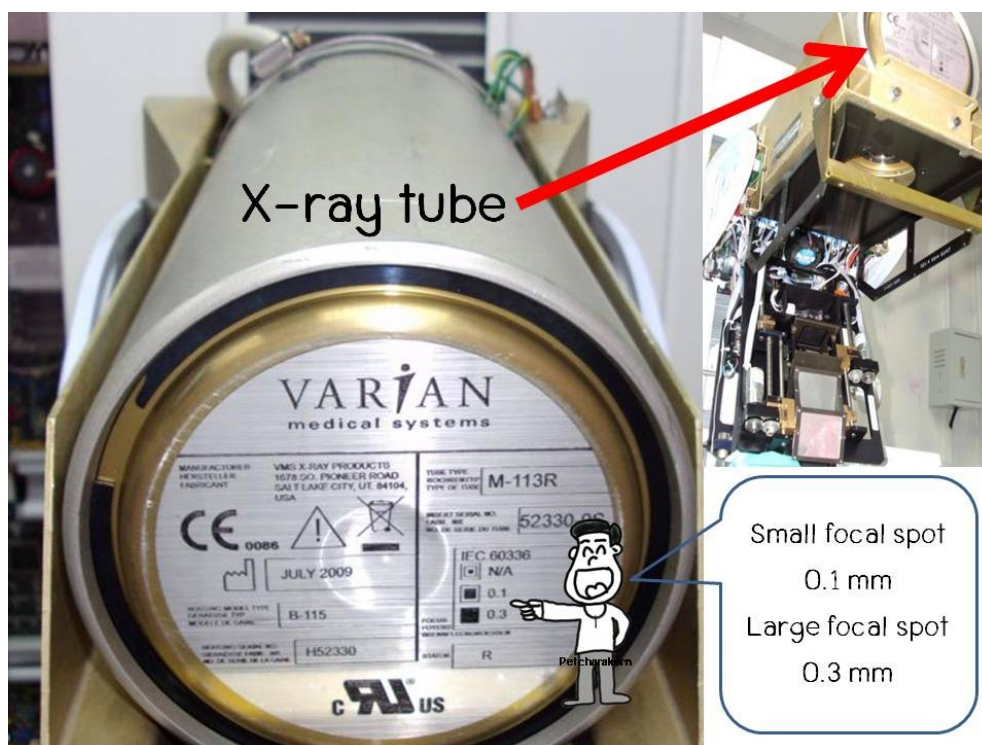
ควรจัดทำผู้ป่วย

โดยจัดอวัยวะส่วนที่หนาๆ (ศรชี้) ไปอยู่ ด้านซ้าย
จะทำให้ภาพบริเวณหนามีความดำเพิ่มขึ้น

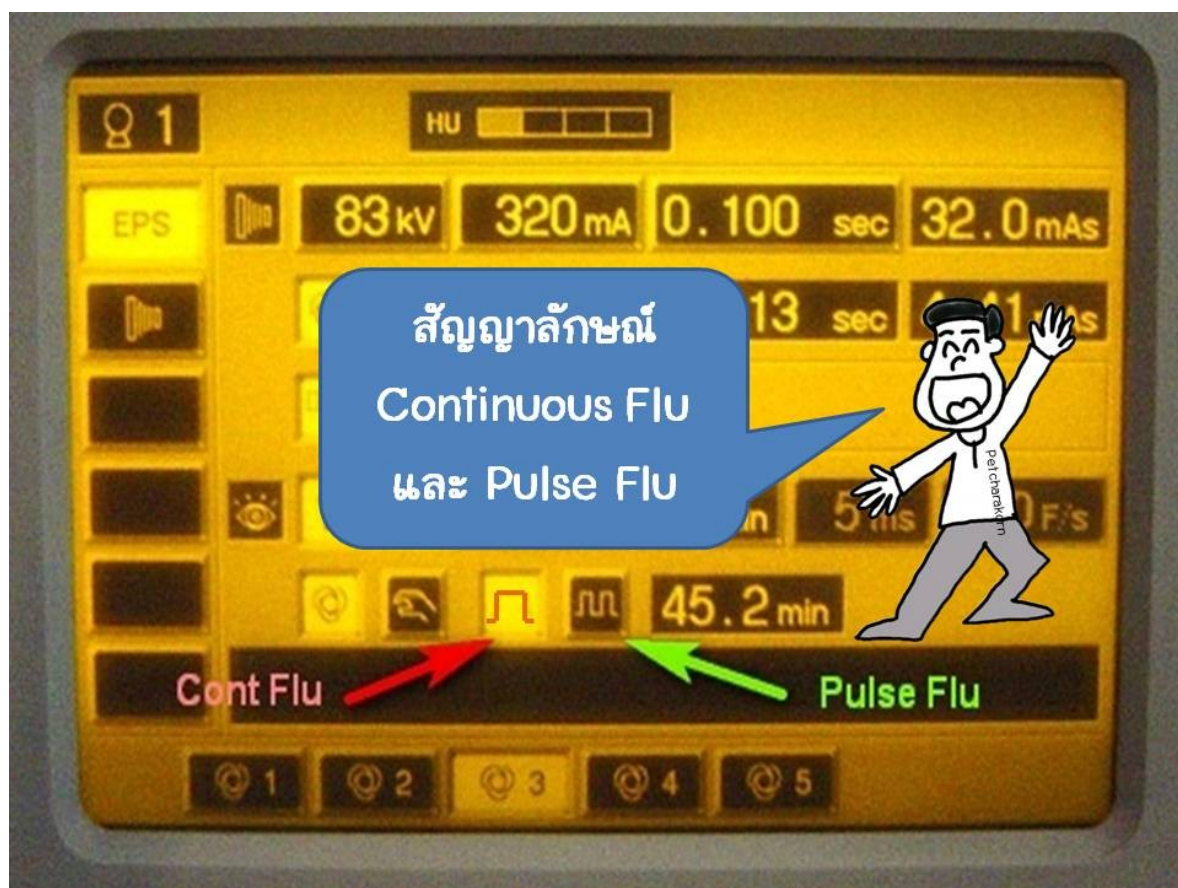
หลอดเอกซเรย์สำหรับเครื่องเอกซเรย์ชนิดต่างๆ

