การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าฮาล์ฟแวลูเลเยอร์ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

นางอริณญา อุตบัววงศ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF HALF VALUE LAYER MEASURMENT DEVICE FOR SINGLE X-RAY EXPOSURE

Mrs. Arinya Utbuawong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology
Department of Nuclear Technology
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าฮาล์ฟแวลูเลเยอร์ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว
โดย	นางอริณญา อุตบัววงศ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายอรรถโกวิท สงวนสัตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(นายอรรถโกวิท สงวนสัตย์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อริณญา อุตบัววงศ์ : การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าฮาล์ฟแวลูเลเยอร์ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว. (DEVELOPMENT OF HALF VALUE LAYER MEASUREMENT DEVICE FOR SINGLE X-RAY EXPOSURE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.อรรถพร ภัทรสุมันต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นายอรรถโกวิท สงวนสัตย์, 76 หน้า.

ได้พัฒนาเครื่องวัดค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) ของรังสีเอกซ์จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว โดยเลือกใช้หัววัดรังสีแบบโฟโตไดโอดที่เคลือบด้วยสารซินทิลเลเตอร์ที่มีความไวต่อรังสีเอกซ์และเชื่อมโยงระบบวัดรังสีเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล ทำให้สามารถคำนวณค่า HVL จากการฉายรังสีเพียงครั้งเดียวโดยใช้ค่าความเข้มรังสีที่ถูกลดทอนจากลิ่มอะลูมิเนียมที่มีความหนาต่อเนื่องตั้งแต่ 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร แล้วทำการสอบเทียบค่า HVL ที่ได้กับอุปกรณ์มาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ จากการทดสอบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ใช้งานตามสถานที่ต่าง ๆ จำนวน 6 เครื่อง ที่ค่าความต่างศักย์หลอดผลิตรังสีเอกซ์ระหว่าง 60 ถึง 90 kV ที่ระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสของหลอดผลิตรังสีเอกซ์กับหัววัดรังสีเท่ากับ 50 เซนติเมตร และ ค่า HVL ในช่วง 2 ถึง 3 mm Al โดยเทียบกับเครื่องวัดค่า HVL มาตรฐาน พบว่าสำหรับเอกซ์โพเซอร์ไม่เกิน 50 mAs ค่า HVL ที่ได้มีความแตกต่างไม่เกิน -0.14 ถึง +0.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2549..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

#4670537921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: HALF VALUE LAYER / X-RAY GENERATOR

ARINYA UTBUAWONG : DEVELOPMENT OF HALF VALUE LAYER MEASUREMENT DEVICE FOR SINGLE X-RAY EXPOSURE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATTAPORN PATTARASUMUNT, THESIS CO-ADVISOR : ATTAKOVIT SANGONSAT, 76 pp.

A portable single x-ray exposure (HVL) measuring device was developed. A photodiode detector coated with scintillator was selected for x-ray intensity measurements. The measuring system was connected to a microcomputer for data storage and analysis. The HVL was calculated from a single exposure by using an attenuated intensity from a continuous aluminum wedge. Then the measured HVL was calibrated with the corrected HVL measured by the standard device of the Department of Medical Sciences. The tested HVL measurements from the developed and the standard devices were performed with 6 x-ray generators used in various institutes in the x-ray tube high voltage supply range from 60 to 90 kV at distance between focal spot of x-ray tube to detector of 50 cm. and HVL between 2 to 3 mm Al. The differences were found to be within -0.14 to +0.80 for exposure not greater than 50 mAs.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department…….Nuclear Technology…….Student's signature.....Arinya Utbuawong.....

Field of study…..Nuclear Technology.....Advisor's signature.....

Academic year ……2006……Co-advisor's signature.....Attakovit Sangonsat.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยแนะนำขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ นายอรรถโกวิท สงวนสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งคอยแนะนำแก้ไขปัญหาในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในระยะแรกที่เริ่มทำวงจร และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณสาโรช ปริยะวาที ที่ช่วยให้คำแนะนำและตอบข้อสงสัยในการออกแบบและการต่อวงจร รวมทั้งช่วยให้อุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณศิริ ศรีมะโนรถ ที่ช่วยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องผลิตรังสีเอกซ์เพื่อทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพรเทพ จันทร์คุณาภาส ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณอนุสรณ์ สมวันดี ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอเอส เมดิคอล เซอร์วิส ที่ช่วยสนับสนุนอุปกรณ์สำหรับวัดรังสีเอกซ์ และให้คำแนะนำในการใช้งาน

ขอขอบคุณ บริษัท คงศักดิ์เอกซเรย์อุตสาหกรรมทางการแพทย์ จำกัด ที่ช่วยสนับสนุนการทำลิ่มอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่งานรังสีวินิจฉัย กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณนพพล อุตบัววงศ์ ที่ให้คำปรึกษาเรื่องการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ด.ช. บูรพา อุตบัววงศ์ และพี่น้องที่เป็นกำลังใจให้ตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ถ้าปราศจากบิดามารดาผู้ให้กำเนิด ผู้ซึ่งคอยสนับสนุนดูแลและเอาใจใส่ในทุกๆด้าน ถึงแม้บิดา นายวันชัย พันธ์มาลา จะไม่ได้อยู่ดูความสำเร็จของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอระลึกพระคุณสูงสุดของท่านเสมอ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งมา ณ โอกาส นี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูปภาพ..... ฎ
บทที่
1. บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย..... 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย..... 3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3
2. เครื่องผลิตรังสีเอกซ์และการวัดค่าการกรองรังสีเอกซ์..... 5
2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์..... 5
2.2 การเกิดรังสีเอกซ์..... 5
2.3 ชนิดของหลอดผลิตรังสีเอกซ์..... 7
2.4 โครงสร้างของหลอดผลิตรังสีเอกซ์..... 9
2.5 การเกิดภาพเอกซเรย์..... 12
2.6 การกรองรังสีเอกซ์..... 12
2.7 การวัดการกรองรังสีเอกซ์..... 15
2.8 ระบบตรวจและวัดรังสีเอกซ์..... 17
2.9 มอเตอร์กระแสตรงและการควบคุม..... 19
2.10 ระบบแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล..... 20
3. การพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว..... 23
3.1 การทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 23
3.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL..... 24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3.2.1 วงจรหัววัดรังสีเอกซ์ด้วยหัววัดโฟโตไดโอด……..…..…..……. 25
3.2.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....……..... 26
3.2.3 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง……..... 26
3.2.4 การออกแบบลิ่มอะลูมิเนียมและถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียม..... 27
3.2.5 การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการทำงานร่วมกับ
เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 30
4. การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดสอบ.....….. 36
4.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์
สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว..... 36
4.1.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรภาคหัววัดความเข้มรังสี
เอกซ์และภาคขยายสัญญาณ..... 36
4.2 การสอบเทียบเครื่องมือวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 38
4.2.1 อุปกรณ์ในการสอบเทียบ……..... 38
4.2.2 การจัดอุปกรณ์……..… 38
4.2.3 การทดสอบการวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์……. 41
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 44
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 44
5.2 ลักษณะพิกัดของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 44
5.3 ข้อเสนอแนะ..... 45
รายการอ้างอิง……..…….. 46
ภาคผนวก..... 48
ภาคผนวก ก ค่า HVL มาตรฐานที่พลังงานรังสีเอกซ์ต่างๆ……..... 49
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อสอบเทียบ
เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 52
ภาคผนวก ค โปรแกรมการทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 54
ภาคผนวก ง รายการอุปกรณ์……..… 70
ภาคผนวก จ การออกแบบขนาดอุปกรณ์ของเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์
สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว..... 72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 76

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 Inherent filtration สำหรับหลอดผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย……..……..... 14
4.1 แสดงค่า Output เมื่อวัดความเข้มรังสีเอกซ์ไม่ผ่านและผ่านแผ่น Al ที่ความหนาต่าง ๆ ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์.....…….……..... 37
4.2 แสดงค่า Output เมื่อวัดความเข้มรังสีเอกซ์ไม่ผ่านและผ่านแผ่น Al ที่ความหนาต่าง ๆ ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ เมื่อเพิ่มอัตราการขยายเป็น 100 เท่า..... 37
4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า HVL ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ระหว่างเครื่องมือวัดรังสีย่ี่ห้อ Keithley และเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น…….……..... 40
4.4 แสดงผลการทดสอบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์อื่น ๆ..... 43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด full wave..... 7
2.2 ลักษณะของรูปคลื่นของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด full wave และ half wave……... 7
2.3 วงจรเรียงกระแสของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด half wave…… 8
2.4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด capacitor discharge……..…….. 8
2.5 แสดงลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของ Stationary anode tube……. 9
2.6 แสดงลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของ Rotating anode tube……..…….. 10
2.7 แสดง Line-focus principle และการเอียง Target เป็นมุม 17 – 20 องศา เพื่อทำให้ได้ Effective focal spot ขนาดเล็ก…….…..... 11
2.8 แสดงความเข้มของรังสี I_0 ทะลุผ่านความหนา d มีความเข้มลดลงเหลือ I ……..... 13
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ (I) กับความหนาของแผ่นกรองรังสี (d)……...……..… 13
2.10 กราฟแสดงการลดลงของความเข้มรังสีเอกซ์ที่ความหนาอะลูมิเนียมต่าง ๆ เพื่อหาค่า HVL……..... 16
2.11 แผ่นอะลูมิเนียมมาตรฐานบริสุทธิ์ 99.9 % เพื่อใช้วัดค่า HVL……..... 16
2.12 การจัดวางเครื่องมือวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย……..... 17
2.13 สัญลักษณ์และโครงสร้างพื้นฐานของไดโอด…..……..... 18
2.14 วงจรหัววัดรังสีเอกซ์โดยใช้ไดโอดเรียงกระแส…….…..... 18
2.15 โฟโตไดโอดที่ใช้ในงานวิจัย..……..... 19
2.16 วงจรทดสอบมอเตอร์กระแสตรงโดยมีการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Reference signal)…….…….... 20
2.17 Interface board ยี่ห้อ Inex รุ่น U-board 1.0/1.1……..…….…..... 20
2.19 วงจรสมบูรณ์ของ U-Board บอร์ดเชื่อมต่อพอร์ต USB……. 21
3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์..... 23
3.2 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 24
3.3 แสดงวงจรภาคหัววัดความเข้มรังสีเอกซ์และภาคขยายสัญญาณ 25

รูปที่ หน้า

3.4 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ +12 V และ -12 V 26
3.5 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง 26
3.6 ลิ่มอะลูมิเนียมที่ออกแบบขึ้นสำหรับใช้ในการวิจัย..... 28
3.7 ถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียม..... 30
3.8 ลิ่มอะลูมิเนียมและถาดยึดวางเข้าด้วยกัน..... 30
3.9 โฟล์วชาร์ต (Flow chart) การทำงานของโปรแกรมวัดค่า HVL 31
3.10 แสดงภาพโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเปิดโปรแกรม..... 32
3.11 หน้าโปรแกรมอ่านข้อมูล, บันทึกข้อมูล, แสดงกราฟและค่า HVL 32
3.12 วงจรรวมของเครื่องมือวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย..... 33
3.13 แสดงเครื่องมือวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว..... 34
3.14 แสดงการต่อและการทำงานของอุปกรณ์วัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 35
3.15 แสดงแผ่นวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยบรรจุลง
ในกล่องเหล็ก..... 35
4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณจากหัววัดรังสี..... 36
4.2 แสดงการจัดอุปกรณ์วัดค่า HVL ในการสอบเทียบ..... 38
4.3 แสดงการจัดอุปกรณ์เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 39
4.4 กราฟสอบเทียบค่า HVL ระหว่างเครื่องมือวัดรังสียี่ห้อ Keithley
และเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น..... 40
4.5 การแสดงผลบนหน้าจอไมโครคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมวัดค่า HVL 42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ใช้ในหน่วยงานต่าง ๆ ภายในประเทศไทย ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นเครื่องที่ใช้งานในด้านการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ ซึ่งมีบุคคลที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 ประเภท ประเภทที่หนึ่งได้แก่ แพทย์ ผู้ช่วยแพทย์ และเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมเครื่องกำเนิดรังสี ประเภทที่สองได้แก่ ผู้ป่วยที่จะเข้ารับการวินิจฉัยโรค และประเภทที่สามได้แก่ ประชาชนทั่วไปที่อยู่หรือผ่านเข้ามาในบริเวณห้องเอกซเรย์ บุคลากรต่าง ๆ เหล่านี้อาจได้รับอันตรายจากรังสีโดยเฉพาะในส่วนของผู้ป่วยควรปฏิบัติตามหลักที่เรียกว่า ALARA[1] (As Low As Reasonably Achievable) หรือการใช้ปริมาณรังสีต่ำที่สุดเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์อย่างสมเหตุสมผลที่สุด ซึ่งทำให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุดและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ดังนั้นจึงมีการนำระบบประกันคุณภาพเพื่อดูแลความปลอดภัยกับบุคคลากรที่เกี่ยวข้อง กิจกรรมควบคุมคุณภาพส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับคุณภาพของภาพถ่ายรังสี คุณภาพของอุปกรณ์เครื่องมือและคุณภาพของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ หากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ปราศจากการควบคุมคุณภาพ ภาพถ่ายเอกซเรย์อาจมีคุณภาพต่ำทำให้แพทย์วินิจฉัยได้ไม่ครบถ้วนตามความเป็นจริง ผู้ป่วยอาจต้องถ่ายภาพเอกซเรย์ซ้ำทำให้ต้องเสียค่าใช่จ่ายเพิ่มและได้รับปริมาณรังสีเพิ่มมากขึ้นอีกโดยไม่จำเป็น

การควบคุมคุณภาพมาตรฐานของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัยข้อหนึ่งที่สำคัญ คือ การตรวจสอบคุณภาพของลำรังสีเอกซ์ โดยวิธีวัดค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer : HVL) โดยนิยามว่า ค่า HVL คือ ความหนาของแผ่นกรองรังสีที่สามารถลดความเข้มรังสีเอกซ์ให้เหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีเดิม เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ในงานรังสีวินิจฉัยนิยมบอกค่า HVL เป็นมิลลิเมตรของอะลูมิเนียม (mm Al) หรือ มิลลิเมตรของทองแดง (mm Cu) หากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์มีค่าความต่างศักย์สูงสุดต่ำกว่า 120 กิโลโวลต์ จะกำหนด HVL เป็นมิลลิเมตรของอะลูมิเนียม หากความต่างศักย์ที่มากกว่า 120 กิโลโวลต์ขึ้นไปจะกำหนดเป็นมิลลิเมตรของทองแดง ความหนาของแผ่นกรองรังสีที่ทำให้ได้ค่า HVL ที่เหมาะสมจะช่วยดูดกลืนรังสีที่ไม่จำเป็นได้แก่ รังสีพลังงานต่ำที่ผู้ป่วยได้รับในขณะถ่ายภาพด้วยรังสีเพื่อให้ได้รับรังสีน้อยที่สุด วิธีการตรวจสอบค่า HVL ทำได้โดยวัดค่าความเข้มรังสีที่ผ่านแผ่นกรองรังสีความหนาต่างๆ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นกรองและความเข้มรังสี พิจารณาค่าความหนาที่สามารถลดความเข้มรังสีให้เหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีที่ไม่ผ่านแผ่นกรองรังสี ค่าความถูกต้องของค่า HVL ขึ้นกับจำนวนจุดที่

นำมาเขียนกราฟ หรืออาจใช้วิธีการตรวจสอบโดยฉายรังสีขณะไม่มีแผ่นกรองรังสีหนึ่งครั้ง จากนั้นฉายรังสีผ่านแผ่นกรองรังสีความหนาต่าง ๆ เลือกใช้ความหนาที่สามารถลดทอนความเข้มรังสีให้เหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีที่ไม่ผ่านแผ่นกรองรังสี ใช้ความหนาดังกล่าวมาคำนวณค่า HVL ซึ่งค่าความถูกต้องขึ้นกับการเลือกค่าความหนาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะต้องเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความหนาที่สามารถลดทอนความเข้มรังสีให้เหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มที่ไม่ได้ผ่านแผ่นกรองรังสีให้มากที่สุด

มาตรฐานของค่า HVL ที่มีขึ้นเพื่อความปลอดภัยของผู้ป่วยและผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งกำหนดโดย Food and Drug Administration (FDA)[2] และ National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP)[3] ที่ความต่างศักย์สูงสุด 80 กิโลโวลต์ (kVp) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2.3 mm Al ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์[4]

ในปี พ.ศ. 2550 มีเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัยที่ใช้งานอยู่ทั่วประเทศ 8,095 เครื่อง การตรวจสอบคุณภาพอยู่ในความรับผิดชอบของกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ และศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ซึ่งกระจายอยู่ทั่วประเทศรวมทั้งสิ้น 12 ศูนย์ แต่ละศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์จะมีเครื่องตรวจสอบคุณภาพเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัยซึ่งรวมทั้งการวัดค่า HVL ด้วย ประมาณ 2 ชุด ในส่วนของกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ มีอยู่ 4 ชุด ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวมีราคาแพงเพราะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ในการวัดค่า HVLให้มีความถูกต้องมากที่สุดโดยใช้วิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจำเป็นต้องฉายรังสีหลายครั้ง และต้องเสียเวลาในการคำนวณค่า HVL จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL ขึ้น โดยใช้หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอดวัดความเข้มรังสีที่ผ่านแผ่นกรองรังสีที่มีความหนาต่อเนื่อง เชื่อมโยงสัญญาณจากอุปกรณ์วัดรังสีเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถคำนวณค่า HVL ได้อย่างรวดเร็วจากการฉายรังสีเพียงครั้งเดียวเป็นการลดเวลาในการปฏิบัติงาน และค่า HVL ที่ได้ยังมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถกำหนดตำแหน่งความหนาของลิ่มอะลูมิเนียมกรองรังสีที่ลดทอนความเข้มรังสีให้เหลือหรือใกล้เคียงครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีที่ไม่ผ่านแผ่นกรองรังสีมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วัดค่า HVL แบบเคลื่อนย้ายได้โดยการฉายรังสีเพียงครั้งเดียวจากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่า HVL โดยใช้แผ่นกรองรังสีที่ทำจากอะลูมิเนียมที่มีความหนาแบบต่อเนื่องร่วมกับระบบวัดรังสีเอกซ์และไมโครคอมพิวเตอร์

2. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลเพื่อหาค่า HVL ของรังสีเอกซ์จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์

3. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้กับอุปกรณ์มาตรฐานที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ใช้ในปัจจุบัน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่า HVL โดยใช้แผ่นกรองรังสีที่ทำจากลิ่มอะลูมิเนียมร่วมกับระบบวัดรังสีเอกซ์และไมโครคอมพิวเตอร์

3. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลเพื่อหาค่า HVL ของรังสีเอกซ์จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย

4. ทำการทดสอบและปรับปรุงอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

5. สอบเทียบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์มาตรฐานที่กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ใช้ในปัจจุบัน

6. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้อุปกรณ์สำหรับวัดค่า HVL จากการฉายรังสีครั้งเดียวแบบเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการควบคุมคุณภาพของรังสีเอกซ์วินิจฉัย

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2532 นาย สาโรช ปริยะวาที[5] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องวัดค่ากิโลโวลต์พีกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัย งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการทำเครื่องมือวัดค่ากิโลโวลต์พีกของเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัย โดยใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวรับแสงเรืองของแผ่น fluorescence screen หลังได้รับรังสีเอกซ์ทำให้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการวัดรังสีเอกซ์และความเข้มแสงที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์และแสดงผล

เป็นตัวเลข จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องที่พัฒนาขึ้นพบว่า สามารถวัดค่ากิโลโวลต์พีกของเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยได้ตั้งแต่ 60 – 120 kV โดยมีความแม่นยำ (accuracy) หรือความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 3 % เมื่อเทียบกับเครื่องวัดกิโลโวลต์พีกของเครื่องวัดมาตรฐานยี่ห้อ Victoreen

2. ปี 2540 นาย สาโรช ปริยะวาที[6] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องวัดค่าเวลาในการฉายรังสีเอกซ์วินิจฉัยแบบอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้เกี่ยวกับเรื่องการพัฒนาเครื่องวัดค่าเวลาในการฉายรังสีเอกซ์โดยใช้ไดโอดเรียงกระแสจำนวน 10 ตัว ต่อแบบขนานเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับรังสีเอกซ์ สัญญาณที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถวัดค่าเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับเครื่องมือที่ซื้อจากต่างประเทศที่ใช้ในงานตรวจสอบเครื่องเอกซเรย์ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

3. ปี 2543 Annual EMBS International Conference[7] เป็นงานวิจัยเรื่อง A new Portable Electronic Device for Single Exposure Half-Value Layer Measurement เกี่ยวกับการวัดค่า Half Value Layer จากการฉายรังสีเพียงครั้งเดียว โดยการใช้ Silicon electric cell เป็นตัววัดรังสีเอกซ์ อะลูมิเนียมสำหรับวัดค่า Half Value Layer จะออกแบบลักษณะเป็นลิ่มโดยเคลื่อนที่ผ่านระหว่างหลอดเอกซเรย์กับหัววัดรังสีขณะทำการฉายรังสี ซึ่งหัววัดรังสีสามารถวัดค่าปริมาณรังสีที่ผ่านอะลูมิเนียมทุกความหนา และสัญญาณที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เข้าสู่คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมสำหรับแสดงกราฟและคำนวณค่า Half Value Layer

