

การลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์สำหรับเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีลำรังสีแบบทรงกรวย

นางสาวชาลินี ธนทรัพย์สมบัติ

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.

REDUCTION OF X-RAY SCATTERING EFFECT FOR CONE BEAM  
COMPUTED TOMOGRAPHY

Miss Chalinee Thanasupsombat

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

การลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์สำหรับ  
เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีลำรังสีแบบทรงกรวย

โดย

นางสาวชาลิณี ธนทรัพย์สมบัติ

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.เสาวภาคย์ ธงวิจิตรมณี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัณวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวาณิชย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.เสาวภาคย์ ธงวิจิตรมณี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทร์สุนันต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.จตุวัฒน์ ราชเรืองระบิน)

ชาลินี ธนทรัพย์สมบัติ : การลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์สำหรับเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีลำรังสีแบบทรงกรวย. (REDUCTION OF X-RAY SCATTERING EFFECT FOR CONE BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เสาวภาคย์ ธงวิจิตรมณี, 105 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายในวัตถุที่มีต่อภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรมซึ่งพัฒนาขึ้นโดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยใช้ Geant4 ในการสร้างแบบจำลองเลียนแบบระบบถ่ายภาพตัดขวางเพื่อใช้ในการจำลองถ่ายภาพวัตถุ ในส่วนของการวัดรังสีในการจำลองได้เขียนโปรแกรมสำหรับแยกวัดรังสีเอกซ์ที่ตกเข้าสู่บริเวณเครื่องวัดรังสี โดยแบ่งข้อมูลของรังสีออกเป็นสองส่วนคือ รังสีเอกซ์ปฐมภูมิและรังสีเอกซ์กระเจิง ข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์กระเจิง นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความเข้มของรังสีที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชันเทียบกับผลจากการทดลองเพื่อตรวจสอบผลซึ่งพบว่า ความเข้มของรังสีจากผลการจำลองและจากผลการทดลองมีลักษณะสอดคล้องกันดี หลังจากนั้นได้นำข้อมูลจากการจำลองมาคำนวณหาสัดส่วนระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ปฐมภูมิต่อปริมาณรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่แต่ละตำแหน่งบนภาพโปรเจกชัน และนำสัดส่วนที่ได้นี้มาใช้ในการปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพโปรเจกชันจากการทดลอง โดยพบว่า ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากภาพโปรเจกชันที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว มีปริมาณ Cupping artifact ปรากฏบนภาพลดลง แสดงให้เห็นว่าภาพตัดขวางมีคุณภาพดีขึ้น

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

# # 5370420021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : GEANT4 / MONTE CARLO METHOD / COMPUTED TOMOGRAPHY /  
SCATTER ARTIFACT

CHALINEE THANASUPSOMBAT : REDUCTION OF X-RAY SCATTERING EFFECT  
FOR CONE BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY. ADVISOR : PHONGPHAETH  
PENGVANICH, Ph.D., CO-ADVISOR : SAOWAPAK THONGVIGITMANEE, Ph.D.,  
105 pp.

The purpose of this research is to reduce the effect of X-ray scattering inside an object for cone beam computed tomography (CBCT). This effect can reduce the quality of the CT images which affects the effectiveness of their applications. In this research, a Monte Carlo-based toolkit, Geant4, was used to simulate a CT system of the dental CT machine constructed by the National Science and Technology Development Agency (NSTDA). In the simulation, X-ray signals detected by the detector were divided into two parts: the primary X-rays and the scattered x-rays. The scattered X-ray properties were analyzed from the simulated data. The X-ray projection image from simulation gives a good agreement with the projection image from an actual CT system. The primary to all X-ray intensity ratios in each region on the detector from the simulated data was applied to correct the experimental projection images. The images which are reconstructed from the corrected experimental projection images appear to decrease the cupping artifacts. This confirms the improvement of the CT image quality.

Department : Nuclear Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Nuclear Technology Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012 Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ทั้งนี้ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อ อ.ดร.พงษ์แพทย์ เฟ่งวาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ ดร.เสาวภาคย์ ธงวิจิตรมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ในด้านต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนให้ทุนสำหรับงานวิจัยมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณสรพงศ์ อุตะภา และพี่ ๆ ทุกท่านจากห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีภาพ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำหรับข้อมูลการทดลองถ่ายภาพตัดขวาง โปรแกรมการคำนวณสร้างภาพตัดขวาง รวมไปถึงข้อชี้แนะต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี รวมไปถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรม นิวเคลียร์ที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับงานวิจัยนี้

และท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้การช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดมา

## สารบัญ

|                                                                     | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                             | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                         | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                    | ฅ    |
| สารบัญรูป.....                                                      | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                             | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                    | 4    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                                          | 4    |
| 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....                               | 4    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                  | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี.....                                                  | 6    |
| 2.1 การผลิตรังสีเอกซ์.....                                          | 6    |
| 2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร.....                            | 8    |
| 2.3 การถ่ายภาพตัดขวางโดยอาศัยคอมพิวเตอร์.....                       | 13   |
| 2.4 การจำลองแบบมอนติคาร์โล.....                                     | 17   |
| บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....                                      | 19   |
| 3.1 การสร้างแบบจำลองด้วย Geant4.....                                | 19   |
| 3.2 การทดลองด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวางสำหรับงานทางด้านทันตกรรม.....     | 25   |
| 3.3 การคำนวณวิเคราะห์ข้อมูล.....                                    | 28   |
| บทที่ 4 การทดสอบการจำลองถ่ายภาพ.....                                | 34   |
| 4.1 การทดสอบใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพ.....                        | 34   |
| 4.2 ผลการทดสอบใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพ.....                      | 36   |
| 4.3 การทดสอบผลของขนาดวัสดุภายในวัตถุที่มีต่อปริมาณการกระเจิง.....   | 44   |
| 4.4 ผลการทดสอบผลของขนาดวัสดุภายในวัตถุที่มีต่อปริมาณการกระเจิง..... | 46   |

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 5 การเปรียบเทียบผลและการลดการรบกวนในภาพตัดขวาง.....      | 50   |
| 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง.....    | 50   |
| 5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง.....  | 51   |
| 5.3 การลดการรบกวนในภาพตัดขวางที่ได้จากการทดลอง.....            | 55   |
| 5.4 ผลการจำลองถ่ายภาพตัดขวาง.....                              | 56   |
| 5.5 ผลการปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจคชันจากการทดลอง..... | 64   |
| 5.6 ผลการคำนวณสร้างภาพตัดขวางจากการทดลอง.....                  | 66   |
| บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....                         | 74   |
| 6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย.....                              | 74   |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ.....                                            | 76   |
| รายการอ้างอิง.....                                             | 78   |
| ภาคผนวก.....                                                   | 80   |
| ภาคผนวก ก.....                                                 | 81   |
| ภาคผนวก ข.....                                                 | 103  |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....                                | 105  |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1 การกำหนดอันตรายกิริยาในการจำลอง.....                                  | 22   |
| 3.2 การกำหนดวัสดุในการจำลอง.....                                          | 24   |
| 3.3 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการสร้างฟิลเตอร์.....                            | 29   |
| 4.1 การกำหนดข้อมูลนำเข้าสำหรับการสร้างลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวย.....         | 35   |
| 5.1 ค่าเลขชี้ที่บ่งบภาพตัดขวางก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง..... | 72   |
| 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดค่าเกรย์สเกล.....                         | 73   |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                          | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ตัวอย่างภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพหัวหมูด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์.....              | 3    |
| 1.2 ตัวอย่างภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพทรงกระบอกน้ำด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์.....        | 3    |
| 2.1 หลอดรังสีเอกซ์.....                                                                         | 6    |
| 2.2 ปปรากฏการณ์ Heel effect.....                                                                | 7    |
| 2.3 ปปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....                                                              | 9    |
| 2.4 การกระเจิงแบบเรย์ลี.....                                                                    | 10   |
| 2.5 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน.....                                                                  | 11   |
| 2.6 ระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ลำรังสีแบบลำแคบ.....                                                | 14   |
| 2.7 ระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ลำรังสีแบบทรงกรวย.....                                              | 14   |
| 2.8 การสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธีแบคโปรเจคชัน.....                                                 | 15   |
| 2.9 ผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์.....                                                           | 16   |
| 2.10 ผลการเกิดความกระต่างของลำรังสีเอกซ์เมื่อผ่านวัตถุที่มีความหนาต่างกัน.....                  | 17   |
| 3.1 แผนภาพหมวดหมู่ของคลาสใน Geant4.....                                                         | 21   |
| 3.2 ระบบที่ใช้ทดลองถ่ายภาพตัดขวาง.....                                                          | 27   |
| 3.3 เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม DentiScan.....                                        | 27   |
| 3.4 สเปกตรัมพลังงานของลำรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยได้มาจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SpekCalc..... | 28   |
| 3.5 การจัดวางของระบบถ่ายภาพตัดขวาง.....                                                         | 28   |
| 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพที่ได้จากการทดลอง.....                      | 31   |
| 4.1 วัตถุทดสอบที่ 2.....                                                                        | 34   |
| 4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการจำลองถ่ายภาพ.....                                                    | 35   |
| 4.3 ภาพโปรเจคชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1.....                   | 37   |
| 4.4 ภาพโปรเจคชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2.....                   | 37   |
| 4.5 ภาพโปรเจคชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1.....                   | 38   |
| 4.6 ภาพโปรเจคชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2.....                   | 39   |

|      |                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7  | ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจกชันในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ จากตำแหน่ง $x$ ถึง $x'$ สำหรับวัตถุทดสอบที่ 1 .....                                                                                                | 40 |
| 4.8  | ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจกชันในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ จากตำแหน่ง $x$ ถึง $x'$ สำหรับวัตถุทดสอบที่ 2 .....                                                                                                | 41 |
| 4.9  | สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1 .....                                                                                                                                             | 41 |
| 4.10 | สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2 .....                                                                                                                                             | 42 |
| 4.11 | สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 1 .....                                                                                                                                                                    | 43 |
| 4.12 | สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 2 ณ บริเวณรูอากาศ                                                                                                                                                          | 43 |
| 4.13 | สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 2 ณ บริเวณกระดูก                                                                                                                                                           | 44 |
| 4.14 | วัตถุในลอนที่ใช้ในการถ่ายภาพ .....                                                                                                                                                                                                  | 45 |
| 4.15 | ระบบที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน .....                                                                                                                                                                                         | 45 |
| 4.16 | ลำดับวัสดุที่อยู่ภายในวัตถุในลอน .....                                                                                                                                                                                              | 46 |
| 4.17 | ความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพในลอน โดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของรูอากาศที่แตกต่างกัน .....                                                                                                                          | 47 |
| 4.18 | เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพในลอนที่มีการเพิ่มขนาดของรูภายในเทียบกับความเข้มที่ได้จากการถ่ายภาพในลอนที่รูภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. ....                                  | 47 |
| 4.19 | ความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพในลอนที่ภายในใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ ลงไป โดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของวัสดุภายในที่แตกต่างกัน .....                                                                                        | 48 |
| 4.20 | เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพในลอนที่ภายในใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ โดยมีการเพิ่มขนาดของวัสดุภายในเทียบกับความเข้มที่ได้จากการถ่ายภาพในลอนที่วัสดุภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. .... | 48 |
| 5.1  | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัด ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน .....                                                                                                                                       | 51 |
| 5.2  | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัด ซึ่งได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอน .....                                                                                                                                       | 51 |

|      |                                                                                                     |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.3  | เปรียบเทียบความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดในลอน..... | 52 |
| 5.4  | ค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง.....                                             | 53 |
| 5.5  | ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากจำลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดในลอน.....                          | 54 |
| 5.6  | สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดในลอน.....  | 54 |
| 5.7  | สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุในลอน.....                                          | 55 |
| 5.8  | ระบบที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่ใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ.....                                     | 56 |
| 5.9  | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน.....                           | 57 |
| 5.10 | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน.....                           | 58 |
| 5.11 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการจำลอง.....                                                       | 59 |
| 5.12 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว.....                              | 60 |
| 5.13 | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน..... | 61 |
| 5.14 | ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน..... | 62 |
| 5.15 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในที่ได้จากการจำลอง.....                             | 63 |
| 5.16 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว.....    | 64 |
| 5.17 | ภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอน.....                                                 | 65 |
| 5.18 | ภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน.....                       | 66 |
| 5.19 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการทดลอง.....                                                       | 67 |
| 5.20 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว.....                              | 68 |
| 5.21 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายในซึ่งได้จากการทดลอง.....                               | 69 |
| 5.22 | ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายใน ซึ่งได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว.....     | 70 |
| 5.23 | บริเวณที่ใช้ในการศึกษาค่าเลขซีทีบนภาพตัดขวาง.....                                                   | 72 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากภาพถ่ายเอกซเรย์ธรรมดาซึ่งได้จากการถ่ายภาพเงา เมื่อนำมาใช้ประกอบการวินิจฉัยและรักษาโรคมักประสบปัญหาต่าง ๆ อาทิ การทับซ้อนกันของเงาอวัยวะในสามมิติ หรือการไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจนำไปสู่ความผิดพลาดของผลการวินิจฉัย จึงมีการคิดค้นเทคนิคการถ่ายภาพตัดขวางโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ (Computed tomography) ขึ้นมา ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยหลักการยิงรังสีทะลุผ่านผู้ป่วยโดยทำซ้ำกันในหลาย ๆ มุม จากนั้นจะนำข้อมูลความเข้มรังสีที่วัดได้ในแต่ละมุมมาคำนวณสร้างเป็นภาพตัดขวาง ทั้งนี้การถ่ายภาพตัดขวางด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-Ray computed tomography) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์เพื่อค้นหาความผิดปกติที่เกิดในร่างกาย ซึ่งสำหรับงานทางด้านทันตกรรมนั้น การถ่ายภาพตัดขวางด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในส่วนของวางแผนการรักษาคนไข้ เช่น การวางแผนผ่าตัดกระดูกขากรรไกร การวางแผนฝังรากฟันเทียม เป็นต้น ช่วยให้การรักษาเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบัน ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ได้ร่วมกับ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในการพัฒนาเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรมขึ้นเพื่อลดการนำเข้าเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์จากต่างประเทศ และเพื่อให้มีเครื่องมือเพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวยพลังงาน 90 kV และกระแส 6 mA ซึ่งจากการทดลองถ่ายภาพตัดขวางพบว่า ภาพที่สร้างขึ้นจากข้อมูลที่เก็บได้จากเครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบ Flat panel ยังมีการรบกวนปรากฏอยู่ในระดับที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้การรบกวนดังกล่าวจะเกิดมากขึ้นในกรณีที่เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือถ่ายวัตถุที่มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัตถุที่ถ่ายมีส่วนประกอบที่เป็นของเหลวหรือเนื้อเยื่อนอกเหนือไปจากส่วนประกอบที่เป็นกระดูกเพียงอย่างเดียวดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.1 โดยอาจเห็นได้ชัดเจนจากการถ่ายภาพตัดขวางของทรงกระบอกบรรจุน้ำดังรูปที่ 1.2 ซึ่งค่าเกรย์สเกลของวัสดุน้ำในภาพจะมีความไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้น การรบกวนในภาพที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) ของรังสีเอกซ์ภายในของเหลวหรือเนื้อเยื่อ ส่งผลให้รังสีส่วนที่เกิดการกระเจิงมีพลังงานลดลงและมีทิศทางที่

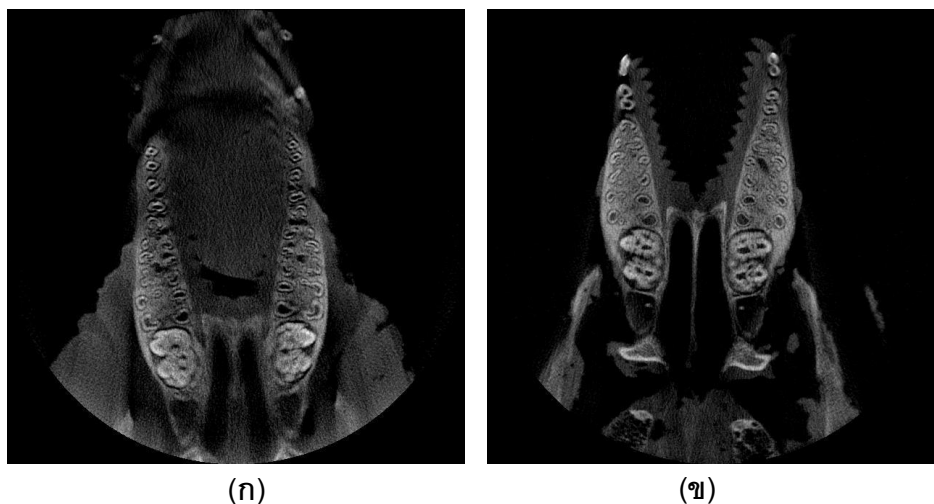
เปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อรังสีส่วนนี้เข้าสู่หัววัดพร้อมกับรังสีที่มีการทะลุผ่านวัตถุตามปกติ จะทำให้ข้อมูลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดรังสีมีความคลาดเคลื่อน เมื่อนำมาคำนวณสร้างภาพตัดขวางจึงทำให้เกิดการรบกวนปรากฏขึ้นบนภาพ

ในการศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้ หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้คือ การจำลองด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo methods) โดยเป็นวิธีที่ใช้ตัวเลขสุ่ม (Random number) ในการจำลองอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ซึ่งมีคุณลักษณะที่สามารถอธิบายได้ในเชิงความน่าจะเป็น ทั้งนี้ได้มีงานวิจัยที่หลากหลายเกี่ยวกับการใช้วิธีมอนติคาร์โลในการจำลองการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพตัดขวางสำหรับงานทางด้านการแพทย์และงานทางด้านอุตสาหกรรม โดยมีการศึกษาทั้งในเรื่องของปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิง [1,2,3,4] และปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการกระเจิง เช่น ขนาดของวัตถุ, ระยะห่างของแหล่งกำเนิดรังสีกับเครื่องวัดรังสี, สเปกตรัมพลังงานของรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพ เป็นต้น [1,2,3] ในส่วนของงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวางนั้น Reitz, I. [2] ได้ทดลองนำอัลกอริทึมที่อิงข้อมูลจากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมาใช้ในการปรับปรุงข้อมูลภาพโปรเจกชัน ซึ่งพบว่า ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากภาพโปรเจกชันหลังผ่านการปรับปรุงข้อมูลแล้วเกิด cupping บนภาพน้อยลง นอกจากนี้ Jarry, G. และคณะ [4] ได้ทดลองปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจกชันจากการทดลองโดยใช้ข้อมูลภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการหักลบ ซึ่งพบว่าภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากภาพโปรเจกชันชุดใหม่นี้มีปริมาณ cupping ปรากฏบนภาพลดลง

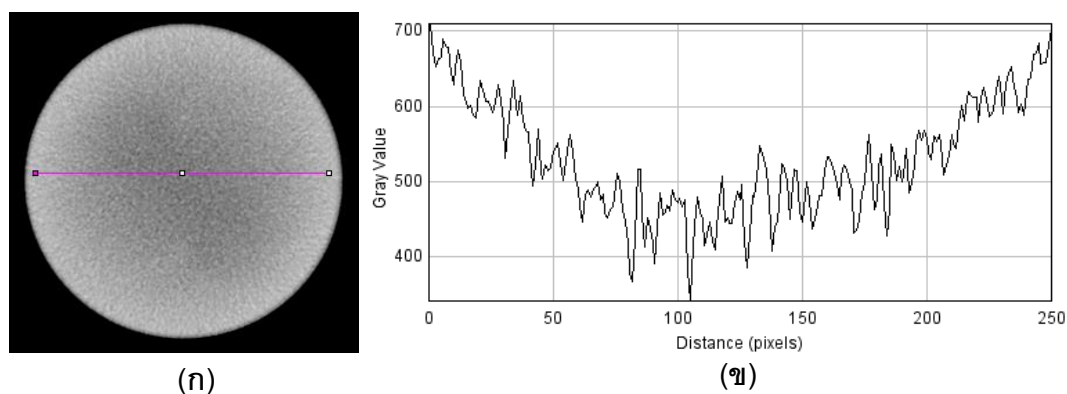
ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในของเหลวหรือเนื้อเยื่อ โดยใช้การจำลองการกระเจิงด้วยวิธีมอนติคาร์โลในการจำลองการถ่ายภาพวัตถุซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่มีพารามิเตอร์เช่นเดียวกับเนื้อเยื่อ (เช่น น้ำ) ในลักษณะรูปทรงต่าง ๆ และทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ส่วนที่มีการกระเจิง อาทิ ปริมาณการกระเจิง ระดับพลังงานของรังสี การกระจายตัวของรังสี เป็นต้น จากนั้นจึงนำเอาข้อมูลเหล่านี้มาทดลองใช้ในการลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพตัดขวางให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

โครงสร้างหลักของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย บทที่ 2 ซึ่งบรรยายถึงทฤษฎีหลักที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้, บทที่ 3 บรรยายถึงกระบวนการจำลองระบบถ่ายภาพตัดขวางรายละเอียดเกี่ยวกับระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ใช้ในการศึกษา รวมไปถึงการคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย, บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบการใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชันเพื่อทำการศึกษาปริมาณที่สนใจ, บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบการนำโปรแกรม

มาประยุกต์ใช้ โดยทำการเปรียบเทียบผลภาพโปรเจกชันระหว่างผลที่ได้จากการจำลองกับผลที่ได้จากการทดลอง และทดสอบการนำผลที่ได้จากการจำลองมาปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพจากการทดลอง สุดท้าย บทที่ 6 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพหัวหมูด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์  
(ก) ภาพที่ได้เมื่อเลาะเนื้อบางส่วนออก (ข) ภาพที่ได้เมื่อเลาะเนื้อออกทั้งหมด



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพทรงกระบอกน้ำด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (ก) ภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพทรงกระบอกบรรจุน้ำด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และ (ข) เกรย์สเกลบนภาพตัดขวาง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการกระเจิงและวิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ที่เป็นผลมาจากการกระเจิงในของเหลวหรือเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม

1.2.2 เพื่อนำผลการศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ไปใช้ลดการรบกวนต่อภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการกระเจิงและวิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ที่เป็นผลมาจากการกระเจิงในของเหลวหรือเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม DentiiScan ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

1.3.2 ศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในของเหลวหรือเนื้อเยื่อ โดยใช้วิธีมอนติคาร์โลในการจำลอง

1.3.3 วิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ส่วนที่มีการกระเจิงเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเข้มรังสีกระเจิง ระดับพลังงาน และการกระจายตัวของรังสีกระเจิง

1.3.4 นำผลการศึกษาที่ได้มาทดลองใช้ลดการรบกวนต่อภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม DentiiScan ที่ทางศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติพัฒนาขึ้น

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เลือกใช้โปรแกรมมอนติคาร์โลที่เหมาะสมต่อการจำลอง และศึกษารูปร่างของโปรแกรม



1.4.3 ทดสอบการใช้โปรแกรมในการจำลองการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในวัตถุที่มีวัสดุเป็นน้ำ โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ตามเครื่อง DentiiScan

1.4.4 วิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ส่วนที่มีการกระเจิงในวัตถุที่มีวัสดุเป็นน้ำ เพื่อศึกษาความเข้มรังสีกระเจิง ระดับพลังงาน และการกระจายตัวของรังสี

1.4.5 ใช้โปรแกรมในการจำลองการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในวัตถุที่สร้างขึ้นเลียนแบบวัตถุจริง โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ตามเครื่อง DentiiScan

1.4.6 เปรียบเทียบผลการถ่ายภาพที่ได้จากการจำลองกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพของเครื่อง DentiiScan

1.4.7 วิเคราะห์คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ส่วนที่มีการกระเจิงในวัตถุที่สร้างขึ้นเลียนแบบวัตถุจริง เพื่อศึกษาความเข้มรังสีกระเจิง ระดับพลังงาน และการกระจายตัวของรังสี

1.4.8 นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาใช้ลดการรบกวนที่มีต่อภาพตัดขวางที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพของเครื่อง DentiiScan

1.4.9 สรุปผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคการลดการรบกวนของรังสีเอกซ์กระเจิงต่อภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องเอกซ์เรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรมที่สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของภาพได้

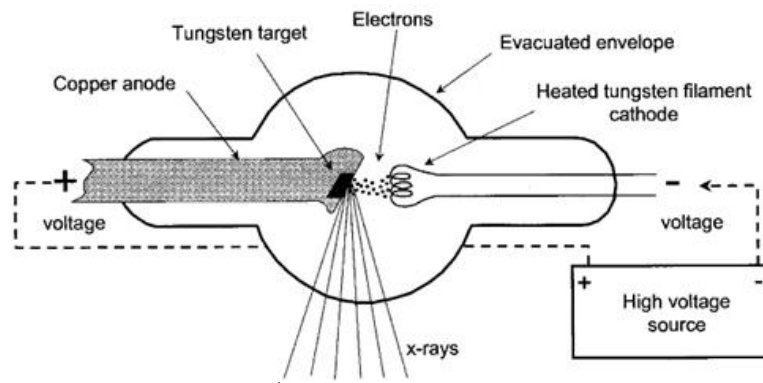
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การผลิตรังสีเอกซ์

##### 2.1.1 หลอดรังสีเอกซ์

ในการถ่ายภาพตัดขวางสำหรับการวินิจฉัยโรค รังสีเอกซ์ที่ใช้ถูกผลิตขึ้นมาจากหลอดรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 2.1 โดยภายในหลอดประกอบด้วยขดลวดทังสเตนอยู่ที่บริเวณขั้วลบ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดความร้อนสูงและมีอิเล็กตรอนหลุดออก อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกเร่งไปยังบริเวณขั้วบวกซึ่งเป็นเป้าโลหะภายใต้สนามไฟฟ้าที่กำหนดให้ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนเป้าโลหะจะเกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ โดยพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นรังสีเอกซ์ ทั้งนี้วัสดุที่นำมาใช้เป็นเป้าโลหะจะต้องมีความสามารถในการผลิตรังสีเอกซ์ได้ดี ซึ่งได้แก่โลหะที่มีเลขอะตอมสูง นอกจากนี้จะต้องสามารถทนต่อความร้อนได้สูงด้วย โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้คือทังสเตน ซึ่งมีเลขอะตอม 74 และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่  $3370^{\circ}\text{C}$  ถึงแม้ว่าทังสเตนจะมีประสิทธิภาพในการผลิตรังสีเอกซ์สูง แต่พลังงานจากลำอิเล็กตรอนเพียงประมาณ 1% เท่านั้นที่ถูกนำไปสร้างเป็นรังสีเอกซ์ ส่วนพลังงานในส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน [5]



รูปที่ 2.1 หลอดรังสีเอกซ์ [6]

##### 2.1.2 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์

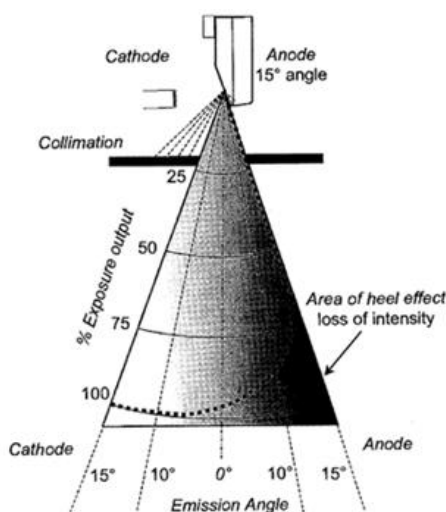
สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก [5] โดยใน ส่วนแรกเกิดมาจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมของเป้าโลหะ ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับประจุบวกภายในนิวเคลียส ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนไปจาก

ทิศทางเดิมและสูญเสียพลังงานจลน์ออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยระดับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นช่วงกว้างและมีค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ซึ่งค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนนี้จะสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขั้วหลอด รังสีเอกซ์ในส่วนนี้เรียกว่า รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous x-rays) หรือรังสีเบรมส์ตราห์ลุง (Bremsstrahlung radiation)

นอกจากรังสีเอกซ์ต่อเนื่องแล้ว ยังมีรังสีเอกซ์อีกส่วนซึ่งปรากฏเป็นพีคอยู่ในสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ โดยรังสีในส่วนนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมของเป้าโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้นหลุดออกมา ก่อให้เกิดที่ว่างในวงโคจรชั้นนั้น อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นถัด ๆ ไปจะลงมาแทนที่ที่ว่างที่เกิดขึ้นนี้และปล่อยพลังงานบางส่วนออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ในส่วนนี้จะมีค่าพลังงานเฉพาะค่าขึ้นอยู่กับชนิดของเป้าโลหะ เรียกรังสีเอกซ์นี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-rays)

### 2.1.3 ปรากฏการณ์ Heel effect

ในทางปฏิบัตินั้น หากพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์ตามแนวแกนระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบ จะพบว่าความเข้มรังสีที่บริเวณฝั่งใกล้ขั้วลบจะสูงกว่าบริเวณฝั่งใกล้ขั้วบวก ดังรูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Heel effect ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากผิวของเป้าโลหะบางส่วนถูกดูดกลืนโดยเป้าโลหะเอง โดยรังสีเอกซ์ที่อยู่บริเวณฝั่งใกล้ขั้วลบมากกว่าจะเคลื่อนที่ผ่านไปเป้าโลหะเป็นระยะทางที่มากกว่า ดังนั้นจึงถูกดูดกลืนภายในเป้าโลหะมากกว่ารังสีเอกซ์ที่อยู่บริเวณฝั่งขั้วลบ [5]



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ Heel effect [6]

### 2.1.4 จุดโฟกัสของรังสีเอกซ์

คือบริเวณบนเป้าโลหะที่อิเล็กตรอนจากขดลวดทำอันตรกิริยาและเกิดการผลิตรังสีเอกซ์ออกมา [6] โดยปกติการพิจารณารังสีเอกซ์จะสมมติว่าลำรังสีเอกซ์ออกมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด แต่ในความจริง รังสีเอกซ์จะออกมาจากพื้นที่เล็ก ๆ บนเป้าโลหะ ซึ่งการที่จุดโฟกัสมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้บริเวณขอบภาพเกิดเงามัว

## 2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น สำหรับรังสีเอกซ์ที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพตัดขวางเพื่อการวินิจฉัยโรคจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 นาโนเมตรถึง 0.01 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าระดับพลังงานระหว่าง 12.4 keV ถึง 124 keV ทั้งนี้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์ในช่วงระดับพลังงานดังกล่าวกับสสารสามารถเกิดได้ 3 แบบ คือ ปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กตริก, การกระเจิงแบบเรย์ลี และการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

### 2.2.1 ปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect)

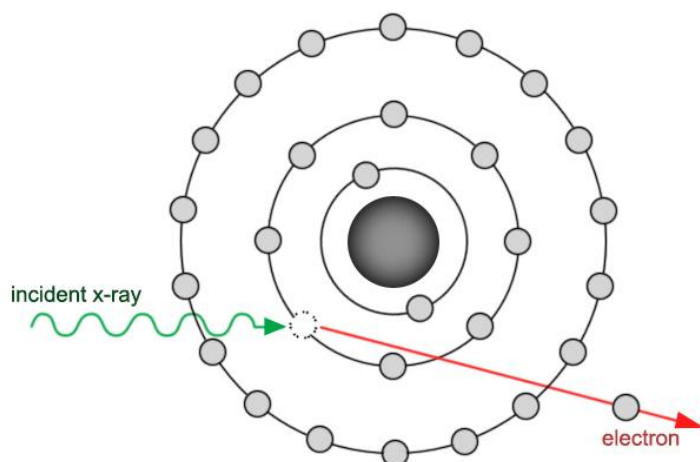
ปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กตริกเกิดจากการที่รังสีเอกซ์เข้าชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมของธาตุและถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอน หากพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าชนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร (Binding energy) อิเล็กตรอนจะสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ โดยพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ที่ว่างในอะตอมที่เกิดขึ้นหลังจากอิเล็กตรอนหลุดออกไปจะถูกอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นถัด ๆ ไปลงมาแทนที่และปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา [6, 7, 8, 9]

สำหรับกรณีของสสารที่เป็นเนื้อเยื่อนั้น เนื่องจากองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ได้แก่ ไฮโดรเจน, คาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานต่ำมาก ทำให้ถูกดูดกลืนภายในเนื้อเยื่อจนหมด จึงกล่าวได้ว่า ผลของการเกิดปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กตริกภายในเนื้อเยื่อ รังสีเอกซ์จะถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์และไม่มีรังสีตกเข้าสู่เครื่องตรวจจับรังสี [8]

ความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ ( $Z$ ) และพลังงานของรังสีเอกซ์ ( $E$ ) โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ (2.1)

$$P_{\text{photoelectric}} \propto \frac{Z^3}{E^3} \quad (2.1)$$

ซึ่งจากความสัมพันธ์ สามารถบ่งบอกได้ว่า ปฏิกิริยาการโฟโตอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นมากในกรณีที่มีเลขอะตอมของธาตุสูงและพลังงานรังสีเอกซ์ต่ำ

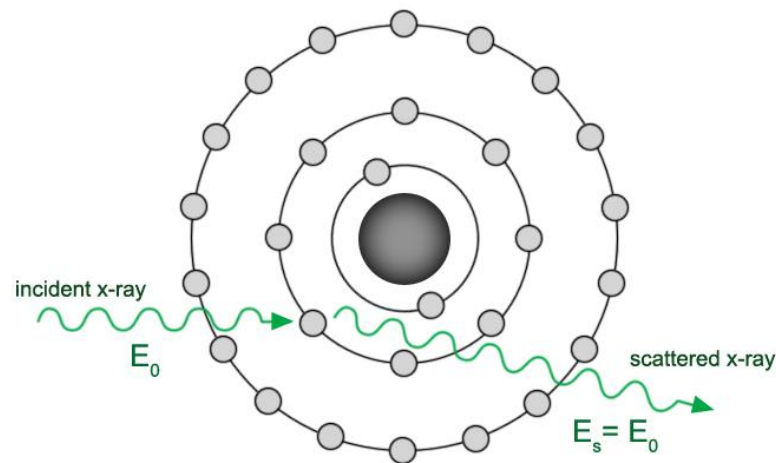


รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการโฟโตอิเล็กทริก

### 2.2.2 การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering หรือ Coherent scattering)

การกระเจิงแบบเรย์ลีเป็นการกระเจิงที่เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่นของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม หลังจากเกิดการชน รังสีเอกซ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปจากเดิม แต่ไม่มีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น [6, 9]

แม้ว่าการกระเจิงของรังสีเอกซ์จะส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย แต่สำหรับในช่วงระดับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรคนั้น การกระเจิงแบบเรย์ลีภายในเนื้อเยื่อมีเปอร์เซ็นต์ในการเกิดค่อนข้างน้อย [8]



รูปที่ 2.4 การกระเจิงแบบเรย์ลี

### 2.2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตันเป็นการกระเจิงที่เกิดจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมของธาตุ โดยรังสีเอกซ์จะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม [6, 9] ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะเกิดการสูญเสียพลังงานจนต่อไปโดยการกระตุ้นหรือไอออไนซ์อะตอมอื่นข้างเคียง [7] ในส่วนของรังสีเอกซ์หลังจากเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันจะมีพลังงานลดลงและเกิดการกระเจิงไปในทิศทางที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยมุมกระเจิงสามารถเป็นไปได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ทั้งนี้ รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงขึ้น จะมีโอกาสในการกระเจิงไปในทิศทางข้างหน้าซึ่งมีมุมกระเจิงต่ำกว่า 90 องศาได้มากขึ้น [8]

พลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานรังสีเอกซ์ตั้งต้นและมุมที่เกิดการกระเจิงไป ดังสมการ (2.2)

$$E_s = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E_s$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิง

$E_0$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ตั้งต้น

$m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9.11 \times 10^{-31}$  kg

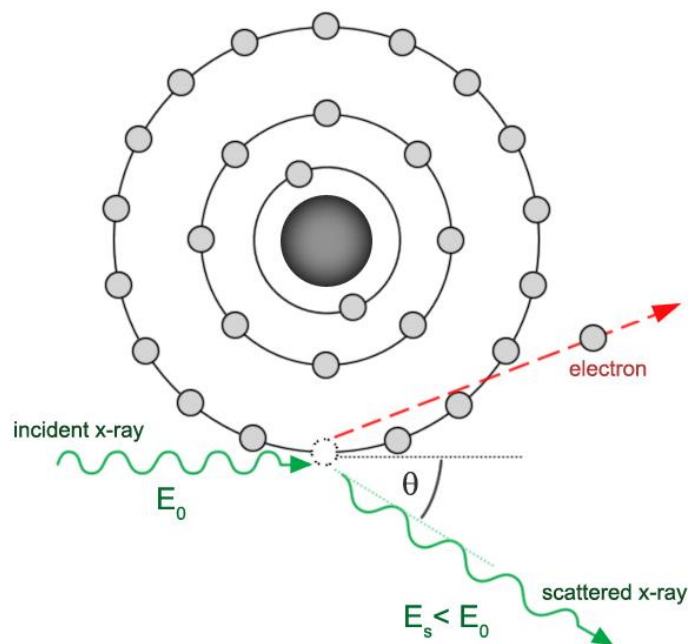
$c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

$\theta$  คือ มุมที่รังสีเอกซ์กระเจิงไปจากเดิม

ซึ่งจากสมการแสดงให้เห็นว่า พลังงานของรังสีเอกซ์กระเจิงจะมีค่าน้อยลงเมื่อมุมกระเจิงมีค่ามากขึ้น

ความน่าจะเป็นในการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันไม่ขึ้นกับค่าเลขอะตอมของธาตุ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของวัสดุ [6] นอกจากนี้ ในช่วงระดับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัย ความน่าจะเป็นในการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันจะค่อนข้างเป็นอิสระต่อค่าพลังงานของรังสี

ในการถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัย การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันภายในเนื้อเยื่อเป็นอันตรกิริยาที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์หลักที่ทำให้เกิดการรบกวนในภาพตัดขวาง



รูปที่ 2.5 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

#### 2.2.4 การลดทอนของรังสีเอกซ์

เมื่อยังลำรังสีเอกซ์ผ่านวัสดุใด ๆ ลำรังสีที่ผ่านออกมาจากวัสดุจะเกิดการลดทอนความเข้ม ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับสสาร ทำให้รังสีเอกซ์บางส่วนถูกดูดกลืนหรือเกิดการกระเจิงไป สำหรับลำรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานค่าเดียวเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่

มีความหนา  $x$  ความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary x-ray) ซึ่งเป็นรังสีที่ผ่านออกมาจากวัสดุโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.3)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาจากวัสดุ

$I_0$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ตั้งต้น

$\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัสดุ (Linear attenuation coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นมีหน่วยเป็น  $cm^{-1}$  โดยมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีตั้งต้นและแปรผันตามความหนาแน่นของวัสดุ ในตัวกลางที่สามารถลดทอนรังสีได้มากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่สูง นอกจากนี้ สามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในรูปของผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในแต่ละอันตรกิริยา ดังสมการ (2.4)

$$\mu = \mu_{photoelectric} + \mu_{Rayleigh} + \mu_{Compton} \quad (2.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจะเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุ หากวัตถุที่พิจารณาไม่ใช่ตัวกลางเนื้อเดียว จะเขียนความสัมพันธ์ในสมการ (2.3) ได้ใหม่ดังสมการ (2.5)

$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \quad (2.5)$$

เนื่องจากในกรณีที่วัสดุชนิดเดียวกันแต่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น น้ำกับน้ำแข็ง ในบางครั้งจึงมีการพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) แทน [6, 8] ซึ่งค่านี้คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นหารด้วยค่าความหนาแน่นของวัสดุ ( $\mu/\rho$ ) มีหน่วยเป็น  $cm^2/g$  โดยในวัสดุชนิดเดียวกัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่เหมือนกัน

หากนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมาใช้ในการคำนวณการลดทอนของรังสีสามารถเขียนสมการ (2.3) ใหม่ได้ดังสมการ (2.6)



$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (2.6)$$

## 2.3 การถ่ายภาพตัดขวางโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ (Computed Tomography)

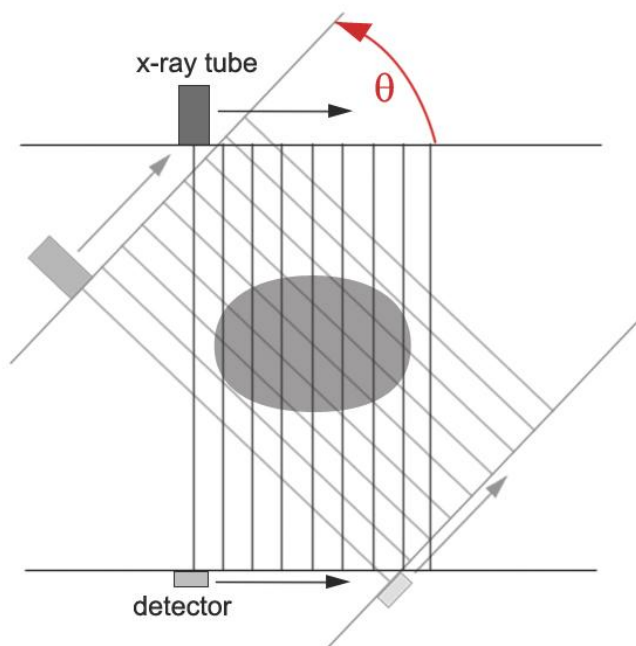
การถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiography) ถือเป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีการถ่ายภาพทางการแพทย์ในปัจจุบัน โดยในการถ่ายภาพ จะวางแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ไว้ด้านหนึ่งของผู้ป่วย และวางเครื่องวัดรังสีเอกซ์ไว้ที่ฝั่งตรงข้าม ซึ่งเครื่องวัดรังสีเอกซ์ที่ใช้นั้น อาจเป็นฟิล์มถ่ายภาพ หรือเครื่องวัดรังสีแบบอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจะทำการยิงลำรังสีเอกซ์ผ่านตัวผู้ป่วย รังสีที่ผ่านออกมาจะถูกลดทอนความเข้ม เมื่อลำรังสีนี้ตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสี จะเกิดเป็นภาพถ่ายรังสีขึ้น ภาพถ่ายที่ได้จะมีลักษณะเป็นภาพเงาของผู้ป่วยในสองมิติ โดยที่ระดับเฉดสีต่าง ๆ ที่ปรากฏบนภาพจะสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มของรังสีที่ผ่านออกมาจากตัวผู้ป่วย ทั้งนี้ เนื่องมาจากในแต่ละบริเวณภายในตัวผู้ป่วย เช่น กระดูก เนื้อเยื่อ รวมไปถึงอากาศ มีสมบัติในการลดทอนรังสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นลำรังสีที่ผ่านออกมาจากผู้ป่วยจึงมีความเข้มในแต่ละบริเวณแตกต่างกันไป

แม้ว่าการถ่ายภาพด้วยรังสีเช่นนี้มีการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น การทับซ้อนกันของเงาอวัยวะบนภาพสองมิติ หรือการไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันได้ชัดเจน จึงเกิดการคิดค้นพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพตัดขวางขึ้นมา ทำให้สามารถถ่ายภาพสองมิติที่แสดงภาพตัดขวางของตัวผู้ป่วยซึ่งเป็นสามมิติได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยและการวางแผนการรักษาโรคอย่างมาก

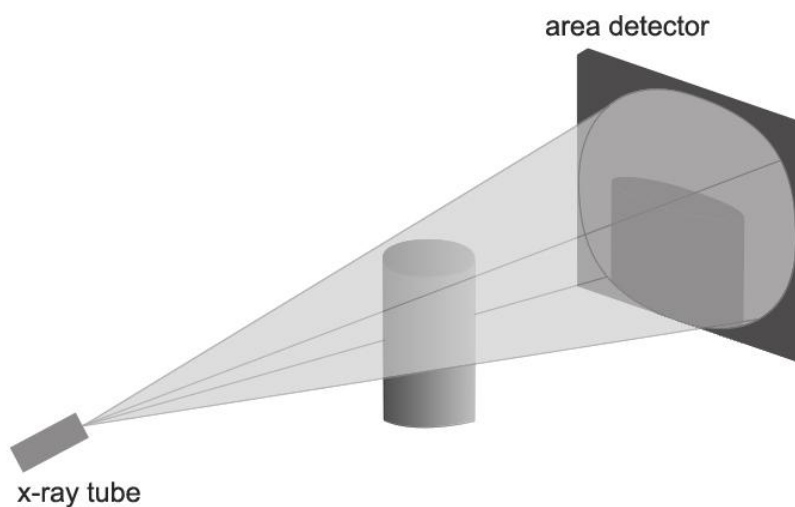
### 2.3.1 การถ่ายภาพตัดขวาง

เบื้องต้นจะเริ่มจากการพิจารณาการถ่ายภาพตัดขวางโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ใช้ลำรังสีแบบลำแคบ ระบบในการถ่ายภาพประกอบด้วยหลอดรังสีเอกซ์และหัววัดรังสีวางอยู่ตรงข้ามกัน โดยให้วัตถุที่ต้องการถ่ายภาพวางอยู่ระหว่างกลาง ในการถ่ายภาพ จะทำการเก็บข้อมูลความเข้มของรังสีที่ผ่านออกมาจากวัตถุและตกเข้าสู่หัววัดรังสี หลังจากนั้นจะทำการเลื่อนตำแหน่งหลอดรังสีเอกซ์กับหัววัดรังสีให้ไปในตำแหน่งที่สัมพันธ์กันเพื่อเก็บข้อมูลความเข้มในจุดอื่น ๆ จนครบ ถัดมาจึงทำการหมุนระบบเพื่อเก็บข้อมูลความเข้มในมุมอื่น ๆ ต่อไปดังรูปที่ 2.6 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณสร้างภาพตัดขวางต่อไป

สำหรับระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ลำรังสีทรงกรวย จะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกัน เพียงแต่ลำรังสีที่ใช้จะเป็นลำรังสีแบบทรงกรวย และใช้เครื่องวัดรังสีแบบแผ่นระนาบ ซึ่งประกอบด้วยหัววัดรังสีเรียงต่อกันในสองมิติ ทำให้สามารถเก็บข้อมูลความเข้มรังสีในแต่ละมุมได้ครอบคลุมทั้งบริเวณที่สนใจภายในการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องมีการเลื่อนตำแหน่งหลอดรังสีเอกซ์แบบระบบที่ใช้ลำรังสีแบบลำแคบ จึงเป็นการช่วยลดเวลาการเก็บข้อมูลในแต่ละโปรเจกชันให้เร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.6 ระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ลำรังสีแบบลำแคบ



รูปที่ 2.7 ระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ลำรังสีแบบทรงกรวย

### 2.3.2 หลักการสร้างภาพตัดขวาง

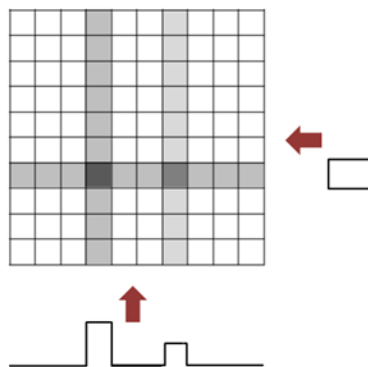
หลังจากทำการเก็บข้อมูลเสร็จสิ้น ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จะถูกนำมาเตรียมการก่อนทำการสร้างภาพ [6, 9] จากสมการ (2.5) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ตั้งต้น ( $I_0$ ) กับความเข้มของรังสีเอกซ์หลังจากถูกลดทอนรังสีโดยวัตถุ ( $I$ ) นำมาจัดรูปใหม่ได้ดังสมการ (2.7)

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int \mu dx = p \quad (2.7)$$

โดยค่า  $p$  เรียกว่า เรย์ซัม (ray sum) ข้อมูลทุกจุดที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเรย์ซัมก่อนนำไปสร้างภาพตัดขวาง

ฟิลเตอร์แบ็คโปรเจคชัน (Filtered backprojection) เป็นวิธีการคำนวณสร้างภาพตัดขวางที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะนำเอาข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้มาผ่านการกรองด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ก่อนทำการคำนวณสร้างภาพด้วยวิธีแบ็คโปรเจคชัน (Backprojection) การกรองข้อมูลจะเป็นการช่วยลดการเบลอในภาพตัดขวาง ทำให้ได้ภาพที่คมชัดยิ่งขึ้น

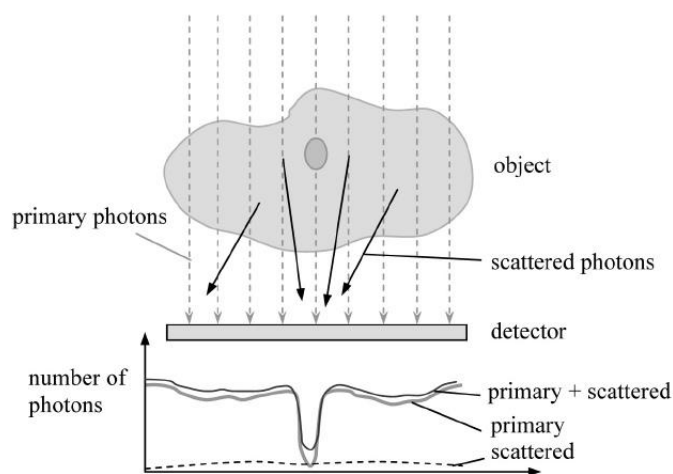
ในการทำแบ็คโปรเจคชันจะเริ่มจากการสร้างระนาบของภาพตัดขวาง โดยจะแบ่งภาพบนระนาบเป็นเมตริกซ์จัตุรัส ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นในแต่ละเซลล์เป็นศูนย์ จากนั้นนำข้อมูลแต่ละเรย์ซัมในแต่ละมุมมาใส่ค่าคืนย้อนกลับลงในเมตริกซ์ในตำแหน่งเดิมที่ลำรังสีเคยเคลื่อนที่ผ่าน เนื่องจากค่าเรย์ซัมมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นดังสมการ (2.7) ดังนั้นเมื่อใส่ค่าเรย์ซัมคืนกลับลงในเมตริกซ์ของภาพ จะได้ค่าในแต่ละเซลล์บนเมตริกซ์ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุ ซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นเฉดสีต่าง ๆ ของภาพได้ต่อไป



รูปที่ 2.8 การสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธีแบ็คโปรเจคชัน

### 2.3.3 ผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มีต่อภาพตัดขวาง

จากกระบวนการสร้างภาพตัดขวาง ซึ่งได้มีการพิจารณาใช้ค่าเรย์ซัมดังสมการ (2.7) มาทำการคำนวณสร้างภาพ ทั้งนี้ได้ตั้งอยู่บนแนวคิดที่ว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์หลังผ่านวัตถุ ( $I$ ) คือความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิซึ่งไม่เกิดอันตรกิริยากับวัตถุ แต่ในความเป็นจริงไม่ได้มีเพียงรังสีปฐมภูมิที่ตกเข้าสู่หัววัดรังสี ยังมีรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงภายในวัตถุซึ่งอาจตกเข้าสู่หัววัดด้วย ทำให้ข้อมูลความเข้มที่ได้จากหัววัดเกิดความคลาดเคลื่อน เมื่อนำข้อมูลนี้มาคำนวณสร้างภาพตัดขวาง ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่ได้จะมีค่าลดลงไปจากค่าจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงบริเวณตรงกลางของวัตถุ ซึ่งจะทำให้ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นมีเงามืดปรากฏอยู่บนภาพ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Cupping artifact นอกจากนี้ สำหรับวัตถุที่ภายในประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด ความเปรียบต่างบนภาพตัดขวางระหว่างสองบริเวณที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจะต่ำลงด้วย [9]



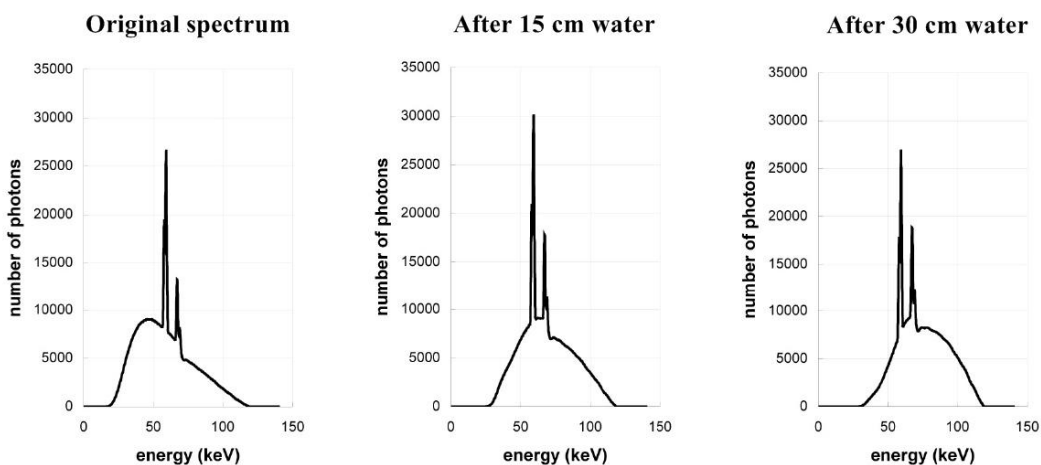
รูปที่ 2.9 ผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ [9]

ในระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ใช้รังสีเอกซ์แบบลำรังสีทรงกรวยจะได้รับผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงมาก เนื่องจากการใช้ลำรังสีที่กว้างขึ้นและใช้เครื่องวัดรังสีแบบแผ่นระนาบ ทำให้สามารถตรวจจับรังสีเอกซ์กระเจิงได้มาก [10]

### 2.3.4 ความกระด้างของลำรังสีเอกซ์

ความกระด้างของลำรังสี (Beam hardening) เป็นผลมาจากการใช้ลำรังสีเอกซ์ที่มีค่าพลังงานหลายค่า เมื่อลำรังสีเอกซ์ผ่านวัตถุ รังสีส่วนที่พลังงานต่ำ ๆ จะถูกลดทอนได้มากกว่า

ส่งผลให้สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมา มีค่าพลังงานเฉลี่ยที่สูงขึ้น [6, 9] ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี ดังนั้นการเกิดความกระด้างของลำรังสีจึงอาจส่งผลให้การคำนวณสร้างภาพตัดขวางเกิดความคลาดเคลื่อน และอาจเกิด Cupping artifact ได้เช่นเดียวกับการเกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.10 ผลการเกิดความกระด้างของลำรังสีเอกซ์เมื่อผ่านวัตถุที่มีความหนาต่างกัน [9]

## 2.4 การจำลองแบบมอนติคาร์โล

วิธีมอนติคาร์โลเป็นวิธีที่ใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์หรือฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้ในเชิงความน่าจะเป็น ซึ่งเทคนิคนี้มักถูกนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการคำนวณหาผลลัพธ์โดยตรงทำได้ยาก ในการจำลองแบบมอนติคาร์โลจะใช้ตัวเลขสุ่ม (Random number) ในการทำการทดลอง โดยจะทำการทดลองจำนวนหลาย ๆ ครั้งเพื่อศึกษาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น [11, 12] การจำลองด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีข้อมูลที่ต้องกำหนด 2 สิ่ง คือ

- 1) ตัวเลขสุ่ม โดยตัวเลขสุ่มที่ดีจะต้องเป็นชุดของลำดับตัวเลขที่มีสมบัติ 2 ประการ ดังนี้
  - Uniformity คือ ค่าของตัวเลขสุ่มมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงตัวเลขที่ทำการพิจารณา
  - Independence คือ การที่ตัวเลขแต่ละค่าในชุดของลำดับตัวเลขไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นจะไม่สามารถคำนวณหรือคาดเดาตัวเลขลำดับถัด ๆ ไปได้

2) การแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability distribution) ที่ใช้บรรยายระบบที่ทำการศึกษา

การจำลองแบบมอนติคาร์โลถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในวัสดุชนิดต่าง ๆ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นไปโดยการสุ่มซึ่งอิงข้อมูลจากการแจกแจงความน่าจะเป็นของระบบ เมื่อทำการจำลองซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้งจะสามารถคำนวณหาปริมาณที่สนใจได้ เช่น ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose) เป็นต้น โดยจำนวนครั้งของการจำลองที่มากขึ้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ค่าผลลัพธ์จริงที่ควรจะเป็นมากขึ้น

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายในวัตถุที่เกิดขึ้นในการถ่ายภาพตัดขวางโดยอาศัยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบที่ใช้ลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวย และนำผลที่ได้มาใช้ในการลดการรบกวนของรังสีเอกซ์กระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวาง โดยในการศึกษาจะใช้ Geant4 เวอร์ชัน 9.4 p01 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสสารด้วยวิธีมอนติคาร์โลมาใช้ในการจำลองเลียนแบบระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพตัดขวางทางพันธุกรรมที่ทางสวทช. ได้พัฒนาขึ้น ในส่วนของการวัดข้อมูลของรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี จะทำการเขียนโปรแกรมเพื่อให้สามารถแยกวัดข้อมูลระหว่างรังสีเอกซ์ส่วนปฐมภูมิและรังสีเอกซ์กระเจิง ทั้งนี้รายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองด้วย Geant4 และการทดลองถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวางทางพันธุกรรม รวมไปถึงการคำนวณวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ เป็นไปดังนี้

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองด้วย Geant4

##### 3.1.1 Geant4

Geant4 (GEometry ANd Tracking) [13,14] เป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูป (Software package) แบบโอเพนซอร์ส (Open source) ที่เขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C++ โดยจะประกอบด้วยชุดคำสั่งที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อผ่านสสารใด ๆ ในการใช้งานจะต้องนำเอาไลบรารี (library) ต่าง ๆ ที่มีมาสร้างเป็นแบบจำลองขึ้นเอง Geant4 มีจุดเด่นคือ มีแบบจำลองทางฟิสิกส์ที่หลากหลายซึ่งสามารถรองรับอันตรกิริยาของอนุภาคได้ในช่วงระดับพลังงานที่กว้าง ทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขา อาทิเช่น ฟิสิกส์พลังงานสูง, นิวเคลียร์ฟิสิกส์, เครื่องเร่งอนุภาค รวมไปถึงงานทางด้านการแพทย์ด้วย

จุดเริ่มต้นของ Geant4 มาจากความพยายามในการหาเทคนิคการคำนวณแบบสมัยใหม่เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุง GEANT3 ซึ่งเดิมเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จที่ถูกเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา FORTRAN สำหรับการใช้งานด้านฟิสิกส์พลังงานสูงซึ่ง CERN พัฒนาขึ้น ในเวลาต่อมาจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มความร่วมมือขนาดใหญ่ของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจากสถาบันและมหาวิทยาลัยในหลาย ๆ ประเทศโดยมีวัตถุประสงค์ในการสร้างโปรแกรมจำลองแบบใหม่ที่ยึด

หลักเทคโนโลยีเชิงวัตถุ (Object-Oriented Technology) ขึ้นมา นอกจากนี้ยังมีการขยายขอบเขตการใช้ประโยชน์จากซอฟต์แวร์ให้กว้างขึ้นโดยครอบคลุมไปถึงงานทางด้านนิเวศลิยร์, เครื่องเร่งอนุภาค และฟิสิกส์ทางการแพทย์ด้วย ผลจากความร่วมมือนี้ จึงเกิดเป็น Geant4 เวอร์ชันแรกขึ้นในปี ค.ศ.1998 และได้มีการปรับปรุงและพัฒนาต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน

### 3.1.2 การทำงานของ Geant4

Geant4 ถูกเขียนขึ้นโดยใช้หลักเทคโนโลยีเชิงวัตถุ ซึ่งมีแนวคิดในการเขียนโปรแกรมโดยมองสิ่งต่าง ๆ ในระบบออกเป็นวัตถุ (Object) แต่ละวัตถุสามารถนำมาแบ่งเป็นประเภทได้ เรียกว่า คลาส (Class) ซึ่งคลาสจะเปรียบเสมือนต้นแบบของวัตถุ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ที่วัตถุของคลาสนั้น ๆ จะต้องมี

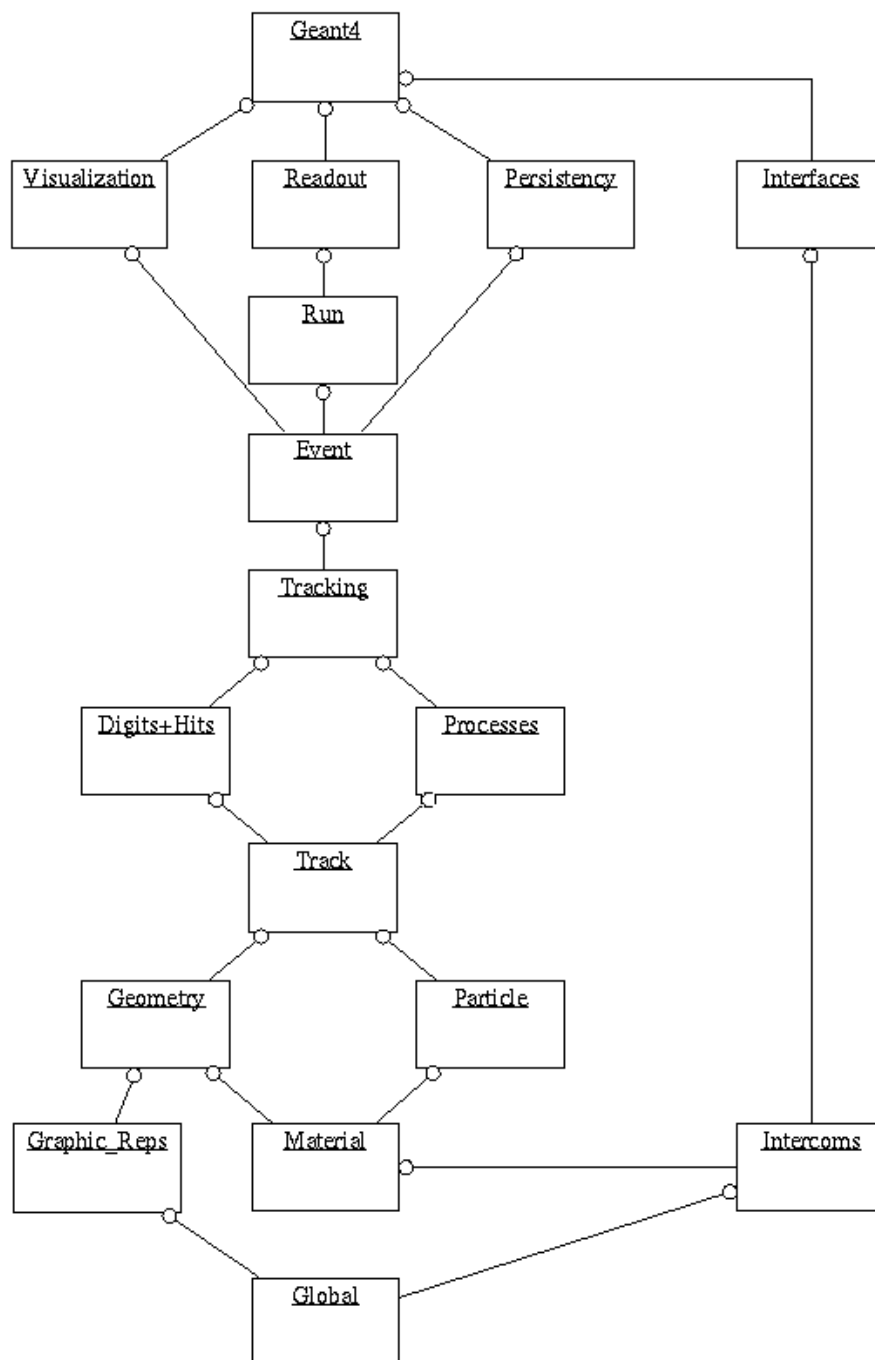
คลาสใน Geant4 สามารถนำมาจัดแบ่งประเภทได้โดยนำเอาคลาสที่มีความเกี่ยวข้องกันมารวมไว้ในหมวดหมู่เดียวกัน ในแต่ละหมวดหมู่ของคลาสนั้น มีความสัมพันธ์กันเป็นไปตามแผนภาพในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย

- *Global* เป็นหมวดหมู่ที่ครอบคลุมถึงหน่วยต่าง ๆ ของระบบ, ค่าคงที่, ชนิดของข้อมูลตัวเลข และการจัดการเกี่ยวกับตัวเลขสุ่ม
- *Material* เกี่ยวข้องกับการกำหนดชนิดของสสาร โดยสามารถเลือกใช้ได้ทั้งข้อมูลจากฐานข้อมูลของ Geant4 หรือสามารถใช้นิยามสสารขึ้นมาเองก็ได้
- *Geometry* เกี่ยวข้องกับการกำหนดรูปทรงของวัตถุและการส่งผ่านอนุภาคเข้าไปภายในวัตถุ
- *Particle* และ *Processes* เกี่ยวข้องกับการกำหนดอนุภาคในการจำลองและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับวัสดุ โดยในการทำงานจะต้องมีการนิยามอนุภาคและอันตรกิริยาทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นในการจำลอง สำหรับอันตรกิริยานั้น มีหลากหลายโมเดลให้เลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม ขึ้นอยู่กับช่วงระดับพลังงาน, ชนิดของอนุภาค เป็นต้น
- *Track* และ *Tracking* ประกอบด้วยคลาสเกี่ยวกับเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยในการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละช่วงของการเคลื่อนที่และนำเอา *Processes* ที่เกี่ยวข้องเข้ามาใช้ในการคำนวณ



- *Event* ซึ่งเป็นหมวดหมู่ที่จัดการเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคตลอดทั้งเส้นทาง รวมไปถึงอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary particles) ที่เกิดขึ้นด้วย และ *Run* ซึ่งเกี่ยวกับการจัดการกลุ่มของ *Event*

นอกจากนี้ยังมีหมวดหมู่ *interfaces*, *Visualization* และ *Persistency* ซึ่งเชื่อมโยงกับส่วนสนับสนุนอื่น ๆ ภายนอก Geant4 ด้วย



รูปที่ 3.1 แผนภาพหมวดหมู่ของคลาสใน Geant4

### 3.1.3 การกำหนดอนุภาคและอันตรกิริยาในการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอนุภาคและอันตรกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการจำลองทั้งหมดไว้ในคลาสชื่อ *XrayPhysicsListPenelope* ซึ่งสร้างขึ้นมาจากคลาสใน Geant4 โดยมีอนุภาคที่กำหนดในการจำลอง ได้แก่ รังสีเอกซ์ และอิเล็กตรอน ในส่วนของการกำหนดอันตรกิริยานั้น จะเลือกใช้โมเดล Penelope ซึ่งเป็นหนึ่งในโมเดลที่ใช้สำหรับการศึกษาโฟตอน, อิเล็กตรอน และโพสิตรอนที่มีระดับพลังงานต่ำ โดยสามารถใช้ได้กับอนุภาคที่มีระดับพลังงานประมาณ 100 eV จนถึงระดับพลังงานประมาณ 1GeV ทั้งนี้อันตรกิริยาต่าง ๆ ที่กำหนดในการจำลองเป็นไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดอันตรกิริยาในการจำลอง

| อนุภาค     | ชื่ออันตรกิริยา          | ชื่อคลาสใน Geant4 ที่ใช้             |
|------------|--------------------------|--------------------------------------|
| รังสีเอกซ์ | ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก | <i>G4PenelopePhotoElectricModel</i>  |
|            | การกระเจิงแบบคอมป์ตัน    | <i>G4PenelopeComptonModel</i>        |
|            | การกระเจิงแบบเรย์ลี      | <i>G4PenelopeRayleighModel</i>       |
| อิเล็กตรอน | ไอออนไนเซชัน             | <i>G4PenelopeIonisationModel</i>     |
|            | เบรมส์สตราห์ลุง          | <i>G4PenelopeBremsstrahlungModel</i> |
|            | การกระเจิงแบบทวีคูณ      | <i>G4eMultipleScattering</i>         |

### 3.1.4 การกำหนดรังสีเอกซ์ตั้งต้น

เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในระบบถ่ายภาพตัดขวางในการวิจัยนี้คือหลอดรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถใช้ Geant4 ในการจำลองสร้างขึ้นมาโดยตรงได้ โดยทำการกำหนดลำอิเล็กตรอนตั้งต้นและยิงไปยังเป้าโลหะ แต่การสร้างรังสีเอกซ์ตั้งต้นโดยใช้วิธีจำลองหลอดรังสีเอกซ์โดยตรงนั้น จะใช้ระยะเวลาในการจำลองที่นานมากเมื่อเทียบกับปริมาณของรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้ อีกทั้งยังไม่สามารถกำหนดปริมาณของรังสีเอกซ์ที่ออกมาแบบแน่นอนได้ เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กตรอนและเป้าโลหะจะมีลักษณะเป็นไปตามความน่าจะเป็น ดังนั้นการสร้างรังสีเอกซ์ตั้งต้นด้วยวิธีนี้จึงไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเพื่อนำไปใช้งานต่อ อย่างไรก็ตามใน Geant4 ได้มีรูปแบบในการกำหนดอนุภาคตั้งต้นที่หลากหลายไว้สำหรับการเลือกใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดอนุภาคตั้งต้นไว้ในคลาสชื่อ *XrayPrimaryGeneratorAction* ซึ่งเป็นคลาสที่

สร้างขึ้นมาจากคลาสใน Geant4 โดยจะเลือกใช้วัตถุของคลาส *G4GeneralParticleSource* [15] ในการสร้างลำรังสีเอกซ์ตั้งต้น ในการใช้งานจะสามารถกำหนดลักษณะเฉพาะของอนุภาคตั้งต้นได้ดังนี้

- การกระจายตัวของพลังงาน ซึ่งสามารถกำหนดได้หลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น ล้าอนุภาคชนิดพลังงานเดียว, ล้าอนุภาคที่มีการกระจายตัวของพลังงานในลักษณะฟังก์ชัน เช่น แบบเชิงเส้น, แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล นอกจากนี้ยังสามารถทำการกำหนดลักษณะการกระจายตัวได้เองด้วย
- การกระจายตัวเชิงตำแหน่ง โดยสามารถกำหนดรูปร่างของพื้นที่ที่เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของล้าอนุภาคได้ ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแบบจุด (Point source) จะกำหนดรูปร่างเป็นแบบจุด, แหล่งกำเนิดแบบระนาบ (Planar source) จะกำหนดรูปร่างเป็นพื้นที่ เช่น วงกลม, วงรี, สี่เหลี่ยม เป็นต้น
- การกระจายตัวเชิงมุม เป็นการกำหนดการกระจายตัวในทิศทางต่าง ๆ ของอนุภาคที่วิ่งออกมา ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างล้าอนุภาคได้ในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น ล้าอนุภาคแบบขนาน, ล้าอนุภาคแบบทรงกรวย

