

การคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม

นายจุมพฏ จำเนียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

CALCULATION OF CONCRETE WALL THICKNESS FOR INDUSTRIAL X-RAY
RADIOGRAPHY ROOM

Mr. Jumpot Jamnian

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้อง
ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม

โดย

นายจุมพล จำเนียร

สาขาวิชา

นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญชัย นิลสุวรรณ โฆษิต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี)

จุมพล จำเนียร : การคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์
 ในงานอุตสาหกรรม. (CALCULATION OF CONCRETE WALL THICKNESS FOR
 INDUSTRIAL X-RAY RADIOGRAPHY ROOM.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 รศ. สมยศ ศรีสถิตย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, 134 หน้า.

การกำบังรังสีจากห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์นั้นจำเป็นต้องทำให้แน่ใจว่าบุคคลภายนอก
 ห้องจะได้รับปริมาณรังสีเอกซ์ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งได้แก่ ผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีหรือ
 บุคคลทั่วไปที่เข้ามาใช้งานบริเวณพื้นที่ที่อยู่ติดกับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ งานวิจัยนี้มี
 วัตถุประสงค์เพื่อออกแบบกำบังรังสีเอกซ์จากห้องถ่ายภาพด้วยรังสีในงานอุตสาหกรรมให้ปลอดภัย
 และมีประสิทธิภาพโดยใช้การทดลองและเทคนิคการคำนวณ ได้เลือกใช้แผ่นคอนกรีตที่จัดเตรียม
 ขึ้นเพื่อเก็บข้อมูลที่เป็นสำหรับการคำนวณ ในการทดลองคำนวณผนังคอนกรีตได้กำหนด
 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ และข้อมูลบริเวณโดยรอบห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจัดแบ่งผนังห้อง
 ออกเป็น 2 ประเภท คือ ผนังห้องด้านที่รับรังสีปฐมภูมิ สามารถกำบังลำรังสีเอกซ์ได้ถึง 180 kVp
 และผนังห้องด้านที่รับรังสีทุติยภูมิ สามารถกำบังรังสีจากการกระเจิงและการรั่วของรังสีเอกซ์ ชุด
 ข้อมูลต่าง ๆ จากการทดลองถูกรวมเข้าไปใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณ
 ความหนาของผนังห้อง ผลการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จากงานวิจัยนี้
 ทำให้แน่ใจได้ว่าเพียงพอสำหรับความปลอดภัยทางรังสีในบริเวณพื้นที่ทำงาน

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270246121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : X-RAY / RADIATION SFETY / RADIATION SHIELDING

JUMPOT JAMNIAN : CALCULATION OF CONCRETE WALL THICKNESS FOR INDUSTRIAL X-RAY RADIOGRAPHY ROOM. ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMYOT SRISATIT. CO. ADVISOR : ASSOC. PROF.NARES CHANKOW, 134 pp.

X-ray rooms are shielded as necessary to make sure that radiation doses to persons outside the room do not exceed state limits for radiation workers or members of the public, based on who has access to the areas next to the x-ray room. This work aims to design an x-ray radiographic room shielding for industrial radiation imaging. There is the effectiveness for radiation safety using both experimental and calculation techniques. The provided concrete wall was selected for testing the necessary shielding data sets. The surrounding area of the x-ray room could be given by simulation. The barrier of x-ray room from calculation was divided into two classes. First, the primary barrier wall could protect the direct x-ray beam up to 180 kV. The second is secondary barrier wall that protect secondary radiation such as scatter and leakage. The data sets from experimental were integrated into developed computer program for concrete barrier thickness calculation. Calculation resulted from this work was ensured for radiation safety in working area.

Department : Nuclear Engineering Student's Signature

Field of Study : Nuclear Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2012 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ และ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว ที่คอยดูแลเอาใจใส่ ให้ความรู้ทางทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ดี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำการวิจัยให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่สำนักงานรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ประกอบการทำวิจัยและให้คำแนะนำต่าง ๆ

ท้ายนี้ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อนและบุคคลใกล้ชิดอื่น ๆ ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.6.1 Carl B. Braestrup (1965).....	3
1.6.2 M. Petrantonaki, C. Kappas, E. P. Efstathopoulos, Y. Theodorakos and G. Panayiotakis (1999).....	4
1.6.3 I. A. Tsalafoutas, E. Yakoumakis, and P. Sandilos (2003).....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติรังสีเอกซ์.....	5
2.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	5
2.3 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์.....	6
2.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์.....	8
2.5 แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล.....	10
2.6 การกำบังรังสี.....	12
2.6.1 การกำบังเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Source shielding).....	12
2.6.2 การกำบังรังสีเอกซ์จากผนังโครงสร้าง (Structural shielding).....	13
2.7 การลดทอนรังสีเอกซ์.....	34

บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	35
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	35
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.2.1	การหาค่า HVL, TVL และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต	35
3.2.2	การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนการกระเจิง.....	46
3.2.3	การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์	48
บทที่ 4	ผลการวิจัย.....	52
4.1	เงื่อนไขในการคำนวณหาความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	52
4.2	การคำนวณความหนาผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ด้านปฐมภูมิ (Primary Protective Barrier).....	53
4.3	การคำนวณความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ (Secondary Protective Barrier)	70
4.3.1	ผนังห้องด้าน B ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 2.5 เมตร	70
4.3.2	ผนังห้องด้าน C ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 1 เมตร.....	73
4.3.3	ผนังห้องด้าน D ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 1 เมตร.....	75
4.3.4	เพดานห้องด้าน E ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 2 เมตร	77
4.4	การคำนวณความหนาของผนังห้องจากการประมาณค่าในช่วงของค่า kVp อื่น ๆ ...	79
4.4.1	การใช้ข้อมูลจากการทดลองในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่	79
4.4.2	การคำนวณความหนาของผนังห้องจากการประมาณค่าในช่วงของค่า kVp อื่น ๆ	82
4.5	การคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์โดยใช้โปรแกรมคำนวณเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง.....	88
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	92
	ภาคผนวก ก ข้อมูลส่วนผสมแผ่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	93

ภาคผนวก ข ข้อมูลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์จากการทดลอง	94
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวัดปริมาณรังสีเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิง.....	114
ภาคผนวก ง ข้อมูลโปรแกรมการคำนวณ	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	134

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า Occupancy factors, T.....	14
ตารางที่ 2.2 ค่า HVL และTVL ของตะกั่วและคอนกรีต.....	24
ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วน (a) การกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อรังสีตกกระทบ.....	26
ตารางที่ 2.4 ค่าแฟกเตอร์ f ที่ขึ้นกับพลังงาน.....	30
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 70 kVp, 3.5 mA และ 10 sec	38
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 100 kVp, 3.5 mA และ 10 sec	40
ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 150 kVp, 3.5 mA และ 10 sec	42
ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 180 kVp, 3.5 mA และ 10 sec	44
ตารางที่ 3.5 ค่า HVL และ TVL ของคอนกรีตที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	46
ตารางที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนการกระเจิงที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่มุม 90°.....	47
ตารางที่ 4.1 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 1	53
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 1	54
ตารางที่ 4.2 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 0.1	56
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 0.1	57
ตารางที่ 4.3 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 1	58
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 1	59
ตารางที่ 4.4 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 0.1	60
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 0.1	61
ตารางที่ 4.5 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 1	62
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 1	63
ตารางที่ 4.6 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 0.1	64
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 0.1	65
ตารางที่ 4.7 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 1	66

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 1	67
ตารางที่ 4.8 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 0.1	68
ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 0.1	69
ตารางที่ 4.9 ความหนาผนังห้องด้าน B, P = 1.....	70
ตารางที่ 4.10 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ B, P = 0.1	72
ตารางที่ 4.11 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 1	73
ตารางที่ 4.12 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 0.1	74
ตารางที่ 4.13 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 1	75
ตารางที่ 4.14 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 0.1	76
ตารางที่ 4.15 ความหนาเพดานห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 1	77
ตารางที่ 4.16 ความหนาเพดานห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 0.1.....	78
ตารางที่ 4.17 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ได้จาก การทดลอง.....	81
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความหนาของคอนกรีตที่คำนวณได้ ณ ความต่างศักย์ 70, 80 และ 100 kVp.....	83
ตารางที่ 4.19 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ได้จาก การประมาณค่าในช่วง.....	85
ตารางที่ 4.20 ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่าง โปรแกรมการคำนวณกับเอกสารอ้างอิง	88
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงส่วนผสมของคอนกรีต	93
ตารางที่ ข.1 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp	94
ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	95
ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	96
ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	97
ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	98
ตารางที่ ข.2 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp	99
ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp.....	100
ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp.....	101
ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp.....	102
ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp.....	103

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp	104
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp.....	105
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp.....	106
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp.....	107
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp.....	108
ตารางที่ ข.4 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp	109
ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp.....	110
ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp.....	111
ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp.....	112
ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp.....	113
ตารางที่ ค.1 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	114
ตารางที่ ค.2 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 100 kVp.....	114
ตารางที่ ค.3 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 150 kVp.....	115
ตารางที่ ค.4 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 180 kVp.....	115

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 หลอดรังสีเอกซ์.....	6
ภาพที่ 2.2 กระบวนการเกิดรังสีเฉพาะตัว (characteristic X – rays)	7
ภาพที่ 2.3 กระบวนการเกิดเบรมส์ชตราลุง (Bremsstrahlung)	8
ภาพที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์.....	9
ภาพที่ 2.5 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า (mA) ที่มีผลต่อปริมาณรังสีเอกซ์.....	9
ภาพที่ 2.6 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้า (kV) ที่มีผลต่อพลังงานของรังสีเอกซ์	10
ภาพที่ 2.7 เครื่องมือในการอ่านค่าปริมาณรังสีที่วัดได้จากแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล	11
ภาพที่ 2.8 แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล.....	11
ภาพที่ 2.9 แผนภาพผนังห้องด้านที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ	15
ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 50 – 200 kVp.....	18
ภาพที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 250 – 400 kVp.....	19
ภาพที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 500 – 3000 kVp.....	20
ภาพที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นคอนกรีตความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 50 – 400 kVp.....	21
ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นคอนกรีตความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 500 – 3000 kVp.....	22
ภาพที่ 2.15 แผนภาพการกระเจิงของรังสีเอกซ์.....	25
ภาพที่ 2.16 เมื่อมีผนังกั้นลำรังสีจะพิจารณาการลดทอน.....	28
ภาพที่ 2.17 แผนภาพการกำบังรังสีที่รั่วไปด้านผนังห้องทุติยภูมิ.....	30
ภาพที่ 3.1 ลักษณะการจัดอุปกรณ์การทดลอง	36
ภาพที่ 3.2 การติดตั้งแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล (OSLs) ด้านหน้า pahntom	37
ภาพที่ 3.3 การจัดวางแผ่นคอนกรีตที่ตำแหน่งด้านหน้า phantom	37
ภาพที่ 3.4 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 70 kVp	39
ภาพที่ 3.5 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 70 kVp	39

ภาพที่ 3.6 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 100 kVp	41
ภาพที่ 3.7 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 100 kVp	41
ภาพที่ 3.8 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 150 kVp	43
ภาพที่ 3.9 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 150 kVp	43
ภาพที่ 3.10 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 180 kVp	45
ภาพที่ 3.11 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 180 kVp	45
ภาพที่ 3.12 ลักษณะการจัดการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนการกระเจิงของรังสีเอกซ์	47
ภาพที่ 3.13 เมนูหลักของ โปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์	48
ภาพที่ 3.14 ภาพโปรแกรมส่วน Primary Protective Barrier	49
ภาพที่ 3.15 ภาพโปรแกรมส่วน Secondary Protective Barrier	51
ภาพที่ 4.1 ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Top View)	52
ภาพที่ 4.2 ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Front View)	53
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 70 kVp และ $P = 1$	55
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 70 kVp และ $P = 0.1$	57
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 100 kVp และ $P = 1$	59
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 100 kVp และ $P = 0.1$	61
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 150 kVp และ $P = 1$	63
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 150 kVp และ $P = 0.1$	65
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 180 kVp และ $P = 1$	67
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 180 kVp และ $P = 0.1$	69

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม B, P = 1.....	71
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม B, P = 0.1.....	72
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม C, P = 1.....	73
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม C, P = 0.1.....	74
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม D, P = 1.....	75
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม D, P = 0.1.....	76
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม E, P = 1.....	77
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้อง ด้านทศนิยม E, P = 0.1.....	78
ภาพที่ 4.19 กราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 2 – 6 ซม. ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	79
ภาพที่ 4.20 กราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 6 – 48 ซม. ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	80
ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 70 kVp.....	81
ภาพที่ 4.22 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 80 kVp.....	84
ภาพที่ 4.23 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 70 – 90 kVp).....	85
ภาพที่ 4.24 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 100 – 120 kVp).....	86

ภาพที่ 4.25 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 130 – 150 kVp).....	86
ภาพที่ 4.26 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 160 – 180 kVp).....	87
ภาพที่ ง.1 หน้าแรกของโปรแกรมคำนวณ	116
ภาพที่ ง.2 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ Primary Protective Barrier	118
ภาพที่ ง.3 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ Secondary Protective Barrier	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำรังสีเอกซ์มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งในทางด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านการเกษตรกรรม ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยทางด้านรังสี โดยการป้องกันอันตรายจากรังสีเอกซ์นั้น ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีจะมีโอกาสได้รับรังสีสูงกว่าบุคคลภายนอก เพื่อความปลอดภัยผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสี ต้องยึดหลัก 3 ประการดังนี้

- (1) ใช้เวลาในการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีให้น้อยที่สุด
- (2) การปฏิบัติงานกับสารรังสีต้องอยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุด
- (3) ใช้เครื่องกำบังเพื่อลดความแรงของรังสี

จาก 3 ข้อที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ข้อ 1 และข้อ 2 เป็นสิ่งที่ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับรังสีสามารถจัดการวางแผนด้วยตนเองได้ และในข้อ 3 เครื่องกำบังรังสีที่กล่าวถึงนั้น สำหรับรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ เครื่องกำบังรังสี ณ หลอดรังสีเอกซ์ (Source shielding) และกำบังรังสีด้วยผนังห้องเอกซเรย์ (Structural shielding) โดยการกำบังรังสีต้องมีการพิจารณาอัตราปริมาณรังสีที่ได้รับให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ ICRP (International Commission on Radiological Protection) กำหนด

เนื่องจากรังสีเอกซ์ เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อภายในร่างกายได้หากไม่มีเครื่องกำบัง โดยเครื่องกำบังรังสี ณ หลอดรังสีเอกซ์ส่วนใหญ่มักมีการสร้างจากบริษัทผู้ผลิตหลอดรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ ICRP กำหนดไว้แล้ว ดังนั้นสิ่งที่ผู้เกี่ยวข้องกับการใช้รังสีเอกซ์ต้องพิจารณาคือ การก่อสร้างผนังห้องรังสีเอกซ์ จึงมีความสำคัญยิ่ง เพราะใช้เป็นการกำบังปริมาณรังสีเอกซ์ไม่ให้ทะลุออกนอกห้องปฏิบัติการเพื่อให้บุคคลที่ไม่เกี่ยวข้องกับรังสีและอยู่ใกล้เคียงบริเวณห้องปฏิบัติการ ได้รับรังสีไม่เกินมาตรฐานที่ ICRP กำหนดไว้

ในการเลือกใช้วัสดุกำบังรังสีเอกซ์สำหรับเป็นผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์นั้น ส่วนใหญ่จะเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องสามารถกำบังรังสีเอกซ์ได้ดีซึ่งได้แก่ คอนกรีตนั่นเอง

ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์งานวิจัยนี้จึงได้มีการในการพัฒนาโปรแกรมคำนวณความหนาของผนังถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และเจาะจงเฉพาะการสร้างผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่ทำจากคอนกรีตเท่านั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม โดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางรังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

(1) สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาของแผ่นคอนกรีตกับค่า K ($\text{mSv} / \text{mA} - \text{min}$ at 1 m) หรือปริมาณรังสีเอกซ์ต่อปริมาณการใช้งาน (workload) ของหลอดรังสีเอกซ์ใน 1 สัปดาห์ ที่ระยะ 1 เมตร

(2) ทดลองหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อรังสีตกกระทบ (scattering ratio, a) ที่มุม 90°

(3) กำหนดเงื่อนไขตามลักษณะการออกแบบต่าง ๆ ได้แก่

- ค่า Maximum Permissible Dose (R/week), (P)
- ค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ (kVp)
- ค่ากระแสไฟฟ้าของหลอดรังสีเอกซ์ (mA)
- ค่า Workload (mA-min/week), (W)
- ค่า Use factor (U)
- ค่า Occupancy factor (T)
- ตำแหน่งการวางหลอดรังสีเอกซ์และลักษณะการใช้งาน
- ค่าแฟกเตอร์ f ที่ขึ้นกับพลังงาน

(4) พัฒนาโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

(5) คำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์โดยเลือกใช้คอนกรีตเป็นวัสดุกำบัง ตามเงื่อนไขในข้อ (3) เปรียบเทียบกับข้อมูลจากเอกสาร

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

(1) วัดปริมาณรังสีเอกซ์ (หน่วยเป็น mSv/mA-min) ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีเอกซ์ 1 เมตร โดยเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีต ระหว่างหลอดรังสีเอกซ์และเครื่องวัดรังสี ปรับค่าความต่างศักย์หลอดรังสีเอกซ์ เป็น 70, 100, 150 และ 180 kVp และปรับค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 mA

(2) สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาของแผ่นคอนกรีตกับค่า K (mSv / mA – min at 1 m) หรือปริมาณรังสีเอกซ์ต่อปริมาณการใช้งาน (workload) ของหลอดรังสีเอกซ์ใน 1 สัปดาห์ที่ระยะ 1 เมตร

(3) วัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและปริมาณรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกจากจุดกระทบที่ระยะห่าง 1 เมตร โดยทำมุม 90° ที่ค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ต่าง ๆ ตามข้อ (2) และคำนวณอัตราส่วนการกระเจิง (scattering ratio) ระหว่างรังสีตกกระทบกับรังสีกระเจิงที่มีค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ ดังข้อ (1)

(4) พัฒนาโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

(5) คำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับข้อมูลจากเอกสาร

(6) สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคและโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางด้านอุตสาหกรรม โดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางรังสีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยมีประสิทธิภาพ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 Carl B. Braestrup (1965)^[1]

การอภิปรายหลักการของการออกแบบการป้องกันรังสีสำหรับการติดตั้งเครื่องฉายรังสีโคบอลต์-60 เพื่อการรักษา สำหรับการป้องกันรังสีจะถูกระบุรูปแบบทั่วไปและการดำเนินงานเกี่ยวกับการออกแบบของการป้องกันรวมทั้งจะมีการแสดง ตัวอย่างการออกแบบระบบป้องกันรังสีสำหรับห้องฉายรังสี

1.6.2 M. Petrantonaki, C. Kappas, E. P. Efstathopoulos, Y. Theodorakos and G. Panayiotakis (1999)^[2]

โครงสร้าง การป้องกันรังสีวินิจฉัยสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้รังสีเอกซ์ มักทำตามคำแนะนำใน รายงาน ของ the National Council on Radiation Protection and Measurements Report ฉบับที่ 49 กระบวนการวิเคราะห์มากมายที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงการออกแบบ โครงสร้างเพื่อ ป้องกันรังสีจากอุปกรณ์เหล่านี้ โดยเฉพาะวิธีการเหล่านี้ทำการประเมินปริมาณรังสีเอกซ์และ พิจารณาที่พื้นที่ใช้งานเพื่อคำนวณความหนาของผนังให้เหมาะสมในหลาย ๆ กรณี บทความนี้ได้ นำเสนอเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการคำนวณ โครงสร้างการป้องกันรังสีจากหลอดรังสีเอกซ์ กระบวนการ คำนวณหาความหนาผนังเพื่อให้มีปริมาณรังสีออกมาต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งกระบวนการที่นำเสนอ นี้จะช่วยลดการประเมินค่าความหนาของผนังที่หนาเกินความเป็นจริงซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยใช้วิธีการ อื่น ๆ ด้วยโปรแกรมระบบปฏิบัติการ windows ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณความหนา ของผนัง

1.6.3 I. A. Tsalafoutas, E. Yakoumakis, and P. Sandilos (2003)^[3]

ในการศึกษานี้เป็นการนำเสนอรูปแบบใหม่สำหรับการคำนวณการป้องกันรังสีเอกซ์จาก เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ในงานวินิจฉัย ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการรวบรวมและการปรับเปลี่ยนรูปแบบ แนวคิดของการคำนวณการสร้างกำบังรังสีในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับเพื่อให้ได้มีการป้องกันรังสี เอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ในงานวินิจฉัยได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีรูปแบบในการติดตั้งเครื่อง กำเนิดรังสีเอกซ์ที่หลากหลาย ในการปฏิบัติการต้องการลดการรั่วของรังสีให้น้อยกว่าค่าสูงสุดของ รังสีทฤษฎีโดยใช้แฟกเตอร์ต่าง ๆ ช่วยในการคำนวณสำหรับการลดปริมาณรังสีโดยการกำบังรังสี ปฐมภูมิ การลดทอนอุปกรณ์รับภาพและจากวัสดุก่อสร้างที่มีอยู่จะนำเข้ามาใช้ในการคำนวณด้วย ตัวอย่างของการคำนวณการป้องกันสำหรับกรณีนี้ ประกอบด้วยรูปแบบการคำนวณต่าง ๆ และ แนวคิดในการคำนวณเพื่อสัณยภาพที่ดีในการป้องกันรังสีเอกซ์แก่เจ้าหน้าที่และประชาชน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติรังสีเอกซ์^[4]

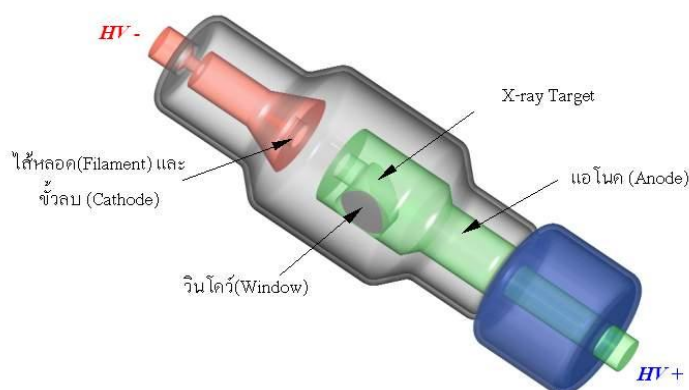
ศาสตราจารย์เรินต์เกน (Wilhelm Conrad Röntgen) ค้นพบรังสีเอกซ์ เมื่อปี ค.ศ.1895 ขณะที่กำลังศึกษารังสีแคโทด แล้วพบว่า แผ่นกรองแสงซึ่งเคลือบด้วยสารประกอบแบเรียม แพลทินไซยาไนด์ (barium platinocyanide) เรืองแสง ขณะที่วางอยู่ห่างหลอดรังสีแคโทดออกไป แสดงว่ามีรังสีชนิดหนึ่งที่มีมองไม่เห็นและมีอำนาจทะลุทะลวงสูง สามารถผ่านออกจากหลอดรังสีแคโทดไปกระทบแผ่นเรืองรังสี ซึ่งในครั้งแรกที่พบนั้น ไม่ทราบว่าเป็นรังสีอะไร จึงเรียกรังสีนี้ว่า รังสีเอกซ์ จากการศึกษารายละเอียดของปรากฏการณ์นี้ และคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ ต่อมา นักวิทยาศาสตร์จึงได้สรุปสมบัติที่สำคัญของรังสีเอกซ์ได้ดังนี้

- (1) เป็นรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับรังสีแกมมา แต่มีช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า คือ ประมาณ $0.01 - 100 \text{ \AA}$ (อังสตรอม)
- (2) เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และไม่ถูกทำให้เบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า
- (3) ทำให้วัตถุบางอย่างเรืองแสงได้
- (4) เป็นรังสีคอไอออน
- (5) ทำให้เกิดรอยดำบนแผ่นฟิล์มถ่ายรูปได้ เช่นเดียวกับแสงสว่าง
- (6) ทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้ดี
- (7) ถูกดูดกลืน โดยวัตถุที่มีเลขเชิงมวลสูง
- (8) มีสมบัติเช่นเดียวกับแสง เช่น การสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) การเลี้ยวเบน (diffraction)

2.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์^[4]

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ซึ่งเป็นหลอดแก้วสุญญากาศ ภายในมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วลบ (แคโทด) หรือไส้หลอด (filament) และขั้วบวก (แอโนด) หรือ เป้า (target) ขั้วทั้ง 2 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า (ภาพที่ 2.1) เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้หลอดที่ทำจากทังสเตน (tungsten) จนอุณหภูมิสูง ($\geq 2,000$ องศาเซลเซียส) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากไส้หลอดและถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปกระทบกับเป้า ซึ่งทำจากโลหะผสมระหว่างทังสเตนกับวัสดุอื่นเช่น โมลิบดีนัม (molybdenum) หรือรูเนียม (rhenium)

เนื่องจากทั้งสเทนมี่เลขเชิงอะตอมสูง จุดหลอมเหลวสูง และส่งผ่านความร้อนได้ดี เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงกระทบกับเป้า จะสูญเสียพลังงานไปเป็นความร้อน ($\geq 99\%$) และส่วนพลังงานที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2.1



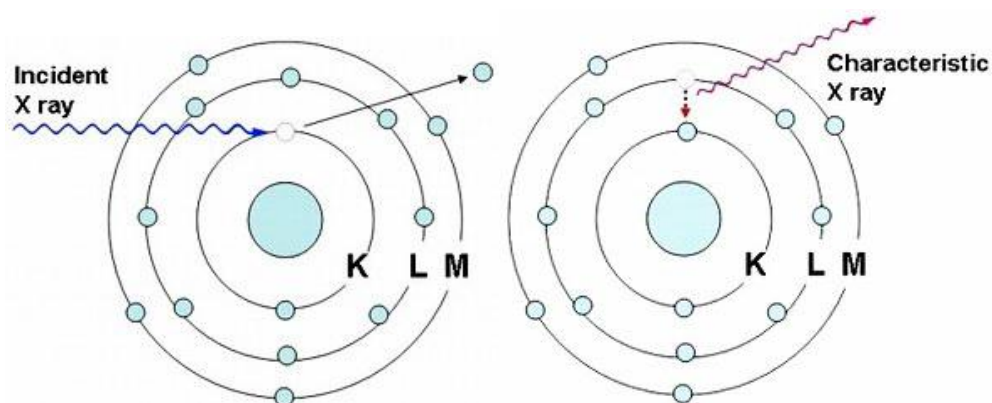
ภาพที่ 2.1 หลอดรังสีเอกซ์

2.3 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์^[4]

เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงจากไส้หลอดกระทบเป้า รังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นจากกระบวนการที่สำคัญคือ

- (1) เมื่ออิเล็กตรอนจากไส้หลอดชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรอะตอมของเป้า และสามารถทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ด้วยการปลักอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากอะตอม เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอื่นที่ห่างออกไปเข้ามาแทนที่ว่าง จะปลดปล่อยพลังงานออกในรูปรังสีเอกซ์ ซึ่งเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) จากภาพที่ 2.2 อิเล็กตรอนจากวง L เข้ามาแทนที่ว่างในวง K รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัวเค (K – characteristic X – ray) หากเป็นการแทนที่ว่างในวง L หรือ M ก็จะมีชื่อว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวแอล (L – characteristic X – ray) และรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเอ็ม (M – characteristic X – ray) พลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะเท่ากับผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจรเริ่มต้นกับวงโคจรสุดท้าย ซึ่งอะตอมของเป้า

แต่ละชนิดจะมีการเรียงลำดับของอิเล็กตรอนแตกต่างกัน ดังนั้น พลังงานของรังสีเอกซ์จะเปลี่ยนไปเมื่อชนิดของเป้าเปลี่ยนไป กล่าวคือ พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากทั้งสทนต์มีค่าแตกต่างจากตะกั่ว รังสีเอกซ์ชนิดนี้มีชื่อว่า แครกเทอริสติก ซึ่งหมายถึง มีลักษณะเฉพาะตัวตามชนิดของเป้านั้นเอง



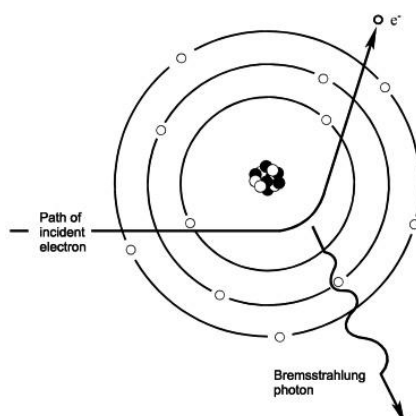
ภาพที่ 2.2 กระบวนการเกิดรังสีเฉพาะตัว (characteristic X – rays)

ที่มา <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>

- (2) เมื่ออิเล็กตรอนจากไส้หลอดวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า ประจุบวกของนิวเคลียสจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทาง และมีพลังงานลดลง โดยการปล่อยออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า เบรมส์ตราลุง (bremsstrahlung) ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งมีพลังงาน (E_x) เท่ากับผลต่างของพลังงานอิเล็กตรอนก่อนผ่านเข้าอะตอม (E_i) และหลังจากออกจากอะตอม (E_f) ดังสมการที่ 2.1

$$E_x = E_i - E_f \quad (2.1)$$

ดังนั้น เบรมส์ตราลุงจึงมีพลังงานได้หลายค่า ขึ้นอยู่กับว่าอิเล็กตรอนที่เข้าชนสามารถเข้าใกล้นิวเคลียสได้มากหรือน้อยและสูญเสียพลังงานมากน้อยเพียงใด เบรมส์ตราลุงมีสเปกตรัมพลังงานที่ต่อเนื่อง โดยมีค่าสูงสุดเท่าพลังงานของอิเล็กตรอน เช่น อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์ 70 keV ทำให้เกิดเบรมส์ตราลุงซึ่งมีพลังงานตั้งแต่ 0 จนถึง 70 keV