4. ปี 2548 นาย วันนพ สุนันท์รุ่งอังคณา[8] ได้ทำวิจัยเรื่อง การจัดวางระยะของแผ่นอะลูมิเนียมในการวัดค่าความหนาครึ่งค่าของเครื่องเอกซเรย์ งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการวัดค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer) ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัยโรค โดยใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.9 % เป็นแผ่นกรองรังสีวางในตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างคอลลิเมเตอร์กับหัววัดรังสี ทำการวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่ไม่ผ่านแผ่นอะลูมิเนียมและที่ผ่านแผ่นอะลูมิเนียม โดยเปลี่ยนระยะระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมกับคอลลิเมเตอร์ที่ระยะต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือวัดยี่ห้อ Keithley รุ่น 10100A นำค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่วัดได้มาวิเคราะห์และประเมินค่า HVL พบว่าค่า HVL ที่วัดได้มีความแตกต่างกันแม้จะตั้งเทคนิคของเครื่องเอกซเรย์เหมือนกัน

บทที่ 2

เครื่องผลิตรังสีเอกซ์และการวัดค่าการกรองรังสีเอกซ์

2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์[9]

1. เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงคลื่นสั้นมาก อยู่ในช่วง 4×10^{-12} ถึง 1×10^{-7} เมตร

2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เป็นต้นว่าเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ถ้าเคลื่อนที่ในสุญญากาศแล้วจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง คือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ 3×10^{8} เมตรต่อวินาที นอกจากนั้นแล้วยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา

3. ไม่หักเหโดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า

4. เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรของอะตอมหลังเกิดอันตรกิริยาบริเวณอะตอมนั้น เช่น การแทนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานหรือการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอน อีกข้อที่สำคัญคือ ถ้ามีอิเล็กตรอนผ่านใกล้นิวเคลียสจะถูกดูดโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบวกที่มีในนิวเคลียสของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางและทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนลดลงและคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์

2.2 การเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เกิดขึ้นโดยที่อนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้าที่เรียกว่าเบรมสตราลุง (Breamsstrahlung) ผลทำให้เกิดรังสีเอกซ์และความร้อน[10] การเกิดรังสีเอกซ์อาศัยองค์ประกอบ 5 ประการ คือ

1. กระบวนการทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอนหรือการแยกอนุภาคอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะ เช่น การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่งไส้หลอดร้อนขึ้นประมาณ 2000 องศาเซลเซียส หรือมากกว่านั้นจะมีผลทำให้เกิดเทอร์มิโอนิคอิมิสชั่น (Therminonic Emission) คือ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าค่า work function หลุดออกจากผิวโลหะเมื่อรับความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้จะมาออกันอยู่รอบ ๆ ผิวหน้าของโลหะจนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดพ้นไปจากผิวหน้าของโลหะเพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน และอะตอมของโลหะ (surface binding energy) ยังมีอยู่

2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดและเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะไปได้คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของโลหะมาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงนี้นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของโลหะแล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ถ้ายิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าใดก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของไส้หลอดได้มากและเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ความต่างศักย์ 100 กิโลโวลต์ (kV) จะทำให้ อิเล็กตรอนมีความเร็วประมาณ 165,000 เมตรต่อวินาที

3. การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไปต้องไม่มีสิ่งกีดขวางจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง ดังนั้นภายในหลอดเอกซเรย์จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศหรือก๊าซอยู่ภายในหลอดแม้เพียงเล็กน้อยก็ตามความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากเกิดการไอออนไนเซชั่น (Ionization) สูญเสียพลังงาน

4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้ม (Concentration of electron) หมายถึงจะต้องมีวิธีการที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกันหรือรวมตัวเป็นลำอิเล็กตรอน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้ม) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า “Electron focusing device” คอยควบคุมให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไปตกในบริเวณจุดโฟกัสของเป้า

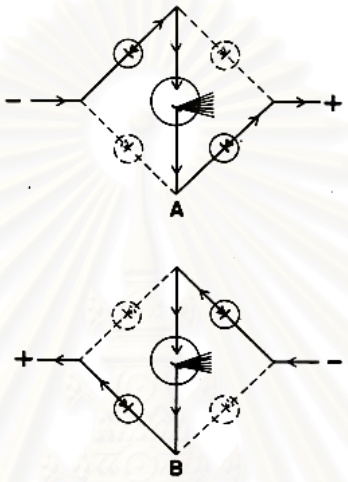
5. การทำให้อิเล็กตรอนเกิดอันตรกิริยาปลดปล่อยรังสีเอกซ์ โดยการที่ทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนมาด้วยความเร็วสูงแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทาง โดยหาวัตถุมากั้นหรือขวางอิเล็กตรอนไว้ วัตถุนั้นคือเป้า ผลที่เกิดขึ้นคือ ถ้ามีอิเล็กตรอนผ่านใกล้นิวเคลียสจะถูกดูดโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบวกที่มีในนิวเคลียสของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางและทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนลดลงและคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์นี้มีชื่อเรียกว่าเบรมสตราลุง (Breamsstralung) พลังงานของรังสีเอกซ์ลักษณะนี้จะมีค่าตั้งแต่มากกว่าศูนย์เล็กน้อยถึงค่าสูงสุดของค่า kV การที่อิเล็กตรอนวิ่งชนเป้า พลังงานส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน กล่าวคือจากพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่เคลื่อนไปสู่เป้านั้น 99.8 % จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % เป็นรังสีเอกซ์

2.3 ชนิดของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์[10]

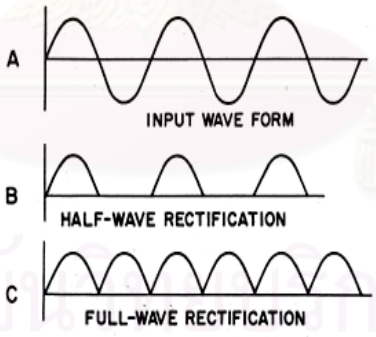
ชนิดของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์สามารถแบ่งตามระบบจ่ายไฟฟ้า (Generator) ได้เป็น 4 ชนิด คือ

2.3.1 เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิดเต็มคลื่น (full wave)

คือ เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่มีวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นดังรูปคลื่นที่ได้ในรูปที่ 2.1 และลักษณะของรูปคลื่นดังรูปที่ 2.2 C



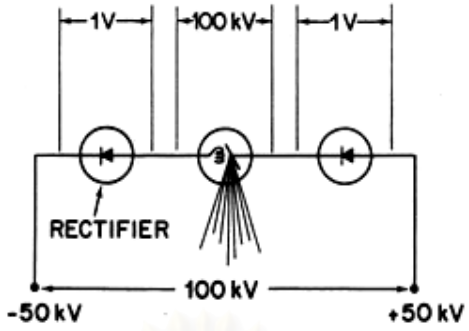
รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด full wave



รูปที่ 2.2 ลักษณะของรูปคลื่นของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด full wave และชนิด half wave

2.3.2 เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิดครึ่งคลื่น (half wave)

วงจรเรียงกระแสจะมีไดโอดเรียงกระแส (rectifier diode) จำนวน 2 ตัว ต่ออนุกรมกันภายในหลอดผลิตรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 2.3 และจะได้สัญญาณรูปคลื่นดังในรูปที่ 2.2 B



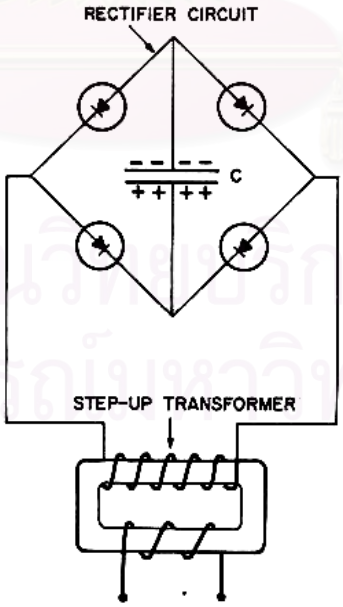
รูปที่ 2.3 วงจรเรียงกระแสของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด half wave

2.3.3 เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิดความถี่สูง (high frequency)

คือ เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ 50 เฮิร์ต (Hz) ทำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในช่วง 300 – 600 โวลต์ และทำให้มีความต่างศักย์สูง ๆ ที่ความถี่ 1 kHz ขึ้นไป และควบคุมค่าความต่างศักย์สูงด้วยความถี่

2.3.4 เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด condenser discharge หรือ capacitor discharge

มีวงจรเรียงกระแสที่ทำงานร่วมกับหม้อแปลงแบบเพิ่มขึ้น (step-up transformer) ดังวงจรแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีตัวเก็บประจุต่ออยู่ระหว่างไดโอดเรียงกระแส โดยตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุจนเต็มในเวลาไม่กี่มิลลิวินาที และหากทำการฉายรังสีเอกซ์ตัวเก็บประจุจะคายประจุออกมาในเวลาสั้น ๆ



รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ชนิด capacitor discharge

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 โครงสร้างของหลอดผลิตรังสีเอกซ์

หลอดผลิตรังสีเอกซ์ที่ใช้กันในวงการแพทย์มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ

1. หลอดผลิตรังสีเอกซ์ชนิด Stationary anode tube

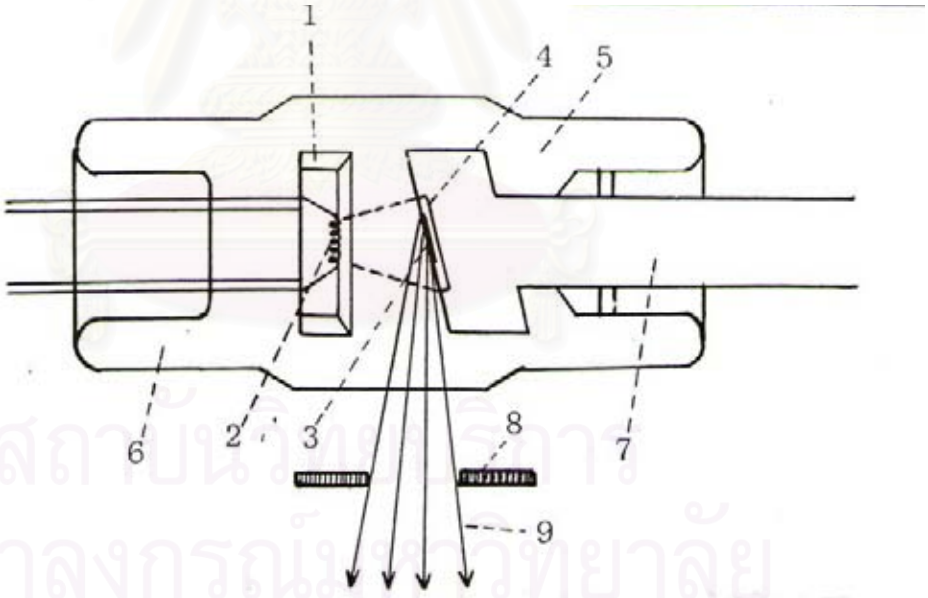
มีลักษณะเป็นหลอดผลิตรังสีเอกซ์ชนิดที่ขั้วบวก (Anode) อยู่คงที่ กล่าวคือ ขั้วบวกมักจะทำเป็นแท่งทองแดง ลักษณะเป็นบล็อก (Block) และมีเป้าเป็นบริเวณพื้นที่เล็ก ๆ ทำด้วยแผ่นโลหะทังสเตนฝังลงในบล็อกทองแดง

2. หลอดผลิตรังสีเอกซ์ชนิด Rotating anode tube

มีลักษณะเป็นหลอดผลิตรังสีเอกซ์ที่มีขั้วบวกไม่อยู่คงที่ กล่าวคือจะหมุนรอบตัวอยู่ตลอดเวลาที่ทำการถ่ายเอกซเรย์ ขั้วบวกของหลอดชนิดนี้ จะมีรูปร่างคล้าย ๆ จาน (Disc) ทำด้วยทังสเตนและมีแกนหรือด้าม (Shaft) ลักษณะเรียวเล็กทำด้วยโมลิปดินัม (Molybdenum) และมีทุ่นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) ทำให้เกิดการหมุนอยู่ตรงปลายของด้ามนั้น

ส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ทั้ง 2 ชนิดดูได้จาก Diagram 2 รูปข้างล่างนี้

Stationary anode tube



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของ Stationary anode tube โดยลำดับ คือ

1 = ขั้วลบ (Cathode)

2 = ไส้หลอด

3 = จุดโฟกัส (Focal spot)

4 = เป้าทังสเตน (Tungsten target)

5 = บริเวณสุญญากาศ (Vacuum space)

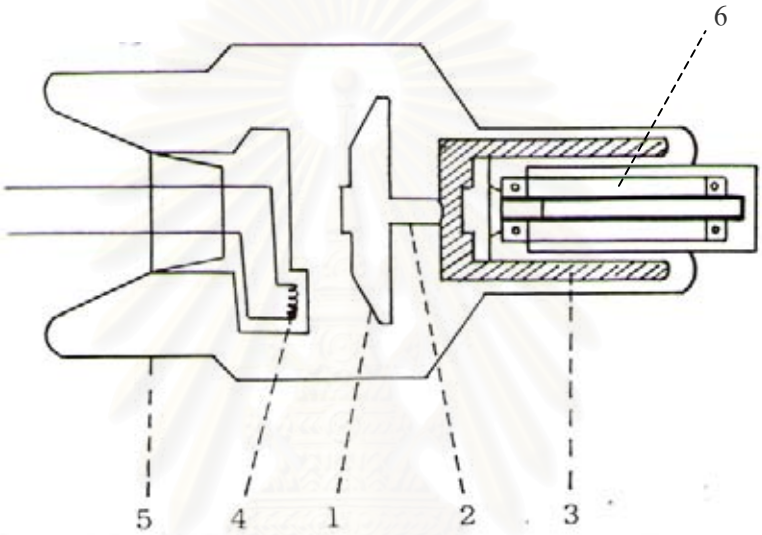
6 = หลอดแก้ว

7 = แกนของขั้วบวก (Copper shaft)

8 = ที่ควบคุมขนาดของลำแสงเอกซเรย์ (Primary diaphragm)

9 = ลำแสงเอกซเรย์ที่นำไปใช้ประโยชน์

Rotating anode tube



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะและส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของ Rotating anode tube

1 = จานทังสเตน (Tungsten disc)

2 = แกนของขั้วบวกทำด้วยโมลิปดินัม

3 = ระบบลูกปืน

4 = ขั้วลบพร้อมกับไส้หลอด (Cathode with filament)

5 = หลอดแก้วสุญญากาศ

6 = ทุ่นมอเตอร์ (Rotor)

จากรูปที่ 2.5 และ 2.6 พอจะสรุปส่วนประกอบหรือโครงสร้างสำคัญ ๆ ของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ทั้ง 2 ชนิดได้ดังนี้ คือ

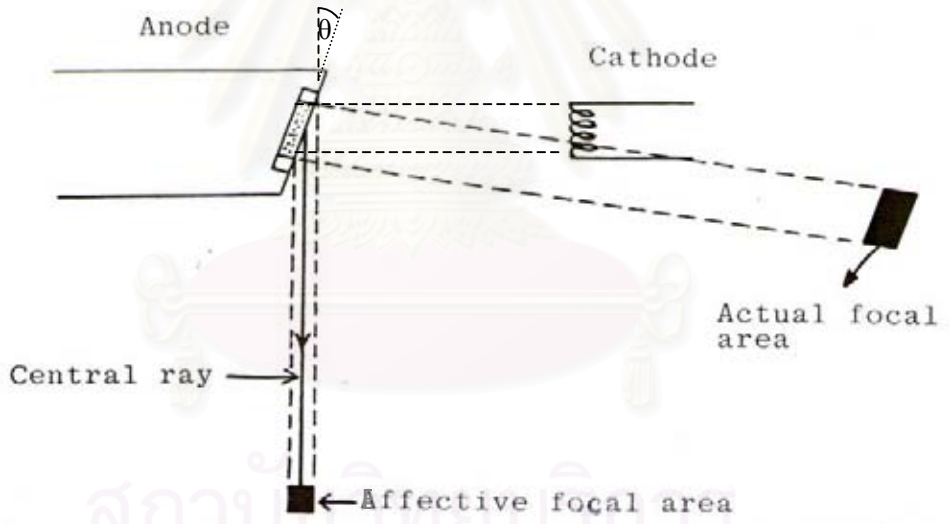
- โครงสร้างทั้งหมดของหลอดผลิตรังสีเอกซ์จะถูกบรรจุอยู่ในหลอดแก้วที่ผนึกอย่างดี ทั้งนี้เพื่อให้ภายในหลอดแก้วเป็นสุญญากาศ

- มีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วบวกมี 2 ชนิด ดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว สำหรับขั้วลบนี้ประกอบด้วยลวดทังสเตนที่พันเป็นขด เรียกว่าไส้หลอด ขดลวดนี้จะบรรจุอยู่ในที่รองรับที่มีลักษณะคล้ายถ้วย เรียกว่า “Focusing cup” ซึ่ง Focusing cup นี้จะมีส่วนต่อออกไปภายนอกหลอดแก้วเพื่อต่อกับวงจรไฟฟ้า

- เป้า เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนจะต้องวิ่งมาชนเป้านี้จึงจะเกิดรังสีเอกซ์ จุดหรือบริเวณที่เป็นเป้าให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนนี้เรียกว่าจุดโฟกัสขนาดเล็ก

ดังนั้นเพื่อที่จะให้ได้ภาพที่มีความชัดเจนและเพื่อให้แอโนด (เป้า) มีความทนทานต่อความร้อนได้เป็นอย่างดี จึงได้มีการหาวิธีที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ ซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ

<u>วิธีที่ 1</u> ใช้วิธีการสร้าง Line-focus principle อาศัยหลัก คือ บังคับให้ลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปสู่เป้าในลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากแคบ ๆ และสร้างให้ด้านหน้าของเป้าเอียงเป็นมุม ($\hat{\theta}$) ประมาณ 17 – 20 องศา กับด้านหน้าของ Cathode ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดง Line-focus principle และการเอียง Target เป็นมุม 17 – 20 องศา เพื่อทำให้ได้ Effective focal spot ขนาดเล็ก

การทำให้เป้าเอียง 17 – 20 องศา นี้มีวัตถุประสงค์ คือ

- ทำให้ Effective focal area มีขนาดเล็ก ภาพที่ได้จะชัดเจนและคม
- ทำให้ Actual focal area มีขนาดใหญ่ รับความร้อนได้มากและทนความร้อนได้ดี

วิธีที่ 2 วิธีที่ทำให้ Anode หมุนนั้น ก็เพื่อจะเพิ่มเนื้อที่ของ Anode ให้มากขึ้น ผล คือ ทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้น และตำแหน่งของ Focal spot ที่ถูกอิเล็กตรอนชนจะเปลี่ยนที่ไป เนื่องจาก Anode มีการหมุนต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลา เป็นผลให้ช่วยระบายความร้อนไปภายในตัว

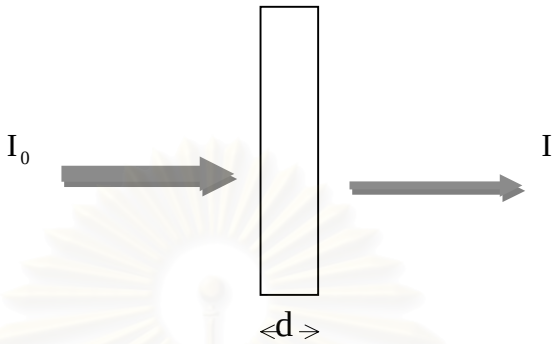
2.5 การเกิดภาพเอกซเรย์

รังสีเอกซ์มีคุณสมบัติประการหนึ่งคือ สามารถที่จะทะลุทะลวงเข้าไปในวัตถุได้แต่ไม่เสมอไป ทั้งนี้เพราะการที่รังสีเอกซ์จะสามารถทะลุทะลวงไปได้นั้น ต้องขึ้นอยู่กับช่วงคลื่น (Wave length) และอำนาจการทะลุทะลวง (Penetrating power) ของรังสี รังสีเอกซ์ที่มีช่วงคลื่นยาว หรือที่เรียกว่า Soft x-ray มีอำนาจการทะลุทะลวงต่ำจะถูกดูดกลืน (Absorbed) โดยวัตถุนั้น ส่วนรังสีเอกซ์ที่มีช่วงคลื่นสั้น มักจะเรียกว่า Hard x-ray มีอำนาจทะลุทะลวงสูงจะผ่านทะลุวัตถุออกมาได้ และเนื่องจากลำแสงรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากหลอดผลิตรังสีเอกซ์นั้นประกอบด้วย Soft และ Hard x-ray ที่มีช่วงคลื่นต่าง ๆ ดังนั้นเมื่อเอกซเรย์ผ่านวัตถุ จึงมีบางส่วนถูกดูดกลืน และบางส่วนทะลุออกมายังฟิล์ม ทำให้เกิดรูปภาพแฝงหรือเงา (Latent image) ปรากฏอยู่บนฟิล์ม และภาพที่ปรากฏยังขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่าน

2.6 การกรองรังสีเอกซ์ (Filters)