ในการกำหนดลักษณะการกระจายตัวทั้งสามชนิดของอนุภาคตั้งต้นนั้น จะเขียนคำสั่งต่าง ๆ ไว้ในไฟล์คำสั่ง ซึ่งเวลาทำการจำลองจะเรียกไฟล์นี้ขึ้นมาใช้งาน

### 3.1.5 การสร้างวัตถุในการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ การกำหนดสร้างวัตถุต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองจะกำหนดไว้ในคลาสชื่อ *XrayDetectorConstruction* ซึ่งเป็นคลาสที่ถูกสร้างขึ้นมาจากคลาสใน Geant4 โดยการสร้างวัตถุจะมีสิ่งจำเป็นที่ต้องกำหนด คือ รูปร่างวัตถุ, ขนาดของวัตถุ, ชนิดของวัสดุ และตำแหน่งการจัดวาง วัตถุทั้งหมดที่สร้างขึ้นจะถูกจัดวางไว้ภายในวัตถุ World ซึ่งเป็นวัตถุที่มีขนาดใหญ่ที่สุด โดยสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตพื้นที่สำหรับการจำลอง ในการกำหนดรูปร่างวัตถุสามารถกำหนดได้หลายวิธี โดยวัตถุที่มีรูปร่างทั่วไป เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก กล่องสี่เหลี่ยม ทรงกรวย เป็นต้น สามารถใช้คลาสที่มีอยู่ใน Geant4 ในการกำหนดรูปร่างได้เลย แต่สำหรับวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้น สามารถเลือกใช้การนำเข้าไฟล์วัตถุเพื่อไปใช้ใน Geant4 ได้ ได้แก่ ไฟล์ CAD, ไฟล์ DICOM เป็นต้น การกำหนดวัตถุที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกำหนดโดยใช้คลาสที่มีอยู่ใน Geant4 ในส่วนของการกำหนดชนิดวัสดุ สามารถเลือกใช้ได้จากข้อมูลใน

ฐานข้อมูลของ Geant4 ซึ่งเป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากฐานข้อมูลของ NIST หรือสามารถใช้การนิยามวัสดุขึ้นมาเองก็ได้ โดยในงานวิจัยนี้ หากวัสดุที่ใช้มีข้อมูลอยู่ในฐานข้อมูล จะเลือกใช้การนิยามวัสดุจากฐานข้อมูล แต่หากวัสดุที่ใช้ไม่มีข้อมูลในฐานข้อมูล จะใช้การกำหนดวัสดุเอง โดยวัสดุทั้งหมดที่ได้กำหนดขึ้น เป็นไปดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดวัสดุในการจำลอง

| วัสดุที่กำหนดโดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลใน Geant4 |                       |                                                               |                                  |
|------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ชื่อวัสดุ                                      | ชื่อในฐานข้อมูล       | สูตรเคมี                                                      | ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) |
| อากาศ                                          | G4_AIR                | -                                                             | 1.205 x 10 <sup>-3</sup>         |
| น้ำ                                            | G4_WATER              | H <sub>2</sub> O                                              | 1.0                              |
| ไนลอน 6,6                                      | G4_NYLON-6/6          | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1.14                             |
| เทฟลอน                                         | G4_TEFLON             | C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>                                 | 2.2                              |
| Polyoxymethylene (Delrin)                      | G4_POLYOXYMETHYLENE   | CH <sub>2</sub> O                                             | 1.425                            |
| กระดูก                                         | G4_BONE_CORTICAL_ICRP | -                                                             | 1.85                             |
| สุญญากาศ                                       | G4_Galactic           | -                                                             | 10 <sup>-25</sup>                |

| วัสดุที่กำหนดสร้างขึ้นมาเอง   |                                              |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|
| ชื่อวัสดุ                     | สูตรเคมี                                     | ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Polymethylmethacrylate (PMMA) | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> | 1.19                             |

### 3.1.6 การวัดปริมาณรังสีเอกซ์และการศึกษาการกระเจิง

ในส่วนของการวัดปริมาณรังสีเอกซ์นั้น งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการจำลองสร้างเครื่องวัดรังสีตามเครื่องจากระบบจริงซึ่งใช้เครื่องวัดรังสีแบบ flat panel แต่จะทำการสร้างเครื่องวัดรังสีที่มีลักษณะเหมือนกับเครื่องวัดรังสีในอุดมคติแทน ทำให้สามารถวัดรังสีที่ตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสีในการจำลองได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในทุกค่าพลังงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นการช่วยลดระยะเวลาในการจำลอง ในการวัดรังสีจากการจำลองนี้จะใช้การกำหนดบริเวณที่สนใจในการตรวจวัด โดยสร้างเป็นแผ่นสุญญากาศบาง ๆ ที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับขนาดของเครื่องวัดรังสีของจริงในระบบ และวางไว้ ณ ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของเครื่องวัดรังสีในการทดลองจริง เมื่อมีรังสีเอกซ์ตกเข้าสู่พื้นผิวของบริเวณนี้ จะถูกตรวจวัดข้อมูลและบันทึกค่าที่สนใจในการศึกษา ซึ่งในที่นี้เลือกวัดค่าพลังงานและ

ตำแหน่งของรังสีแต่ละตัวที่ตกลงบนบริเวณเครื่องวัด ตำแหน่งของรังสีแต่ละตัวที่ได้จากการวัดนี้ จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสร้างภาพโปรเจกชันของวัตถุต่อไป โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาภาพโปรเจกชันขนาด 480 x 384 พิกเซล

ในงานวิจัยนี้ คลาสที่จะใช้ในการศึกษาปริมาณต่าง ๆ ได้แก่คลาสชื่อ *XrayRunAction*, *XraySteppingAction* และ *XrayEventAction* ซึ่งทั้งสามเป็นคลาสสร้างขึ้นมาจากคลาสใน Geant4 โดยในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน Geant4 นั้น จะแบ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกเป็นช่วง ๆ เรียกว่า สเต็ป (Step) ซึ่งแทนด้วยวัตถุของคลาส *G4Step* ซึ่งคลาสนี้ประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับอนุภาคในสเต็ป, สภาวะสิ้นสุดของสเต็ป และจุดปลายสองจุดที่เชื่อมระหว่างแต่ละสเต็ป อันได้แก่ จุดเริ่มต้นของสเต็ปนั้น ๆ และจุดสิ้นสุดของสเต็ปนั้น ๆ ทั้งนี้จุดปลายทั้งสองสามารถแทนได้ด้วยวัตถุของคลาส *G4StepPoint* ซึ่งเป็นคลาสที่ประกอบด้วยข้อมูลของอนุภาค ณ จุดที่ทำการพิจารณา อาทิเช่น พลังงานจลน์ของอนุภาค, ความเร็วของอนุภาค, ตำแหน่งของอนุภาค, อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นของอนุภาคในสเต็ปนั้น ๆ เป็นต้น

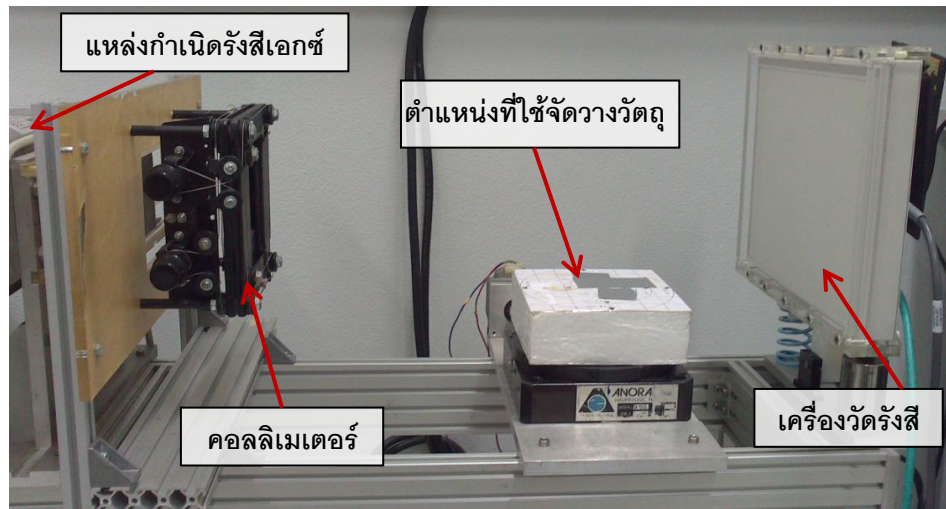
ในการศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ จะใช้วัตถุของคลาส *G4StepPoint* มาช่วยในการพิจารณา โดยจากข้อมูลที่ได้จากวัตถุของคลาส *G4StepPoint* จะทำให้สามารถทราบได้ว่า รังสีเอกซ์แต่ละตัวเมื่อผ่านเข้าไปในวัตถุที่นำมาถ่ายภาพแล้ว มีการเกิดอันตรกิริยาแบบใดบ้างภายในวัตถุ เมื่อรังสีเอกซ์เหล่านี้ตกเข้าสู่บริเวณเครื่องวัดรังสีจะถูกบันทึกค่าที่สนใจ โดยในการบันทึกค่า จะทำการบันทึกข้อมูลแยกกันระหว่างข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ผ่านออกมาจากวัตถุโดยไม่เกิดอันตรกิริยาและข้อมูลรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดการกระเจิงภายในวัตถุแล้วตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสี ซึ่งข้อมูลในส่วนของรังสีเอกซ์กระเจิงนี้ จะเป็นข้อมูลรวมกันระหว่างรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันและรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงแบบเรย์ลี

### 3.2 การทดลองด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวางสำหรับงานทางด้านทันตกรรม

ระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยระบบนี้เป็นระบบถ่ายภาพที่เป็นระบบเดียวกับระบบถ่ายภาพตัดขวางทางทันตกรรมของเครื่อง DentiiScan ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งทางสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ระบบทั้งสองได้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เหมือนกัน แต่มีเพียงค่าพลังงานยังผลของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการทำการทดลองจะใช้ระบบดังรูปที่ 3.2 แทน ซึ่งระบบประกอบด้วย

- **แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์** Monobloc X-ray generator รุ่น E-40R HF ผลิตโดย I.M.D. Generators ใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงาน 90 kV กระแส 6 mA โดยเป้าโลหะทำจากวัสดุชนิดทังสเตนทำมุม  $10^\circ$  ขนาดจุดโฟกัส 0.6 มม. ฟิลเตอร์ในระบบประกอบด้วย inherent filter ซึ่งเทียบเท่ากับอะลูมิเนียมหนา 1 มม. และ additional filter ได้แก่ อะลูมิเนียมหนา 0.5 มม. และทองแดงหนา 1.3 มม. สำหรับค่าพลังงานยังผล (Effective energy) และสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จาก X-ray generator จะใช้การอ้างอิงจากการทดลองของหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีภาพ (Image Technology Laboratory) จากสวทช. ซึ่งได้ทำการทดลองวัดค่า HVL ด้วยเครื่องมือซึ่งผลิตโดย Radcal Corporation รุ่น 9010 ค่า HVL ที่ได้จากการทดลองนี้ถูกนำมาใช้คำนวณหาค่าพลังงานยังผลและสเปกตรัมพลังงานโดยใช้โปรแกรม SpekCalc [16] ในการคำนวณ ซึ่งพบว่า พลังงานยังผลมีค่าเท่ากับ 64.3 keV และสเปกตรัมพลังงานมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 3.4
- **คอลลิเมเตอร์ของลำรังสีเอกซ์** ทำจากวัสดุชนิดตะกั่ว โดยมีลักษณะเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาด  $7.7 \times 6.2$  ซม.
- **เครื่องวัดรังสี** Cesium Iodine flat panel detector รุ่น PaxScan 2520D ซึ่งผลิตโดย Varian มีขนาด  $19.5 \times 24.4$  ซม. และขนาดเมตริกซ์พิกเซลของภาพ  $1536 \times 1920$  พิกเซล

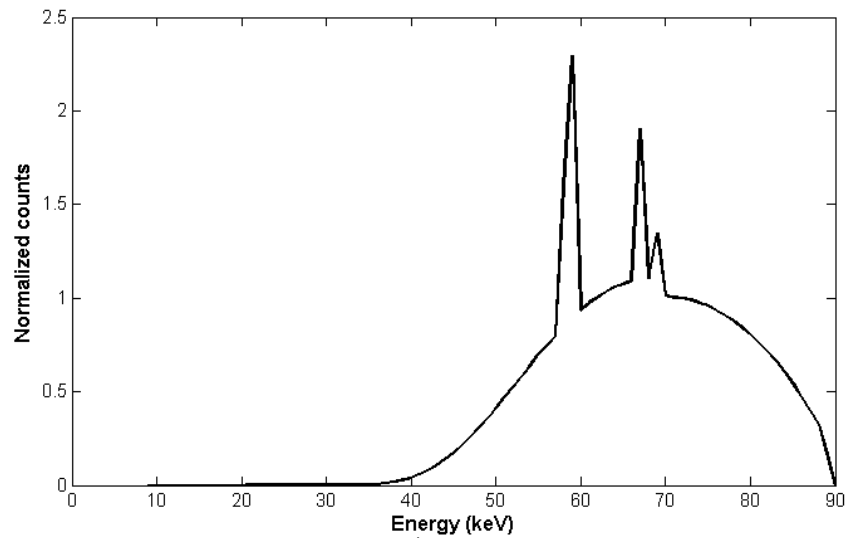
โดยมีระยะการจัดวางของระบบเป็นไปดังรูปที่ 3.5 สำหรับระยะ  $x$  ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างวัตถุกับเครื่องวัดรังสีนั้น จะใช้ระยะ 20 ซม. แต่สำหรับการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่ภายในไส้วัสดุชนิดอื่น ระยะที่ใช้คือ 21.8 ซม.



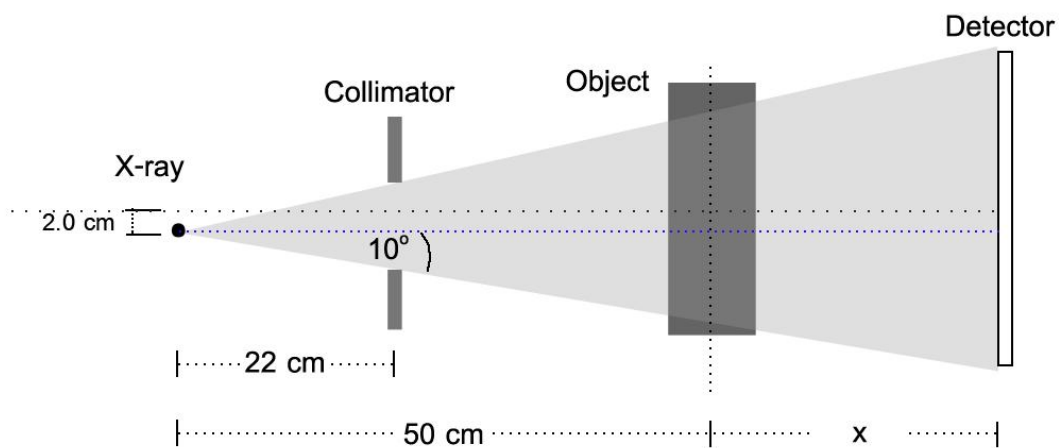
รูปที่ 3.2 ระบบที่ใช้ทดลองถ่ายภาพตัดขวาง



รูปที่ 3.3 เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทางทันตกรรม DentiScan



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมพลังงานของลำรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยได้มาจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SpekCalc



รูปที่ 3.5 การจัดวางของระบบถ่ายภาพตัดขวาง

### 3.3 การคำนวณวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.3.1 การลดความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ฟิลเตอร์

ข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองจะมีความแปรปรวนของข้อมูลมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพมีปริมาณน้อย อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ในการจำลองจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้จำลองนานขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ การพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจกชันบางส่วน จะนำเอาข้อมูลภาพมาทำการกรองด้วย



Gaussian lowpass filter เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งผลจากการกรองข้อมูลนี้ จะทำให้การพิจารณาข้อมูลภาพมีความสะดวกมากขึ้น แต่ความคมชัดในภาพจะลดลง

ในการกรองข้อมูลภาพ จะใช้ฟังก์ชัน *fspecial* ในโปรแกรม MATLAB ในการสร้างฟิลเตอร์ จากนั้นจะนำฟิลเตอร์ไปใช้ในการกรองข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชัน *imfilter* โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างฟิลเตอร์เป็นไปดังนี้

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่กำหนดในการสร้างฟิลเตอร์

| ฟิลเตอร์ | ขนาดเมตริกซ์ | ซิกม่า | คำอธิบาย                                   |
|----------|--------------|--------|--------------------------------------------|
| $L_1$    | 12 x 12      | 3      | สำหรับการกรองข้อมูลรังสีปฐมภูมิจากการจำลอง |
| $L_2$    | 80 x 80      | 20     | สำหรับการกรองข้อมูลรังสีกระเจิงจากการจำลอง |
| $L_3$    | 5 x 5        | 1.1    | สำหรับการกรองข้อมูลที่ได้จากการจำลอง       |

### 3.3.2 สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ

สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ (Scatter to primary ratio หรือ SPR) เป็นการหาสัดส่วนระหว่างปริมาณความเข้มของรังสีกระเจิงต่อปริมาณความเข้มของรังสีปฐมภูมิ ณ แต่ละตำแหน่งบนภาพโปรเจคชัน วิธีนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการพิจารณาปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิง โดยการที่ SPR มีค่ามาก จะแสดงถึงการที่มีรังสีส่วนที่ไม่จำเป็นในการใช้งานเข้ามารวมอยู่กับข้อมูลที่เครื่องวัดรังสีวัดได้ในปริมาณที่มาก ซึ่งอาจส่งผลให้ภาพที่ได้มีคุณภาพแย่ง

$$SPR = \frac{I_S}{I_P} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I_S$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ บนภาพ

$I_P$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนภาพ

### 3.3.3 การคำนวณความแตกต่างระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลอง

ในการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลภาพโปรเจคชันจากการจำลองกับผลข้อมูลจากการทดลอง จะนำข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการถ่ายภาพวัตถุมาทำให้เป็นบรรทัดฐาน

(Normalization) โดยการหารด้วยข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการถ่ายภาพแบบไม่มีวัตถุ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้นี้มาคำนวณหาค่าสัมบูรณ์ (absolute value) ของผลต่างระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง ดังสมการ

$$Difference = |I_{norm, sim} - I_{norm, exp}| \quad (3.2)$$

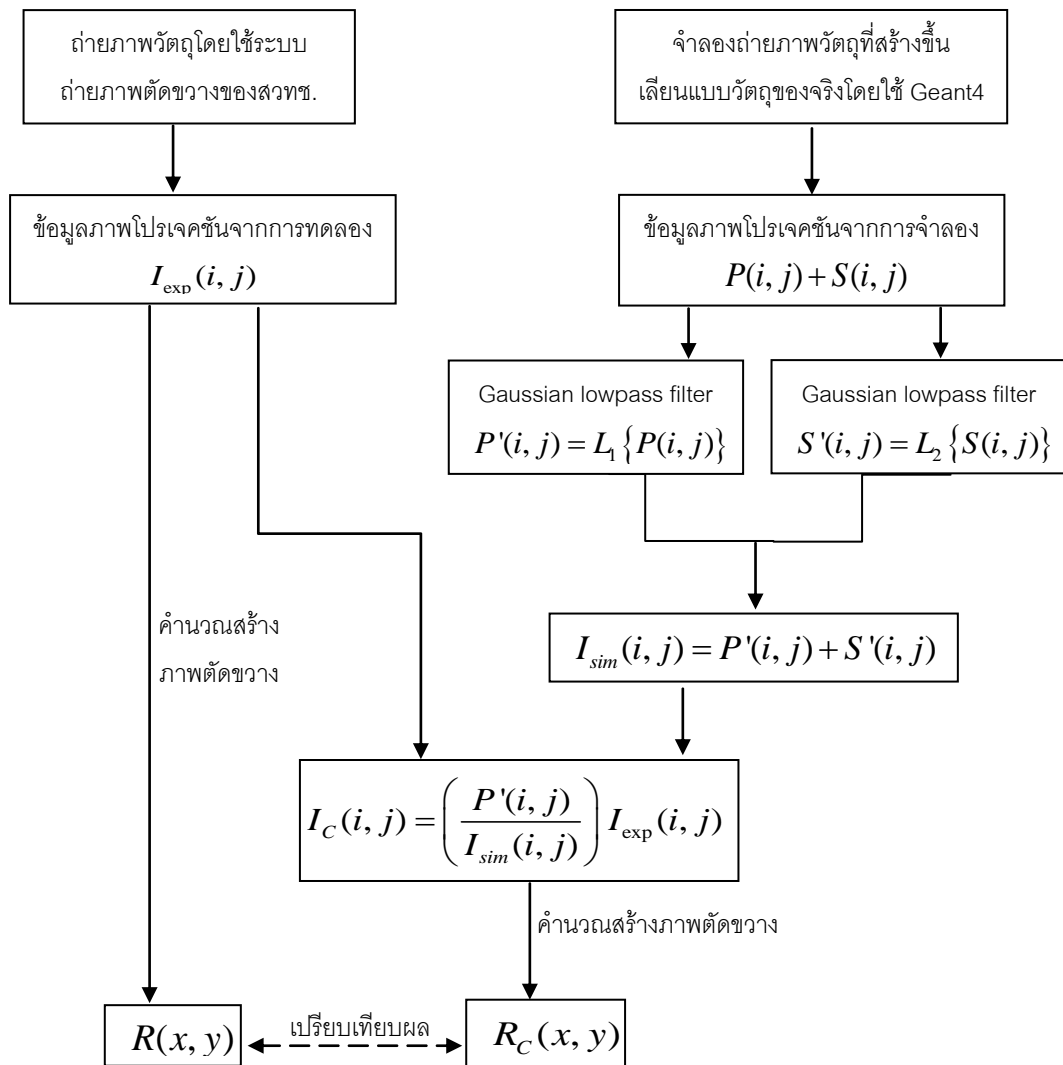
เมื่อ  $I_{norm, sim}$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

$I_{norm, exp}$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

### 3.3.4 การลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง

การลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวางนั้น จะนำผลที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพมาใช้ในปรับปรุงข้อมูลภาพโปรเจกชันจากการทดลอง ซึ่งจากการเขียนโปรแกรมเพื่อแยกแยะข้อมูลของรังสีเอกซ์ ทำให้ข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพในแต่ละมุมแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ ข้อมูลภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และข้อมูลภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง เมื่อนำข้อมูลที่ได้นี้มาคำนวณหาสัดส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิต่อความเข้มของรังสีทั้งหมดที่ผ่านออกมาจากวัตถุและตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสี โดยคำนวณ ณ แต่ละตำแหน่งบนภาพโปรเจกชัน แล้วนำสัดส่วนนี้มาปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจกชันจากการทดลอง จะได้ข้อมูลภาพโปรเจกชันจากการทดลองที่ผ่านการลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงแล้ว ดังสมการ(3.3) โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.6

$$I_c(i, j) = \left( \frac{P'(i, j)}{I_{sim}(i, j)} \right) \times I_{exp}(i, j) \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพที่ได้จากการทดลอง

เมื่อ  $I_{\text{exp}}(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี ณ ตำแหน่ง  $(i, j)$  บนภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลอง

$P(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลอง

$P'(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้ว

$S(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิง ที่ได้จากการจำลอง

$S'(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิง ที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้ว

$I_{\text{sim}}(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี ที่ได้จากการจำลอง

$I_C(i, j)$  คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการปรับลดรังสีเอกซ์  
กระเจิงแล้ว

$R(x, y)$  คือ ข้อมูลภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากผลการทดลอง

$R_C(x, y)$  คือ ข้อมูลภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากผลการทดลอง ซึ่งผ่านการลดผลของรังสี  
เอกซ์กระเจิงแล้ว

### 3.3.5 การคำนวณสร้างภาพตัดขวาง

การคำนวณสร้างภาพตัดขวางในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมใน MATLAB ที่ทางหน่วย  
ปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีภาพจากสวทช. เขียนขึ้น โดยเป็นโปรแกรมที่ใช้เทคนิคฟิลเตอร์แบ็ค  
โปรเจกชันสำหรับลำรังสีแบบทรงพืด ฟิลเตอร์ที่เลือกใช้คือ Ram-Lak filter และใช้ค่า cut-off  
frequency เท่ากับ 0.7 ในการนำข้อมูลจากภาพโปรเจกชันมาใช้สร้างภาพตัดขวาง เนื่องจาก  
โปรแกรมที่นำมาใช้เป็นโปรแกรมสำหรับลำรังสีแบบทรงพืด แต่ระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ใช้ใน  
งานวิจัยนี้เป็นระบบสำหรับลำรังสีแบบทรงกรวย ดังนั้นจะทำการเลือกข้อมูลในภาพโปรเจกชันที่อยู่  
บริเวณกลางลำรังสีเพื่อนำมาคำนวณสร้างภาพ

### 3.3.6 การวัดปริมาณ cupping บนภาพตัดขวาง

Cupping artifact ที่เกิดขึ้นบนภาพตัดขวางสามารถวัดปริมาณได้โดยใช้ค่าเกรย์สเกล  
บนภาพตัดขวางมาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ cupping ที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$\%Cupping = \left( \frac{\overline{GV}_{edge} - \overline{GV}_{center}}{\overline{GV}_{edge}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\overline{GV}_{edge}$  คือ ค่าเกรย์สเกลเฉลี่ยที่บริเวณช่วงขอบของวัตถุในภาพตัดขวาง

$\overline{GV}_{center}$  คือ ค่าเกรย์สเกลเฉลี่ยที่บริเวณช่วงกลางของวัตถุในภาพตัดขวาง

### 3.3.7 การหาค่าเลขซีที

เลขซีที (CT number) ในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่า  
เกรย์สเกล ณ บริเวณที่สนใจ แล้วนำมาคำนวณหาเลขซีทีดังสมการ

$$CT\ number = \left( \frac{\overline{GV}_{measure} - \overline{GV}_{water}}{\overline{GV}_{water} - \overline{GV}_{air}} \right) \times 1000 \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $\overline{GV}_{measure}$  คือ ค่าเกรย์สเกลเฉลี่ย ณ บริเวณที่ต้องการหาค่าเลขซีที
- $\overline{GV}_{water}$  คือ ค่าเกรย์สเกลเฉลี่ยของวัสดุน้ำบนภาพตัดขวาง
- $\overline{GV}_{air}$  คือ ค่าเกรย์สเกลเฉลี่ยของอากาศบนภาพตัดขวาง

## บทที่ 4

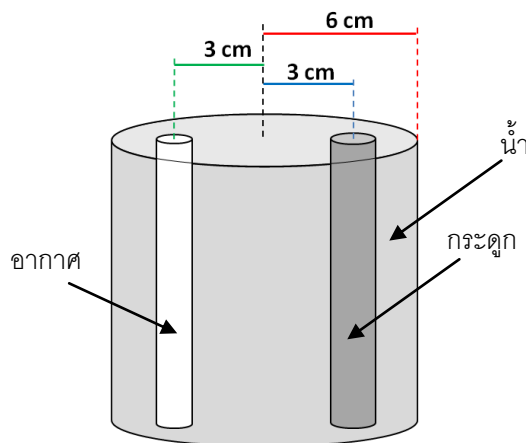
### การทดสอบการจำลองถ่ายภาพ

โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองถ่ายภาพจะถูกนำมาทดสอบการใช้งาน โดยทำการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบและนำผลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ทั้งลักษณะการกระจายตัวของรังสีเอกซ์, ปริมาณของรังสีเอกซ์กระเจิง รวมไปถึงสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของขนาดวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ภายในวัตถุตัวอย่าง เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุภายในวัตถุมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

#### 4.1 การทดสอบใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพ

สำหรับการทดสอบการใช้งานโปรแกรม จะทำการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชันของวัตถุทดสอบเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ โดยวัตถุทดสอบที่นำมาใช้ในการจำลองถ่ายภาพมีดังนี้

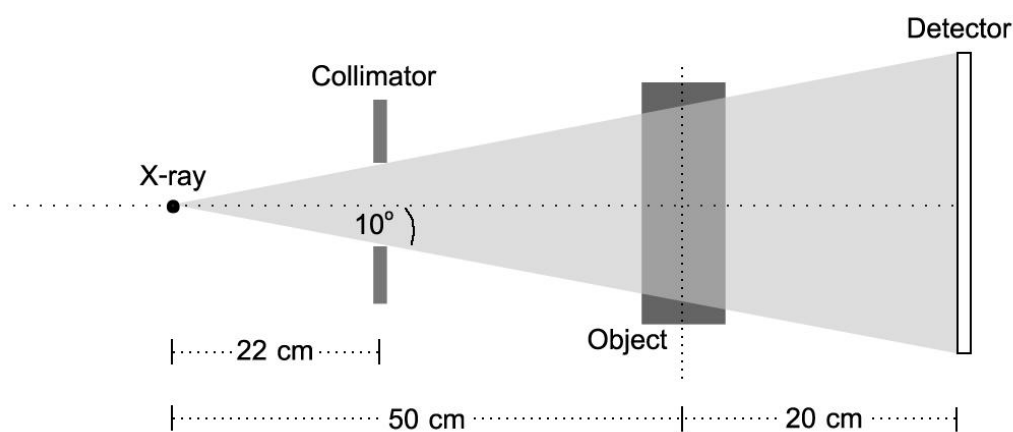
- **วัตถุทดสอบที่ 1** ได้แก่ ทรงกระบอกน้ำ ขนาดรัศมี 6 ซม. ความสูง 12 ซม.
- **วัตถุทดสอบที่ 2** ได้แก่ ทรงกระบอกน้ำ ขนาดรัศมี 6 ซม. ความสูง 12 ซม. ภายในมีรูอากาศขนาดรัศมี 0.75 ซม. และมีแท่งกระดูกขนาดรัศมี 1 ซม. ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วัตถุทดสอบที่ 2

ขั้นตอนในการจำลองทดสอบมีดังนี้

4.1.1 จำลองสร้างระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามระบบถ่ายภาพตัดขวางของทางสวทช. ซึ่งระบบที่จำลองประกอบด้วยลำรังสีเอกซ์ที่มีลำรังสีแบบทรงกรวย, เครื่องวัดรังสีขนาด 24.4x19.5 ซม. และวัตถุทดสอบที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการจำลองถ่ายภาพ โดยการจัดวางทั้งหมดเป็นไปดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการจำลองถ่ายภาพ

4.1.2 ยิงลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวยไปยังวัตถุทดสอบ โดยใช้รังสีเอกซ์จำนวน  $3 \times 10^8$  อนุภาค และใช้การกำหนดลักษณะการกระจายตัวต่าง ๆ ของรังสีเอกซ์ตั้งต้นเป็นไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดข้อมูลนำเข้าสำหรับการสร้างลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวย

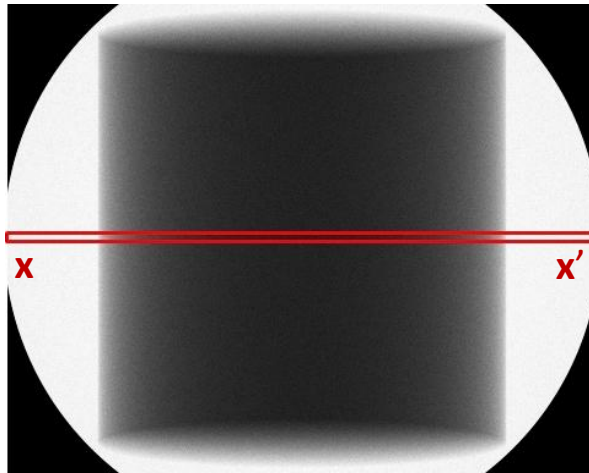
| ประเภทการกระจายตัว      | ลักษณะที่ใช้                                                                                                                                         |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การกระจายตัวของพลังงาน  | กำหนดการกระจายตัวของพลังงานเอง โดยนำสเปกตรัมพลังงานจากโปรแกรม SpekCalc มาใช้เป็นข้อมูลเข้า                                                           |
| การกระจายตัวเชิงตำแหน่ง | เลือกใช้แหล่งกำเนิดแบบจุด                                                                                                                            |
| การกระจายตัวเชิงมุม     | ใช้การกระจายตัวแบบเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) โดยกำหนดให้รังสีเอกซ์ตั้งต้นมีการกระจายตัวเชิงมุมอยู่ในช่วงขนาดของมุมครึ่งลำรังสีไม่เกิน $10^\circ$ |

4.1.3 นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ความเข้มรังสี, ระดับพลังงานของรังสี, ปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิง

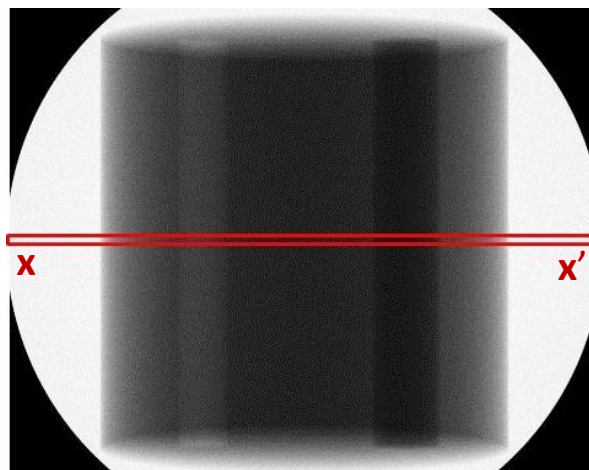
#### 4.2 ผลการทดสอบใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพ

ผลการทดสอบการใช้โปรแกรมในการจำลองถ่ายภาพ สำหรับวัตถุทดสอบทั้งสองชนิดพบว่า ภาพโปรเจกชันของวัตถุทดสอบที่ 1 ซึ่งเป็นทรงกระบอกน้ำรัศมี 6 ซม. ความสูง 12 ซม. โดยเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ มีลักษณะดังรูปที่ 4.3 และภาพของวัตถุทดสอบที่ 2 ซึ่งเป็นทรงกระบอกน้ำรัศมี 6 ซม. ความสูง 12 ซม. ภายในมีกระดูกและรูอากาศอยู่มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเงตสีในภาพบริเวณที่มีแท่งกระดูกอยู่จะมีสีที่เข้มกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณกระดูกเกิดการดูดกลืนรังสีที่มากกว่า ขณะที่เงตสีบริเวณที่มีรูอากาศจะมีสีที่อ่อนกว่าบริเวณอื่น สำหรับภาพโปรเจกชันที่ได้จากการเลือกพิจารณาข้อมูลเฉพาะส่วนรังสีเอกซ์กระเจิงมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 (ก) และรูปที่ 4.6 (ก) โดยในส่วนของรังสีเอกซ์กระเจิงนั้นเนื่องจากจำนวนรังสีที่ตกเข้าสู่เครื่องวัดมีปริมาณที่น้อย เพื่อเป็นการลดความแปรปรวนของข้อมูลจะนำข้อมูลภาพที่ได้มากรองด้วย Gaussian lowpass filter ก่อน ดังรูปที่ 4.5 (ข) และ 4.6 (ข) จากการเปรียบเทียบความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านการกรองข้อมูล ดังรูปที่ 4.5 (ค) และรูปที่ 4.6 (ค) พบว่า ข้อมูลหลังผ่านการกรองแล้วมีความแปรปรวนลดลง ช่วยให้เกิดความสะดวกในการพิจารณามากขึ้น นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.5 (ค) และรูปที่ 4.6 (ค) พบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดกระเจิงในวัตถุทรงกระบอกน้ำที่ภายในมีกระดูกและรูอากาศมีปริมาณที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดกระเจิงในวัตถุทรงกระบอกน้ำธรรมดา โดยในบริเวณฝั่งที่มีกระดูกจะมีปริมาณลดลงจากเดิมเล็กน้อย