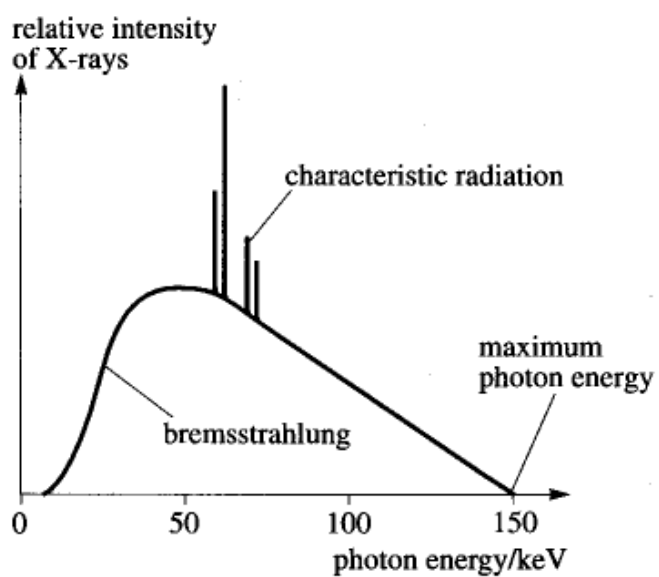
ภาพที่ 2.3 กระบวนการเกิดเบรมส์ตราลุง (Bremsstrahlung)

ที่มา <http://www4.nau.edu/microanalysis/Microprobe-SEM/Signals.html>

2.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์^[4]

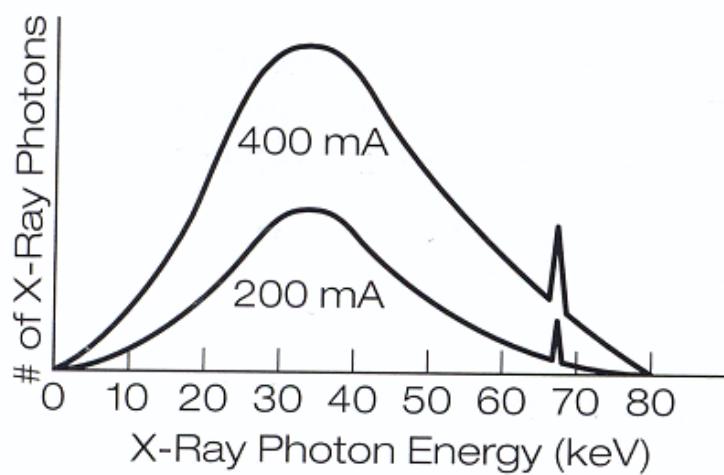
สเปกตรัมรังสีเอกซ์แสดงความเข้มหรือจำนวนโฟตอนของรังสีเอกซ์ที่พลังงานต่าง ๆ (ภาพที่ 2.4) ประกอบด้วยสเปกตรัมต่อเนื่อง (continuous spectrum) เป็นผลมาจากเบรมส์ตราลุงและสเปกตรัมเชิงเส้น (Line spectrum or discrete spectrum) เนื่องจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ดังนั้น ความถี่และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จึงมีค่าต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยจะมีความถี่สูงสุดหรือความยาวคลื่นต่ำสุด เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานทั้งหมด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณและคุณภาพของรังสีเอกซ์ คือ กระแสไฟฟ้าในหน่วยมิลลิแอมแปร์ (mA) และศักย์ไฟฟ้าในหน่วยกิโลโวลต์ (kV) ที่ให้กับหลอดรังสีเอกซ์ การเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้ได้หลอดร้อนมากขึ้น มีอิเล็กตรอนปลดปล่อยออกมามากขึ้น เป็นผลให้ได้รังสีเอกซ์มากขึ้น (ภาพที่ 2.5) ส่วนการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูง มีอำนาจทะลุทะลวงสูง (ภาพที่ 2.6)



ภาพที่ 2.4 สเปกตรัมรังสีเอกซ์

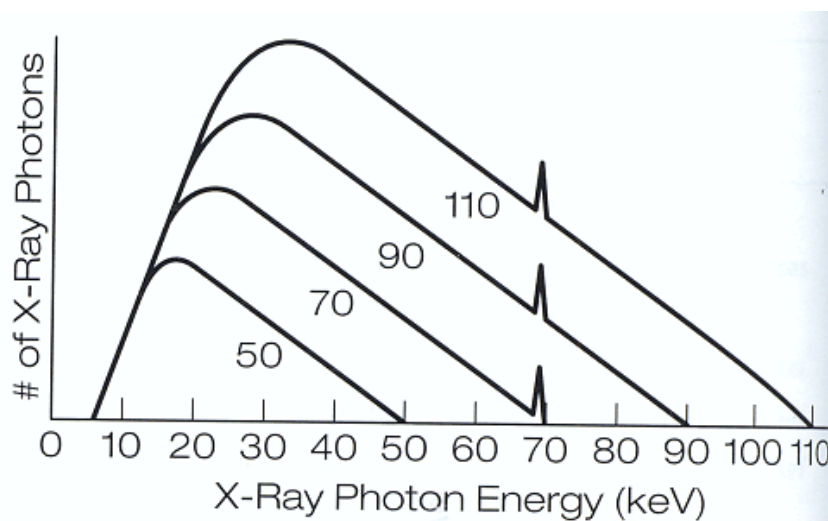
ที่มา <http://koukalaka.wordpress.com/2012/01/11/physics-in-medicine-lectures-week-1/>



ภาพที่ 2.5 อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า (mA) ที่มีผลต่อปริมาณรังสีเอกซ์

ที่มา <http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage>

[/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter7/chapter7.html](http://busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter7/chapter7.html)



ภาพที่ 2.6 อิทธิพลของศักย์ไฟฟ้า (kV) ที่มีผลต่อพลังงานของรังสีเอกซ์

ที่มา <http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter7/chapter7.html>

2.5 แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล^[5]

Optically Stimulated Luminescence หรือ OSL เป็นผลึกของสารประกอบ $Al_2O_3 : C$ ซึ่งมีคุณสมบัติที่เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแล้ว จะสะสมพลังงานเอาไว้โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน เมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงสีเขียวความเข้มที่เหมาะสม ผลึกจะคายพลังงานที่ได้รับมาส่วนหนึ่งในรูปของแสงสีน้ำเงิน ปริมาณของแสงที่ปล่อยออกมาจะแปรตามปริมาณรังสีที่ได้รับ

ผลึกของ $Al_2O_3 : C$ เมื่อนำมาบรรจุเป็นแผ่นวัดรังสีแล้ว ต้องใช้คู่กับตัวลบใส่แผ่นวัดรังสีซึ่งตัวลบจะบรรจุแผ่นกรองรังสี ชนิดและความหนาแตกต่างกันเพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณรังสีตามข้อกำหนดของ International Commission on Radiation Unit and Measurement Report No.47 หรือ ICRU – 47

เนื่องจากแผ่นวัดรังสีไอเอสแอลใช้วัดปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับ ดังนั้นในการทำการวิจัยจึงจำเป็นต้องมี phantom เพื่อให้แทนตัวบุคคลที่ได้รับปริมาณรังสี ในการทำวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ถังน้ำทรงสี่เหลี่ยมใช้เป็น phantom เนื่องจากในร่างกายมนุษย์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำและมีขนาดใกล้เคียงกับร่างกายมนุษย์



ภาพที่ 2.7 เครื่องมือในการอ่านค่าปริมาณรังสีที่วัดได้จากแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล



ภาพที่ 2.8 แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล

2.6 การกำบังรังสี^[6]

การกำบังรังสีจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์นั้น จะต้องพิจารณาและทราบกำหนดอัตราปริมาณรังสีที่ยอมให้รับได้ โดยมาตรฐานดังกล่าว ICRP (International Commission on Radiological Protection) เป็นผู้กำหนด ซึ่งข้อกำหนดต่าง ๆ นี้ ผู้ออกแบบกำบังรังสีจะต้องปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานและบุคคลทั่วไปที่อยู่ใกล้เคียงดังกล่าว

เมื่อพิจารณาถึงการกำบังรังสีจะมีปัจจัยสำคัญอยู่ 2 อย่างด้วยกันคือ กำบังรังสี ณ หลอดรังสีเอกซ์ (Source shielding) และกำบังรังสีด้วยผนังห้องเอกซเรย์ (Structural shielding) ดังนั้นจึงขอแยกกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละส่วน คือ

2.6.1 การกำบังเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Source shielding)

จากกระบวนการการเกิดรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งชนเป้าทำให้เกิดรังสีเอกซ์ทุกทิศทางซึ่งมีเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1% ของพลังงานจากอิเล็กตรอน) เท่านั้นที่ออกมาทางช่องหน้าต่างต่าง (window) และถูกใช้ประโยชน์ ส่วนที่เหลือ (มากกว่า 99% ของพลังงานจากอิเล็กตรอน) ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ณ เป้าโลหะซึ่งจะต้องระบายความร้อนออกเพื่อไม่ให้อุณหภูมิสูงมากเกินไป โดยอาจใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหรือน้ำมัน และมีหลอดรังสีเอกซ์บางชนิดที่ใช้แผ่นเป้าโลหะหมุนเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของเป้าโลหะสูงมากเกินไป

ดังนั้นจะเห็นว่าบริษัทผู้ผลิตหลอดรังสีเอกซ์ต้องควบคุมให้ลำรังสีเอกซ์พุ่งออกมาทางหน้าต่างหรือเฉพาะส่วนที่ใช้งานเท่านั้น ส่วนรังสีเอกซ์ที่ไม่ใช้งานจะต้องสร้างวัสดุกำบังไม่ให้หลุดลอดออกมาภายนอกเกินมาตรฐานกำหนด โดยหลอดรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นหลอดแก้วจะอยู่ภายในกรอบโลหะที่บุด้านในด้วยแผ่นโลหะตะกั่วเรียกว่า “เฮซิง (Housing)” แผ่นโลหะตะกั่วต้องมีความหนาพอเพียงที่จะกั้นลำรังสีเอกซ์ในส่วนที่ไม่ใช้งานนี้ ซึ่งโดยทั่วไปคิดความหนาสำหรับรังสีเอกซ์พลังงานสูงสุดที่สามารถปรับค่าได้ ในการปรับพลังงานของรังสีเอกซ์นั้น เป็นการปรับค่าความต่างศักย์ภายในหลอดแก้วสุญญากาศโดยสามารถปรับได้ที่ปุ่มตรงหน้าปิดเครื่องควบคุม (control panel) ซึ่งมีเข็มชี้บอกและมีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ (kilovolt, kV) ส่วนการปรับปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ก็สามารถปรับได้ตรงที่หน้าปัดดังกล่าว โดยปรับที่ปุ่มกระแสไฟฟ้า หรือ mA ซึ่งต้องปรับควบคู่กับปุ่มปรับเวลาเป็นนาที่ หรือวินาที ดังนั้นจึงสัมพันธ์กับการใช้งานของเครื่องเอกซเรย์ที่เรียกว่า “work load” มีหน่วยเป็น mA-min/week หรือ mA-sec/week (ปัจจุบันเครื่องเอกซเรย์บางเครื่องมีการปรับค่าความต่างศักย์ผ่าน โปรแกรมแล้ว)

2.6.2 การกำบังรังสีเอกซ์จากผนังโครงสร้าง (Structural shielding)

เป็นการสร้างกำบังรังสีโดยการคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ที่จะกั้นรังสีเอกซ์ไม่ให้แผ่ออกไปนอกห้องเกินมาตรฐานกำหนด ซึ่งต้องพิจารณาว่าบริเวณพื้นที่ภายนอกที่ติดกับผนังห้องแต่ละด้านนั้นเป็นบริเวณที่เรียกว่า “พื้นที่ควบคุม (Controlled area)” หรือ “พื้นที่ไม่ควบคุม (Uncontrolled area)” ทั้งนี้พื้นที่ควบคุม หมายถึง บริเวณที่เจ้าหน้าที่ทางด้านรังสีเข้าไปใช้ปฏิบัติงาน เช่น ห้องปฏิบัติการทางด้านรังสี ห้องจัดเก็บอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับรังสี เป็นต้น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการปฏิบัติการทางรังสี ดังนั้น ICRP จึงกำหนดว่า พื้นที่ควบคุมสามารถมี

อัตราปริมาณรังสีสูงสุดได้ไม่เกิน **0.1 R/week หรือ 1 mSv/week** ส่วนอีกบริเวณเป็น พื้นที่ที่ไม่ควบคุม หมายถึง บริเวณที่บุคคลทั่วไปสามารถเข้าไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการทางรังสี เช่น ห้องประชุม ห้องทำงานอื่น ๆ สนามเด็กเล่น เป็นต้น ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงถูกกำหนดว่าจะต้องมีอัตราปริมาณรังสี (exposure rate) สูงสุดได้ไม่เกิน **0.01 R/week หรือ 0.1 mSv/week**

ในการคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงข้อมูลรายละเอียดของเครื่องเอกซเรย์และข้อมูลการใช้งานทุกอย่าง ซึ่งพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- **Maximum Permissible Dose (P)** หมายถึง อัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่กำหนดให้สำหรับบริเวณด้านหลังติดกับผนังห้องเอกซเรย์ ว่าเป็นพื้นที่ควบคุม หรือไม่เป็นพื้นที่ควบคุม ดังได้กล่าวไว้ในข้างต้น

- **Maximum kilovoltage (kVp) of X-ray tube** หมายถึง ความต่างศักย์สูงสุดของหลอดรังสีเอกซ์ มีหน่วยเป็น kVp ซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 50 – 3000 kVp ซึ่งก็คืออำนาจการทะลุทะลวงสูงสุดของรังสีเอกซ์

- **Maximum Current of X-ray tube** หมายถึง กระแสไฟฟ้าสูงสุดของหลอดรังสีเอกซ์ มีหน่วยเป็น mA ซึ่งเป็นความเข้มสูงสุดของรังสีเอกซ์ที่ใช้งาน

- **Workload (W)** หมายถึง ปริมาณการใช้งานหลอดรังสีเอกซ์ มีหน่วยเป็น mA-min/week หรือ mA-sec/week เป็นอัตราการใช้ในหนึ่งสัปดาห์ เครื่องเอกซเรย์บางชนิดจะมีปุ่ม mA และปุ่มเวลา min หรือ sec แยกออกจากกัน แต่บางชนิดจะรวมเป็นปุ่มเดียวกันคือ เป็นปุ่ม mA-min หรือ mA-sec

- **Use factor (U)** หมายถึง แฟกเตอร์ที่บอกถึงสัดส่วนในการหันลำรังสีเข้าหาผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่กำลังพิจารณาเพื่อการคำนวณความหนา โดยที่ลำรังสีเอกซ์ที่กระทบกับผนังห้องเอกซเรย์คิดเป็น 2 อย่างคือ รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray) หมายถึง ลำรังสีที่ยังออกมาจาก

หลอดรังสีเอกซ์และตกกระทบกับผนังห้องโดยตรงซึ่งยังไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการตกกระทบกับวัตถุสิ่งอื่นมาก่อน อีกอย่างหนึ่งคือ รังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray) หมายถึง ลำรังสีเอกซ์ที่มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนจากการกระเจิง (Scatter) หรือการรั่ว (Leakage) แล้วจึงตกกระทบกับผนังห้องด้านที่พิจารณา ซึ่งอย่างหลังนี้เราถือว่าแฟกเตอร์การใช้งานมีค่าเป็นหนึ่งเสมอ ($U = 1$) ทั้งนี้เนื่องจากไม่ว่าจะหันลำรังสีไปด้านใดก็จะมีรังสีกระเจิงและรังสีที่รั่วไปตกกระทบกับผนังด้านนี้ตลอดเวลา

- **Occupancy factor (T)** หมายถึง โอกาสของการเข้าไปครอบครองเพื่อใช้ประโยชน์จากพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งถ้าเป็นพื้นที่ที่มีคนเข้าไปใช้ประโยชน์อยู่ตลอดเวลาแล้ว ผนังห้องด้านนั้นจะต้องสร้างให้หนาที่สุด เพราะโอกาสที่บุคคลที่อยู่ด้านหลังของผนังห้องเอกซเรย์นั้นจะได้รับรังสีสูงมีมาก ในการคำนวณจึงกำหนดให้แฟกเตอร์ T ของผนังห้องด้านนั้นมีค่าสูงสุดคือ $T = 1$ ส่วนพื้นที่อื่น ๆ ที่บุคคลมีโอกาสเข้าไปครอบครองเพื่อใช้ประโยชน์แต่ไม่ตลอดเวลา หรือนาน ๆ ครั้ง แฟกเตอร์ T ก็จะมีค่าน้อยลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

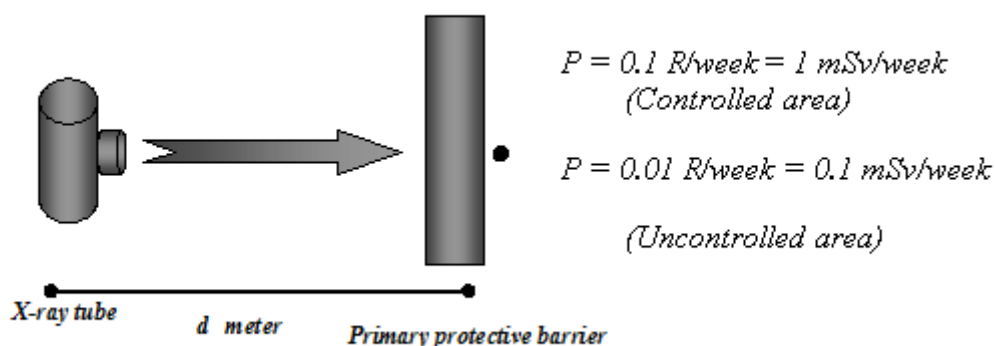
ตารางที่ 2.1 ค่า Occupancy factors, T^[7]

Occupancy	Area
Full occupancy ($T = 1$)	Work areas such as offices, laboratories, shops, wards, nurses' stations; living quarters; children's play areas; and occupied space in nearby buildings.
Partial occupancy ($T = 1/4$)	Corridors, rest rooms, elevators using operators, and unattended parking lots.
Occasional occupancy ($T = 1/16$)	Waiting rooms, toilets, stairways, unattended elevators, janitors' closets, and outside areas used only for pedestrians or vehicular traffic.

ในการคำนวณออกแบบความหนาของผนังห้องเอกซเรย์เราต้องพิจารณาชนิดของลำรังสีที่ตกกระทบผนังห้องเป็นหลัก ผนังด้านที่รับรังสีโดยตรงหรือรังสีปฐมภูมิเรียกว่า **“Primary protective barrier”** และผนังด้านที่รับรังสีทุติยภูมิเรียกว่า **“Secondary protective barrier”** โดยทั่วไปแล้วผนังด้านที่รับรังสีปฐมภูมิจะมีความหนากว่าด้านทุติยภูมิ สำหรับวัสดุที่นิยมใช้สร้างกำบังรังสีเอกซ์มีอยู่สองชนิดคือ แผ่นตะกั่ว (Lead) และคอนกรีต (Concrete) ทั่วไป ถ้าเลือกใช้แผ่น

ตะกั่วก็จะทำให้ผนังห้องบางมากแต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะราคาแพงและก่อสร้างไม่สะดวก ที่นิยมใช้กันมากคือ คอนกรีต เพราะมีราคาถูกก่อสร้างง่ายกว่าเพียงแต่ต้องสร้างหนากว่าเท่านั้น

(1) **Primary Protective Barrier** การคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่ตกกระทบด้วยรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งได้แก่ Maximum kV, Maximum mA, Workload เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังต้องทราบถึงระยะห่างระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับตำแหน่งที่ต้องการให้ค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ไม่เกินค่ากำหนดดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.9 แผนภาพผนังห้องด้านที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

จากภาพที่ 2.7 หลอดรังสีเอกซ์หันลำรังสีปฐมภูมิไปยังผนังห้องด้านหนึ่งซึ่งด้านนี้อาจเป็นพื้นที่ควบคุมหรือไม่ก็ได้ แต่ที่สำคัญจะต้องออกแบบความหนาของผนังให้กั้นลำรังสีไม่ให้ทะลุออกไปเกินค่ากำหนดสูงสุด โดยมีระยะห่างของหลอดรังสีเอกซ์กับผนังเท่ากับ d เมตร ในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องใช้หลักการของกฎกำลังสองผกผัน (invert square law) ซึ่งมีข้อจำกัดดังนี้คือ

(1) กฎนี้สามารถใช้ได้กับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเท่านั้น เพราะเราสามารถตัดทิ้งเรื่องการดูดกลืนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในอากาศได้เลย ถ้าเป็นอนุภาคบีตา (Beta particles) จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือถ้าเป็นอนุภาคแอลฟา (Alpha particles) ถึงแม้ว่ามีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง แต่มีระยะทางการเคลื่อนที่สั้นมากเพราะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมด

(2) ในทางทฤษฎีต้องถือว่าต้นกำเนิดรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมามีขนาดเล็กมาก ซึ่งเรียกว่าเป็น “ต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (point source)” จะมีการแผ่รังสีออกมาทุกทิศทางทุกทาง ส่วนในทาง

ปฏิบัติถึงแม้ว่าต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวมีรูปร่างและขนาด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางที่ห่างมากแล้ว เราก่อนๆ โลมว่าต้นกำเนิดรังสีมีขนาดเล็กมาก ๆ จนถือว่าเป็น ต้นกำเนิดรังสีแบบจุด

(3) ระหว่างต้นกำเนิดรังสีที่วางห่างจากหัววัดรังสี การใช้กฎกำลังสองผกผันถือว่าเราสามารถวางวัสดุกำบัง (shielding) ไว้ตรงตำแหน่งไหนก็ได้

(4) ไม่สามารถใช้กฎกำลังสองผกผันกับลำรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาแบบลำขนานได้

สำหรับการคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ จากภาพที่ 2.7 ที่ระยะ d เมตร ถ้ายังไม่มีผนังห้องเราวัดค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดได้เท่ากับ P (R/week) ซึ่งเป็นค่ากำหนด เมื่อเดือนเข้ามาที่ระยะห่าง 1 เมตร อัตราปริมาณรังสีจะต้องมีค่ามากขึ้นเกินค่ากำหนด ดังสมการต่อไปนี้

จากกฎกำลังสองผกผัน

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ I_1 คือ อัตราปริมาณรังสีที่ระยะ d_1

I_2 คือ อัตราปริมาณรังสีที่ระยะ d_2

กำหนดให้ I_1 ที่ระยะห่าง 1 เมตร มีค่าเป็น X R/week และให้ I_2 ที่ระยะห่าง d เมตร มีค่าเป็น P/T R/week ดังนั้นจะได้

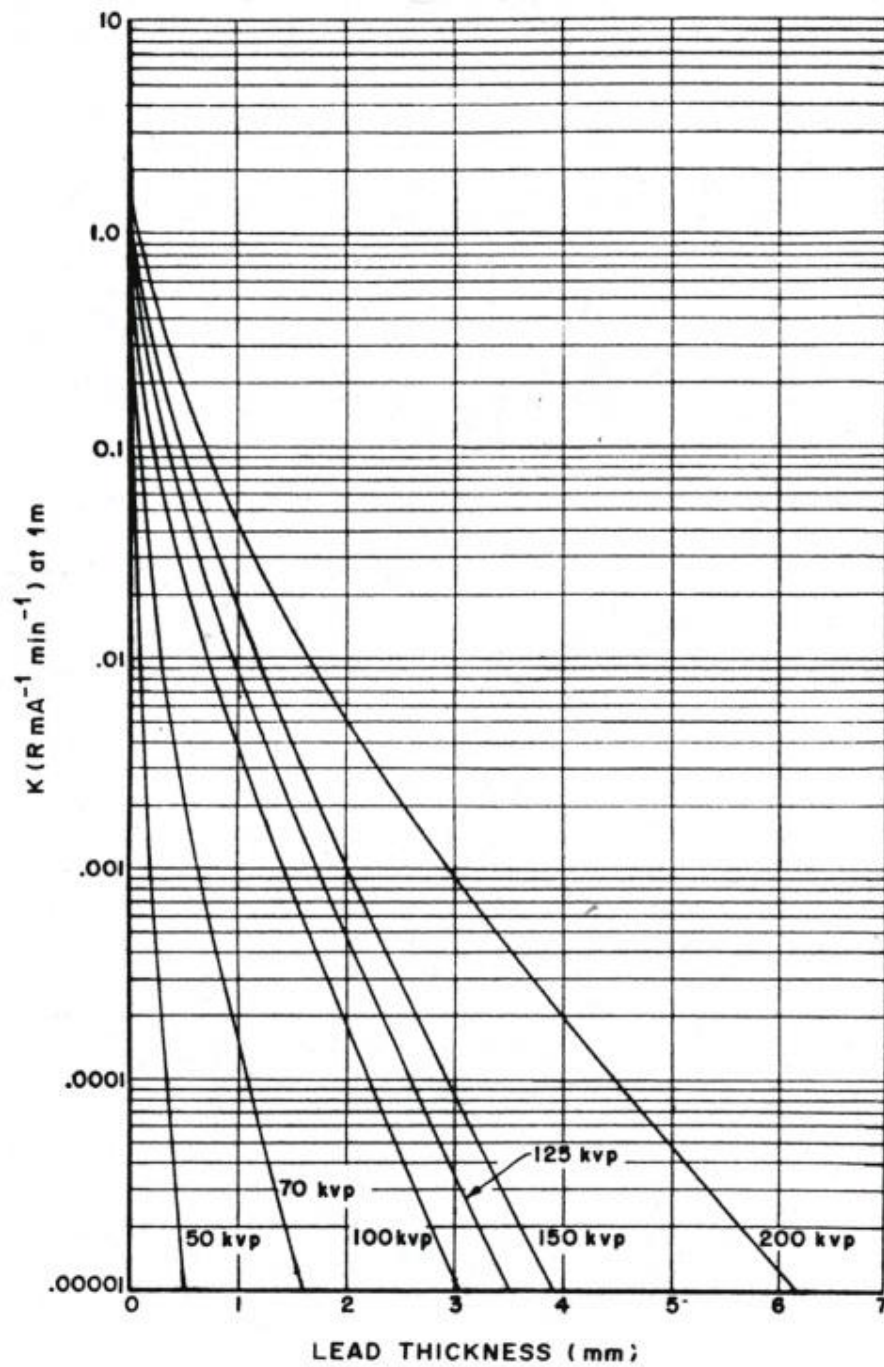
$$X = \frac{d^2 P}{T} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นค่าอัตราปริมาณรังสีที่ระยะ 1 เมตร ที่ยังไม่มีวัสดุกำบังรังสีมาวางกันลำรังสี ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงได้สร้างกราฟเปรียบเทียบ โดยการใช้วัสดุกำบังรังสีสองชนิดที่มีความหนาต่าง ๆ ได้แก่ แผ่นตะกั่ว และคอนกรีต วัดค่าอัตราปริมาณรังสีที่ระยะห่าง 1 เมตร หลังแผ่นวัสดุกำบังรังสีโดยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ (kVp) และค่าปริมาณการใช้งาน (mA-min) ซึ่งหมายถึง workload นั้นเอง ค่า workload (W) นี้ต้องคูณด้วย The used factor (U) และค่า Occupancy factor (T) เพราะต้องพิจารณาบริเวณด้านหลังกำบังรังสีด้วยว่าเป็นพื้นที่ควบคุมหรือไม่ และมีการใช้ประโยชน์นานแค่ไหน รวมทั้งมีสัดส่วนการหันลำรังสีมายังด้านนี้เป็นเท่าไร ซึ่งมีค่าเป็น WUT มีหน่วยเป็น mA-min คิดในหนึ่งสัปดาห์ เมื่อนำค่า WUT ไปหารกับค่าปริมาณ