เนื่องจากลำของรังสีเอกซ์ประกอบด้วยจำนวนโฟตอนมากมายซึ่งจะมีลักษณะเป็นสเปกตรัมพลังงานทั้งหมด พลังงานเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 1/3 หรือ 1/2 ของสเปกตรัมพลังงาน[11] ดังนั้น โฟตอนจำนวนมากจะอยู่ในช่วงพลังงานต่ำ ๆ โดยรังสีที่ผ่านไปถึงผู้ป่วยจะประกอบด้วยโฟตอนพลังงานต่ำและมีเพียงโฟตอนพลังงานสูงที่ผ่านผู้ป่วยไปทำให้เกิดภาพถ่ายทางรังสี ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ (Patient Dose) ขึ้นกับจำนวนโฟตอนที่ดูดกลืนไว้เนื้อเยื่อของผู้ป่วยที่บริเวณลึกประมาณ 1 – 2 เซนติเมตร จะได้รับปริมาณรังสีมากกว่าอวัยวะภายใน การป้องกันการดูดกลืนโฟตอนพลังงานต่ำทำได้โดยการสอดแผ่นกรองรังสี (Filter) ระหว่างผู้ป่วยกับหลอดเอกซเรย์ แผ่นกรองรังสีนี้จะทำจากแผ่นโลหะ ส่วนมากนิยมใช้อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งจะทำหน้าที่ลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ ในงานตรวจสอบมาตรฐานเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย จะตรวจสอบค่าการกรองรังสีเอกซ์ ที่เรียกว่า ค่า Half Value Layer หรือ HVL ซึ่งหมายถึงค่าความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมที่สามารถลดความเข้มรังสีในลำรังสีเอกซ์ลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีเดิม ถ้าใช้รังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยว (Monochomatic X-ray) ความเข้ม I_0 ทะลุสารเนื้อเดียวตลอด

(Homogenous Absorber) หนา d ปรากฏว่ามีความเข้มทะลุออกมาได้ I ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) ดังรูปที่ 2.8

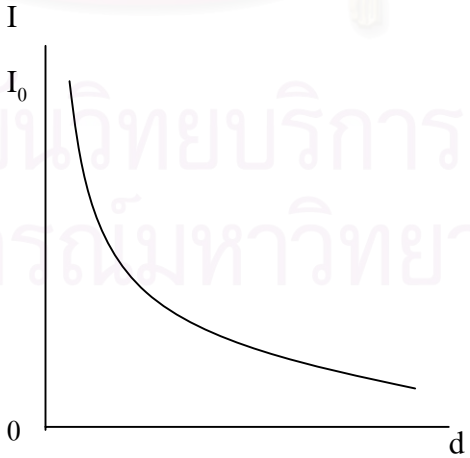


รูปที่ 2.8 แสดงความเข้มของรังสี I_0 ทะลุผ่านความหนา d มีความเข้มลดลงเหลือ I

$$I = I_0 e^{-\mu d} \text{ .....(2.1)}$$

เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มรังสี (Linear Attenuation Coefficient) เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุกรองรังสีแผ่นกรองรังสีและพลังงานของรังสีเอกซ์

ในทางปฏิบัติเอกซเรย์ไม่ใช่เอกซเรย์พลังงานเดี่ยว แต่เป็นเอกซเรย์พลังงานหลายค่า (Polyenergentic X-ray) ดังนั้น โดยอนุโลมตามสมการ (2.1) ความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ d จะไม่เป็นเอกซ์โพเนนเชียล และความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ d จะไม่เป็นเส้นตรงตลอดแต่จะเป็นเส้นตรงเมื่อความหนาของสารมากพอ[12]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ (I)
กับความหนาของแผ่นกรองรังสี (d)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การตรวจสอบเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย ลำรังสีเอกซ์จะถูกกรองที่ตำแหน่งต่าง ๆ 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์[13] ดังนี้

- หลอดผลิตรังสีเอกซ์ และ เฮาส์ซิ่ง (housing) เรียกการกรองรังสีที่ตำแหน่งนี้ว่า Inherent filtration
- แผ่นโลหะที่วางอยู่ในทางเดินของลำรังสี เรียกการกรองรังสีที่ตำแหน่งนี้ว่า additional filtration
- ผู้ป่วยที่รับการฉายรังสีหรือถ่ายภาพรังสี

ก. Inherent filtration

การกรองรังสีประเภทนี้เกิดจากการดูดกลืนลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านหลอดผลิตรังสีเอกซ์และเฮาส์ซิ่ง โดยวัสดุที่ทำให้เกิด inherent filtration คือ แก้วที่ใช้ห่อหุ้มแอโนดและแคโทด, น้ำมันที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนรอบ ๆ หลอดผลิตรังสีเอกซ์ และช่องหน้าต่าง (window) ใน tube housing ค่า inherent filtration จะวัดในเทอมของ aluminum equivalents โดยใช้ความหนาของอะลูมิเนียม เพื่อลดทอนปริมาณรังสีเอกซ์ที่เท่ากับการลดทอนเนื่องจากความหนาของวัสดุดังกล่าวข้างต้น

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า inherent filtration ที่เกิดจากส่วนประกอบต่างๆ ของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ซึ่งค่าความหนาจะอยู่ในช่วง 0.5 – 1.0 มิลลิเมตรของความหนาอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.1 Inherent filtration สำหรับหลอดผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย

ABSORBER	THICKNESS (mm)	ALUMINUM EQUIVALENT (mm)
Glass envelope	1.40	0.78
Insulating oil	2.36	0.07
Bakelite window	1.02	0.05
	Total	0.90

การกรองรังสีเนื่องจากแก้วที่ใช้ห่อหุ้มแอโนดและแคโทดจะทำให้ค่าพลังงานเฉลี่ยของลำรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นทำให้ความเปรียบต่าง (Contrast) ของเนื้อเยื่อลดลง คุณภาพของภาพถ่ายเอกซเรย์ไม่ดี ดังนั้นหน้าต่างใน tube housing จะใช้ เบริลเลียม (beryllium) ที่มีเลขอะตอม 4 แทนแก้ว เพื่อไม่ให้เกิดการกรองรังสีมากเกินไป ทำให้โฟตอนพลังงานต่ำผ่านได้มาก

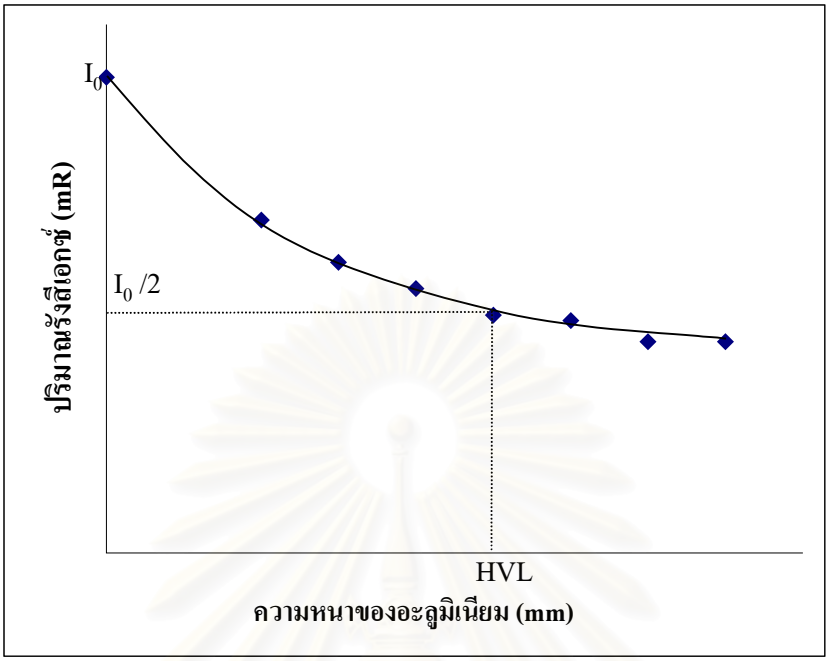
กว่าแก้ว เหมาะสำหรับถ่ายภาพ soft tissue ตัวอย่างเช่น เครื่องเอกซเรย์ถ่ายภาพเต้านม (mammography)

ข. Additional filtration

การกรองรังสีประเภทนี้จะใช้ วัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสี (absorbers) วางระหว่างทางเดินของลำรังสีเอกซ์ ในทางทฤษฎีแล้ววัสดุที่ใช้เป็นตัวกรองรังสีควรจะดูดกลืนโฟตอนพลังงานต่ำ ๆ ได้ทั้งหมดและโฟตอนพลังงานสูงผ่านออกมาได้ แต่ไม่มีวัสดุใดมีคุณสมบัติดังกล่าวจริง เราสามารถเลือกวัสดุที่ดูดกลืนรังสีพลังงานต่ำโดยใช้คุณสมบัติของ Photoeletric attenuation สำหรับโฟตอนพลังงานต่ำการลดทอนจะมีมาก นั่นคือพลังงานของรังสีที่ถูกกรองออกจากลำรังสีเอกซ์ขึ้นกับการเลือกใช้วัสดุที่ประเมินจากเลขอะตอม ของอะลูมิเนียมและทองแดงเป็นวัสดุที่เลือกใช้สำหรับงานรังสีวินิจฉัย โดยอะลูมิเนียมมีเลขอะตอม 13 เหมาะสำหรับการทำเป็นวัสดุกรองรังสีพลังงานต่ำได้ดี ทองแดงมีเลขอะตอม 29 เป็นวัสดุกรองรังสีพลังงานสูงได้ดีกว่าอะลูมิเนียม ในทางปฏิบัติจะใช้ filter ที่ทำจากวัสดุเพียงอย่างเดียวนิยมใช้อะลูมิเนียม สำหรับทองแดงจะไม่นิยมใช้เป็น filter เพียงวัสดุเดียวมักนิยมใช้ร่วมกับอะลูมิเนียม ซึ่งเรียกว่า compound filter โดยประกอบด้วย 2 ชั้นหรือมากกว่า แต่ละชั้นใช้โลหะหรือวัสดุที่ต่างกัน คือ วัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ทองแดง จะวางอยู่ด้านหน้าหลอดเอกซเรย์ และเลขอะตอมต่ำกว่า เช่น อะลูมิเนียม จะวางอยู่ด้านผู้ป่วย การกรองรังสีส่วนใหญ่จะเกิดจากอันตรกิริยาของทองแดง การลดทอนเนื่องจาก Photoeletric ในทองแดงจะทำให้เกิด characteristic radiation ที่มีพลังงานประมาณ 8 keV ซึ่งพลังงานนี้ชั้นอะลูมิเนียมจะดูดกลืนและจะทำให้เกิด characteristic radiation มีพลังงานเพียง 1.5 keV ซึ่งพลังงานนี้จะถูกดูดกลืนโดยอากาศภายในช่องว่างระหว่าง filter กับผู้ป่วย

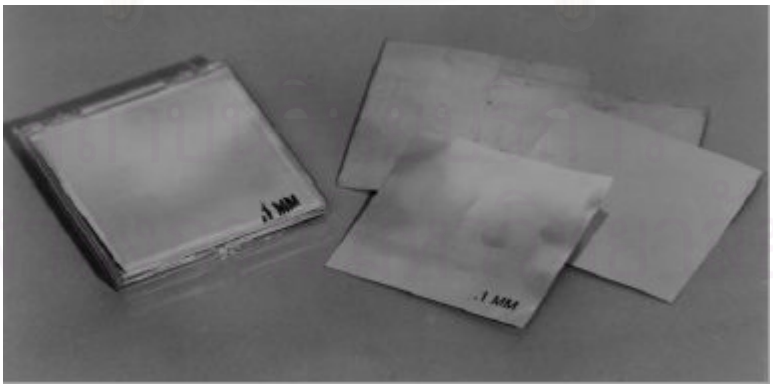
2.7 การวัดการกรองรังสีเอกซ์

วิธีวัดค่า HVL ทำได้โดยใช้เครื่องวัดรังสีวัดความเข้มของลำรังสีที่ไม่ผ่านแผ่นกรองรังสี (I_0) และวัดความเข้มของลำรังสีที่ผ่านแผ่นกรองรังสีความหนาต่างๆ (I_t) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่วัดได้กับความหนาของแผ่นกรองรังสี จากกราฟหาค่าของความหนาที่ทำให้ความเข้มของลำรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มที่ไม่ผ่านแผ่นกรองรังสี โดยลากเส้นที่ความเข้มลดลงเหลือครึ่งหนึ่งมายังเส้นกราฟแล้วลากตัดแกน x ซึ่งเป็นความหนาของอะลูมิเนียม จะได้ค่า HVL ที่ต้องการ ดังในรูปที่ 2.10

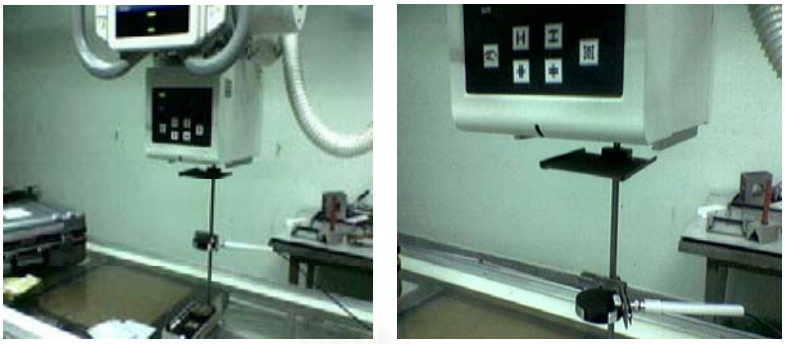


รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการลดลงของความเข้มรังสีเอกซ์ที่ความหนาของอะลูมิเนียมต่าง ๆ เพื่อหาค่า HVL

วิธีการมาตรฐานที่กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ใช้ในการวัดค่า HVL จะใช้เครื่อง Dosimeter readout ยี่ห้อ Keithley รุ่น 35050A และใช้แผ่นอะลูมิเนียมมาตรฐานชนิด 1100 ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.1 – 4.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.11 โดยจัดวางเครื่องมือวัดดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แผ่นอะลูมิเนียมมาตรฐานบริสุทธิ์ 99.9 % เพื่อใช้วัดค่า HVL



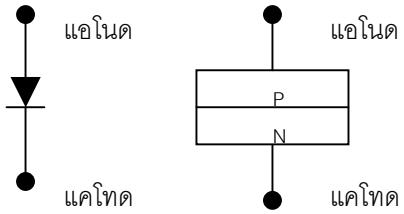
รูปที่ 2.12 การจัดวางเครื่องมือวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์วินิจฉัย

ขั้นตอนการวัด จะทำการวัดค่าความเข้มรังสีเอกซ์ขณะไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมและวัดค่าความเข้มรังสีเอกซ์ขณะมีแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาตั้งแต่ 0.1 มิลลิเมตรจนถึง 4.5 มิลลิเมตร โดยเพิ่มความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมครั้งละ 0.5 มิลลิเมตร เทคนิคในการตั้งค่าของเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไปจะใช้ความต่างศักย์ของหลอดเอกซเรย์ 80 kV และค่ากระแสหลอด-เวลา 20-40 mAs แล้วนำค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้มาวาดกราฟจะได้กราฟลักษณะดังรูปที่ 2.10 และคำนวณหาค่า HVL

2.8 ระบบตรวจและวัดรังสีเอกซ์

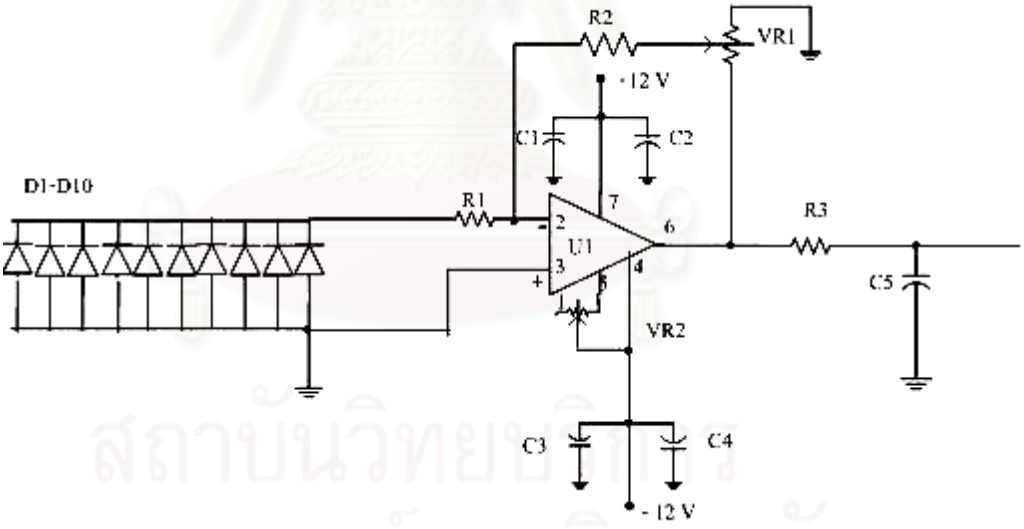
ระบบตรวจและวัดรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนหัววัดรังสีเอกซ์และส่วนขยายสัญญาณ การเลือกใช้หัววัดรังสีเอกซ์จะต้องศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางในการวัดรังสีที่มีการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์และมีความไวมากพอ เพื่อทำการเลือกใช้หัววัดรังสีดังต่อไปนี้

ก. ไดโอดเรียงกระแสทั่วไป (Rectifier Diode) ไดโอดเป็นอุปกรณ์ทางโซลิตสเตด (Solid state) ที่มี 2 ขั้ว[14] และยอมให้กระแสไหลผ่านตัวมันเพียงทางเดียวเท่านั้น ถ้ากระแสไหลในทิศทางตรงข้ามจะไม่สามารถไหลผ่านตัวมันได้ ดังรูป 2.13 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของไดโอด ส่วนรูปที่ 2.13 (ข) แสดงโครงสร้างของไดโอดพื้นฐานทั่ว ๆ ไป ซึ่งเป็นรอยต่อ P-N โดยขั้วทางด้าน P เรียกว่า แอโนด และขั้วทางด้าน N เรียกว่า แคโทด โครงสร้างบริเวณรอยต่อจะเป็นบริเวณที่ไวต่อรังสีและแสง



รูปที่ 2.13 สัญลักษณ์และโครงสร้างพื้นฐานของไดโอด

เมื่อนำมาใช้วัดรังสีเอกซ์จะต้องต่อแบบไบอัสกลับ เนื่องจากการต่อแบบไบอัสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับผ่านไดโอดในปริมาณน้อย เมื่อเกิดกระแสจากการวัดรังสีจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัด เมื่อนำมาทดสอบโดยต่อแบบไบอัสกลับเรียงขนานกันประมาณ 10 ตัว ดังรูปที่ 2.14 เหตุที่ต้องต่อเรียงกัน 10 ตัวเพื่อเพิ่มพื้นที่รับความเข้มรังสี พบว่าสัญญาณที่วัดได้น้อยเกินไปไม่เหมาะสำหรับการวัดหาค่า HVL ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์วินิจฉัย เพราะสัญญาณที่ผ่านลิ่มอะลูมิเนียมจะน้อยกว่าสัญญาณที่ไม่ผ่านลิ่มอะลูมิเนียม และความไวในการตรวจวัดความเข้มรังสีเอกซ์ของไดโอดแบบเรียงกระแสไม่ไวพอ



รูปที่ 2.14 วงจรหัววัดรังสีเอกซ์โดยใช้ไดโอดเรียงกระแส

ข. หัววัดรังสีแบบไกเกอร์มูเลอร์ โดยเลือกใช้หัววัดขนาดความยาวประมาณ 1.5 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 มิลลิเมตร รูปทรงกระบอก พบว่า เมื่อวัดความเข้มรังสีปฐมภูมิ (Primary X-ray) จะได้สัญญาณที่มากจนเครื่องวัดอ่านค่าไม่ได้ และเมื่อทำการจำกัดลำรังสี (Collimate Beam) โดยใช้แผ่นตะกั่วหนา 2 มิลลิเมตร เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร แล้วทำการวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่ผ่านช่องแผ่นตะกั่วจะได้ผลเหมือนครั้งแรก หากทำการทดลองวัดความเข้มรังสี

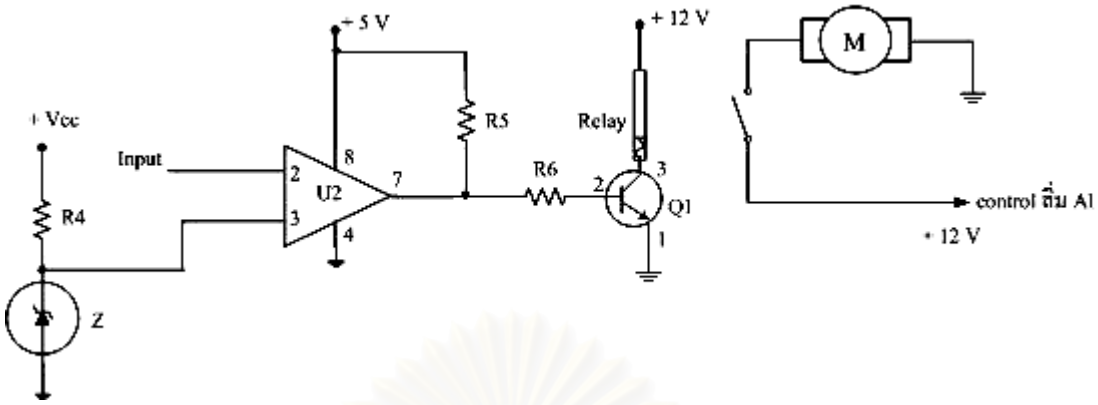
ทุติยภูมิ (Secondary X-ray) พบว่าสามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าจากความเข้มรังสีได้ นั่นคือ หัววัดรังสีแบบไกเกอร์มูเลอร์ไม่เหมาะสมในการวัดความเข้มรังสีปฐมภูมิ แต่เหมาะสำหรับวัดความเข้มรังสีทุติยภูมิ