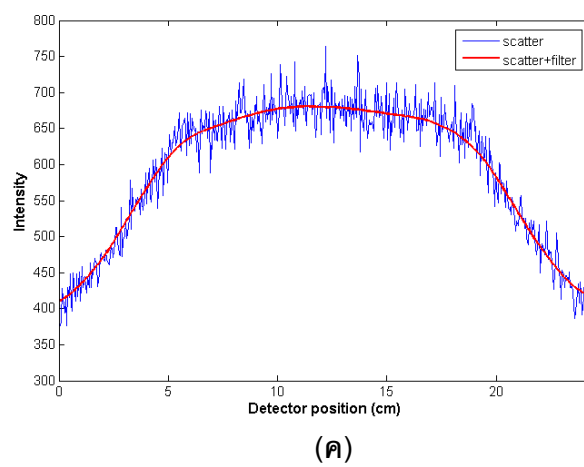
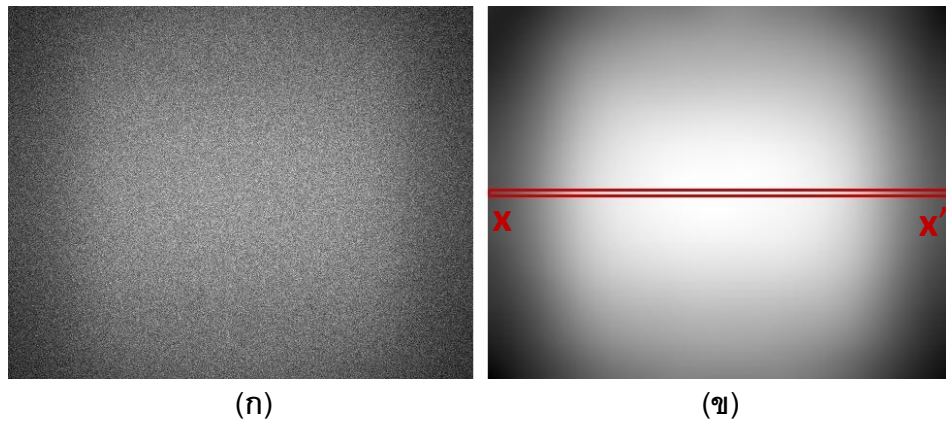




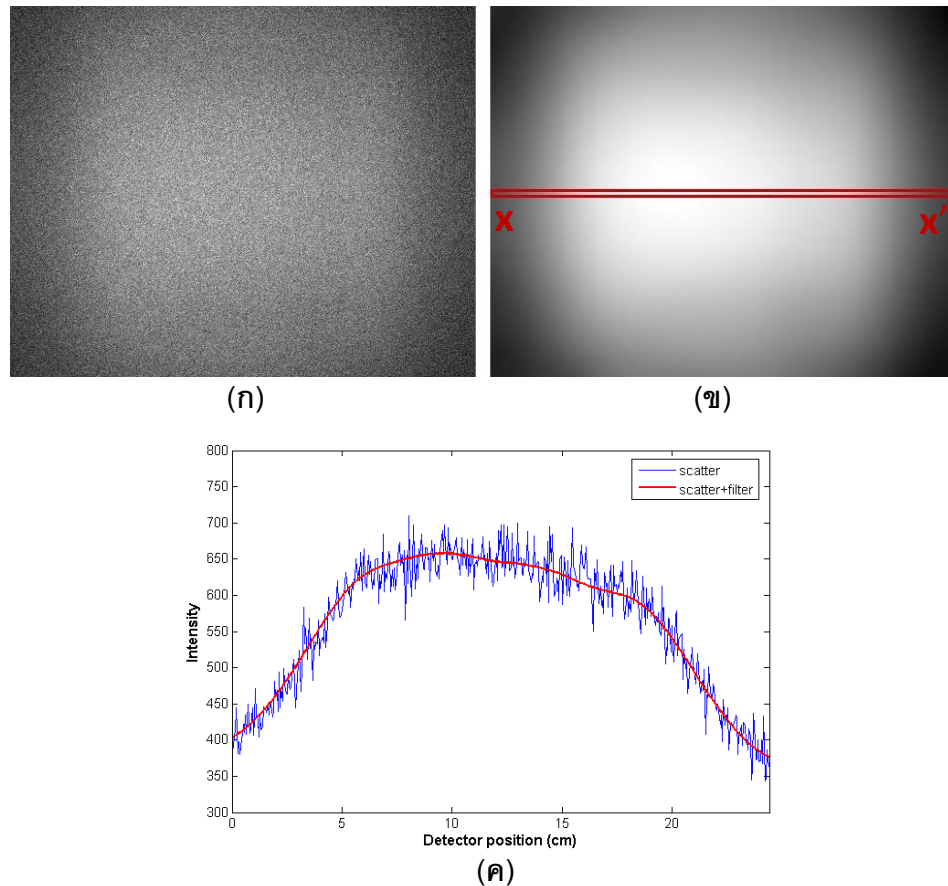
รูปที่ 4.3 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐุมภูมิ ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.4 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐุมภูมิ ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2



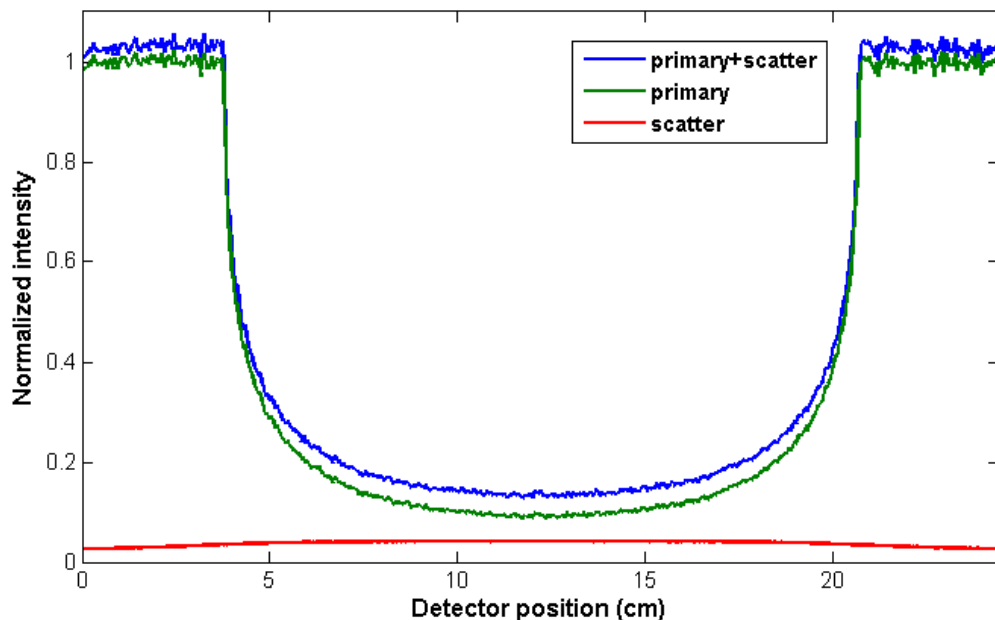
รูปที่ 4.5 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1 โดย (ก) ข้อมูลภาพก่อนผ่านการกรอง, (ข) ข้อมูลภาพที่ผ่านการกรองแล้ว และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกรอง



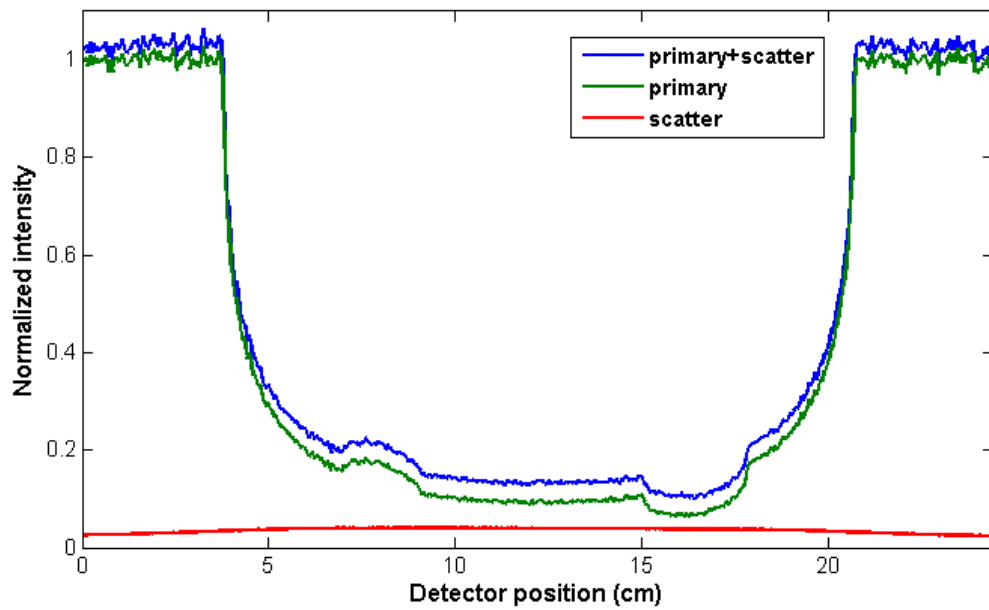
รูปที่ 4.6 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2 โดย (ก) ข้อมูลภาพก่อนผ่านการกรอง, (ข) ข้อมูลภาพที่ผ่านการกรองแล้ว และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกรอง

ในการศึกษาความเข้มของรังสีเอกซ์จากข้อมูลภาพโปรเจกชันสำหรับวัตถุทดสอบทั้งสองชนิดนั้น ได้เลือกศึกษาความเข้มที่อยู่ในช่วงพื้นที่ที่สนใจบริเวณกึ่งกลางภาพ ซึ่งเป็นพื้นที่ขนาด  $480 \times 10$  พิกเซล ณ บริเวณกรอบสีแดงบนภาพโปรเจกชันของรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ความเข้มที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาทำให้เป็นบรรทัดฐานก่อน โดยการหารด้วยความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการถ่ายภาพแบบไม่มีวัตถุ กราฟแสดงความเข้มของรังสีเป็นไปดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพวัตถุทดสอบทั้งสองชนิดมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ นอกจากนี้จากรูปที่ 4.8 หากพิจารณาเทียบกันระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิง พบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงไม่สามารถแบ่งแยกได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณใดเป็นตำแหน่งของกระดูก, ภูเขาอากาศ และน้ำ ซึ่งแตกต่างจากลักษณะความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

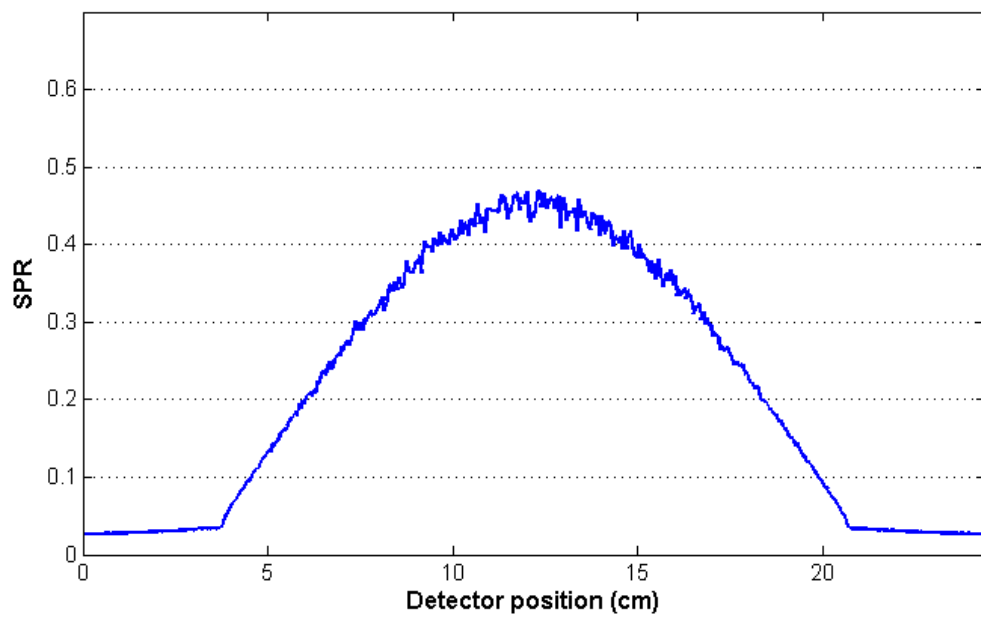
สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ (SPR) ในแต่ละตำแหน่งมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 โดยพบว่า ค่า SPR ของทรงกระบอกน้ำธรรมดาจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกลางของทรงกระบอก สำหรับทรงกระบอกน้ำที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายใน จะพบว่า บริเวณตำแหน่งที่มีกระดุกอยู่จะมีค่า SPR สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับบริเวณข้างเคียงซึ่งเป็นน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากกระดุกมีการดูดกลืนรังสีเอกซ์มาก ทำให้รังสีเอกซ์ปฐมภูมิมิมีปริมาณลดลง ค่า SPR ที่คำนวณได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่บริเวณตำแหน่งที่มีรูอากาศอยู่จะมีค่า SPR ที่ต่ำลงกว่าบริเวณข้างเคียง เนื่องจากการที่มีรูอากาศอยู่ภายในจะทำให้ความหนาของเนื้อสารที่ลำรังสีจะต้องผ่านมีความหนาที่ลดลงจากเดิม ทำให้ปริมาณรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาจากบริเวณนี้มีค่ามากขึ้น



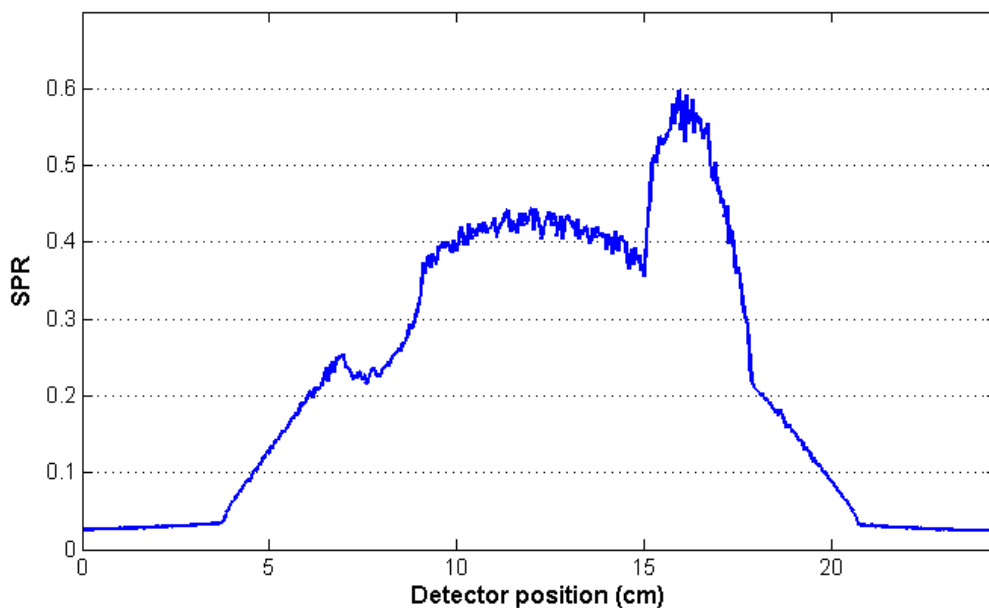
รูปที่ 4.7 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจคชันในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ จากตำแหน่ง  $x$  ถึง  $x'$  สำหรับวัตถุทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.8 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจกชันในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ จากตำแหน่ง  $x$  ถึง  $x'$  สำหรับวัตถุทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.9 สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 1

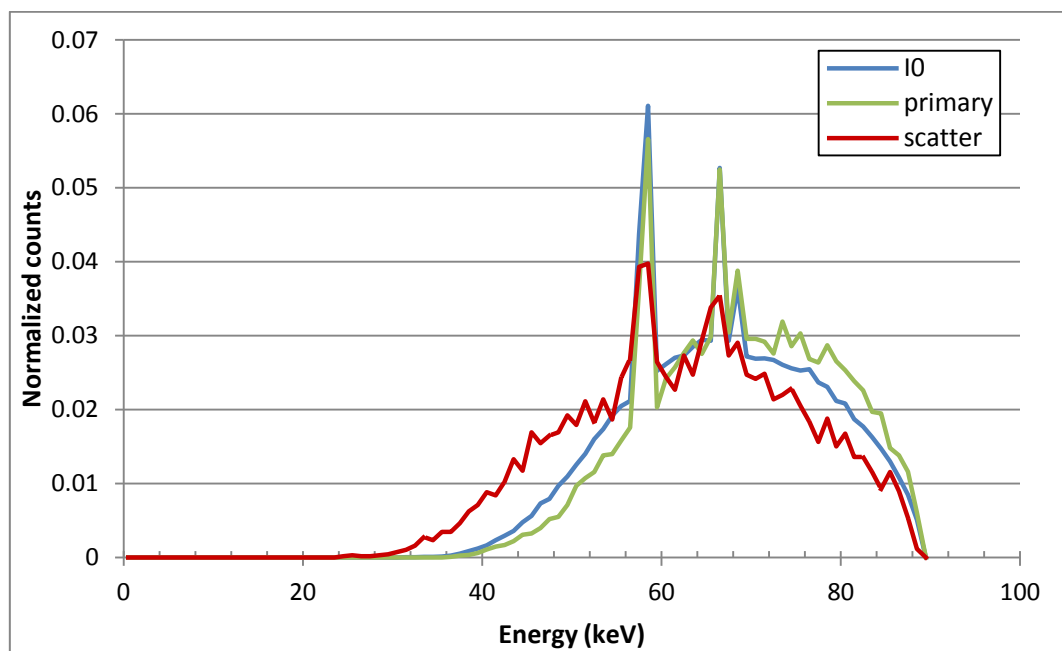


รูปที่ 4.10 สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุทดสอบที่ 2

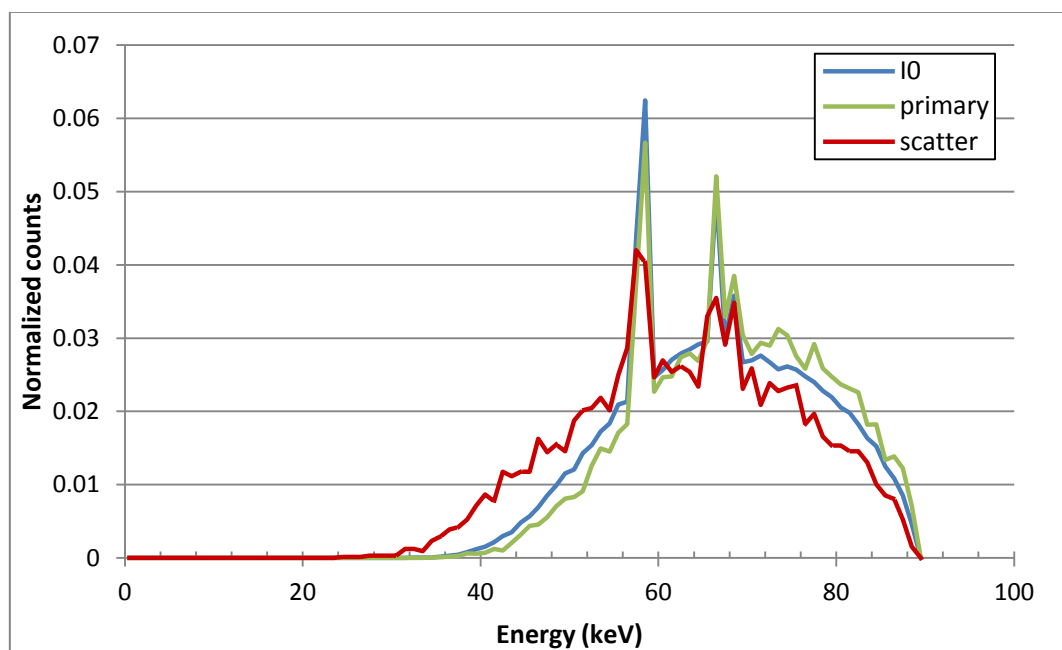
ในการพิจารณาสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ สำหรับวัตถุทดสอบที่ 1 ได้เลือกศึกษาพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกเข้าสู่บริเวณเครื่องวัดรังสี ณ จุดกึ่งกลางภาพ ในพื้นที่ขนาด 10 x 10 พิกเซล สเปกตรัมที่ได้จะถูกนำมาทำให้เป็นบรรทัดฐานก่อนเพื่อความสะดวกในการพิจารณาเปรียบเทียบผล โดยค่านับวัดรังสีในแต่ละค่าพลังงานจะถูกหารด้วยจำนวนของรังสีทั้งหมดที่ตกเข้าสู่พื้นที่ที่เลือกพิจารณา ซึ่งพบว่า สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านวัตถุ, สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการจำลองมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.11 โดยที่ค่าพลังงานเฉลี่ยในแต่ละสเปกตรัมมีค่าเท่ากับ 66.54, 68.41 และ 62.67 keV ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิหลังจากผ่านวัตถุทดสอบมีค่าพลังงานเฉลี่ยที่สูงกว่าพลังงานเฉลี่ยก่อนผ่านวัตถุเล็กน้อย เนื่องจากผลจากการเกิดความกระด้างของลำรังสีเอกซ์ ขณะที่พลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงมีค่าลดลงจากเดิม

สำหรับวัตถุทดสอบที่ 2 ได้เลือกศึกษาสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสีใน 2 บริเวณ คือ บริเวณตำแหน่งบนภาพที่มีรูอากาศ และบริเวณตำแหน่งบนภาพที่มีกระดูก โดยเลือกพิจารณาภายในพื้นที่ 10 x 10 พิกเซลเช่นกัน จากการศึกษพบว่า สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการจำลองโดยวัตถุที่บริเวณตำแหน่งที่มีรูอากาศมีลักษณะดังรูปที่ 4.12 โดยมีพลังงานเฉลี่ยในแต่ละสเปกตรัมเท่ากับ 66.56, 68.20 และ 63.00 keV ตามลำดับ ส่วนสเปกตรัมพลังงานที่บริเวณตำแหน่งที่มีรูอากาศมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 4.13 โดยมีพลังงานเฉลี่ยในแต่ละสเปกตรัมเท่ากับ 66.51, 68.91 และ 63.26 keV ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า พลังงาน

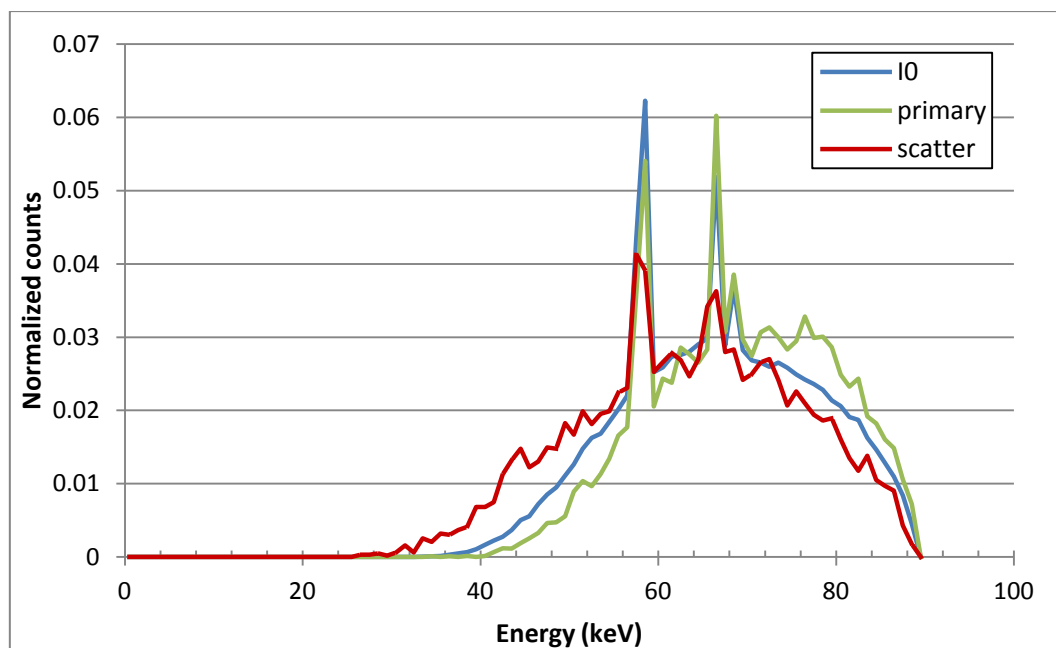
ของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิหลังจากผ่านวัตถุมีค่าพลังงานเฉลี่ยที่สูงกว่าพลังงานเฉลี่ยก่อนผ่านวัตถุเล็กน้อยเช่นเดียวกับกรณีใช้วัตถุทดสอบที่ 1 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดความกระด้างของลำรังสีเอกซ์ ในขณะที่พลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงมีค่าลดลงจากเดิม



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 2 ณ บริเวณรูอากาศ



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุทดสอบที่ 2 ณ บริเวณกระดูก

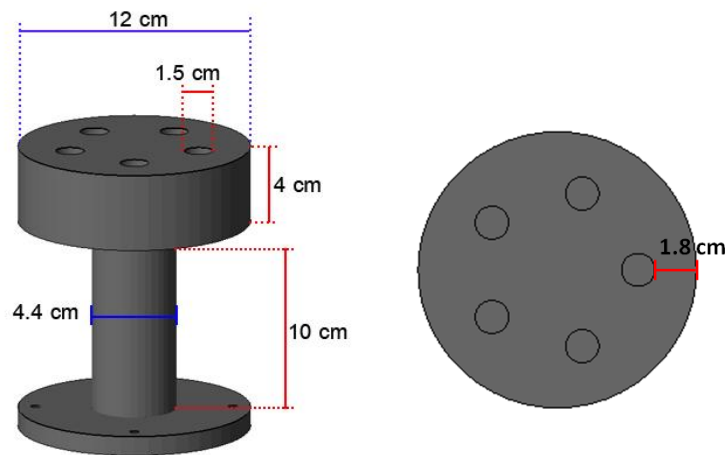
#### 4.3 การทดสอบผลของขนาดวัสดุภายในวัตถุที่มีต่อปริมาณการกระเจิง

ในส่วนนี้เป็นการจำลองถ่ายภาพวัตถุที่อยู่ในประกอบด้วยวัสดุหลากหลายชนิด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่อเลือกใช้ขนาดวัสดุภายในที่แตกต่างกัน โดยมีขั้นตอนในการจำลองทดสอบมีดังนี้

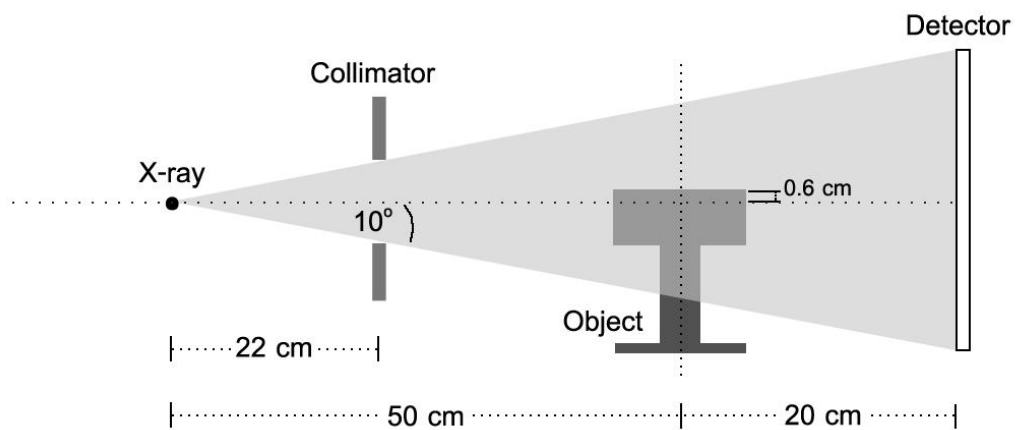
4.3.1 จำลองสร้างระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามระบบถ่ายภาพตัดขวางของทางสวทช. สำหรับวัตถุนำมาใช้ในการจำลองถ่ายภาพจะใช้วัตถุที่ทำมาจากวัสดุชนิดไนลอน 6,6 ซึ่งมีรูปทรงและขนาดเป็นไปดังรูปที่ 4.14 โดยส่วนบนของวัตถุจะมีช่องอากาศทั้งหมด 5 รู การจัดวางของระบบทั้งหมดจะเป็นไปตามรูปที่ 4.15

4.3.2 ยิงลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวยไปยังวัตถุทดสอบ โดยใช้รังสีเอกซ์จำนวน  $3 \times 10^8$  อนุภาค และใช้การกำหนดลักษณะการกระจายตัวต่าง ๆ ของรังสีเอกซ์ตั้งต้นเป็นไปดังตารางที่ 4.1





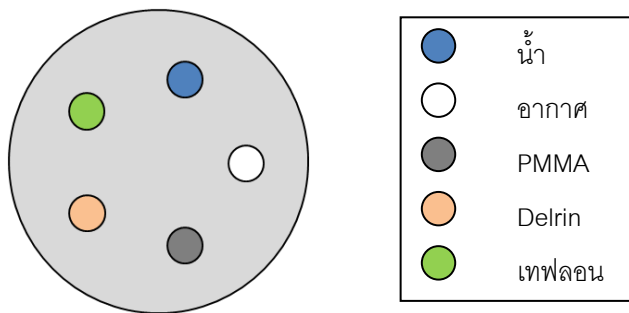
รูปที่ 4.14 วัตถุในลอนที่ใช้ในการถ่ายภาพ



รูปที่ 4.15 ระบบที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน

4.3.3 ทำการจำลองซ้ำในขั้นตอนที่ 4.3.1 และ 4.3.2 โดยเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในวัตถุทั้ง 5 รูเป็น 1.65 ซม., 1.8 ซม. และ 1.95 ซม. จากนั้นนำผลที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการกระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่อขนาดของรูภายในเปลี่ยนไป

4.3.4 ทำการจำลองซ้ำในขั้นตอนที่ 4.3.1 ถึง 4.3.3 โดยใช้วัตถุในลอนชนิดเดิมแต่ใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมลงไปในห้องอากาศ ได้แก่ Delrin, PMMA, อากาศ, น้ำ และเทฟลอน โดยจัดเรียงตามรูปที่ 4.16



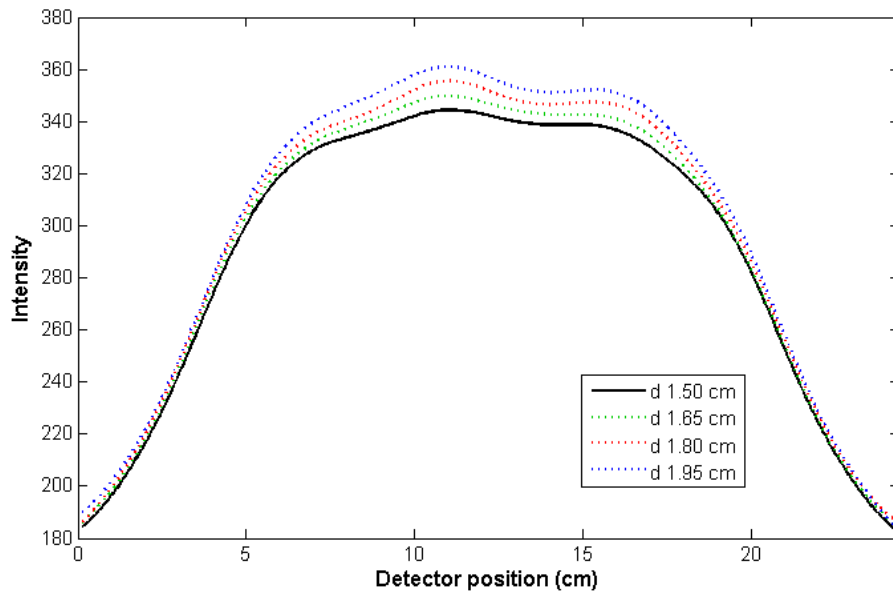
รูปที่ 4.16 ลำดับวัสดุที่อยู่ภายในวัตถุในลอน

#### 4.4 ผลการทดสอบผลของขนาดวัสดุภายในวัตถุที่มีต่อปริมาณการกระเจิง

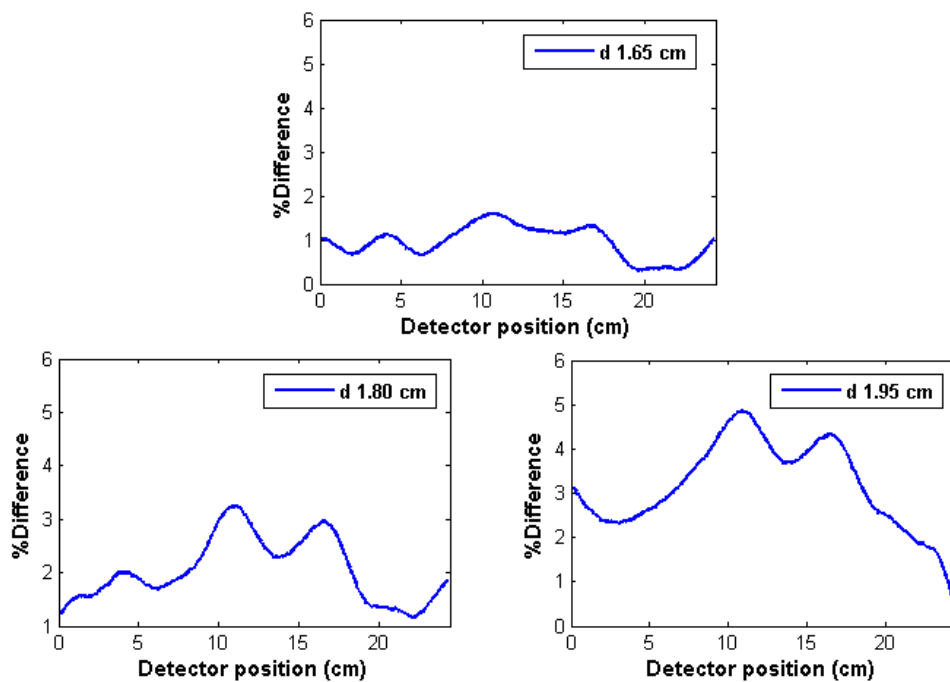
จากการถ่ายภาพวัตถุในลอนที่ภายในมีรูอากาศ 5 รู โดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของรูที่แตกต่างกัน ผลความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจกชันมีลักษณะดังรูปที่ 4.17 โดยพบว่า เมื่อมีการเพิ่มขนาดของรูอากาศภายในจากเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. เป็นขนาด 1.65 ซม., 1.8 ซม. และ 1.95 ซม. ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้นจากเดิมเท่ากับ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย และจากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขนาดรูอากาศเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงในกรณีที่ใช้รูอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. ดังรูปที่ 4.18 พบว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดรูอากาศภายใน มีผลทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมากขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย โดยในกรณีที่ใช้น้ำขนาดของรูอากาศใหญ่ขึ้นจากเดิม 30 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ปริมาณรังสีกระเจิงเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

สำหรับกรณีที่ใช้วัตถุในลอนที่ใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมลงไป ในรูอากาศ พบว่า ผลความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพโดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของรูภายในที่แตกต่างกันมีลักษณะดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดวัสดุอื่นที่อยู่ภายในวัตถุในลอน ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงจะมีการเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หากพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขนาดวัสดุที่ใส่ภายในเทียบกับปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงในกรณีที่ใช้วัสดุภายในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. ดังรูปที่ 4.20 พบว่า การที่เพิ่มขนาดของวัสดุภายในถึง 30 เปอร์เซ็นต์ส่งผลให้ปริมาณการกระเจิงมีความแตกต่างจากเดิมส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกิน 1

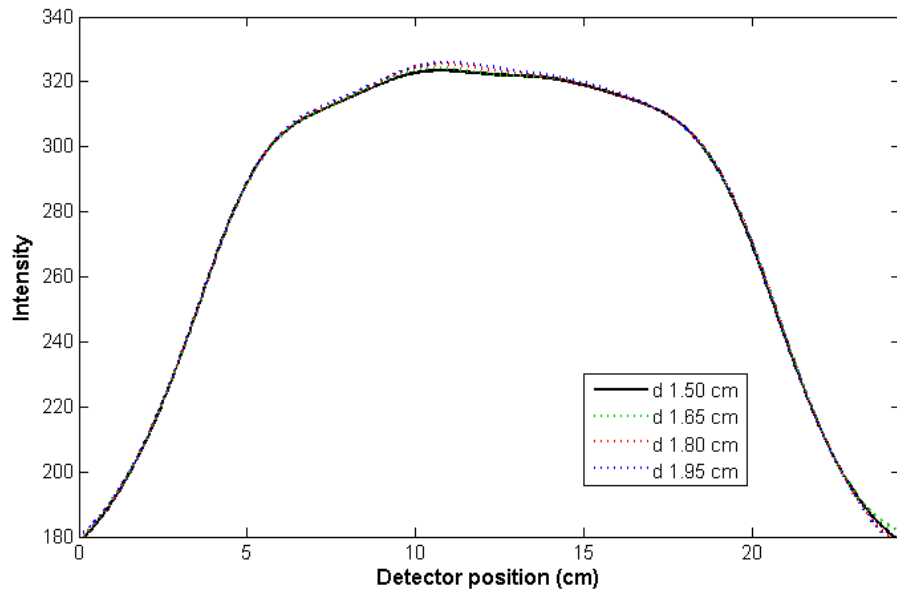
เปอร์เซ็นต์ โดยการที่บริเวณขอบมีความเปอร์เซ็นต์แตกต่างที่สูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการกรองข้อมูลด้วย Gaussian lowpass filter



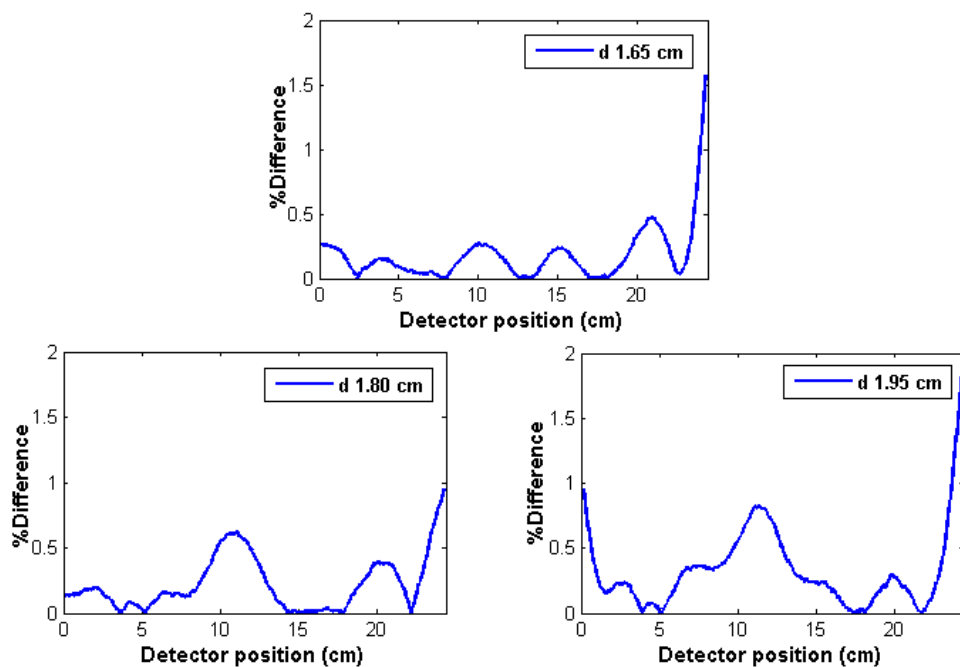
รูปที่ 4.17 ความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอน โดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของรูอากาศที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอนที่มีการเพิ่มขนาดของรูภายในเทียบกับความเข้มที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอนที่รูภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม.