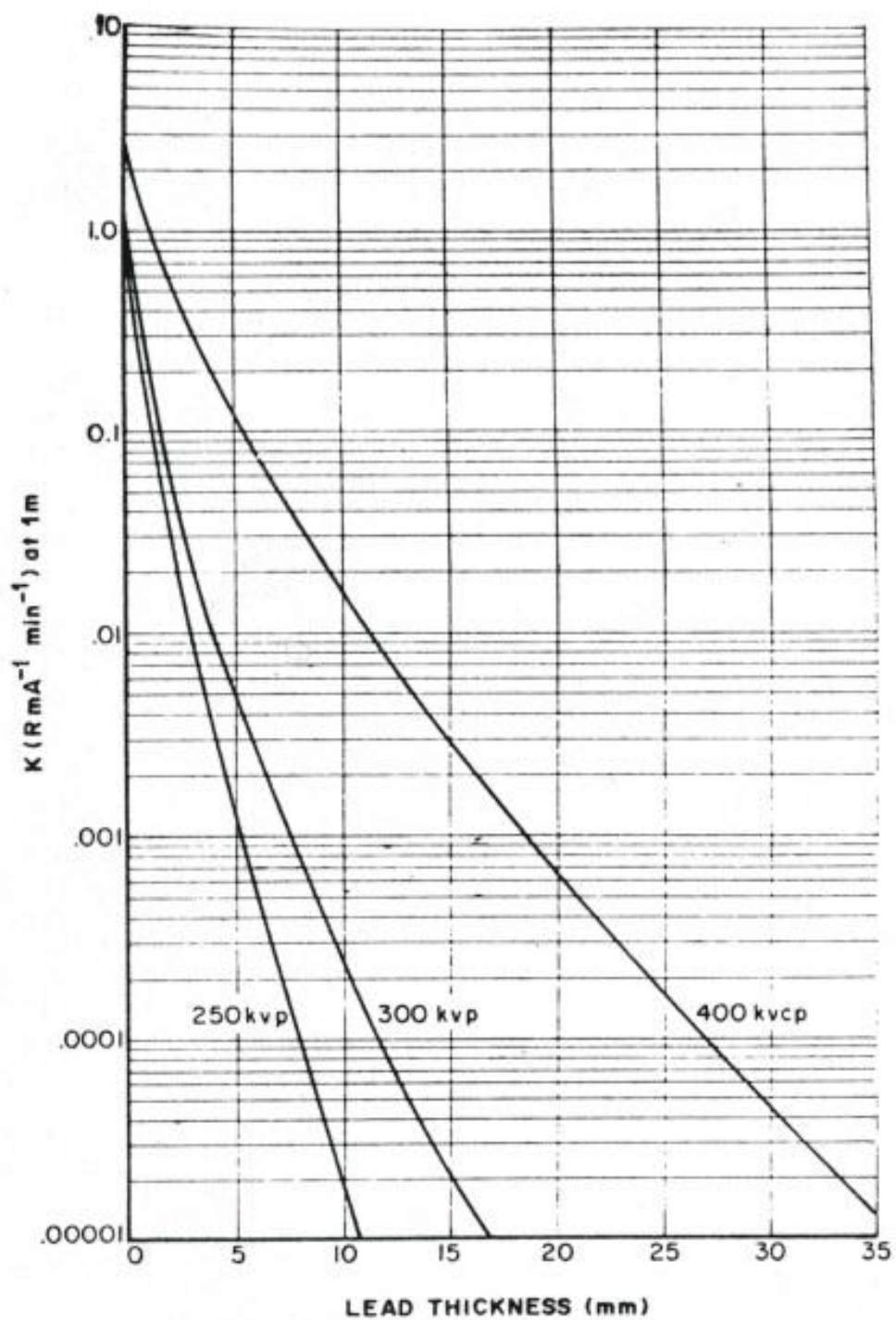
รังสีที่วัดได้จากการตั้งค่า kVp ไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง กำหนดให้เป็น K หรือปริมาณรังสีต่อการใช้งานใน 1 สัปดาห์ ซึ่งมีหน่วยเป็น R/mA-min at 1 m และเมื่อพิจารณาค่าอัตราปริมาณรังสีในสมการที่ (2.3) และหารด้วย WU จะพบว่ามีความหมายเดียวกัน จึงได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการที่ (2.4)

$$K = \frac{d^2 P}{WUT} \quad (2.4)$$

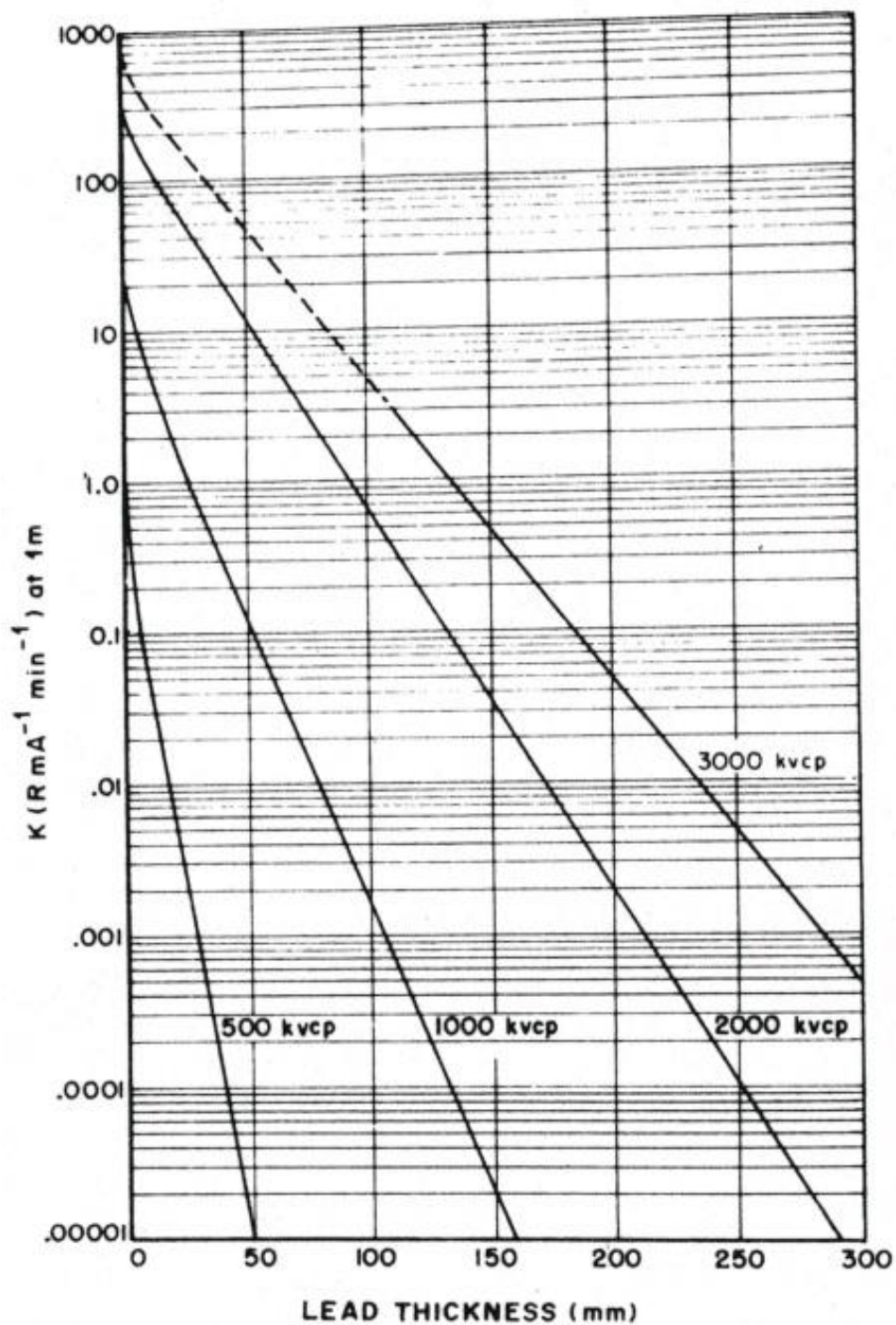
กราฟเปรียบเทียบในภาพที่ 2.8 – 2.12 ^[8] ได้ถูกสร้างขึ้นจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะเห็นว่าในที่นี้เราไม่พูดถึงค่า Build up factor เลย ทั้งนี้ก็เพราะว่าการจัดระบบวัดรังสีเป็นแบบ Poor geometry ซึ่งรวมเอาการกระเจิงของรังสีเข้าไปด้วยแล้ว



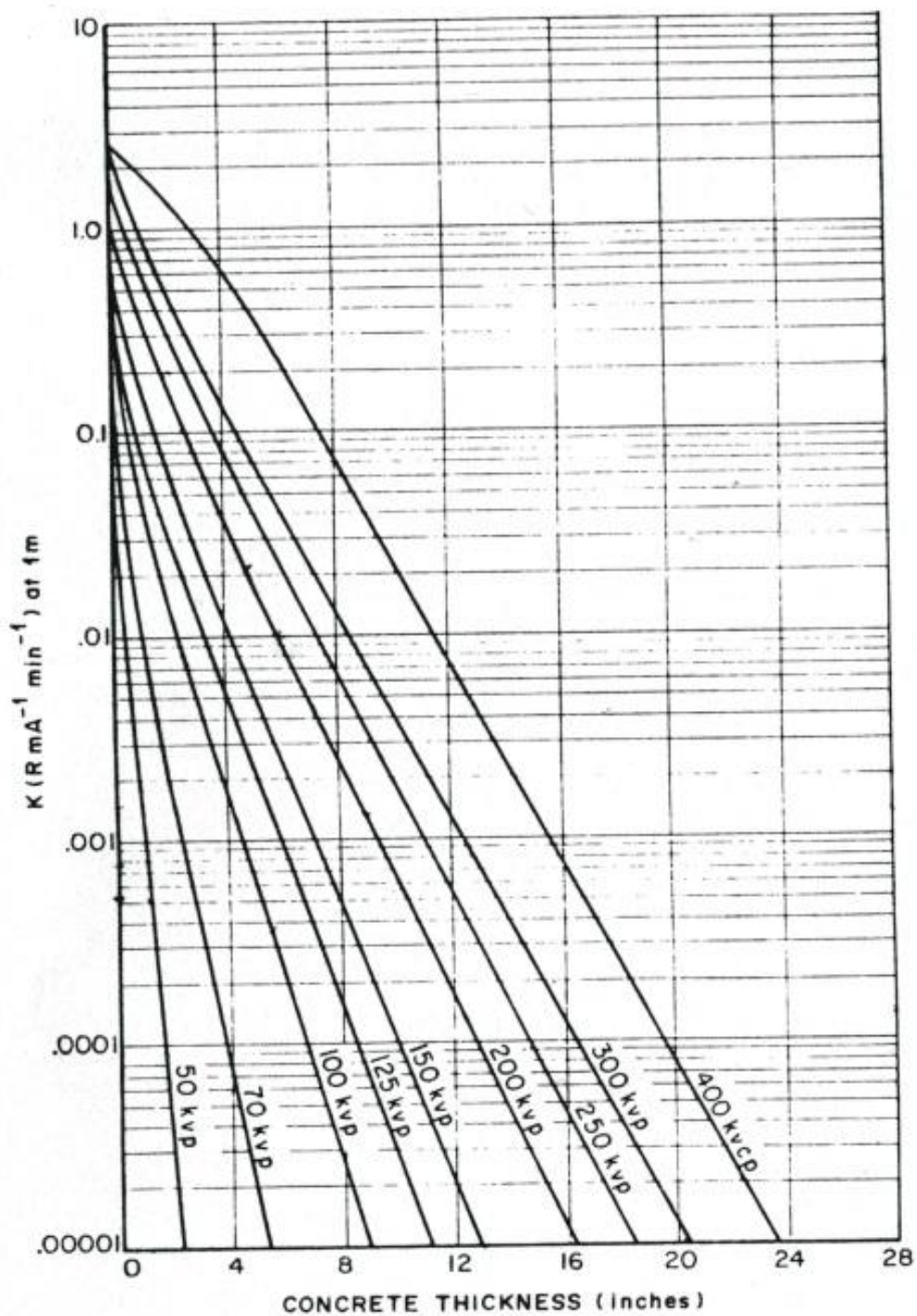
ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 50 – 200 kVp^[7]



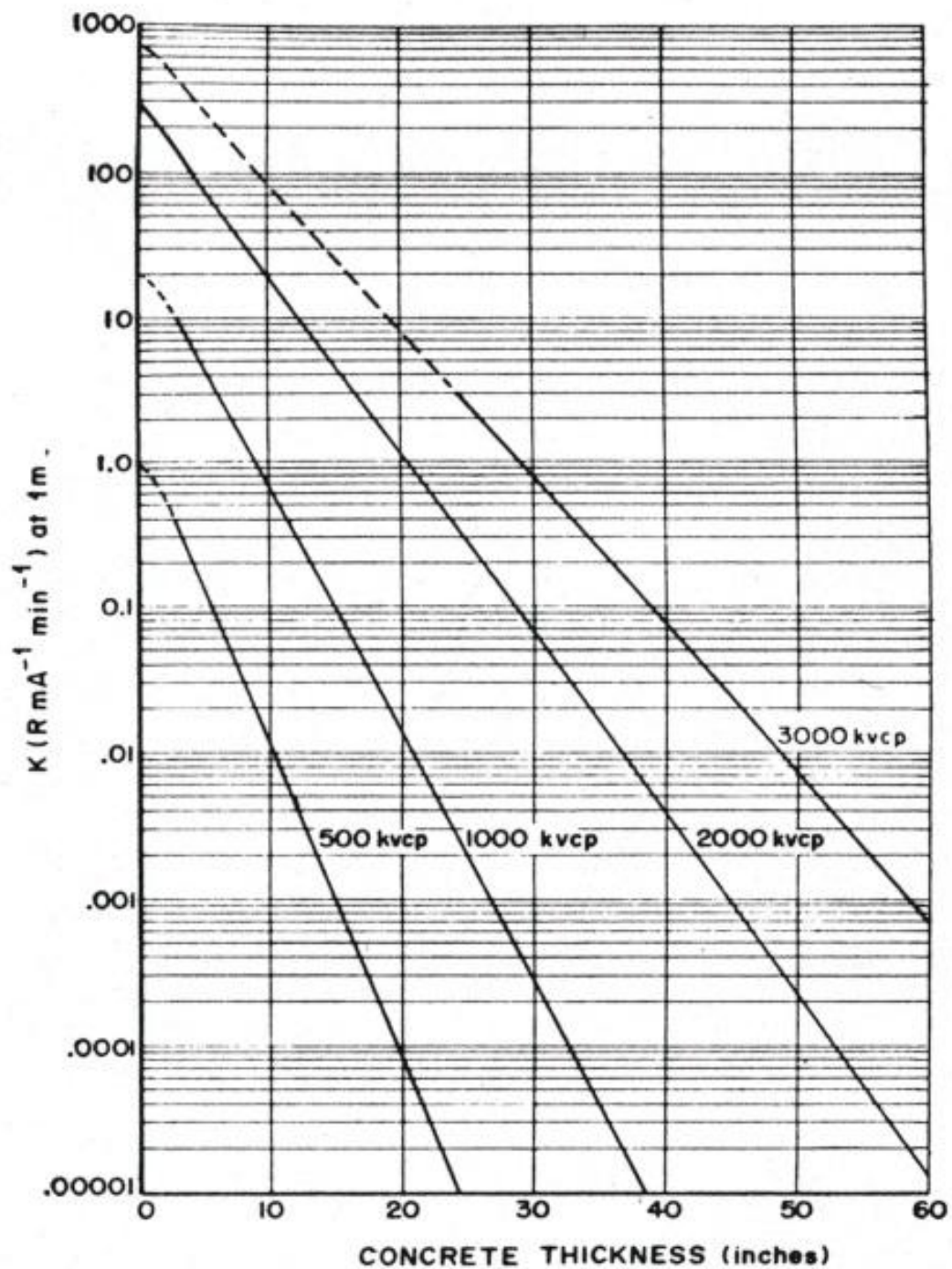
ภาพที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่างๆ ที่ความต่างศักย์ 250 – 400 kVp^[7]



ภาพที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นตะกั่วความหนาต่างๆ ที่ความต่างศักย์ 500 – 3000 kVp^[7]



ภาพที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K, หลังแผ่นคอนกรีตความหนาต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์ 50 – 400 kVp^[7]



ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณรังสี (R/mA-min at 1 m), K , หลังแผ่นคอนกรีตความหนาต่างๆ ที่ความต่างศักย์ 500 – 3000 kVp^[7]

ตัวอย่างการคำนวณความหนาผนังห้องเอกซเรย์ด้านปฐมภูมิ

เครื่องเอกซเรย์มีความต่างศักย์สูงสุด 125 kVp และกระแสไฟฟ้า 220 mA ใช้งานเป็นเวลา 90 วินาที ต่อสัปดาห์ ให้คำนวณความหนาผนังห้องเอกซเรย์ที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary protective barrier) ถ้าใช้ตะกั่วหรือคอนกรีตเพียงอย่างเดียว โดยหลอดรังสีเอกซ์ห่างจากผนังห้องเป็นระยะทาง 15 ฟุต ด้านหลังเป็นพื้นที่ไม่ควบคุม ซึ่งเป็นระเบียง (hallway) และหันลำรังสีเอกซ์ไปทางด้านผนังห้องดังกล่าวคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 3 ของเวลาทั้งหมดที่ใช้งาน

สำหรับพื้นที่ไม่ควบคุม กำหนดค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุด P คือ 0.01 R/week หรือ 0.1 mSv/week ระยะห่างระหว่างหลอดเอกซเรย์ถึงผนังห้อง d คือ 15/3.28 เมตร ปริมาณการใช้งานต่อสัปดาห์ W คือ 220 mA x 90/60 min/week = 330 mA-min/week แฟกเตอร์ของการเข้าครอบครอง T คือ 1/4 ดังนั้นจากสมการที่ (2.4) จะได้ค่า K เป็น

$$K = \frac{(15/3.28)^2 \times 0.01}{330 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{4}}$$

$$K = 7.61 \times 10^{-3} \text{ R/MA-min at 1 m}$$

จากภาพที่ 2.8 ที่ความต่างศักย์ 125 kVp อ่านค่าความหนาของแผ่นตะกั่ว ได้เท่ากับ 1.05 มิลลิเมตร และจากภาพที่ 2.11 อ่านค่าความหนาของคอนกรีตได้เท่ากับ 3.6 นิ้ว

(2) Secondary Protective Barrier สำหรับการคำนวณออกแบบความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ที่รับรังสีทุติยภูมินั้น จะต้องพิจารณาอยู่ 2 กรณี ได้แก่ รังสีกระเจิง (Scattering radiation) และรังสีรั่ว (Leakage radiation) ที่ออกมาจากหลอดรังสีเอกซ์ ทั้งนี้เนื่องจากผนังห้องดังกล่าวไม่ได้อยู่ในทิศทางของลำรังสีที่ใช้งาน การคำนวณความหนาต้องแยกพิจารณา ดังนั้นจึงได้ความหนาของผนังห้องเป็น 2 ค่า ซึ่งต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้เป็นค่าความหนาที่เหมาะสมค่าเดียว เราได้สมมติรังสีทั้งสองชนิดว่ามีลักษณะการแผ่รังสีเป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด และถือว่าสัดส่วนของลำรังสีที่ตกกระทบผนังห้องด้านทุติยภูมิเป็น 1 เสมอ ($U = 1$) เพราะไม่ว่าจะหันลำรังสีไปทางทิศใดก็จะมีทั้งรังสีกระเจิงและรังสีรั่วไปยังผนังด้านนี้ตลอดเวลาที่เครื่องเอกซเรย์ทำงาน

ในการพิจารณาความหนาจากผลการคำนวณของทั้งแบบรังสีกระเจิงและแบบรังสีรั่ว มีข้อความสำคัญดังนี้คือ

(1) ถ้าผลต่างของความหนาทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า ความหนา 1 เท่าของ TVL (Tenth Value Layer) เราพิจารณาเลือกใช้ค่าความหนาที่มากกว่านั้นได้เลย เพราะถือว่าค่าความหนาที่น้อยกว่านั้นทำหน้าที่กั้นรังสีเอกซ์ปริมาณต่ำ ๆ ใ้ได้อย่างง่ายดาย ส่วนค่าความหนาที่มากกว่าก็สามารถกั้นปริมาณรังสีสูงกว่าได้อย่างสบาย ดังนั้นจึงเลือกความหนาที่มากกว่ากั้นปริมาณรังสีทั้งสองแบบได้เพียงพอ

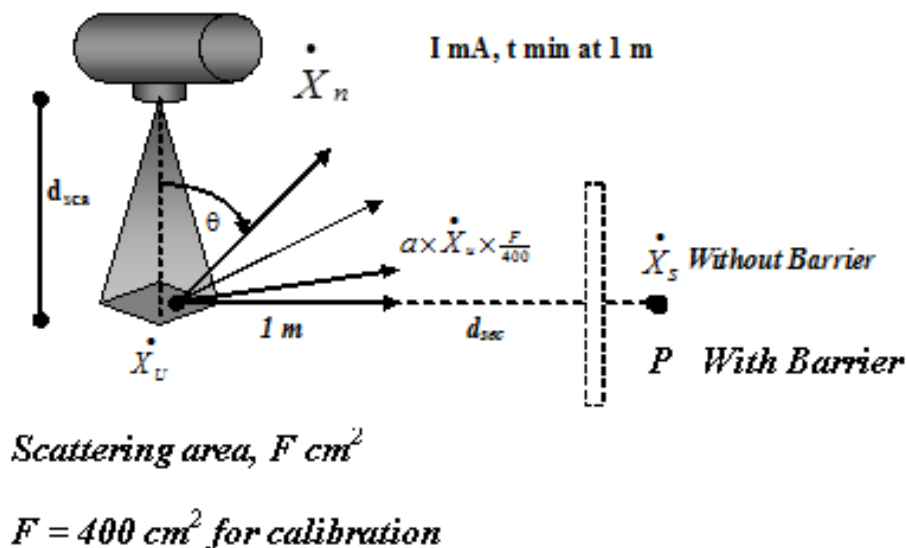
(2) ถ้าผลต่างของความหนาทั้งสองแบบมีค่าน้อยกว่า ความหนา 1 เท่าของ TVL เราเลือกค่าความหนาที่มากกว่าเล็กน้อยนั้น แล้วเพิ่มให้หนาขึ้นอีก 1 เท่าของ HVL (Half Value Layer) เพราะความหนาจากทั้งสองแบบมีผลต่อปริมาณรังสีพอสมควร ดังนั้นการเลือกความหนาที่มากกว่าแล้วเพิ่มความหนาอีก 1 HVL จึงทำให้เพียงพอต่อการกำบังรังสี สำหรับค่า TVL และค่า HVL แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า HVL และTVL ของตะกั่วและคอนกรีต^[8]

Peak Voltage (kVp)	Lead (mm)		Concrete (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL
50	0.06	0.17	0.43	1.50
70	0.17	0.52	0.84	2.80
100	0.27	0.88	1.60	5.30
125	0.28	0.93	2.00	6.60
150	0.30	0.99	2.24	7.40
200	0.52	1.70	2.50	8.40
250	0.88	2.90	2.80	9.40
300	1.47	4.80	3.10	10.40
400	2.5	8.30	3.30	10.90
500	3.6	11.90	3.60	11.70
1,000	7.9	26.00	4.40	14.70
2,000	12.5	42.00	6.40	21.00
3,000	14.5	48.50	7.40	24.50
4,000	16.0	53.00	8.80	29.20

(2.1) **Scattering radiation** รังสีที่กระเจิงจากการตกกระทบวัตถุไปยังผนังห้อง จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยสองอย่างด้วยกัน อย่างแรกก็คือ เครื่องเอกซเรย์ต้องให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ใช้งาน ซึ่งย่อมขึ้นอยู่กับกระแส (mA) ระยะเวลาที่ใช้งาน และพลังงานของรังสีเอกซ์ ส่วนอีกอย่างหนึ่งก็คือ การจัดระบบ ซึ่งได้แก่ การปรับขนาดความกว้างในการตกกระทบของลำรังสี มุมตกกระทบ ระยะทางจากวัตถุถึงผนังห้อง และระยะจากหลอดรังสีเอกซ์ถึงวัตถุ

ในการกระเจิงนั้น จะพิจารณาเป็นส่วน ๆ ไป ซึ่งในตอนแรกเราให้ลำรังสีเอกซ์ถูกปลดปล่อยออกจากหลอดรังสีเอกซ์มายังวัตถุ โดยมีระยะทางเป็น d_{sc} ในทางปฏิบัติแนวคิดในการคำนวณเราตั้งค่าอัตราปริมาณรังสี (exposure rate) เป็น \dot{X}_n เรียกว่า “Normalized exposure rate” โดยปรับกระแสไว้ที่ 1 mA ที่ค่าความต่างศักย์ค่าหนึ่ง ใช้เครื่องวัดรังสีวางไว้ที่ระยะ 1 เมตร วัดค่าออกมา จากนั้นก็ใช้กฎกำลังสองผกผันคำนวณค่าอัตราปริมาณรังสีมาที่ระยะ d_{sc} ได้ค่าเป็น \dot{X}_u ซึ่งก็คือ อัตราปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบวัตถุ (incident radiation) สำหรับพื้นที่ที่เปิดให้ลำรังสีเอกซ์ตกกระทบเท่ากับ 400 cm^2 จากนั้นจึงใช้หัววัดรังสีวัดอัตราปริมาณรังสีที่กระเจิงออกไปห่างจากวัตถุ 1 เมตร ณ มุมต่าง ๆ และค่าความต่างศักย์ของรังสีเอกซ์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งได้สรุปค่าอัตราส่วนการกระเจิง (scattering ratio) ระหว่างรังสีตกกระทบกับรังสีกระเจิงเพื่อใช้เป็นค่าแก้ไขในการคำนวณต่อไปดังตารางที่ 2.3



ภาพที่ 2.15 แผนภาพการกระเจิงของรังสีเอกซ์

กำหนดให้ a คืออัตราส่วนการกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อรังสีตกกระทบที่ระยะห่างจากพื้นที่ตกกระทบ 1 เมตร โดยอัตราส่วนดังกล่าวขึ้นกับมุมกระเจิง และพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยกำหนดพื้นที่ตกกระทบเป็น 400 cm^2

ตารางที่ 2.3 ค่าอัตราส่วน (a) การกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อรังสีตกกระทบ^[8]

X – rays	30°	45°	60°	90°	120°	135°
50 kV	0.0005	0.0002	0.00025	0.00035	0.0008	0.0010
70 kV	0.00065	0.00035	0.00035	0.0005	0.0010	0.0013
100 kV	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013	0.0020	0.0022
125 kV	0.0018	0.0015	0.0015	0.0015	0.0023	0.0025
150 kV	0.0020	0.0016	0.0016	0.0016	0.0024	0.0026
200 kV	0.0024	0.0020	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
250 kV	0.0025	0.0021	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
300 kV	0.0026	0.0022	0.0020	0.0019	0.0026	0.0028
4 MV	-	0.0027	-	-	-	-
6 MV	0.007	0.0018	0.0011	0.0006	-	0.0004
Gamma Rays						
Cs-137	0.0065	0.0050	0.0041	0.0028	-	0.0019
Co-60	0.0060	0.0036	0.0023	0.0009	-	0.0006

ปริมาณรังสีตกกระทบจากหลอดรังสีเอกซ์ – วัตถุ

\dot{X}_n = อัตราปริมาณรังสีที่ระยะ 1 เมตร (กระแส 1 mA)

I = กระแสไฟฟ้าของหลอดรังสี (mA)

d_{sca} = ระยะทางจากหลอดรังสีเอกซ์ถึงวัตถุ (m)

จากกฎกำลังสองผกผัน

$$\frac{\dot{X}_u}{\dot{X}_n \times I} = \left(\frac{1}{d_{sca}} \right)^2 \quad (2.5)$$

หรือ

$$\dot{X}_u = \frac{\dot{X}_n \times I}{d_{sca}^2} \quad (2.6)$$

ปริมาณรังสีจากวัตถุกระเจิงไปยังตำแหน่งใด ๆ ทางด้านผนังห้อง

- \dot{X}_s = อัตราปริมาณรังสีที่ระยะ d_{sec} เมื่อยังไม่มีผนังห้อง (R/hr)
 d_{sec} = ระยะจากวัตถุถึงตำแหน่งใด ๆ (m)
 F = ขนาดความกว้างของพื้นที่ตกกระทบ (cm^2)
 t = ระยะเวลาใช้งานเครื่องเอกซเรย์ (minute)

$$\frac{\dot{X}_s}{a \times \dot{X}_u \times \frac{F}{400}} = \left(\frac{1}{d_{sec}} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$\dot{X}_s = \frac{a \times \dot{X}_u}{(d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \quad (2.8)$$

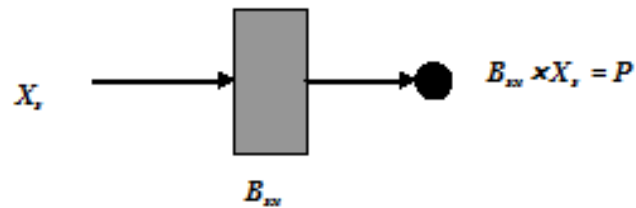
แทนค่า \dot{X}_u จากสมการที่ (2.6) ลงในสมการที่ (2.8)

$$\dot{X}_s = \frac{a \times \dot{X}_n \times I}{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \quad (2.9)$$

ใช้งานเป็นเวลา t min/week

$$X_s = \frac{a \times \dot{X}_n \times I}{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \times t \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.10) เป็นค่าปริมาณรังสี (exposure) ที่ยังไม่มีผนังห้อง ดังนั้นเมื่อมีผนังห้องมา กั้นจึงมีการลดทอน (attenuation) รังสีด้วยแฟกเตอร์ B_{sx} ด้วยความหนาที่ทำให้อัตราปริมาณรังสีไม่เกินมาตรฐานกำหนด P R/week



ภาพที่ 2.16 เมื่อมีผนังกั้นลำรังสีจะพิจารณาการลดทอน

จากสมการที่ (2.10)

$$B_{sx} \times X_s = B_{sx} \times \frac{a \times \dot{X}_n \times I}{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \times t \quad (2.11)$$

หรือ

$$P = B_{sx} \times \frac{a \times \dot{X}_n \times I}{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \times t \quad (2.12)$$

กำหนดให้ $K_{ux} = B_{sx} \times \dot{X}_n$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการสร้างกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 2.8 – 2.12

$$P = K_{ux} \times \frac{a \times I \times t}{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \quad (2.13)$$

จัดเทอมใหม่ได้เป็น

$$K_{ux} = P \times \frac{(d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2}{a \times I \times t} \times \frac{400}{F} \quad (2.14)$$

ในที่นี้ $I \times t = WT$ ซึ่งเป็นปริมาณการใช้รังสีเอกซ์ต่อสัปดาห์ แทนค่าในสมการที่ (2.14) จะได้

$$K_{ux} = \frac{P}{aWT} \times (d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2 \times \frac{400}{F} \quad (2.15)$$

พลังงานที่กระเจิงออกไปนั้น ถือว่ามีค่าเท่ากับพลังงานตกกระทบ เมื่อพลังงานตกกระทบ น้อยกว่า 500 kVp แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 500 kVp จะมีแฟกเตอร์ที่ใช้แก้ค่าการกระเจิงของพลังงานที่ทำให้ค่า K_{ux} (มีหน่วยเป็น R/mA-min per week) เปลี่ยนไปดังสมการที่ (2.16) และตารางที่ 2.4

$$K_{ux} = \frac{P}{aWTf} \times (d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2 \times \frac{400}{F} \quad (2.16)$$

สำหรับในงานวิจัยนี้ขนาดความกว้างของพื้นที่ตกกระทบ (F) จะคงที่เสมอตลอดการทดลอง ทั้งการหาค่าอัตราส่วนการกระเจิง (a) และการทดลองอื่น ๆ ดังนั้นอัตราส่วนของพื้นที่ตกกระทบจึงเป็น 1 และสมการที่ (2.16) จึงเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.17)

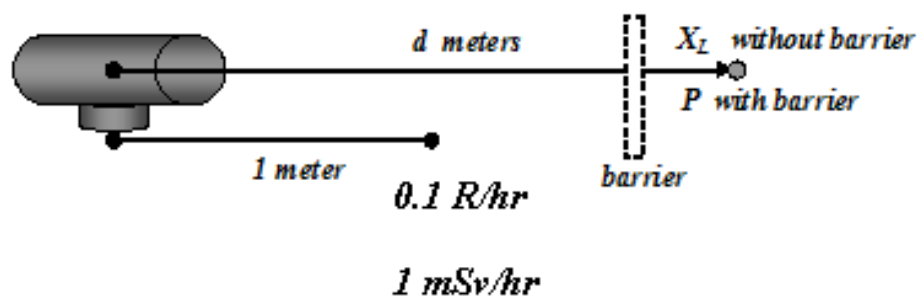
$$K_{ux} = \frac{P}{aWTf} \times (d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2 \quad (2.17)$$

โดยค่า P ในกรณีของพื้นที่ควบคุม (Controlled Area) มีค่าเท่ากับ 1 mSv/week และกรณีพื้นที่ไม่ควบคุม (Uncontrolled Area) มีค่าเท่ากับ 0.1 mSv/week