ค. โฟโตไดโอด ที่มีพื้นที่กว้าง (large area diode) ซึ่งมีคุณสมบัติรอยต่อ P-I-N ที่มีความไวต่อแสงมาก คือเมื่ออยู่ในที่มืดอิมพีแดนซ์จะมีค่ามาก และเมื่ออยู่ในที่สว่างอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อย ตัวโฟโตไดโอดที่ออกแบบให้วัดรังสีเอกซ์จะมีผลึกของสารเรืองรังสี หรือผลึกซิลทิลเลชัน (Scintillation) เคลือบอยู่ โดยทั่วไปจะห่อหุ้มรอยต่อ P-I-N ด้วยวัสดุทึบแสง เพื่อให้ไวต่อรังสีเอกซ์เท่านั้น เมื่อมีรังสีเอกซ์ตกกระทบจะทำให้ผลึกดังกล่าวเรืองแสงและมีกระแสไหลผ่านตัวโฟโตไดโอด รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของโฟโตไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากการนำมาทดสอบต่อแบบไบอัสกลับเพื่อไม่ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานเมื่อความเข้มของแสงสว่างที่เกิดขึ้นมากพอตามที่ต้องการ นั่นคือเมื่อโฟโตไดโอดได้รับแสงสว่างจะเกิดกระแสในทิศทางเดียวกับกระแสรั่วไหล ปริมาณกระแสจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง[15] พบว่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างมากเมื่อผ่านวงจรขยายและมีความไวพอที่สามารถใช้ตรวจวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์ได้

รูปที่ 2.15 โฟโตไดโอดที่ใช้ในงานวิจัย

2.9 มอเตอร์กระแสตรงและการควบคุม

รูปที่ 2.16 เป็นวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่มีแรงดันอ้างอิงเพื่อต้องการให้มอเตอร์ทำงานขณะที่รับสัญญาณทางไฟฟ้าจากความเข้มรังสีเอกซ์จริง ๆ เมื่อมีสัญญาณอินพุตสูงกว่าสัญญาณอ้างอิง ที่ขาบวกของ U2 จะมีสัญญาณไปทริก (Trig) ทรานซิสเตอร์ ทำให้สวิตช์ของรีเลย์ (Relay) ปิด (off) เมื่อรีเลย์ทำงานจะทำให้ไฟเลี้ยง +12 โวลต์ ไหลผ่านมอเตอร์ลงกราวนด์ (Ground) มอเตอร์จะหมุนได้



รูปที่ 2.16 วงจรทดสอบมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยมีการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Reference signal)

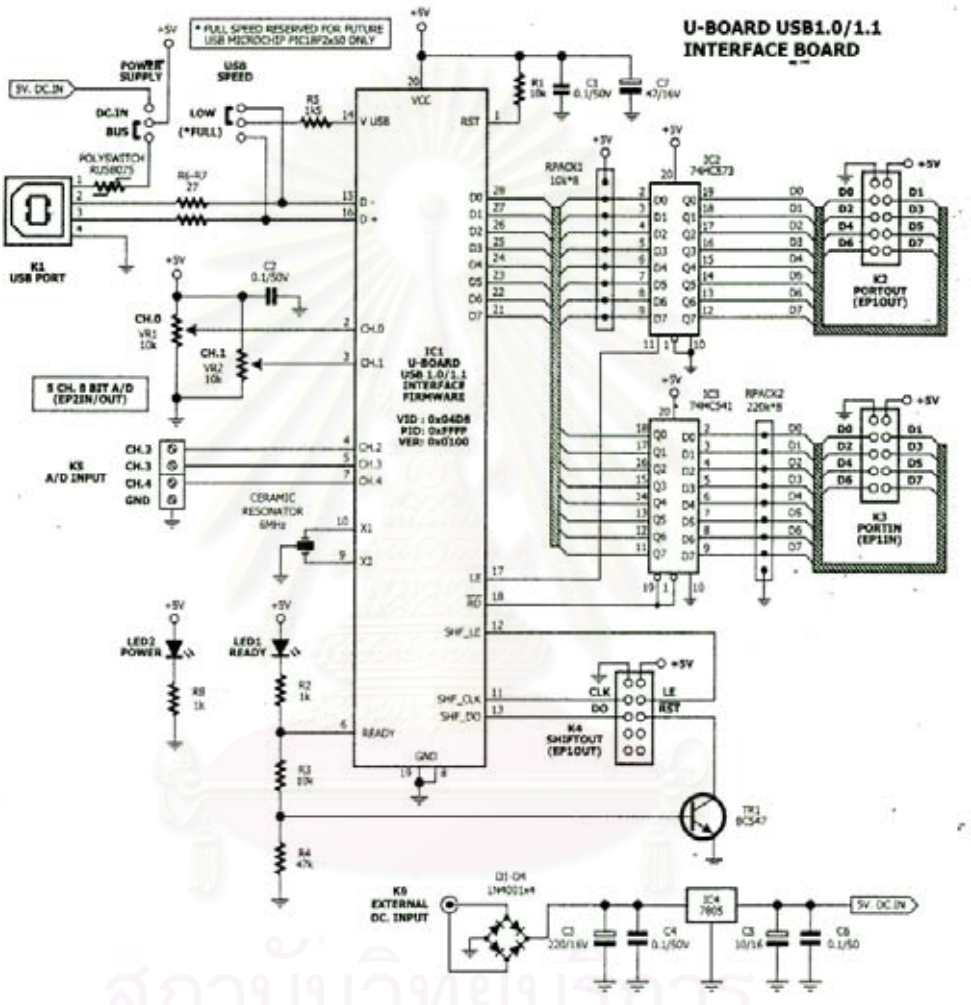
2.10 ระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ในการให้คอมพิวเตอร์ประมวลข้อมูลที่นำมาเชื่อมต่อจะต้องอาศัยบอร์ดเชื่อมต่อ (Interface board) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (Digital number) บอร์ดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยี่ห้อ Inex รุ่น U-Board 1.0/1.1 [16] ซึ่งมีพอร์ต USB ที่เหมาะสำหรับใช้งานกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา โดยบอร์ด มีลักษณะดังรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17 Interface board ยี่ห้อ Inex รุ่น U-Board 1.0/1.1

การทำงานของบอร์ด Inex รุ่น U-Board 1.0/1.1 มีหลักการทำงานโดยที่ U-Board เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อพอร์ต USB ที่ได้รับการออกแบบให้ทำงานในระดับ HID Class (Human Interface Device Class) เป็นลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ USB เน้นไปที่การติดต่อกับผู้ใช้งาน สำหรับการใช้งานนี้ไม่สามารถต่อพ่วง U-Board ได้มากกว่า 1 บอร์ดบนระบบบัสของพอร์ต USB

ไฟเลี้ยงของ U-Board เลือกได้จากภายนอกหรือจากพอร์ต USB ในกรณีใช้จากภายนอก สามารถรับแรงดันได้ตั้งแต่ 9 – 16 โวลต์ แรงดันที่ป้อนเข้ามานั้นจะถูกส่งให้ไอซี 7805 ดังรูปวงจรที่ 2.18 เพื่อควบคุมให้ได้แรงดันคงที่ที่ + 5 โวลต์ สำหรับเลี้ยงอุปกรณ์บน U-Board และบอร์ดต่อพ่วงที่นำมาต่อร่วมด้วย



รูปที่ 2.18 วงจรสมบูรณ์ของ U-Board บอร์ดเชื่อมต่อพอร์ต USB

จากรูปที่ 2.18 แสดงวงจรสมบูรณ์ของ U-Board หัวใจของการทำงานทั้งหมดอยู่ที่ IC1 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบมีวงจรเชื่อมต่อพอร์ต USB อยู่ภายใน โดยในที่นี้ใช้เบอร์ PIC16C745 ของ Microship Technology, USA. โดยภายใน IC1 ได้ทำการบรรจุโปรแกรมควบคุมการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการติดต่อกับพอร์ต USB ไว้เรียบร้อยแล้ว

ส่วนเชื่อมต่อกับพอร์ต USB ของ IC1 คือขา 15 และ 16 จะต่อเข้ากับคอนเน็กเตอร์ K1 ซึ่งเป็นคอนเน็กเตอร์ USB แบบ B โดยมีตัวต้านทานจำกัดกระแส 2 ตัว คือ R6 และ R7 จั๊ม

เปอร์ JP1 Power Supply ใช้สำหรับเลือกแรงดันไฟเลี้ยงจากภายนอกหรือจากพอร์ต USB ซึ่งการเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟนั้นต้องพิจารณาจากอุปกรณ์ที่นำมาต่อพ่วงกับ U-Board หากนำ U-Board ไปขับโหลดที่กระแสรวมไม่มากกว่า 100 mA ก็สามารถใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต USB ได้เลย แต่ถ้ามากกว่านั้นควรใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจากภายนอก ซึ่งบน U-Board ได้เตรียมแหล่งจ่ายไฟ +5 โวลต์ไว้ให้แล้ว

ด้านพอร์ตอินพุตเอาต์พุตสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกของ U-Board ได้มีไว้ 4 ส่วนด้วยกันคือ พอร์ตอินพุต (PORTIN), พอร์ตเอาต์พุต (PORTOUT), พอร์ต SHIFTOUT และพอร์ตอินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D INPUT) โดยในส่วนของพอร์ตดิจิตอล 2 พอร์ตแรกนั้นได้รับการจัดสรรให้เป็นเอ็นด์พอยต์ 1 ส่วนวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลเป็นเอ็นด์พอยต์ 2

ภายใน IC1 มีวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 8 บิต จำนวน 5 ช่อง ผู้ผลิตจึงนำคุณสมบัติพิเศษนั้นมาสร้างเป็นวงจรทดลองการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลด้วย โดยต่อตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อป้อนแรงดันทดลองบนบอร์ดได้ทันที 2 ช่อง และอีก 3 ช่องที่เหลือต่อเข้ากับเทอร์มินอลบล็อกเพื่อรับสัญญาณจากภายนอก

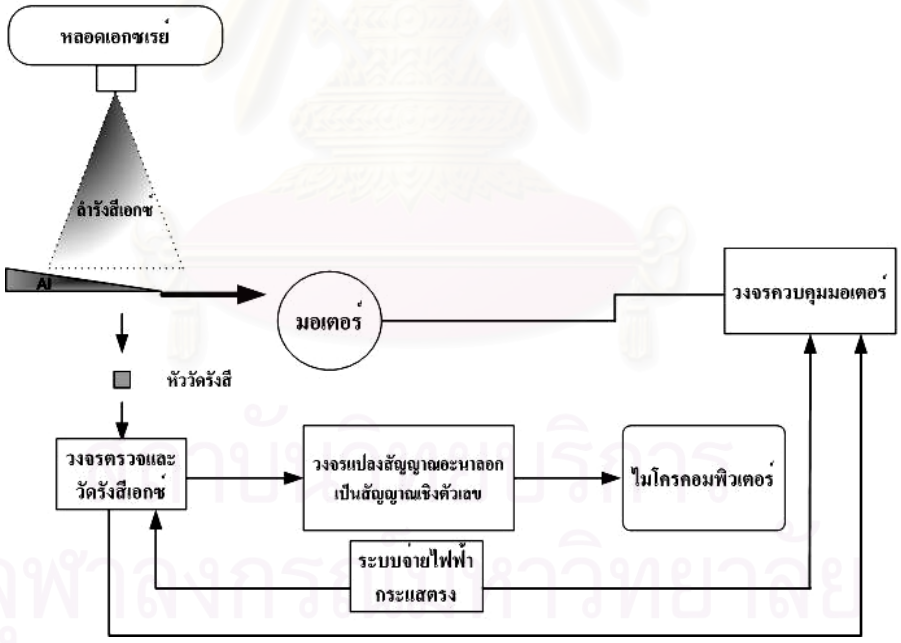
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

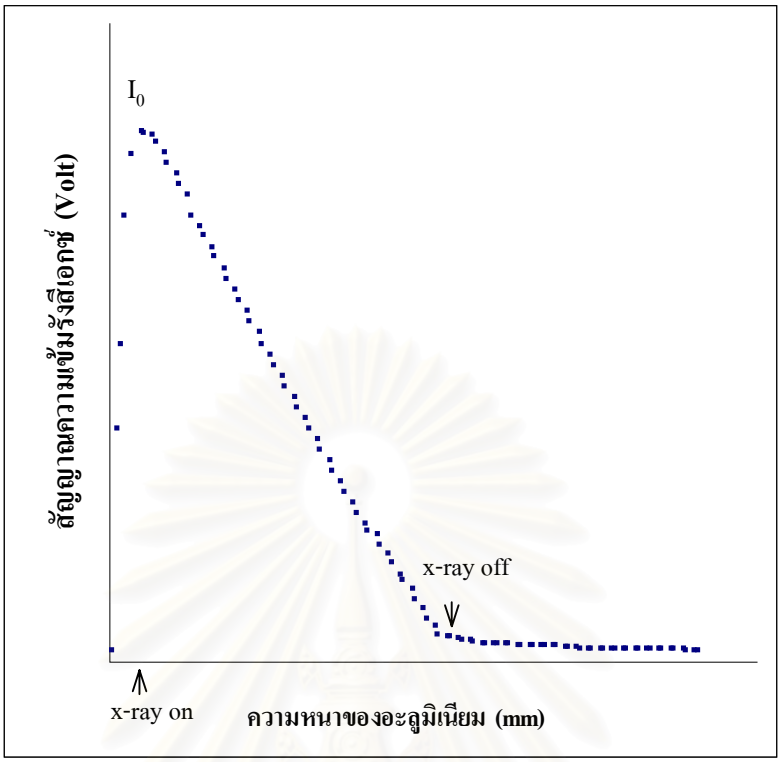
การพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

3.1 การทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

หลักการวัดค่า HVL คือ เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ ลำรังสีจะถูกตรวจวัดโดยหัววัดรังสีเอกซ์ และสัญญาณที่ได้จะถูกขยายและส่งไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์เพื่อขับเพลาของมอเตอร์ให้หมุนทำให้สายพานที่มีลิ่มอะลูมิเนียมวางอยู่เคลื่อนที่ผ่านลำรังสีเอกซ์ สัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีจะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลหรือสัญญาณเชิงตัวเลขด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (U-Board) สัญญาณดิจิตอลที่ได้จะถูกประมวลผลและคำนวณหาค่า HVL โดยไมโครคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาด้วย Visual basic 6.0 และเมื่อครบเวลาในการฉายรังสี ปุ่มบนสายพานจะชนกับลิมิตสวิตซ์ (limit switch) ทำให้มอเตอร์หยุดหมุนโดยลิ่มอะลูมิเนียมจะเคลื่อนที่ผ่านลำรังสีเอกซ์พอดีกับความยาวของลิ่มอะลูมิเนียม จากนั้นมอเตอร์จะหมุนกลับทำให้ลิ่มอะลูมิเนียมเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นใหม่ ดังการทำงานตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์



รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

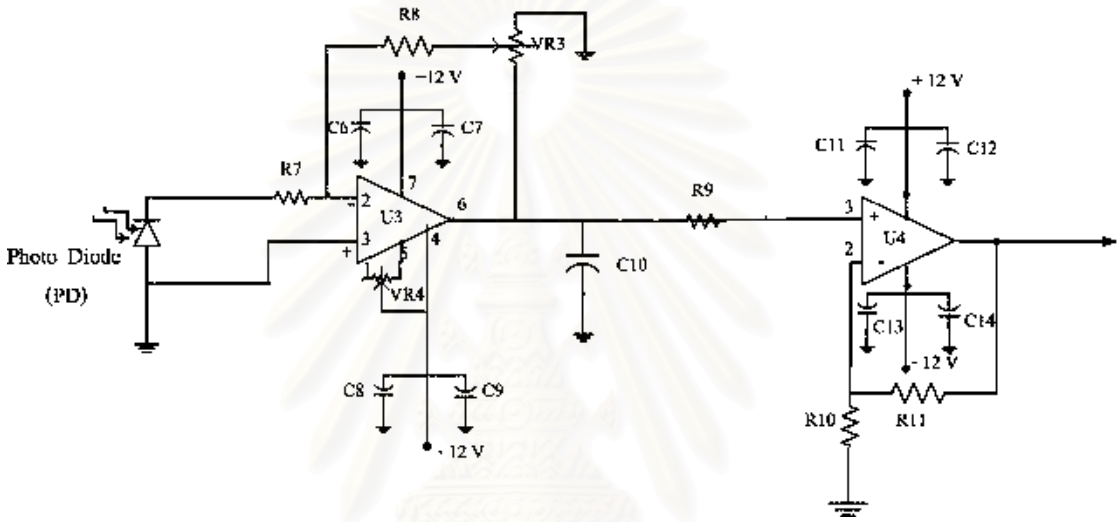
จากรูปที่ 3.2 แสดงกราฟสัญญาณที่วัดได้ โดยกราฟสัญญาณจะเริ่มตั้งแต่ค่าต่ำสุดขณะที่ยังไม่มีความเข้มรังสีเอกซ์ เมื่อมีรังสีเอกซ์สัญญาณที่วัดได้ทางไฟฟ้าของความเข้มรังสีเอกซ์จะเพิ่มในขณะยังไม่มีลิ่มอะลูมิเนียมมาบัง (I_0) และเมื่อลิ่มอะลูมิเนียมเคลื่อนที่ผ่านลำรังสีเอกซ์ สัญญาณทางไฟฟ้าของความเข้มรังสีเอกซ์จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความหนาของลิ่มอะลูมิเนียมมีค่ามากขึ้น และกราฟจะลดลงคงที่ที่ระดับหนึ่งไม่เป็นศูนย์เมื่อหมดเวลาฉายรังสีเอกซ์

3.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL

เครื่องวัดค่า HVL ต้องสามารถวัดค่า HVL ได้ทันทีจากการฉายรังสีเพียงครั้งเดียว โดยใช้หัววัดรังสีเพียงตัวเดียววัดค่าความเข้มรังสีที่ผ่านตัวกรองรังสีซึ่งทำจากลิ่มอะลูมิเนียมที่มีความหนาต่อเนื่องตั้งแต่ 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร ระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนลิ่มอะลูมิเนียมให้เคลื่อนที่ผ่านหัววัดรังสีพอดีตลอดความยาวลิ่มอะลูมิเนียมกับเวลาในการฉายรังสี

3.2.1 วงจรวัดรังสีเอกซ์ด้วยหัววัดโฟโตไดโอด

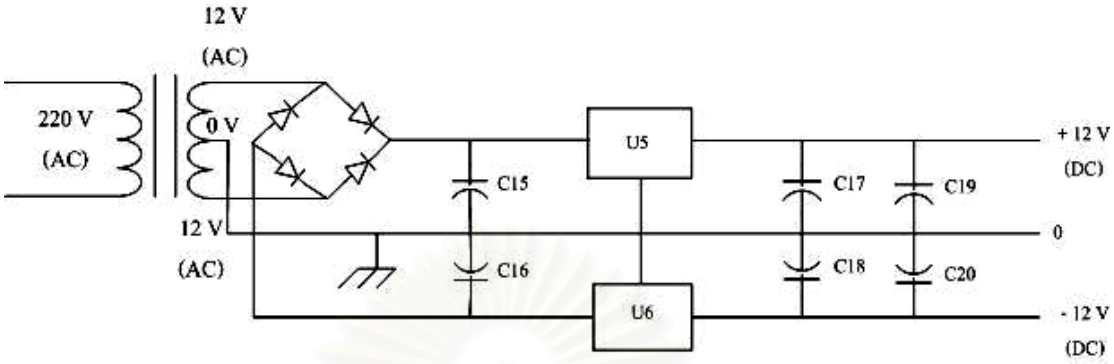
วงจรวัดความเข้มรังสีเอกซ์ จะใช้โฟโตไดโอดเป็นตัววัดรังสีเอกซ์ซึ่งโฟโตไดโอดมีความไวต่อรังสีเอกซ์ค่อนข้างสูง เมื่อรับรังสีเอกซ์ผลึกซิลทิลเลเตอร์ที่เคลือบอยู่บนโฟโตไดโอดจะเปลี่ยนพลังงานรังสีเอกซ์ให้เป็นแสง สัญญาณแสงที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณ และภาคขยายสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้รับด้วยอัตราขยาย 100 เท่า สัญญาณที่ได้จะมีหน่วยเป็นโวลต์ ดังวงจรในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรภาคหัววัดความเข้มรังสีเอกซ์และภาคขยายสัญญาณ