รูปที่ 4.19 ความเข้มรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอนที่ภายในใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ ลงไป โดยในแต่ละครั้งเลือกใช้ขนาดของวัสดุภายในที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.20 เปรอเซ็นต์ความแตกต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอนที่ภายในใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ โดยมีการเพิ่มขนาดของวัสดุภายในเทียบกับความเข้มที่ได้จากการถ่ายภาพไนลอนที่วัสดุภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม.

จากการทดสอบนี้ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดวัตถุที่อยู่ภายในไม่ส่งผลต่อปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงมากนัก ซึ่งจากผลที่ได้นี้ทำให้สามารถใช้วิธีการจำลองถ่ายภาพวัตถุที่มีรูปทรงและคุณลักษณะใกล้เคียงกับศีรษะจริงเพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในการปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจคชันที่ได้จากระบบถ่ายภาพตัดขวางได้ โดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของลักษณะภายในศีรษะมากนัก อย่างไรก็ตาม อาจต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในกรณีที่ใช้ชนิดของวัสดุภายในที่มีความหนาแน่นสูง รวมถึงกรณีที่วัตถุทดสอบมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นต่อไป

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบผลและการลดการรบกวนในภาพตัดขวาง

งานวิจัยในหัวข้อนี้ประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชันเพื่อนำผลที่ได้มาตรวจสอบเปรียบเทียบผลกับภาพที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวางทางทันตกรรมของสวทช. โดยเลือกใช้วัตถุในการถ่ายภาพที่มีรูปทรงและชนิดวัสดุเดียวกันทั้งในการจำลองและในการทดลอง สำหรับงานในส่วนหลังเป็นการทดสอบการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวางจากการทดลอง โดยนำภาพโปรเจกชันแต่ละภาพที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุมาคำนวณหาสัดส่วนระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิต่อความเข้มของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นจึงนำสัดส่วนที่ได้นี้มาใช้ในการปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจกชันแต่ละภาพที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวาง และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ต่อไป

#### 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง

ในการเปรียบเทียบข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการเลือกถ่ายภาพวัตถุ ๓ มุม ๆ หนึ่งระหว่างผลที่ได้จากการจำลองด้วย Geant4 กับผลที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพของสวทช. มีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

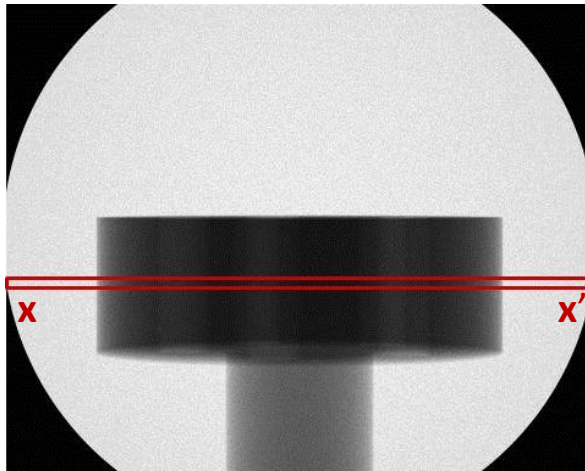
5.1.1 จำลองสร้างระบบถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามระบบถ่ายภาพตัดขวางของสวทช. สำหรับวัตถุที่นำมาจำลองถ่ายภาพจะใช้วัตถุที่ทำมาจากวัสดุชนิดในลอน 6,6 ดังรูปที่ 4.14 โดยมีการจัดวางของระบบทั้งหมดเป็นไปตามรูปที่ 4.15

5.1.2 จำลองถ่ายภาพวัตถุ ๓ มุม ๆ หนึ่ง โดยยิงลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวยที่สร้างขึ้นจากการกำหนดลักษณะการกระจายตัวต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 และใช้จำนวนรังสีเอกซ์ในการจำลองเท่ากับ  $3 \times 10^6$  อนุภาค

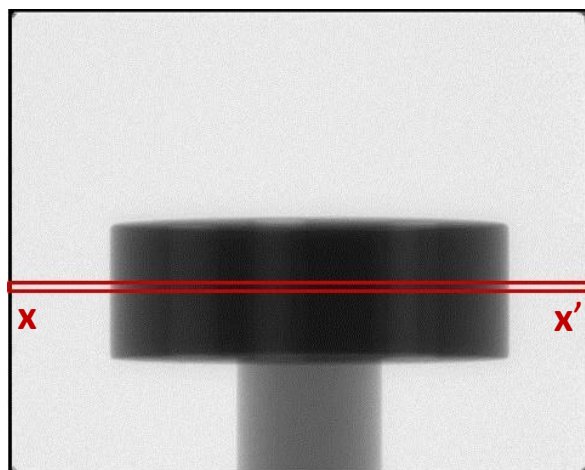
5.1.3 นำข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยระบบถ่ายภาพตัดขวางของสวทช. แล้วทำการวิเคราะห์ผล

## 5.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง

จากการเปรียบเทียบข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดไนลอน พบว่า ภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองด้วย Geant4 มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.1 และภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองโดยใช้ระบบถ่ายภาพตัดขวางที่ทางสวทช.พัฒนาขึ้น มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.2



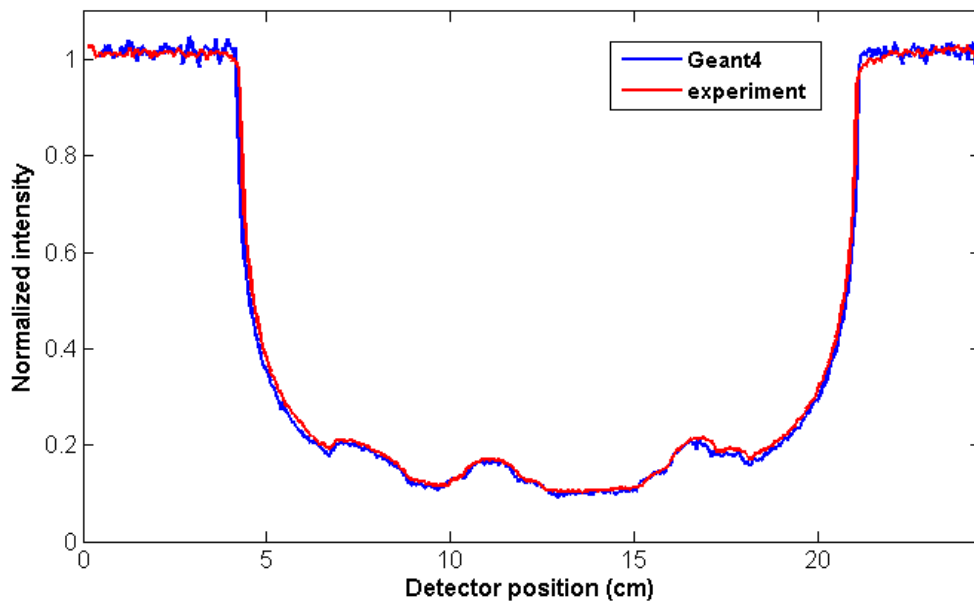
รูปที่ 5.1 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัด ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุไนลอน



รูปที่ 5.2 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัด ซึ่งได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุไนลอน

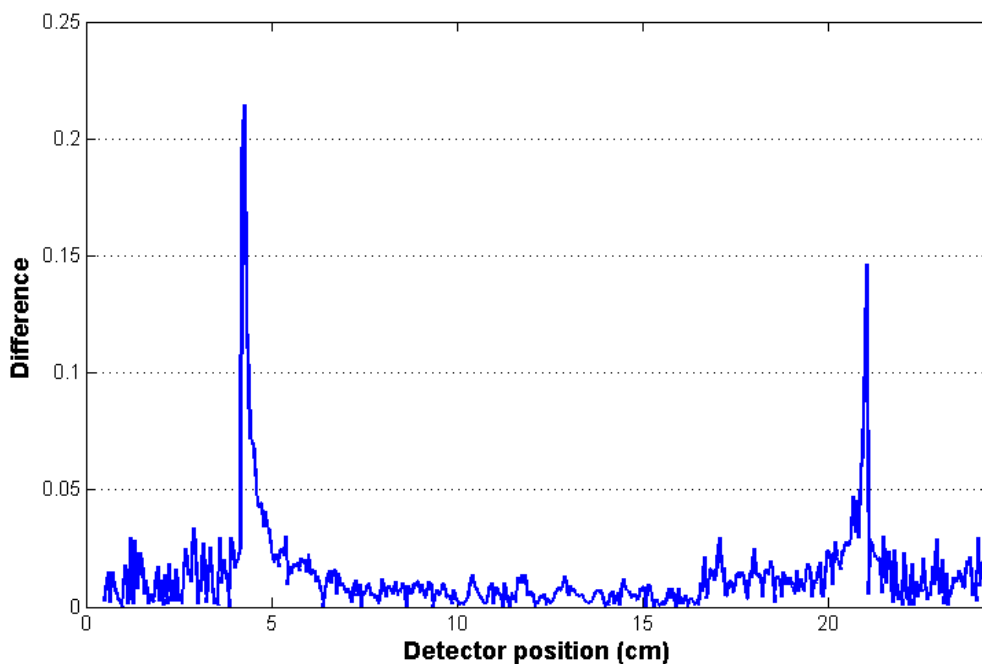
เมื่อพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์จากข้อมูลภาพโปรเจคชัน โดยเลือกศึกษาความเข้มของรังสีที่ตกลงบริเวณพื้นที่ขนาด  $480 \times 10$  พิกเซล ที่แสดงได้ดังกรอบสีแดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ข้อมูลความเข้มที่ได้จะถูกนำมาทำให้เป็นบรรทัดฐานก่อน โดยการหารด้วยข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการถ่ายภาพแบบไม่มีวัตถุ ซึ่งพบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการพิจารณาข้อมูลภาพโปรเจคชันในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ จากตำแหน่ง  $x$  ถึง  $x'$  สำหรับผลจากการจำลองและผลจากการทดลองมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 5.3

ในส่วนของคุณค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างความเข้มที่ได้จากการจำลองและความเข้มที่ได้จากการทดลองเป็นไปดังรูปที่ 5.4 ซึ่งพบว่า ผลต่างระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลองส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกินค่า 0.02 โดยที่บริเวณขอบของวัตถุจะมีค่าผลต่างที่สูงขึ้นกว่าบริเวณอื่น ๆ



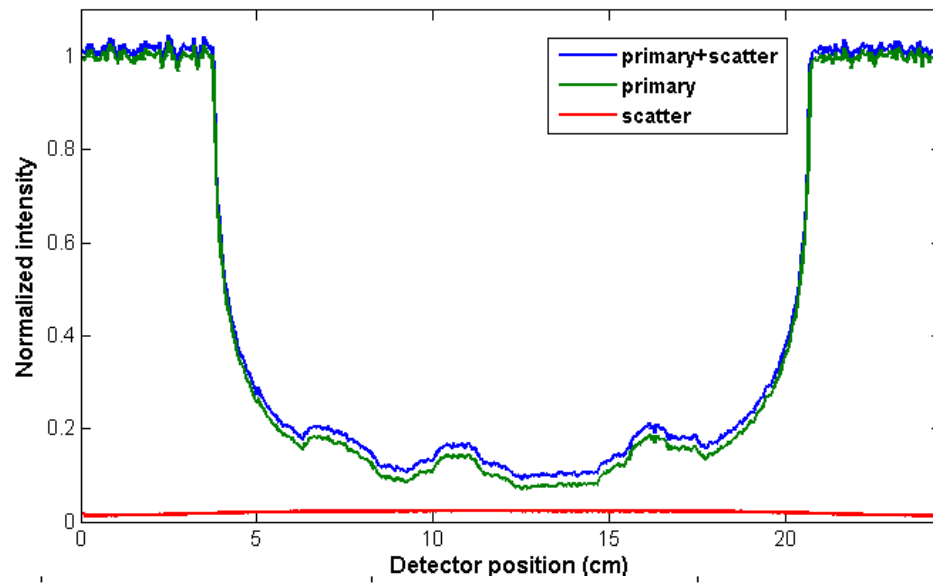
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดไนลอน



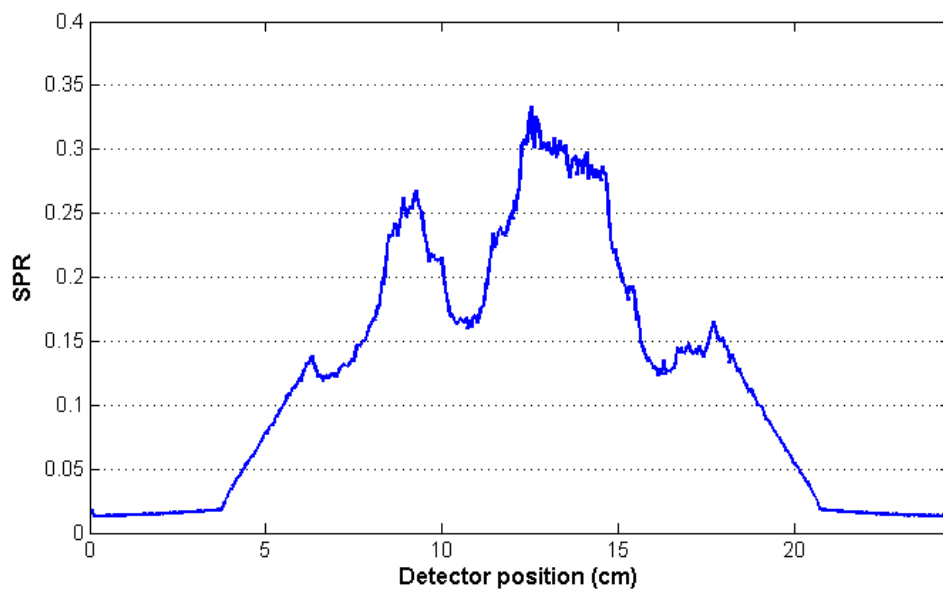


รูปที่ 5.4 ค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง

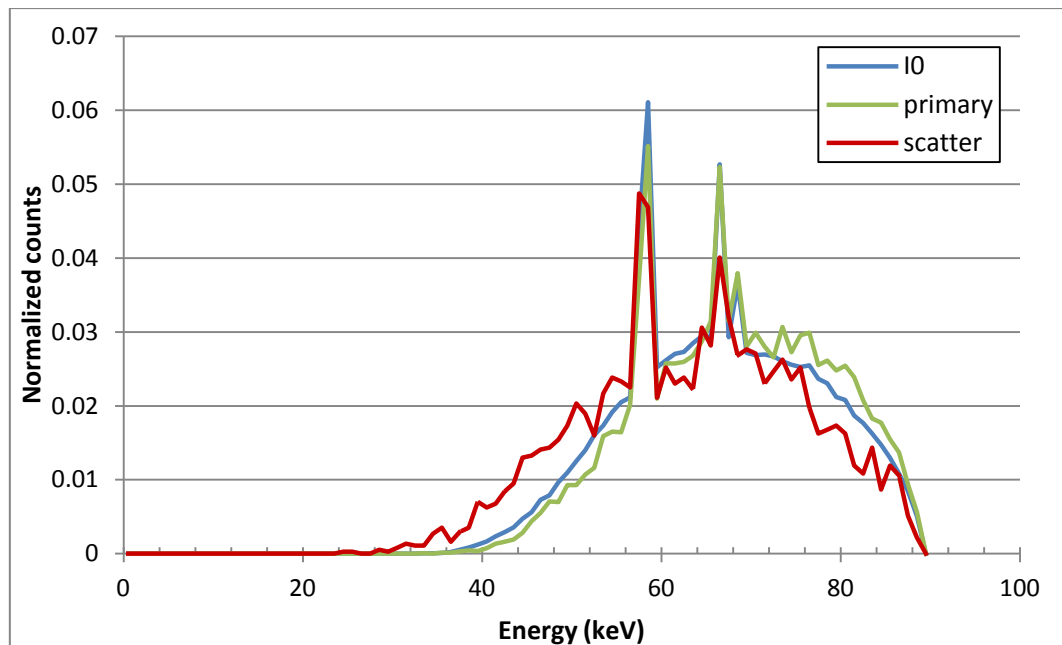
หากพิจารณาเฉพาะข้อมูลความเข้มที่ได้จากการจำลอง พบว่า ความเข้มเปรียบเทียบกันระหว่างรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัด, รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงภายในวัตถุในลอน มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.5 โดยความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงมีลักษณะค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ สำหรับค่า SPR ในแต่ละตำแหน่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.6 โดยในตำแหน่งที่ตรงกับตำแหน่งของรูอากาศภายในวัตถุในลอน ค่า SPR ที่ได้จะมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นใกล้เคียง นอกจากนี้พบว่า สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านวัตถุ, สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์กระเจิงที่วัดได้จากการจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 5.7 และมีค่าพลังงานเฉลี่ยในแต่ละสเปกตรัมเท่ากับ 66.54, 67.99 และ 63.39 keV ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการถ่ายภาพนี้เกิดความกระด้างของลำรังสีเอกซ์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากค่าพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์หลังผ่านวัตถุมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อย



รูปที่ 5.5 ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากจำลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดไนลอน



รูปที่ 5.6 สัดส่วนระหว่างรังสีกระเจิงกับรังสีปฐมภูมิ ที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดไนลอน



รูปที่ 5.7 สเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังผ่านวัตถุในลอน

### 5.3 การลดการรบกวนในภาพตัดขวางที่ได้จากการทดลอง

ในการทดสอบนำผลที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวางจากการทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

5.3.1 สร้างระบบถ่ายภาพตัดขวางในการจำลองเพื่อใช้ในการถ่ายภาพวัตถุในลอน 6,6 ที่มีรูปทรงเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.14 โดยในส่วนนี้ระบบที่ใช้ศึกษามี 2 รูปแบบ คือ

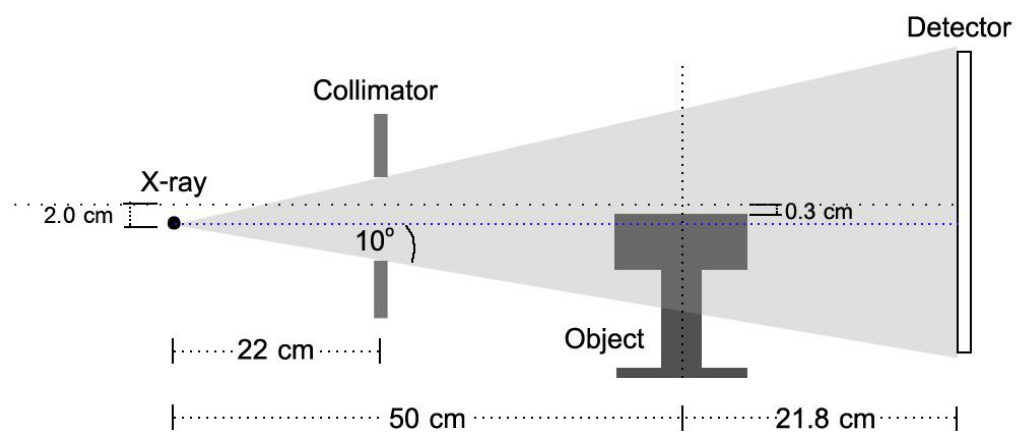
5.3.1.1 ระบบดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะใช้ในการถ่ายภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีช่องอากาศทั้งหมด 5 รู

5.3.1.2 ระบบดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจะใช้ในการถ่ายภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้วัสดุชนิดอื่น ๆ ลงในช่องอากาศ ได้แก่ Delrin, PMMA, อากาศ, น้ำ และเทฟลอน โดยจัดเรียงตามรูปที่ 4.16

5.3.2 จำลองถ่ายภาพวัตถุในแต่ละระบบโดยใช้ลำรังสีเอกซ์แบบทรงกรวยซึ่งกำหนดลักษณะการกระจายตัวต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 ในการถ่ายภาพวัตถุแต่ละมุมจะใช้รังสีเอกซ์

จำนวน  $1 \times 10^8$  อนุภาค จากนั้นจะหมุนวัตถุครั้งละ  $1^\circ$  เพื่อเก็บข้อมูลภาพโปรเจกชันของวัตถุในมุมอื่น ๆ จนได้ภาพถ่ายครบรอบวัตถุ

5.3.3 นำข้อมูลภาพโปรเจกชันในแต่ละมุมที่ได้จากการจำลองด้วย Geant4 มาใช้ในการปรับปรุงข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากระบบถ่ายภาพของสวทช. แล้วทำการวิเคราะห์ผล

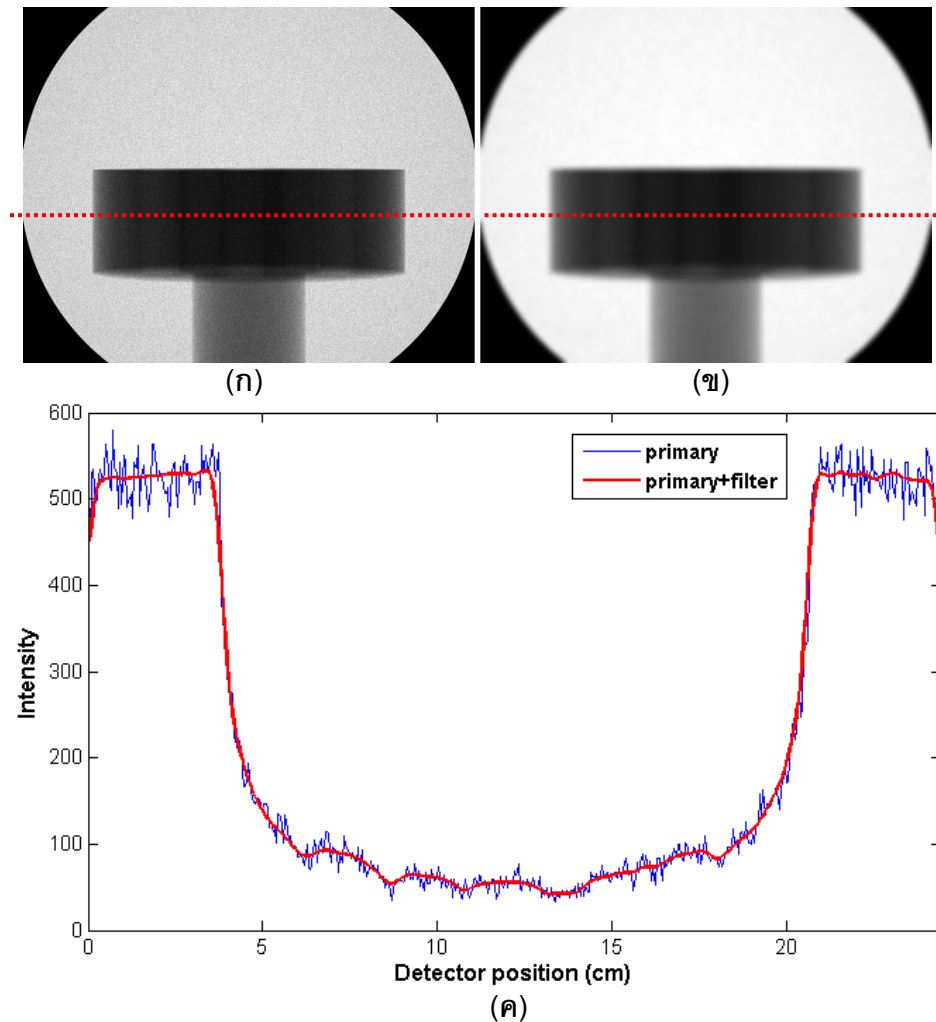


รูปที่ 5.8 ระบบที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่ใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ

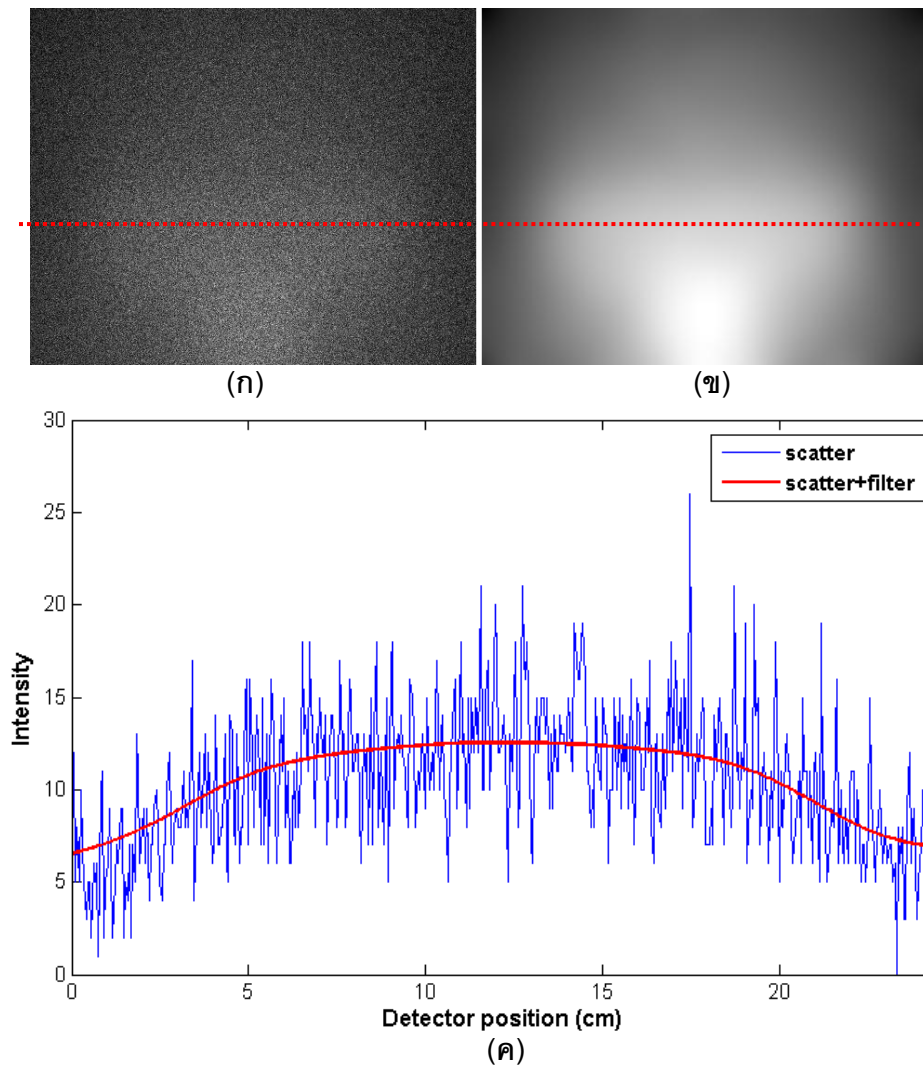
#### 5.4 ผลการจำลองถ่ายภาพตัดขวาง

สำหรับการนำผลที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการลดผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในภาพโปรเจกชันแต่ละภาพที่ได้จากการทดลอง เริ่มต้นจะทำการจำลองถ่ายภาพวัตถุในแต่ละมุมจนครบรอบวัตถุ โดยทำการหมุนวัตถุครั้งละ  $1^\circ$  ทั้งนี้การถ่ายภาพในส่วนนี้ได้ลดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการจำลองลงจากปริมาณเดิมที่ได้ใช้จำลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อเป็นการลดเวลาการจำลองถ่ายภาพในแต่ละมุมให้น้อยลง แต่ผลที่ตามมาคือข้อมูลที่ได้จะมีความแปรปรวนมากขึ้นตามไปด้วย ในการนำข้อมูลจากการจำลองมาใช้ลดผลจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในผลการทดลอง จะทำการกรองข้อมูลที่ได้ด้วย Gaussian lowpass filter ก่อน โดยจะกรองทั้งข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและข้อมูลของรังสีเอกซ์กระเจิง ตัวอย่างภาพโปรเจกชันของวัตถุในลอนที่ได้จากการจำลองทั้งก่อนและหลังผ่านการกรอง ซึ่งเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนข้อมูลรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมิมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.9 (ก) และรูปที่ 5.9 (ข) และตัวอย่างภาพโปรเจกชันที่เลือกพิจารณาเฉพาะส่วนข้อมูลของรังสีเอกซ์กระเจิงมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.10 (ก) และรูปที่ 5.10 (ข) จากการพิจารณาความเข้มของรังสีบนข้อมูลภาพ ดังรูปที่ 5.9 (ค) และรูปที่ 5.10 (ค) จะเห็นได้ว่า

ข้อมูลภาพหลังจากผ่านการกรองแล้วสามารถเห็นรายละเอียดต่าง ๆ ได้ชัดเจนขึ้นเนื่องจากข้อมูลมีความแปรปรวนลดลง แต่ทว่าความคมชัดในภาพจะลดลงด้วย



รูปที่ 5.9 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุไนลอน (ก) ภาพก่อนการกรองข้อมูล (ข) ภาพหลังการกรองข้อมูล และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี

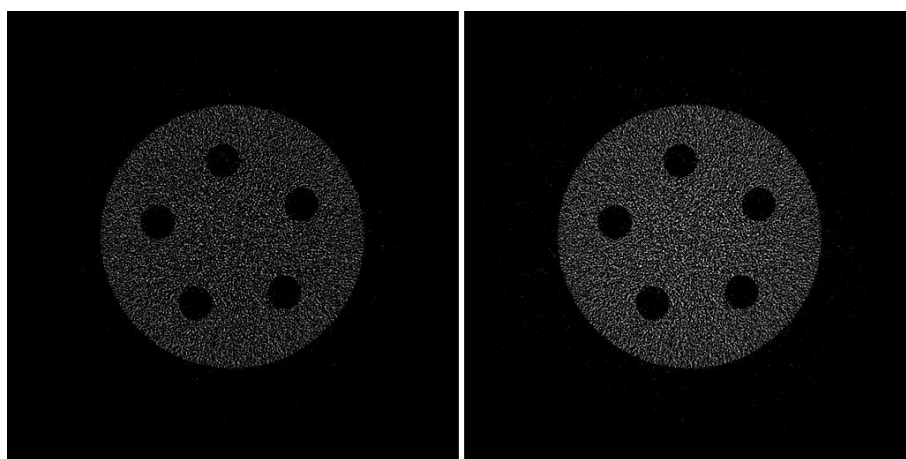


รูปที่ 5.10 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอน (ก) ภาพก่อนการกรองข้อมูล (ข) ภาพหลังการกรองข้อมูล และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาคำนวณสร้างภาพตัดขวาง พบว่า ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ยังไม่ได้ผ่านการกรองมีลักษณะดังรูปที่ 5.11 โดยภาพที่ได้จะมีความแปรปรวนปรากฏอยู่บนภาพมากจนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างรูปที่ 5.11 (ก) ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลรวมระหว่างรังสีเอกซ์ปฐมภูมิและรังสีเอกซ์กระเจิง และรูปที่ 5.11 (ข) ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลเฉพาะส่วนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิได้ ในส่วนของภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้ว มีลักษณะดังรูปที่ 5.12 (ก) และรูปที่ 5.12 (ข) ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางทั้งสองเป็นไปดังรูปที่ 5.12 (ค) โดยพบว่า ในภาพที่สร้างขึ้นจากข้อมูลรวมระหว่างรังสี