ตารางที่ 2.4 ค่าแฟกเตอร์ f ที่ขึ้นกับพลังงาน¹⁷⁾

kVp	f
500 or less	1
1000	20
2000	300
>2000	700

(2.2) **Leakage Radiation** เครื่องเอกซเรย์ทุกชนิดขณะใช้งานอยู่จะมีรังสีเอกซ์รั่วออกมาจากเฮาซิ่ง (housing) ซึ่งบริษัทผู้ผลิตจะต้องสร้างกำแพงรังสีขึ้นภายในเฮาซิ่งให้มีความหนาเพียงพอที่ไม่ทำให้ปริมาณรังสีเกินอัตรากำหนด ทั้งนี้ขึ้นกับพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยมีข้อกำหนดดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ในงานอุตสาหกรรมกำหนดว่าปริมาณรังสีที่ยอมให้รั่วได้ไม่เกิน **0.1 R/hr** หรือ **1 mSv/hr** ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีเอกซ์ 1 เมตร ในการนี้ถ้าระยะห่างของผนังห้องกับหลอดรังสีเอกซ์เป็น d เมตร เราสามารถใช้กฎกำลังสองผกผันคำนวณค่าอัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนั้นได้



ภาพที่ 2.17 แผนภาพการกำบังรังสีที่รั่วไปด้านผนังห้องทุติยภูมิ

จากภาพที่ 2.15 อัตราปริมาณรังสีเมื่อยังไม่มีผนังห้อง

$$\left(\frac{X_L}{0.1 \text{ R/hr}} \right) = \left(\frac{1}{d} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\dot{X}_L = \frac{0.1}{d^2} R/hr \quad (2.19)$$

เมื่อเปิดเครื่องเอกซเรย์ใช้งานเป็นเวลา t min/week

$$X_L = \frac{0.1}{d^2} \times \frac{t}{60} \frac{R}{hr} \times \frac{hr}{week}$$

หรือ

$$X_L = \frac{0.1}{d^2} \times \frac{t}{60} \frac{R}{week} \quad (2.20)$$

และปริมาณการใช้งานคือ $WUT = It$, โดยที่ $U = 1$ สำหรับการรั่ว

$$t = \frac{WT}{I}$$

$$X_L = \frac{1}{d^2} \times \frac{WT}{600I} \frac{R}{week} \quad (2.21)$$

และกรณีที่มีผนังห้องกั้นลำรังสี

$$P = B_{Lx} \times X_L$$

$$P = B_{Lx} \times \frac{1}{d^2} \times \frac{WT}{600I} \quad (2.22)$$

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 600I}{WT} \quad (2.23)$$

ความหนาของผนังห้องสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24) ดังนี้

$$B_{Lx} = \frac{1}{2^n} = e^{-\mu t} = 2^{-x/HVL} \quad (2.24)$$

เมื่อ	n	คือ จำนวนเท่าของความหนา HVL
	x	คือ ความหนาของผนังห้อง
	μ	คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์

จากสมการที่ (2.18) ถ้าเปลี่ยนหน่วยอัตราปริมาณรังสีที่รั่วจากหลอดเอกซเรย์เป็นหน่วย mSv/hr จะได้ความสัมพันธ์ของสมการเป็นสมการที่ (2.25)

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 60I}{WT} \quad (2.25)$$

โดยค่า P ในกรณีของพื้นที่ควบคุม (Controlled Area) มีค่าเท่ากับ 1 mSv/week และกรณีพื้นที่ไม่ควบคุม (Uncontrolled Area) มีค่าเท่ากับ 0.1 mSv/week

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีทุติยภูมิ ซึ่งเรียกว่า “Secondary protective barrier”

ตัวอย่างการคำนวณผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีทุติยภูมิ

กำหนดให้ เครื่องเอกซเรย์ขนาด 250 kVp และ 20 mA ปรับขนาดพื้นที่ตกกระทบเป็น 400 cm² มีปริมาณการใช้งานเป็น 20,000 mA-min/week ติดตั้งไว้ห่างจากผนังห้องด้านหนึ่งเป็นระยะทาง 3 เมตร โดยด้านหลังเป็นพื้นที่ไม่ควบคุมแต่มีการใช้ประโยชน์อยู่ตลอดเวลา ระยะห่างระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับวัตถุ 50 เซนติเมตร

เราสามารถคำนวณความหนาของผนังห้องดังกล่าวได้โดยแยกเป็นสองกรณีคือ

(1) **Scatter radiation** จากสมการที่ (2.16)

$$K_{ux} = \frac{P}{aWTF} \times (d_{sca})^2 \times (d_{ssc})^2 \times \frac{400}{F}$$

P = 0.01 R/hr เป็นพื้นที่ไม่ควบคุม

$$W = 20,000 \text{ mA-min/week}$$

$a = 0.0019$ ถือว่ากระเจิงทำมุม 90 องศา กับลำรังสีตกกระทบบดงตารางที่ 3

$$d_{\text{sc}} = 0.5 \text{ m}, \quad d_{\text{sec}} = 3 \text{ m}, \quad F = 400 \text{ cm}^2, \quad f = 1, \quad T = 1$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$K_{ux} = \frac{(0.01)(0.5)^2(3)^2}{0.0019 \times 20000 \times 1 \times 1} \times \frac{400}{400}$$

$$K_{ux} = 5.29 \times 10^{-4}$$

เมื่อนำค่า K_{ux} ไปอ่านค่าความหนาของคอนกรีตที่ 250 kVp ในกราฟภาพที่ 2.11 พบว่า ต้องใช้คอนกรีตหนาเท่ากับ 30 เซนติเมตร

(2) Leakage radiation จากสมการที่ (2.22)

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 600I}{WT}$$

$P = 0.01 \text{ R/hr}$ เป็นพื้นที่ที่ไม่ควบคุม

$$W = 20,000 \text{ mA-min/week}$$

$d = 3 \text{ m}$ ระยะจากหลอดรังสีเอกซ์ถึงผนังห้องด้านทุติยภูมิ

$I = 20 \text{ mA}$ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเป็นความเข้มของลำรังสีเอกซ์

$T = 1$ (Occupancy factor) มีการใช้พื้นที่ตลอดเวลา

$$\text{ดังนั้น } B_{Lx} = \frac{0.01 \times 3^2 \times 600(20)}{(20000)(1)}$$

$$B_{Lx} = 0.054$$

และจากสมการที่ (2.23)

$$B_{Lx} = \frac{1}{2^n}$$

$$0.054 = \frac{1}{2^n}$$

$$n = 4.21$$

พบว่า จะต้องใช้คอนกรีตที่มีความหนาเป็น 4.21 เท่าของความหนา HVL ซึ่งค่าความหนา 1 HVL ของคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 250 kVp เท่ากับ 2.8 cm ดังนั้น จึงต้องใช้คอนกรีตหนา $4.21 \times 2.8 = 11.8 \text{ cm}$ สำหรับกรณี Leakage radiation

พิจารณาผลต่างกันจากทั้งกรณีรังสีกระเจิงและการรั่วของรังสี คือ $30 - 11.8 = 18.2 \text{ cm}$ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า 1 TVL ที่ความต่างศักย์ 250 kVp ซึ่งเท่ากับ 9.4 cm พบว่า ผลต่างมีค่ามากกว่า 1 TVL ดังนั้นจึงเลือกค่าความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ที่คำนวณจากกรณีการกระเจิงของรังสี (ซึ่งมีค่ามากกว่า)

ดังนั้นการออกแบบคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีทุติยภูมิ จากตัวอย่างข้างต้น ได้ความหนาเป็น 30 เซนติเมตร

2.7 การลดทอนรังสีเอกซ์^[4]

เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านสสาร บางส่วนของรังสีถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ บางส่วนก็จะกระเจิงไป และบางส่วนผ่านออกมาได้ ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล ถ้า I_0 เป็นความเข้มเดิมของรังสีเอกซ์พลังงานเดียวที่เป็นขนานแคบ ๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนา x เซนติเมตร ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านตัวกลางออกมาได้ คือ I สามารถได้จากสมการต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.26)$$

โดยค่า μ คือ สัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้นรวม (total linear attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น cm

จากค่า μ สามารถคำนวณค่า HVL (half value layer) หรือความหนาของตัวกลางที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลงครึ่งหนึ่ง และ TVL (tenth value layer) หรือความหนาของตัวกลางที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง 1/10 เท่าของความเข้มเดิม ซึ่งหาได้จากสมการ

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.27)$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (2.28)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

- (1) เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ Rigaku รุ่น RF – 200EGM2 ปรับความต่างศักย์ได้ตั้งแต่ 70 – 200 kVp ปรับกระแสได้สูงสุด 5 mA
- (2) แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล จำนวน 100 แผ่น
- (3) แผ่นคอนกรีต ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 2 ซม. ความหนาแน่น 2.39 g / cm³
- (4) ถังน้ำทรงสี่เหลี่ยม 2 ถัง (ใช้เป็น phantom)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การหาค่า HVL, TVL และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต

(1) วัดปริมาณรังสีเอกซ์ (หน่วยเป็น mSv/mA-min) ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีเอกซ์ 1 เมตร โดยเพิ่มความหนาของแผ่นคอนกรีตซึ่งมีขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 2 ซม. ระหว่างหลอดรังสีเอกซ์ และแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล ปรับค่าความต่างศักย์หลอดรังสีเอกซ์ เป็น 70, 100, 150 และ 180 kVp ปรับค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 mA และเดินเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 10 วินาที โดยวัดด้วยแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล (OSLs) ซึ่งติดที่ถังน้ำ (ใช้น้ำแทน phantom) จำนวน 2 แผ่น วัดซ้ำอีก 1 ครั้งโดยเปลี่ยนแผ่น ไอเอสแอล ดังภาพที่ 3.1 – 3.3

(2) สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ที่ระยะ 1 เมตรกับความหนาของแผ่นคอนกรีต และคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ความต่างศักย์ 70, 100, 150 และ 180 kVp

(3) ทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เพื่อหาสมการในข้อ (2) ที่ความต่างศักย์ 80, 90, 110, 120, 130, 140, 160 และ 170 kVp

(4) คำนวณหา HVL และ TVL จากสมการที่คำนวณได้ในข้อ (2) และ (3)

(5) คำนวณค่า K (หน่วยเป็น mSv / mA – min at 1 m) จากค่าปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากการทดลอง ที่ความต่างศักย์ 70, 100, 150 และ 180 kVp และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 mA โดยใช้เวลาวัด 10 วินาที

(6) สร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า K ($\text{mSv} / \text{mA} - \text{min at 1 m}$) หรือปริมาณรังสีเอกซ์ต่อปริมาณการใช้งาน (workload) ของหลอดรังสีเอกซ์ใน 1 สัปดาห์ที่ระยะ 1 เมตร กับความหนาของแผ่นคอนกรีต และคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ความต่างศักย์ 70, 100, 150 และ 180 kVp

(7) ทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และความหนาของคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 80, 90, 110, 120, 130, 140, 160 และ 170 kVp

X-ray tube



Phantom

ภาพที่ 3.1 ลักษณะการจัดอุปกรณ์การทดลอง



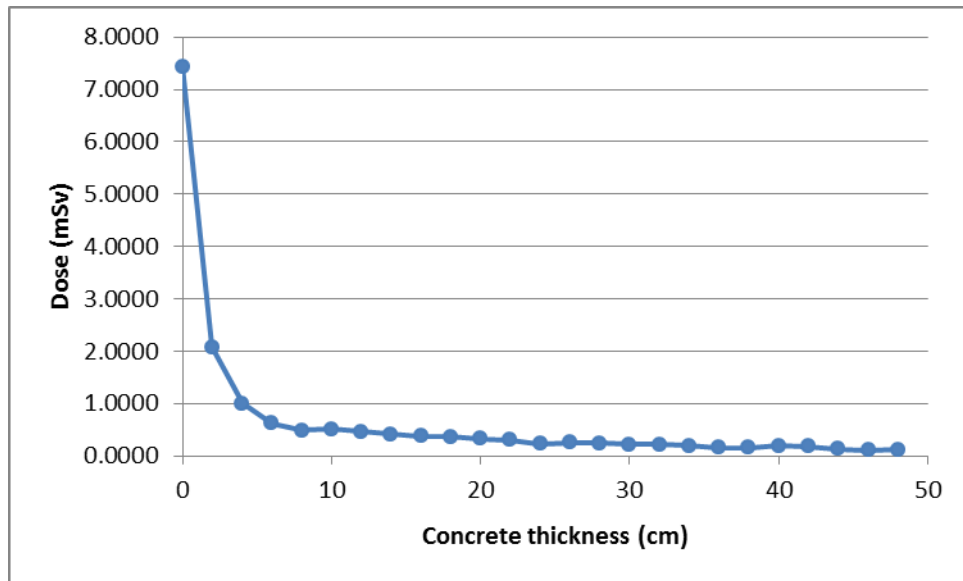
ภาพที่ 3.2 การติดตั้งแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล (OSLs) ด้านหน้า phantom



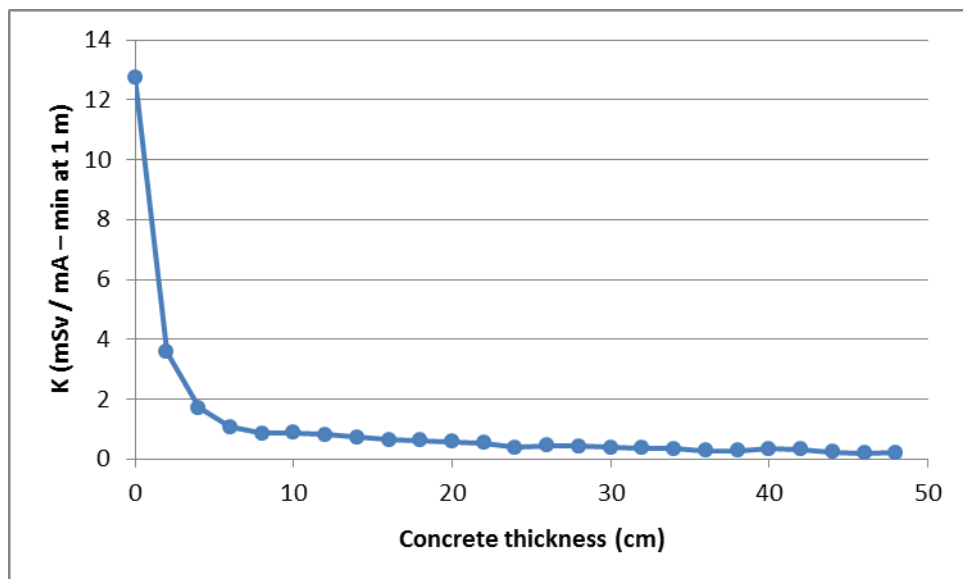
ภาพที่ 3.3 การจัดวางแผ่นคอนกรีตที่ตำแหน่งด้านหน้า phantom

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต
เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 70 kVp, 3.5 mA และ 10 sec

Thickness (cm)	ปริมาณรังสีเอกซ์ (mSv) ที่ระยะ 1 เมตร	K (mSv / mA – min at 1 m)
0	7.4400	12.754290
2	2.0800	3.565714
4	0.9950	1.705714
6	0.6225	1.067143
8	0.4925	0.844286
10	0.5075	0.870000
12	0.4675	0.801429
14	0.4200	0.720000
16	0.3775	0.647143
18	0.3625	0.621429
20	0.3325	0.570000
22	0.3075	0.527143
24	0.2275	0.390000
26	0.2600	0.445714
28	0.2475	0.424286
30	0.2200	0.377143
32	0.2125	0.364286
34	0.1925	0.330000
36	0.1575	0.270000
38	0.1600	0.274286
40	0.1925	0.330000
42	0.1850	0.317143
44	0.1375	0.235714
46	0.1100	0.188571
48	0.1200	0.165000



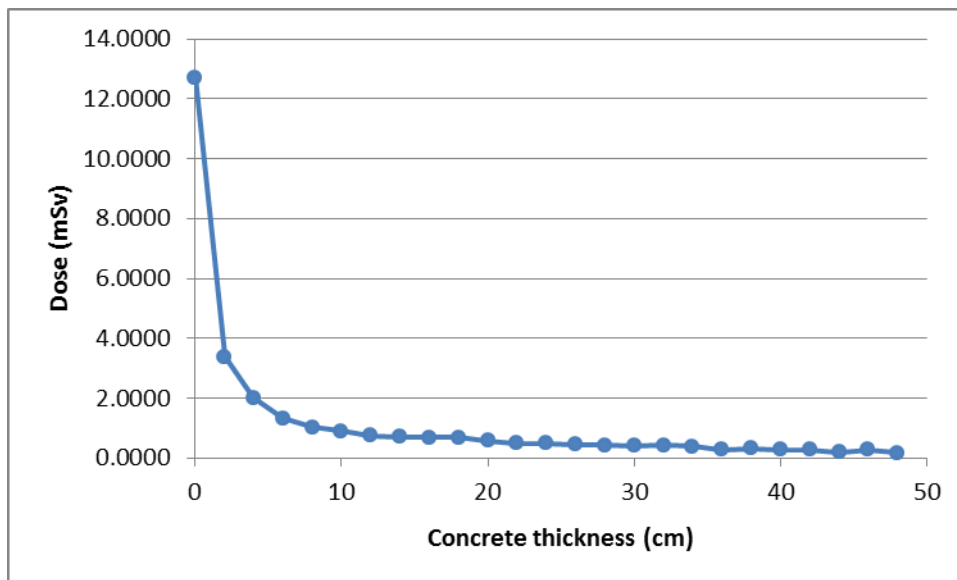
ภาพที่ 3.4 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 70 kVp



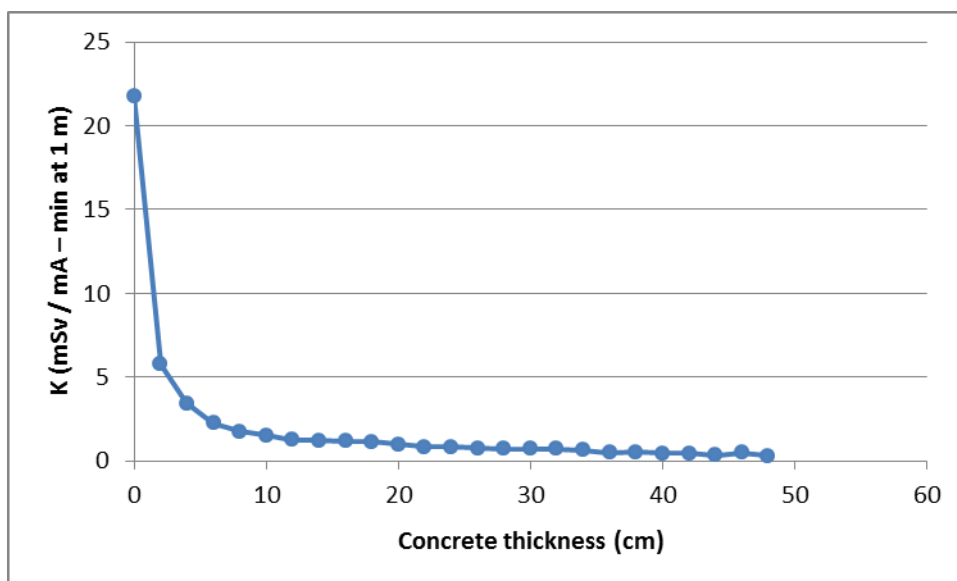
ภาพที่ 3.5 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต
เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 100 kVp, 3.5 mA และ 10 sec

Thickness (cm)	ปริมาณรังสีเอกซ์ (mSv) ที่ระยะ 1 เมตร	K (mSv / mA – min at 1 m)
0	12.7025	21.775710
2	3.3700	5.777143
4	2.0050	3.437143
6	1.3150	2.254286
8	1.0275	1.761429
10	0.8850	1.517143
12	0.7375	1.264286
14	0.7100	1.217143
16	0.6775	1.161429
18	0.6725	1.152857
20	0.5800	0.994286
22	0.4925	0.844286
24	0.4825	0.827143
26	0.4400	0.754286
28	0.4175	0.715714
30	0.4100	0.702857
32	0.4250	0.728571
34	0.3725	0.638571
36	0.2800	0.480000
38	0.3100	0.531429
40	0.2675	0.458571
42	0.2650	0.454286
44	0.2000	0.342857
46	0.2800	0.480000
48	0.1650	0.282857



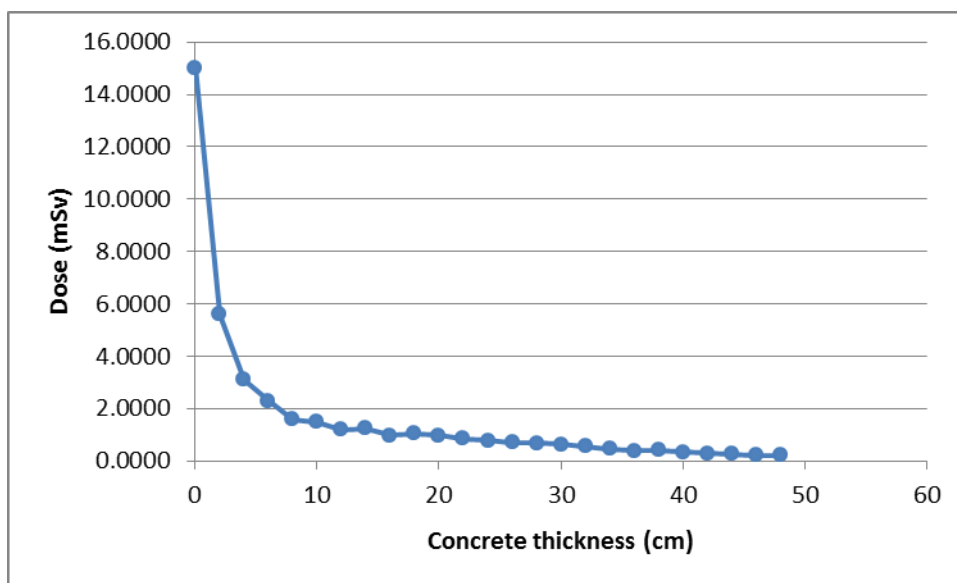
ภาพที่ 3.6 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 100 kVp



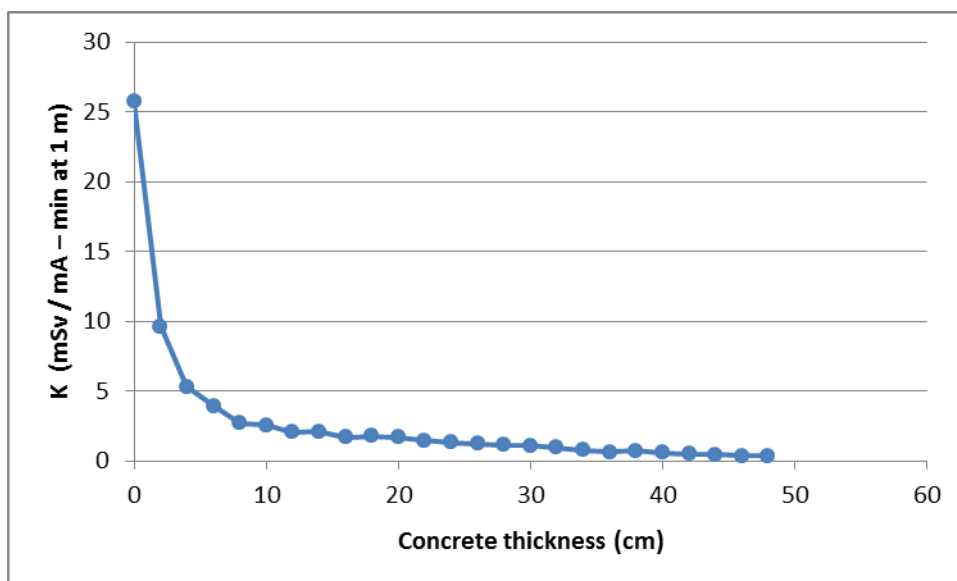
ภาพที่ 3.7 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต
เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 150 kVp, 3.5 mA และ 10 sec

Thickness (cm)	ปริมาณรังสีเอกซ์ (mSv) ที่ระยะ 1 เมตร	K (mSv / mA – min at 1 m)
0	15.0050	25.722860
2	5.6025	9.604286
4	3.1075	5.327143
6	2.3000	3.942857
8	1.5775	2.704286
10	1.5000	2.571429
12	1.1950	2.048571
14	1.2375	2.121429
16	0.9775	1.675714
18	1.0400	1.782857
20	0.9750	1.671429
22	0.8425	1.444286
24	0.7750	1.328571
26	0.7075	1.212857
28	0.6750	1.157143
30	0.6400	1.097143
32	0.5575	0.955714
34	0.4550	0.780000
36	0.3775	0.647143
38	0.4150	0.711429
40	0.3375	0.578571
42	0.3000	0.514286
44	0.2575	0.441429
46	0.2125	0.364286
48	0.2150	0.368571



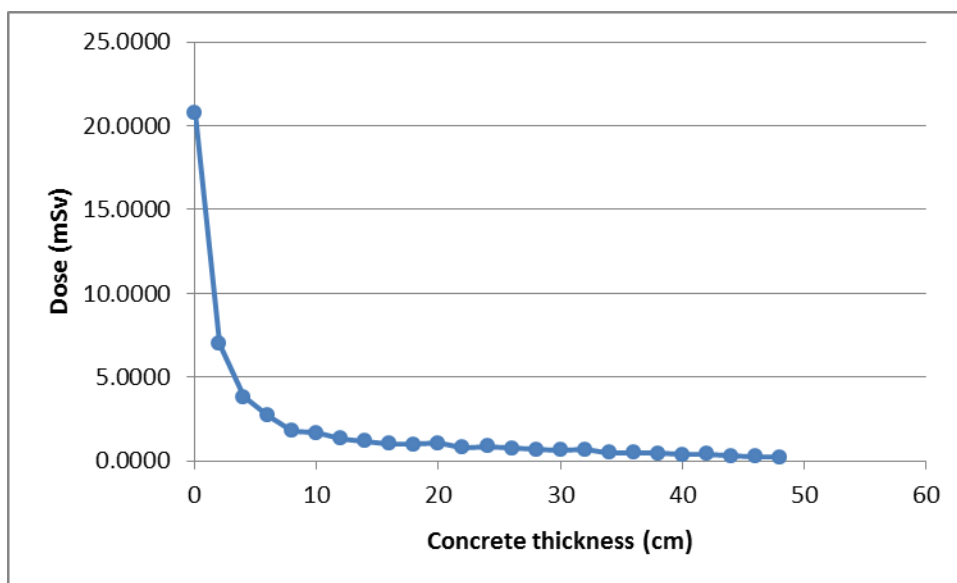
ภาพที่ 3.8 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 150 kVp



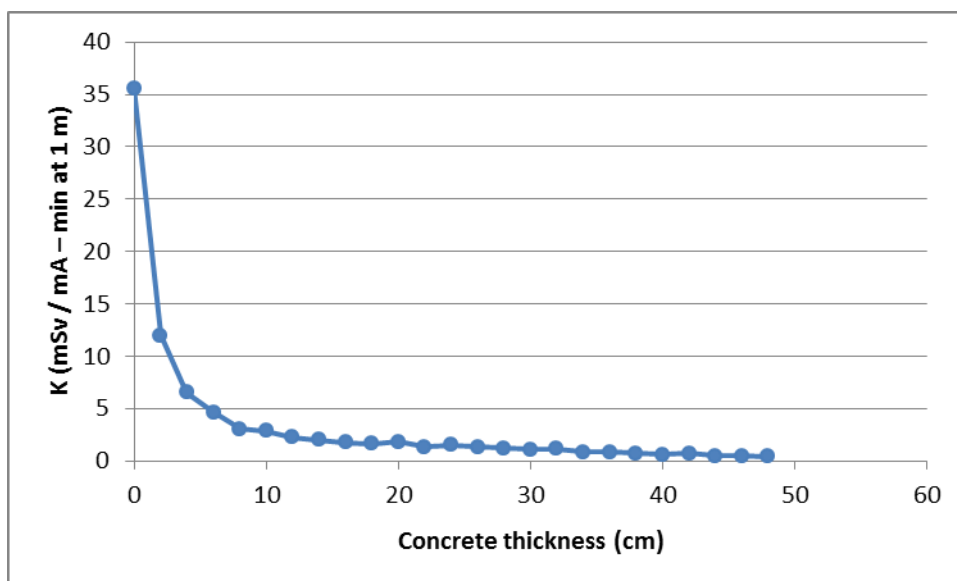
ภาพที่ 3.9 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดและค่า K ที่ความหนาต่าง ๆ ของคอนกรีต
เมื่อความต่างศักย์เท่ากับ 180 kVp, 3.5 mA และ 10 sec

Thickness (cm)	ปริมาณรังสีเอกซ์ (mSv) ที่ระยะ 1 เมตร	K (mSv / mA – min at 1 m)
0	20.7625	35.592860
2	6.9950	11.991430
4	3.7975	6.510000
6	2.7075	4.641429
8	1.7925	3.072857
10	1.6775	2.875714
12	1.3175	2.258571
14	1.1875	2.035714
16	1.0300	1.765714
18	0.9750	1.671429
20	1.0475	1.795714
22	0.7950	1.362857
24	0.8775	1.504286
26	0.7650	1.311429
28	0.6925	1.187143
30	0.6325	1.084286
32	0.6750	1.157143
34	0.4975	0.852857
36	0.4775	0.818571
38	0.4350	0.745714
40	0.3675	0.630000
42	0.4100	0.702857
44	0.2950	0.505714
46	0.2775	0.475714
48	0.2350	0.402857



ภาพที่ 3.10 กราฟปริมาณรังสีเอกซ์กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 180 kVp



ภาพที่ 3.11 กราฟค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีตที่ความต่างศักย์ 180 kVp

ตารางที่ 3.5 ค่า HVL และ TVL ของคอนกรีตที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ

kVp	HVL (cm)	TVL (cm)
70	0.75	2.51
80	0.98	3.25
90	1.20	3.99
100	1.42	4.73
110	1.57	5.22
120	1.72	5.70
130	1.86	6.19
140	2.01	6.69
150	2.16	7.17
160	2.21	7.36
170	2.27	7.52
180	2.32	7.70

3.2.2 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนการกระเจิง

(1) วัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและปริมาณรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกจากจุดกระทบที่ระยะห่าง 1 เมตร ทำมุม 90° ที่ค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์เป็น 70, 100, 150 และ 180 kVp โดยใช้แผ่นวัดรังสีไอเอสแอลและคำนวณอัตราส่วนการกระเจิง (scattering ratio, a) ระหว่างรังสีตกกระทบกับรังสีกระเจิงที่มีค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 3.12

(2) ทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เพื่อหาอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 80, 90, 110, 120, 130, 140, 160 และ 170 kVp