การทำงานของวงจรรูปที่ 3.3 เมื่อมีความเข้มรังสีเอกซ์ตกกระทบหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด (PD) จะเกิดแรงดันจากโฟโตไดโอดส่งมาที่ U3 (CA3140E) ซึ่ง PD ต่อแบบไบอัสกลับ สัญญาณที่ได้จะผ่านเข้าทางอินพุตขาลบของ U3 เอาต์พุตที่ได้จึงมีค่าเป็นบวก จะได้สัญญาณที่ถูกขยาย 10 เท่า (Gain = 10) และแรงดันจากเอาต์พุตของ U3 จะถูกอินพุตเข้าที่ขาบวกของ U4 จะได้สัญญาณขยายเป็น 10 เท่า ดังนั้นสัญญาณทั้งหมดที่ได้จะถูกขยายเป็น 100 เท่า ในวงจรนี้ต้องมีการปรับออฟเซท (Offset) เนื่องจาก เมื่ออินพุตเท่ากับศูนย์แต่สัญญาณไฟฟ้าทางเอาต์พุตไม่เท่ากับศูนย์ การปรับออฟเซททำได้โดยต่อความต้านทานปรับค่าได้เข้าที่ขาไฟลบของ U3 เมื่อตรวจสอบ อินพุตเท่ากับศูนย์ ปรับความต้านทานให้ได้เอาต์พุตเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดถูกต้อง

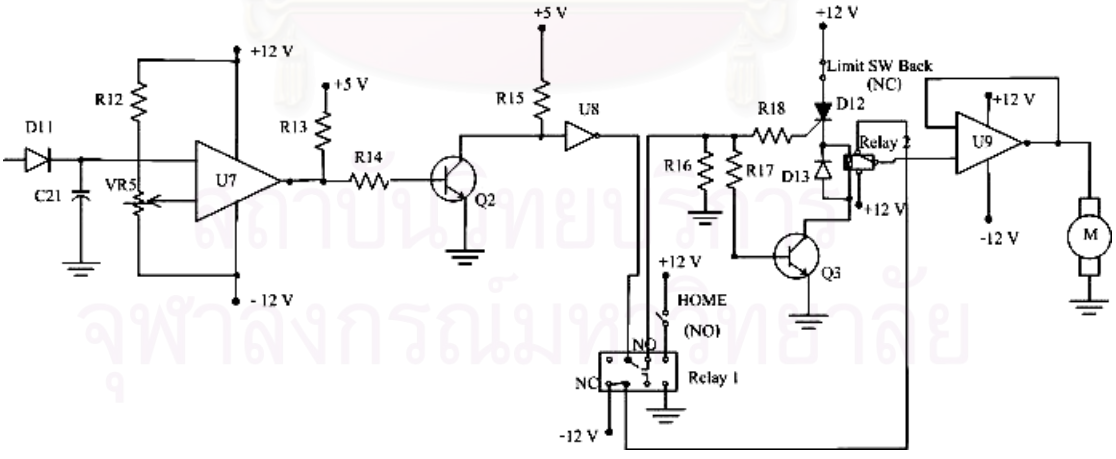
3.2.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.4 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ +12 V และ –12 V

การทำงานของวงจรรูปที่ 3.4 เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ (Primary) ฝั่งขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) จะมีฟุลเวฟเซ็นเตอร์แท็ป (Full wave center tapped) ทำหน้าที่เรียงกระแส โดย มี C15 และ C16 ทำหน้าที่กรองแรงดัน และมี C17, C18, C19 และ C20 ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงทิ้งไป ทำให้สัญญาณรบกวนน้อยลง ส่วน U5 (7812) และ U6 (7912) ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่ (Regulator) +12 V และ –12 V ตามลำดับ

3.2.3 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

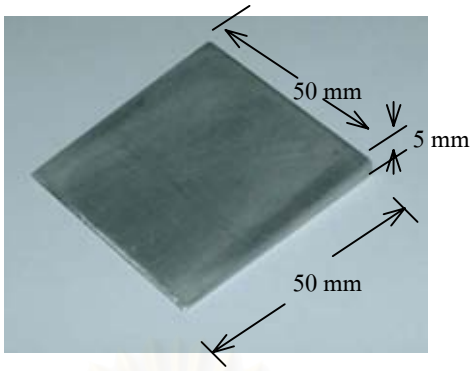
การทำงานของวงจรรูปที่ 3.5 คือ ขณะที่เครื่องมือวัดพร้อมทำงานตำแหน่งสวิทช์จะอยู่ที่ ตำแหน่งเริ่มต้น (Home) โดยมีสวิทช์ตำแหน่งเริ่มต้น (Limit switch home) จะถูกกดเพื่อต่อวงจร ทำให้มีแรงดัน 12 โวลต์ เข้าสู่ รีเลย์ 1 (Relay 1) หน้าสัมผัสของรีเลย์ 1 จะอยู่ที่ตำแหน่ง NO ซึ่งในขณะที่มอเตอร์จะยังไม่หมุนเนื่องจาก D12 (SCR) ยังไม่ทำงาน ต้องรอให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C21 เท่ากับแรงดันทริกที่ตั้งไว้ คือ เท่ากับ 350 มิลลิโวลต์ แรงดันทริกนี้เกิดขึ้นเมื่อโฟโตไดโอดได้รับรังสีเอกซ์จะเกิดแสงขึ้นและแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าขึ้นผ่านไปที่ D11 ปริมาณประจุที่สะสมบน C21 จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมบน C21 เพิ่มขึ้น เมื่อมากกว่า 350 มิลลิโวลต์ U7 ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันจะเปลี่ยนสภาวะทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำงาน Q2 จะนำกระแสทำให้อินพุตของ U8 มีสถานะต่ำ (Low) ทำให้เอาต์พุตของ U8 มีสถานะสูง (High) คือมีค่าประมาณ 5 โวลต์ แรงดัน 5 โวลต์นี้จะผ่านหน้าสัมผัส NO ของรีเลย์ 1 ผ่าน R18 เข้าไปกระตุ้นให้ SCR ทำงาน แรงดัน 5 โวลต์ อีกส่วนจะผ่าน R17 ไปทำให้ Q3 ทำงาน เมื่อ SCR และ Q3 ทำงาน จะทำให้รีเลย์ 2 (Relay 2) ทำงาน ซึ่งหน้าสัมผัสของรีเลย์ 2 จะเปลี่ยนไปที่ NO นั่นคือ ขาบวกของ U9 จะได้รับแรงดัน +12 โวลต์ และเอาต์พุตของ U9 จะมีแรงดัน +12 โวลต์ เช่นกัน จะทำให้มอเตอร์หมุนทำให้สายพานที่มีลิ่มอะลูมิเนียมวางอยู่เคลื่อนที่ผ่านลำรังสีเอกซ์

เมื่อลิ่มอะลูมิเนียมเคลื่อนที่มาจนสวิทช์ตำแหน่งกลับถูกกด (Limit switch back) ทำให้หน้าสัมผัสเปิด เป็นผลไม่มีแรงดัน +12 โวลต์ ไปเลี้ยงรีเลย์ 2 ทำให้หน้าสัมผัสเปลี่ยนเป็น NC ขาบวกของ U9 จะได้รับแรงดัน -12 โวลต์ ทำให้เอาต์พุตของ U9 มีแรงดัน -12 โวลต์ เช่นกัน มอเตอร์จะหมุนไปทางขวา เมื่อหมุนมาทางขวาเรื่อยๆ จนมากดสวิตช์ เริ่มต้น (Limit switch home) ทำให้หน้าสัมผัสถึงกัน มีแรงดัน +12 โวลต์ ไปเลี้ยงรีเลย์ 1 หน้าสัมผัสของรีเลย์ 1 จะเป็น NO ทำให้ขาบวกของ U9 ต่อกับกราวนด์ (GND) เอาต์พุตของ U9 จะไม่มีแรงดันออกมา จ่ายให้มอเตอร์ มอเตอร์จึงหยุดอยู่กับที่และรอสัญญาณครั้งใหม่มาทริกให้ทำงาน

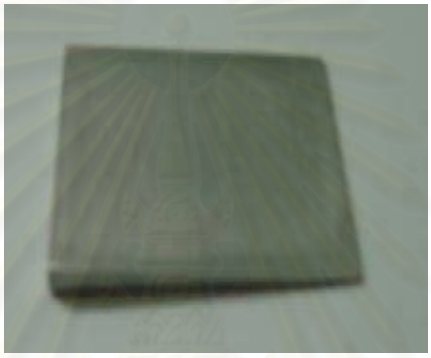
3.2.4 การออกแบบลิ่มอะลูมิเนียมและถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียม

ก. ลิ่มอะลูมิเนียม

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบลิ่มที่มีความยาว 50 มม. กว้าง 50 มม. และหนา 5 มม. ดังรูปที่ 3.6



ก. ด้านบน



ข. ด้านข้าง

รูปที่ 3.6 ลิ่มอะลูมิเนียมที่ออกแบบขึ้นสำหรับใช้ในการวิจัย

- การคำนวณหาความหนาของอะลูมิเนียม

เมื่อทำการทดสอบวงจรที่ต่อเชื่อมกับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ แล้วทำการวัดในเวลาที่ฉายรังสีเอกซ์ 0.6 วินาที จะได้จำนวนข้อมูลประมาณ 20 ข้อมูล ตลอดความยาวที่ผ่านลิ่มอะลูมิเนียมซึ่งมีความยาว 50 มิลลิเมตร สามารถนำมาคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของลิ่มอะลูมิเนียมได้ดังนี้

จากสมการหาความเร็วในการเคลื่อนที่ $v = \frac{s}{t}$ .....(3.1)

และอัตราเร็วในการเก็บข้อมูล (Sampling rate) เท่ากับ 30 มิลลิวินาที หรือ 0.03 วินาที

จากสมการที่ 3.1 จะได้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลิ่มเท่ากับ

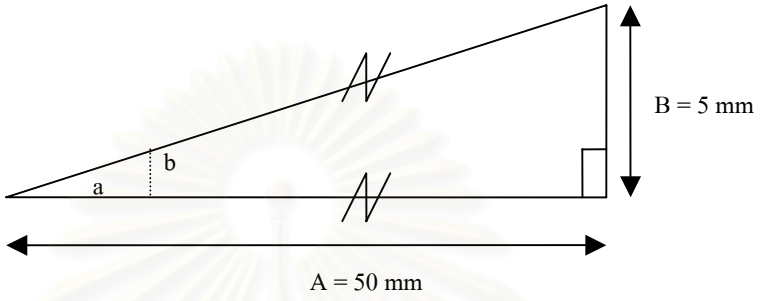
$$v = \frac{50}{(20 \times 0.03)} = 83.33 \text{ มิลลิเมตร/วินาที (mm/sec)}$$

ในเวลา 0.03 วินาที ลิ่มจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางเท่ากับ

$s = v \times t = 83.33 \times 0.03$

$s = 2.4999$ มิลลิเมตร หรือ ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร

ดังนั้น จะสามารถหาความหนาของอะลูมิเนียมที่สอดคล้องกับตำแหน่งการเก็บข้อมูลที่เวลา 0.03 วินาที ได้ โดยใช้การคำนวณแบบสามเหลี่ยมคล้าย คือ



$$\frac{B}{A} = \frac{b}{a} \quad \text{.....(3.2)}$$

จากสมการที่ 3.2 และระยะทางที่ลิ่มเคลื่อนที่ไป 0.03 วินาที จะได้

$$\frac{5}{50} = \frac{b}{2.4999}$$

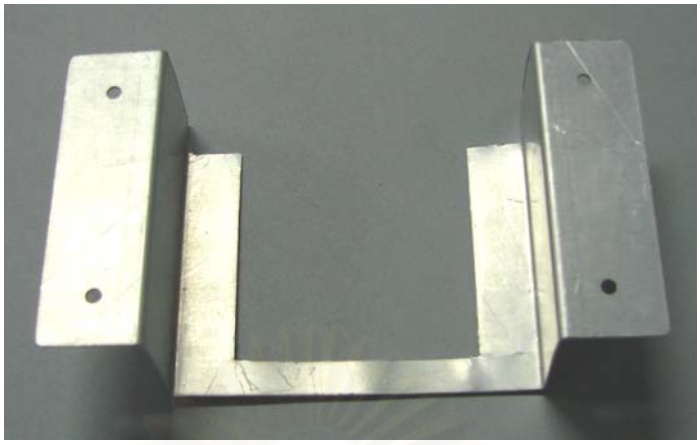
$$b = \frac{5}{50} \times 2.4999 = 0.24999 \text{ มิลลิเมตร}$$

หรือ b มีค่าประมาณ 0.25 มิลลิเมตร

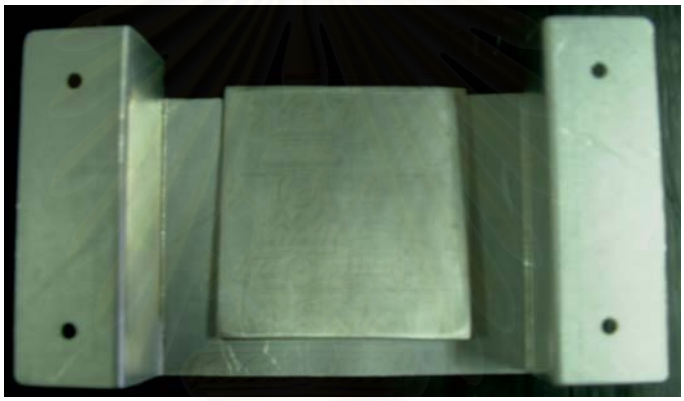
นั่นคือ ในเวลา 0.03 วินาที ลิ่มจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะสอดคล้องกับความหนาของลิ่มอะลูมิเนียมประมาณ 0.25 มิลลิเมตร สำหรับที่เวลาอื่น ๆ ก็สามารถคำนวณความหนาอะลูมิเนียมได้ทำนองเดียวกัน

ข. ถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียม

ออกแบบถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียมโดยทำจากอะลูมิเนียมเช่นกันเพื่อวางให้ได้ระยะใกล้หัววัดรังสีมากที่สุด ดังรูปที่ 3.7 ถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียมจะนำไปประกอบกับระบบขับเคลื่อนด้วยสายพาน ให้เคลื่อนบนรางสายพานระหว่างจุดเริ่มต้น (home point) และ moving slide



รูปที่ 3.7 ถาดยึดลิ่มอะลูมิเนียม

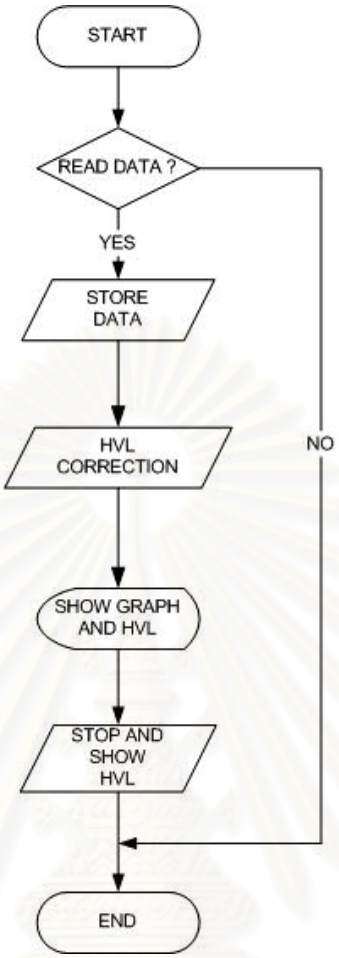


รูปที่ 3.8 ลิ่มอะลูมิเนียมและถาดยึดวางเข้าด้วยกัน

3.2.5 การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการทำงานร่วมกับเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อทำงานร่วมกับเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น จะใช้โปรแกรมภาษา Visual basic 6.0 มีโฟล์วชาร์ตการทำงานดังรูปที่ 3.9 ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ค และรูปแบบโปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 3.10 และ 3.11

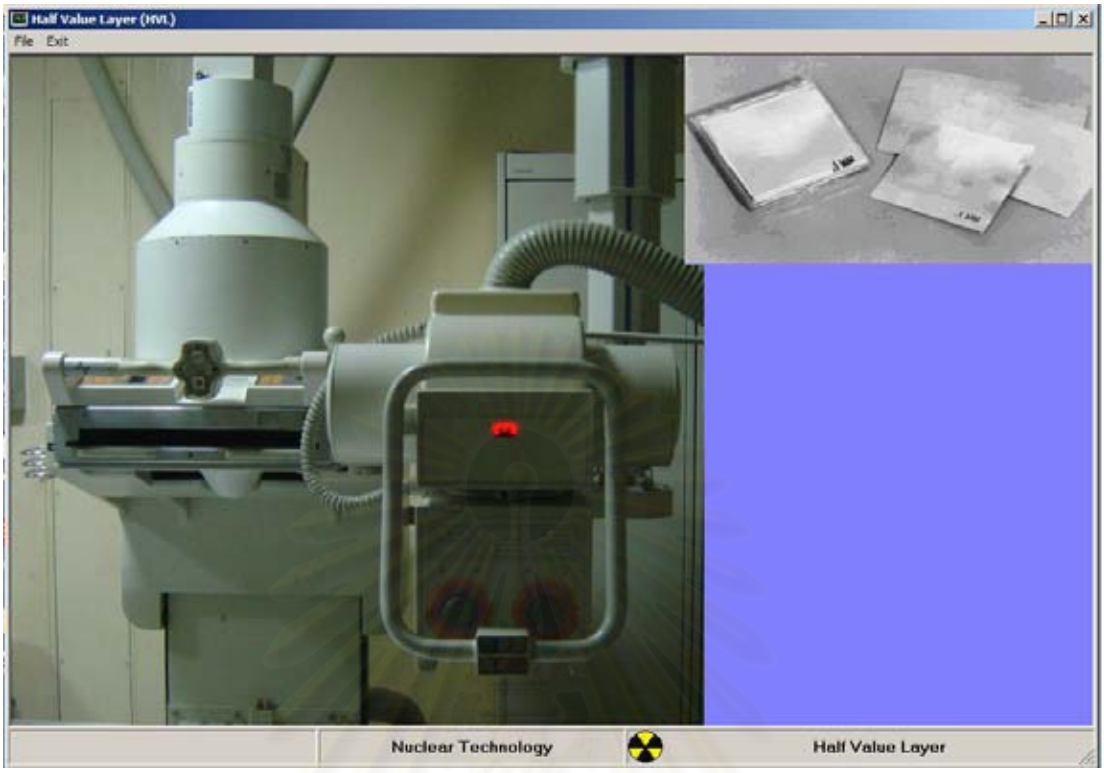
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



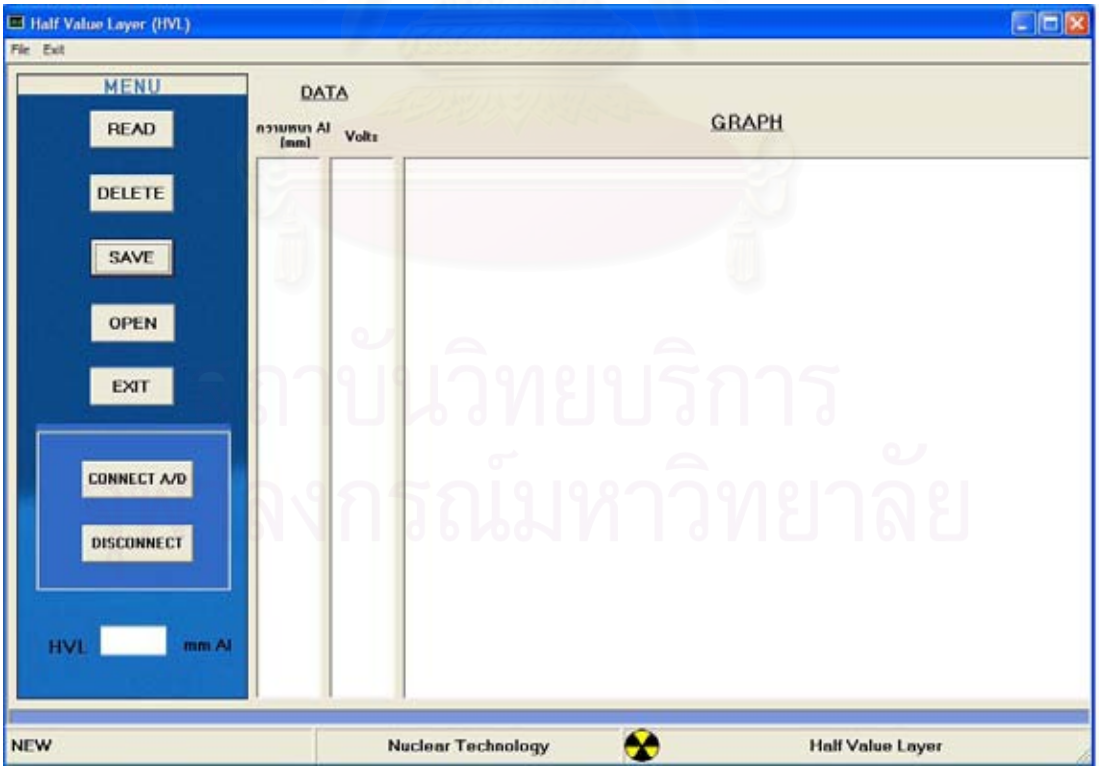
รูปที่ 3.9 โฟล์วชาร์ต (Flow Chart) การทำงานของโปรแกรมวัดค่า HVL

การทำงานตามโฟล์วชาร์ตดังรูปที่ 3.9 มีการทำงานต่อไปนี้ เมื่อเริ่มต้นโปรแกรมการวัดค่า HVL หากทำการกดปุ่มคำสั่งอ่าน (READ) ค่าสัญญาณข้อมูลแล้วทำการฉายรังสี หัววัดรังสีจะวัดค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งข้อมูลเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้ แล้วแสดงค่าเป็นกราฟข้อมูล เมื่อหมดเวลาในการฉายรังสีเอกซ์และไม่มีสัญญาณโปรแกรมจะแสดงค่า HVL ที่คำนวณได้จากข้อมูลทั้งหมด ในกรณีที่ไม่มีการกดปุ่มคำสั่งอ่านค่าสัญญาณ การทำงานของโปรแกรมจะไม่ผ่านขั้นตอนตามโฟล์วชาร์ต