ปฐมภูมิและรังสีกระเจิงจะมีความไม่สม่ำเสมอของค่าเกรย์สเกลเกิดขึ้น เห็นได้จากที่บริเวณกลางภาพจะมีเฉดสีที่มืดกว่าบริเวณอื่น ขณะที่ค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลเฉพาะส่วนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะมีความสม่ำเสมอดีกว่า

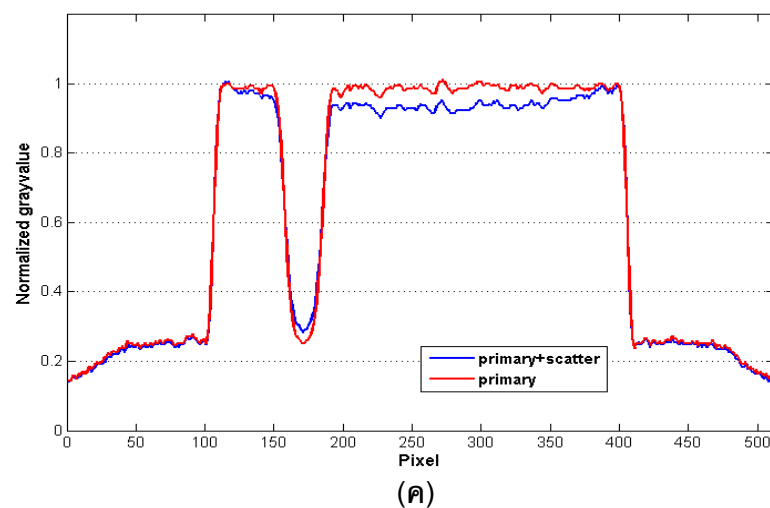
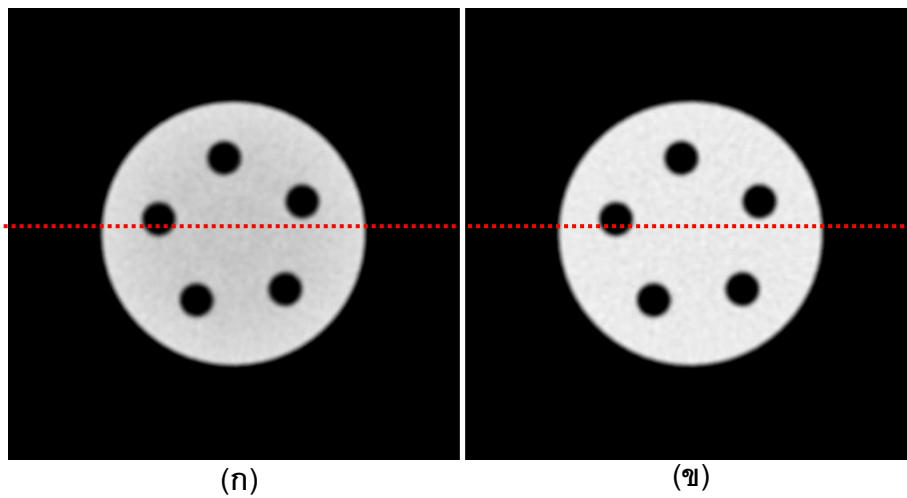
จากการพิจารณาภาพตัดขวางของไนลอนที่สร้างขึ้นจากข้อมูลก่อนและหลังการผ่านการกรอง จะเห็นได้ว่า ภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลภาพที่ไม่ได้ผ่านการกรองจะมีความแปรปรวนอันเนื่องมาจากรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนเครื่องวัดมีปริมาณน้อย ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้หากนำเอาข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการกรองนี้ไปใช้ในการลดผลจากการรบกวนของรังสีเอกซ์กระเจิงในข้อมูลภาพที่ได้จากการทดลอง อาจทำให้ภาพตัดขวางที่ได้หลังจากผ่านการปรับปรุงข้อมูลแล้วมีความแปรปรวนปรากฏอยู่บนภาพสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการนำภาพตัดขวางจากการทดลองนี้ไปใช้งานด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การกรองข้อมูลภาพโปรเจกชันมีผลทำให้ภาพตัดขวางที่คำนวณสร้างขึ้นจากข้อมูลนี้มีความคมชัดลดลง



(ก)

(ข)

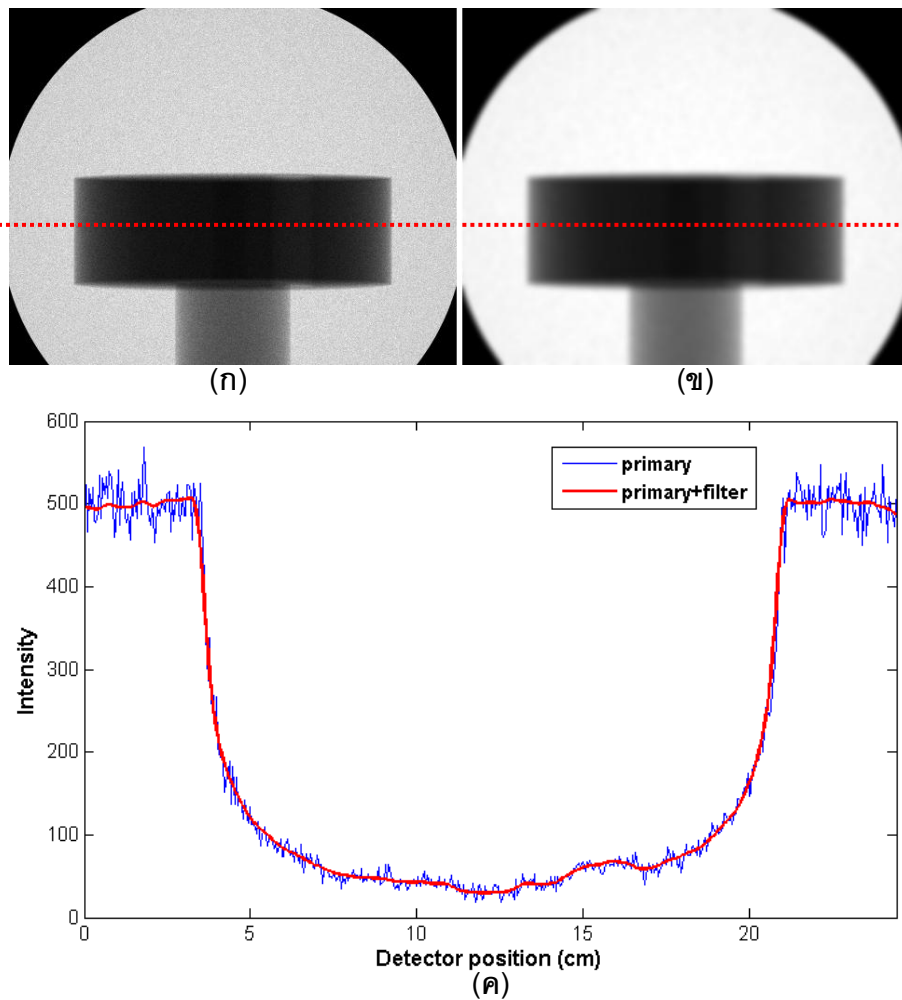
รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางของวัตถุไนลอนที่ได้จากการจำลอง โดย (ก) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี และ (ข) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ



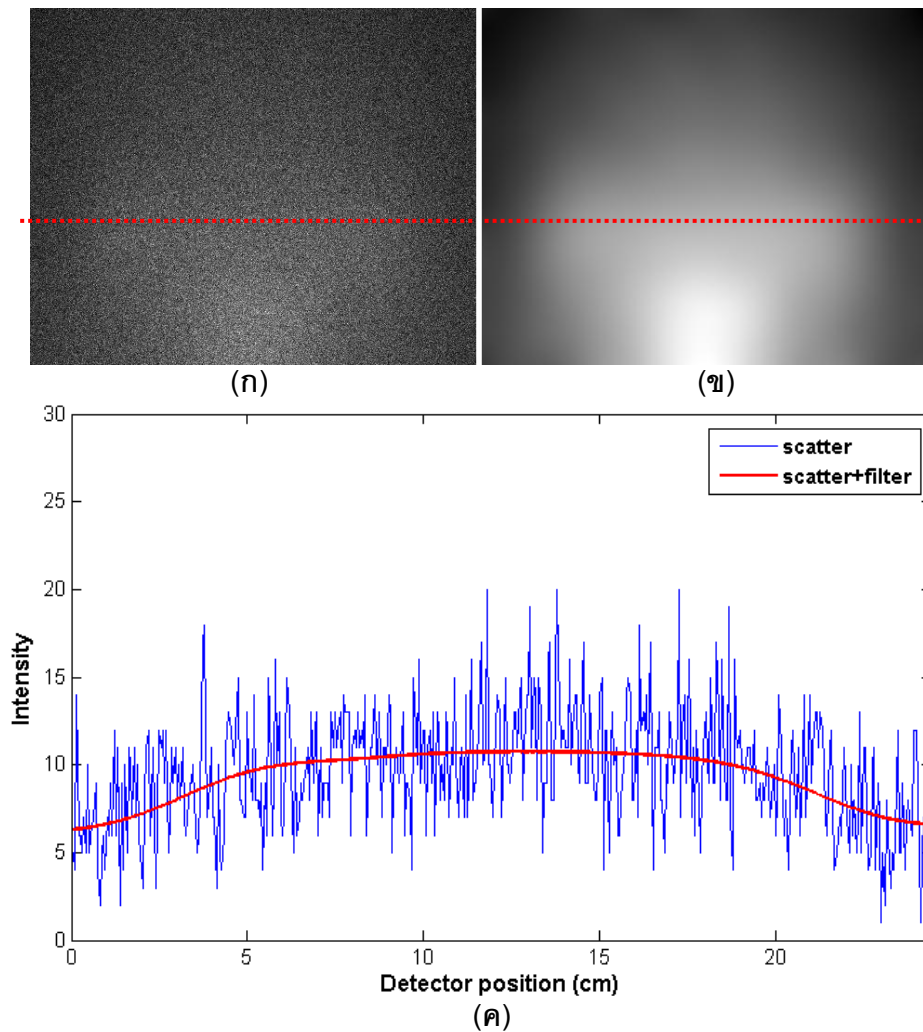
รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว (ก) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี (ข) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และ (ค) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพ

ตัวอย่างภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่ใส่วัสดุอื่นอยู่ภายในทั้งก่อนและหลังจากผ่านการกรอง สำหรับข้อมูลส่วนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมี่ลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.13 (ก) และรูปที่ 5.13 (ข) และตัวอย่างภาพโปรเจกชันที่เลือกพิจารณาเฉพาะข้อมูลส่วนรังสีเอกซ์กระเจิงมีลักษณะดังรูปที่ 5.14 (ก) และรูปที่ 5.14 (ข) โดยจากการพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์บนภาพ ดังรูปที่ 5.13 (ค) และรูปที่ 5.14 (ค) พบว่า ข้อมูลหลังจากผ่านการกรองแล้วจะเห็นรายละเอียดต่าง ๆ ได้ชัดเจนขึ้นเนื่องจากมีความแปรปรวนของข้อมูลลดลง แต่ทว่าความคมชัดในภาพจะลดลงด้วย





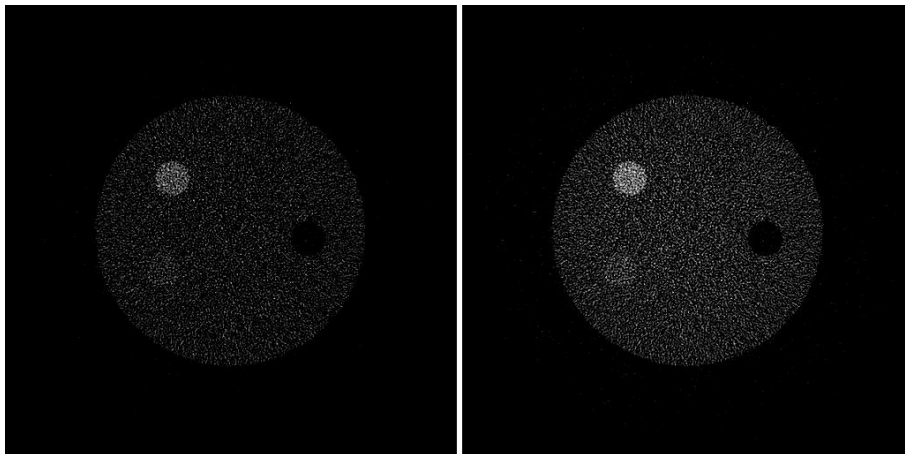
รูปที่ 5.13 ภาพโปรเจคชันของรังสีเอกซ์ปัฐมภูมิ ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน (ก) ภาพก่อนการกรองข้อมูล (ข) ภาพหลังการกรองข้อมูล และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี



รูปที่ 5.14 ภาพโปรเจกชันของรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งได้จากการจำลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน (ก) ภาพก่อนการกรองข้อมูล (ข) ภาพหลังการกรองข้อมูล และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี

ภาพตัดขวางของไนลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในซึ่งคำนวณสร้างขึ้นจากข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการจำลอง สำหรับข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.15 โดยภาพที่ได้จะมีความแปรปรวนปรากฏอยู่บนภาพมากจนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างรูปที่ 5.15 (ก) ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลรวมระหว่างรังสีเอกซ์ปฐุมภูมิและรังสีเอกซ์กระเจิง และรูปที่ 5.15 (ข) ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลเฉพาะส่วนรังสีเอกซ์ปฐุมภูมิได้ ในส่วนของภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้ว มีลักษณะดังรูปที่ 5.16 (ก) และรูปที่ 5.16 (ข) ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางทั้งสองเป็นไปดังรูปที่ 5.16 (ค) โดยพบว่า ในภาพที่

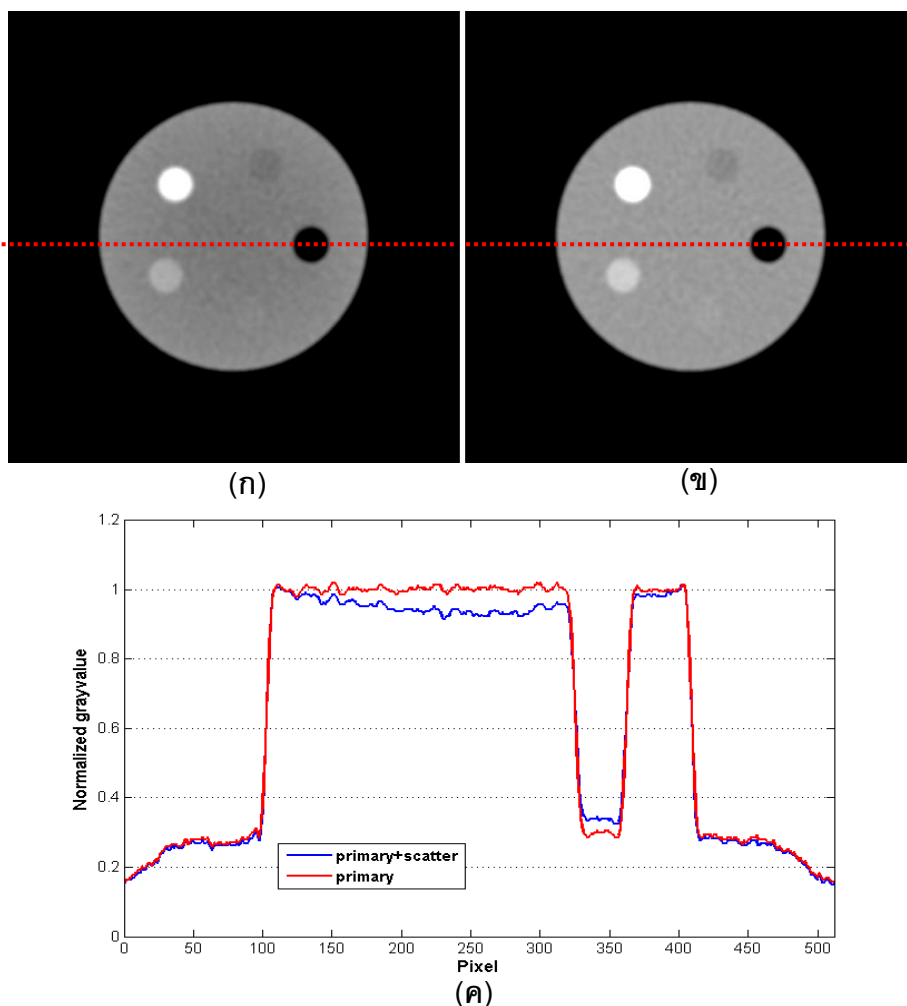
สร้างขึ้นจากข้อมูลรวมระหว่างรังสีปฐมภูมิและรังสีกระเจิงจะมีความไม่สม่ำเสมอของค่าเกรย์สเกลเกิดขึ้น เห็นได้ชัดจากที่บริเวณกลางภาพจะมีเฉดสีที่มืดกว่าบริเวณอื่น ขณะที่ค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นจากข้อมูลเฉพาะส่วนรังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะมีความสม่ำเสมอดีกว่า นอกจากนี้ หากพิจารณาเทียบกันระหว่างรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 จะพบว่า ในรูปที่ 5.15 มีวัสดุบางชนิดที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของเฉดสีบนภาพได้เมื่อเทียบกับบริเวณที่เป็นไนลอน ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นวัสดุชนิดนั้นได้ในภาพตัดขวางนี้ ในขณะที่ภาพตัดขวางจากข้อมูลที่ผ่านการกรองแล้วสามารถแยกแยะให้เห็นได้ชัดเจนกว่า แต่ความคมชัดภายในภาพจะลดลง



(ก)

(ข)

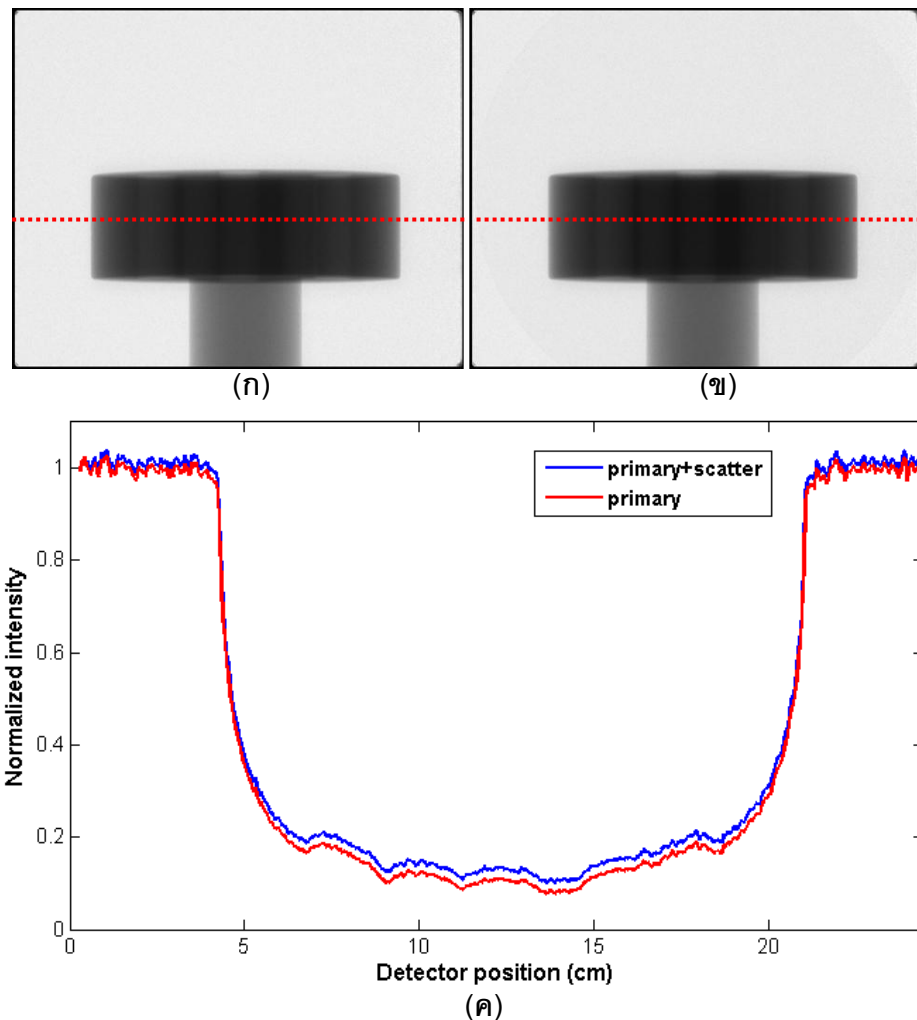
รูปที่ 5.15 ภาพตัดขวางของวัตถุไนลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในที่ได้จากการจำลอง โดย (ก) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี และ (ข) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ



รูปที่ 5.16 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในที่ได้จากการจำลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว (ก) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ตกลงบนเครื่องวัดรังสี (ข) สร้างขึ้นจากข้อมูลของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ และ (ค) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพ

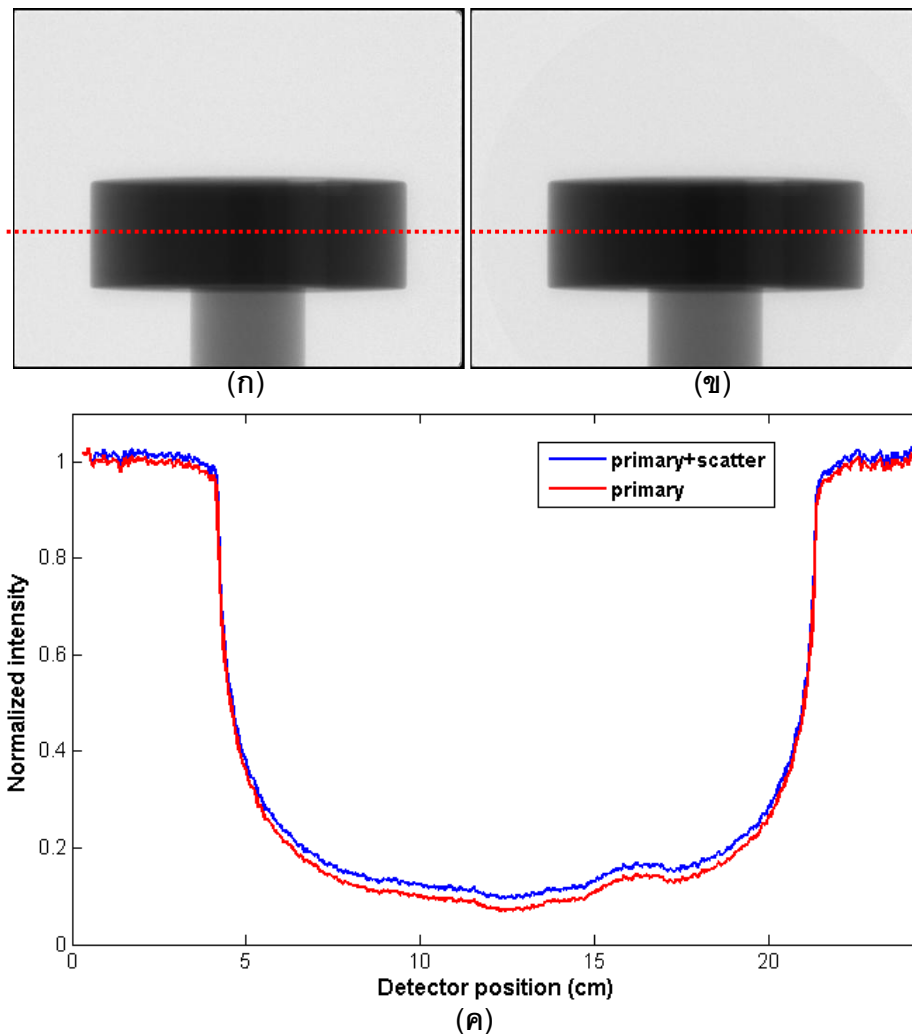
### 5.5 ผลการปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงบนภาพโปรเจคชันจากการทดลอง

ภาพโปรเจคชันแต่ละภาพที่ได้จากการถ่ายภาพโดยใช้ระบบถ่ายภาพตัดขวางของสวทช. จะถูกนำมาปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงโดยนำผลจากการจำลองที่ผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้วมาใช้ในการปรับปรุง ตัวอย่างภาพโปรเจคชันของวัตถุในลอนก่อนและหลังการลดผลของรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพ มีลักษณะดังรูปที่ 5.17 ซึ่งจากการพิจารณาที่ภาพโปรเจคชันดังรูปที่ 5.17 (ก) และรูปที่ 5.17 (ข) อาจไม่เห็นความแตกต่างของทั้งสองรูป แต่หากพิจารณาที่ความเข้มของรังสีเอกซ์บนภาพ ดังรูปที่ 5.17 (ค) จะพบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์หลังจากผ่านการปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงแล้ว จะมีปริมาณที่ลดลงจากเดิม



รูปที่ 5.17 ภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอน (ก) ก่อนลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง (ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี

ตัวอย่างภาพโปรเจกชันของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายในก่อนและหลังผ่านการปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพ มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.18 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ภาพโปรเจกชันดังรูปที่ 5.18 (ก) และ 5.18 (ข) จะไม่พบความแตกต่างของทั้งสองภาพเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มของรังสีเอกซ์บนภาพ ดังรูปที่ 5.18 (ค) พบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์หลังจากผ่านการปรับลดรังสีเอกซ์กระเจิงแล้ว จะมีปริมาณที่ลดลงจากเดิม



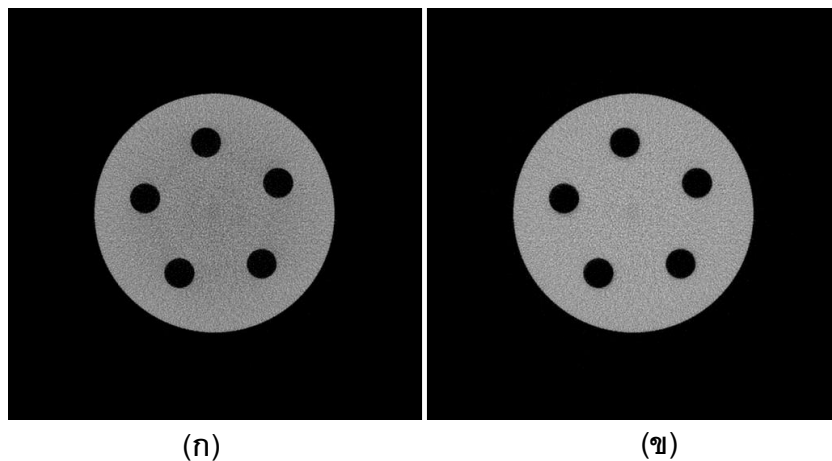
รูปที่ 5.18 ภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน (ก) ก่อนลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง (ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง และ (ค) เปรียบเทียบความเข้มของรังสี

## 5.6 ผลการคำนวณสร้างภาพตัดขวางจากการทดลอง

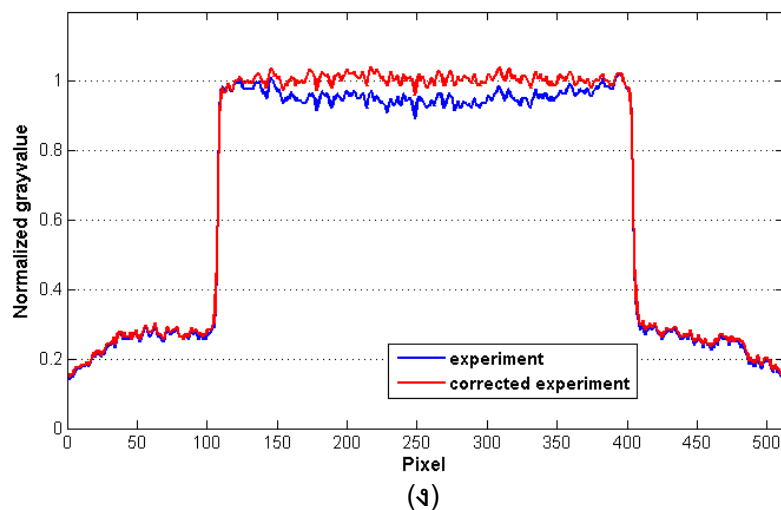
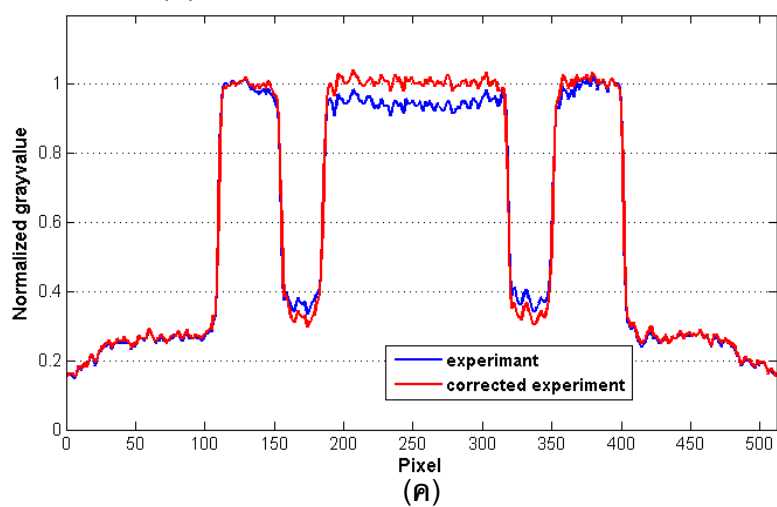
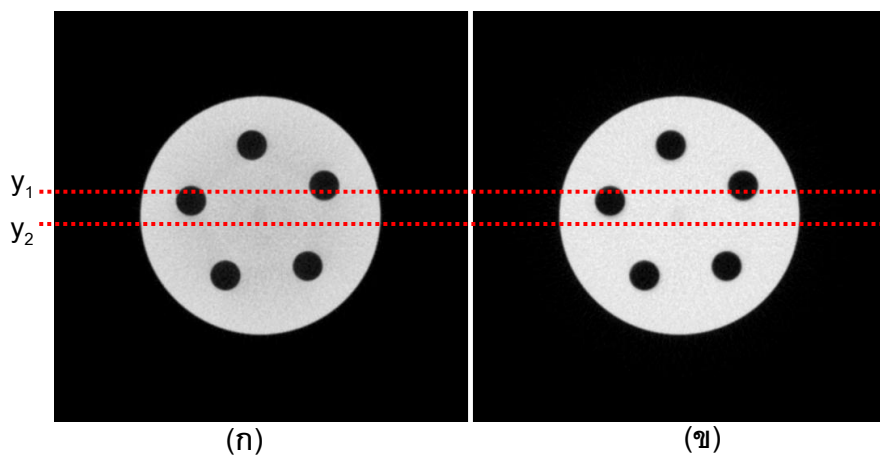
### 5.6.1 ผลการคำนวณสร้างภาพตัดขวางของวัสดุในลอน

เมื่อนำข้อมูลภาพโปรเจกชันที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสร้างภาพตัดขวาง พบว่าภาพตัดขวางของวัตถุในลอนทั้งก่อนและหลังผ่านการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง มีลักษณะดังรูปที่ 5.19 นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลและทำการคำนวณหาปริมาณ cupping บนภาพตัดขวางทั้งก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการพิจารณา จะทำการวิเคราะห์ห้ข้อมูลจากภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลการทดลองที่ผ่านการ

กรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้วดังรูปที่ 5.20 (ก) และรูปที่ 5.20 (ข) ผลการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง เป็นไปดังรูปที่ 5.20 (ค) และรูปที่ 5.20 (ง) ซึ่งพบว่า ค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางของวัตถุในลอนก่อนการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงจะมีความไม่สม่ำเสมอ โดยที่บริเวณช่วงกลางวัตถุจะมีค่าลดลงจากบริเวณขอบอย่างชัดเจน ขณะที่ค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ผ่านการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงแล้วจะมีความสม่ำเสมอกว่า และจากการคำนวณหาปริมาณ cupping ที่เกิดขึ้นในภาพ พบว่าปริมาณ cupping ในภาพตัดขวางก่อนการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงมีค่าเท่ากับ 7.7% และปริมาณ cupping ในภาพตัดขวางหลังผ่านการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงแล้วมีค่าเท่ากับ 0.1% จะเห็นว่าปริมาณ cupping ในภาพตัดขวางมีการลดลงจนเกือบหมด



รูปที่ 5.19 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการทดลอง (ก) ก่อน และ (ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง

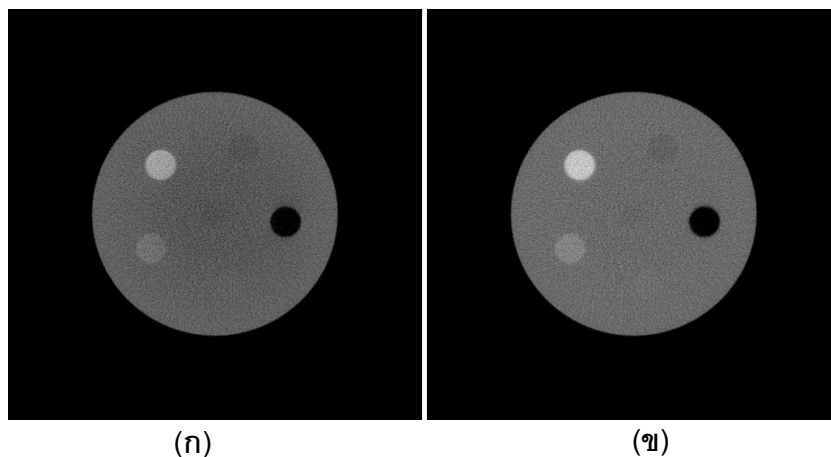


รูปที่ 5.20 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่ได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว (ก) ก่อน และ (ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง (ค) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_1$  และ (ง) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_2$