ภาพที่ 3.12 ลักษณะการจัดการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนการกระเจิงของรังสีเอกซ์

ตารางที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนการกระเจิงที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่มุม 90°

kVp	อัตราส่วนการกระเจิง (a)
70	0.004
80	0.004
90	0.004
100	0.004
110	0.0039
120	0.0038
130	0.0036
140	0.0035
150	0.0034
160	0.0033
170	0.0033
180	0.0033

3.2.3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังคอนกรีตสำหรับห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม โดยแบ่งการคำนวณเป็น 2 ส่วนคือ

(1) การคำนวณความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ (Primary Protective Barrier)

โดยกำหนดเงื่อนไขให้รังสีตกกระทบโดยตรงกับผนังห้อง ซึ่งต้องกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่

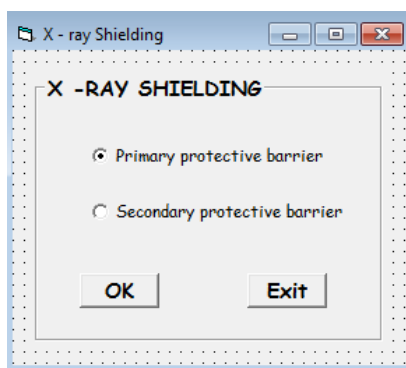
- Maximum kVp of X-ray
- Maximum mA of X-ray tube
- Workload (W), mA – min / week
- Use factor (U)
- Occupancy factor (T)

และคำนวณค่า K จากสมการที่ (2.4)

$$K = \frac{d^2 P}{WUT}$$

นำค่า K ที่คำนวณได้มาอ่านค่าความหนาของคอนกรีตจากกราฟ

ในการออกแบบโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ ได้ออกแบบให้สามารถเลือกการคำนวณได้ทั้งกรณีความหนาปฐมภูมิและความหนาทุติภูมิดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 เมนูหลักของโปรแกรมการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

เมื่อเลือก Primary protective barrier ก็จะปรากฏหน้าจอการคำนวณดังภาพที่ 3.14

ภาพที่ 3.14 ภาพโปรแกรมส่วน Primary Protective Barrier

จากภาพที่ 3.14 ข้อมูลในส่วนของ input ประกอบด้วย Maximum Permissible Dose, X-ray tube, Occupancy factor, Use factor, Workload

ส่วนข้อมูลของ output ประกอบด้วย K, Thickness of concrete

(2) การคำนวณความหนาของผนังห้องทุติยภูมิ (Secondary Protective Barrier)

ในการคำนวณความหนาของผนังห้องทุติยภูมิ กำหนดให้ค่า $U = 1$ เสมอ ซึ่งพิจารณาความหนาเป็น 2 กรณีได้แก่

(2.1) คำนวณกรณีรังสีกระเจิง (Scattering Radiation) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.17) โดยกำหนดให้ค่า $f=1$ เสมอ จะได้สมการ (3.1) และค่า K ที่คำนวณได้แทนในสมการเปรียบเทียบเพื่อคำนวณหาความหนาของผนังคอนกรีต ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26

$$K_{ux} = \frac{P}{aWT} \times (d_{sca})^2 \times (d_{ssc})^2$$

(2.2) คำนวณกรณีการรั่วของรังสี (Laekage Radiation) จากสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.24)

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 60I}{WT}$$

คำนวณ B_{Lx} จากสมการ (2.25) จากนั้นคำนวณความหนา

$$B_{Lx} = \frac{1}{2^n}$$

โดยนำค่า n ที่คำนวณได้คูณกับค่า HVL ที่ความต่างศักย์เดียวกันจะได้ ความหนาของคอนกรีตสำหรับกรณีการรั่วของรังสี

เมื่อคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีทุติยภูมิจากทั้งกรณีการกระเจิงของรังสีและการรั่วของรังสี ซึ่งจะได้ความหนาเป็น 2 ค่า จากนั้นพิจารณาว่าจะใช้ความหนาจากกรณีใดตามขั้นตอนต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ถ้าความหนาของผนังห้องทั้ง 2 กรณีต่างกันมากกว่า 1 เท่าของ TVL ดังนั้นจะเลือกใช้ความหนาที่มากกว่าเป็นความหนาของผนังห้องด้านที่รับรังสีทุติยภูมิ เช่น

สมมุติว่าความหนาของกรณีการกระเจิงของรังสีมากกว่ากรณีการรั่วที่ค่าความต่างศักย์ 100 kVp เท่ากับ 5.30 ซม. เราเลือกใช้ความหนาของกรณีการกระเจิงของรังสีได้เลย

กรณีที่ 2 ถ้าความหนาของผนังห้องทั้ง 2 กรณีต่างกันน้อยกว่า 1 เท่าของ TVL เราจะเลือกใช้ความหนาของผนังด้านที่มากกว่าโดยเพิ่มความหนาเข้าไปอีก 1 เท่าของ HVL เช่น

สมมุติว่า ถ้าความหนาของคอนกรีตกรณีรังสีกระเจิงมากกว่าดังนั้นความหนาของคอนกรีตที่ใช้จึงเท่ากับความหนาของคอนกรีตที่คำนวณได้รวมกับความหนา 1 HVL

จากภาพที่ 3.13 ซึ่งเป็นเมนูหลักเมื่อเลือก Secondary protective barrier ก็จะปรากฏหน้าจอ ดังภาพที่ 3.15 เมื่อใส่ข้อมูลค่า Maximum Permissible dose, Occupancy factor, Workload, ความต่างศักย์ของหลอดเอกซเรย์ กระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างหลอดเอกซเรย์ถึงชั้นงาน และระยะระหว่าง

หลอดเอกซเรย์ถึงผนังห้อง โปรแกรมก็จะคำนวณความหนาของห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีทุติยภูมิให้ทันที ดังภาพที่ 3.15

ภาพที่ 3.15 ภาพโปรแกรมส่วน Secondary Protective Barrier

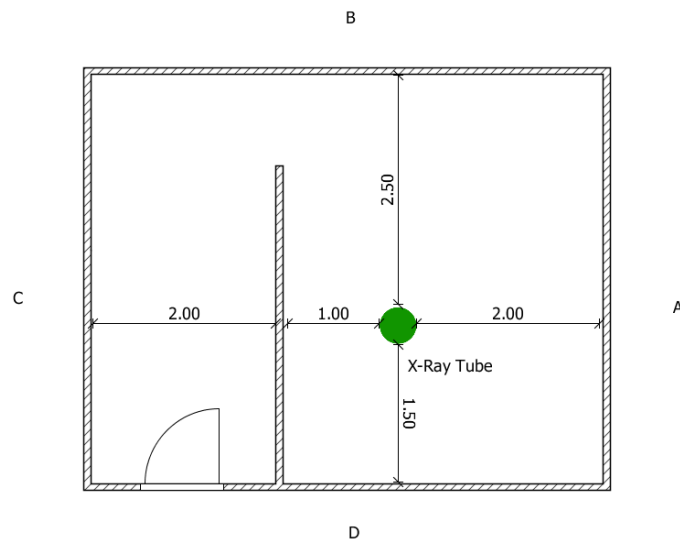
จากภาพที่ 3.15 ข้อมูลในส่วนของ input ประกอบด้วย Maximum Permissible Dose, X-ray tube, Occupancy factor, Workload, Target to Object distance

ส่วนข้อมูลของ output ประกอบด้วย TVL, HVL, Scattering Radiation, Leakage Radiation, Thickness of concrete

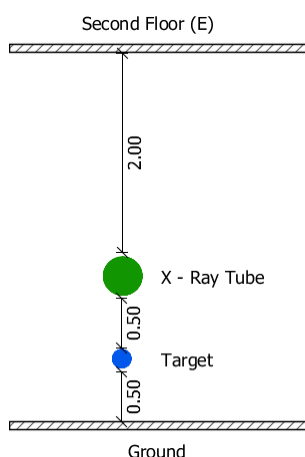
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 เงื่อนไขในการคำนวณหาความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

กำหนดห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 5 เมตร x 4 เมตร x 3 เมตร อยู่ติดกับพื้นที่ใช้งานอื่น ถือว่ามีความสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ใช้พื้นที่โดยรอบห้องเอกซเรย์ ในที่นี้สามารถกำหนดค่าต่าง ๆ ตามเงื่อนไขของพื้นที่ที่รอบ ๆ ห้องเอกซเรย์ เช่น The Use Factor (U) และ Occupancy Factor (T) กำหนดให้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ติดตั้งอยู่ภายในห้องห่างจากผนังห้องด้าน A ระยะทาง 2 เมตร ซึ่งเป็นผนังห้องด้านที่รับรังสีแบบปฐมภูมิ (primary protective barrier) ส่วนผนังห้องด้าน B, C, D และเพดาน รับรังสีแบบทุติยภูมิ (secondary protective barrier) ส่วนพื้นห้องกำหนดว่าเป็นชั้นที่อยู่บนพื้นดิน (ground floor) โดยหลอดรังสีเอกซ์ถูกติดตั้งให้อยู่เหนือพื้นดิน 1 เมตร ดังนั้นจึงอยู่ห่างจากเพดาน 2 เมตร ในทางปฏิบัติการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์มักจะหันลำรังสีลงพื้นห้องซึ่งจะทำให้ผนังห้องทุกด้านรับรังสีแบบทุติยภูมิ แต่ในกรณีศึกษาสามารถจะหันลำรังสีได้ทุกด้านซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาของผนังทุกด้านโดยสะดวกด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ดังภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Top View)



ภาพที่ 4.2 ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (Front View)

4.2 การคำนวณความหนาผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ด้านปฐมภูมิ (Primary Protective Barrier)

ในการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ด้านที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิได้กำหนดค่าตัวแปรจากสมการที่ (2.4) ซึ่งกำหนดให้ค่า Workload (W) ในการใช้งานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อสัปดาห์เป็น 1,000 mA-min ระยะระหว่างหลอดรังสีเอกซ์ถึงผนังห้องเท่ากับ 2 เมตร ซึ่งจะกำหนดค่า Maximum Permissible Dose เป็น 1 และ 0.1 mSv / week กำหนดให้ค่า Occupancy Factor เป็น 1, 0.25, และ 0.0625 กำหนดให้ค่า Use Factor (U) มีค่าเป็น 0.1 – 1 และค่าความต่างศักย์ของหลอดเอกซเรย์ดังต่อไปนี้

(1) 70 kVp

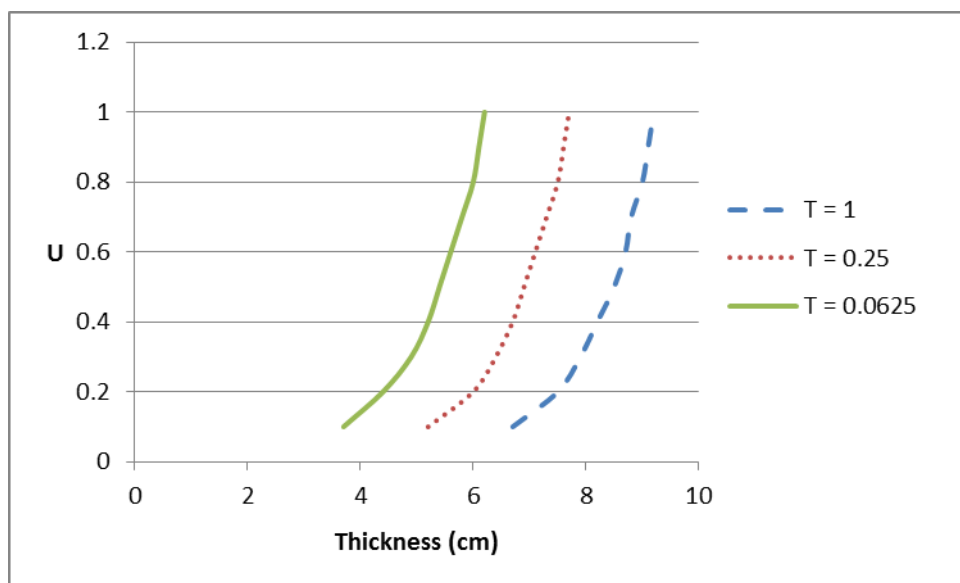
ตารางที่ 4.1 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	1	0.1	6.7
	1	0.2	7.5
	1	0.3	7.9
	1	0.4	8.2
	1	0.5	8.5

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	1	0.6	8.7
	1	0.7	8.8
	1	0.8	9
	1	0.9	9.1
	1	1	9.2
	0.25	0.1	5.2
	0.25	0.2	6
	0.25	0.3	6.4
	0.25	0.4	6.7
	0.25	0.5	6.9
	0.25	0.6	7.1
	0.25	0.7	7.3
	0.25	0.8	7.5
	0.25	0.9	7.6
	0.25	1	7.7
	0.0625	0.1	3.7
	0.0625	0.2	4.4
	0.0625	0.3	4.9
	0.0625	0.4	5.2
	0.0625	0.5	5.4
	0.0625	0.6	5.6
	0.0625	0.7	5.8
	0.0625	0.8	6
	0.0625	0.9	6.1
	0.0625	1	6.2

จากตารางที่ 4.1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Use Factor กับความหนาของผนังห้อง เมื่อค่า T เป็น 1, 0.25 และ 0.0625 สำหรับค่าความต่างศักย์เป็น 70 kVp พบว่า กรณีที่ T = 1 ซึ่งหมายความว่า พื้นที่ด้านหลังของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์มีผู้ใช้พื้นที่ตลอดเวลา ดังนั้นจะเห็นว่าความหนาของผนังห้องมีความหนามากกว่ากรณีที่ T มีค่าน้อยกว่า เพราะมีการใช้พื้นที่ในเวลาที่สั้นกว่า



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 70 kVp และ P = 1

จากภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าความหนาของผนังห้องด้านที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิพบว่าที่ค่า U มีค่าเพิ่มขึ้นช่วงน้อย ๆ ความหนาของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อค่า U มีค่าสูงขึ้น ความหนาจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

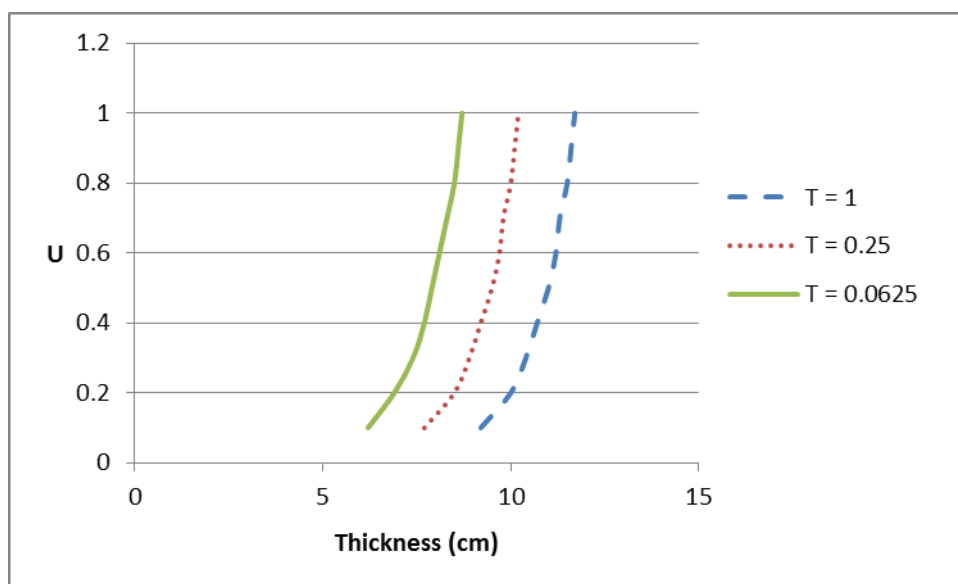
จากผลการคำนวณดังกล่าวสรุปได้ว่า การใช้พื้นที่ด้านที่รับรังสีแบบปฐมภูมิ มีผลต่อความหนาของผนังห้องโดยตรง เพราะการใช้พื้นที่ตลอดเวลาจะมีโอกาสได้รับปริมาณรังสีสูง อีกทั้งต้องพิจารณาการใช้งานของลำรังสีเอกซ์ที่หันไปทางด้านปฐมภูมิด้วย ดังนั้นผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จึงต้องมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับค่าความต่างศักย์อื่น ๆ ดังภาพที่ 4.4 – 4.10

ตารางที่ 4.3 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	1	0.1	9.2
	1	0.2	10
	1	0.3	10.4
	1	0.4	10.7
	1	0.5	11
	1	0.6	11.2
	1	0.7	11.3
	1	0.8	11.5
	1	0.9	11.6
	1	1	11.7
	0.25	0.1	7.7
	0.25	0.2	8.5
	0.25	0.3	8.9
	0.25	0.4	9.2
	0.25	0.5	9.5
	0.25	0.6	9.7
	0.25	0.7	9.8
	0.25	0.8	10
	0.25	0.9	10.1
	0.25	1	10.2

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 70 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	0.0625	0.1	6.2
	0.0625	0.2	6.9
	0.0625	0.3	7.4
	0.0625	0.4	7.7
	0.0625	0.5	7.9
	0.0625	0.6	8.1
	0.0625	0.7	8.3
	0.0625	0.8	8.5
	0.0625	0.9	8.6
	0.0625	1	8.7



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 70 kVp และ P = 0.1

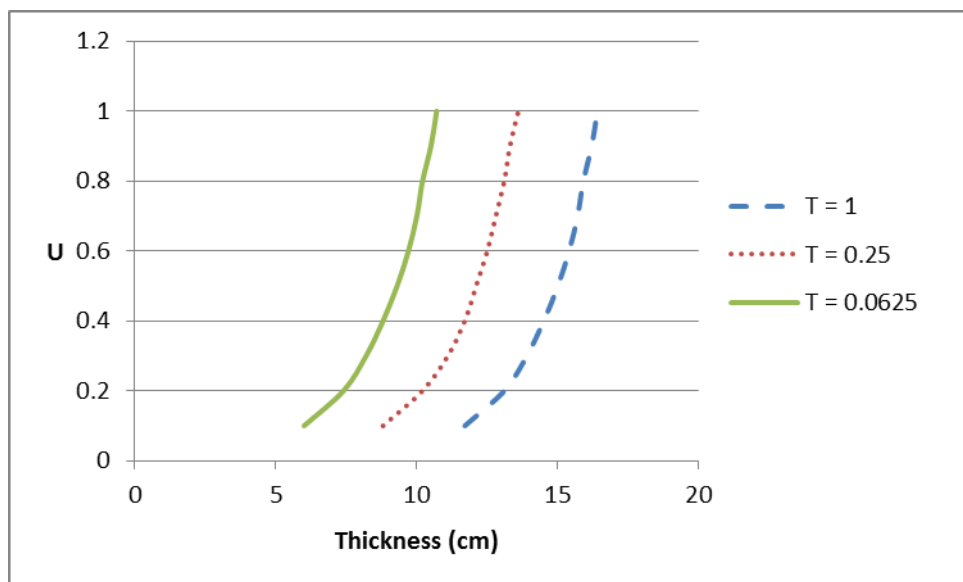
(2) 100 kVp

ตารางที่ 4.5 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	1	0.1	11.7
	1	0.2	13.1
	1	0.3	13.9
	1	0.4	14.5
	1	0.5	15
	1	0.6	15.4
	1	0.7	15.7
	1	0.8	15.9
	1	0.9	16.2
	1	1	16.4
	0.25	0.1	8.8
	0.25	0.2	10.2
	0.25	0.3	11.1
	0.25	0.4	11.7
	0.25	0.5	12.1
	0.25	0.6	12.5
	0.25	0.7	12.8
	0.25	0.8	13.1
	0.25	0.9	13.3
	0.25	1	13.6

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	0.0625	0.1	6
	0.0625	0.2	7.4
	0.0625	0.3	8.2
	0.0625	0.4	8.8
	0.0625	0.5	9.3
	0.0625	0.6	9.7
	0.0625	0.7	10
	0.0625	0.8	10.2
	0.0625	0.9	10.5
	0.0625	1	10.7



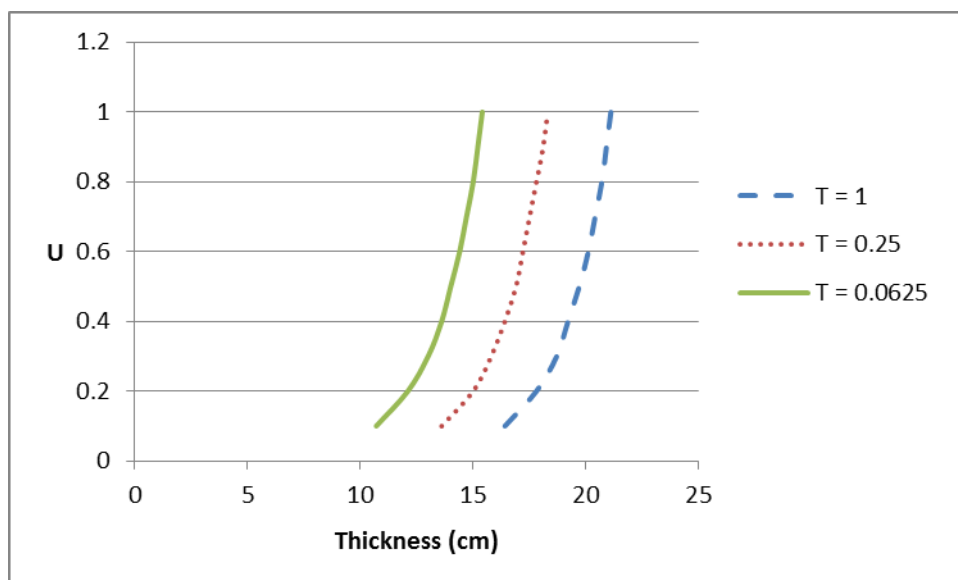
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิที่ความต่างศักย์ 100 kVp และ P = 1

ตารางที่ 4.7 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	1	0.1	16.4
	1	0.2	17.8
	1	0.3	18.7
	1	0.4	19.2
	1	0.5	19.7
	1	0.6	20.1
	1	0.7	20.4
	1	0.8	20.7
	1	0.9	20.9
	1	1	21.1
	0.25	0.1	13.6
	0.25	0.2	15
	0.25	0.3	15.8
	0.25	0.4	16.4
	0.25	0.5	16.9
	0.25	0.6	17.2
	0.25	0.7	17.5
	0.25	0.8	17.8
	0.25	0.9	18.1
	0.25	1	18.3

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 100 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	0.0625	0.1	10.7
	0.0625	0.2	12.1
	0.0625	0.3	13
	0.0625	0.4	13.6
	0.0625	0.5	14
	0.0625	0.6	14.4
	0.0625	0.7	14.7
	0.0625	0.8	15
	0.0625	0.9	15.2
	0.0625	1	15.4



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 100 kVp และ P = 0.1

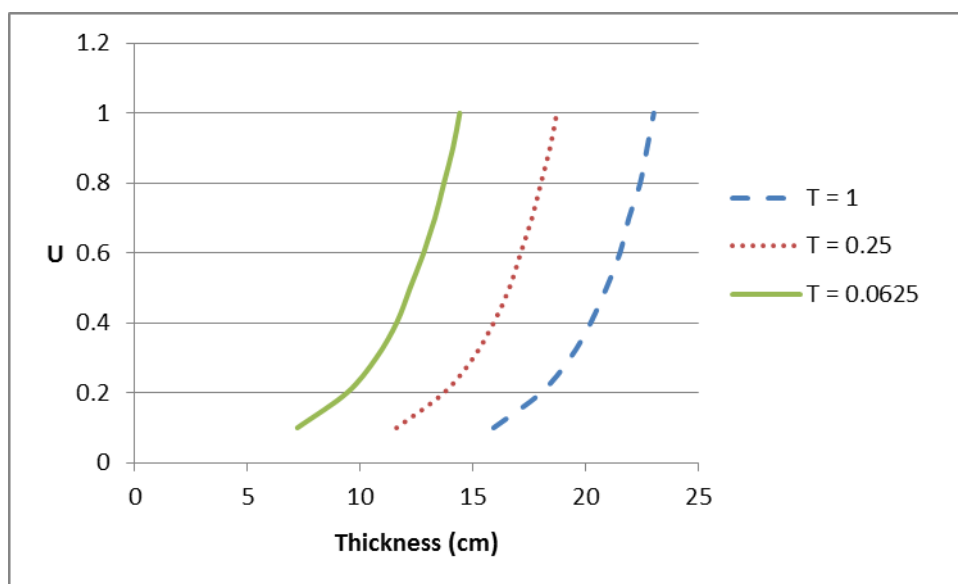
(3) 150 kVp

ตารางที่ 4.9 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	1	0.1	15.9
	1	0.2	18
	1	0.3	19.3
	1	0.4	20.2
	1	0.5	20.9
	1	0.6	21.5
	1	0.7	21.9
	1	0.8	22.4
	1	0.9	22.7
	1	1	23
	0.25	0.1	11.6
	0.25	0.2	13.7
	0.25	0.3	15
	0.25	0.4	15.9
	0.25	0.5	16.6
	0.25	0.6	17.1
	0.25	0.7	17.6
	0.25	0.8	18
	0.25	0.9	18.4
	0.25	1	18.7

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	0.0625	0.1	7.2
	0.0625	0.2	9.4
	0.0625	0.3	10.7
	0.0625	0.4	11.6
	0.0625	0.5	12.2
	0.0625	0.6	12.8
	0.0625	0.7	13.3
	0.0625	0.8	13.7
	0.0625	0.9	14.1
	0.0625	1	14.4



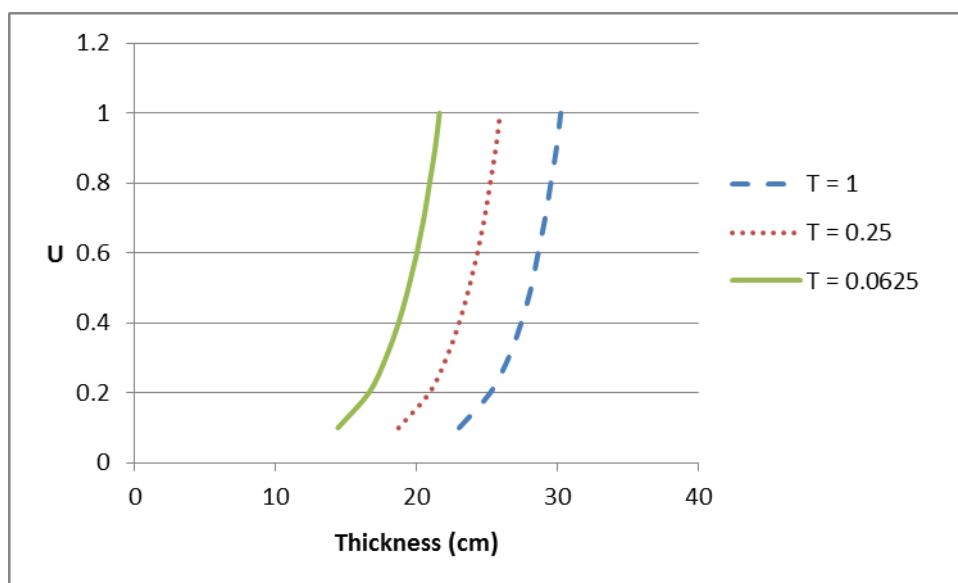
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 150 kVp และ P = 1

ตารางที่ 4.11 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	1	0.1	23
	1	0.2	25.2
	1	0.3	26.5
	1	0.4	27.4
	1	0.5	28.1
	1	0.6	28.6
	1	0.7	29.1
	1	0.8	29.5
	1	0.9	29.9
	1	1	30.2
	0.25	0.1	18.7
	0.25	0.2	20.9
	0.25	0.3	22.1
	0.25	0.4	23
	0.25	0.5	23.7
	0.25	0.6	24.3
	0.25	0.7	24.8
	0.25	0.8	25.2
	0.25	0.9	25.6
	0.25	1	25.9

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 150 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	0.0625	0.1	14.4
	0.0625	0.2	16.6
	0.0625	0.3	17.8
	0.0625	0.4	18.7
	0.0625	0.5	19.4
	0.0625	0.6	20
	0.0625	0.7	20.5
	0.0625	0.8	20.9
	0.0625	0.9	21.3
	0.0625	1	21.6



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ
ที่ความต่างศักย์ 150 kVp และ P = 0.1

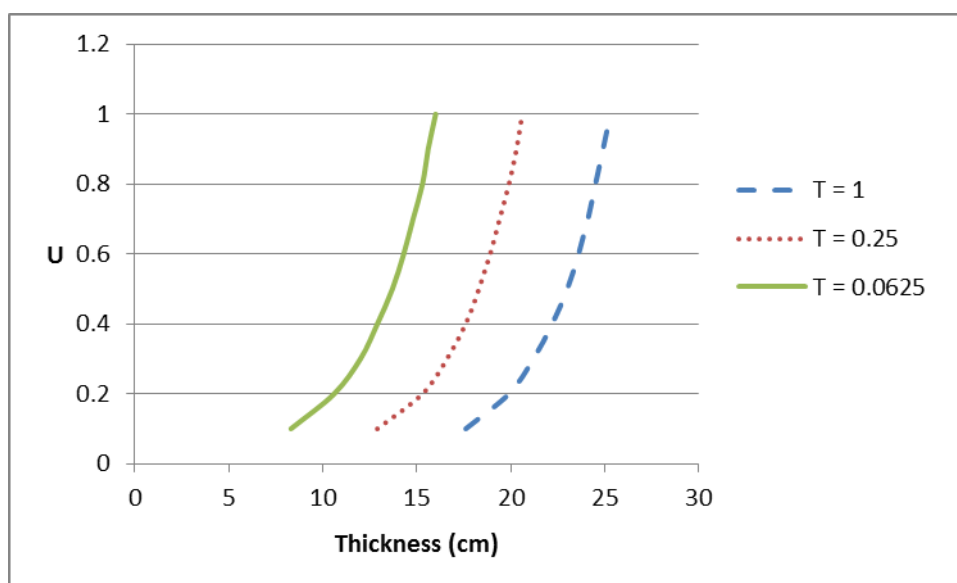
(4) 180 kVp

ตารางที่ 4.13 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	1	0.1	17.6
	1	0.2	19.9
	1	0.3	21.2
	1	0.4	22.2
	1	0.5	23
	1	0.6	23.6
	1	0.7	24.1
	1	0.8	24.5
	1	0.9	24.9
	1	1	25.3
	0.25	0.1	12.9
	0.25	0.2	15.3
	0.25	0.3	16.6
	0.25	0.4	17.6
	0.25	0.5	18.3
	0.25	0.6	18.9
	0.25	0.7	19.4
	0.25	0.8	19.9
	0.25	0.9	20.3
	0.25	1	20.6