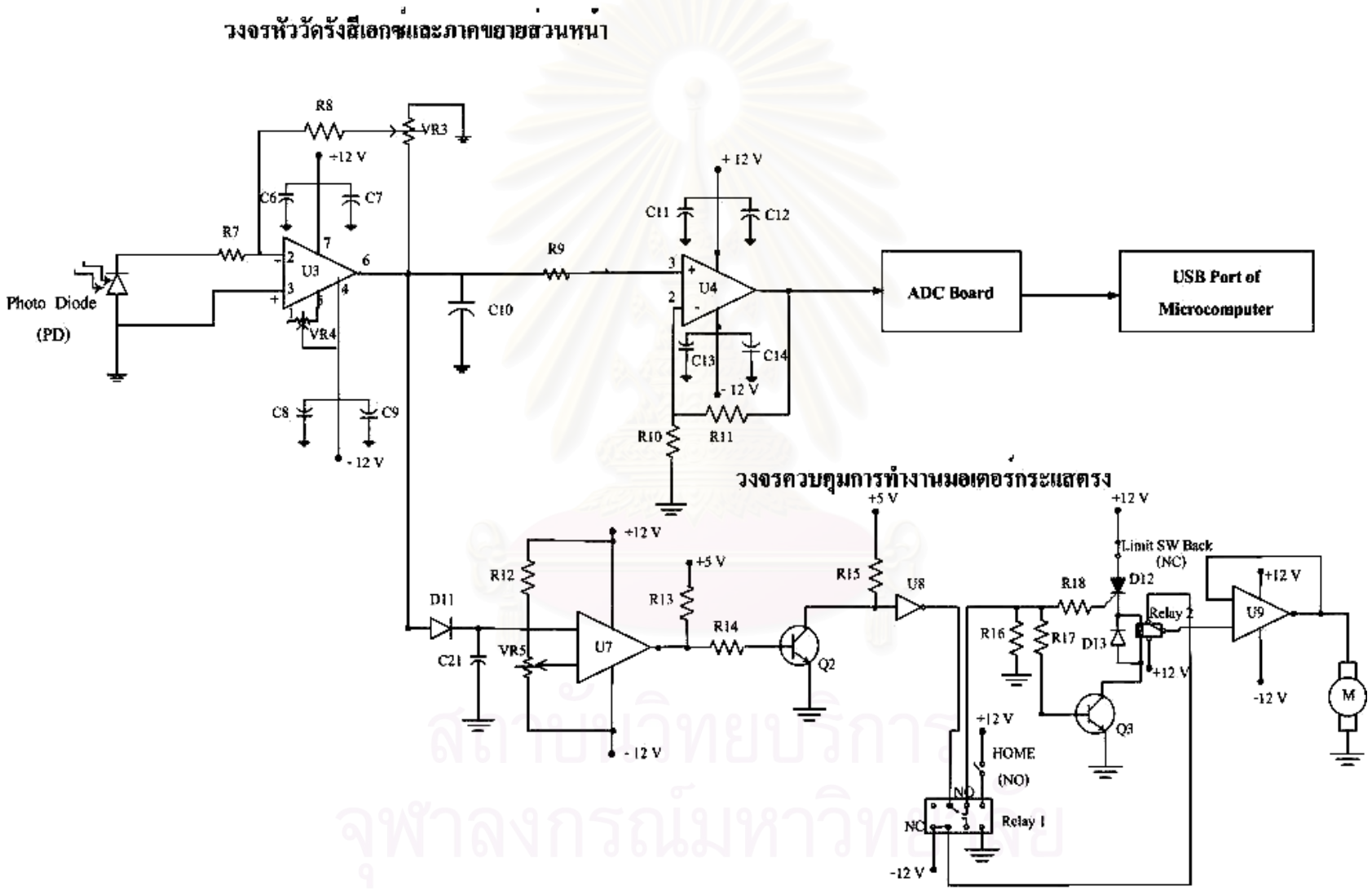
การแสดงค่า HVL ที่ได้จะใช้สมการที่ได้จากการ fit curve[17] และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient determination : R^2)[18] ร่วมด้วย จากนั้นจะใช้สมการสอบเทียบมาคำนวณเพื่อแก้ค่า HVL ที่ถูกต้อง



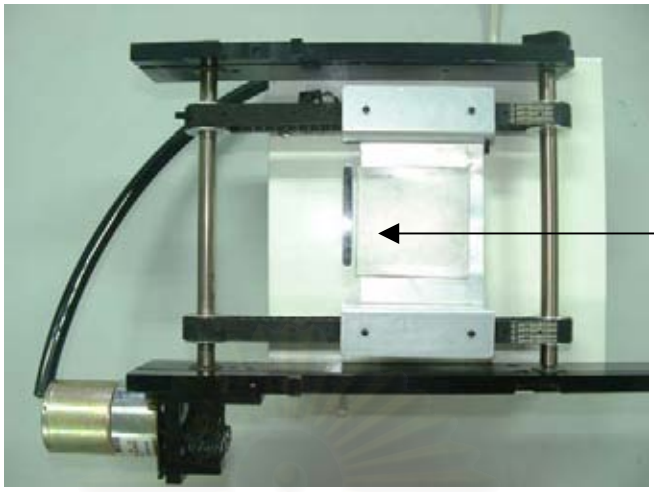
รูปที่ 3.10 แสดงภาพโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเปิดโปรแกรม



รูปที่ 3.11 หน้าโปรแกรมอ่านข้อมูล, บันทึกข้อมูล, แสดงกราฟและค่า HVL



รูปที่ 3.12 วงจรรวมของเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัย



ก. ด้านบนของเครื่อง

ข. ด้านข้างที่มีส่วนเชื่อมต่อกับบอร์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ค. แสดงสวิตช์ เปิด/ปิด ของเครื่อง

รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

รูปที่ 3.14 แสดงการต่ออุปกรณ์วัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 3.15 แสดงแผ่นวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลโดยบรรจุลงในกล่องเหล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

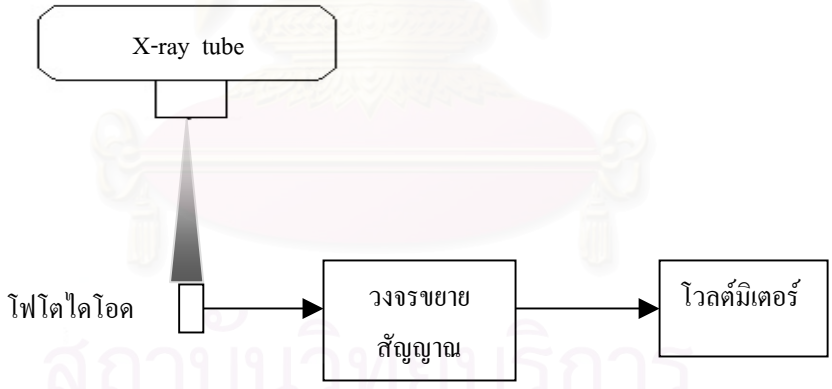
การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

การทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ภายในเครื่องวัดค่า HVL สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียวที่ได้พัฒนาขึ้นมีต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรวัดความเข้มรังสีเอกซ์และภาคขยายสัญญาณ

การทดสอบการทำงานของวงจรโดยใช้โฟโตไดโอด ดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำไปวัดความเข้มรังสีเอกซ์ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ระบบ 1 phase full wave โดยตั้งค่าความต่างศักย์หลอดเท่ากับ 80 kV ค่ากระแสหลอดเท่ากับ 100 mA และ ค่าเวลาในการฉายรังสีเท่ากับ 0.2 sec จะได้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณจากหัววัดรังสี

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า OUTPUT เมื่อวัดความเข้มรังสีเอกซ์ไม่ผ่านและผ่านแผ่น Al ที่ความหนาต่าง ๆ ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์

ความหนา Al (mm)	OUTPUT (Volt)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0.31	0.33	0.32	0.32 ± 0.01
1	0.29	0.28	0.26	0.28 ± 0.02
2	0.25	0.21	0.24	0.23 ± 0.02
3	0.19	0.18	0.20	0.19 ± 0.01
4	0.07	0.08	0.08	0.08 ± 0.01

เนื่องจากสัญญาณทางไฟฟ้าของความเข้มรังสีเอกซ์ที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ต้องเพิ่มอัตราขยาย (Gain) สัญญาณโดยเพิ่มเป็น 100 เท่าของสัญญาณที่ได้รับ (input) และนำไปวัดกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์เครื่องเดิม จะได้ค่าดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า OUTPUT เมื่อวัดความเข้มรังสีเอกซ์ไม่ผ่านและผ่านแผ่น Al ที่ความหนาต่าง ๆ ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ เมื่อเพิ่มอัตราการขยายเป็น 100 เท่า

ความหนา Al (mm)	OUTPUT (Volt)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย
0	3.21	3.20	3.25	3.22 ± 0.03
1	2.75	2.81	2.79	2.78 ± 0.03
2	2.02	2.03	2.05	2.03 ± 0.03
3	1.56	1.54	1.52	1.54 ± 0.02
4	0.98	0.96	0.99	0.98 ± 0.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การสอบเทียบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

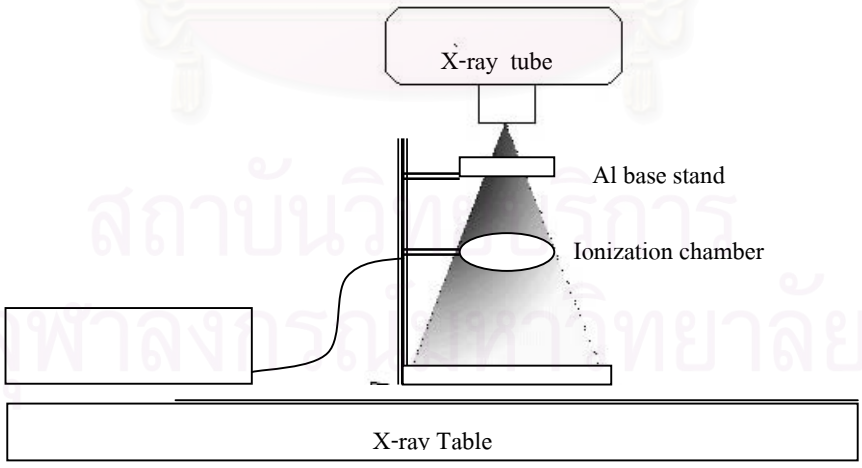
เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น ก่อนนำไปใช้งานจะต้องทำการปรับแต่ง, สอบเทียบ และ ทดสอบสมรรถนะ

4.2.1 อุปกรณ์ในการสอบเทียบ

1. เครื่องวัดความเข้มรังสีเอกซ์ (Dosimeter readout) ยี่ห้อ Keithley รุ่น 35050A หมายเลขเครื่อง 72883 ซึ่งหัววัดรังสีเป็นชนิด Ionization Chamber
2. เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Toshiba รุ่น KXO-15E ระบบ 1 phase full wave
3. แผ่นกรองรังสีเอกซ์ทำจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.9 % ชนิด 1100 เป็นชนิดที่ NCRP ใช้ ที่มีความหนา 0.5 – 4.5 มม.

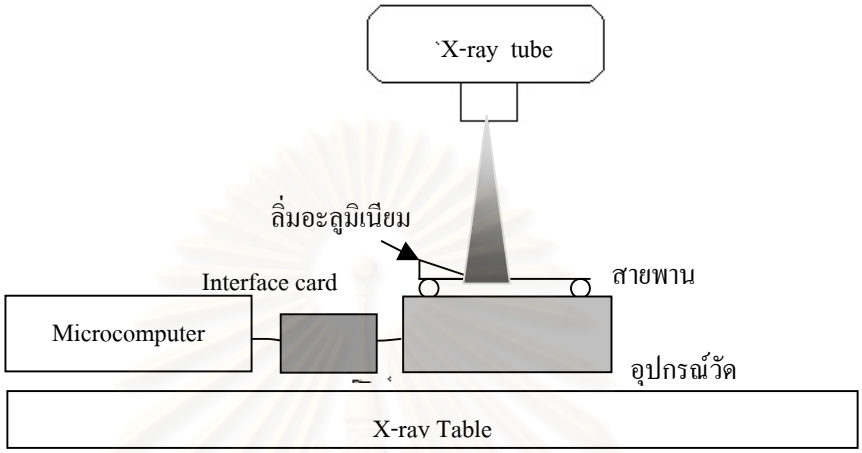
4.2.2 การจัดอุปกรณ์

การจัดอุปกรณ์หัววัดรังสีเอกซ์ (Ionization chamber) เพื่อวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ในการสอบเทียบ ดังรูป 4.2 โดยจัดระยะระหว่างจุดโฟกัสของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ถึง Ionization chamber เท่ากับ 50 เซนติเมตร และจำกัดลำรังสีเอกซ์ให้พอดีกับ Ionization chamber เพื่อให้มีรังสีกระเจิง (Scattering radiation) เข้าสู่หัววัดน้อยลง



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดอุปกรณ์วัดค่า HVL ในการสอบเทียบ

เมื่อเปรียบการจัดอุปกรณ์สำหรับเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley กับเครื่องวัดค่า HVLที่พัฒนาขึ้น โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการจัดอุปกรณ์เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 4.3 แสดงการจัดอุปกรณ์เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น โดยจัดระยะระหว่างจุดโฟกัสของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ถึงหัววัดเท่ากับ 50 เซนติเมตร และจำกัดลำรังสีให้พอดีกับขนาดของหัววัดรังสี

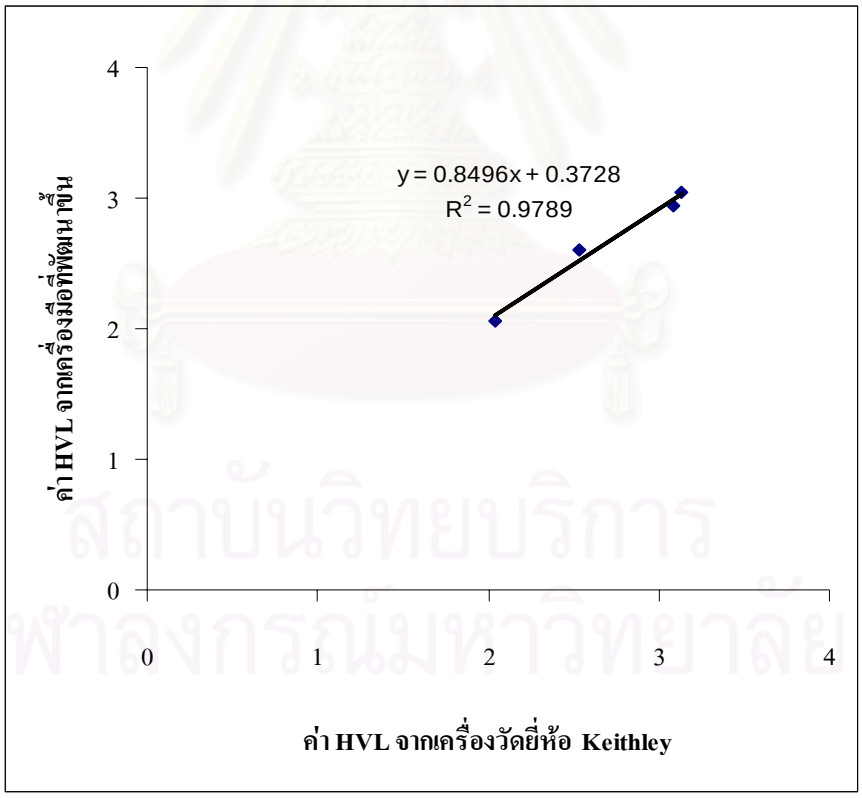
ทำการวัดค่า HVL โดยเครื่องมือวัดยี่ห้อ Keithley ที่ 60 kV, 70 kV, 80 kV และ 90 kV ร่วมกับอะลูมิเนียมมาตรฐาน และเปลี่ยนความหนาอะลูมิเนียมตั้งแต่ 0.5 – 4.5 มิลลิเมตร ทุก ๆ ค่าความต่างศักย์ แล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อหาค่า HVL และเมื่อใช้เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นวัดค่า HVL โดยใช้เทคนิคเดียวกันที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งทำการวัด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

จากค่า HVL ที่ได้จากเครื่องมือวัดยี่ห้อ Keithley และค่า HVL จากเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น นำค่าเฉลี่ยของ HVL มาหาค่าความแตกต่างระหว่างค่า HVL ที่วัดจากเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley และ ค่า HVL ที่ได้จากเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น ดัง ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงการสอบเทียบค่า HVL ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ระหว่างเครื่องมือวัดรังสีย่ีห้อ Keithley และเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

ค่าความต่างศักย์ (kVp)	ค่า HVL (mm Al)		
	เครื่องวัด Keithley	เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น	ค่าความแตกต่าง (Difference)
60	2.04	2.06	-0.02
70	2.53	2.61	-0.08
80	3.08	2.91	-0.17
90	3.13	3.04	+0.09

จากตารางที่ 4.3 นำค่า HVL มาหาความสัมพันธ์ความเป็นเชิงเส้น เพื่อสร้างกราฟสอบเทียบ ดังกราฟที่แสดงดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟสอบเทียบค่า HVL ระหว่างเครื่องมือวัดรังสีย่ีห้อ Keithley และเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

สามารถนำสมการเส้นตรงจากกราฟสอบเทียบมาคำนวณหาค่า HVL ที่ถูกต้องจากรูปที่ 4.4 จะได้กราฟสมการการสอบเทียบคือ

$$y = 0.8496x + 0.3728 \text{ ……..(4.1)}$$

ทำการทดสอบเครื่องผลิตรังสีเอกซ์แบบทั่วไป (General x-ray machine) โดยตั้งค่าความต่างศักย์หลอดผลิตรังสีเอกซ์ที่ 70 kV ค่ากระแสหลอด 100 mA และค่าเวลาที่ทำการฉายรังสีเอกซ์ 0.6 วินาที จะได้ผลการทดสอบแสดงที่หน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่า HVL ได้เท่ากับ 2.26 mm Al เมื่อนำค่า HVL ที่ได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาปรับเทียบกับเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley โดยกราฟปรับเทียบค่า HVL ทำได้ดังนี้

จากสมการ 4.1 และค่า HVL จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น $y = 2.26$ mm Al

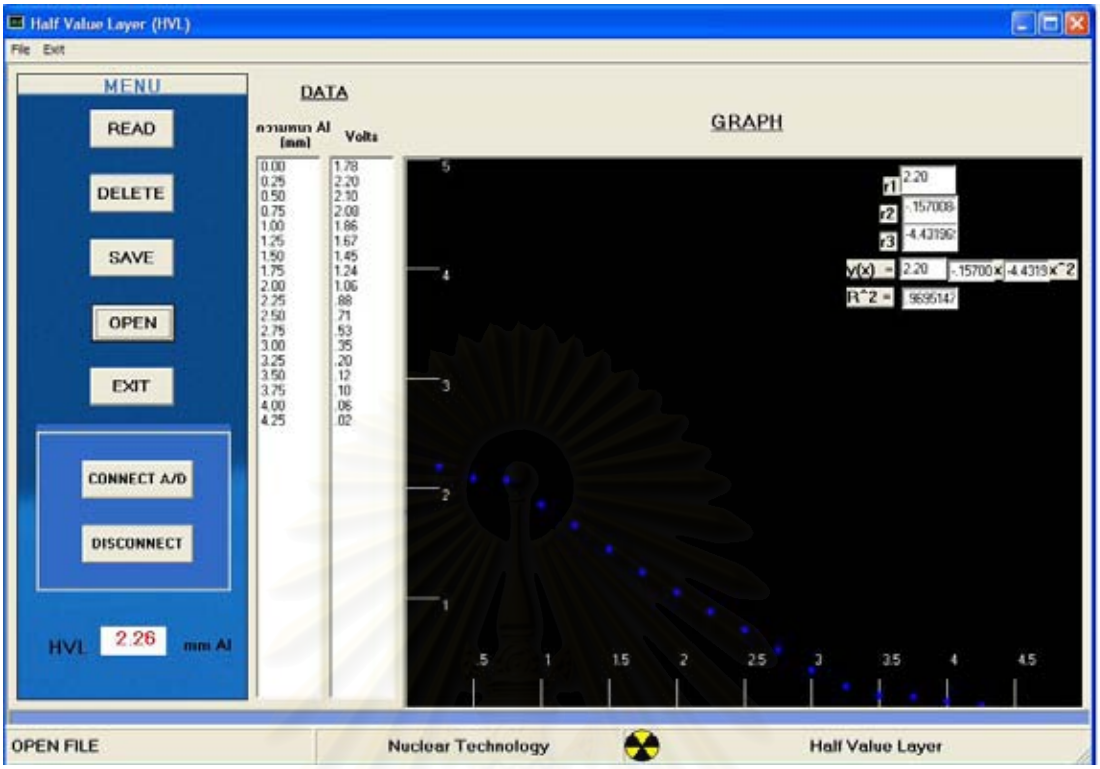
$$x = \frac{2.26 - 0.3728}{0.8496} = 2.22 \text{ mm Al}$$