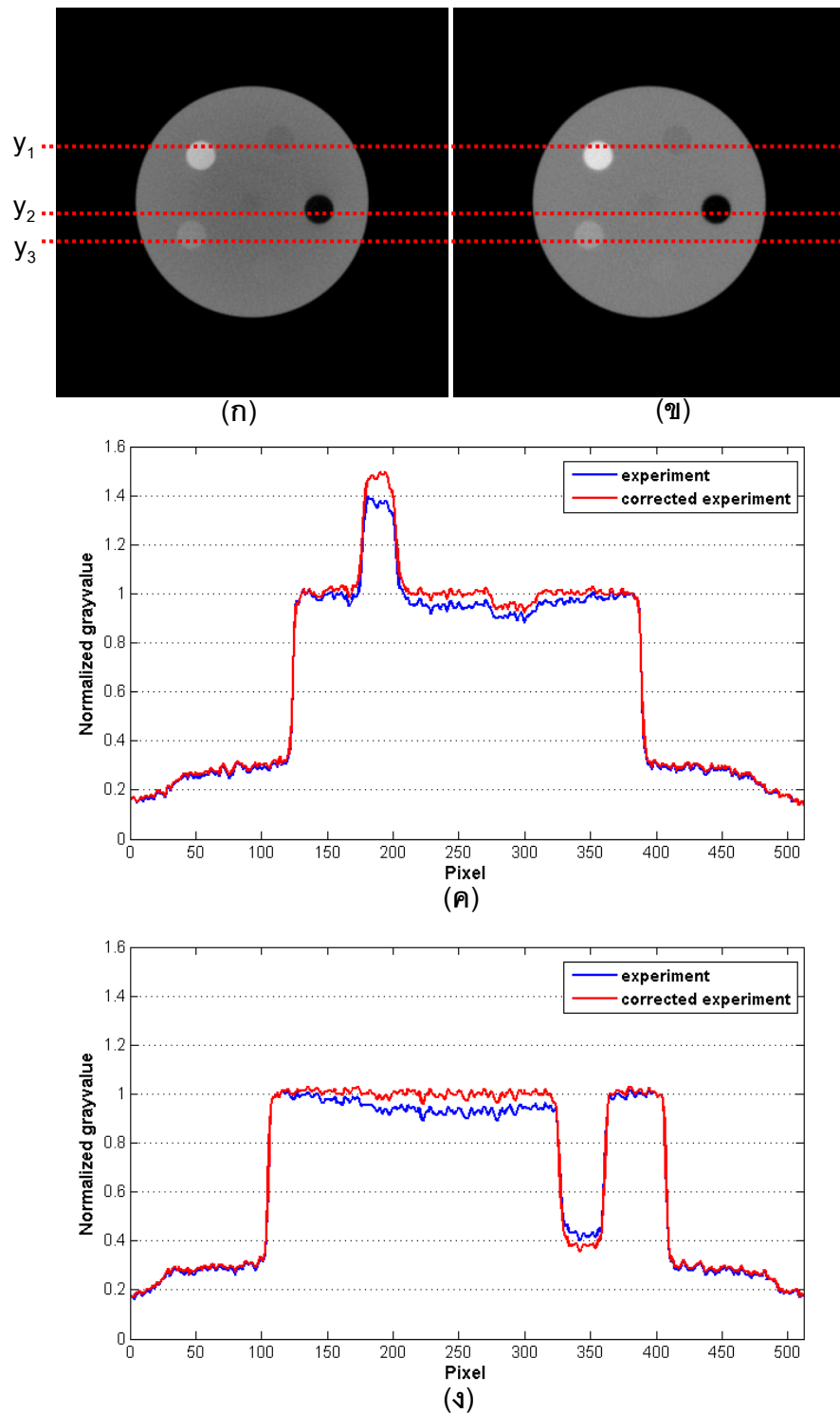


### 5.6.2 ผลการคำนวณสร้างภาพตัดขวางของวัสดุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายใน

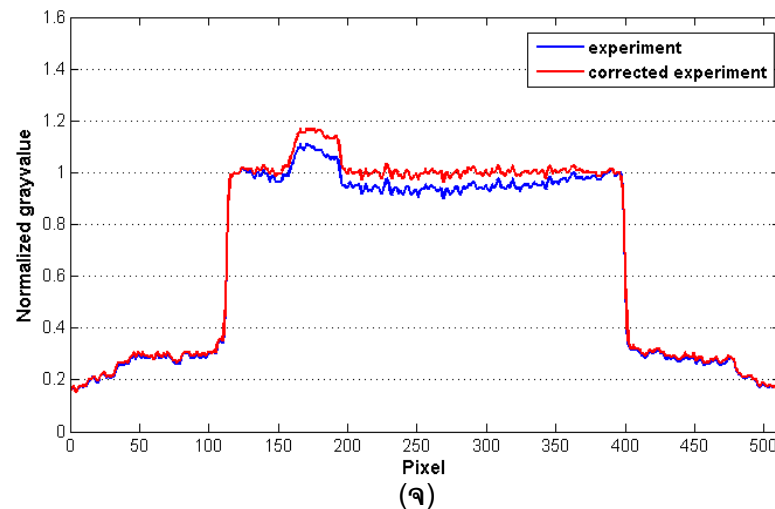
สำหรับภาพตัดขวางที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่น ๆ อยู่ภายในทั้งก่อนและหลังผ่านการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง พบว่า มีลักษณะเป็นไปดังรูปที่ 5.21 นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลและทำการคำนวณหาปริมาณ cupping บนภาพตัดขวางทั้งก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงในภาพ ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพตัดขวางที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลการทดลองที่ผ่านการกรองด้วย Gaussian lowpass filter แล้วดังรูปที่ 5.22 (ก) และรูปที่ 5.22 (ข) ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง เป็นไปดังรูปที่ 5.22 (ค), รูปที่ 5.22 (ง) และรูปที่ 5.22 (จ) ซึ่งพบว่า ค่าเกรย์สเกลบนภาพตัดขวางในบริเวณที่เป็นวัสดุในลอนหลังทำการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงแล้วมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งวัตถุมากกว่า นอกจากนี้ในภาพที่ผ่านการลดผลจากรังสีกระเจิงแล้วนั้น เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าเกรย์สเกลของวัสดุอื่นที่นำมาใส่เปรียบเทียบกับในลอนที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน จะพบว่า สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างสองบริเวณได้ดีขึ้น และจากการคำนวณหาปริมาณ cupping ที่เกิดขึ้นในภาพ พบว่า ปริมาณ cupping ในภาพตัดขวางก่อนการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงมีค่าเท่ากับ 8.9% และปริมาณ cupping ในภาพตัดขวางหลังจากลดผลจากการกระเจิงแล้วมีค่าเท่ากับ 0.8%



รูปที่ 5.21 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายในซึ่งได้จากการทดลอง (ก) ก่อน และ (ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง

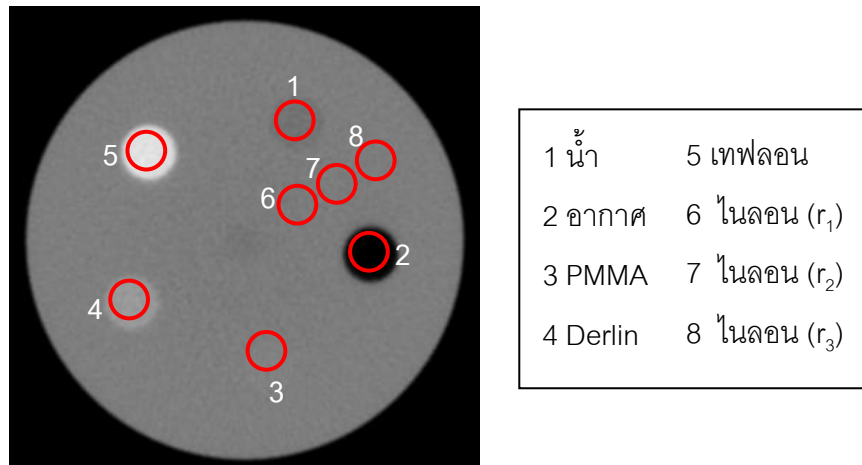


รูปที่ 5.22 ภาพตัดขวางของวัตถุในลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายใน ซึ่งได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว (ก) ก่อนและ(ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง (ค) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_1$ , (ง) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_2$  และ (จ) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_3$



รูปที่ 5.22 ภาพตัดขวางของวัตถุไนลอนที่มีวัสดุอื่นอยู่ภายใน ซึ่งได้จากการทดลอง โดยข้อมูลผ่านการกรองแล้ว (ก) ก่อนและ(ข) หลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง (ค) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_1$ , (ง) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_2$  และ (จ) เปรียบเทียบค่าเกรย์สเกลบนภาพที่ตำแหน่ง  $y_3$  (ต่อ)

จากการคำนวณค่าเลขซีทีของแต่ละวัสดุบนภาพตัดขวาง โดยเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเกรย์สเกลที่อยู่ภายในบริเวณพื้นที่ที่สนใจดังรูปที่ 5.23 มาทำการคำนวณดังสมการที่ (3.5) ค่าที่คำนวณได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเลขซีทีของวัสดุที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากฐานข้อมูลของ NIST [17] ที่ค่าพลังงาน 64.3 keV ซึ่งเป็นค่าพลังงานยังผลของสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ใช้ พบว่า ค่าเลขซีทีที่ได้ในแต่ละวัสดุมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 5.1 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดค่าเฉลี่ยของค่าเกรย์สเกลในแต่ละวัสดุเป็นไปตามตารางที่ 5.2 โดยจากตารางที่ 5.1 พบว่า เลขซีทีหลังจากทำการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงแล้ว จะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเลขซีทีก่อนการลดผลจากรังสีกระเจิง และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าจากฐานข้อมูล พบว่า ภาพตัดขวางที่ผ่านการลดผลจากรังสีกระเจิงแล้วจะมีค่าเลขซีทีที่ใกล้เคียงกับค่าจากฐานข้อมูลมากขึ้น แต่มีเพียง PMMA ที่ผลก่อนและหลังการปรับปรุงภาพยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PMMA มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับไนลอน ประกอบกับมีขนาดเล็กกว่าจึงได้รับผลจากการกระเจิงของรังสีที่น้อยกว่า ทำให้อาจไม่เห็นถึงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการลดผลจากการกระเจิงได้ชัดเจน



รูปที่ 5.23 บริเวณที่ใช้ในการศึกษาค่าเลขชี้ที่บนภาพตัดขวาง

ตารางที่ 5.1 ค่าเลขชี้ที่บนภาพตัดขวางก่อนและหลังการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิง

| ชื่อวัสดุ       | เลขชี้ที่จากฐานข้อมูล | ภาพจากการทดลอง                            |                               |                                           |                               |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|
|                 |                       | เลขชี้ที่จากภาพก่อนการลดผลจากรังสีกระเจิง | %คลาดเคลื่อนเทียบกับฐานข้อมูล | เลขชี้ที่จากภาพหลังการลดผลจากรังสีกระเจิง | %คลาดเคลื่อนเทียบกับฐานข้อมูล |
| น้ำ             | 0.00                  | 0.00                                      | -                             | 0.00                                      | -                             |
| อากาศ           | -1000.00              | -1000                                     | -                             | -1000                                     | -                             |
| PMMA            | 110.46                | 124.30                                    | 12.53                         | 125.06                                    | 13.22                         |
| Derlin          | 338.23                | 319.60                                    | 5.51                          | 333.09                                    | 1.52                          |
| เทฟลอน          | 990.86                | 885.78                                    | 10.61                         | 965.13                                    | 2.60                          |
| ไนลอน ( $r_1$ ) | 68.03                 | 36.08                                     | 46.96                         | 75.75                                     | 11.34                         |
| ไนลอน ( $r_2$ ) |                       | 53.52                                     | 21.33                         | 80.55                                     | 18.39                         |
| ไนลอน ( $r_3$ ) |                       | 91.47                                     | 34.45                         | 84.97                                     | 24.89                         |

ตารางที่ 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดค่าเกรย์สเกล

| ชื่อวัสดุ       | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน               |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                 | ภาพก่อนการลดผล<br>จากรังสีกระเจิง | ภาพหลังการลดผล<br>จากรังสีกระเจิง |
| น้ำ             | 1.854                             | 1.730                             |
| อากาศ           | 2.038                             | 1.823                             |
| PMMA            | 1.665                             | 1.621                             |
| Derlin          | 2.189                             | 1.915                             |
| เทฟลอน          | 2.422                             | 1.833                             |
| ไนลอน ( $r_1$ ) | 1.962                             | 1.868                             |
| ไนลอน ( $r_2$ ) | 1.693                             | 1.726                             |
| ไนลอน ( $r_3$ ) | 1.733                             | 1.544                             |

## บทที่ 6

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำ Geant4 ซึ่งเป็นชุดคำสั่งสำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในวัสดุชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีมอนติคาร์โลมาใช้ในการจำลองระบบถ่ายภาพตัดขวางสำหรับงานทางทันตกรรมที่ทางสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) พัฒนาขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการจำลองเพื่อศึกษาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในวัสดุและนำผลการศึกษามาใช้ปรับลดผลจากการกระเจิงที่มีต่อภาพตัดขวาง ในการจำลองจะใช้การเขียนโปรแกรมแยกวัดรังสีเอกซ์ที่ตกลงบนบริเวณเครื่องวัดรังสี โดยแบ่งรังสีออกเป็นสองส่วน คือ รังสีเอกซ์ปฐมภูมิและรังสีเอกซ์กระเจิง ซึ่งผลการศึกษาเป็นไปดังนี้

จากการทดสอบการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชัน เมื่อพิจารณาข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์พบว่า การที่มีรังสีเอกซ์กระเจิงตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสีจะทำให้ปริมาณความเข้มที่เครื่องวัดรังสีวัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ โดยหากพิจารณาที่ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิง พบว่า ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงมีลักษณะค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ นอกจากนี้ในกรณีถ่ายภาพวัตถุที่ภายในประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด ความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่จำลองได้ยังคงมีลักษณะเช่นเดิม ทำให้ไม่สามารถแบ่งแยกได้ชัดเจนว่าบริเวณใดตรงกับตำแหน่งวัสดุใด ซึ่งแตกต่างจากความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของลักษณะความเข้มได้ชัดเจนกว่า สำหรับการพิจารณาสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิเทียบกับสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านเข้าวัตถุพบว่า พลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์หลังจากผ่านวัตถุมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าในการถ่ายภาพโปรเจกชันนี้ เกิดปรากฏการณ์ความกระด้างของลำรังสีเอกซ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าพลังงานยังผลของลำรังสีเอกซ์ที่เพิ่มค่าค่อนข้างสูงประกอบกับขนาดของวัตถุที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพมีขนาดเล็ก ในขณะที่พลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์ที่เกิดการกระเจิงภายในวัตถุมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับพลังงานเฉลี่ยของรังสีเอกซ์ก่อนผ่านเข้าวัตถุ

จากการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของขนาดวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ภายในวัตถุที่ใช้ในการถ่ายภาพ โดยในที่นี้เลือกใช้วัตถุที่ทำมาจากวัสดุไนลอน 6,6 พบว่า การเพิ่มขนาดของวัสดุอื่นที่อยู่ภายในไนลอนมีผลทำให้ปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิงเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจาก

ผลการทดสอบก่อนหน้าพบว่าความเข้มของรังสีกระเจิงมีลักษณะค่อนข้างเรียบเมื่อเทียบกับรังสีเอกซ์ปฐมภูมินั้น แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดวัสดุชนิดอื่นที่อยู่ภายในวัตถุในลอนแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงเลยเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบนี้ได้ทดลองเพิ่มขนาดของวัสดุภายในขึ้นจากเดิมในระดับไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

จากการเปรียบเทียบผลระหว่างข้อมูลความเข้มที่ได้จากการจำลองและข้อมูลความเข้มที่ได้จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดในลอน 6,6 พบว่า ข้อมูลความเข้มที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกันดี มีค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดลองส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกินค่า 0.02 โดยที่บริเวณขอบของวัตถุจะมีค่าผลต่างที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้คาดว่าเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการจัดวางระบบ ความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการจำลอง ความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการวัดรังสีของเครื่องวัดรังสีในการทดลองจริง รวมไปถึงการละผลที่เกิดจากขนาดพื้นที่ของจุดโฟกัสของรังสีเอกซ์ในการจำลองด้วย

ในการลดการรบกวนบนภาพตัดขวางที่ได้จากการทดลอง ได้นำข้อมูลภาพโปรเจกชันจากการจำลองมาคำนวณหาสัดส่วนระหว่างรังสีเอกซ์ปฐมภูมิกับรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ผ่านออกจากวัตถุ และตกเข้าสู่เครื่องวัดรังสี แล้วนำสัดส่วนที่ได้มาใช้ในการปรับลดการกระเจิงในภาพโปรเจกชันจากการทดลอง โดยในงานวิจัยส่วนนี้ใช้วัตถุในลอนที่ภายในเป็นรูอากาศและวัตถุในลอนที่ภายในใส่วัสดุชนิดอื่น ๆ ในการถ่ายภาพ เมื่อนำภาพโปรเจกชันจากการทดลองที่ผ่านการปรับลดการกระเจิงแล้วมาคำนวณสร้างภาพตัดขวาง พบว่า ภาพตัดขวางที่ได้มีปริมาณ cupping ลดลงจนเกือบหมด โดยปริมาณ cupping ที่ยังคงเหลืออยู่อาจเป็นผลมาจากความแปรปรวนของข้อมูลในการคำนวณค่า รวมถึงอาจเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ความกระด้างของลำรังสีเอกซ์ และจากการพิจารณาเลขซีทีของวัสดุต่าง ๆ บนภาพตัดขวางเปรียบเทียบกับเลขซีทีของวัสดุที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากฐานข้อมูล NIST พบว่า เลขซีทีของแต่ละวัสดุบนภาพที่ผ่านการลดผลจากรังสีเอกซ์กระเจิงแล้ว ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากฐานข้อมูลมากขึ้น ทว่าบางส่วนยังคงมีความคลาดเคลื่อนที่มากอยู่ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าพลังงานยังผลที่นำมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากฐานข้อมูล ซึ่งใช้ค่าพลังงานที่คำนวณได้จากโปรแกรม SpekClac แต่ในความจริง ค่าพลังงานยังผลของสเปกตรัมที่ใช้ในการถ่ายภาพอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากการคำนวณ

นอกจากนี้อาจเกิดจากความแปรปรวนของค่าเกเรย์สเกลในบริเวณที่ทำการวัด และอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการสร้างภาพตัดขวางอีกด้วย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้การจำลอง โดยในการจำลองถ่ายภาพที่ใช้ปริมาณรังสีเอกซ์  $3 \times 10^8$  อนุภาค จะใช้ระยะเวลาจำลองถึง 3-4 ชม. ทั้งนี้เวลาในการจำลองขึ้นอยู่กับรายละเอียดที่กำหนดในแบบจำลอง เช่น จำนวนวัตถุที่กำหนดในการจำลอง ปริมาณรังสีที่ใช้ เงื่อนไขต่าง ๆ ในการวัดปริมาณที่สนใจ เป็นต้น แม้ว่าจะใช้การกรองด้วย Gaussian lowpass filter เพื่อช่วยในการลดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ใช้ แต่การกรองข้อมูลนั้นอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของระยะต่าง ๆ บนภาพตัดขวาง อีกทั้งในกรณีที่จำลองถ่ายภาพวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้น อาจส่งผลให้รายละเอียดของข้อมูลบางส่วนหายไปด้วย ดังนั้นจึงควรหาแนวทางปรับปรุงแก้ไขในส่วนนี้ โดยอาจปรับแก้เงื่อนไขต่าง ๆ ในโปรแกรมให้มีความรัดกุมขึ้น รวมไปถึงการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประมวลผลแบบขนาน โดยอาจต้องใช้ร่วมกับไลบรารีอื่น เช่น TOP-C เป็นต้น

เนื่องจากวัตถุที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นวัตถุที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมาก จึงสามารถใช้คลาสที่มีอยู่ใน Geant4 จำลองสร้างได้โดยตรง แต่ในการใช้งานจริง วัตถุที่ใช้อาจมีรูปร่างที่ซับซ้อน หรืออาจไม่สามารถสร้างได้โดยใช้คลาสของวัตถุที่มีอยู่ใน Geant4 ดังนั้นอาจจำเป็นต้องทดสอบการจำลองถ่ายภาพโดยใช้การนำเข้าไฟล์วัตถุประเภทอื่น ๆ ด้วย

การจำลองในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการถ่ายภาพจริง รังสีเอกซ์อาจมีการกระเจิงไปในบริเวณอื่นข้างเคียง เช่น บริเวณระบบที่ใช้ในการถ่ายภาพ บริเวณกำแพง เป็นต้น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของระบบถ่ายภาพจริง นอกจากนี้ยังใช้การประมาณจุดโฟกัสของรังสีเอกซ์ให้เป็นแบบจุด และใช้เครื่องวัดรังสีแบบอุดมคติในการจำลอง ซึ่งอาจเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้การทำข้อมูลให้เป็นบรรทัดฐานก่อนนำมาใช้วิเคราะห์ผลอาจช่วยลดปัญหานี้ได้ส่วนหนึ่ง

เนื่องจากข้อมูลความเข้มของรังสีเอกซ์กระเจิงที่ได้มีลักษณะค่อนข้างเรียบและไม่สามารถแบ่งแยกระหว่างวัสดุภายในได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนขนาดของวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ภายในวัตถุยังไม่ค่อยส่งผลต่อปริมาณการกระเจิง ดังนั้นใน



การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการถ่ายภาพตัดขวางทางทันตกรรม จึงอาจใช้การจำลองถ่ายภาพวัตถุที่มีรูปทรงและคุณลักษณะใกล้เคียงกับศีรษะจริง และนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในการปรับลดปริมาณรังสีเอกซ์กระเจิง ทั้งนี้อาจต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในกรณีที่เลือกใช้ชนิดของวัสดุภายในที่มีความหนาแน่นสูงและกรณีที่ว่าวัตถุทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของขนาดศีรษะที่มีต่อปริมาณรังสีกระเจิงด้วย โดยหากขนาดของศีรษะส่งผลต่อปริมาณการกระเจิงมาก ในการประยุกต์ใช้งานจริงอาจต้องทำการจำลองถ่ายภาพวัตถุศีรษะในขนาดต่าง ๆ กันเพื่อเก็บข้อมูลของแต่ละขนาดมาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานต่อไป

## รายการอ้างอิง

- [1] Miceli, A., et al. Monte Carlo simulations of a high-resolution X-ray CT system for industrial applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 583 (2007) : 313-323.
- [2] Reitz, I. Development and evaluation of a method for scatter correction in kV Cone Beam Computer Tomography. Doctoral dissertation, Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics, Ruperto-Carola University of Heidelberg, 2008.
- [3] Kyriakou, Y. and Kalender, W. A. X-ray scatter data for flat-panel detector CT. Physica Medica 23 (2007) : 3-15.
- [4] Jarry, G., et al. Characterization of scattered radiation in kV CBCT images using Monte Carlo simulations. Medical Physics 33(11) (2006) : 4320-4329.
- [5] Smith, N.B. and Webb, A.W. Introduction to Medical Imaging: Physics, Engineering and Clinical Applications. New York, USA : Cambridge University Press, 2011.
- [6] Bushberg, J.T., Seibert, J.A., Leidholdt, E.M., and Boone J.M. The Essential Physics of Medical Imaging. 2<sup>nd</sup> edition. USA : Lippincott Williams & Wilkins Publishers, 2002.
- [7] Buzug, T.M. Computed Tomography From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. Leipzig, Germany : Springer-Verlag, 2008.
- [8] Seibert, J. A. and Boone, J. M. X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 2: X-ray interactions and image formation. Journal of Nuclear Medicine Technology 33(1) (2005) : 3-18.
- [9] Hsieh, J. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. 2<sup>nd</sup> edition. Bellingham, Washington : SPIE Press, 2009.
- [10] Scarfe, W.C., and Farman, A.G. What is Cone-Beam CT and How Does it Work?. Dental Clinics of North America 52 (2008) : 707-730.

- [11] Johansen, A. M. and Evers, L. Monte Carlo Methods Lecture notes. [Online] 2007.  
Available from: <http://www.maths.bris.ac.uk/~manpw/teaching/notes.pdf> [2011, April 14]
- [12] Morin, R. L. Monte Carlo Simulation in the Radiological Sciences. Florida : CRC Press, 1988.
- [13] Agostinelli, S., et al. GEANT4—a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 506(3) (2003) : 250-303.
- [14] Allison, J., et al. Geant4 Developments and Applications. IEEE Transactions on Nuclear Science 53(1) (2006) : 270-278.
- [15] Ferguson, C. General purpose Source Particle Module for Geant4/SPARSET: Technical Note, UoS-GSPM-Tech 1.1 (2000).
- [16] Poludniowski, G., Landry, G., DeBlois, F., Evans, P. M., and Verhaegen, F.  
SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. Physics in Medicine and Biology 54 (2009) : N433-N438.
- [17] Chantler, C. T., et al. X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering Tables  
[Online]. 2005. Available from : <http://www.nist.gov/pml/data/ffast/index.cfm>  
[2013, February 19]

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพ

## 1. Main Program

## 1.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจคชัน

```

#include "G4RunManager.hh"
#include "G4UImanager.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayPhysicsListPenelope.hh"
#include "XrayPrimaryGeneratorAction.hh"
#include "XraySteppingAction.hh"
#include "XrayEventAction.hh"
#include "XrayRunAction.hh"

#ifdef G4VIS_USE
#include "G4VisExecutive.hh"
#endif

#ifdef G4UI_USE
#include "G4UIExecutive.hh"
#endif

int main(int argc, char** argv)
{
    CLHEP::HepRandom::setTheSeed(8358);

    // Construct the run manager
    G4RunManager * runManager = new G4RunManager;

    // Set mandatory initialization classes
    XrayDetectorConstruction* detector = new XrayDetectorConstruction;
    runManager->SetUserInitialization(detector);

    G4VUserPhysicsList* physics = new XrayPhysicsListPenelope;
    runManager->SetUserInitialization(physics);

    // Set user action classes
    G4VUserPrimaryGeneratorAction* gen_action = new XrayPrimaryGeneratorAction;
    runManager->SetUserAction(gen_action);

    G4UserRunAction* run_action = new XrayRunAction;
    runManager->SetUserAction(run_action);

    XrayEventAction* event_action = new XrayEventAction;
    runManager->SetUserAction(event_action);

    G4UserSteppingAction* stepping_action = new XraySteppingAction(detector,
event_action);
    runManager->SetUserAction(stepping_action);

    #ifdef G4VIS_USE
    // Visualization manager
    G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;
    visManager->Initialize();
    #endif

    // Initialize G4 kernel
    runManager->Initialize();

```

```

// Get the pointer to the User Interface manager
G4UImanager* UImanager = G4UImanager::GetUIpointer();
if (argc==1) // Define UI session for interactive mode
{
    #ifdef G4UI_USE
        G4UIExecutive* ui = new G4UIExecutive(argc, argv);
    #ifdef G4VIS_USE
        UImanager->ApplyCommand("/control/execute vis.mac");
    #endif
        ui->SessionStart();
        delete ui;
    #endif
}
else // Batch mode
{
    G4String command = "/control/execute ";
    G4String fileName = argv[1];
    UImanager->ApplyCommand(command+fileName);
}

#ifdef G4VIS_USE
    delete visManager;
#endif
delete runManager;
return 0;
}

```

## 1.2 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจกชันรอบวัตถุ

```

#include "G4RunManager.hh"
#include "G4UImanager.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayPhysicsListPenelope.hh"
#include "XrayPrimaryGeneratorAction.hh"
#include "XraySteppingAction.hh"
#include "XrayEventAction.hh"
#include "XrayRunAction.hh"

#ifdef G4VIS_USE
#include "G4VisExecutive.hh"
#endif

#ifdef G4UI_USE
#include "G4UIExecutive.hh"
#endif

int main(int argc, char** argv)
{
    CLHEP::HepRandom::setTheSeed(8358);

    // Construct the run manager
    G4RunManager * runManager = new G4RunManager;

    // Set mandatory initialization classes
    XrayDetectorConstruction* detector = new XrayDetectorConstruction;
    runManager->SetUserInitialization(detector);

    G4VUserPhysicsList* physics = new XrayPhysicsListPenelope;
    runManager->SetUserInitialization(physics);

    // Set user action classes
    G4VUserPrimaryGeneratorAction* gen_action = new XrayPrimaryGeneratorAction;
    runManager->SetUserAction(gen_action);
}

```

```

XrayRunAction* run_action = new XrayRunAction;
runManager->SetUserAction(run_action);

XrayEventAction * event_action = new XrayEventAction(detector, run_action);
runManager->SetUserAction(event_action);

G4UserSteppingAction* stepping_action = new XraySteppingAction(detector,
event_action);
runManager->SetUserAction(stepping_action);

#ifdef G4VIS_USE
// Visualization manager
G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;
visManager->Initialize();
#endif

// Initialize G4 kernel
runManager->Initialize();

// Get the pointer to the User Interface manager
G4UImanager* UImanager = G4UImanager::GetUIpointer();
if (argc==1) // Define UI session for interactive mode
{
#ifdef G4UI_USE
G4UIExecutive* ui = new G4UIExecutive(argc, argv);
#endif
#ifdef G4VIS_USE
UImanager->ApplyCommand("/control/execute vis.mac");
#endif
ui->SessionStart();
delete ui;
#endif
}
else // Batch mode
{
G4String command = "/control/execute ";
G4String fileName = argv[1];
UImanager->ApplyCommand(command+fileName);
}

#ifdef G4VIS_USE
delete visManager;
#endif
delete runManager;
return 0;
}

```

## 2. XrayDetectorConstruction

### 2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจคชั่น

#### 2.1.1 XrayDetectorConstruction.hh

```

#ifndef XrayDetectorConstruction_h
#define XrayDetectorConstruction_h 1
#include "G4UserDetectorConstruction.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"

class G4VPhysicalVolume;
class G4Material;
class XrayDetectorConstruction : public G4UserDetectorConstruction

```

```

{
public:
  XrayDetectorConstruction();
  virtual ~XrayDetectorConstruction();
public:
  virtual G4VPhysicalVolume* Construct();
  const G4VPhysicalVolume* GetWorld() {return worldPhys;};
  const G4VPhysicalVolume* GetDetector() {return platePhys;};
  const G4VPhysicalVolume* GetCollimator() {return colPhys;};
  G4double GetboundDetZpre() {return (detPosition.z()+detectorZ);};
private:
  void DefineMaterials();
  void SetupGeometry();
private:
  G4Material* air;
  G4Material* water;
  G4Material* vacuum;
  G4Material* lead;
  G4VPhysicalVolume* worldPhys;
  G4VPhysicalVolume* platePhys;
  G4VPhysicalVolume* phanPhys;
  G4bool constructed;
  G4double detectorX;
  G4double detectorY;
  G4double detectorZ;
  G4ThreeVector detPosition;
  G4ThreeVector objPosition;
  G4RotationMatrix* targetRot;

};

#endif

```

### 2.1.2 XrayDetectorConstruction.cc

```

#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "G4Material.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4NistManager.hh"

XrayDetectorConstruction::XrayDetectorConstruction():constructed(false){}
XrayDetectorConstruction::~XrayDetectorConstruction(){}
G4VPhysicalVolume* XrayDetectorConstruction::Construct()
{
  if(!constructed)
  {
    constructed = true;
    DefineMaterials();
    SetupGeometry();
  }
  return worldPhys;
}

void XrayDetectorConstruction::DefineMaterials()
{
  G4NistManager* man = G4NistManager::Instance();
  water = man->FindOrBuildMaterial("G4_WATER");
  air = man->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
}

```



```

    vacuum      = man->FindOrBuildMaterial("G4_Galactic");
    lead        = man->FindOrBuildMaterial("G4_Pb");
}

void XrayDetectorConstruction::SetupGeometry()
{
    detectorX = 12.2*cm; detectorY = 9.75*cm;   detectorZ = 0.5*cm;
    detPosition = G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm, -70.5*cm); // sdd = 70.0 cm
    objPosition = G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm, -50.0*cm); // sod = 50.0 cm

//World
    G4VSolid* worldSolid = new G4Box("World",1.5*m,1.5*m,2.0*m);
    G4LogicalVolume* worldLogical = new G4LogicalVolume(worldSolid,air,"World");
    worldPhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(),worldLogical,"World",0,false,0);

//detector
    G4VSolid* plateSolid = new G4Box("plate",detectorX, detectorY, detectorZ);
    G4LogicalVolume* plateLogical = new G4LogicalVolume(plateSolid,vacuum,"plate");
    platePhys = new
G4PVPlacement(0,detPosition,plateLogical,"plate",worldLogical,false,0);

//collimator
    G4VSolid* colSolid = new G4Box("colli",5.0*cm, 5.0*cm, 0.25*cm);
    G4LogicalVolume* colLogical = new G4LogicalVolume(colSolid,lead,"colli");
    colPhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm,-
22.0*cm),colLogical,"colli",worldLogical,false,0);

    G4VSolid* colholeSolid = new G4Box("colhole",3.85*cm, 3.1*cm, 0.25*cm);
    G4LogicalVolume* colholeLogical = new G4LogicalVolume(colholeSolid,air,"colhole");
    G4VPhysicalVolume* colholePhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm,
0.0*cm),colholeLogical,"colhole",colLogical,false,0);

//object
    targetRot = new G4RotationMatrix();
    targetRot->rotateX(90.*deg);

    G4VSolid* phanSolid = new G4Tubs("cylinphantom", 0.0*cm, 6.0*cm, 3.0*cm, 0.*deg,
360.*deg);
    G4LogicalVolume* phanLogical = new G4LogicalVolume(phanSolid,water,"cylinphantom");
    phanPhys = new G4PVPlacement(targetRot, objPosition, phanLogical,"cylinphantom",
worldLogical,false,0);

//visualization
    G4VisAttributes* simpleBoxVisAtt= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0));
    simpleBoxVisAtt->SetVisibility(true);
}

```

## 2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจคชันรอบวัตถุ

### 2.2.1 XrayDetectorConstruction.hh

```

#ifndef XrayDetectorConstruction_h
#define XrayDetectorConstruction_h 1
#include "G4UserDetectorConstruction.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"

class G4VPhysicalVolume;
class G4Material;
class XrayDetectorMessenger;
class XrayDetectorConstruction : public G4UserDetectorConstruction
{

```

```

public:
  XrayDetectorConstruction();
  virtual ~XrayDetectorConstruction();
public:
  virtual G4VPhysicalVolume* Construct();
  const G4VPhysicalVolume* GetWorld() {return worldPhys;};
  const G4VPhysicalVolume* GetDetector() {return platePhys;};
  const G4VPhysicalVolume* GetCollimator() {return colPhys;};
  G4double GetboundDetZpre() {return (detPosition.z()+detectorZ);};
  G4double GetHalfDetectorX() {return detectorX/cm;};
  G4double GetHalfDetectorY() {return detectorY/cm;};
  void SetRotationZ(G4double);

private:
  void DefineMaterials();
  void SetupGeometry();
private:
  G4Material* air;
  G4Material* water;
  G4Material* vacuum;
  G4Material* lead;
  G4VPhysicalVolume* worldPhys;
  G4VPhysicalVolume* platePhys;
  G4VPhysicalVolume* phanPhys;
  G4bool constructed;
  G4double detectorX;
  G4double detectorY;
  G4double detectorZ;
  G4ThreeVector detPosition;
  G4ThreeVector objPosition;
  G4RotationMatrix* targetRot;
  XrayDetectorMessenger* xrayDetectorMessenger;
};

#endif

```

### 2.2.2 XrayDetectorConstruction.cc

```

#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayDetectorMessenger.hh"
#include "G4Material.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4NistManager.hh"

XrayDetectorConstruction::XrayDetectorConstruction():constructed(false)
{
  xrayDetectorMessenger = new XrayDetectorMessenger(this);
}
XrayDetectorConstruction::~XrayDetectorConstruction()
{
  delete xrayDetectorMessenger;
}
G4VPhysicalVolume* XrayDetectorConstruction::Construct()
{
  if(!constructed)
  {
    constructed = true;
    DefineMaterials();
  }
}

```

```

        SetupGeometry();
    }
    return worldPhys;
}

void XrayDetectorConstruction::DefineMaterials()
{
    G4NistManager* man = G4NistManager::Instance();
    water          = man->FindOrBuildMaterial("G4_WATER");
    air            = man->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
    vacuum        = man->FindOrBuildMaterial("G4_Galactic");
    lead = man->FindOrBuildMaterial("G4_Pb");
}

void XrayDetectorConstruction::SetupGeometry()
{
    detectorX = 12.2*cm; detectorY = 9.75*cm;  detectorZ = 0.5*cm;
    detPosition = G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm, -70.5*cm); // sdd = 70.0 cm
    objPosition = G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm, -50.0*cm); // sod = 50.0 cm

    //World
    G4VSolid* worldSolid = new G4Box("World",1.5*m,1.5*m,2.0*m);
    G4LogicalVolume* worldLogical = new G4LogicalVolume(worldSolid,air,"World");
    worldPhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(),worldLogical,"World",0,false,0);

    //detector
    G4VSolid* plateSolid = new G4Box("plate",detectorX, detectorY, detectorZ);
    G4LogicalVolume* plateLogical = new G4LogicalVolume(plateSolid,vacuum,"plate");
    platePhys = new
    G4PVPlacement(0,detPosition,plateLogical,"plate",worldLogical,false,0);

    //collimator
    G4VSolid* colSolid = new G4Box("colli",5.0*cm, 5.0*cm, 0.25*cm);
    G4LogicalVolume* colLogical = new G4LogicalVolume(colSolid,lead,"colli");
    colPhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm,-
    22.0*cm),colLogical,"colli",worldLogical,false,0);

    G4VSolid* colholeSolid = new G4Box("colhole",3.85*cm, 3.1*cm, 0.25*cm);
    G4LogicalVolume* colholeLogical = new G4LogicalVolume(colholeSolid,air,"colhole");
    G4VPhysicalVolume* colholePhys = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0.0*cm, 0.0*cm,
    0.0*cm),colholeLogical,"colhole",colLogical,false,0);

    //object
    targetRot = new G4RotationMatrix();
    targetRot->rotateX(90.*deg);

    G4VSolid* phanSolid = new G4Tubs("cylinphantom", 0.0*cm, 6.0*cm, 3.0*cm, 0.*deg,
    360.*deg);
    G4LogicalVolume* phanLogical = new G4LogicalVolume(phanSolid,water,"cylinphantom");
    phanPhys = new G4PVPlacement(targetRot, objPosition, phanLogical,"cylinphantom",
    worldLogical,false,0);

    //visualization
    G4VisAttributes* simpleBoxVisAtt= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0));
    simpleBoxVisAtt->SetVisibility(true);
}

void XrayDetectorConstruction::SetRotationZ(G4double angle)
{
    targetRot->rotateZ(angle*deg);
    G4cout<<"-----> rotation angle = "<<angle<<G4endl;
}

```

### 2.2.3 XrayDetectorMessenger.hh

```

#ifndef XrayDetectorMessenger_h
#define XrayDetectorMessenger_h 1
#include "globals.hh"
#include "G4UImessenger.hh"

class XrayDetectorConstruction;
class G4UIdirectory;
class G4UIcmdWithADouble;
class XrayDetectorMessenger: public G4UImessenger
{
public:
    XrayDetectorMessenger(XrayDetectorConstruction* );
    ~XrayDetectorMessenger();
    void SetNewValue(G4UIcommand*, G4String);
private:
    XrayDetectorConstruction* XTube;
    G4UIdirectory*             XrayTubeDir;
    G4UIdirectory*             phanDir;
    G4UIcmdWithADouble*       RotZ;
};
#endif

```

### 2.2.4 XrayDetectorMessenger.cc

```

#include "XrayDetectorMessenger.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "G4UIdirectory.hh"
#include "G4UIcmdWithADouble.hh"

XrayDetectorMessenger::XrayDetectorMessenger(XrayDetectorConstruction* Det)
:XTube(Det)
{
    XrayTubeDir = new G4UIdirectory("/XTube/");
    XrayTubeDir->SetGuidance("UI for this work");

    phanDir = new G4UIdirectory("/XTube/Phantom/");
    phanDir->SetGuidance("phantom control");

    RotZ = new G4UIcmdWithADouble("/XTube/Phantom/setRotationZ",this);
    RotZ->SetGuidance("Set Z Rotation of phantom");
    RotZ->SetParameterName("Angle",false);
    RotZ->AvailableForStates(G4State_PreInit,G4State_Idle);
}

XrayDetectorMessenger::~XrayDetectorMessenger()
{
    delete XrayTubeDir;
    delete phanDir;
    delete RotZ;
}

void XrayDetectorMessenger::SetNewValue(G4UIcommand* command,G4String newValue)
{
    if(command == RotZ )
    {
        XTube->SetRotationZ(RotZ->GetNewDoubleValue(newValue));
    }
}

```

### 3. XrayPhysicsListPenelope

#### 3.1 XrayPhysicsListPenelope.hh

```

#ifndef XrayPhysicsListPenelope_h
#define XrayPhysicsListPenelope_h 1
#include "G4VUserPhysicsList.hh"
#include "globals.hh"

class XrayPhysicsListPenelope: public G4VUserPhysicsList
{
public:
    XrayPhysicsListPenelope();
    virtual ~XrayPhysicsListPenelope();
    void ConstructParticle();
    void ConstructProcess();
    void SetCuts();
private:
    void ConstructEM();
};
#endif

```

#### 3.2 XrayPhysicsListPenelope.cc

```

#include "XrayPhysicsListPenelope.hh"
#include "G4ProcessManager.hh"
#include "G4ParticleTypes.hh"
#include "G4StepLimiter.hh"

XrayPhysicsListPenelope::XrayPhysicsListPenelope(): G4VUserPhysicsList()
{
    defaultCutValue = 1.0*mm;
    SetVerboseLevel(1);
}

XrayPhysicsListPenelope::~XrayPhysicsListPenelope(){};

void XrayPhysicsListPenelope::ConstructParticle()
{
    G4Gamma::GammaDefinition();
    G4Electron::ElectronDefinition();
}

void XrayPhysicsListPenelope::ConstructProcess()
{
    AddTransportation();
    ConstructEM();
}

//gamma
#include "G4PhotoElectricEffect.hh"
#include "G4PenelopePhotoElectricModel.hh"
#include "G4ComptonScattering.hh"
#include "G4PenelopeComptonModel.hh"
#include "G4RayleighScattering.hh"
#include "G4PenelopeRayleighModel.hh"

//electron
#include "G4eMultipleScattering.hh"
#include "G4UniversalFluctuation.hh"
#include "G4eIonisation.hh"
#include "G4PenelopeIonisationModel.hh"

```

```

#include "G4eBremsstrahlung.hh"
#include "G4PenelopeBremsstrahlungModel.hh"

void XrayPhysicsListPenelope::ConstructEM()
{
  theParticleIterator->reset();
  while( (*theParticleIterator)() ){
    G4ParticleDefinition* particle = theParticleIterator->value();
    G4ProcessManager* pmanager = particle->GetProcessManager();
    G4String particleName = particle->GetParticleName();

    if (particleName == "gamma") {
      //Photoelectric effect
      G4PhotoElectricEffect* thePhotoElectricEffect = new G4PhotoElectricEffect();
      thePhotoElectricEffect->SetModel(new G4PenelopePhotoElectricModel());
      pmanager->AddDiscreteProcess(thePhotoElectricEffect);
      //Compton scattering
      G4ComptonScattering* theComptonScattering = new G4ComptonScattering();
      theComptonScattering->SetModel(new G4PenelopeComptonModel());
      pmanager->AddDiscreteProcess(theComptonScattering);
      //Rayleigh Scattering
      G4RayleighScattering* theRayleigh = new G4RayleighScattering();
      theRayleigh->SetModel(new G4PenelopeRayleighModel());
      pmanager->AddDiscreteProcess(theRayleigh);
    }

    else if (particleName == "e-") {
      //Multiple Scattering
      G4eMultipleScattering* msc = new G4eMultipleScattering();
      msc->SetStepLimitType(fUseDistanceToBoundary);
      pmanager->AddProcess(msc, -1, 1, 1);
      //Ionisation
      G4eIonisation* eIoni = new G4eIonisation();
      eIoni->SetEmModel(new G4PenelopeIonisationModel());
      eIoni->SetStepFunction(0.2, 100*um);
      pmanager->AddProcess(eIoni, -1, 2, 2);
      //Bremsstrahlung
      G4eBremsstrahlung* eBrem = new G4eBremsstrahlung();
      eBrem->SetEmModel(new G4PenelopeBremsstrahlungModel());
      pmanager->AddProcess(eBrem, -1,-3, 3);
    }
  }
}

void XrayPhysicsListPenelope::SetCuts()
{
  if (verboseLevel >0){
    G4cout << "RE03PhysicsListLow::SetCuts:";
    G4cout << "CutLength : " << G4BestUnit(defaultCutValue,"Length") << G4endl;
  }
  G4ProductionCutsTable::GetProductionCutsTable()->SetEnergyRange(250*eV, 1*GeV);
  //set cut values
  SetCutValue(0.001*mm, "gamma");
  SetCutValue(defaultCutValue, "e-");
  if (verboseLevel>0) DumpCutValuesTable();
}

```

#### 4. User Action

##### 4.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจคชัน

###### 4.1.1 XraySteppingAction

## 4.1.1.1 XraySteppingAction.hh

```

#ifndef XraySteppingAction_h
#define XraySteppingAction_h 1
#include "G4UserSteppingAction.hh"
#include "G4StepPoint.hh"
#include "G4ParticleDefinition.hh"

class XrayDetectorConstruction;
class XrayEventAction;
class XraySteppingAction : public G4UserSteppingAction
{
public:
  XraySteppingAction(XrayDetectorConstruction*, XrayEventAction*);
  virtual ~XraySteppingAction();
  void UserSteppingAction(const G4Step*);
  bool CheckPhantom(const G4StepPoint*);
private:
  XrayDetectorConstruction* detector;
  XrayEventAction* eventaction;
};

#endif

```

## 4.1.1.2 XraySteppingAction.cc

```

#include "XraySteppingAction.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayEventAction.hh"
#include "G4Step.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4RunManager.hh"

XraySteppingAction::XraySteppingAction(XrayDetectorConstruction* det, XrayEventAction*
evt):detector(det), eventaction(evt)
{}
XraySteppingAction::~XraySteppingAction()
{}

void XraySteppingAction::UserSteppingAction(const G4Step* aStep)
{
  G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();
  if(aStep->GetTrack()->GetParticleDefinition() == particleTable-
>FindParticle("gamma"))
  {
    G4int tran = 0; G4int phot = 0; G4int comp = 0; G4int rayl = 0;
    G4StepPoint* point1 = aStep->GetPreStepPoint();
    if (CheckPhantom(point1))
    {
      G4StepPoint* point2 = aStep->GetPostStepPoint();
      G4String process = point2->GetProcessDefinedStep()->GetProcessName();

      if(process == "Transportation"){tran = 1;}
      if(process == "phot"){phot = 1;}
      if(process == "compt"){comp = 1;}
      if(process == "Rayl"){rayl = 1;}
      eventaction->AddProcess(tran, phot, comp, rayl);
    }
    if (point1->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetDetector())
    {
      G4ThreeVector pos1 = point1->GetPosition();
      G4double zaxispre = pos1.z();

```

```

        if( ( (detector->GetboundDetZpre()-0.000001*cm) < zaxispre) && (zaxispre <
((detector->GetboundDetZpre()+0.000001*cm)) )
        {
            G4double KE = point1->GetKineticEnergy();
            eventaction->AddData(pos1, KE);
        }
    }
}

bool XraySteppingAction::CheckPhantom(const G4StepPoint* CPoint)
{
    if( CPoint->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetWorld())
        return false;
    if(CPoint->GetMaterial() == detector->GetWorld()->GetLogicalVolume()->GetMaterial())
        return false;
    if( CPoint->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetCollimator())
        return false;
    if(CPoint->GetPosition().z() < detector->GetboundDetZpre()+0.000001*cm)
        return false;
    return true;
}

```

## 4.1.2 XrayEventAction

### 4.1.2.1 XrayEventAction.hh

```

#ifndef XrayEventAction_h
#define XrayEventAction_h 1
#include "G4UserEventAction.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"

class G4Event;
class XrayEventAction : public G4UserEventAction
{
public:
    XrayEventAction();
    ~XrayEventAction();
public:
    void BeginOfEventAction(const G4Event*);
    void EndOfEventAction(const G4Event*);
    void AddProcess(G4int tran, G4int phot, G4int comp, G4int rayl)
        {tranNb += tran; photNb += phot; compNb += comp; raylNb += rayl; };
    void AddData(G4ThreeVector pos1, G4double KE)
    {
        N++;
        if(N==1)
        {
            position = new G4ThreeVector[1];    energy = new G4double[1];
            position[0] = pos1;                energy[0] = KE;
        }
        else
        {
            temp_p = new G4ThreeVector[N-1];    temp_e = new G4double[N-1];

            for(i=0;i<N-1;i++)
            {
                temp_p[i] = position[i];        temp_e[i] = energy[i];
            }
            delete [] position;
            delete [] energy;
            position = new G4ThreeVector[N];    energy = new G4double[N];
        }
    }
}

```



```

        for(i=0;i<N-1;i++)
        {
            position[i] = temp_p[i];
            energy[i] = temp_e[i];
        }
        position[N-1] = pos1;    energy[N-1] = KE;
        delete [] temp_p;
        delete [] temp_e;
    }
};
private:
    G4int tranNb;                G4int photNb;
    G4int compNb;               G4int ray1Nb;
    G4int N;                     G4int i;
    G4ThreeVector *position;    G4ThreeVector *temp_p;
    G4double *energy;          G4double *temp_e;
};
#endif

```

#### 4.1.2.2 XrayEventAction.cc

```

#include "XrayEventAction.hh"
#include "G4Event.hh"
#include "Randomize.hh"
#include <fstream>
using namespace std;
fstream tfile;
fstream sfile;

XrayEventAction::XrayEventAction()
{
    tfile.open ("primary.txt",fstream::in | fstream::out | fstream::app);
    sfile.open ("scatter.txt",fstream::in | fstream::out | fstream::app);
}
XrayEventAction::~XrayEventAction()
{
    tfile.close();
    sfile.close();
}

void XrayEventAction::BeginOfEventAction(const G4Event* evt)
{
    //initialisation per event
    tranNb = 0;  photNb = 0;
    compNb = 0;  ray1Nb = 0;
    N=0;
}

void XrayEventAction::EndOfEventAction(const G4Event* evt)
{
    if(N!=0)
    {
        if(photNb == 0 && compNb == 0 && ray1Nb == 0) //primary photon
        {
            tfile << G4endl;
            tfile << position[0]/cm << "\t" << energy[0]/keV ;
        }
        else //scattered photon
        {
            for(i=0;i<N;i++)
            {
                sfile << G4endl;
                sfile << position[i]/cm << "\t" << energy[i]/keV ;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    delete [] position;
    delete [] energy;
}
}

```

### 4.1.3 XrayRunAction

#### 4.1.3.1 XrayRunAction.hh

```

#ifndef XrayRunAction_h
#define XrayRunAction_h 1
#include "G4UserRunAction.hh"
#include "globals.hh"
class G4Run;
class XrayRunAction : public G4UserRunAction
{
public:
    XrayRunAction();
    ~XrayRunAction();
public:
    void BeginOfRunAction(const G4Run*);
    void EndOfRunAction(const G4Run*);
};

#endif

```

#### 4.1.3.2 XrayRunAction.cc

```

#include "XrayRunAction.hh"
#include "G4Run.hh"
#include "G4RunManager.hh"

XrayRunAction::XrayRunAction(){}
XrayRunAction::~XrayRunAction(){}
void XrayRunAction::BeginOfRunAction(const G4Run* aRun)
{}
void XrayRunAction::EndOfRunAction(const G4Run*)
{}

```

## 4.2 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองถ่ายภาพโปรเจคชันรอบวัตถุ

### 4.2.1 XraySteppingAction

#### 4.2.1.1 XraySteppingAction.hh

```

#ifndef XraySteppingAction_h
#define XraySteppingAction_h 1
#include "G4UserSteppingAction.hh"
#include "G4StepPoint.hh"
#include "G4ParticleDefinition.hh"

class XrayDetectorConstruction;
class XrayEventAction;
class XraySteppingAction : public G4UserSteppingAction
{

```

```

public:
  XraySteppingAction(XrayDetectorConstruction*, XrayEventAction*);
  virtual ~XraySteppingAction();
  void UserSteppingAction(const G4Step*);
  bool CheckPhantom(const G4StepPoint*);
private:
  XrayDetectorConstruction* detector;
  XrayEventAction*          eventaction;
};

#endif

```

#### 4.2.1.2 XraySteppingAction.cc

```

#include "XraySteppingAction.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayEventAction.hh"
#include "G4Step.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4RunManager.hh"

XraySteppingAction::XraySteppingAction(XrayDetectorConstruction* det, XrayEventAction*
evt):detector(det), eventaction(evt)
{}
XraySteppingAction::~XraySteppingAction()
{}

void XraySteppingAction::UserSteppingAction(const G4Step* aStep)
{
  G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();
  if(aStep->GetTrack()->GetParticleDefinition() == particleTable-
>FindParticle("gamma"))
  {
    G4int tran = 0;   G4int phot = 0;   G4int comp = 0;   G4int rayl = 0;
    G4StepPoint* point1 = aStep->GetPreStepPoint();
    if (CheckPhantom(point1))
    {
      G4StepPoint* point2 = aStep->GetPostStepPoint();
      G4String process = point2->GetProcessDefinedStep()->GetProcessName();

      if(process == "Transportation"){tran = 1;}
      if(process == "phot"){phot = 1;}
      if(process == "compt"){comp = 1;}
      if(process == "Rayl"){rayl = 1;}
      eventaction->AddProcess(tran, phot, comp, rayl);
    }
    if (point1->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetDetector())
    {
      G4ThreeVector pos1 = point1->GetPosition();
      G4double zaxispre = pos1.z();
      if( ( ((detector->GetboundDetZpre()-0.000001*cm) < zaxispre) && (zaxispre <
((detector->GetboundDetZpre()+0.000001*cm)) )
      {
        eventaction->AddData(pos1);
      }
    }
  }
}

bool XraySteppingAction::CheckPhantom(const G4StepPoint* CPoint)
{
  if( CPoint->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetWorld())
    return false;
  if(CPoint->GetMaterial() == detector->GetWorld()->GetLogicalVolume()->GetMaterial())

```

```

    return false;
if( CPoint->GetTouchableHandle()->GetVolume() == detector->GetCollimator())
    return false;
if(CPoint->GetPosition().z() < detector->GetboundDetZpre()+0.00001*cm)
    return false;
return true;
}

```

## 4.2.2 XrayEventAction

### 4.2.2.1 XrayEventAction.hh

```

#ifndef XrayEventAction_h
#define XrayEventAction_h 1
#include "G4UserEventAction.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"

class G4Event;
class XrayDetectorConstruction;
class XrayRunAction;
class XrayEventAction : public G4UserEventAction
{
public:
    XrayEventAction(XrayDetectorConstruction*, XrayRunAction*);
    ~XrayEventAction();
public:
    void BeginOfEventAction(const G4Event*);
    void EndOfEventAction(const G4Event*);
    void AddProcess(G4int tran, G4int phot, G4int comp, G4int rayl)
        {tranNb += tran; photNb += phot; compNb += comp; raylNb += rayl; };
    void AddData(G4ThreeVector pos1, G4double KE)
    {
        N++;
        if(N==1)
        {
            position = new G4ThreeVector[1];
            position[0] = pos1;
        }
        else
        {
            temp_p = new G4ThreeVector[N-1];

            for(i=0;i<N-1;i++)
            {
                temp_p[i] = position[i];
            }
            delete [] position;
            position = new G4ThreeVector[N];
            for(i=0;i<N-1;i++)
            {
                position[i] = temp_p[i];
            }
            position[N-1] = pos1;
            delete [] temp_p;
        }
    };
private:
    XrayDetectorConstruction* detector;
    XrayRunAction* runact;
    G4int tranNb;
    G4int photNb;
    G4int compNb;
    G4int raylNb;
    G4int N;
    G4int i;

```

```

    G4ThreeVector *position;          G4ThreeVector *temp_p;
    G4int xbin;                       G4int ybin;
    G4double halfX;                   G4double x;
    G4double halfY;                   G4double y;

};
#endif

```

#### 4.2.2.2 XrayEventAction.cc

```

#define BINX 480
#define BINY 384
#include "XrayEventAction.hh"
#include "XrayDetectorConstruction.hh"
#include "XrayRunAction.hh"
#include "G4Event.hh"
#include "Randomize.hh"

XrayEventAction::XrayEventAction(XrayDetectorConstruction* det, XrayRunAction* run)
:detector(det),runact(run)
{}
XrayEventAction::~XrayEventAction()
{}

void XrayEventAction::BeginOfEventAction(const G4Event* evt)
{
//initialisation per event
  tranNb = 0;  photNb = 0;
  compNb = 0;  raylNb = 0;
  N=0;
}

void XrayEventAction::EndOfEventAction(const G4Event* evt)
{
  if(N!=0)
  {
    halfX = detector->GetHalfDetectorX();
    halfY = detector->GetHalfDetectorY();
    for(i=0;i<N;i++)
    {
      x = 0.0;      y = 0.0;
      x = halfX + position[i].x()/cm;
      y = halfY - position[i].y()/cm;

      xbin = (G4int)(x*BINX/(halfX*2.0));
      if(x != halfX*2.0)
      {
        xbin = xbin + 1;
      }
      ybin = (G4int)(y*BINY/(halfY*2.0));
      if(y != halfY*2.0)
      {
        ybin = ybin + 1;
      }
      runact->ImgAllX(ybin,xbin); // primary + scatter image

      if(photNb == 0 && compNb == 0 && raylNb == 0) //primary image
      {
        runact->ImgTran(ybin,xbin);
      }
      else //scatter image
      {
        runact->ImgScat(ybin,xbin);
      }
    }
  }
}

```

```

    }
    delete [] position;
}
}

```

## 4.2.3 XrayRunAction

### 4.2.3.1 XrayRunAction.hh

```

#define BINX 480
#define BINY 384
#ifdef XrayRunAction_h
#define XrayRunAction_h 1
#include "G4UserRunAction.hh"
#include "globals.hh"
class G4Run;
class XrayRunActionMessenger;
class XrayRunAction : public G4UserRunAction
{
public:
    XrayRunAction();
    ~XrayRunAction();
public:
    void BeginOfRunAction(const G4Run*);
    void EndOfRunAction(const G4Run*);
    void ImgAllX(G4int yb, G4int xb) {allx[yb][xb] = allx[yb][xb] + 1;} ;
    void ImgTran(G4int yb, G4int xb) {tran[yb][xb] = tran[yb][xb] + 1;} ;
    void ImgScat(G4int yb, G4int xb) {scat[yb][xb] = scat[yb][xb] + 1;} ;
    void OpenFile(G4int);
private:
    XrayRunActionMessenger*      xrayRunActionMessenger;
    G4double allx[BINY+5][BINX+5];
    G4double tran[BINY+5][BINX+5];
    G4double scat[BINY+5][BINX+5];
    G4int i,j;
};
#endif

```

### 4.2.3.2 XrayRunAction.cc

```

#include "XrayRunAction.hh"
#include "XrayRunActionMessenger.hh"
#include "G4Run.hh"
#include "G4RunManager.hh"
#include <fstream>
#include <cstdio>
using namespace std;
fstream tfile;
fstream sfile;
fstream afile;

XrayRunAction::XrayRunAction()
{
    xrayRunActionMessenger = new XrayRunActionMessenger(this);
}
XrayRunAction::~XrayRunAction()
{
    delete xrayRunActionMessenger;
}

```

```

void XrayRunAction::BeginOfRunAction(const G4Run* aRun)
{
//set initial value
  for(j=0;j<BINY+5;j++)
    for(i=0;i<BINX+5;i++)
      {
        allx[j][i]=0;
        tran[j][i]=0;
        scat[j][i]=0;
      }
}

void XrayRunAction::EndOfRunAction(const G4Run*)
{
  for(j=1;j<=BINY;j++)
    {
      for(i=1;i<=BINX;i++)
        {
          afile << allx[j][i] << "\t" ;
          tfile << tran[j][i] << "\t" ;
          sfile << scat[j][i] << "\t" ;
        }
      afile << endl;
      tfile << endl;
      sfile << endl;
    }
  afile.close();
  tfile.close();
  sfile.close();
}

void XrayRunAction::OpenFile(G4int angle)
{
  char aname[30],tname[30],sname[30],cname[30];

  sprintf(aname,"%d_all.txt",angle);
  afile.open (aname,fstream::in | fstream::out | fstream::app);

  sprintf(tname,"%d_primary.txt",angle);
  tfile.open (tname,fstream::in | fstream::out | fstream::app);

  sprintf(sname,"%d_scatter.txt",angle);
  sfile.open (sname,fstream::in | fstream::out | fstream::app);
}

```

#### 4.2.3.3 XrayRunActionMessenger.hh

```

#ifndef XrayRunActionMessenger_h
#define XrayRunActionMessenger_h 1
#include "globals.hh"
#include "G4UImessenger.hh"

class XrayRunAction;
class G4UIdirectory;
class G4UIcmdWithAnInteger;
class G4UIcmdWithoutParameter;
class XrayRunActionMessenger: public G4UImessenger
{
public:
  XrayRunActionMessenger(XrayRunAction*);
  virtual ~XrayRunActionMessenger();
  void SetNewValue(G4UIcommand*, G4String);
private:
  XrayRunAction*          runAction;
}

```

```

        G4UIdirectory*          runDir;
        G4UIcmdWithAnInteger*  OpenFile;
    };
#endif

```

#### 4.2.3.4 XrayRunActionMessenger.cc

```

#include "XrayRunActionMessenger.hh"
#include "XrayRunAction.hh"
#include "G4UIdirectory.hh"
#include "G4UIcmdWithAnInteger.hh"
#include "G4UIcmdWithoutParameter.hh"
#include "globals.hh"

XrayRunActionMessenger::XrayRunActionMessenger(XrayRunAction* runAct)
:runAction(runAct)
{
    runDir = new G4UIdirectory("/XTube/runact/");
    runDir->SetGuidance("run control");

    OpenFile = new G4UIcmdWithAnInteger("/XTube/runact/OpenFile",this);
    OpenFile->SetGuidance("Open file with angle in filename");
    OpenFile->SetParameterName("Angle",false);
}

XrayRunActionMessenger::~XrayRunActionMessenger()
{
    delete OpenFile;
    delete runDir;
}

void XrayRunActionMessenger::SetNewValue(G4UIcommand* command,G4String newValue)
{
    if(command == OpenFile)
    {
        runAction->OpenFile(OpenFile->GetNewIntValue(newValue));
    }
}

```

#### 4.2.3.5 Macro File สำหรับจัดการการจำลอง

```

/XTube/runact/OpenFile {n}
/XTube/Phantom/setRotationZ 1
/run/beamOn 100000000

```

### 5. XrayPrimaryGeneratorAction

#### 5.1 XrayPrimaryGeneratorAction.hh

```

#ifndef XrayPrimaryGeneratorAction_h
#define XrayPrimaryGeneratorAction_h 1
#include "G4VUserPrimaryGeneratorAction.hh"

class G4GeneralParticleSource;
class G4Event;
class XrayPrimaryGeneratorAction : public G4VUserPrimaryGeneratorAction
{
public:

```



```

    XrayPrimaryGeneratorAction();
    ~XrayPrimaryGeneratorAction();
public:
    void GeneratePrimaries(G4Event* anEvent);
private:
    G4GeneralParticleSource* particleGun;
};

#endif

```

## 5.2 XrayPrimaryGeneratorAction.cc

```

#include "XrayPrimaryGeneratorAction.hh"
#include "G4Event.hh"
#include "G4GeneralParticleSource.hh"
#include "G4ParticleTable.hh"
#include "G4ParticleDefinition.hh"
#include "globals.hh"

XrayPrimaryGeneratorAction::XrayPrimaryGeneratorAction()
{
    particleGun = new G4GeneralParticleSource();
}
XrayPrimaryGeneratorAction::~XrayPrimaryGeneratorAction()
{
    delete particleGun;
}
void XrayPrimaryGeneratorAction::GeneratePrimaries(G4Event* anEvent)
{
    particleGun->GeneratePrimaryVertex(anEvent) ;
}

```

## 5.3 Macro File สำหรับกำหนดลักษณะการกระจายตัว

```

/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/pos/centre 0. -2. 0. cm

/gps/ang/type iso
/gps/ang/mintheta 0. deg
/gps/ang/maxtheta 10. deg
/gps/ang/rot1 1. 0. 0.

/gps/ene/type User
/gps/hist/type energy
/gps/hist/point 0.009      0.00
/gps/hist/point 0.01      0.00
/gps/hist/point 0.011     0.00
/gps/hist/point 0.012     0.00
/gps/hist/point 0.013     0.00
/gps/hist/point 0.014     0.00
/gps/hist/point 0.015     0.00
/gps/hist/point 0.016     0.00
/gps/hist/point 0.017     0.00
/gps/hist/point 0.018     0.00
/gps/hist/point 0.019     0.00
/gps/hist/point 0.02      0.00
/gps/hist/point 0.021     0.00
/gps/hist/point 0.022     0.00
/gps/hist/point 0.023     0.00
/gps/hist/point 0.024     0.00
/gps/hist/point 0.025     0.00

```

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| /gps/hist/point 0.026 | 0.02      |
| /gps/hist/point 0.027 | 0.16      |
| /gps/hist/point 0.028 | 0.98      |
| /gps/hist/point 0.029 | 4.06      |
| /gps/hist/point 0.03  | 14.82     |
| /gps/hist/point 0.031 | 45.21     |
| /gps/hist/point 0.032 | 121.99    |
| /gps/hist/point 0.033 | 291.70    |
| /gps/hist/point 0.034 | 640.20    |
| /gps/hist/point 0.035 | 1274.10   |
| /gps/hist/point 0.036 | 2354.30   |
| /gps/hist/point 0.037 | 4051.71   |
| /gps/hist/point 0.038 | 6640.13   |
| /gps/hist/point 0.039 | 10232.76  |
| /gps/hist/point 0.04  | 15207.92  |
| /gps/hist/point 0.041 | 21543.07  |
| /gps/hist/point 0.042 | 29764.66  |
| /gps/hist/point 0.043 | 39655.06  |
| /gps/hist/point 0.044 | 51566.18  |
| /gps/hist/point 0.045 | 64660.15  |
| /gps/hist/point 0.046 | 80125.03  |
| /gps/hist/point 0.047 | 96897.96  |
| /gps/hist/point 0.048 | 115648.40 |
| /gps/hist/point 0.049 | 134885.00 |
| /gps/hist/point 0.05  | 155275.90 |
| /gps/hist/point 0.051 | 176615.60 |
| /gps/hist/point 0.052 | 196110.30 |
| /gps/hist/point 0.053 | 217700.30 |
| /gps/hist/point 0.054 | 238649.80 |
| /gps/hist/point 0.055 | 261549.60 |
| /gps/hist/point 0.056 | 279845.50 |
| /gps/hist/point 0.057 | 299103.10 |
| /gps/hist/point 0.058 | 599683.70 |
| /gps/hist/point 0.059 | 862089.30 |
| /gps/hist/point 0.06  | 351820.60 |
| /gps/hist/point 0.061 | 366518.40 |
| /gps/hist/point 0.062 | 377245.20 |
| /gps/hist/point 0.063 | 387773.40 |
| /gps/hist/point 0.064 | 398613.20 |
| /gps/hist/point 0.065 | 404438.20 |
| /gps/hist/point 0.066 | 409918.20 |
| /gps/hist/point 0.067 | 716774.90 |
| /gps/hist/point 0.068 | 414891.10 |
| /gps/hist/point 0.069 | 506299.10 |
| /gps/hist/point 0.07  | 381048.20 |
| /gps/hist/point 0.071 | 376807.90 |
| /gps/hist/point 0.072 | 375712.20 |
| /gps/hist/point 0.073 | 372078.50 |
| /gps/hist/point 0.074 | 366774.00 |
| /gps/hist/point 0.075 | 359812.90 |
| /gps/hist/point 0.076 | 351290.60 |
| /gps/hist/point 0.077 | 340973.90 |
| /gps/hist/point 0.078 | 329418.30 |
| /gps/hist/point 0.079 | 316351.60 |
| /gps/hist/point 0.08  | 301646.90 |
| /gps/hist/point 0.081 | 285685.60 |
| /gps/hist/point 0.082 | 267696.50 |
| /gps/hist/point 0.083 | 248813.50 |
| /gps/hist/point 0.084 | 227124.50 |
| /gps/hist/point 0.085 | 203859.20 |
| /gps/hist/point 0.086 | 177292.50 |
| /gps/hist/point 0.087 | 149849.90 |
| /gps/hist/point 0.088 | 121444.60 |
| /gps/hist/point 0.089 | 64474.11  |
| /gps/hist/point 0.09  | 0.00      |

## ภาคผนวก ข

## การคำนวณค่าเลขซีทีจากฐานข้อมูล

## 1. ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจากฐานข้อมูลของ NIST

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละวัสดุที่ค่าพลังงานต่าง ๆ

| พลังงาน<br>(keV) | $\mu / \rho$ (cm <sup>2</sup> /g) |          |          |          |          |
|------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                  | น้ำ                               | PMMA     | Derlin   | เทฟลอน   | ไนลอน    |
| 51.18542         | 0.231057                          | 0.209966 | 0.21383  | 0.215024 | 0.20917  |
| 54.71721         | 0.222124                          | 0.203676 | 0.206562 | 0.204662 | 0.203458 |
| 58.4927          | 0.214193                          | 0.197967 | 0.200047 | 0.19566  | 0.19822  |
| 62.5287          | 0.207072                          | 0.192725 | 0.194139 | 0.187756 | 0.193361 |
| 66.84318         | 0.200597                          | 0.187867 | 0.188722 | 0.180757 | 0.188819 |
| 71.45536         | 0.194652                          | 0.183303 | 0.183695 | 0.174471 | 0.184511 |
| 76.38578         | 0.189132                          | 0.178979 | 0.178983 | 0.168775 | 0.180397 |

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของอากาศที่ค่าพลังงานต่าง ๆ

| พลังงาน (keV) | $\mu / \rho$ (cm <sup>2</sup> /g) |
|---------------|-----------------------------------|
| 40            | 0.2485                            |
| 50            | 0.208                             |
| 60            | 0.1875                            |
| 80            | 0.1662                            |
| 100           | 0.1541                            |

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ค่าพลังงาน 64.3 keV

ตารางแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ค่าพลังงาน 64.3 keV

| วัสดุ  | $E_1$<br>(keV) | $(\mu/\rho)_1$<br>(cm <sup>2</sup> /g) | $E_2$<br>(keV) | $(\mu/\rho)_2$<br>(cm <sup>2</sup> /g) | $\mu/\rho$ ที่ 64.3 keV<br>(cm <sup>2</sup> /g) |
|--------|----------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| น้ำ    | 62.5287        | 0.207072                               | 66.84318       | 0.200597                               | 0.204414                                        |
| อากาศ  | 60             | 0.1875                                 | 80             | 0.1662                                 | 0.182921                                        |
| PMMA   | 62.5287        | 0.192725                               | 66.84318       | 0.187867                               | 0.190731                                        |
| Derlin | 62.5287        | 0.194139                               | 66.84318       | 0.188722                               | 0.191915                                        |
| เทฟลอน | 62.5287        | 0.187756                               | 66.84318       | 0.180757                               | 0.184882                                        |
| ไนลอน  | 62.5287        | 0.193361                               | 66.84318       | 0.188819                               | 0.191496                                        |

## 3. การคำนวณค่าเลขซีทีที่ค่าพลังงาน 64.3 keV

ตารางแสดงการคำนวณค่าเลขซีทีที่ค่าพลังงาน 64.3 keV

| วัสดุ  | ความหนาแน่น<br>$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\mu/\rho$<br>(cm <sup>2</sup> /g) | $\mu$<br>(cm <sup>-1</sup> ) | เลขซีที |
|--------|--------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------|
| น้ำ    | 1.0                                        | 0.204414                           | 0.204414                     | 0       |
| อากาศ  | $1.205 \times 10^{-3}$                     | 0.182921                           | 0.000220                     | -1000   |
| PMMA   | 1.19                                       | 0.190731                           | 0.226969                     | 110.46  |
| Derlin | 1.425                                      | 0.191915                           | 0.273479                     | 338.23  |
| เทฟลอน | 2.2                                        | 0.184882                           | 0.406741                     | 990.86  |
| ไนลอน  | 1.14                                       | 0.191496                           | 0.218306                     | 68.03   |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชาลินี ธนทรัพย์สมบัติ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่เขตบางแค กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ.2553 จากนั้นในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