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 1

P	T	U	Thickness (cm)
1	0.0625	0.1	8.3
	0.0625	0.2	10.6
	0.0625	0.3	12
	0.0625	0.4	12.9
	0.0625	0.5	13.7
	0.0625	0.6	14.3
	0.0625	0.7	14.8
	0.0625	0.8	15.3
	0.0625	0.9	15.6
	0.0625	1	16



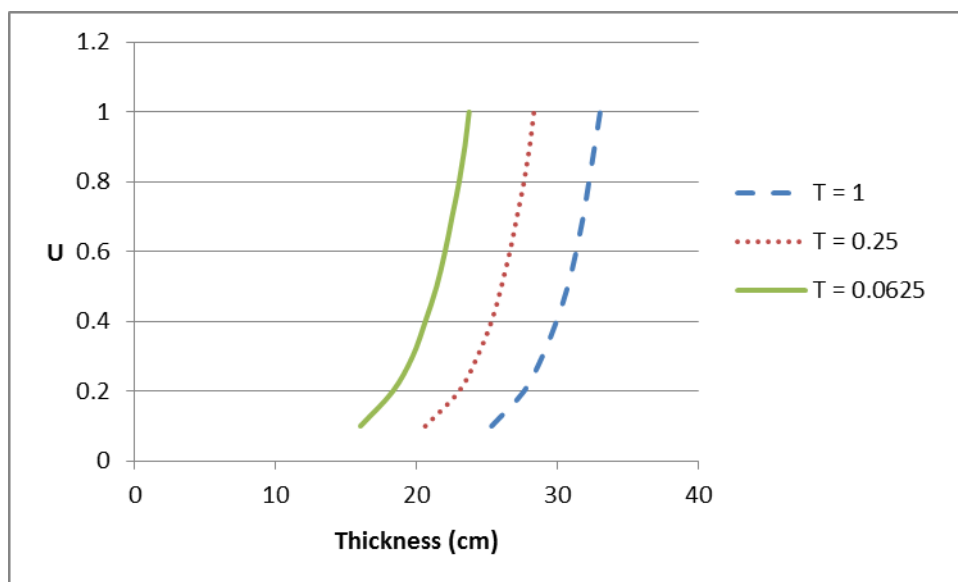
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 180 kVp และ P = 1

ตารางที่ 4.15 ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	1	0.1	25.3
	1	0.2	27.6
	1	0.3	28.9
	1	0.4	29.9
	1	0.5	30.7
	1	0.6	31.3
	1	0.7	31.8
	1	0.8	32.2
	1	0.9	32.6
	1	1	33
	0.25	0.1	20.6
	0.25	0.2	23
	0.25	0.3	24.3
	0.25	0.4	25.3
	0.25	0.5	26
	0.25	0.6	26.6
	0.25	0.7	27.1
	0.25	0.8	27.6
	0.25	0.9	28
	0.25	1	28.3

ตารางที่ 4.16 (ต่อ) ความหนาของผนังห้องด้านปฐมภูมิที่ 180 kVp และ P = 0.1

P	T	U	Thickness (cm)
0.1	0.0625	0.1	16
	0.0625	0.2	18.3
	0.0625	0.3	19.7
	0.0625	0.4	20.6
	0.0625	0.5	21.4
	0.0625	0.6	22
	0.0625	0.7	22.5
	0.0625	0.8	23
	0.0625	0.9	23.4
	0.0625	1	23.7



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Use Factor (U) กับความหนาของผนังห้องปฐมภูมิ ที่ความต่างศักย์ 180 kVp และ P = 0.1

4.3 การคำนวณความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ (Secondary Protective Barrier)

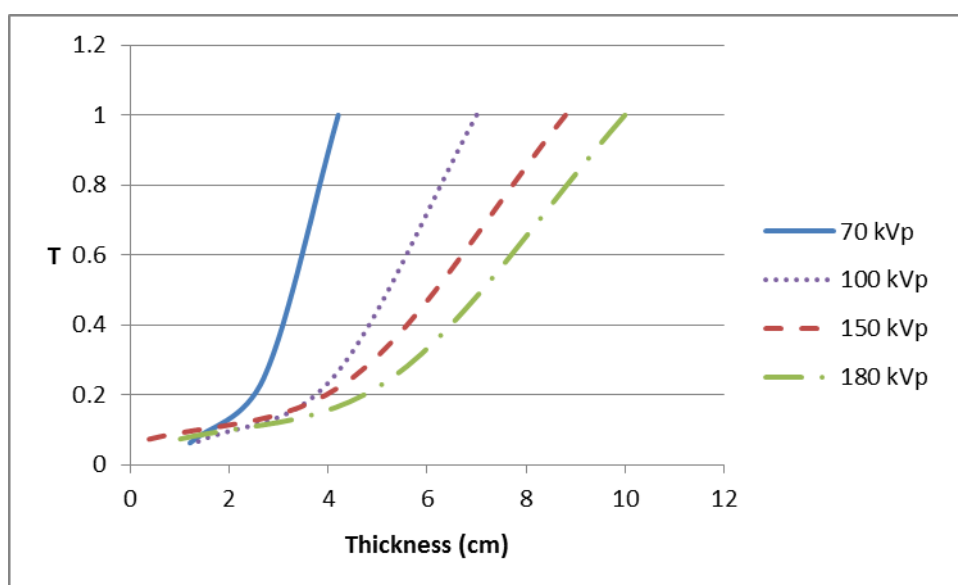
ในการคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีเอกซ์ทุติยภูมิกำหนด ค่าตัวแปรจากสมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.24) ซึ่งกำหนดให้ค่า Workload (W) ในการใช้งานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อสัปดาห์เป็น 1,000 mA-min ระยะระหว่างหลอดรังสีเอกซ์ถึงวัตถุเท่ากับ 0.5 เมตร ซึ่งจะกำหนดค่า Maximum Permissible Dose เป็น 1 และ 0.1 mSv / week กำหนดให้ค่า Occupancy Factor เป็น 1, 0.25, และ 0.0625 กำหนดให้ค่า The Use Factor มีค่าเป็น 1 กำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงของหลอดเอกซเรย์เป็น 5 mA และกำหนดระยะระหว่างหลอดเอกซเรย์และผนังห้องเอกซเรย์ด้านที่รับรังสีเอกซ์ทุติยภูมิรวมทั้งค่าความต่างศักย์ของหลอดเอกซเรย์ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผนังห้องด้าน B ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 2.5 เมตร

ตารางที่ 4.17 ความหนาผนังห้องด้าน B, P = 1

kVp	P	T	Thickness (cm)
70	1	1	4.2
70		0.25	2.7
70		0.0625	1.2
100		1	7
100		0.25	4.1
100		0.0625	1.3
150		1	8.8
150		0.25	4.5
150		0.0625	0.1
180		1	10
180		0.25	5.3
180		0.0625	0.7

จากตารางที่ 4.9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Occupancy Factor (T) กับความหนาของผนังห้อง ที่ค่าความต่างศักย์ 70, 100, 150 และ 180 kVp พบว่า กรณีที่ค่า T เดียวกัน ความหนาของผนังห้องจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ถ้าค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผนังห้องได้รับการกระเจิงและการรั่วของรังสีซึ่งเป็นรังสีทุติยภูมิ ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาของผนังห้องเอกซเรย์ที่รับรังสีทุติยภูมิมีความหนาเพิ่มขึ้นตามค่าความต่างศักย์

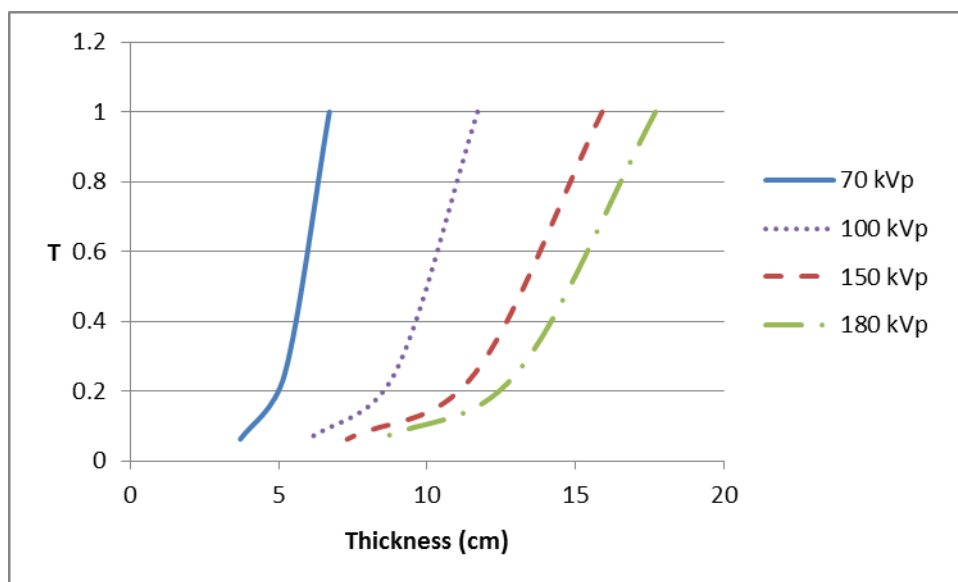


ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ B, P = 1

จากภาพที่ 4.11 เมื่อเพิ่มโอกาสการใช้งานพื้นที่บริเวณรอบ ๆ ห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์นานขึ้น ปริมาณรังสีเอกซ์ก็จะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จึงต้องมีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อไม่ให้ปริมาณรังสีเอกซ์ทะลุผ่านไปมากเกินไปเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย ICRP ค่า T ต่ำ ๆ หมายถึง การใช้งานพื้นที่ใกล้เคียงไม่นานมากนัก ความหนาจะไม่หนามากนัก แต่ช่วง T ต่ำ ๆ ช่วงความหนาของผนังห้องจะเพิ่มเร็วกว่าช่วง T สูงขึ้น ซึ่งขึ้นกับค่าความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ด้วย ทั้งนี้จะสอดคล้องกันกับผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนค่า P ดังภาพที่ 4.12 – 4.18

ตารางที่ 4.18 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ B, P = 0.1

kVp	P	T	Thickness (cm)
70	0.1	1	6.7
70		0.25	5.2
70		0.0625	3.7
100		1	11.7
100		0.25	8.9
100		0.0625	6
150		1	15.9
150		0.25	11.6
150		0.0625	7.3
180		1	17.7
180		0.25	13
180		0.0625	8.4

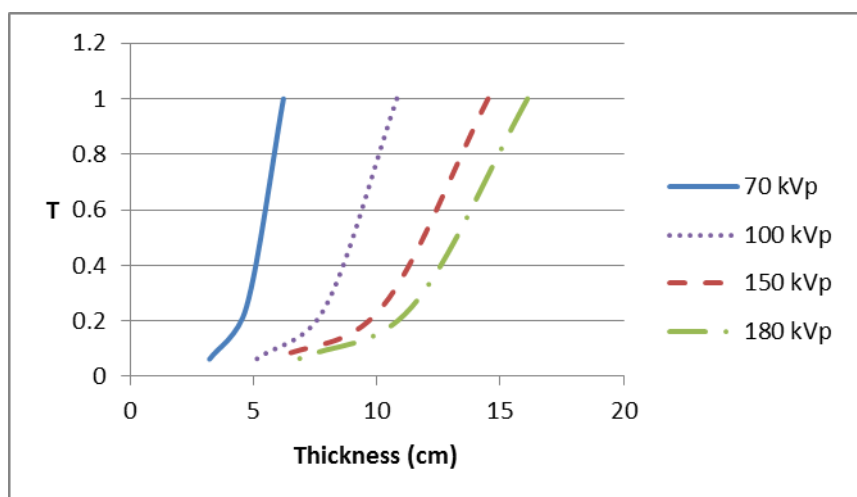


ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ B, P = 0.1

4.3.2 ผนังห้องด้าน C ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 1 เมตร

ตารางที่ 4.19 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 1

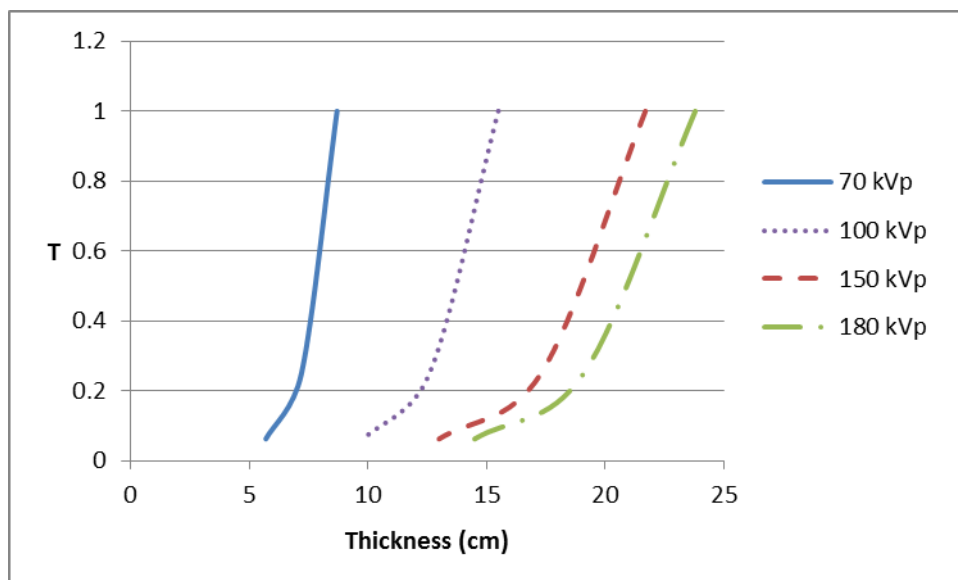
kVp	P	T	Thickness (cm)
70	1	1	6.2
70		0.25	4.7
70		0.0625	3.2
100		1	10.8
100		0.25	7.9
100		0.0625	5.1
150		1	14.5
150		0.25	10.2
150		0.0625	5.8
180		1	16.1
180		0.25	11.4
180		0.0625	6.8



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 1

ตารางที่ 4.20 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 0.1

kVp	P	T	Thickness (cm)
70	0.1	1	8.7
70		0.25	7.2
70		0.0625	5.7
100		1	15.5
100		0.25	12.6
100		0.0625	9.8
150		1	21.7
150		0.25	17.3
150		0.0625	13
180		1	23.8
180		0.25	19.1
180		0.0625	14.5

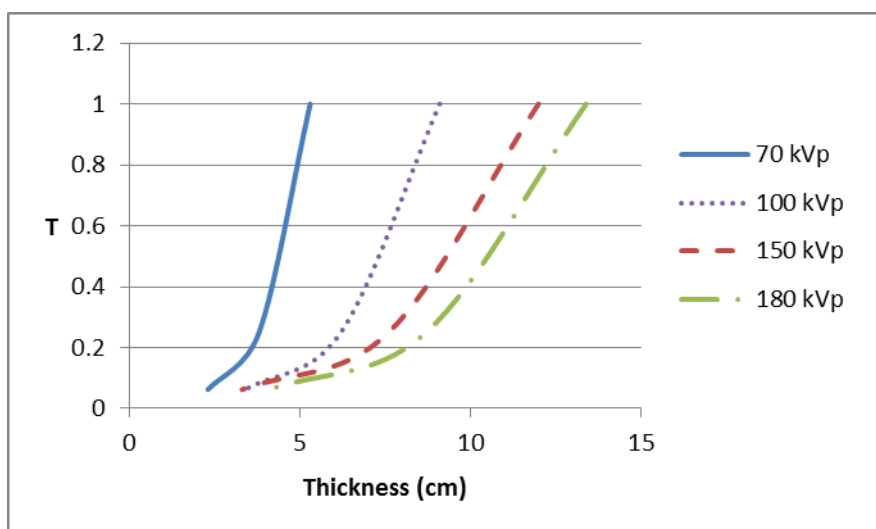


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ C, P = 0.1

4.3.3 ผนังห้องด้าน D ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 1 เมตร

ตารางที่ 4.21 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 1

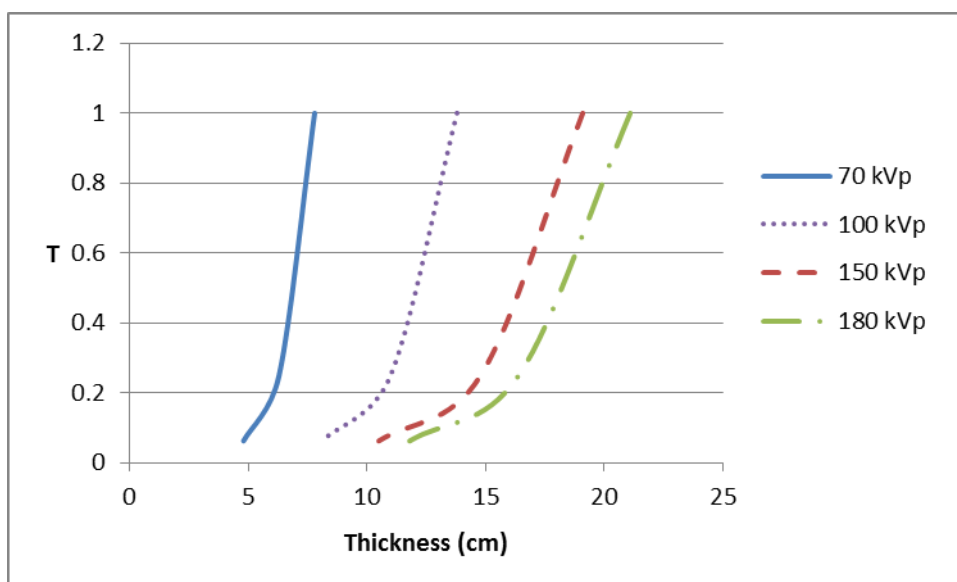
kV	P	T	Thickness (cm)
70	1	1	5.3
70		0.25	3.8
70		0.0625	2.3
100		1	9.1
100		0.25	6.2
100		0.0625	3.4
150		1	12
150		0.25	7.6
150		0.0625	3.3
180		1	13.4
180		0.25	8.7
180		0.0625	4.1



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 1

ตารางที่ 4.22 ความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 0.1

kV	P	T	Thickness (cm)
70	0.1	1	7.8
70		0.25	6.3
70		0.0625	4.8
100		1	13.8
100		0.25	11
100		0.0625	8.1
150		1	19.1
150		0.25	14.8
150		0.0625	10.5
180		1	21.1
180		0.25	16.4
180		0.0625	11.8

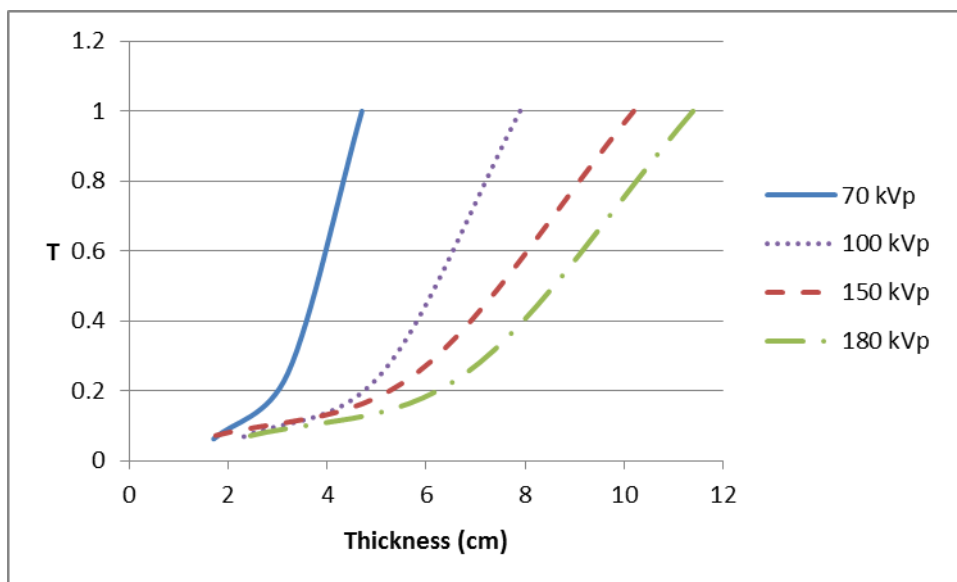


ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ D, P = 0.1

4.3.4 เพลานห้องด้าน E ระยะห่างจากหลอดเอกซเรย์ 2 เมตร

ตารางที่ 4.23 ความหนาเพลานห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 1

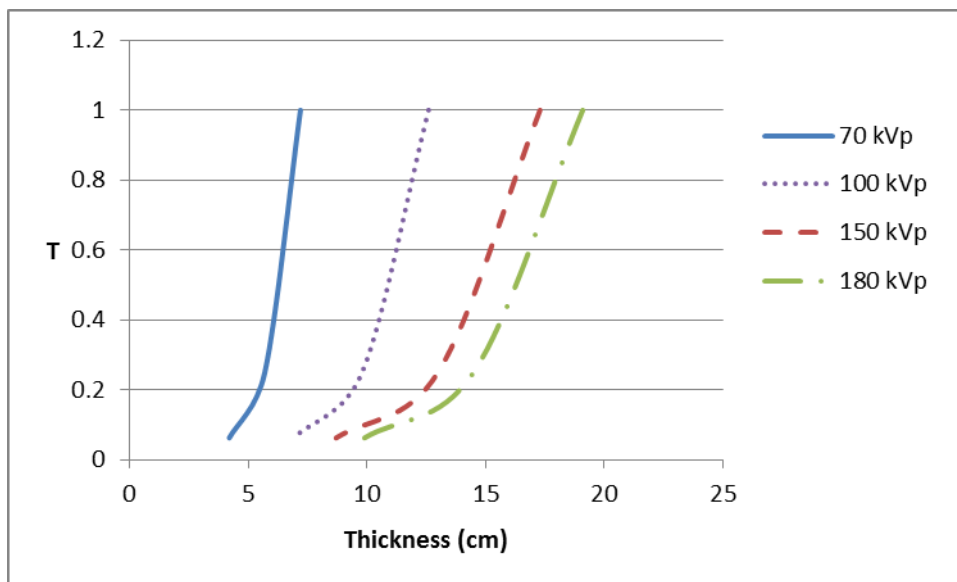
kVp	P	T	Thickness (cm)
70	1	1	4.7
70		0.25	3.2
70		0.0625	1.7
100		1	7.9
100		0.25	5.1
100		0.0625	2.2
150		1	10.2
150		0.25	5.8
150		0.0625	1.5
180		1	11.4
180		0.25	6.8
180		0.0625	2.2



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 1

ตารางที่ 4.24 ความหนาเพดานห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 0.1

kVp	P	T	Thickness (cm)
70	0.1	1	7.2
70		0.25	5.7
70		0.0625	4.2
100		1	12.6
100		0.25	9.8
100		0.0625	6.9
150		1	17.3
150		0.25	13
150		0.0625	8.7
180		1	19.1
180		0.25	14.5
180		0.0625	9.9



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Occupancy factor (T) กับความหนาผนังห้องด้านทุติยภูมิ E, P = 0.1

4.4 การคำนวณความหนาของผนังห้องจากการประมาณค่าในช่วงของค่า kVp อื่น ๆ

4.4.1 การใช้ข้อมูลจากการทดลองในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่

(1) ใช้ข้อมูลจากการทดลองวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ค่า 70, 100, 150 และ 180 kVp

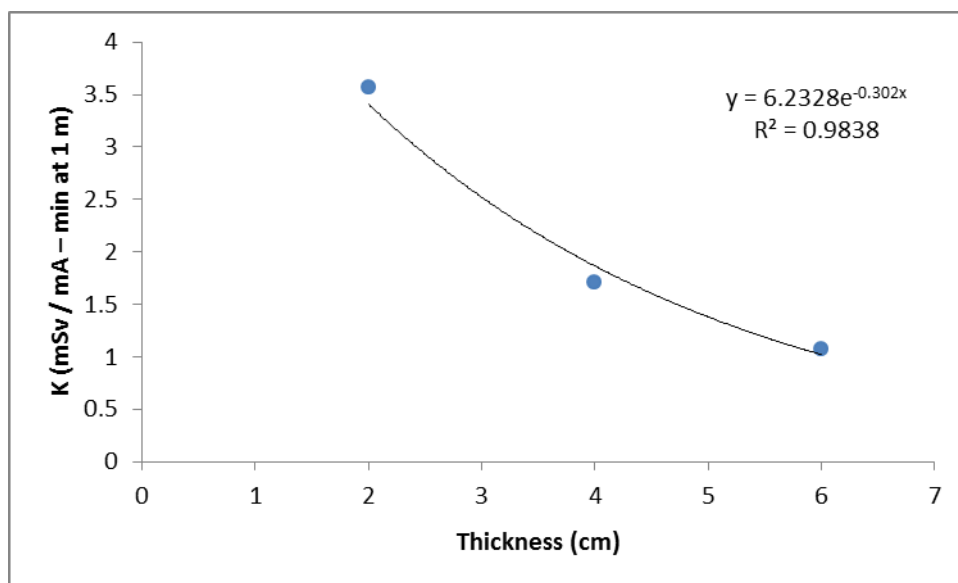
(2) นำค่าดังกล่าวมาคำนวณเปลี่ยนเป็นค่า K และสร้างกราฟเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล

เขียน

(3) กรณีที่ 70 kVp มีวิธีการคำนวณดังนี้

(3.1) ใช้วิธีการเลือกช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K อย่างมีนัยสำคัญ โดยสร้างกราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 2 – 6 ซม. ซึ่งเป็นค่าที่มีการรบกวนอย่างมากจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ หาสมการความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังภาพที่

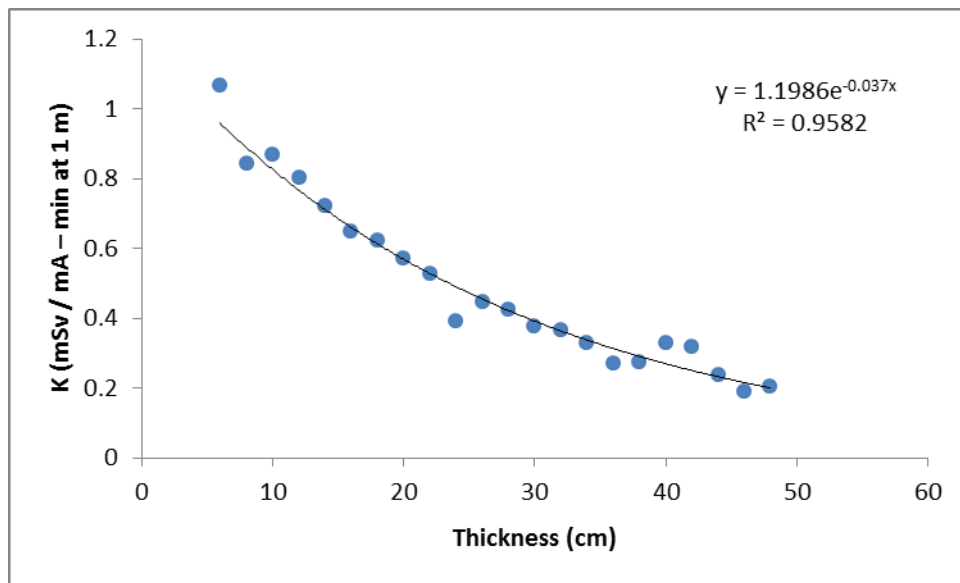
4.19



ภาพที่ 4.19 กราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 2 – 6 ซม.