หลอดเอกซเรย์บางหลอดออกแบบมาเพื่อใช้งานเฉพาะงานใดงานหนึ่ง มักจะสร้างเป็นพิเศษให้เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องเอกซเรย์แบบนั้นๆ เครื่องเอกซเรย์ที่ใช้กันส่วนใหญ่จะมีการกำหนดหรือออกแบบหลอดเอกซเรย์พิเศษดังนี้

1. หลอดเอกซเรย์สำหรับเครื่องเอกซเรย์เต้านม โครงสร้างของเต้านมประกอบด้วยไขมัน หลอดเลือด ต่อมหรือท่อน้ำนม ต่อมน้ำเหลือง เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีความหนาแน่นน้อย ส่วนประกอบของหลอดเอกซเรย์เต้านม มีลักษณะดังนี้คือ วัสดุที่นำมาใช้ทำเป้า ทำด้วยวัสดุที่มีเลขอะตอมไม่สูงนัก เช่น โมลิบดีนัม หรือ โรเดียม สำหรับบริเวณช่องที่รังสีผ่านออก (window) อาจทำด้วยเบริลเลียม (beryllium) หรือ แก้ว เป็นต้น (Hranitzky and Shalek 1967; Paixao et al. 2015) พลังงานรังสีที่ใช้งานอยู่ช่วง 20 ถึง 45 kV ไล่หลอดมีขนาดเล็ก เนื่องจากต้องการสร้างภาพที่มีรายละเอียดที่สูง การวางหลอดเอกซเรย์ให้แกนเอียงโดยวางให้ข้อบอยอยู่ใกล้ตัวผู้ป่วย เพื่อลดปัจจัยความเข้มรังสีไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากผลจากการดูดกลืนรังสีที่ต่างกันในแนวลาดเอียงของเป้าที่ข้อบอย หรือ เรียกว่า ฮิวเอฟเฟค (Fritz and Livingston 1985; Braun et al. 2010) ระยะห่างระหว่างหลอดเอกซเรย์กับอุปกรณ์รับภาพ มีระยะประมาณ 60 เซนติเมตร



2. หลอดเอกซเรย์สำหรับเครื่องตรวจหลอดเลือดและหัวใจ สำหรับการตรวจหลอดเลือดและหัวใจ เป็นการตรวจที่ต้องใช้ระยะเวลาในการฉายรังสีติดต่อกันที่ยาวนาน หลอดเอกซเรย์ควรเป็นชนิดมีประสิทธิภาพในการจุความร้อนได้สูง ทนความร้อนได้ดี (high capacity heat unit x-ray tube) โดยส่วนใหญ่จะมีหน่วยความร้อนใช้ได้ประมาณ 400,000 ถึง 1,000,000 หน่วยความร้อน (heat unit) มีรอบในการหมุน ประมาณ 3500 rpm. ถึง 9000 รอบต่อนาที (round per minute ; rpm) ทำให้ทนทานต่อการใช้งานหนัก ฉายรังสีที่ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน รวมถึงเครื่องฟลูออโรโรสโคปบางเครื่อง บางรุ่นมีโปรแกรมที่ควบคุมการปล่อยรังสีออกจากเครื่องฟลูออโรโรสโคปออกเป็นช่วงๆ (pulse fluoroscopy) เพื่อเป็นการลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยจะได้รับน้อยกว่าการให้รังสีอย่างต่อเนื่อง (continuous fluoroscopy) (Grollman 1974; Balter 2014)

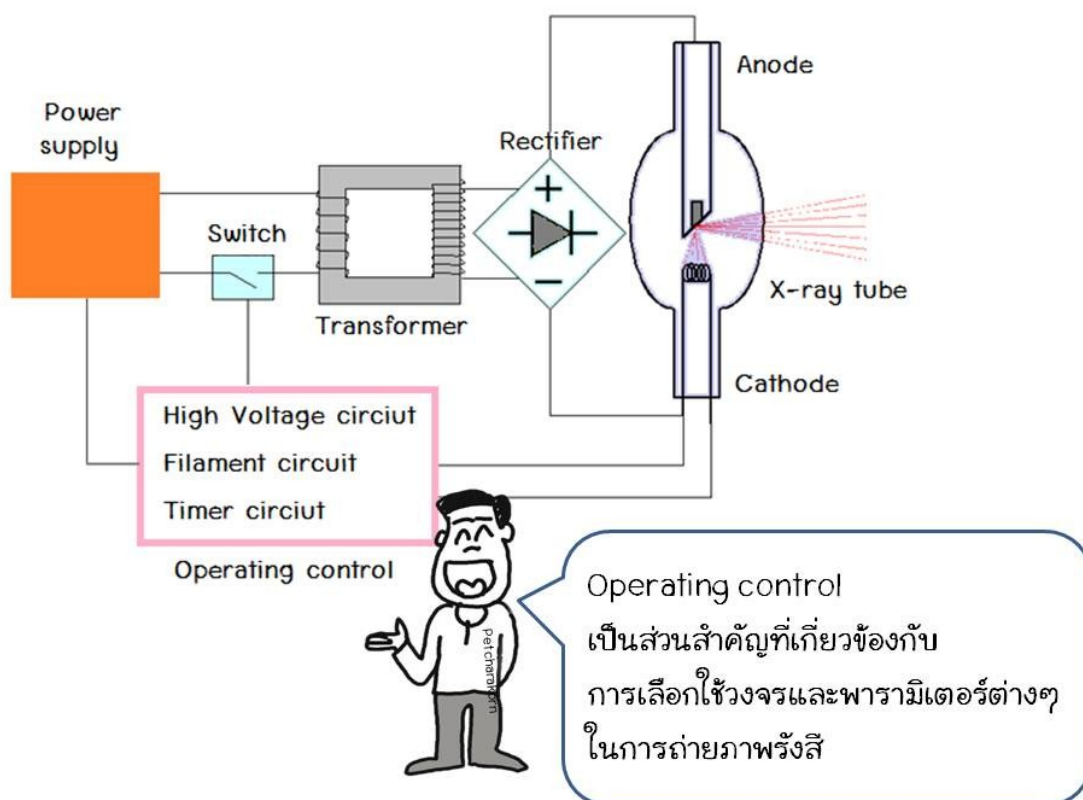


3. หลอดเอกซเรย์สำหรับเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เนื่องจากการตรวจด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จะมีการฉายรังสีติดต่อกันอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหลอดเอกซเรย์ มักจะออกแบบให้มีลักษณะพิเศษ เช่น วัสดุที่ห่อหุ้มหลอดอาจเปลี่ยนจากแก้วทนความร้อนมาเป็นโลหะ เพื่อช่วยให้หลอดสามารถทนความร้อนได้ดีขึ้น มีการออกแบบจานหมุนของเป้าให้มีขนาดที่กว้างขึ้น เพื่อทำให้มีพื้นที่การชนของลำอิเล็กตรอน มีความจุและทนความร้อนที่สูง มีระบบระบายความร้อนใช้ระบบหมุนเวียนโดยทำให้น้ำมันที่อยู่ในหลอดเอกซเรย์ไหลเวียนออกมานอกได้ พัดผ่านด้วยพัดลม หรือ มีระบบน้ำไหลเวียนช่วยพาความร้อนภายในหลอดออกสู่ภายนอกได้ดียิ่งขึ้น การออกแบบต่างๆจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนดีกว่าหลอดเอกซเรย์ทั่วไป โดยส่วนใหญ่จะมีหน่วยความร้อนใช้ได้ประมาณ 1-5 MHU (ล้านหน่วยความร้อน)

ชุดควบคุมการทำงาน (operating console)

ชุดควบคุมการทำงานเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องเอกซเรย์ จะประกอบด้วยปุ่ม หน้าปัดแสดงข้อมูล แบบเข็ม หรือ แบบตัวเลข หรือ แบบสัญลักษณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ รวมถึงสวิตช์ไฟใหญ่ (main switch) ควบคุมการเปิดปิดเครื่องเอกซเรย์ การเลือกใช้ อาจเป็นแบบใช้มือหมุน ปุ่มกด หรือ จอสัมผัส การเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมพลังงานของรังสีในการถ่ายภาพ ได้แก่ kVp, mA, mAs เวลา บางรุ่น อาจมีระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการทำงานด้วยการตั้งค่าแบบอัตโนมัติสำหรับการถ่ายภาพอวัยวะต่างๆ หรือ ตามความหนาขนาดต่างๆ เป็นต้น





วงจรไฟฟ้าแรงสูง (high voltage circuit) ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ และ ชุดจ่ายไฟแรงสูง ทำหน้าที่แปลงหรือจ่ายไฟฟ้าให้แก่วงจรหรือชุดควบคุมต่างๆในเครื่องเอกซเรย์

วงจรไส้หลอด หรือ วงจรฟิลาเมนต์ (filament circuit) หรือ ชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า (mA control) มีหน้าที่ปรับกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพื่ออุ่นหรือเผาไส้หลอด ประกอบด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ ซึ่งเป็นตัวปรับมิลลิแอมป์แปร์ ให้มีจำนวนของอิเล็กตรอนตามได้ตามที่ต้องการ เช่น ถ้าเลือกใช้ mA สูง ค่ากระแสไฟที่เผาไส้หลอดจะมีมาก ซึ่งส่งผลให้มีจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ไส้หลอดมากตามไปด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันจะมีค่าประมาณ 50-200 mA สำหรับเครื่องที่มีขนาดกำลังต่ำ 300-500 mA เครื่องมีขนาดกำลังปานกลางและสูง 500-1250 mA สำหรับการถ่ายภาพทางรังสี เมื่อเลือกใช้ mA สูงจะทำให้ภาพมีความดำ (density) หรือ สัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio ; SNR) เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมากจากไส้หลอดจำนวนมากมาทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์รับภาพมากขึ้นตามค่ากระแสที่เพิ่ม

วงจรควบคุมเวลา (timer circuit) ชุดควบคุมเวลาในการถ่ายภาพ (exposure time) เป็นตัวควบคุมระยะเวลาที่รังสีฉายออกมาจากหลอดเอกซเรย์ หรือ ระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ ระยะเวลาที่สามารถเลือกใช้มีตั้งแต่ มิลลิวินาที ถึง วินาที ประกอบด้วยปุ่มแบบหมุน กด หรือ แบบสัมผัสหน้าจอก ในการถ่ายภาพรังสีมีความจำเป็นต้องเลือกใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพให้เหมาะสม เพื่อเป็นการลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยหรือบุคลากรที่เกี่ยวข้องอาจได้รับ

เครื่องเอกซเรย์บางรุ่น จะมีการนำค่ากระแสและเวลามาใช้ร่วมกัน ที่แสดงออกในรูป mAs คือ milliampere-second เช่น ในการถ่าย KUB ต้องใช้ค่า 80 kVp และ 200 mA ที่หน้าปัดแสดง ข้อมูลว่า 40 mAs คำถาม คือ ระยะเวลาที่ใช้ มีค่าเท่ากับเท่าไร

$$\text{mAs} = \text{mA} \times \text{sec}$$

$$\text{sec} = 40 \text{ mAs} / 200 \text{ mA}$$

$$= 0.2 \text{ second หรือ } 200 \text{ millisecond}$$

ชุดปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้า (kvp adjustment) ในเครื่องเอกซเรย์บางรุ่นจะมีปุ่มปรับค่าหลัก (major kVp) คือ ปรับค่าครั้งละ 10 kVp และ ปรับค่ารอง (minor kVp) คือ ปรับค่าครั้งละ 1-2 kVp ค่าศักย์ไฟฟ้านี้จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพรังสี คือ เป็นการกำหนดพลังงานหรืออำนาจในการทะลุทะลวง (penetration) ของรังสีเอกซ์ โดยทางปฏิบัติเมื่อถ่ายภาพรังสีอวัยวะที่มีขนาดเล็ก เช่น กระดูกข้อมือ ขา ก็ควรเลือกใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าอวัยวะที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น

เพื่อให้ภาพถ่ายรังสีที่ได้มีคุณภาพดี การเลือกใช้พารามิเตอร์ต่างๆ สัมพันธ์กับ kVp-mAs ในการตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์ควบคุมเวลา สามารถใช้เครื่องมือที่ เรียกว่า spinning top สำหรับ วัดความเที่ยงตรงของเวลาของเครื่องเอกซเรย์ที่ใช้ไฟฟ้าเฟสเดียว synchronous spinning top สำหรับไฟฟ้าสามเฟส ส่วนอุปกรณ์วัดเวลาแบบอื่นๆ ในรูปแบบหัววัดรังสีแบบต่างๆ ก็ สามารถวัดระยะเวลาในการฉายรังสีได้สะดวก เพราะมักจะแสดงเป็นค่าตัวเลข

ข้อควรระวังในการใช้งาน

หลอดเอกซเรย์เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญและมีราคาแพง เพื่อเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดเอกซเรย์แล้ว เจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องควรที่จะมีความระมัดระวัง ให้ความสนใจและศึกษาถึงสาเหตุต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเสื่อมที่อาจเกิดขึ้นกับหลอดเอกซเรย์ เช่น การเลือกใช้พารามิเตอร์ในการถ่ายภาพ การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสต่อระยะเวลา ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความร้อนของหลอดเอกซเรย์ ดังนั้นเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของหลอดเอกซเรย์ ให้ให้เหมาะสม สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. การอุ่นหลอดเอกซเรย์ (x-ray tube warm up) ในการใช้งานสำหรับการถ่ายภาพรังสีในแต่ละครั้งจะเกิดความร้อนขึ้นภายในหลอดเอกซเรย์ ถ้าหากการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในค่าที่สูง ก็ย่อมจะทำให้เกิดความร้อนจะสูงขึ้นมากด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นนานๆ หรือเกิดอย่างต่อเนื่อง ก็มีโอกาสนำไปสู่หลอดร้อนหรือเป่าที่รับอิเล็กตรอนเกิดการหลอมละลาย เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นได้ส่งผลกระทบต่อความเสื่อมสภาพและประสิทธิภาพการทำงานของหลอดเอกซเรย์ ถ้าหากไม่ได้ใช้งานหลอดเอกซเรย์ เป็นระยะเวลานานๆ เมื่อใช้งานครั้งแรก ก็ไม่ควรเริ่มต้นด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่สูงมาก เช่น การถ่ายภาพกระดูกสันหลัง โดยปกติจะต้องถ่ายภาพด้านตรง (anteroposterior or AP view) และ ด้านข้าง (lateral view) ในทางปฏิบัติ ไม่ควรเริ่มต้นในการถ่ายภาพด้านข้าง ทำนั้นเป็นการถ่าย

อวัยวะที่มีความหนา ซึ่งต้องใช้พารามิเตอร์ที่มีค่ากำหนดปริมาณรังสีสูง ทำให้ปริมาณรังสีสามารถทะลุผ่านอวัยวะได้ การใช้พารามิเตอร์ที่มีค่าสูง ก็ จะเกิดความร้อนสูงหากจำเป็น ก่อนใช้งาน ก็อาจจะใช้วิธีการที่ เรียกว่า การอุ่นหลอดเอกซเรย์

สำหรับเครื่องเอกซเรย์ทั่วไป อาจทำได้โดยกำหนดค่ารังสีที่ใช้ไม่สูงนัก เช่น การใช้เทคนิค 40-50 kV 100-200 mA ครั้งแรกกดแค่เตรียมถ่ายภาพรังสี (ready) แต่ไม่กดถ่ายภาพรังสี (x-ray) เพื่อเป็นการทำให้ระบบการหมุนของเป่าพร้อมที่จะทำงาน จากนั้นเริ่มกดให้รังสีออก เพื่ออุ่นหลอดทำประมาณ 2-3 ครั้ง บางแหล่งข้อมูล ก็แนะนำให้เลือกกำหนดค่ารังสี คือ 70 kVp และ mA ต่ำ ระยะเวลาฉายรังสี ประมาณ 2 วินาที (Vieau and Mantel 1979; Robert F and Denise O 2012)

สำหรับเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ จะมีโปรแกรมที่ระบุวิธีการและระยะเวลาที่จะทำการอุ่นหลอดอย่างชัดเจน ในการอุ่นหลอดอัตโนมัติ มักจะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่กำหนดหรือเรียงลำดับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เริ่มจากค่าที่น้อยๆ แล้วค่อยเพิ่มขึ้นไปสู่ค่าที่มากขึ้น ตามลำดับ



เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์บางรุ่น
จะมีข้อความแจ้งให้ทราบถึง
ความจำเป็นในการอุ่นหลอด และ
แสดงให้เห็นช่วงที่มีการฉายรังสี



2. การใช้ระยะเวลานานในการถ่ายภาพ ทำนองเดียวกัน เมื่อใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพที่นาน จะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ไส้หลอดหรือเป้า โดยเฉพาะการใช้เวลาในการถ่ายภาพที่ต่อเนื่องเป็นนาที ดังนั้นในการฉายรังสีในลักษณะการตรวจแบบฟลูออโรสโคปี (fluoroscopy) จึงกำหนดใช้ค่า กระแสไฟฟ้า หรือ ค่า mA ที่ต่ำๆ ไม่เกิน 5 mA และ เครื่องเอกซเรย์มักจะติดตั้งอุปกรณ์เตือน เมื่อ มีการฉายรังสีที่ต่อเนื่อง ติดต่อกันไม่ควรเกิน ครึ่งละ 5 นาที เพราะว่าทั้ง mA และ ระยะเวลา จะ เกี่ยวข้องกับความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในหลอดเอกซเรย์ทั้งสิ้น สำหรับหลอดเอกซเรย์ที่มีอายุการใช้งาน ที่นานๆ ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง จะส่งผลต่อความเสื่อม นำไปสู่อาการชำรุดได้ (Schueler 2000; Wang and Blackburn 2000; Nickoloff 2011)

3. การดูแลรักษา นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง การใช้งานของหลอดเอกซเรย์ต้องใช้ความ ระมัดระวัง การกระทบกระเทือนกับของแข็ง จะทำให้หลอดเอกซเรย์ชำรุดได้ โดยเฉพาะเครื่องเอกซเรย์ ชนิดเคลื่อนที่ ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะหากไม่ยึดหลอดเข้ากับตัวเครื่องให้ดีแล้ว โอกาสที่หลอด เอกซเรย์จะหมุน หลุด หรือ แกว่งไปกระทบกับวัตถุอื่นๆ ย่อมอาจเกิดขึ้นได้ และอาจทำให้หลอดชำรุด ได้ หรือการเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ขรุขระ อาจทำให้อุปกรณ์ภายในอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนจากตำแหน่ง ดังนั้น หลอดและเครื่องเอกซเรย์ ควรได้รับการตรวจสอบดูแลประจำวันเป็นอย่างดี เช่น การทำความสะอาด ภายนอก กำจัดฝุ่น คราบสกปรก ควรการสังเกตสิ่งผิดปกติขณะการใช้งาน ว่า... มีเสียง กลิ่นไหม้ เก อดจี้ระหว่างหรือหลังการใช้งานหรือไม่ มีการรั่วไหลของน้ำมัน ขณะทำงานว่าเป็นอย่างไร การตรวจ ประเมินด้วยสายตา จับ คลำ เคาะ ฟัง ก็เป็นการประเมินคุณภาพเบื้องต้น และจะช่วยยืดอายุการ ทำงานของหลอดและเครื่องเอกซเรย์ได้เช่นกัน

เครื่องเอกซเรย์ เป็นเครื่องมือที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแรงสูง ต้องระวังอันตรายจากไฟฟ้า ขณะใช้งาน ซึ่งในการติดตั้งเครื่องเอกซเรย์ทั่วไปแล้ว จะต้องมียระบบความปลอดภัยหลายๆ ประการ คือ

1. ระบบสายดิน (ground) เป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะหากมีไฟฟ้าลัดวงจรเข้าสู่ตัวเครื่องเอกซเรย์ อาจเกิดอันตรายต่อผู้ป่วยหรือผู้ปฏิบัติงานจากการถูกไฟฟ้าดูด ดังนั้นเครื่องเอกซเรย์ทุกเครื่องต้องมื การต่อเชื่อมสายดินที่ถูกต้องและใช้สายขนาดที่เหมาะสม

2. การเชื่อมกระแสไฟฟ้าในระบบโรงพยาบาลกับเครื่องเอกซเรย์ ควรมีการใช้ main circuit breaker ก่อนเข้าเครื่องเอกซเรย์ ซึ่งเป็นสวิตช์ที่ตัดไฟหรือช่วยทำให้เกิดความปลอดภัยในการปิดเปิด เครื่องเอกซเรย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการซ่อมบำรุงรักษา ภายในเครื่องเอกซเรย์จะมีการจัดวงจร line input voltage โดยใช้ระบบ push on หรือ push off switch หรือ breaker ที่มีฟิวส์ขนาดต่างๆ ภายในเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานและเครื่องเอกซเรย์เอง

3. สายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับต่อระหว่าง high tension tank กับ หลอดเอกซเรย์จะต้องใช้สาย high voltage cable ที่ทนแรงดัน ได้มากกว่า 200 kVp

การจัดซื้อเครื่องเอกซเรย์

ในภาระหน้าที่อย่างหนึ่งของบุคลากรด้านรังสี อาจจะต้องมีส่วนร่วมกับการกำหนดรายละเอียดของเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ต่อไปนี้จึงขอเสนอขึ้นและแนวทางการกำหนดรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กำหนดงบประมาณที่ต้องใช้สำหรับจัดซื้อเครื่องหรืออุปกรณ์เอกซเรย์
2. จัดขอรายละเอียดเครื่องหรืออุปกรณ์เอกซเรย์จากทางบริษัทผู้ขาย
3. จัดทำตารางเปรียบเทียบข้อดี ข้อเด่น ข้อเสีย ข้อด้อย จากรายละเอียดที่ได้มาในข้อ 2
4. กำหนดรายละเอียดอย่างเป็นทางการที่ต้องประกาศ เพื่อให้บริษัทผู้ขายรับทราบ
5. การกำหนดรายละเอียดบางแห่ง ต้องกำหนดรายละเอียดต่างๆของเครื่อง หรือ อุปกรณ์

เอกซเรย์ที่ชัดเจน เพื่อเป็นการบอกให้ทราบสิ่งที่ต้องการหรือขาดไม่ได้เลย ให้บริษัทผู้ขายรับทราบ แต่บางแห่งอาจจะไม่ต้องกำหนดรายละเอียดที่ชัดเจน เพียงแต่กำหนดกว้างๆ เพื่อให้บริษัทผู้ขายหลายแห่งเข้าร่วมดำเนินการซื้อขายได้ ไม่เป็นการปิดกั้นโอกาสทางการค้า

ตัวอย่าง การกำหนดรายละเอียดเครื่องเอกซเรย์

แบบที่ 1

วัตถุประสงค์ **บริการสาธารณสุข**

ชื่อรายการ **เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่**

คุณลักษณะ **เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่และอุปกรณ์ประกอบสำหรับการตรวจ จำนวน 1 ชุด**

หลักการและเหตุผล

เนื่องจากในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ คณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีผู้ป่วยที่มีการเคลื่อนย้ายลงมาที่ภาควิชารังสีทำให้เกิดความไม่สะดวก เช่น ผู้ป่วยที่ต้องใช้เครื่องช่วยหายใจในห้องตรวจจะระยะวิฤต ห้องผ่าตัด ห้องตรวจอุบัติเหตุฉุกเฉิน ผู้ป่วยที่อยู่ในห้องแยก เหล่านี้รอรับบริการถ่ายภาพรังสี สำหรับประกอบการรักษาโรคมีอยู่จำนวนมาก เพื่อให้มีเครื่องมือที่เพียงพอต่อการให้บริการที่กล่าวมาแล้ว จึงมีความจำเป็นต้องจัดหาครุภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการด้านสาธารณสุขแก่ผู้รับบริการ เพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนของภาควิชารังสีและ หน่วยงานอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์ในการใช้งาน

เพื่อให้เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่สำหรับให้บริการถ่ายภาพรังสีแก่ผู้ป่วยที่เคลื่อนย้ายลงมาที่ภาควิชารังสีวิทยาไม่สะดวก พร้อมอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณรังสีแก่ผู้ป่วยและบุคลากรที่มีโอกาสได้รับรังสีขณะปฏิบัติงาน

คุณลักษณะทั่วไป

เป็นเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ มีล้อสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก มีน้ำหนักเบา สามารถถ่ายภาพรังสีของอวัยวะตามส่วนต่างๆของร่างกาย พร้อมอุปกรณ์ประกอบ

คุณลักษณะเฉพาะ

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์และชุดควบคุม (x-ray generator and controller) จำนวน 1 ชุด

1. เป็น high-frequency generator inverter type
2. มีกำลังเครื่องไม่น้อยกว่า 12 kW
3. สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างหลอดเอกซเรย์ ได้ระหว่าง 45 ถึง 120 kV หรือกว้างกว่าสามารถปรับค่า mAs เลือกปรับได้ระหว่าง 0.5 ถึง 125 mAs หรือกว้างกว่า ที่แสดงเป็นตัวเลขดิจิทัล
4. มี hand switch exposure control พร้อมแสดงสัญญาณแสงและเสียง ขณะถ่ายภาพรังสี
5. มีชุดควบคุมเป็นชนิดที่มีระบบควบคุมการทำงานด้วย microprocessor
6. ตัวเครื่องมีช่องเก็บอุปกรณ์ ที่สามารถสอดใส่ cassette ขนาด 14 x 17 นิ้ว

แกนยึดหลอดเอกซเรย์ (tube column and supporting arm)

1. แกนยึดติดตัวเครื่องที่มั่นคงแข็งแรงสะดวกในการใช้งาน พร้อมระบบล้อการเคลื่อนที่ให้คงที่
2. สามารถปรับระยะและจัดทำในการถ่ายเอกซเรย์ได้สะดวก
3. หลอดเอกซเรย์เลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้งได้ และตามแนวนอนได้สะดวก

หลอดเอกซเรย์ (x-ray tube)

1. เป็นแบบ rotating anode tube
2. focal spot ไม่เกิน 1.0 มม.

อุปกรณ์ประกอบการใช้งาน

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| 1. เลือต๊ะกั่ว | จำนวน 2 ตัว |
| 2. thyroid shield | จำนวน 2 อัน |
| 3. คาสเซต ขนาด 14 x 17 นิ้ว | จำนวน 2 แผ่น |

เงื่อนไขเฉพาะ

1. มีคู่มือการใช้งานและบำรุงรักษาทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษอย่างละ 1 ชุด
2. มีคู่มือการซ่อมและวงจรของเครื่อง
3. ผู้ขายต้องรับประกันคุณภาพเป็นเวลา 2 ปี นับแต่วันรับมอบของครบเป็นต้นไป
4. หากเกิดการชำรุดหรือขัดข้อง เนื่องจากการใช้งานตามปกติและผู้ขายทำการแก้ไขแล้วถึง 2 ครั้ง แต่ยังไม่สามารถใช้งานได้ ผู้ซื้ออาจให้ผู้ขายเปลี่ยนเฉพาะชิ้นส่วน หรือเปลี่ยนเครื่องใหม่ให้ภายในกำหนดเวลาที่ผู้ซื้อกำหนดก็ได้
5. ผู้ขายต้องส่งช่างมาตรวจเช็คเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ อย่างน้อย 2 ครั้ง/ปี

6. ผู้ขายรับรองว่ามีอะไหล่ขายในท้องตลาดไม่น้อยกว่า 5 ปี
7. ครุภัณฑ์ต้องได้รับการตรวจสอบและรับรองคุณภาพจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์หรือหน่วยงานอื่นที่ได้รับรองมาตรฐานภายในประเทศไทย โดยผู้ขายเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งหมด

แบบที่ 2

คุณลักษณะเฉพาะเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่

วัตถุประสงค์การใช้งาน

เป็นเครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ซึ่งมีล้อเลื่อนและสามารถเคลื่อนที่ด้วยระบบมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อเพื่อนำไปใช้งานนอกสถานที่ได้สะดวก และใช้งานถ่ายภาพได้ทุกส่วนของร่างกาย

ลักษณะทั่วไป

1. เป็นเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ชนิด high frequency generator
2. มี battery บรรจุอยู่ภายใน เพื่อช่วยในการขับเคลื่อนและถ่ายภาพเอกซเรย์
3. ใช้กับไฟฟ้าขนาด 220 V, 50 Hz.

ลักษณะเฉพาะ

1. เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์เคลื่อนที่ขนาดใหญ่ ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้
 - 1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงและเครื่องควบคุมการถ่ายภาพรังสี
 - 1.2 ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงเป็นแบบ high frequency generator มี frequency ไม่น้อยกว่า 20 kHz. ควบคุมด้วยระบบ microprocessor เพื่อให้ได้ปริมาณรังสีที่คงที่ และแสดงค่า kV และ mAs เป็นตัวเลข (digital)
 - 1.3 มีค่ากระแสสูงสุดที่ชั่วพลอด (mA) ไม่น้อยกว่า 200 mA
 - 1.4 สามารถปรับค่า V ได้โดย kV ค่าต่ำสุดไม่เกิน 40 kV และค่าสูงสุดไม่น้อยกว่า 125 kV
 - 1.5 สามารถปรับค่า mAs ได้โดยค่าต่ำสุดไม่เกิน 0.5 mAs และค่าสูงสุดไม่น้อยกว่า 200 mAs
 - 1.6 มี hand switch สำหรับควบคุมการถ่ายภาพรังสี
 - 1.7 มี switch สำหรับเปิด-ปิด เครื่องพร้อมสัญญาณไฟ
 - 1.8 มีระบบป้องกันความเสียหายของหลอดเอกซเรย์จากการใช้งาน (overload protection)
 - 1.9 มีระบบปรับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่โดยอัตโนมัติ
 - 1.10 ใช้กับไฟฟ้าขนาด 220-240 V, 50 Hz.

2. หลอดเอกซเรย์

- 2.1 หลอดเอกซเรย์เป็นแบบ rotating anode
- 2.2 มี focal spot ขนาดไม่เกิน 1.0 mm. หรือต่ำกว่า

- 2.3 มี anode heat capacity ไม่น้อยกว่า 120,000 HU
- 2.4 มี collimator สำหรับปรับขนาดของลำรังสีเอกซเรย์
- 2.5 มีค่า power output ไม่ต่ำกว่า 18 kw
3. ชุดเสาและแขนยึดหลอดเอกซเรย์
 - 3.1 ระบบแขนของหลอดเอกซเรย์เป็นแบบปรับได้โดยระบบถ่วงสมดุลย์ (balancing mechanism) สามารถปรับความสูงให้หยุดนิ่งได้ทุกระดับ
 - 3.2 หัวหลอดเอกซเรย์สามารถปรับทำมุมขึ้นลงได้รวมกันไม่น้อยกว่า 90 องศา และหมุนซ้าย/ขวาได้ไม่น้อยกว่า ± 120 องศา
 - 3.3 มีปุ่มสำหรับปิดเปิดแสงไฟแสดงตำแหน่งของชุดควบคุมแสงเอกซเรย์ (collimator lamp on/off switch) ที่ตัวเครื่อง และมีความสว่างไม่ต่ำกว่า 150 lux ที่ระยะห่าง 1 เมตร
4. ระบบเคลื่อนที่ด้วย motor ไฟฟ้า
 - 4.1 สามารถเลือกความเร็วในการเคลื่อนที่แบบช้า และหรือ เร็วได้
 - 4.2 สามารถเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า เป็นระบบแรงเหวี่ยงธรรมดา โดยไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อเส้นบนทางเรียบเพื่อช่วยประหยัดไฟฟ้า
 - 4.3 battery เป็นชนิดซึ่งบรรจุอยู่ภายในเครื่อง และน้ำหนักรวมของเครื่องเอกซเรย์ ไม่เกิน 390 กิโลกรัม
5. ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเอกซเรย์
 - 5.1 มีระบบ brake สำหรับบังคับให้เครื่องเอกซเรย์หยุดเคลื่อนที่ได้ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนย้ายเครื่องไปตามสถานที่ต่างๆ
 - 5.2 มีระบบปรับความเที่ยงตรงของค่าต่างๆ ของเครื่องโดยอัตโนมัติ เพื่อความแม่นยำในการตั้งค่าต่างๆ ในการถ่ายภาพรังสี
6. อุปกรณ์ประกอบการใช้งาน
 - 6.1 เลือตตะกั่ว จำนวน 2 ตัว
 - 6.2 thyroid shield จำนวน 2 อัน

เงื่อนไขเฉพาะ

1. ผู้ขายต้องรับประกันคุณภาพเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี
2. มีหลักฐานว่ามีช่างที่ผ่านการอบรมที่สามารถซ่อมเครื่องได้
3. ผู้ขายรับประกันว่าเป็นเครื่องใหม่ ไม่เคยใช้งานมาก่อน
4. มีคู่มือการใช้งานและบำรุงรักษาเครื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
5. มีคู่มือการซ่อมและวงจรของเครื่อง (technical/service manual)
6. ผู้ขายรับรองว่ามีอะไหล่ในการซ่อมไม่น้อยกว่า 5 ปี

7. กรณีเป็นการนำเข้าจากต่างประเทศผู้ขายต้องมีหลักฐานว่าเป็นผู้แทนจำหน่ายจากผู้ผลิตโดยตรงจากต่างประเทศ
8. ครุภัณฑ์ต้องได้รับการตรวจสอบและรับรองคุณภาพจากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์หรือหน่วยงานอื่นๆที่ได้รับรองมาตรฐานภายในประเทศไทย โดยผู้ขายเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

- Aichinger H, Joite-Barfuß S, Dierker J, Sabel M. Radiation exposure and image quality in X-ray diagnostic radiology: Physical principles and clinical applications. 2012. (Radiation Exposure and Image Quality in X-Ray Diagnostic Radiology: Physical Principles and Clinical Applications; vol. 9783642112416).
- Angerstein W, Gursky S. Principles of radiation physics and radiological technique in medicine. GEORG THIEMELEIPZIG. 1975;
- Balter S. Fluoroscopic frame rates: Not only dose. Am J Roentgenol. 2014;202(3):W234–6.
- Blinov NN, Kuzin VS, Leichenko AI. Quality assurance of equipment in x-ray diagnostic departments. Biomed Eng. 1992;26(3):121–3.
- Boland GWL, Murphy B, Arellano R, Niklason L, Mueller PR. Dose reduction in gastrointestinal and genitourinary fluoroscopy: Use of grid-controlled pulsed fluoroscopy. Am J Roentgenol. 2000;175(5):1453–7.
- Braun H, Kyriakou Y, Kachelrieß M, Kalender WA. The influence of the heel effect in cone-beam computed tomography: Artifacts in standard and novel geometries and their correction. Phys Med Biol. 2010;55(19):6005–21.
- Chen W-G, Rao Y-H, Chen H-H. Research on tube current control method of the X-ray machine. Hedianzixue Yu Tance JishuNuclear Electron Detect Technol. 2008;28(4):770–3.
- Everson JD, Gray JE. Focal-spot measurement: Comparison of slit, pinhole, and star resolution pattern techniques. Radiology. 1987;165(1):261–4.

- Fritz SL, Livingston WH. The effect of anode curvature on radiographic heel effect. *Med Phys*. 1985;12(4):443–6.
- Gambini D–J. Basic concepts of radiology physics. *J Radiol*. 2010;91(11 C2):1186–8.
- Gray L, Dowling A, Gallagher A, Gorman D, O’Connor U, Devine M, et al. Acceptance testing and routine quality control in general radiography: Mobile units and film/screen fixed systems. *Radiat Prot Dosimetry*. 2008;129(1–3):276–8.
- Grollman J. Radiation reduction by means of low pulse rate fluoroscopy during cardiac catheterization and coronary arteriography. *AMERJROENTGENOL*. 1974;121(3):636–41.
- Hall EJ, Giaccia AJ. Radiobiology for the radiologist: Seventh edition. 2012. (Radiobiology for the Radiologist: Seventh Edition).
- Hranitzky EB, Shalek RJ. Skin doses from glass and beryllium window x-ray tubes in mammography. *Radiology*. 1967;88(4):668–71.
- Iversen AH, Whitaker S. A new high heat load x-ray tube. *Proc SPIE – Int Soc Opt Eng*. 1984;454:304–10.
- Kirchner E, Leu J. TECHNICAL COMPONENTS FOR THE GENERATION OF X-RAYS. *Acta Electron*. 1977;20(1):25–32.
- Kropp R. W. C. Roentgen: A new type of rays part 2. *Pneumologie*. 2008;62(8):482–8.
- Nickoloff EL. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: Physics of flat-panel fluoroscopy systems: Survey of modern fluoroscopy imaging: Flat-panel detectors versus image intensifiers and more. *Radiographics*. 2011;31(2):591–602.
- Paixo L, Oliveira BB, Vilorio C, de O, Teixeira MHA, Nogueira MS. Monte Carlo derivation of filtered tungsten anode X-ray spectra for dose computation in digital mammography. *Radiol Bras*. 2015;48(6):363–7.
- Perry RL. Principles of conventional radiography and fluoroscopy. *Vet Clin N Am – Small Anim Pract*. 1993;23(2):235–52.

Poludniowski G, Landry G, Deblois F, Evans PM, Verhaegen F. SpekCalc: A program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. *Phys Med Biol*. 2009;54(19):N433–8.

Ramsdale ML, Horton PW. Radiological protection in health care. *Saudi Med J*. 1982;3(1):9–16.

Robert F, Denise O. *Essentials of Radiologic Science*. Vol. 2012. Philadelphia : Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins; 2012.

Schardt P, Deuringer J, Freudenberger J, Hell E, Knipfer W, Mattern D, et al. New x-ray tube performance in computed tomography by introducing the rotating envelope tube technology. *Med Phys*. 2004;31(9):2699–706.

Schreiber P. Heat management in X-ray tubes. *MedicaMundi*. 1990;35(1):49–56.

Schueler BA. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: General overview of fluoroscopic imaging. *Radiographics*. 2000;20(4):1115–26.

Seibert JA. X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 1: Basic principles of x-ray production. *J Nucl Med Technol*. 2004;32(3):139–47.

Vieau DM, Mantel J. A warm-up verification system for X-ray tubes. *Radiology*. 1979;131(2):545–6.

Wambani JS, Korir GK, Tries MA, Korir IK, Sakwa JM. Patient radiation exposure during general fluoroscopy examinations. *J Appl Clin Med Phys*. 2014;15(2):262–70.

Wang J, Blackburn TJ. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents: X-ray image intensifiers for fluoroscopy. *Radiographics*. 2000;20(5):1471–7.

Wolbarst AB, Capasso P, Wyant AR. *Medical Imaging: Essentials for Physicians*. 2013. (Medical Imaging: Essentials for Physicians).

Zoetelief H. *Physics for diagnostic radiology*, third edition. *Radiat Prot Dosimetry*. 2013;154(4):526–9.