ค่า HVL ที่วัดได้จากเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley มีค่า 2.22 mm Al

4.2.3 การทดสอบการวัดค่า HVL ของเครื่องผลิตรังสีเอกซ์

ทำการทดสอบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นโดยทำการวัดค่า HVL เปรียบเทียบกับค่า HVL ที่วัดได้จากเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley โดยทำการวัดจากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์จำนวน 6 เครื่อง ดังผลแสดงในตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 การแสดงผลบนหน้าจอไมโครคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมวัดค่า HVL

สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความต่างระหว่างค่า HVL ของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นเมื่อสอบเทียบกับเครื่องมือวัดรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Keithley จากห้องปฏิบัติการรังสีทุติยภูมิได้ดังนี้

จากค่า HVL ที่ได้จากเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น ได้เท่ากับ 2.26 mm Al

ค่า HVL ที่ได้จากเครื่องมือยี่ห้อ Keithley โดยทำการสอบเทียบได้เท่ากับ 2.22 mm Al

$$\text{ความแตกต่าง} = \frac{2.26 - 2.22}{2.22} = 0.018$$

และได้ทำการทดสอบกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์เครื่องอื่น ๆ ที่แต่ละค่าความต่างศักย์หลอดผลิตรังสีเอกซ์ และค่ากระแสหลอดผลิตรังสีเอกซ์ จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์อื่น ๆ

ชื่อเครื่องผลิตรังสีเอกซ์	ค่าเทคนิคที่ใช้	ค่า HVL (mm Al)		ค่าความแตกต่าง (Difference)
		เครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	เครื่อง Keithley	
TOSHIBA รุ่น KXO-15R	60 kV 100 mA	2.05	2.01	-0.04
	70 kV 100 mA	2.71	2.65	-0.06
	80 kV 100 mA	2.95	2.90	-0.05
	90 kV 100 mA	3.12	3.01	-0.11
PHILIPS รุ่น OPTIMUS	60 kV 100 mA	1.75	1.61	-0.14
	70 kV 100 mA	2.07	2.01	-0.06
	80 kV 100 mA	2.35	2.29	-0.06
	90 kV 100 mA	3.09	3.06	-0.06
SHIMADZU รุ่น UD 150 L	60 kV 100 mA	2.00	1.95	-0.05
	70 kV 100 mA	2.26	2.20	-0.06
	80 kV 100 mA	2.61	2.55	-0.06
	90 kV 100 mA	2.85	2.81	+0.04
KELEX รุ่น MD3125	60 kV 100 mA	2.04	1.97	-0.04
	70 kV 100 mA	2.17	2.22	+0.05
	80 kV 100 mA	2.23	3.03	+0.80
	90 kV 100 mA	2.81	2.77	-0.05
SHIMADZU รุ่น UD150L-30F	60 kV 100 mA	2.00	1.94	-0.06
	70 kV 100 mA	2.31	2.26	-0.05
	80 kV 100 mA	2.52	2.57	-0.05
	90 kV 100 mA	2.75	2.67	-0.08
SHIMADZU รุ่น XUD150L-30F	60 kV 100 mA	2.00	1.96	-0.04
	70 kV 100 mA	2.26	2.17	-0.09
	80 kV 100 mA	2.61	2.58	-0.03
	90 kV 100 mA	2.81	2.76	-0.05

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาเครื่องวัดค่า HVL สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว มีผลสรุปของการวิจัยดังนี้

5.1.1 จากการสอบเทียบค่า HVL ที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นกับค่า HVL ที่วัดได้จากอุปกรณ์มาตรฐานของกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ได้ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงตามสมการ

$$HVL_{measure} = 0.8496 \times HVL_{STD} + 0.3728$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ $R^2 = 0.9789$

ซึ่งในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้ใช้ความสัมพันธ์นี้ในการคำนวณเพื่อปรับแก้ค่า HVL ที่วัดได้ให้มีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.1.2 จากการทดลองวัดค่า HVL โดยใช้เครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ใช้งานตามสถานที่ต่าง ๆ จำนวน 6 เครื่อง ทำการวัดที่ค่าความต่างศักย์หลอดผลิตรังสีเอกซ์ 60 kV, 70 kV, 80 kV และ 90 kV ที่ระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ถึงหัววัดรังสีเท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยทำการฉายรังสีครั้งเดียวผ่านลิ่มอะลูมิเนียมที่มีความหนาต่อเนื่อง 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร ในช่วงเอกซ์โพเชอร์ไม่เกิน 50 mAs ซึ่งความแตกต่างระหว่างค่า HVL ที่วัดได้จากเครื่องวัดยี่ห้อ Keithley และเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้นอยู่ในช่วง -0.14 ถึง +0.80

5.2 ลักษณะพิกัดของเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

5.2.1 ใช้หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดโฟโตไดโอดที่เคลือบด้วยซินทิลเลเตอร์ ที่มีขนาด 4.0 มม. × 8.0 มม. × 44.0 มม. สามารถวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์ ได้ในช่วง 0.5 – 5.0 mm Al และใช้วัดรังสีเอกซ์ได้ที่ค่าความต่างศักย์หลอดผลิตรังสีเอกซ์ 60 – 90 kV ที่ระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ถึงหัววัดรังสีเท่ากับ 50 เซนติเมตร และเอกซ์โพเชอร์ไม่เกิน 50 mAs โดยใช้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์ไม่น้อยกว่า 0.6 วินาที และใช้ขนาดลำรังสีเอกซ์ (field size) ขนาดไม่น้อยกว่า 10 มม. × 50 มม.

5.2.2 ใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 220 โวลต์ โดยสามารถใช้ร่วมกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีพอร์ต USB ทั่วไปได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัยมีความเร็วค่อนข้างต่ำ โดยใช้เวลาในการสุ่มข้อมูล (sampling) และประมวลผลเท่ากับ 30 มิลลิวินาที ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนไปใช้วงจรแปลงสัญญาณที่มีความเร็วมากขึ้นจะทำให้ได้จำนวนข้อมูลจากการวัดในแต่ละครั้งมากขึ้นทำให้ค่า HVL ที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. The International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. New York, 1990.

2. Food and Drugs, Code of Federal Regulations No.21 Part 800-1299. Washington, 1991.

3. National Council on Radiation Protection and Measurements. Quality Assurance for Diagnostic Imaging Equipment, NCRP Report No.99. 1988.

4. ข้อกำหนดด้านมาตรฐานเครื่องเอกซเรย์. กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2544.

5. สาโรช ปริยะวาที. การพัฒนาเครื่องวัดค่ากิโลโวลต์พีกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องเอกซเรย์วินิจฉัย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.

6. สาโรช ปริยะวาที. การพัฒนาเครื่องวัดค่าเวลาในการฉายรังสีเอกซ์วินิจฉัยแบบอิเล็กทรอนิกส์. ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ สงขลา. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2540.

7. Annual EMBS International Conference, Chicago. 22nd edition. July 23-28, 2000.

8. วันนพ สุนันท์รุ่งอังคณา. การจัดวางระยะของแผ่นอะลูมิเนียมในการวัดค่าความหนาครึ่งค่าของเครื่องเอกซเรย์. ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ชลบุรี. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2548.

9. ปรีชา เติมจิตรอารีย์. เอ๊กซเรย์เทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ, 2528.

10. Thomas S. Curry III, James E. Dowdey and Robert C. Murry, Jr. Introduction to the Physics of Diagnostic Radiology. 3rd edition. Philadelphia.

11. Quality Assurance for Diagnostic Imaging Equipment. National Council on Radiation Protection and Measurements, 1988.

12. จิตต์ชัย สุริยะไชยากร และคณะ. การควบคุมคุณภาพของภาพเอกซเรย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : พี.เอ.ลีฟ วิ่ง, 2538.

13. Quality Assurance in Diagnostic Imaging and Radiation Safety in Medicine. Division of Radiation and Medical Devices, Medical of Science, Ministry of Public Health. 2001.

14. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2538.

15. ดุสิต เครืองาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ, 2542.

16. ลภน สุภาพ และคณะ. เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ต USB ขั้นพื้นฐาน. กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์.

17. รสสุคนธ์ หังสพฤกษ์. การคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์เบื้องต้น. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ, 2535.

18. http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determiantion

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ค่า HVL มาตรฐานที่พลังงานรังสีเอกซ์ต่าง ๆ[3]

ตารางที่ 1 Minimum HVL requirement for dental and other x-ray units

Designed operating potential (kVp)	Measured operating potential (kVp)	Minimum HVL (mm AL)	
		Dental	Other X-ray systems
Below 50 kVp	30	1.5	0.3
	40	1.5	0.4
	50	1.5	0.5
51 to 70	51	1.5	1.2
	60	1.5	1.3
	70	1.5	1.5
Above 70	71	2.1	2.1
	80	2.3	2.3
	90	2.5	2.5
	100	2.7	2.7
	110	3.0	3.0
	120	3.2	3.2
	130	3.5	3.5
	140	3.8	3.8
	150	4.1	4.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ค่า HVL และ total filtration สำหรับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ระบบ constant potential wave form และมุมเป้าแอโนด 17°

Total filtration (mm)	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
kVp	HVL in mm of Aluminum				
50	1.29	1.52	1.72		
60	1.52	1.80	2.03		
70	1.73	207	2.34		
80	-	2.38	2.70	3.00	
90	-	2.73	3.05	3.30	
100	-	3.09	3.44	3.82	4.38
110	-	-	3.83	4.22	4.84
120	-	-	4.22	4.61	5.31
140	-	-	5.08	5.47	6.17

ตารางที่ 3 ค่า HVL และ total filtration สำหรับเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ระบบ constant potential waveform และมุมเป้าแอโนด 10° และ 20°

kV	Total filtration mm of Al	Target angel 10° (HVL in mm of Al)	20°
60	1.5	1.72	1.45
100	2.5	3.98	3.20
140	2.5	5.94	4.69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 Limits for total filtration at different operating x-ray tube potentials

Operating tube Potential (kVp)	Minimum total aluminum Filter thickness (mm) (Inherent plus added)
Below 51	0.5
51 to 70	1.5
Above 70	2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อสอบเทียบเครื่องวัดค่า HVL ที่พัฒนาขึ้น

ในการวัดค่า HVL จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจะได้กราฟระหว่างค่าความหนาของอะลูมิเนียมและค่าสัญญาณทางไฟฟ้าเนื่องจากความเข้มรังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นแบบโพลิโนเมียล เพื่อให้สามารถหาค่า HVL ได้อย่างถูกต้องแม่นยำต้องนำไมโครคอมพิวเตอร์วิเคราะห์หาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมระหว่างค่าความหนาของอะลูมิเนียมและค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้

เมื่อกำหนดจุดข้อมูล $P_i(x,y)$ โดยที่ x แทนค่าความหนาของอะลูมิเนียม และ y แทนค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ ในการวัดจะได้จุดข้อมูลจำนวน 20 จุด ดังนั้นการหาสมการแสดงความสัมพันธ์ y = g(x) ถ้ามีจำนวนจุดข้อมูลมากพอสามารถทำนายรูปร่างของฟังก์ชันทำนาย (guess function)[17] g(x) จะแสดงความสัมพันธ์ของ x และ y ซึ่งอยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง สามารถเขียนในรูปของ Normal Equations ได้เป็น

$$g_n(x) = r_1 + r_2x + r_3x^2 = \sum_{j=1}^{n} r_j x^{j-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

และสามารถเขียน Normal Equations ในรูปเมตริกซ์ คือ

$$A_{n\times n}\, r_{n\times n} = b_{n\times 1}$$

$$\begin{bmatrix} m & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix}$$

เมื่อ m คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด

ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูป $r_1 = A^{-1}b$ จากนั้นหาสมการโพลิโนเมียลที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ r_1, r_2 และ r_3 ตามสมการที่ 1 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination : R^2)[18] ดังสมการที่ 2 เมื่อค่า R^2เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเป็นการพิจารณาค่าร่วมกับค่าที่ได้จากการเขียนกราฟของการปรับเทียบ ซึ่งจะทำให้คู่ลำดับ $P_i(x,y)$ ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้กราฟปรับเทียบมากที่สุด

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad \text{.....(2)}$$

เมื่อ y_i คือ ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากความเข้มรังสีที่วัดได้ที่พิกัดต่างๆ ของแต่ละช่วงจุด

$\hat{y}_i$ คือ ค่าสัญญาณไฟฟ้าจากความเข้มรังสีที่ได้จากการคำนวณ

$\bar{y}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าจากความเข้มรังสีของแต่ละช่วงจุด

จากค่าสัมประสิทธิ์ที่หาได้แทนในสมการที่ 1 จะสามารถหาค่า HVL ได้ โดยแทนค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้เท่ากับครึ่งหนึ่งของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ในขณะไม่ผ่านความหนาของลิ่มอะลูมิเนียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการทำงานของเครื่องวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

```
################################### Modul1#####################################

Global resp As String
Public Const Strcon = "Provider=Microsoft.Jet.OLEDB.4.0;Persist Security Info=False"
Public NumL1 As Integer
Public IdexL1() As String
Sub main()
  MDIForm1.Show
  MDIForm1.Enabled = True
  Form1.Hide
End Sub

################################## MDI Form 1 ##################################

Private Sub exit_Click()
StatusBar1.Panels(1).Text = "EXIT"
resp = MsgBox("Do you want to exit ?", vbOKCancel, "WARNING !")
  If resp = vbOK Then
     End
   Else: resp = vbCancel
   End If
End Sub

Private Sub MDIForm_Load()
 With MDIForm1
       .Top = 0
       .Left = 0
       .Width = 14300
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
        .Height = 9980
End With
End Sub

Private Sub new_Click()
  Form1.Show
  StatusBar1.Panels(1).Text = "NEW"
End Sub

Private Sub save_Click()
Dim str As String
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim sqlTemp As String
Dim n As Integer
Dim m As Integer
Dim L1 As Integer
Dim L2 As Integer
Dim Ina As String
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "SAVE FILE"
NumL1 = Form1.List1(0).ListCount + 1
ReDim IdexL1(NumL1)
For L1 = 0 To NumL1
  IdexL1(L1) = Form1.List1(0).List(L1)
Next L1
Load SaveFile
SaveFile.Show
End Sub
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

################################## Form 1 ##################################

```
'Option Explicit
Dim x, y As Integer
Dim Wdth, Hight, TopSpace, i, a, count_low As Integer
Dim b, c, tempdata  As Double
Dim datafirst As Boolean
Dim Conn As New ADODB.Connection    ' ตัวแปร Object connection
Dim Rstvb As New ADODB.Recordset      ' ตัวแปร Object Recordset
Dim sqltvb As String ‘ เก็บตัวแปรชุดคำสั่ง sql
Dim ComTVB As New ADODB.Command
Dim Numlist As Integer
Dim max_volt, half_volt, over_volt, over_thick, lower_volt, lower_thick As Double
Private Sub Command1_Click(Index As Integer)
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "READ/STOP"
   If Timer1.Enabled = False Then
        Timer1.Enabled = True
        Command1(4).Caption = "STOP"
        datafirst = True
        count_low = 0
        List1(0).Clear
        List1(1).Clear
    Else
        Timer1.Enabled = False
        Command1(4).Caption = "READ"
        count_low = 0
        List1(0).Clear
        List1(1).Clear
   End If
End Sub
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Private Sub Command2_Click()
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "DELETE"
  resp = MsgBox("Do you want to delete data ?", vbYesNo, "WARNING !")
    If resp = vbYes Then
       List1(0).Clear
       List1(1).Clear
       Numlist = 0
       Call clear_graph
       Text2.Text = ""
     End If
End Sub

Private Sub Command3_Click()
Dim str As String
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim sqlTemp As String
Dim n As Integer
Dim m As Integer
Dim L1 As Integer
Dim L2 As Integer
Dim Ina As String
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "SAVE FILE"
NumL1 = List1(0).ListCount + 1
ReDim IdexL1(NumL1)
For L1 = 0 To NumL1
  IdexL1(L1) = List1(0).List(L1)
Next L1
Load SaveFile
SaveFile.Show
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
End Sub

Private Sub Command4_Click()
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "EXIT"
resp = MsgBox("Do you want to exit ? ", vbOKCancel, "WARNING!")
  If resp = vbOK Then
     End
   Else: resp = vbCancel
   End If
End Sub

Private Sub Command5_Click()
Dim i, n As Integer
Dim fName As String
Dim iFileNum As Integer
Dim DataVar   As String
List1(0).Clear
List1(1).Clear
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "OPEN FILE"
iFileNum = FreeFile
MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "OPEN FILE"
CommonDialog1.Filter = "All Files (*.*)|*.*|Text Files" & _
 "(*.txt)|*.txt"
 ' Specify default filter
 CommonDialog1.FilterIndex = 2
 ' Display the Open dialog box
 CommonDialog1.ShowOpen
fName = CommonDialog1.FileName
Open fName For Input As #iFileNum
i = 0
Do While Not EOF(iFileNum)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
i = i + 1
Line Input #iFileNum, DataVar
List1(0).AddItem DataVar
Loop
Close #iFileNum
List1(1).Clear
n = List1(0).ListCount - 1
For i = 0 To n
    List1(1).AddItem (List2.List(i))
 Next i
 Call graph
 End Sub

Private Sub Command6_Click()
  MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "Connect Card A/D"
  HIDComm1.MatchManufacturer = "Innovative Experiment"
  HIDComm1.MatchProduct = "U-board USB1.0/1.1 Interface"
  HIDComm1.MatchSerial = 0
  HIDComm1.MatchPID = 4095
  HIDComm1.MatchVID = 1240
  HIDComm1.MatchVersion = 256
  HIDComm1.Connect
End Sub

Private Sub Command7_Click()
  MDIForm1.StatusBar1.Panels(1).Text = "Disconnect Card A/D "
  resp = MsgBox("Disconnect  Card A/D ? ", vbYesNo, "WARNING !")
   If resp = vbYes Then
      HIDComm1.Disconnect
   End If
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
 With Form1
   .Top = 0
   .Left = 0
   .Width = 14000
   .Height = 8580
End With
HIDComm1.Browse
    With Conn     'ติดต่อกับฐานข้อมูล
       If .State = adStateOpen Then .Close
       .ConnectionString = Strcon & ";Data Source=C:\ProjectTVB.mdb"
       .ConnectionTimeout = 90
       .Open
    End With
    Numlist = 0
    List1(0).Clear
End Sub

Private Sub HIDComm1_ConnectFailure(ByVal Status As Long)
  MsgBox "Disconnect  Card A/D ", vbOKOnly, "WARNING !"
End Sub

Private Sub HIDComm1_ConnectSuccess(ByVal Status As Long)
 MsgBox "Connect Card A/D success ", vbOKOnly, "WARNING !"
End Sub


Private Sub Timer1_Timer()
Dim x, y As Double
Dim s As String
Dim c As Integer
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Dim buffer() As Byte
 ReDim buffer(0)
 Dim nlist1 As Integer
   HIDComm1.ReportID = 2
   buffer(0) = 4
   HIDComm1.WriteTo buffer, 1
   buffer = HIDComm1.ReadFrom(1)
   If (buffer(0) <> 0) Then
      x = buffer(0)
      y = 5 * x / 255
      s = FormatNumber(y, 2)
      List1(0).AddItem s
      c = List1(0).ListCount
      List1(1).AddItem (List2.List(List1(0).ListCount - 1))
   End If
   Call graph
   nlist1 = List1(1).ListCount
   If nlist1 >= 42 Then
   Timer1.Enabled = False
   Command1(4).Caption = "READ"
   End If
End Sub