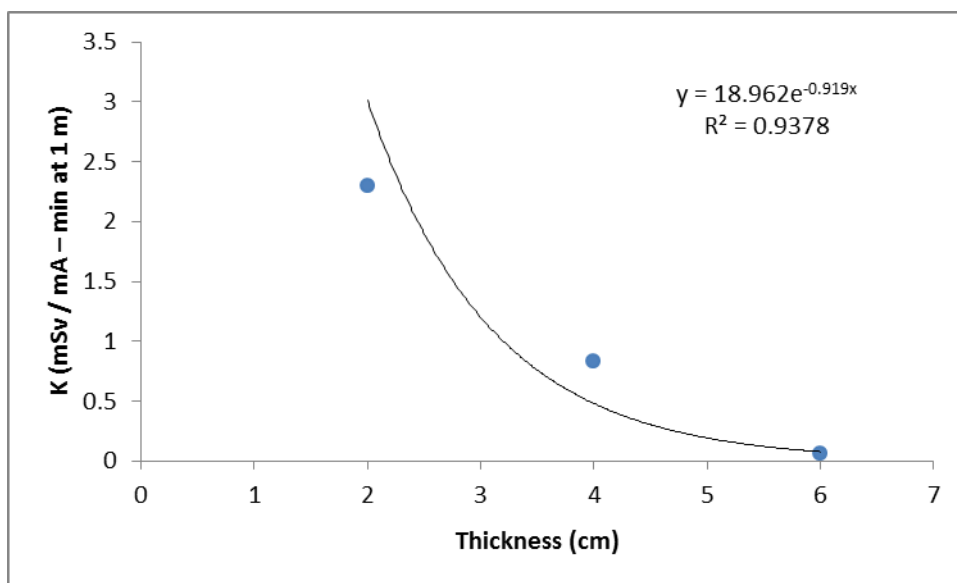
ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

(3.2) สร้างกราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 6 – 48 ซม. หาความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 กราฟระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ความหนาตั้งแต่ 6 – 48 ซม.
ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

(3.3) นำสมการของเส้นแนวโน้มในข้อ (3.1) และ (3.2) หักล้างกันแล้วสร้างกราฟระหว่างค่าดังกล่าวกับความหนาของแผ่นคอนกรีต หากความสมการความสัมพันธ์ของเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยเลือกตั้งแต่ความหนา 2 ซม. โดยสมการที่หาได้คือสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ 70 kVp



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

จากภาพที่ 4.21 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของผนังคอนกรีตดังสมการ $y = 18.962e^{-0.919x}$

(4) ทำการคำนวณแบบเดียวกันในข้อ (3) ที่ความต่างศักย์ 100, 150 และ 180 kVp ซึ่งได้สมการความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ได้จากการทดลอง

ค่าความต่างศักย์ (kVp)	สมการความสัมพันธ์
70	$K = 18.962e^{-0.919x}$
100	$K = 11.763e^{-0.487x}$
150	$K = 6.5276e^{-0.321x}$
180	$K = 7.6573e^{-0.299x}$

4.4.2 การคำนวณความหนาของผนังห้องจากการประมาณค่าในช่วงของค่า kVp อื่นๆ

จากตารางที่ 4.25 เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของผนังคอนกรีต ซึ่งได้มาจากการทดลอง เพื่อความสะดวกในการคำนวณที่ค่าความต่างศักย์อื่น ๆ สามารถประมาณค่าในช่วงจากข้อมูลดังกล่าวได้ ต่อไปนี้

(1) ตัวอย่างการคำนวณการประมาณค่าในช่วงที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 80 kVp จากสมการ

เนื่องจากความต่างศักย์ 80 kVp อยู่ระหว่างค่าของความต่างศักย์ 70 kVp และ 100 kVp นำสมการในตารางที่ 4.25 ที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 70 kVp และ 100 kVp มาคำนวณหาความหนาของคอนกรีตที่ค่า K เดียวกัน จากนั้นนำความหนาของคอนกรีตที่คำนวณได้ที่ 70 kVp และ 100 kVp มาหาความหนาของคอนกรีตที่ 80 kVp ณ ค่า K เดียวกันด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วง สมมุติว่าคำนวณความหนาของคอนกรีตที่ค่า K เท่ากับ 10 mSv / mA-min at 1 m ที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 70 kVp เท่ากับ 0.696248 cm และที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 100 kVp เท่ากับ 0.333417 cm

สามารถคำนวณความหนาของคอนกรีตที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 80 kVp ได้ดังสมการนี้

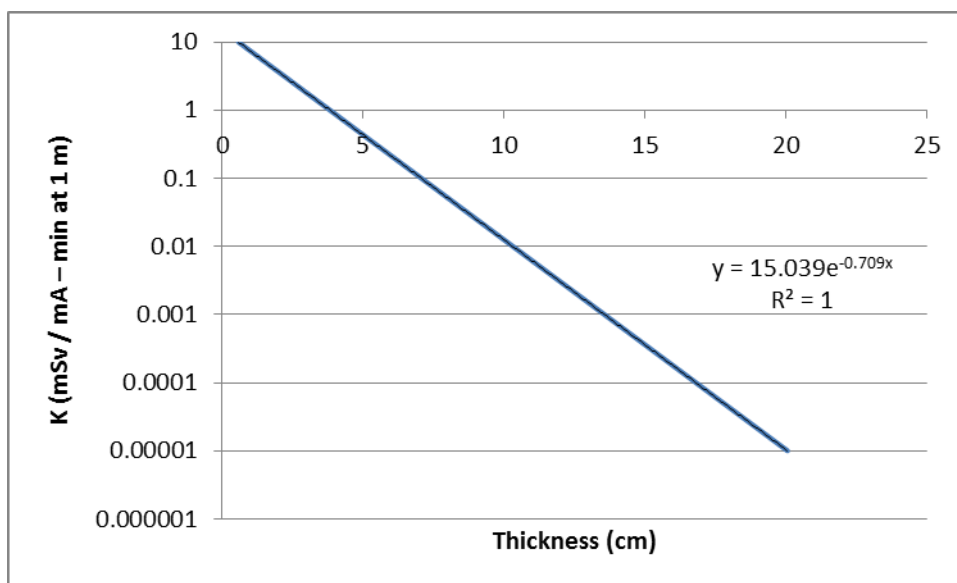
$$Thickness_{80 \text{ kVp}} = \frac{((80 - 70) \times (0.333417 - 0.696248))}{100 - 70} + 0.696248 \quad (4.1)$$

และคำนวณแบบเดียวกันที่ความหนาของคอนกรีตใด ๆ จะได้ดังตาราง 4.26

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าความหนาของคอนกรีตที่คำนวณได้ ณ ความต่างศักย์ 70, 80 และ 100 kVp

K (mSv / mA–min at 1 m)	Thickness (cm)		
	70 kVp	80 kVp	100 kVp
10	0.696248 cm	0.575304 cm	0.333417 cm
9	0.810895 cm	0.723851 cm	0.549763 cm
8	0.939059 cm	0.889912 cm	0.791617 cm
7	1.08436 cm	1.078176 cm	1.065809 cm
6	1.252097 cm	1.295512 cm	1.38234 cm
5	1.450489 cm	1.552565 cm	1.756717 cm
4	1.6933 cm	1.867172 cm	2.214917 cm
3	2.006338 cm	2.272772 cm	2.80564 cm
2	2.447541 cm	2.844433 cm	3.638217 cm
1	3.201781 cm	3.821693 cm	5.061517 cm
0.1	5.707315 cm	7.068082 cm	9.789618 cm
0.01	8.212848 cm	10.31447 cm	14.51772 cm
0.001	10.71838 cm	13.56086 cm	19.24582 cm
0.0001	13.22391 cm	16.80725 cm	23.97392 cm
0.00001	15.72945 cm	20.05364 cm	28.70202 cm

นำค่าความหนาของคอนกรีตที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์ 80 kVp ซึ่งได้จากการประมาณค่าในช่วง มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต และหาสมการเส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล ได้ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต
ที่ความต่างศักย์ 80 kVp

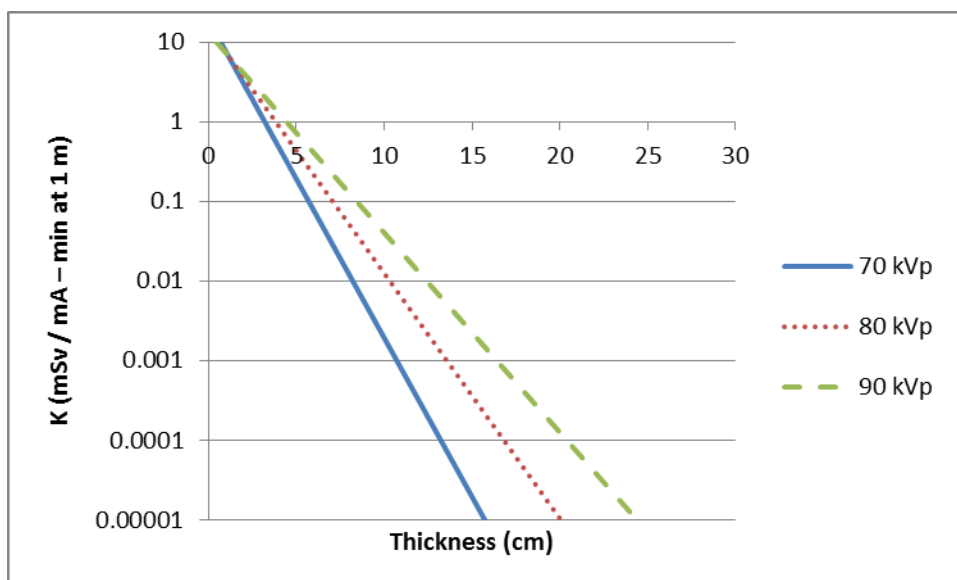
เพราะฉะนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ 80 kVp คือ

$$K = 15.039e^{-0.709x}$$

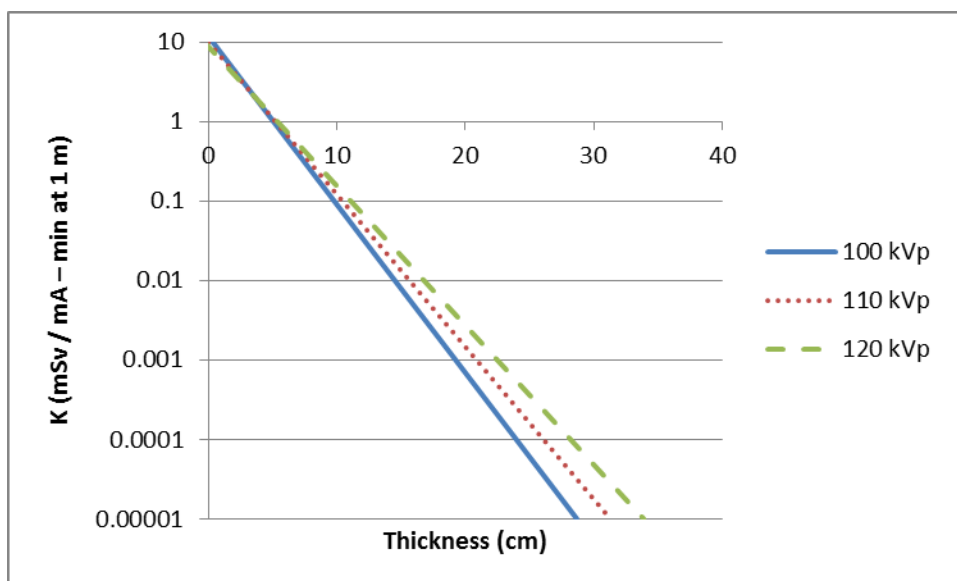
(2) ทำการคำนวณแบบเดียวกันในข้อ (1) ที่ความต่างศักย์ของหลอดรังสีเอกซ์อื่น ๆ ได้ สมการดังนี้

ตารางที่ 4.27 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีตที่ได้จากการประมาณค่าในช่วง

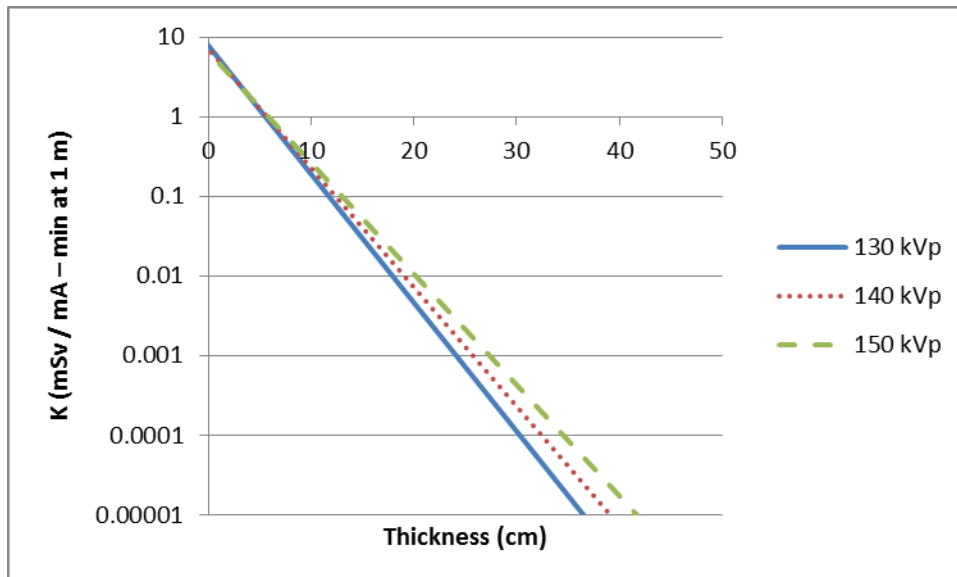
ค่าความต่างศักย์ (kVp)	สมการความสัมพันธ์
80	$K = 15.039e^{-0.709x}$
90	$K = 13e^{-0.577x}$
110	$K = 10.004e^{-0.441x}$
120	$K = 8.748e^{-0.404x}$
130	$K = 7.8133e^{-0.372x}$
140	$K = 7.0947e^{-0.344x}$
160	$K = 6.9019e^{-0.313x}$
170	$K = 7.2786e^{-0.306x}$



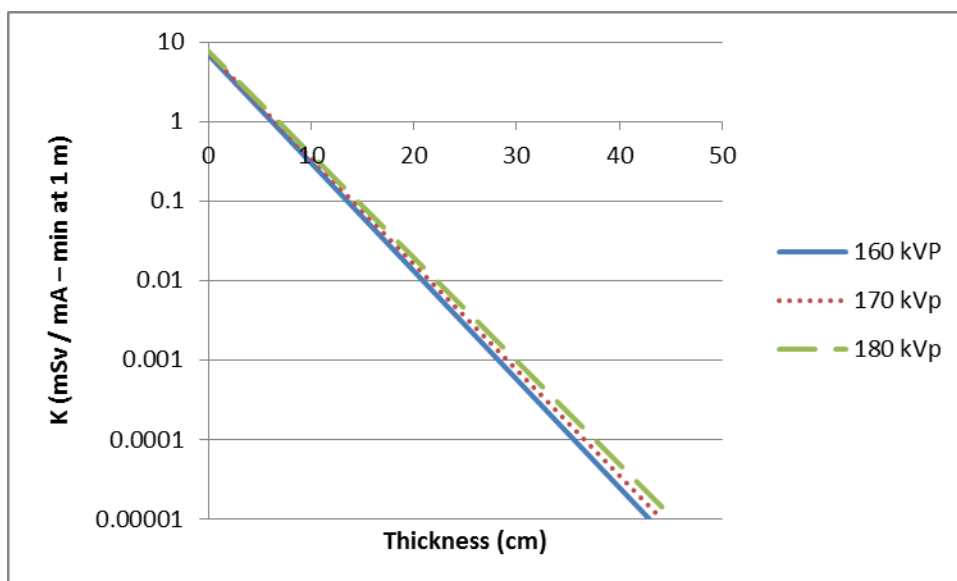
ภาพที่ 4.23 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 70 – 90 kVp)



ภาพที่ 4.24 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 100 – 120 kVp)



ภาพที่ 4.25 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 130 – 150 kVp)



ภาพที่ 4.26 กราฟของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของคอนกรีต (ความต่างศักย์ 160 – 180 kVp)

4.5 การคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์โดยใช้โปรแกรมคำนวณเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง⁸¹

ตัวอย่างการคำนวณ

เครื่องเอกซเรย์มีความต่างศักย์สูงสุด 125 kVp และกระแสไฟฟ้า 220 mA ใช้งานเป็นเวลา 90 วินาที ต่อสัปดาห์ ให้คำนวณความหนาผนังห้องเอกซเรย์ที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (primary protective barrier) โดยใช้คอนกรีตเพียงอย่างเดียว โดยหลอดรังสีเอกซ์ห่างจากผนังห้องเป็นระยะทาง 15 ฟุต ด้านหลังเป็นพื้นที่ไม่ควบคุม ซึ่งเป็นระเบียง (hallway) และหันลำรังสีเอกซ์ไปทางด้านผนังห้องดังกล่าวคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 3 ของเวลาทั้งหมดที่ใช้งาน

ตารางที่ 4.28 ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมการคำนวณกับเอกสารอ้างอิง

การคำนวณจาก	ความหนาผนังห้องเอกซเรย์ที่รับรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ
เอกสารอ้างอิง	9.1 cm
โปรแกรมการคำนวณ	12.1 cm

ผลการจากคำนวณพบ โปรแกรมการคำนวณมีค่ามากกว่าเอกสารอ้างอิง เนื่องจากผลของการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากการทดลองที่มีมาก และความแตกต่างของความหนาแน่นของแผ่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองกับคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อย (ความหนาแน่นของคอนกรีตมาตรฐาน = $2.30 - 2.40 \text{ g/cm}^3$ และความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง = 2.39 g/cm^3)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการคำนวณความหนาของผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานทางการแพทย์ โดยมีการกำหนดอัตราปริมาณรังสีเพื่อความปลอดภัยตามมาตรฐานของหน่วยงาน ICRP (International Commission on Radiological Protection) ซึ่งได้ปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการคำนวณผนังห้องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม โดยต้องทำการทดลองเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบและค่าคงที่อื่น ๆ ทั้งนี้ทั้งนั้นอาจเกิดข้อผิดพลาดจากการทดลองทำให้ผลการคำนวณมีข้อผิดพลาดบ้าง ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

(1) จากการทดลองเพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า K และความหนาของผนังคอนกรีตพบว่า ปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้ในช่วงความหนาของแผ่นคอนกรีตน้อย ๆ มีปริมาณรังสีสูงกว่าปกติ เนื่องจากการวางแผ่นคอนกรีตในตำแหน่งใกล้แผ่นวัดรังสีไอเอสแอล ทำให้ลำรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์มีความกว้างมาก ประกอบกับสถานที่ในการทดลองอยู่ใกล้ผนังห้อง และมีการใช้ถังน้ำแทน Phantom ทำให้ลำรังสีเอกซ์มีการกระเจิงมากส่งผลให้ปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้มีค่ามากกว่าปกติ ผู้วิจัยจึงต้องหาจุดที่ความหนาของแผ่นคอนกรีตทำให้ปริมาณรังสีเอกซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อทำการหาค่าการกระเจิงออกจากค่าที่วัดได้ ทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง นอกจากนี้แผ่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองมีความหนาแน่นมากกว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณโดยทั่วไป และแผ่นคอนกรีตมีส่วนผสมเป็นหินขนาดค่อนข้างใหญ่ทำให้รังสีเอกซ์ที่ผ่านแผ่นคอนกรีตอาจไม่สม่ำเสมอ

(2) จากการทดลองเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อรังสีตกกระทบ พบว่าค่าอัตราส่วนที่วัดได้มีค่ามากกว่าเอกสารอ้างอิง เนื่องจากมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ต่อ phantom ค่อนข้างมาก

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนโปรแกรมคำนวณพบว่า การคำนวณความหนาของผนังห้องเอกซเรย์มีค่าใกล้เคียงกับเอกสารอ้างอิง แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการบิดเบือนของโปรแกรมในการคำนวณได้

(3) จากเงื่อนไขในการคำนวณที่กำหนดให้ ซึ่งได้แก่ ค่าปริมาณการใช้งานของลำรังสีเอกซ์ในแต่ละสัปดาห์ (Workload, W) ค่าปริมาณการใช้งานลำรังสีในทิศทางที่กำหนด (Use Factor, U) ค่าแฟกเตอร์ของการเข้าครอบครองในพื้นที่ใช้งาน (Occupancy Factor, T) เป็นต้น พบว่า

(3.1) กรณีการคำนวณแบบ Primary Protective Barrier เมื่อค่า U มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความหนาของผนังห้องที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อค่า U มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาของผนังห้องก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

(3.2) กรณีการคำนวณแบบ Secondary Protective Barrier เมื่อค่า T มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าความหนาของผนังห้องที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อค่า T มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความหนาของผนังห้องก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

(4) จากการคำนวณเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิงพบว่า ความหนาของผนังคอนกรีตที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าในเอกสารอ้างอิง เนื่องจากมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากการทดลองมาก ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตมาตรฐานกับคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย (ความหนาแน่นของคอนกรีตมาตรฐาน = $2.30 - 2.40 \text{ g/cm}^3$ และความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง = 2.39 g/cm^3)

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อปรับปรุงผลการคำนวณของโปรแกรมให้มีความแม่นยำขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

(1) ในการทดลองสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า K (mSv / mA – min at 1 m) กับความหนาของผนังห้อง ควรจัดระบบวัดให้เหมาะสมเพื่อลดการกระเจิงของลำรังสีเอกซ์ให้มากที่สุด ได้แก่ จัดให้แผ่นคอนกรีตวางชิดต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ เป็นต้น

(2) แผ่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองควรทำให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ความหนาแน่นมีความสม่ำเสมอเท่ากัน โดยตลอด

(3) ในการทดลองเก็บข้อมูล เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับความหนาของแผ่นคอนกรีต ควรดำเนินการในห้องทดลองที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Braestrup, Carl B. 1965. Shielding design for COBALT – 60 teletherapy installations. **NUCLEAR STRUCTURAL ENGINEERING**, 2: 134-141.
- [2] Petrantonaki, M., Kappas C., Efsthopoulos E.P., Theodorakos Y., and Panayiotakis G. 1999. Calculating shielding requirements in diagnostic X-ray Departments. **The British Journal of Radiology**, 72: 179 – 185.
- [3] Tsalafoutas, I. A., Yakoumakis E., and Sandilos P. 2003. A model for calculating Shielding requirements in diagnostic X-ray facilities. **The British Journal of Radiology**, 76: 731–737.
- [4] นवलฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2545. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [5] วิทยาศาสตร์การแพทย์, กรม. **ความรู้เกี่ยวกับแผ่นวัดรังสีทีแอลดีและแผ่นวัดรังสีไอเอสแอล**. กรุงเทพมหานคร: กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. (แผ่นพับ)
- [6] สมยศ ศรีสถิตย์. **โปรแกรมการคำนวณความหนาผนังห้องเอกซเรย์**. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (เอกสารการสอน)
- [7] Turner, E., James. **ATOM, RADIATION AND RADIATION PROTECTION**. United States of America: John Wiley & Son.
- [8] Cember, Herman. 1983. **Introduction to Health Physics**. United States of America: McGraw – Hill.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลส่วนผสมแผ่นคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงส่วนผสมของคอนกรีต

Material	Type	Specified mixture		Amount at mixing	
		(kg/m ³)	(l/m ³)	(kg/batch)	(l/batch)
Cement	Ordinary Portland Cement	376.86	119.26	376.855	119.258
Fine aggregate	River sand	732.72	284.00	732.720	284.000
Coarse aggregate	Lime stone	1133.16	426.00	1133.160	426.000
Water		150.74	150.74	150.742	150.742
	TOTAL	2393.48	980.00	2393.477	980.000

ภาคผนวก ข ข้อมูลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์จากการทดลอง

กำหนดกระแสไฟฟ้าของหลอดเอกซเรย์เท่ากับ 3.5 mA และวัดรังสี 10 วินาที

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01518920I	0	7.74	0.05	7.69	7.44
XA01773244D	0	7.01	0.08	6.93	
XA015098657	0	7.82	0.05	7.77	
XA014797424	0	7.43	0.06	7.37	
XA014987231	1	2.11	0.05	2.06	2.08
XA019516671	1	2.45	0.07	2.38	
XA019807335	1	2.1	0.05	2.05	
XA01911713K	1	1.89	0.06	1.83	
XA01981210M	2	1	0.07	0.93	0.995
XA015000440	2	1.13	0.05	1.08	
XA015357764	2	0.96	0.05	0.91	
XA01912906A	2	1.12	0.06	1.06	
XA00380126K	3	0.76	0.05	0.71	0.6225
XA019129185	3	0.77	0.07	0.7	
XA01524751J	3	0.57	0.04	0.53	
XA019813639	3	0.59	0.04	0.55	
XA01944100U	4	0.58	0.05	0.53	0.4925
XA01509989V	4	0.5	0.04	0.46	
XA01913044R	4	0.66	0.09	0.57	
XA01510540W	4	0.46	0.05	0.41	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01468302J	5	0.54	0.04	0.5	0.5075
XA015199942	5	0.57	0.05	0.52	
XA01503291U	5	0.54	0.04	0.5	
XA01522510V	5	0.54	0.03	0.51	
XA019810594	6	0.49	0.06	0.43	0.4675
XA01475540G	6	0.5	0.04	0.46	
XA01521330Y	6	0.53	0.05	0.48	
XA014788134	6	0.55	0.05	0.5	
XA014475484	7	0.44	0.04	0.4	0.42
XA01913027N	7	0.51	0.07	0.44	
XA019516663	7	0.5	0.07	0.43	
XA014982174	7	0.47	0.06	0.41	
XA015278390	8	0.41	0.05	0.36	0.3775
XA01448612G	8	0.43	0.04	0.39	
XA01456996U	8	0.36	0.04	0.32	
XA01504325Q	8	0.48	0.04	0.44	
XA01531178G	9	0.34	0.05	0.29	0.3625
XA01508448C	9	0.43	0.04	0.39	
XA01455804A	9	0.41	0.05	0.36	
XA01503748B	9	0.44	0.03	0.41	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA017746626	10	0.4	0.07	0.33	0.3325
XA01457898R	10	0.31	0.05	0.26	
XA01536023S	10	0.4	0.05	0.35	
XA014529752	10	0.45	0.06	0.39	
XA01535294G	11	0.39	0.08	0.31	0.3075
XA015553677	11	0.48	0.08	0.4	
XA01980995R	11	0.31	0.09	0.22	
XA01980996P	11	0.37	0.07	0.3	
XA015030322	12	0.25	0.06	0.19	0.2275
XA01479190F	12	0.25	0.08	0.17	
XA01532209I	12	0.25	0.06	0.19	
XA01516807A	12	0.41	0.05	0.36	
XA01506761K	13	0.27	0.08	0.19	0.26
XA01536512L	13	0.35	0.06	0.29	
XA015294883	13	0.41	0.06	0.35	
XA01505917A	13	0.28	0.07	0.21	
XA01532113V	14	0.31	0.06	0.25	0.2475
XA01498370A	14	0.27	0.06	0.21	
XA01475469Y	14	0.36	0.08	0.28	
XA014547762	14	0.32	0.07	0.25	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01535261P	15	0.34	0.09	0.25	0.22
XA01509631M	15	0.25	0.05	0.2	
XA014476870	15	0.26	0.08	0.18	
XA015278663	15	0.31	0.06	0.25	
XA01457425C	16	0.24	0.06	0.18	0.2125
XA01536700M	16	0.28	0.07	0.21	
XA01454156G	16	0.3	0.08	0.22	
XA01904185K	16	0.32	0.08	0.24	
XA01904182Q	17	0.28	0.08	0.2	0.1925
XA01506085O	17	0.25	0.06	0.19	
XA015278168	17	0.26	0.07	0.19	
XA01503321Z	17	0.28	0.09	0.19	
XA01952275B	18	0.29	0.1	0.19	0.1575
XA01458460H	18	0.21	0.12	0.09	
XA01506266K	18	0.3	0.09	0.21	
XA01904822I	18	0.22	0.08	0.14	
XA01504832L	19	0.23	0.08	0.15	0.16
XA01514258H	19	0.3	0.07	0.23	
XA01532276H	19	0.25	0.09	0.16	
XA01536178B	19	0.21	0.11	0.1	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01513845D	20	0.34	0.07	0.27	0.1925
XA01531298C	20	0.23	0.07	0.16	
XA019120202	20	0.27	0.06	0.21	
XA01458514C	20	0.23	0.1	0.13	
XA01514615J	21	0.34	0.09	0.25	0.185
XA01521097K	21	0.27	0.08	0.19	
XA014714288	21	0.25	0.04	0.21	
XA019434881	21	0.14	0.05	0.09	
XA015085688	22	0.2	0.04	0.16	0.1375
XA01457600K	22	0.23	0.07	0.16	
XA01404401Z	22	0.17	0.05	0.12	
XA014757717	22	0.16	0.05	0.11	
XA019808523	23	0.13	0.05	0.08	0.11
XA01523084P	23	0.11	0.06	0.05	
XA01556504E	23	0.26	0.11	0.15	
XA01497852Z	23	0.19	0.03	0.16	
XA01498151E	24	0.15	0.05	0.1	0.12
XA015247395	24	0.15	0.04	0.11	
XA014668641	24	0.2	0.04	0.16	
XA01480436A	24	0.15	0.04	0.11	

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01536178B	0	12.33	0.08	12.25	12.7025
XA01532276H	0	13.11	0.06	13.05	
XA01514258H	0	13.22	0.06	13.16	
XA01504832L	0	12.42	0.07	12.35	
XA01904822I	1	3.53	0.08	3.45	3.37
XA01506266K	1	3.88	0.05	3.83	
XA01458460H	1	3.21	0.09	3.12	
XA01952275B	1	3.14	0.06	3.08	
XA01503321Z	2	1.71	0.05	1.66	2.005
XA015278168	2	2.16	0.06	2.1	
XA015000440	2	2.1	0.04	2.06	
XA01981210M	2	2.26	0.06	2.2	
XA01911713K	3	1.41	0.08	1.33	1.315
XA019807335	3	1.59	0.06	1.53	
XA019516671	3	1.18	0.08	1.1	
XA014987231	3	1.39	0.09	1.3	
XA014797424	4	1.05	0.11	0.94	1.0275
XA015098657	4	1.06	0.08	0.98	
XA01773244D	4	1.16	0.08	1.08	
XA01518920I	4	1.18	0.07	1.11	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01503748B	5	1	0.04	0.96	0.885
XA01455804A	5	0.88	0.05	0.83	
XA01508448C	5	1	0.03	0.97	
XA01531178G	5	0.83	0.05	0.78	
XA01504325Q	6	0.73	0.05	0.68	0.7375
XA01456996U	6	0.74	0.05	0.69	
XA01448612G	6	0.89	0.06	0.83	
XA015278390	6	0.81	0.06	0.75	
XA014982174	7	0.74	0.05	0.69	0.71
XA019516663	7	0.81	0.06	0.75	
XA01479190F	7	0.9	0.07	0.83	
XA015030322	7	0.62	0.05	0.57	
XA01980996P	8	0.72	0.05	0.67	0.6775
XA01980995R	8	0.75	0.09	0.66	
XA015553677	8	0.9	0.07	0.83	
XA01535294G	8	0.61	0.06	0.55	
XA014529752	9	0.92	0.06	0.86	0.6725
XA01536023S	9	0.6	0.07	0.53	
XA01457898R	9	0.73	0.04	0.69	
XA017746626	9	0.67	0.06	0.61	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01457600K	10	0.75	0.06	0.69	0.58
XA015085688	10	0.7	0.04	0.66	
XA019434881	10	0.51	0.05	0.46	
XA014714288	10	0.56	0.05	0.51	
XA01521097K	11	0.65	0.07	0.58	0.4925
XA01514615J	11	0.48	0.06	0.42	
XA01458514C	11	0.67	0.08	0.59	
XA019120202	11	0.46	0.08	0.38	
XA01531298C	12	0.69	0.04	0.65	0.4825
XA01513845D	12	0.43	0.07	0.36	
XA014547762	12	0.66	0.07	0.59	
XA01475469Y	12	0.39	0.06	0.33	
XA01498370A	13	0.58	0.05	0.53	0.44
XA01532113V	13	0.45	0.06	0.39	
XA01505917A	13	0.52	0.06	0.46	
XA015294883	13	0.44	0.06	0.38	
XA01536512L	14	0.53	0.06	0.47	0.4175
XA01506761K	14	0.41	0.06	0.35	
XA01516807A	14	0.62	0.06	0.56	
XA01532209I	14	0.34	0.05	0.29	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01510540W	15	0.49	0.06	0.43	0.41
XA01913044R	15	0.34	0.07	0.27	
XA01509989V	15	0.56	0.05	0.51	
XA01944100U	15	0.47	0.04	0.43	
XA019813639	16	0.56	0.05	0.51	0.425
XA01524751J	16	0.42	0.05	0.37	
XA019129185	16	0.53	0.06	0.47	
XA00380126K	16	0.41	0.06	0.35	
XA01912906A	17	0.47	0.06	0.41	0.3725
XA015357764	17	0.35	0.05	0.3	
XA01480436A	17	0.54	0.04	0.5	
XA014668641	17	0.32	0.04	0.28	
XA015247395	18	0.34	0.05	0.29	0.28
XA01498151E	18	0.27	0.04	0.23	
XA01497852Z	18	0.32	0.04	0.28	
XA01556504E	18	0.39	0.07	0.32	
XA01523084P	19	0.38	0.04	0.34	0.31
XA019808523	19	0.3	0.05	0.25	
XA014757717	19	0.45	0.04	0.41	
XA01404401Z	19	0.27	0.03	0.24	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01506085O	20	0.38	0.06	0.32	0.2675
XA01904182Q	20	0.31	0.07	0.24	
XA01904185K	20	0.36	0.06	0.3	
XA01454156G	20	0.28	0.07	0.21	
XA01536700M	21	0.25	0.06	0.19	0.265
XA01457425C	21	0.27	0.07	0.2	
XA015278663	21	0.5	0.07	0.43	
XA014476870	21	0.31	0.07	0.24	
XA01509631M	22	0.21	0.05	0.16	0.2
XA01535261P	22	0.17	0.06	0.11	
XA01913027N	22	0.38	0.07	0.31	
XA014475484	22	0.27	0.05	0.22	
XA014788134	23	0.5	0.05	0.45	0.28
XA01521330Y	23	0.3	0.05	0.25	
XA01475540G	23	0.31	0.04	0.27	
XA019810594	23	0.21	0.06	0.15	
XA01522510V	24	0.26	0.05	0.21	0.165
XA01503291U	24	0.24	0.04	0.2	
XA015199942	24	0.19	0.04	0.15	
XA01468302J	24	0.14	0.04	0.1	

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01536178B	0	12.16	0.17	11.99	15.005
XA01532276H	0	17.75	0.16	17.59	
XA01514258H	0	18.28	0.18	18.1	
XA01504832L	0	12.48	0.14	12.34	
XA01904822I	1	5.32	0.09	5.23	5.6025
XA01506266K	1	6.28	0.08	6.2	
XA01458460H	1	5.08	0.09	4.99	
XA01952275B	1	6.08	0.09	5.99	
XA01503321Z	2	3.23	0.06	3.17	3.1075
XA015278168	2	3.37	0.06	3.31	
XA015000440	2	2.7	0.06	2.64	
XA01981210M	2	3.38	0.07	3.31	
XA01911713K	3	2.35	0.07	2.28	2.3
XA019807335	3	2.39	0.06	2.33	
XA019516671	3	2.24	0.08	2.16	
XA014987231	3	2.51	0.08	2.43	
XA014797424	4	1.69	0.08	1.61	1.5775
XA015098657	4	1.81	0.07	1.74	
XA01773244D	4	1.4	0.1	1.3	
XA01518920I	4	1.75	0.09	1.66	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01503748B	5	1.46	0.04	1.42	1.5
XA01455804A	5	1.59	0.05	1.54	
XA01508448C	5	1.58	0.03	1.55	
XA01531178G	5	1.53	0.04	1.49	
XA01504325Q	6	1.28	0.05	1.23	1.195
XA01456996U	6	1.35	0.06	1.29	
XA01448612G	6	1.27	0.05	1.22	
XA015278390	6	1.11	0.07	1.04	
XA014982174	7	1.27	0.04	1.23	1.2375
XA019516663	7	1.38	0.08	1.3	
XA01479190F	7	1.23	0.06	1.17	
XA015030322	7	1.29	0.04	1.25	
XA01980996P	8	1.02	0.05	0.97	0.9775
XA01980995R	8	0.9	0.06	0.84	
XA015553677	8	1.12	0.07	1.05	
XA01535294G	8	1.1	0.05	1.05	
XA014529752	9	1.12	0.06	1.06	1.04
XA01536023S	9	1.12	0.04	1.08	
XA01457898R	9	1.1	0.06	1.04	
XA017746626	9	1.04	0.06	0.98	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01457600K	10	1.02	0.06	0.96	0.975
XA015085688	10	1.04	0.04	1	
XA019434881	10	1.06	0.05	1.01	
XA014714288	10	0.97	0.04	0.93	
XA01521097K	11	1.03	0.06	0.97	0.8425
XA01514615J	11	0.85	0.09	0.76	
XA01458514C	11	0.86	0.05	0.81	
XA019120202	11	0.88	0.05	0.83	
XA01531298C	12	0.91	0.05	0.86	0.775
XA01513845D	12	0.77	0.06	0.71	
XA014547762	12	0.88	0.07	0.81	
XA01475469Y	12	0.77	0.05	0.72	
XA01498370A	13	0.65	0.06	0.59	0.7075
XA01532113V	13	0.82	0.05	0.77	
XA01505917A	13	0.83	0.08	0.75	
XA015294883	13	0.76	0.04	0.72	
XA01536512L	14	0.83	0.07	0.76	0.675
XA01506761K	14	0.69	0.07	0.62	
XA01516807A	14	0.79	0.05	0.74	
XA01532209I	14	0.62	0.04	0.58	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01510540W	15	0.72	0.05	0.67	0.64
XA01913044R	15	0.65	0.07	0.58	
XA01509989V	15	0.8	0.05	0.75	
XA01944100U	15	0.61	0.05	0.56	
XA019813639	16	0.56	0.05	0.51	0.5575
XA01524751J	16	0.52	0.04	0.48	
XA019129185	16	0.75	0.05	0.7	
XA00380126K	16	0.61	0.07	0.54	
XA01912906A	17	0.48	0.06	0.42	0.455
XA015357764	17	0.52	0.04	0.48	
XA01480436A	17	0.55	0.04	0.51	
XA014668641	17	0.45	0.04	0.41	
XA015247395	18	0.34	0.04	0.3	0.3775
XA01498151E	18	0.53	0.03	0.5	
XA01497852Z	18	0.4	0.05	0.35	
XA01556504E	18	0.44	0.08	0.36	
XA01523084P	19	0.59	0.06	0.53	0.415
XA019808523	19	0.4	0.05	0.35	
XA014757717	19	0.45	0.04	0.41	
XA01404401Z	19	0.41	0.04	0.37	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 150 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01506085O	20	0.47	0.05	0.42	0.3375
XA01904182Q	20	0.31	0.06	0.25	
XA01904185K	20	0.48	0.05	0.43	
XA01454156G	20	0.32	0.07	0.25	
XA01536700M	21	0.43	0.06	0.37	0.3
XA01457425C	21	0.33	0.05	0.28	
XA015278663	21	0.4	0.04	0.36	
XA014476870	21	0.26	0.07	0.19	
XA01509631M	22	0.27	0.06	0.21	0.2575
XA01535261P	22	0.23	0.06	0.17	
XA01913027N	22	0.44	0.05	0.39	
XA014475484	22	0.31	0.05	0.26	
XA014788134	23	0.21	0.05	0.16	0.2125
XA01521330Y	23	0.21	0.05	0.16	
XA01475540G	23	0.43	0.05	0.38	
XA019810594	23	0.21	0.06	0.15	
XA01522510V	24	0.27	0.04	0.23	0.215
XA01503291U	24	0.22	0.04	0.18	
XA015199942	24	0.32	0.05	0.27	
XA01468302J	24	0.23	0.05	0.18	

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01536178B	0	20.17	0.14	20.03	20.7625
XA01532276H	0	21.2	0.15	21.05	
XA01514258H	0	21.71	0.15	21.56	
XA01504832L	0	20.56	0.15	20.41	
XA01904822I	1	8.17	0.09	8.08	6.995
XA01506266K	1	7.62	0.08	7.54	
XA01458460H	1	6.44	0.09	6.35	
XA01952275B	1	6.11	0.1	6.01	
XA01503321Z	2	3.68	0.07	3.61	3.7975
XA015278168	2	3.96	0.06	3.9	
XA015000440	2	3.97	0.06	3.91	
XA01981210M	2	3.85	0.08	3.77	
XA01911713K	3	2.43	0.07	2.36	2.7075
XA019807335	3	2.9	0.06	2.84	
XA019516671	3	2.78	0.07	2.71	
XA014987231	3	2.99	0.07	2.92	
XA014797424	4	1.62	0.06	1.56	1.7925
XA015098657	4	1.77	0.07	1.7	
XA01773244D	4	2.05	0.08	1.97	
XA01518920I	4	2.01	0.07	1.94	

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01503748B	5	1.66	0.05	1.61	1.6775
XA01455804A	5	1.68	0.06	1.62	
XA01508448C	5	1.78	0.04	1.74	
XA01531178G	5	1.78	0.04	1.74	
XA01504325Q	6	1.26	0.04	1.22	1.3175
XA01456996U	6	1.48	0.04	1.44	
XA01448612G	6	1.38	0.06	1.32	
XA015278390	6	1.35	0.06	1.29	
XA014982174	7	1	0.06	0.94	1.1875
XA019516663	7	1.31	0.08	1.23	
XA01479190F	7	1.29	0.06	1.23	
XA015030322	7	1.4	0.05	1.35	
XA01980996P	8	0.96	0.05	0.91	1.03
XA01980995R	8	1.03	0.07	0.96	
XA015553677	8	1.04	0.05	0.99	
XA01535294G	8	1.33	0.07	1.26	
XA014529752	9	1.15	0.06	1.09	0.975
XA01536023S	9	0.96	0.06	0.9	
XA01457898R	9	0.81	0.05	0.76	
XA017746626	9	1.21	0.06	1.15	

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01457600K	10	1.03	0.06	0.97	1.0475
XA015085688	10	1.2	0.04	1.16	
XA019434881	10	1.08	0.06	1.02	
XA014714288	10	1.1	0.06	1.04	
XA01521097K	11	0.79	0.07	0.72	0.795
XA01514615J	11	0.79	0.07	0.72	
XA01458514C	11	0.94	0.06	0.88	
XA019120202	11	0.93	0.07	0.86	
XA01531298C	12	0.87	0.06	0.81	0.8775
XA01513845D	12	1.02	0.05	0.97	
XA014547762	12	0.98	0.05	0.93	
XA01475469Y	12	0.86	0.06	0.8	
XA01498370A	13	0.63	0.06	0.57	0.765
XA01532113V	13	0.92	0.06	0.86	
XA01505917A	13	0.89	0.06	0.83	
XA015294883	13	0.85	0.05	0.8	
XA01536512L	14	0.82	0.06	0.76	0.6925
XA01506761K	14	0.78	0.05	0.73	
XA01516807A	14	0.84	0.07	0.77	
XA01532209I	14	0.56	0.05	0.51	

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01510540W	15	0.54	0.05	0.49	0.6325
XA01913044R	15	0.8	0.07	0.73	
XA01509989V	15	0.76	0.04	0.72	
XA01944100U	15	0.64	0.05	0.59	
XA019813639	16	0.8	0.05	0.75	0.675
XA01524751J	16	0.64	0.05	0.59	
XA019129185	16	0.82	0.05	0.77	
XA00380126K	16	0.64	0.05	0.59	
XA01912906A	17	0.54	0.04	0.5	0.4975
XA015357764	17	0.47	0.06	0.41	
XA01480436A	17	0.77	0.05	0.72	
XA014668641	17	0.42	0.06	0.36	
XA015247395	18	0.65	0.05	0.6	0.4775
XA01498151E	18	0.46	0.05	0.41	
XA01497852Z	18	0.58	0.05	0.53	
XA01556504E	18	0.43	0.06	0.37	
XA01523084P	19	0.46	0.04	0.42	0.435
XA019808523	19	0.38	0.05	0.33	
XA014757717	19	0.67	0.04	0.63	
XA01404401Z	19	0.41	0.05	0.36	

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ผลการวัดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	Concrete (Sheet)	Deep Dose (mSv)	Base Deep Dose (mSv)	True Deep Dose (mSv)	Mean Deep Dose (mSv)
XA01506085O	20	0.45	0.05	0.4	0.3675
XA01904182Q	20	0.36	0.06	0.3	
XA01904185K	20	0.57	0.06	0.51	
XA01454156G	20	0.31	0.05	0.26	
XA01536700M	21	0.32	0.06	0.26	0.41
XA01457425C	21	0.35	0.05	0.3	
XA015278663	21	0.71	0.05	0.66	
XA014476870	21	0.48	0.06	0.42	
XA01509631M	22	0.32	0.05	0.27	0.295
XA01535261P	22	0.31	0.05	0.26	
XA01913027N	22	0.41	0.04	0.37	
XA014475484	22	0.32	0.04	0.28	
XA014788134	23	0.49	0.05	0.44	0.2775
XA01521330Y	23	0.28	0.05	0.23	
XA01475540G	23	0.31	0.05	0.26	
XA019810594	23	0.23	0.05	0.18	
XA01522510V	24	0.27	0.04	0.23	0.235
XA01503291U	24	0.27	0.04	0.23	
XA015199942	24	0.25	0.04	0.21	
XA01468302J	24	0.3	0.03	0.27	

ภาคผนวก ค ข้อมูลการวัดปริมาณรังสีเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิง

ตารางที่ ค.1 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 70 kVp

OSLs Serial Number	ปริมาณการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (mSv)	ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ (mSv)	ค่าเฉลี่ยการวัดรังสีเอกซ์ (mSv)	ค่าอัตราส่วนการกระเจิง (a)
XA014529752	-	24.22	23.56	0.0040
XA01536023S	-	22.69		
XA01457898R	-	22.32		
XA017746626	-	25.01		
XA01457600K	0.06	-	0.095	
XA015085688	0.11	-		
XA019434881	0.11	-		
XA014714288	0.1	-		

ตารางที่ ค.2 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 100 kVp

OSLs Serial Number	ปริมาณการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (mSv)	ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ (mSv)	ค่าเฉลี่ยการวัดรังสีเอกซ์ (mSv)	ค่าอัตราส่วนการกระเจิง (a)
XA014529752	-	30.55	29.635	0.0040
XA01536023S	-	30.26		
XA01457898R	-	28.17		
XA017746626	-	29.56		
XA01457600K	0.08	-	0.12	
XA015085688	0.16	-		
XA019434881	0.1	-		
XA014714288	0.14	-		

ตารางที่ ค.3 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 150 kVp

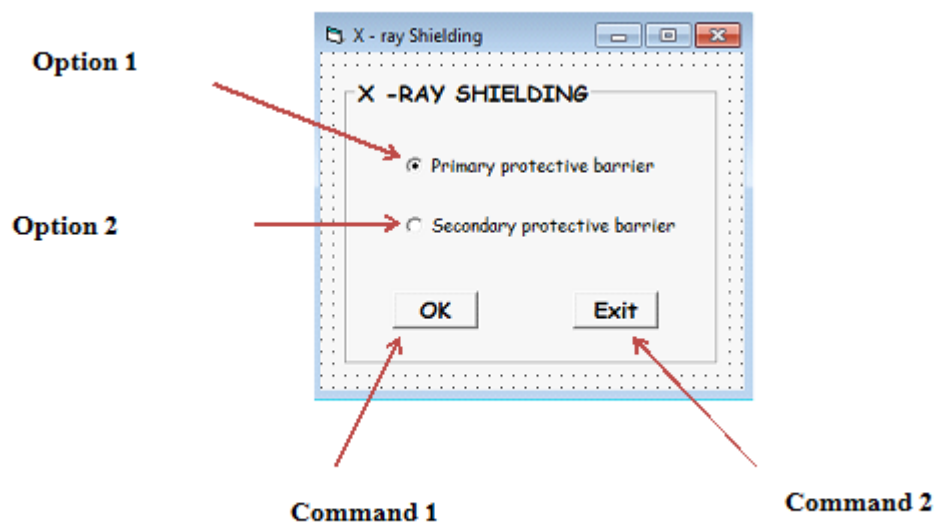
OSLs Serial Number	ปริมาณการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (mSv)	ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ (mSv)	ค่าเฉลี่ยการวัดรังสีเอกซ์ (mSv)	ค่าอัตราส่วนการกระเจิง (a)
XA014529752	-	43.79	52.2	0.0034
XA01536023S	-	53.78		
XA01457898R	-	55.16		
XA017746626	-	56.07		
XA01457600K	0.13	-	0.175	
XA015085688	0.23	-		
XA019434881	0.19	-		
XA014714288	0.15	-		

ตารางที่ ค.4 ผลการวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนการกระเจิงที่ความต่างศักย์ 180 kVp

OSLs Serial Number	ปริมาณการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (mSv)	ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ (mSv)	ค่าเฉลี่ยการวัดรังสีเอกซ์ (mSv)	ค่าอัตราส่วนการกระเจิง (a)
XA014529752	-	46.75	55.305	0.0033
XA01536023S	-	62.19		
XA01457898R	-	66.8		
XA017746626	-	45.48		
XA01457600K	0.16	-	0.1825	
XA015085688	0.15	-		
XA019434881	0.23	-		
XA014714288	0.19	-		

ภาคผนวก ง ข้อมูลโปรแกรมการคำนวณ

(1) โค้ดคำสั่งหน้าต่างของโปรแกรม



ภาพที่ ง.1 หน้าแรกของโปรแกรมคำนวณ

Option Explicit

Private SelectMenu As Integer

Private Sub Command1_Click()

Select Case SelectMenu

Case 1

Form1.Hide

Form2.Show

Case 2

Form1.Hide

Form3.Show

End Select

End Sub

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
SelectMenu = 1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option1_Click()
```

```
SelectMenu = 1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option2_Click()
```

```
SelectMenu = 2
```

```
End Sub
```

(2) โค้ดคำสั่งการคำนวณ Primary Protective Barrier

ภาพที่ ง.2 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ Primary Protective Barrier

Option Explicit

Private P As Single

Private T As Single

Private U As Double

Private W As Single

Private d As Single

Private KV As Single

Private kFact As Single

Private A As Single

Private B As Single

Private Sub Combo1_Click()

Select Case Combo1.Text

Case "70 kV"

KV = 70

Case "80 kV"

KV = 80

Case "90 kV"

KV = 90

Case "100 kV"

KV = 100

Case "110 kV"

KV = 110

Case "120 kV"

KV = 120

Case "130 kV"

KV = 130

Case "140 kV"

KV = 140

Case "150 kV"

KV = 150

Case "160 kV"

KV = 160

Case "170 kV"

KV = 170

Case "180 kV"

KV = 180

End Select

End Sub

Private Sub Command1_Click()

Dim thick As Single

If U <= 0 Or U > 1 Then

 MsgBox ("Please Enter U > 0 or U <= 1")

 Text2.SetFocus

 GoTo Endloop

End If

If W = 0 Then

 MsgBox ("Please Enter Workload")

 Text3.SetFocus

 GoTo Endloop

End If

If d = 0 Then

 MsgBox ("Please Enter distance")

 Text1.SetFocus

 GoTo Endloop

End If

kFact = d * d * P / (W * U * T)

Select Case KV

 Case 70

 A = 18.962

 B = 0.919

 Case 80

 A = 6.1088

 B = 0.5

 Case 90

 A = 9.2036

 B = 0.492

 Case 100

 A = 11.763

$$B = 0.487$$

Case 110

$$A = 5.0133$$

$$B = 0.358$$

Case 120

$$A = 5.47$$

$$B = 0.342$$

Case 130

$$A = 5.8927$$

$$B = 0.333$$

Case 140

$$A = 6.2461$$

$$B = 0.326$$

Case 150

$$A = 6.5276$$

$$B = 0.321$$

Case 160

$$A = 6.7542$$

$$B = 0.31$$

Case 170

$$A = 7.1715$$

$$B = 0.303$$

Case 180

$$A = 7.6573$$

$$B = 0.299$$

End Select

$$\text{thick} = -(1 / B) * \text{Log}(k\text{Fact} / A)$$

Label6.Caption = thick

Label4.Caption = kFact

Endloop:

End Sub

Private Sub Command2_Click()

Form2.Hide

Form1.Show

End Sub

Private Sub Command3_Click()

End

End Sub

Private Sub Form_Load()

P = 1

T = 1

Combo1.AddItem "70 kV"

Combo1.AddItem "80 kV"

Combo1.AddItem "90 kV"

Combo1.AddItem "100 kV"

Combo1.AddItem "110 kV"

Combo1.AddItem "120 kV"

Combo1.AddItem "125 kV"

Combo1.AddItem "130 kV"

Combo1.AddItem "140 kV"

Combo1.AddItem "150 kV"

Combo1.AddItem "160 kV"

Combo1.AddItem "170 kV"

Combo1.AddItem "180 kV"

KV = 70

End Sub

Private Sub Option1_Click()

P = 1

End Sub

Private Sub Option2_Click()

P = 0.1

End Sub

Private Sub Option3_Click()

T = 1

End Sub

Private Sub Option4_Click()

T = 1 / 4

End Sub

Private Sub Option5_Click()

T = 1 / 16

End Sub

Private Sub Text1_Change()

d = Val(Text1.Text)

End Sub

Private Sub Text2_Change()

U = Val(Text2.Text)

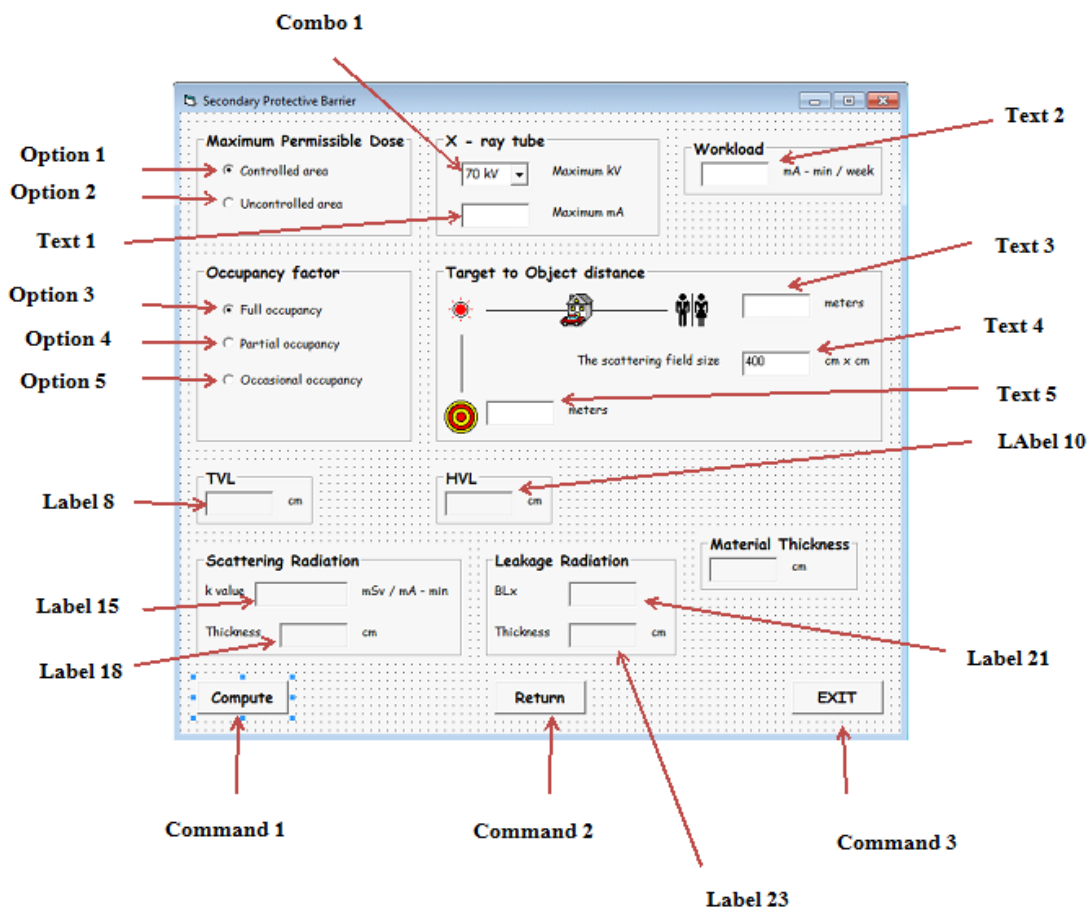
End Sub

Private Sub Text3_Change()

W = Val(Text3.Text)

End Sub

(2) ใ้ค้ดคำสั่งการคำนวณ Secondary Protective Barrier



ภาพที่ 3.3 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ Secondary Protective Barrier

Option Explicit

Private P As Single

Private T As Single

Private W As Single

Private d As Single

Private KV As Single

Private A As Single

Private B As Single

Private I As Single

Private dSkin As Single

Private dObject As Single
Private FieldSize As Single
Private ratio As Single
Private f As Single

Private Sub Combo1_Click()

Select Case Combo1.Text

Case "70 kV"

KV = 70

ratio = 0.004

f = 1

Case "80 kV"

KV = 80

ratio = 0.004

f = 1

Case "90 kV"

KV = 90

ratio = 0.004

f = 1

Case "100 kV"

KV = 100

ratio = 0.004

f = 1

Case "110 kV"

KV = 110

ratio = 0.0039

f = 1

Case "120 kV"

KV = 120

ratio = 0.0038

```
f = 1
Case "130 kV"
  KV = 130
  ratio = 0.0036
  f = 1
Case "140 kV"
  KV = 140
  ratio = 0.0035
  f = 1
Case "150 kV"
  KV = 150
  ratio = 0.0034
  f = 1
Case "160 kV"
  KV = 160
  ratio = 0.0033
  f = 1
Case "170 kV"
  KV = 170
  ratio = 0.0033
  f = 1
Case "180 kV"
  KV = 180
  ratio = 0.0033
  f = 1
End Select
End Sub

Private Sub Command1_Click()
Dim ThickScat As Single
```

```

Dim kFact As Single
Dim HVL As Single
Dim TVL As Single
Dim ThickLeak As Single
Dim BLx As Single
Dim HighThick As Single
Dim LowThick As Single
Dim DiffThick As Single
Dim OutThick As Single
If W <= 0 Then
    MsgBox ("Please Enter Workload")
    Text2.SetFocus
    GoTo Endloop
End If
If dSkin <= 0 Then
    MsgBox ("Please Enter Target to skin distance")
    Text5.SetFocus
    GoTo Endloop
End If
If dObject <= 0 Then
    MsgBox ("Please Enter Target to object distance")
    Text3.SetFocus
    GoTo Endloop
End If
If I <= 0 Then
    MsgBox ("Please Enter I > 0 ")
    Text1.SetFocus
    GoTo Endloop
End If
kFact = P * (dSkin) ^ 2 * (dObject) ^ 2 * 400 / (ratio * W * T * f * FieldSize)

```

Select Case KV

Case 70

$$A = 18.962$$

$$B = 0.919$$

$$\text{HVL} = 0.75$$

$$\text{TVL} = 2.51$$

Case 80

$$A = 6.1088$$

$$B = 0.5$$

$$\text{HVL} = 1.45$$

$$\text{TVL} = 4.83$$

Case 90

$$A = 9.2036$$

$$B = 0.492$$

$$\text{HVL} = 1.48$$

$$\text{TVL} = 4.92$$

Case 100

$$A = 11.763$$

$$B = 0.487$$

$$\text{HVL} = 1.5$$

$$\text{TVL} = 4.97$$

Case 110

$$A = 5.0133$$

$$B = 0.358$$

$$\text{HVL} = 1.94$$

$$\text{TVL} = 6.43$$

Case 120

$$A = 5.47$$

$$B = 0.342$$

$$\text{HVL} = 2.03$$

$$\text{TVL} = 6.73$$

Case 130

$$A = 5.8927$$

$$B = 0.333$$

$$\text{HVL} = 2.08$$

$$\text{TVL} = 6.91$$

Case 140

$$A = 6.2461$$

$$B = 0.326$$

$$\text{HVL} = 2.13$$

$$\text{TVL} = 7.06$$

Case 150

$$A = 6.5276$$

$$B = 0.321$$

$$\text{HVL} = 2.16$$

$$\text{TVL} = 7.17$$

Case 160

$$A = 6.7542$$

$$B = 0.31$$

$$\text{HVL} = 2.24$$

$$\text{TVL} = 7.43$$

Case 170

$$A = 7.1715$$

$$B = 0.303$$

$$\text{HVL} = 2.29$$

$$\text{TVL} = 7.6$$

Case 180

$$A = 7.6573$$

$$B = 0.299$$

$$\text{HVL} = 2.32$$

$$\text{TVL} = 7.7$$

End Select

$$\text{ThickScat} = -(1 / B) * \text{Log}(k\text{Fact} / A)$$

$$\text{BLx} = P * (\text{dObject})^2 * 60 * I / (W * T)$$

$$\text{ThickLeak} = -(\text{HVL} / 0.693) * \text{Log}(\text{BLx})$$

Label8.Caption = TVL

Label10.Caption = HVL

Label18.Caption = ThickScat

Label23.Caption = ThickLeak

Label15.Caption = kFact

Label21.Caption = BLx

If ThickScat > ThickLeak Then

 HighThick = ThickScat

 LowThick = ThickLeak

End If

If ThickScat < ThickLeak Then

 HighThick = ThickLeak

 LowThick = ThickScat

End If

$$\text{DiffThick} = \text{HighThick} - \text{LowThick}$$

If DiffThick >= TVL Then

 OutThick = HighThick

Else

 OutThick = HighThick + HVL

End If

Label12.Caption = OutThick

Endloop:

End Sub

Private Sub Command2_Click()

Form3.Hide

Form1.Show

End Sub

Private Sub Command3_Click()

End

End Sub

Private Sub Form_Load()

P = 1

T = 1

Combo1.AddItem "70 kV"

Combo1.AddItem "80 kV"

Combo1.AddItem "90 kV"

Combo1.AddItem "100 kV"

Combo1.AddItem "110 kV"

Combo1.AddItem "120 kV"

Combo1.AddItem "125 kV"

Combo1.AddItem "130 kV"

Combo1.AddItem "140 kV"

Combo1.AddItem "150 kV"

Combo1.AddItem "160 kV"

Combo1.AddItem "170 kV"

Combo1.AddItem "180 kV"

KV = 70

FieldSize = 400

f = 1

ratio = 0.004

A = 6.9129

B = 0.743

End Sub

Private Sub Label15_Click()

End Sub

Private Sub Option1_Click()

P = 1

End Sub

Private Sub Option2_Click()

P = 0.1

End Sub

Private Sub Option3_Click()

T = 1

End Sub

Private Sub Option4_Click()

T = 1 / 4

End Sub

Private Sub Option5_Click()

T = 1 / 16

End Sub

Private Sub Text1_Change()

I = Val(Text1.Text)

End Sub

Private Sub Text2_Change()

W = Val(Text2.Text)

End Sub

Private Sub Text3_Change()

dObject = Val(Text3.Text)

End Sub

Private Sub Text4_Change()

FieldSize = Val(Text4.Text)

End Sub

Private Sub Text5_Change()

dSkin = Val(Text5.Text)

End Sub

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจุมพฏ จำเนียร เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ.2529 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552