Private Sub graph()
Dim x, y, i, j, n, ii, datacount As Integer
Dim zx, zy As String
Dim m As Integer
Dim data, diff, hvl, sumx, sumy, sumxy, sumx2, r1, r2, r3 As Double
Dim datax(20) As Double
Dim datay(20) As Double
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Picture2.BackColor = vbBlack 'Color of Backgroud
Picture2.ForeColor = vbWhite 'Color of Line
Picture2.DrawWidth = 1 'Thick of Line and Scale
Picture2.Scale (0, 5)-(5, 0) 'Draw Scale Y Axis
Picture2.Scale (0, 5)-(5, 0) 'Draw Scale X Axis
Picture2.Line (0, 0)-(5, 0) 'Draw X Axis
Picture2.Line (0, 0)-(0, 5) 'Draw Y Axis
datacount = List1(1).ListCount - 1
  For i = 0 To datacount
    datax(i) = Val(List1(1).List(i))
    datay(i) = Val(List1(0).List(i))
Next i
Text1.Text = sumD(datacount, datax())
Text3.Text = sumD(datacount, datay())
Text4.Text = PowerX(datacount, datax())
Text5.Text = MultiXY(datacount, datax(), datay())
Text6.Text = PowerX3(datacount, datax())
Text7.Text = PowerX4(datacount, datax())
m = List1(0).ListCount
sumx = Val(Text1.Text)
sumy = Val(Text3.Text)
sumx2 = Val(Text4.Text)
sumxy = Val(Text5.Text)
sumx3 = Val(Text6.Text)
sumx4 = Val(Text7.Text)
r1 = (sumy - (sumx * r2) - (sumx2 * r3)) / m '.....(1)
 r2 = (sumxy - (sumx * r1) - (sumx3 * r3)) / sumx2 '.....(2)
 r3 = (sumx2y - (sumx2 * r1) - (sumx3 * r2)) / sumx4 '.....(3)
Text8.Text = str(r1)
Text9.Text = str(r2)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Text10.Text = str(r3)
Text17.Text = str(r1)
Text18.Text = str(r2)
Text19.Text = str(r3)
Text20.Text = AverageY(datacount, datay())
Call YxiF(datacount, datax(), Val(Text17.Text), Val(Text18.Text), Val(Text19.Text))
Text21.Text = PowerR(datacount, datay(), AverageY(datacount, datay()))
'Add numberal on X axis
   For x = 0 To 5 Step 0.5
      Picture2.Line (x, 0.25)-(x, -0.25) 'Lenght of Line scale X
      If x <> 0 Then
        Picture2.CurrentY = 0.5
        Picture2.Print (x)
      End If
   Next x
'Add numberal on Y axis
   For y = 0 To 5
      Picture2.Line (0.25, y)-(-0.25, y) 'Lenght of Line scale Y
      If y <> 0 Then
         Picture2.CurrentX = 0.25
         Picture2.Print (y)
   End If
   Next y
'Plot data
 x = 0
 y = 0
 i = 0
Picture2.CurrentX = 0
Picture2.CurrentY = 0
n = List1(0).ListCount - 1
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
 For i = 0 To n
    zx = List1(1).List(i) '
    zy = List1(0).List(i)
'Plot to Point
  Picture2.PSet (Val(zx), Val(zy)), RGB(0, 0, 255)
  Picture2.DrawWidth = 6
 Next i
' Calculate hvl
 max_volt = 0
 half_volt = 0
 over_volt = 0
 over_thick = 0
 lower_volt = 0
 lower_thick = 0
max_volt = Val(List1(0).List(0))
half_volt = max_volt / 2
For j = 0 To List1(0).ListCount - 1
     data = Val(List1(0).List(j))
     If (data < half_volt) Or (data = half_volt) Then
         lower_volt = Val(data)
         lower_thick = Val(List1(1).List(j))
         over_volt = Val(List1(0).List(j - 1))
         over_thick = Val(List1(1).List(j - 1))
         diff = (half_volt - lower_volt) * 0.116 / (over_volt - lower_volt)
         hvl = diff + lower_thick
         hvl = FormatNumber(hvl, 2)
         Text2.Text = str(hvl)
         Exit Sub
     End If
 Next j
```

```
End Sub
Private Sub clear_graph()
  Dim x, y, i, n As Integer
  Dim zx, zy As String
  List1(0).Clear
  List1(1).Clear
  Picture2.Cls
   Picture2.BackColor = vbBlack 'Color of Backgroud
   Picture2.ForeColor = vbWhite 'Color of Line
   Picture2.DrawWidth = 1 'Thick of Line and Scale
   Picture2.Scale (0, 5)-(5, 0) 'Draw Scale Y Axis
   Picture2.Scale (0, 5)-(5, 0) 'Draw Scale X Axis
   Picture2.Line (0, 0)-(5, 0) 'Draw X Axis
   Picture2.Line (0, 0)-(0, 5) 'Draw Y Axis
   'Add numberal on X axis
   For x = 0 To 5 Step 0.5
      Picture2.Line (x, 0.25)-(x, -0.25) 'Lenght of Line scale X
      If x <> 0 Then
        Picture2.CurrentY = 0.5
        Picture2.Print (x)
      End If
   Next x
   'Add numberal on Y axis
   For y = 0 To 5
      Picture2.Line (0.25, y)-(-0.25, y) 'Lenght of Line scale Y
      If y <> 0 Then
         Picture2.CurrentX = 0.25
         Picture2.Print (y)
   End If
   Next y
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
End Sub
Function sumD(n As Integer, dataxy() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + dataxy(i)
Next i
sumD = sum
End Function
Function AverageY(n As Integer, datay() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + datay(i)
Next i
AverageY = sum / (n + 1)
End Function
Sub YxiF(n As Integer, datax() As Double, r1 As Double, r2 As Double, r3 As Double)
Dim i As Integer
For i = 0 To n
  Yxi(i) = r1 + (r2 * datax(i)) + (r3 * (datax(i) ^ 2))
Next i
End Sub
Function PowerR(n As Integer, datay() As Double, AverY As Double) As Double
Dim i As Integer
Dim Sum1, sum2 As Double
For i = 0 To n
        Sum1 = Sum1 + ((Yxi(i) - AverY)) ^ 2
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
        sum2 = sum2 + ((datay(i) - AverY)) ^ 2
Next i
PowerR = Sum1 / sum2
End Function
Function PowerX(n As Integer, data() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + data(i) ^ 2
Next i
PowerX = sum
End Function
Function MultiXY(n As Integer, datax() As Double, datay() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + (datax(i) * datay(i))
Next i
MultiXY = sum
End Function
Function PowerX3(n As Integer, data() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + data(i) ^ 3
Next i
PowerX3 = sum
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
End Function
Function PowerX4(n As Integer, data() As Double) As Double
Dim sum As Double
Dim i As Integer
sum = 0
For i = 0 To n
  sum = sum + data(i) ^ 4
Next i
PowerX4 = sum
End Function
################################### SaveFile ###################################

Dim SaveStr As String
Dim iFileNume As Integer
Dim Lit1 As String
Dim Lit2 As String

Private Sub CmdCamcel_Click()
Unload SaveFile
SaveFile.Hide
End Sub

Private Sub CmdSave_Click()
If Text1.Text = "" Then
      MsgBox "Can not file name to save ", vbOKOnly + vbCritical, "can not save"
      Text1.SetFocus
End If
SaveStr = Dir1.Path & "\" & Text1.Text & ".txt"
iFileNume = FreeFile
Open SaveStr For Append As #iFileNume
For I1 = 0 To NumL1 - 2
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Lit1 = IdexL1(I1)
Print #iFileNume, ; Lit1
Next I1
Close #iFileNume
Unload Me
End Sub
Private Sub Drive1_Change()
Dir1.Path = Drive1.Drive
End Sub

Private Sub Form_Load()
Text1.Text = ""
Dim I1, I2 As Integer
End Sub
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
รายการอุปกรณ์

สัญลักษณ์	ชนิดอุปกรณ์	รหัสอุปกรณ์และคุณลักษณะ
U1, U3, U4, U9	OPAMP	CA3140E
U2, U7	OPAMP	LM311
U5	REGULATOR	7812
U6	REGULATOR	7912
U8	NOT GATE	7404
Q1	TRANSISTOR	2N3053
Q2, Q3	TRANSISTOR	BC548
D1 – D11	DIODE	1N4007
D12	SCR	
D13	DIODE	1N4002
M	MOTOR	DC 12 V
Z	ZENOR DIODE	4.7 V
R1, R7	RESISTOR	1 M
R2 , R8	RESISTOR	10 M
R11, R16	RESISTOR	10K
R3, R6, R9, R10, R12, R14	RESISTOR	1 K
R4	RESISTOR	0.8 K
R5	RESISTOR	5 K
R13, R15	RESISTOR	4.7 K
R17	RESISTOR	750
R18	RESISTOR	100
VR1, VR3	VIRABLE RESISTOR	100 K
VR2, VR4, VR5	VIRABLE RESISTOR	10 K
C1, C3, C6, C8, C11, C13	CAPACITOR	0.01 μF, 50 V, MIRA
C2, C4,C7, C9, C12, C14	CAPACITOR	3.3 μF, 10 V

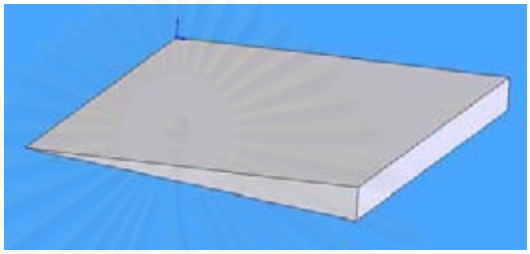
สัญลักษณ์	ชนิดอุปกรณ์	รหัสอุปกรณ์และคุณลักษณะ
C5, C10	CAPACITOR	33 nF, 160 V
C15, C16	CAPACITOR	470 μF, 25V
C17, C18	CAPACITOR	10 μF, 25V
C19, C20	CAPACITOR	0.01 μF, 25 V
C21	CAPACITOR	0. 1 μF, 25 V

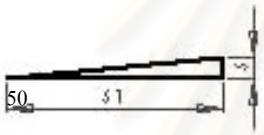
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

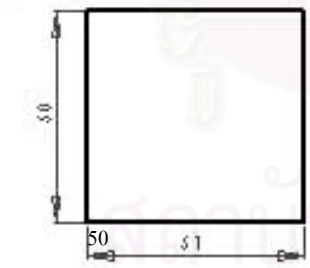
ภาคผนวก จ

การออกแบบขนาดอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดค่า HVL ของรังสีเอกซ์สำหรับการฉายรังสีครั้งเดียว

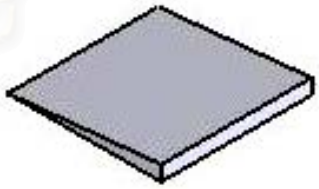
1. รูปวาดส่วนประกอบหลักเครื่องมือวัดค่า HVL
   1) ลิ่มอะลูมิเนียม





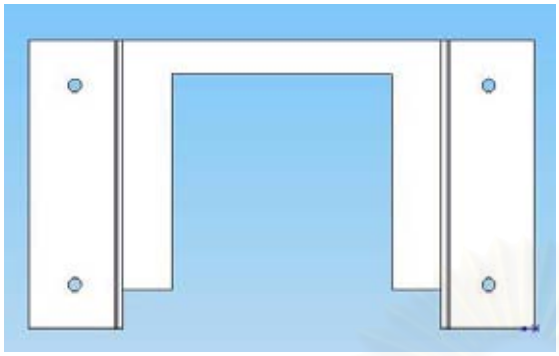


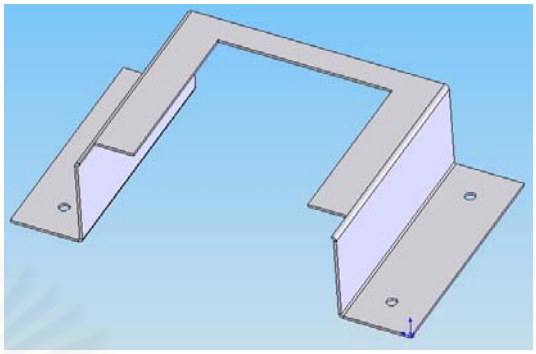
แผ่นอะลูมิเนียม

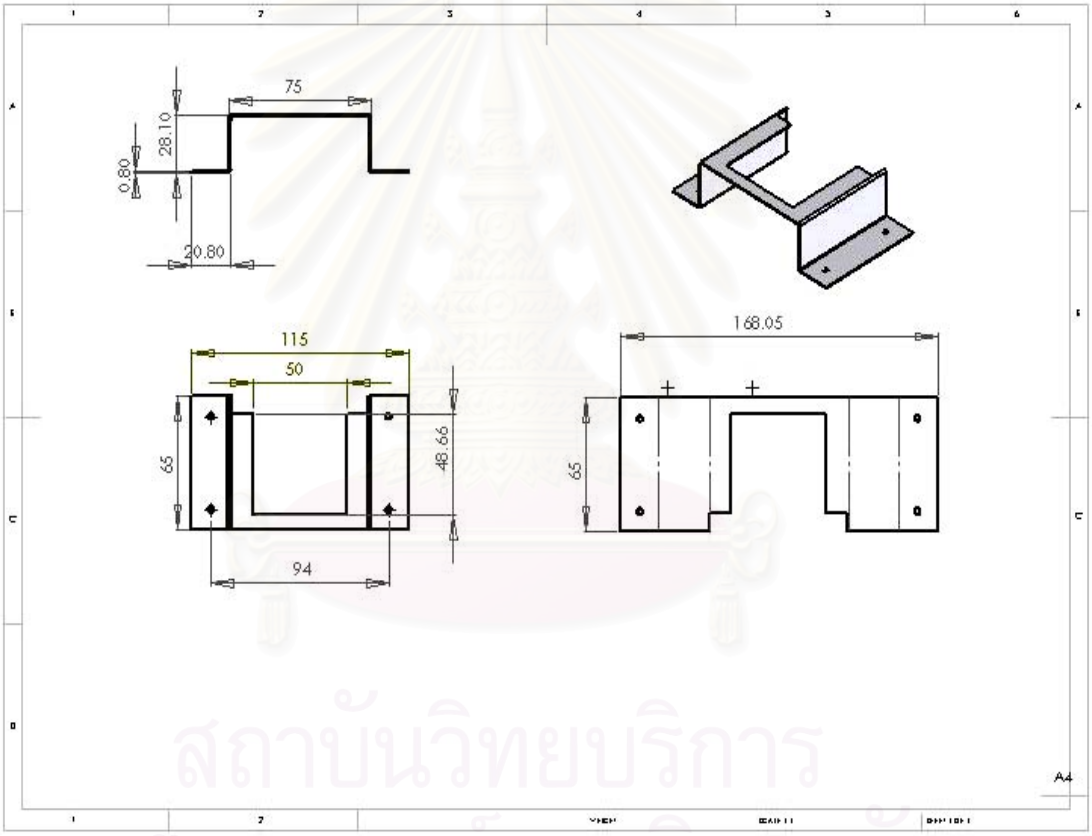


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ถาดรอง

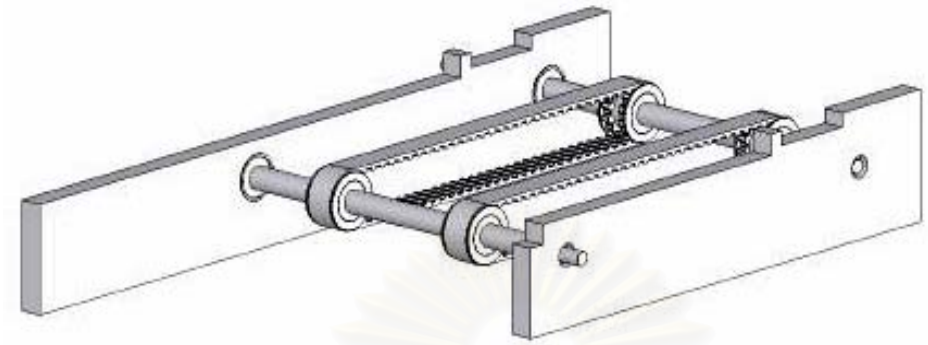




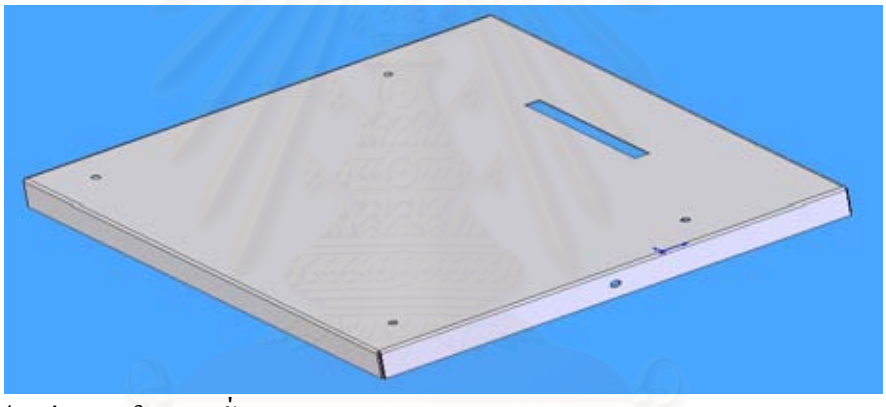


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

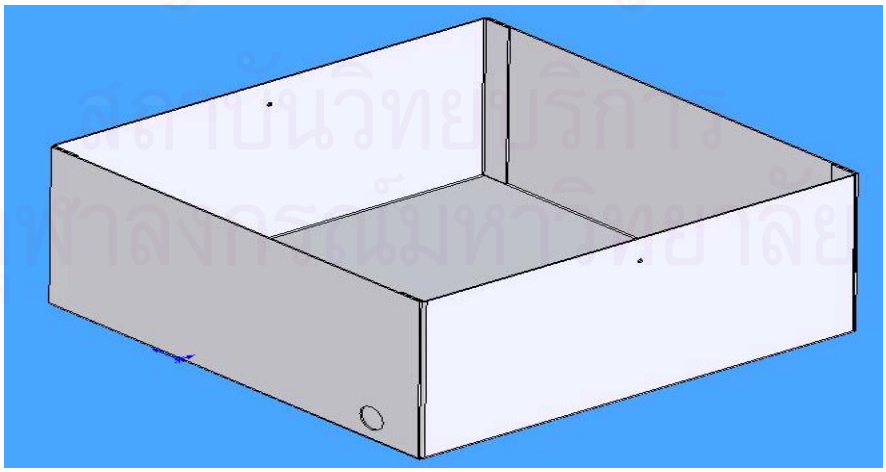
3) สายพาน

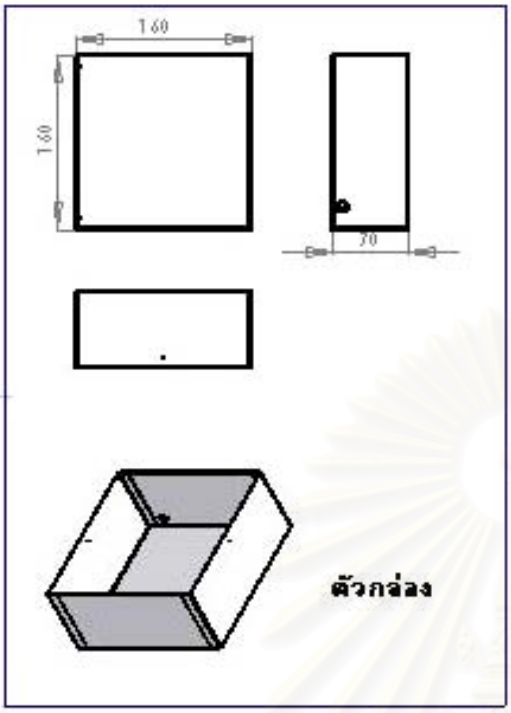


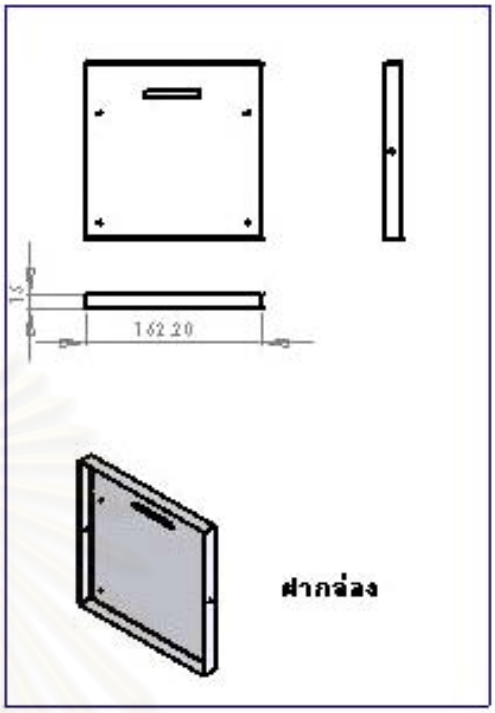
4) กล่องเครื่องมือ

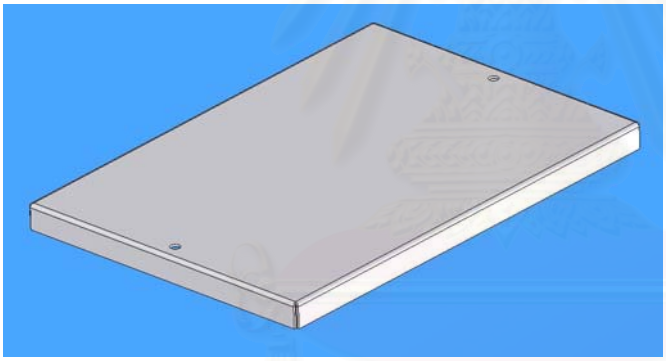


ฝากล่องภายในบุตะกั่วหนา 1 มม.

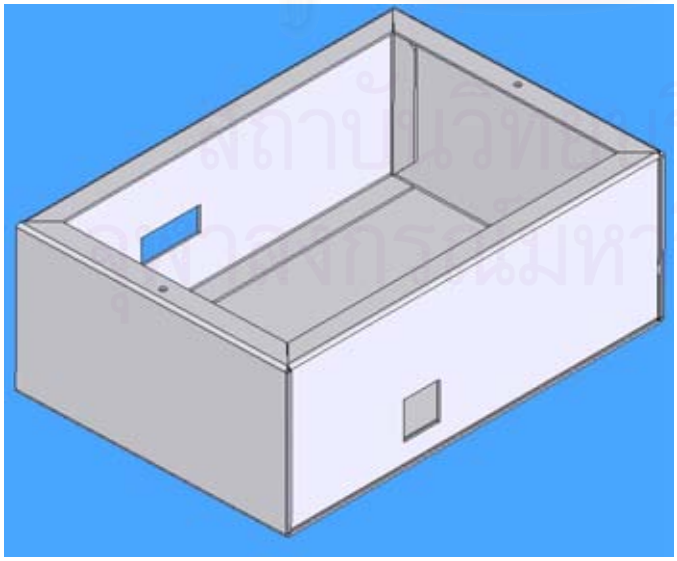








ฝากล่องภายในบุตะกั่วหนา 1 มม.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางอริณญา อุตบัววงศ์ เกิดวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2519 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2540 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย