

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีการสร้างภาพโทโมกราฟี

#### 2.1 ทฤษฎีการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

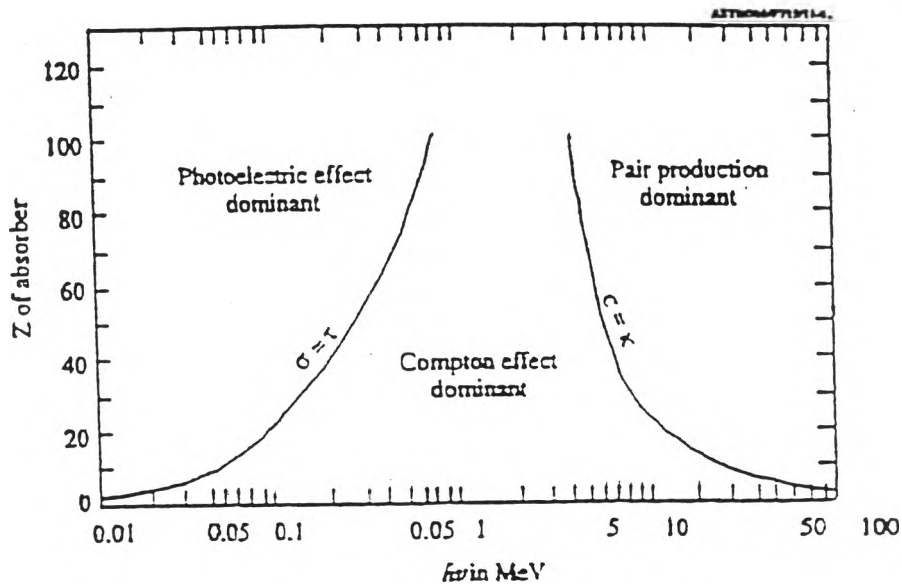
ภาพโทโมกราฟี คือภาพตัดขวางของวัตถุซึ่งเป็นภาพระนาบสองมิติที่จุดภาพแต่ละจุดแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) ในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจะอาศัยหลักการทะลุผ่านของรังสีต่อวัตถุ โดยการสแกนเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรังสีซึ่งติดอยู่ด้านตรงข้ามกับต้นกำเนิดรังสีโดยมีวัตถุอยู่ระหว่างกลาง เมื่อหมุนวัตถุไปด้วยมุมน้อย ๆ ก็สแกนเก็บข้อมูลอีกจนได้ข้อมูลเพียงพอ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อันทั้งหมดมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นพร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน และท้ายที่สุดนำข้อมูลที่ได้อันคำนวณด้วยวิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชันเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี

จากที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ดีจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงลักษณะของการลดทอนของรังสีเมื่อทะลุผ่านตัวกลางก่อน จากนั้นจึงจะศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสร้างภาพโทโมกราฟีต่อไป

##### 2.1.1 การทำอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ (X-ray Interactions)

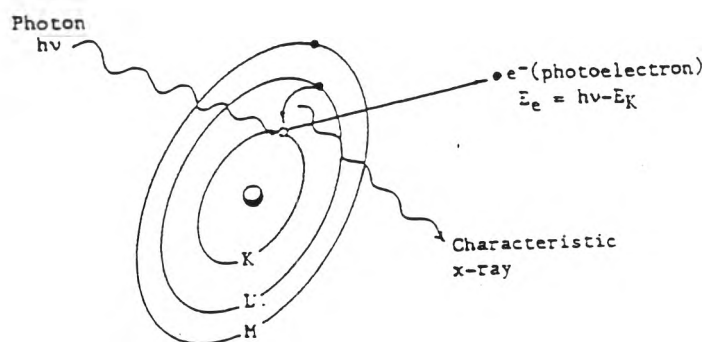
รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะสามารถเกิดอันตรกิริยา<sup>[6]</sup>(Interaction) กับตัวกลาง 4 ชนิดคือ นิวคลีออน (Nucleons) อิเล็กตรอน (Atomic Electron) สนามไฟฟ้าของอะตอม (Electric Field Of Atom) และสนามเมซอนของนิวเคลียส (Meson Field Of Nucleus) อันตรกิริยากับตัวกลางแต่ละชนิดสามารถเกิดได้ 3 รูปแบบคือ การถ่ายเทพลังงานแบบสมบูรณ์ (Complete Absorption) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) กล่าวคือปรากฏการณ์ที่โฟตอนสามารถเกิดอันตรกิริยาในทางทฤษฎีได้ทั้งหมด 12 รูปแบบ แต่ในทางปฏิบัติอันตรกิริยาบางชนิดยังไม่สามารถพบเห็นได้ในปัจจุบัน และแม้ว่ารังสีเอกซ์จะสามารถเกิดอันตรกิริยาหลายรูปแบบ แต่มีเพียง 3 รูปแบบที่มีความสำคัญ คือ การเกิดโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และการเกิดแพร์โปรดักชัน (pair production) โอกาสของเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 รูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางและพลังงานของโฟตอนดังได้แสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อพลังงานของโฟตอนมีพลังงานต่ำจะมี

โอกาสเกิดโฟโตอิเล็กทริกได้ดี แต่เมื่อพลังงานสูงขึ้นโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาในอีก 2 รูปแบบ  
จึงจะเพิ่มขึ้นและการเกิดโฟโตอิเล็กทริกก็จะน้อยลง



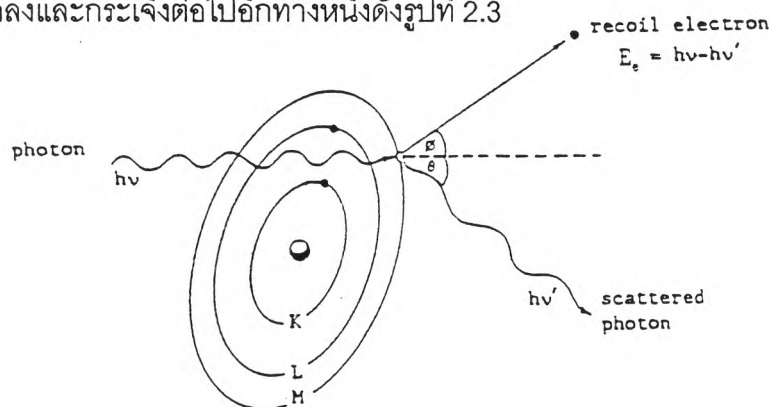
รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับคุณสมบัติของตัวกลางและ  
พลังงานของโฟตอน<sup>[6]</sup>

**การเกิดโฟโตอิเล็กทริก** เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียส  
ของอะตอมของตัวกลาง ด้วยการชนและถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนทั้งหมดทำให้อิเล็กตรอน  
หลุดจากวงโคจรเป็นอิสระ อะตอมจะกลายเป็นไอออนบวก สำหรับอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานของ  
โฟตอนหลุดออกไปนี้เรียกว่า "โฟโตอิเล็กตรอน" การสูญเสียอิเล็กตรอนดังกล่าว จะต้องมีการ  
รักษาสมดุลโครงสร้างและปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) ออกมาดังรูป  
ที่ 2.2



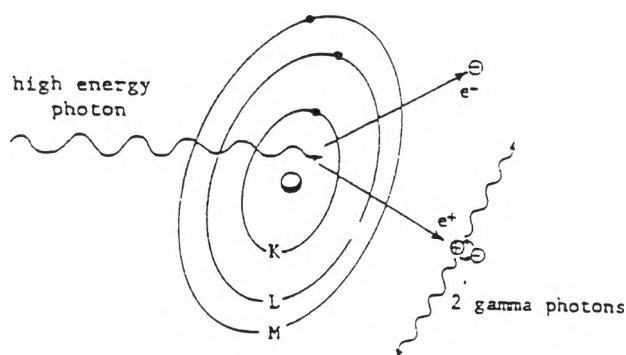
รูปที่ 2.2 ปรัชญาการเกิดโฟโตอิเล็กทริก

การเกิดกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับอิเล็กตรอนที่วงนอก หรือ อิเล็กตรอนอิสระรอบนิวเคลียส แต่การชนทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานบางส่วนจากโฟตอนและ กระเจิงออกจากวงโคจรไป อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกไปเรียกว่า "recoil electron" ส่วนโฟตอนจะมี พลังงานลดลงและกระเจิงต่อไปอีกทางหนึ่งดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปรัชการณักระเจิงแบบคอมป์ตัน

การเกิดแพร์โปรดักชัน เป็นการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับสนามไฟฟ้ารอบนิวเคลียส ในกรณี ที่โฟตอนมีพลังงานสูงมากจะเคลื่อนที่ฝ่าบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนบริเวณใกล้นิวเคลียส ซึ่งมื ความเข้มสนามไฟฟ้าสูง โฟตอนจะหายไปและเกิดเป็นอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนขึ้น จากนั้นในช่วง เวลาอันสั้นโพสิตรอนจะจับอิเล็กตรอนอิสระบริเวณใกล้เคียงเกิดการสลายมวล (annihilation) ทั่น ที่กลายเป็นรังสีแกมมา 2 ตัวปลดปล่อยออกมาในทิศทางทำมุม 180 องศา โดยรังสีแกมมาแต่ละ ตัวมีพลังงานจากการสลายมวล 0.511 MeV ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปรัชการณัแพร์โปรดักชัน

## 2.1.2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีเอกซ์ (Linear attenuation coefficient of X-Ray)

จากหัวข้อ 2.1.1 เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางใด ๆ ตัวกลางนั้นจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ด้วยอันตรกิริยาต่าง ๆ ทำให้ปริมาณของรังสีที่ผ่านตัวกลางออกมามีค่าลดลง การลดลงของรังสีจะเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ  $I$  = ปริมาณรังสีหลังผ่านตัวกลางความหนา  $x$

$I_0$  = ปริมาณรังสีก่อนผ่านตัวกลาง

$\mu$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

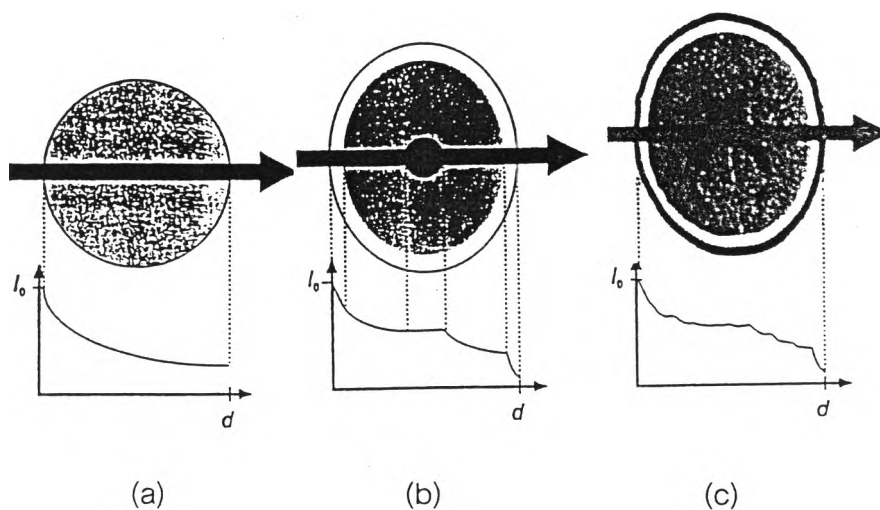
$x$  = ความหนาของตัวกลาง

จากสมการของแลมเบิร์ตเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ผ่านตัวกลางจะลดลงตามความหนาและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์และคุณสมบัติของตัวกลาง สำหรับลักษณะการลดลงของรังสีเอกซ์เมื่อผ่านตัวกลางลักษณะต่าง ๆ กัน แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 โดยกรณีแรกแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางชนิดเดียวแสดงดังรูป 2.5(a) จากกราฟได้ภาพเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ลดลง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวกลางเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามสมการของแลมเบิร์ต กรณีที่สองแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางสองชนิดดังรูป 2.5(b) จากกราฟได้ภาพเมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นสีขาวยังเป็นตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสูงกว่าบริเวณที่เป็นสีเข้ม เห็นได้ว่าในบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสูง การลดลงของรังสีจะมากกว่าบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นต่ำกว่าปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางสองชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)} \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ  $\mu_1, \mu_2$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$x_1, x_2$  เป็นความหนาของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ลำรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางลักษณะต่าง ๆ<sup>[5]</sup>

และสำหรับกรณีสุดท้ายแสดงการที่รังสีผ่านตัวกลางหลาย ๆ ชนิดดังรูป 2.5(c) ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านตัวกลางหลาย ๆ ชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

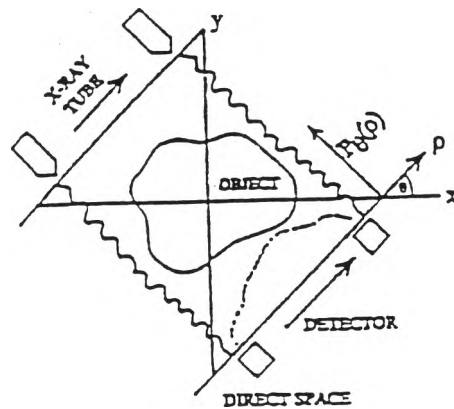
$$I = I_0 e^{-\int \mu(s) dx} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ  $\mu(s)$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่ตัวกลางต่าง ๆ

### 2.1.3 การเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

การเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจะอาศัยการเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรังสีซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกับต้นกำเนิดรังสีโดยมีวัตถุอยู่ระหว่างกลาง ดังรูปที่ 2.6 ในการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ขั้นตอนแรกคือการสแกนเก็บข้อมูลทางรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุในแนวระนาบดังรูปที่ 2.6 ซึ่งข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของข้อมูลโปรเจกชันจากนั้นหมุนวัตถุไปด้วยมุมน้อย ๆ แล้วเริ่มการสแกนเก็บโปรไฟล์ของข้อมูลอีก จากนั้นทำซ้ำ ๆ ตามกระบวนการดังกล่าวจนได้ข้อมูลครบ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ว่าภาพโทโมกราฟีได้มาจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น แต่ข้อมูลโปรเจกชันที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะอยู่ในรูปของความเข้มของรังสี ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงจากข้อมูลความเข้มของรังสีที่เก็บมาด้วยวิธีต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการสแกนเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี<sup>[6]</sup>

#### 2.1.4 การเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์

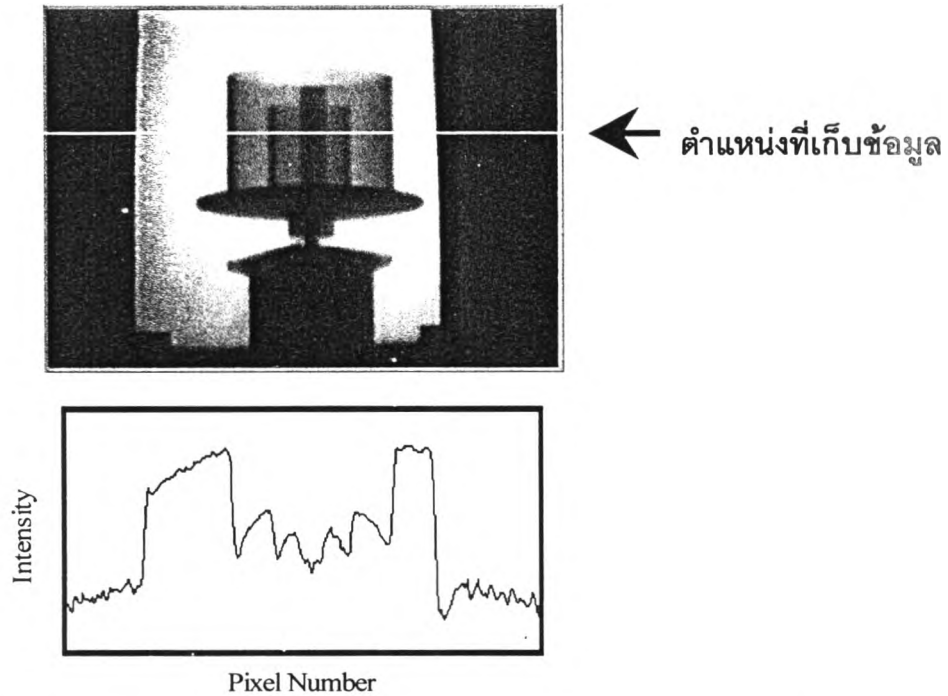
การเก็บข้อมูลโปรไฟล์โดยใช้ระบบโทรทัศน์จากการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งความเข้มของรังสีที่วัดได้จะอยู่ในรูปของความเข้มของจุดภาพที่แสดงบนจอแสดงผล (monitor) ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางรังสีโดยใช้ระบบโทรทัศน์แสดงในรูปที่ 2.7 เป็นข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้ยังไม่สามารถใช้ในการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ค่า (Correction) ก่อน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีเอกซ์ในตัวกลาง ซึ่งสามารถปรับแก้ค่าด้วยวิธี "Shading correction" ดังสมการที่ (2.4)

$$P_s(x_i, y_i) = \ln \left( \frac{V_0(x_i, y_i) - D(x_i, y_i)}{V(x_i, y_i) - D(x_i, y_i)} \right) \quad \dots(2.4)$$

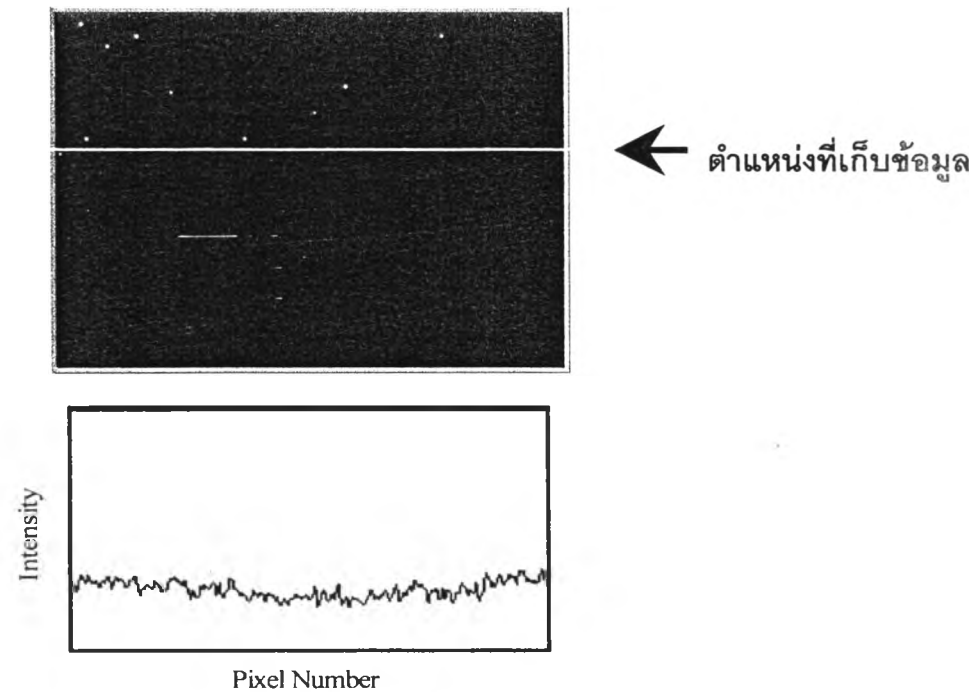
- เมื่อ  $P_s(x_i, y_i)$  คือ ค่าข้อมูลโปรไฟล์ที่ปรับแก้แล้ว  
 $V(x_i, y_i)$  คือ ข้อมูลโปรไฟล์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ  
 $D(x_i, y_i)$  คือ dark current หรือข้อมูลในขณะที่ไม่เปิดเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์  
 $V_0(x_i, y_i)$  คือข้อมูลของภาพถ่ายด้วยรังสีในขณะที่ไม่มีการฉายรังสีทดสอบ

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าต้องทำการคำนวณ ณ ตำแหน่ง  $(x_i, y_i)$  เดียวกันเสมอ สำหรับการหาข้อมูลโปรเจกชัน  $(V(x_i, y_i))$  ทำได้โดยการเก็บข้อมูลโปรเจกชันจากภาพถ่ายด้วยรังสีของวัตถุ ณ ตำแหน่งใด ๆ และมุมต่าง ๆ ส่วนค่า dark current  $(D(x_i, y_i))$  ของจอแสดงผลสามารถหาได้โดยการสแกนเก็บข้อมูลในขณะที่ปิดเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมีค่าที่น้อยแต่มีความแปรปรวนมาก และค่า  $V_0(x_i, y_i)$  เป็นข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บข้อมูลใน

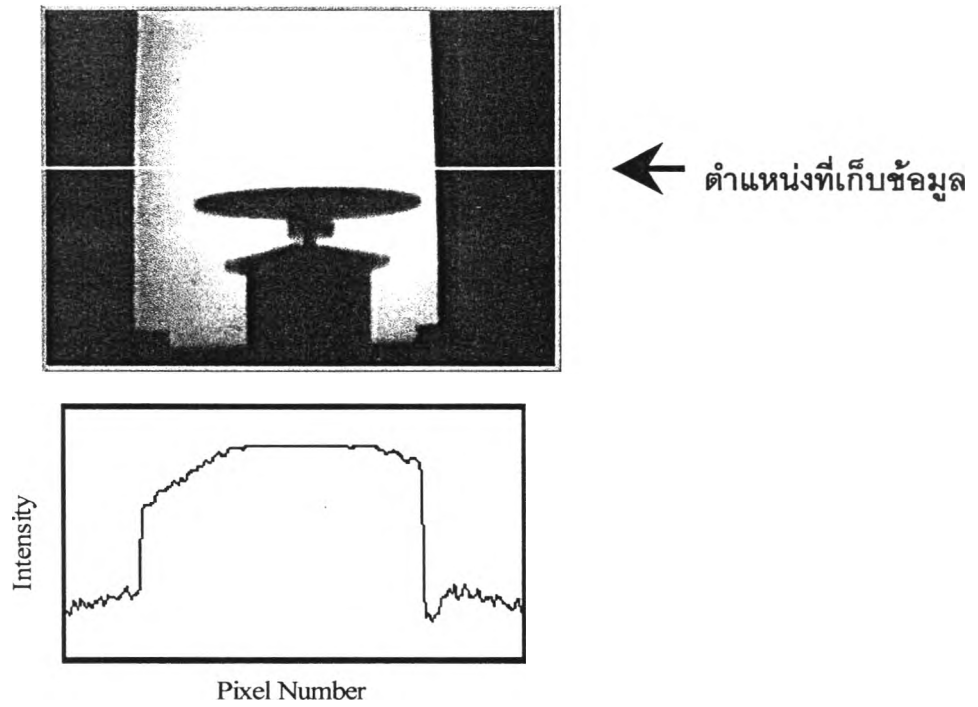
ขณะที่เปิดเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์โดยไม่มีวัตถุที่จะสร้างภาพโทโมกราฟี ตัวอย่างของข้อมูล  $V(x, y, z)$   $D(x, y, z)$  และ  $V_0(x, y, z)$  แสดงในรูปที่ 2.7 ถึง 2.9 ตามลำดับ จากตัวอย่าง เมื่อนำข้อมูลต่าง ๆ มาคำนวณด้วยสมการที่ 2.4 จะได้ข้อมูล  $P_s(x, y, z)$  ดังในรูปที่ 2.10



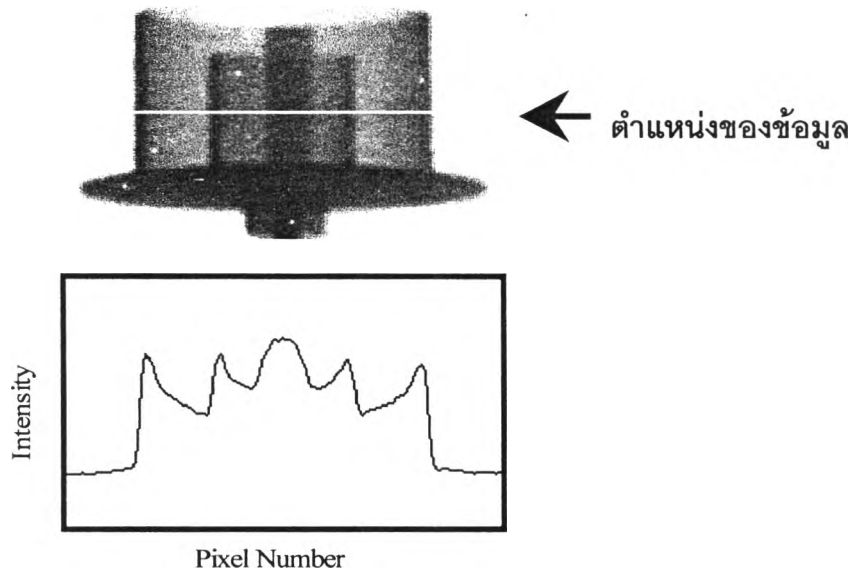
รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายด้วยรังสีโดยใช้ระบบโทมัทสันพร้อมทั้งตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชัน



รูปที่ 2.8 ภาพ dark current พร้อมทั้งตัวอย่างข้อมูลของ dark current



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายด้วยรังสีขณะไม่มีชิ้นงานทดสอบและตัวอย่างข้อมูลโปรไฟล์

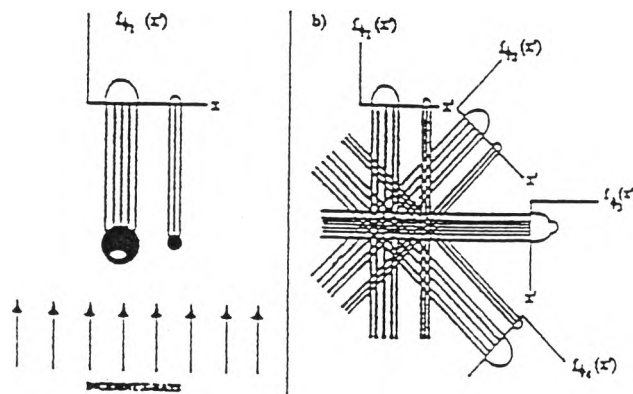


รูปที่ 2.10 ข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการปรับแก้ค่าด้วยวิธี Shading correction



### 2.1.5 วิธีการแบ็กโปรเจกชัน (Back Projection Method)

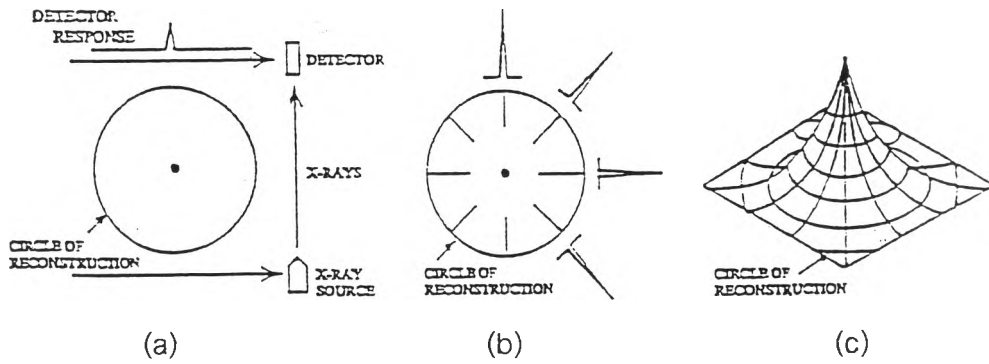
แบ็กโปรเจกชันเป็นวิธีที่ใช้ในการสร้างภาพโทโมกราฟีโดยอาศัยการนำชุดข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในแต่ละมุมมาทำการฉายกลับลงบนตำแหน่งเดิมที่รังสีเดินทางผ่านเพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี ตัวอย่างการแบ็กโปรเจกชันแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ซึ่งด้านซ้ายเป็นภาพของวัตถุที่จะสร้างภาพโทโมกราฟีพร้อมกับข้อมูลโปรเจกชันที่มุมหนึ่ง ส่วนภาพด้านขวาเป็นการฉายกลับโดยนำชุดข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่มุมต่าง ๆ มาฉายซึ่งจะได้ภาพโทโมกราฟีตามภาพด้านขวา



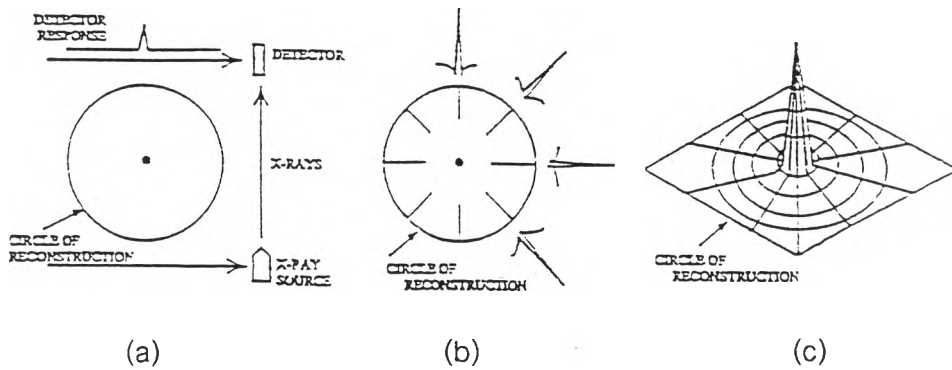
รูปที่ 2.11 วิธีการแบ็กโปรเจกชัน<sup>[6]</sup>

### 2.1.6 ฟังก์ชันฟิลเตอร์ (Filter function)

ในการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชันข้อมูลของทุกโปรเจกชันจะถูกรวมเข้าไปในแต่ละส่วนของภาพโทโมกราฟี ทำให้ภาพที่ได้เกิดความมัวขึ้นดังตัวอย่างในรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชันของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุด เป็นโปรไฟล์ของภาพหลังจากการแบ็กโปรเจกชันแล้วโปรไฟล์ของภาพที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.12(c) ซึ่งความจริงควรมีลักษณะดังรูปที่ 2.13(c) แต่ด้วยวิธีแบ็กโปรเจกชันทำให้ภาพโทโมกราฟีเกิดความมัวขึ้น การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันฟิลเตอร์ปรับปรุงข้อมูลโปรไฟล์ที่จะใช้ในการแบ็กโปรเจกชันเพื่อให้ภาพโทโมกราฟีมีคุณภาพที่ดีขึ้นดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุเหมือนกับในรูปที่ 2.12 แต่ในรูปที่ 2.13 จะใช้ฟังก์ชันฟิลเตอร์ในการปรับปรุงข้อมูลโปรไฟล์ก่อนการสร้างภาพโทโมกราฟี จากรูปที่ 2.13(b) โปรไฟล์ของข้อมูลบริเวณขอบของวัตถุจะมีความแตกต่างมากขึ้นทั้งนี้เพื่อช่วยให้ความมัวของภาพโทโมกราฟีลดลง ดังรูปที่ 2.13(c) ซึ่งโปรไฟล์ของภาพมีความคมชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 2.12(c)



รูปที่ 2.12 ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน<sup>[6]</sup>



รูปที่ 2.13 ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านฟิลเตอร์ฟังก์ชัน<sup>[6]</sup>

2.1.7 วิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน (Filter Back projection Method)

วิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน เป็นวิธีการสร้างภาพโทโมกราฟีวิธีหนึ่งที่ใช้เทคนิคการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เป็นพื้นฐาน พิจารณาฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์ 2 มิติ  $F(X, Y)$  ของฟังก์ชัน  $f(x, y)$

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(Xx+Yy)} dx dy \quad \dots(2.5)$$

เขียนฟังก์ชัน  $f(x, y)$  ไปอยู่ในระบบพิกัด  $(r, s)$  โดยที่แกน  $r$  ทำมุม  $\theta$  กับแกนหมุน  $x$  ของระนาบจะได้ฟังก์ชันการแปลงฟูริเยร์  $F(X, Y)$  เป็น

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[X(r \cos \theta - r \sin \theta) + Y(r \sin \theta + r \cos \theta)]} dr ds$$

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rX \cos \theta - rX \sin \theta + rY \sin \theta + rY \cos \theta]} dr ds$$

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rX \cos \theta - rX \sin \theta + rY \sin \theta + rY \cos \theta]} dr ds$$

เมื่อกำหนดให้  $R = X \cos \theta + Y \sin \theta$

$$S = Y \cos \theta - X \sin \theta$$

จะได้  $F(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) e^{-i[rR + sS]} dr ds \quad \dots(2.6)$

$$F(X, Y) = F_{\theta}(R, S)$$

สมการที่ (2.6) สื่อให้ทราบว่า ถ้า  $f_{\theta}(r, s)$  หมุนจาก  $f(x, y)$  ไปเป็นมุม  $\theta$  ฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์  $F_{\theta}(R, S)$  ก็หมุนจาก  $F(X, Y)$  เป็นมุม  $\theta$  เช่นกัน

พิจารณาฟังก์ชันภาพฉาย  $P(\theta, r)$

$$P(\theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) ds \quad \dots(2.7)$$

และฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์  $P(\theta, R)$  ของ  $P(\theta, r)$  คือ

$$P(\theta, R) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(r, s) e^{-iRr} ds dr \quad \dots(2.8)$$

หากเปรียบเทียบสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.8) จะได้ว่า  $P(\theta, R)$  มีค่าเทียบเคียงได้กับ  $F_{\theta}(R, S)$  ตามแนวแกน R หรือ

$$P(\theta, R) = F_{\theta}(R, S) \Big|_{s=0} \quad \dots(2.9)$$

สมการที่ (2.9) คือ ทฤษฎีโปรเจกชัน-สไลซ์ (Projection-slice theorem) ซึ่งกล่าวว่าฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 1 มิติของฟังก์ชันภาพฉาย คือฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ 2 มิติของฟังก์ชันเดิมตามแนวภาพฉายที่ตัดผ่านจุดกำเนิด

ดังนั้นหากมีข้อมูลฟังก์ชันการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันภาพฉายจำนวนอนันต์มุม แล้ว เราจะทราบค่าทุก ๆ จุดของ  $F(X, Y)$  บนระนาบ  $(X, Y)$  และเมื่อทราบค่า  $F(X, Y)$  ก็ สามารถคำนวณกลับเป็น  $f(x, y)$  ด้วยการแปลงฟูรีเยร์ผกผันได้ดังนี้

สมการที่ (2.10) สามารถเขียนให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\theta, R) e^{iR(x \cos \theta + y \sin \theta)} R dR d\theta \quad \dots(2.11)$$

โดยที่  $F(\theta, R)$  เทียบเคียงได้กับฟังก์ชัน  $F_\theta(R, S)|_\theta$  ซึ่งจากทฤษฎีโปรเจกชัน-สไลซ์ (Projection-slice theorem) ก็คือ  $P(\theta, R)$  และด้วยคุณสมบัติการหมุนแบบสมมาตร เราทราบว่า  $F(-\theta, R)$  มีค่าเท่ากับ  $F(\theta + \pi, R)$  ดังนั้น

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta, R) e^{iRr} |R| dR d\theta \quad \dots(2.12)$$

สมการที่ (2.11) เป็นสมการที่ไม่มีขอบเขตจำกัด (Unbounded function) เนื่องจาก  $|R|$  มีค่าลู่ออก (diversion) ดังนั้นค่า  $R$  จึงควรถูกจำกัดด้วยค่า ๆ หนึ่ง  $|R| \leq \Omega$  กำหนดให้ฟังก์ชันของการกรอง หรือฟิลเตอร์ฟังก์ชัน  $H(R) = b(R)|R|$  โดยที่

$$b(R) = \begin{cases} 1 & \text{where } |R| \leq \Omega \\ 0 & \text{where } |R| > \Omega \end{cases} \quad \dots(2.13)$$

กำหนดให้ช่วงห่างของการเก็บข้อมูลตามแนวขวาง (Lateral sampling) มีค่าเป็น  $a$  ดังนั้น จากทฤษฎีบทการสุ่มตัวอย่าง (Sampling theorem) จะได้ว่า

$$\Omega = 2\pi f_{\max} = \frac{\pi}{a} \quad \dots(2.14)$$

สมการที่ (2.12) แทนค่าด้วย และใช้ทฤษฎีคอนโวลูชัน (Convolution) จะได้สมการการสร้างภาพโทโมกราฟี (Reconstruction formula) เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\theta, \tau) \otimes h(x \cos \theta + y \sin \theta - \tau) d\tau d\theta \quad \dots(2.15)$$

เมื่อ  $h(r)$  เป็นการแปลงฟูรีเยร์ผกผันของ  $H(R)$  ซึ่งสามารถเขียนในรูปวิเคราะห์ (Analytic form) ได้เป็น

$$h(r) = \begin{cases} \frac{\Omega^2}{2\pi} & , r = 0 \\ \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{2\Omega}{r} \sin(\Omega r) + \frac{2}{r^2} \cos(\Omega r) - \frac{2}{r^2} \right] & , r \neq 0 \end{cases} \quad \dots(2.16)$$

ฟิลเตอร์ฟังก์ชัน  $h(r)$  สามารถเขียนเป็นรูปไม่ต่อเนื่อง  $h(r_k = a k)$  เมื่อ  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  ได้เป็น

$$\begin{aligned} h(0) &= \frac{\pi}{2a^2} \\ h(r_k) &= -\frac{2}{\pi k^2 a^2} \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคี่} \quad \dots(2.17) \\ h(r_k) &= 0 \quad \text{เมื่อ } k \text{ เป็นเลขคู่} \end{aligned}$$

สมการที่ 17 คือ ฟิลเตอร์ฟังก์ชันของ Ramachandran ซึ่งมีลักษณะที่แกว่งมาก ต่อมา Shepp และ Logan แนะนำฟิลเตอร์ฟังก์ชันที่แกว่งน้อยลงซึ่งทำให้ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีดีขึ้น ดังสมการ

$$h(r_k) = -\frac{4}{\pi a^2 (4k^2 - 1)} \quad , k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm (N-1) \quad \dots(2.18)$$

สมการนี้เรียกว่า "Shepp & Logan filter function" เมื่อนำข้อมูลโปรไฟล์จากการสแกนมาผ่านการคำนวณด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน การคำนวณนี้จะเป็นการปรับข้อมูลให้สามารถแยกแยะรายละเอียดของข้อมูลให้เห็นเด่นชัดมากขึ้น

ดังนั้นการประมาณแบบไม่ต่อเนื่องของสมการการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยวิธีฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน สามารถเขียนได้เป็น

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N P(\theta_j, r_k) \cdot h(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j - r_k) \quad \dots(2.19)$$

เมื่อ  $M$  คือ จำนวนมุมของการเก็บข้อมูล หรือจำนวนโปรไฟล์  
 $N$  คือ จำนวนจุดของการสแกนเก็บข้อมูลในหนึ่งโปรไฟล์

## 2.2 คุณภาพของภาพโทโมกราฟี (Quality of Computed Tomographic Image)

จุดประสงค์ของการสร้างภาพโทโมกราฟีก็เพื่อสร้างภาพตัดขวางที่สามารถแสดงองค์ประกอบภายในของวัตถุได้โดยไม่ต้องทำลาย ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงหมายถึงภาพที่สามารถแสดงรายละเอียดภายในของวัตถุได้ถูกต้องและชัดเจน การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบ่งบอกถึงภาพโทโมกราฟีที่ดี และภาพโทโมกราฟีที่ดียังหมายความถึงระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่ดีอีกด้วย การตรวจสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีดังนี้

### 2.2.1 Pixel noise

เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่เราจะสร้างระบบที่ปราศจากสิ่งรบกวนเลย และ สิ่งรบกวนก็เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีคุณภาพลดลง การวัดค่าสิ่งรบกวนของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการหาค่าสิ่งรบกวนของระบบสามารถคำนวณได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ CT-number บริเวณหนึ่งของภาพโทโมกราฟีที่มีเนื้อสารเดียวกัน โดยแสดงอยู่ในรูปของค่า Pixel noise<sup>[5]</sup>

การหาค่า Pixel noise ขั้นแรกต้องสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีสารชนิดเดียว จากนั้นเลือกข้อมูล CT-number มาจำนวนหนึ่ง (ควรเลือกจำนวนข้อมูลให้อยู่ในช่วง 25 ถึง 100 ตัว ตามคำแนะนำของ ASTM ฉบับที่ E 1441-97<sup>[6]</sup>) จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_i \quad \dots(2.20)$$

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (\mu_i - \bar{\mu})^2}{m - 1} \right]^{1/2} \quad \dots(2.21)$$

เมื่อ	$\bar{\mu}$	คือ ค่าเฉลี่ยของ CT-number ณ บริเวณที่เลือก
	$\mu_i$	คือ ค่า CT-number ต่าง ๆ ที่เลือก
	$m$	คือ จำนวนข้อมูลที่เลือก
	$\sigma$	คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CT-number หรือ Pixel noise ณ บริเวณที่เลือก

จากสมการดังกล่าว ค่า Pixel noise ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนหรือที่นิยมเรียกกันว่าค่า SNR (Signal to Noise Ratio) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$SNR = \frac{\bar{\mu}}{\sigma} \quad \dots(2.22)$$

จากค่า pixel noise และค่า SNR ที่ได้ทำให้สามารถบอกถึงคุณสมบัติของระบบได้โดยเมื่อค่า pixel noise น้อยหรือค่า SNR มากแสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณสมบัติที่ดี เพราะระบบมีสิ่งรบกวนน้อย ในทางกลับกันถ้าค่า pixel noise มากหรือค่า SNR น้อยแสดงว่าระบบการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่ดี

### 2.2.2 Probability Distribution Function (PDF)

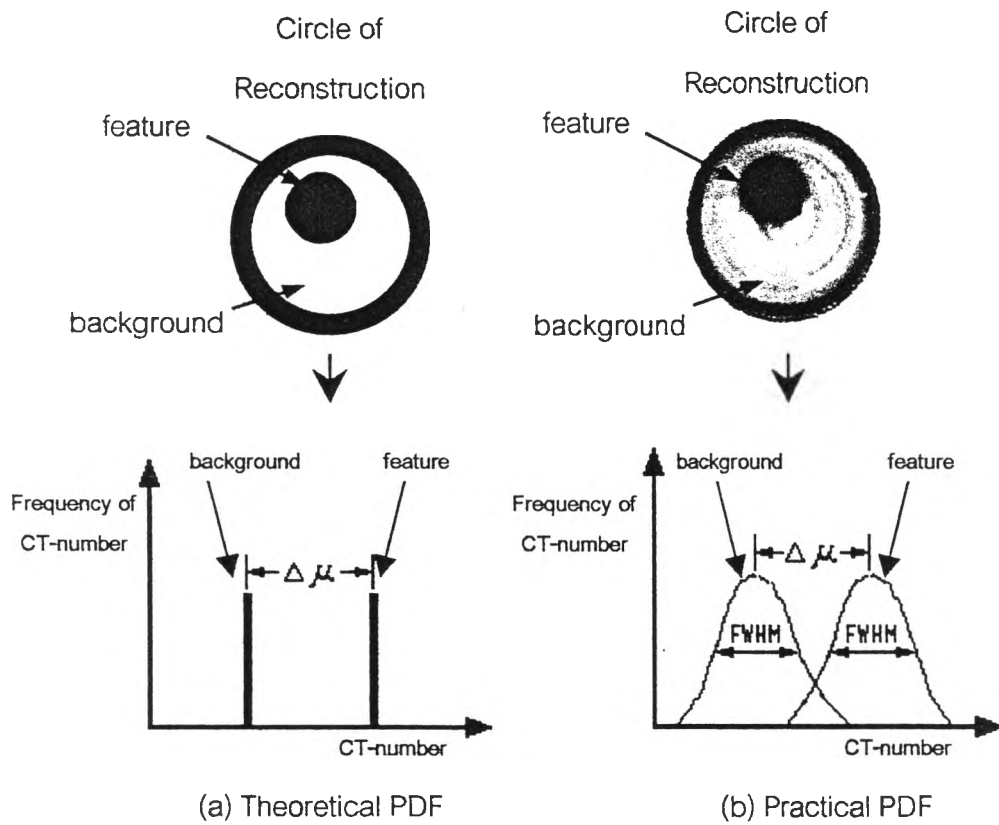
PDF <sup>[5][6]</sup> เป็นกราฟแจกแจงความถี่ที่แสดงค่าความถี่ที่ค่า CT-number ต่าง ๆ จากตัวอย่างของกราฟ PDF ในรูปที่ 2.14 (a) เป็นกราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีในทางทฤษฎี เห็นได้ว่าค่าความถี่ของ CT-number มีเพียงสองค่าซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ CT-number ของวัตถุ (feature ;  $\mu_{feature}$ ) และของแบ็กกราวด์ (background ;  $\mu_{background}$ ) ข้อมูลทั้งสองนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความเปรียบต่าง (Contrast ;  $\Delta \mu$ ) ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$\Delta \mu = \mu_{feature} - \mu_{background} \quad \dots(2.23)$$

ในทางปฏิบัติกราฟ PDF ไม่ได้เหมือนกับในทางทฤษฎี เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ ในการสร้างภาพโทโมกราฟี ทำให้เกิดความมัว (blurring) ในภาพโทโมกราฟีที่สร้างขึ้นซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี ด้วยปัจจัยต่าง ๆ ทำให้ภาพโทโมกราฟีและกราฟ PDF มีลักษณะดังตัวอย่างในรูปที่ 2.14(b) ซึ่งเห็นได้ว่ากราฟ PDF จะมีการกระจายตัวมากกว่าในทางทฤษฎี โดยในการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสามารถวัดได้จากความกว้างของค่า CT-number ที่ค่าความถี่เป็นครึ่งหนึ่งของค่าความถี่สูงสุด หรือ FWHM (Full Width at Half Maximum) ที่เนื้อสารเดียวกัน ดังรูปที่ 2.14(b) สำหรับการหาค่าความเปรียบต่างของกราฟ PDF ในทางปฏิบัติ จะใช้ค่า CT-number ที่มีค่าความถี่สูงสุดของทั้งวัตถุและแบ็กกราวด์ในกราฟ PDF

จากที่กล่าวมา สรุปได้ว่ากราฟ PDF สามารถบอกค่าความเปรียบต่างของภาพโทโมกราฟีและการกระจายตัวของค่า CT-number ในภาพได้โดยวัดจากค่า FWHM ซึ่งค่า FWHM

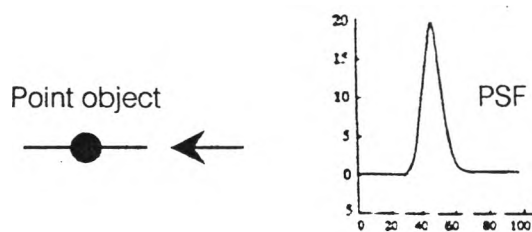
จะสื่อให้เห็นถึงความมัวของภาพโทโมกราฟีได้ ถ้าค่า FWHM มีค่ามากแสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวมาก ในทางกลับกันถ้าค่า FWHM มีค่าน้อยแสดงว่าภาพโทโมกราฟีมีความมัวน้อยหรือมีคุณภาพที่ดีนั่นเอง



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการหาค่า PDF

### 2.2.3 Point Spread Function (PSF)

PSF<sup>[6]</sup> เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่า Resolution สามารถทำได้โดยการสร้างภาพโทโมกราฟีของวัตถุที่มีลักษณะเป็นจุด (point object) จากนั้นอ่านค่า CT-number จากตำแหน่งแถวของข้อมูลในภาพโทโมกราฟี ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของข้อมูลโปรไฟล์ดังรูปที่ 2.15



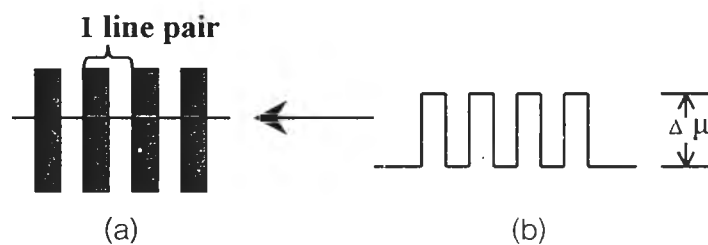
รูปที่ 2.15 Point Spread Function



ในการหาค่า Resolution ขั้นแรกเพิ่มขนาดของ point object ขึ้นจนกว่าค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ข้อมูลจะมีค่าคงที่ ขึ้นต่อมาให้ค่อย ๆ ลดขนาดของ point object ลงในการลดขนาดของ point object ลงจะทำให้ค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ข้อมูลมีค่าลดลงด้วย เมื่อใดที่ค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ลดลงเหลือ 20% ของค่าที่คงที่ในขั้นตอนแรกขนาดของ point object ณ ตำแหน่งนี้ก็คือค่า Resolution ของระบบนั่นเอง

#### 2.2.4 Modulation Transfer Function (MTF)

MTF<sup>[6]</sup> ปรับปรุงมาจาก Point Spread Function (PSF) โดยการแปลงฟูรีเยร์ ค่า CT-number ของวัตถุมีความแตกต่างกัน เมื่อใช้วัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งมาจัดวางให้มีระยะห่างเท่ากับกับความหนาของวัตถุ ออกแบบให้แท่งวัตถุมีความหนาแตกต่างกันหลาย ๆ ค่า อาจเรียกวัตถุตัวอย่างนี้ว่า "slit" ดังรูปที่ 2.16(a)



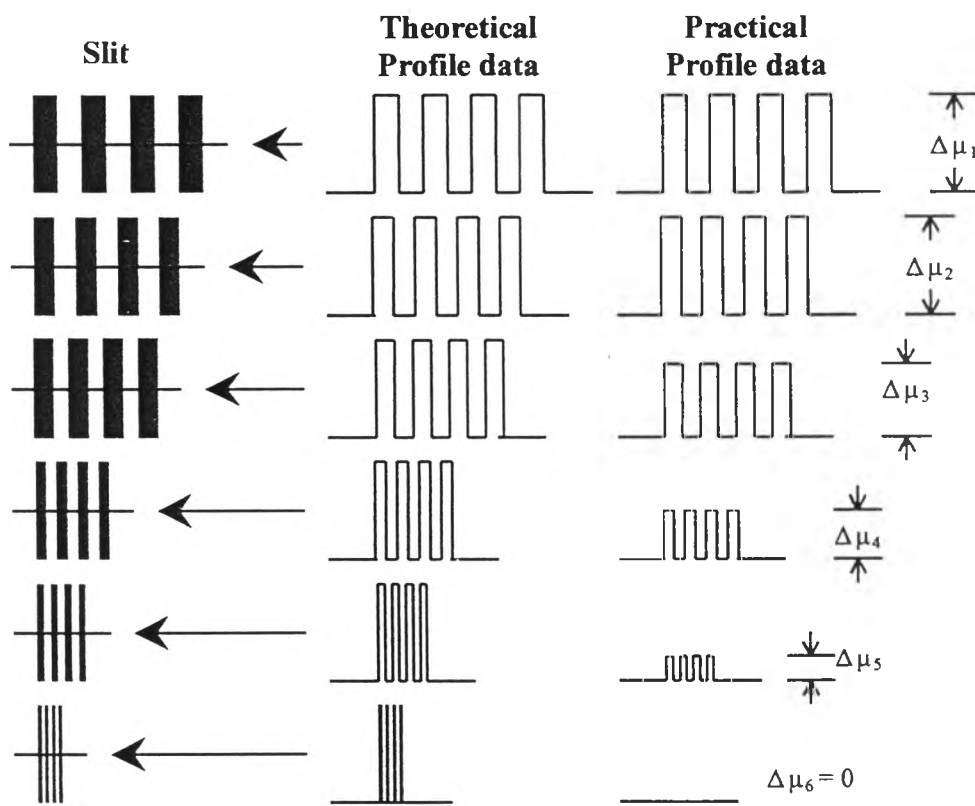
รูปที่ 2.16 ภาพของ slit และตัวอย่างโปรไฟล์ของ slit

การหาค่า MTF ทำโดยการอ่านค่า CT-number จากตำแหน่งแถวของข้อมูลในภาพ slit ดังรูปที่ 2.16(b) ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของโปรไฟล์ความถี่โดยวัดจากจำนวนแท่ง slit ที่มองเห็นภายในหนึ่งเซนติเมตร (มีหน่วยเป็น เส้นคู่ต่อเซนติเมตร หรือ line pair/cm.) เช่น slit มีความหนา 5 มิลลิเมตรเมื่อวางเรียงกันโดยเว้นช่องว่าง 5 มิลลิเมตรตามความหนาของ slit ในหนึ่งเซนติเมตรก็มีแท่ง slit 1 แท่งหรือ 1 เส้นคู่ต่อเซนติเมตร จากนั้นหาความแตกต่างระหว่างค่า CT-number สูงสุดกับต่ำสุดจากโปรไฟล์ความถี่โดยค่าที่ได้ก็คือค่าความแปรปรวนต่าง ( $\Delta\mu$ ) ของ slit ในทางทฤษฎีค่าความแปรปรวนต่างของโปรไฟล์ความถี่จะคงที่ แม้ความถี่ของ slit จะสูงขึ้นดังรูป 2.17 แต่ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อ slit มีความถี่สูงขึ้นค่าความแปรปรวนต่างของโปรไฟล์ความถี่สามารถลดลงได้ดังรูป 2.17 โดยในช่วงแรกเมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น  $\Delta\mu_1$  ก็ยังเท่ากับ  $\Delta\mu_2$  แต่พอเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อย ๆ ความแปรปรวนต่างก็ค่อย ๆ ลดลงตามลำดับจนกระทั่ง  $\Delta\mu_5$  ลดลงเป็นศูนย์ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่า MTF ได้จากสมการดังต่อไปนี้

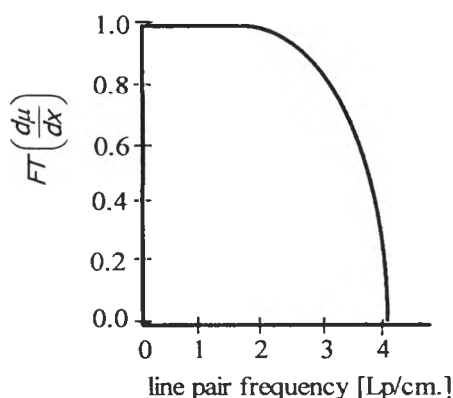
$$MTF = \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_{max}} \quad \dots(2.24)$$

เมื่อ  $\Delta\mu$  คือ ค่าความเปรียบต่างของโปรไฟล์ความถี่ที่ความถี่ใด ๆ  
 $\Delta\mu_{max}$  คือ ค่าความเปรียบต่างสูงสุด

ถ้าพิจารณาสมการข้างต้นแล้วเมื่อความถี่เส้นคู่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเปรียบต่างลดลงและยังผลให้ค่า MTF ลดลงด้วย จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 โปรไฟล์ข้อมูลของ slit เมื่อความถี่สูงขึ้น



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MTF กับความถี่เส้นคู่ ที่ค่า MTF เท่ากับ 1 หรือ 100% แสดงว่าเป็นภาพที่มีความเหมือนวัตถุมาก และเมื่อค่า MTF น้อยลงก็แสดงว่าภาพมีความเหมือนวัตถุน้อยลง สำหรับในงานด้านอุตสาหกรรมกำหนดให้ใช้ค่า MTF ที่ 20% ในการคำนวณหาค่า Resolution โดยค่า Resolution สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$resolution = \frac{1}{2f} \quad \dots(2.25)$$

เมื่อ  $f$  คือ ค่าความถี่เส้นคู่ที่ MTF 20%

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี

ปัจจัยที่เกิดจากสิ่งรบกวนของข้อมูลทางรังสี<sup>[6]</sup> เนื่องจากภาพโทโมกราฟีเกิดจากการคำนวณข้อมูลทางรังสี ซึ่งข้อมูลทางรังสีที่ได้จะมีความแปรปรวนตามลักษณะของการปลดปล่อยรังสีแบบสุ่ม (random) ความแปรปรวนของข้อมูลมีผลต่อภาพโทโมกราฟีโดยตรง ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลสูงก็จะส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้มีค่า pixel noise สูงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ สำหรับการแก้ปัญหาทำได้โดยการเพิ่มจำนวนนับทางรังสี ซึ่งการเพิ่มจำนวนนับทางรังสีจะช่วยลดค่าสิ่งรบกวน ( $\sigma_d$ ) ดังสมการที่ 2.26

$$\sigma_d \cong \left[ \frac{1}{n \exp(-2\mu_0(\bar{E})R_0)} + \frac{1}{n} \right]^{1/2} \quad \dots(2.26)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนนับทางรังสี

$\mu_0(\bar{E})$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัตถุที่พลังงาน  $\bar{E}$

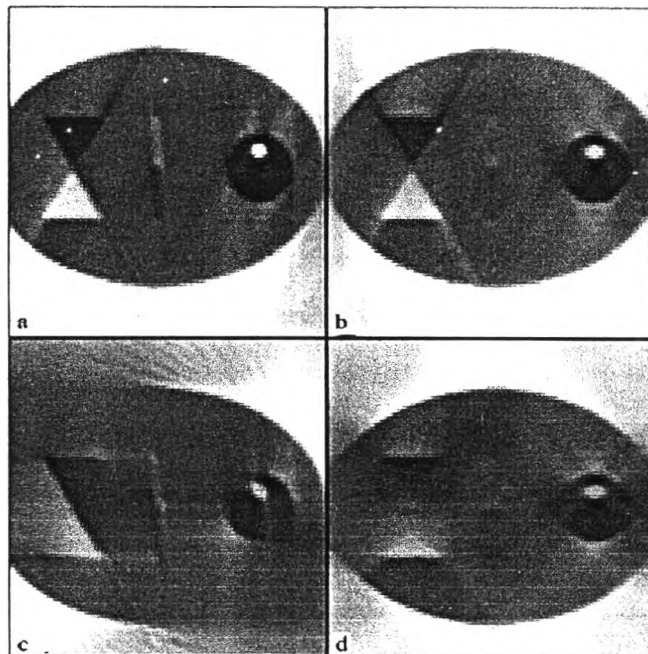
$\bar{E}$  คือ ค่าพลังงานของรังสีเอกซ์

$R_0$  คือ รัศมีของการสร้างภาพ

จากสมการที่ 2.26 ทำให้ทราบว่า การลดสิ่งรบกวนในการเก็บข้อมูลได้โดยการเพิ่มค่า  $n$   $\mu_0(\bar{E})$  และ  $R_0$  ในทางปฏิบัติการเพิ่มค่า  $n$  เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่กว่า โดยถ้าเก็บข้อมูลด้วยหัววัดทางรังสี การเพิ่มค่า  $n$  สามารถทำได้โดยการเพิ่มเวลาในการเก็บข้อมูลนั่นเอง

**ปัจจัยที่เกิดจากข้อมูลที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชัน** ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1.6 ว่าถ้าไม่ได้ปรับปรุงข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยฟิลเตอร์ฟังก์ชันก่อนการคำนวณสร้างภาพแล้ว จะทำให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้เกิดความมัวมากขึ้น ซึ่งความมัวดังกล่าว จะอยู่ในรูปการกระจายตัวของค่า CT-number ถ้าการกระจายตัวสูงก็คือภาพมีความมัวมากโดยอาจวัดจากค่า Pixel noise การใช้ฟิลเตอร์ฟังก์ชันก็เพื่อให้ลดความมัวของภาพโทโมกราฟีลง

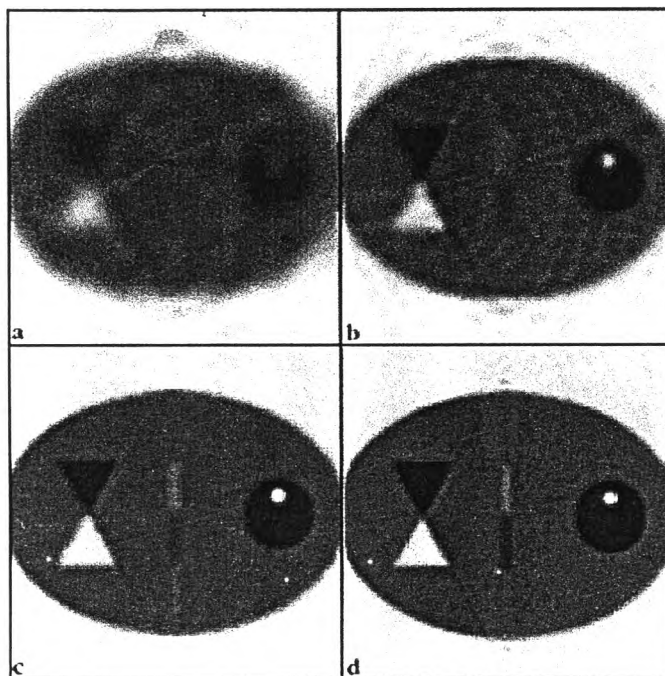
**ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนการสแกนเก็บข้อมูลโปรไฟล์ที่ไม่เพียงพอ** คือการหมุนวัตถุในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีไม่ครบครึ่งรอบ หรือ 180 องศา ทำให้ข้อมูลขาดรายละเอียดที่เพียงพอ ส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้ไม่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.19 เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงต้องสแกนเก็บข้อมูลให้ได้อย่างน้อย 180 องศา



รูปที่ 2.19 ภาพโทโมกราฟีที่ได้จากจำนวนโปรไฟล์ที่ไม่เกิน

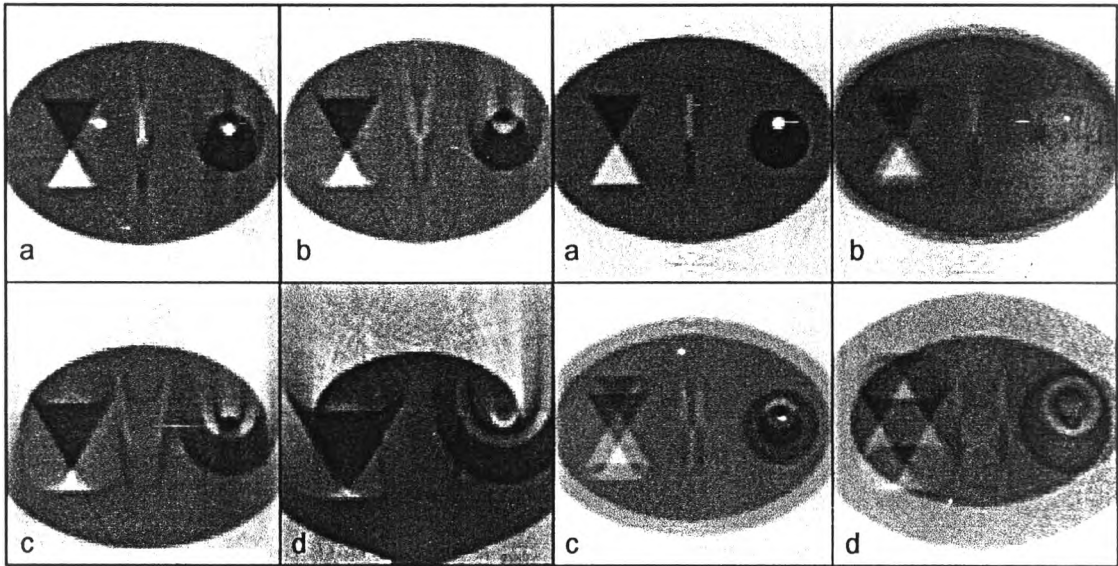
(a) 150° (b) 120° (c) 90° และ (d) 90° มุมที่อยู่ตรงข้าม

ปัจจัยที่เกิดจากจำนวนเรย์ซั่มต่อภาพโทโมกราฟี เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้ไม่คมชัดและขาดรายละเอียด ทั้งนี้จำนวนเรย์ซั่มต่อภาพที่น้อยเกินไป หรืออาจจะมีเหตุผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสีโตเกินไป ทำให้เก็บรายละเอียดได้ไม่เพียงพอ ความคมชัดของภาพโทโมกราฟีที่ได้จึงต่ำ ดังรูปที่ 2.20 เพื่อให้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงควรจะสร้างภาพโทโมกราฟีจากจำนวนเรย์ซั่มที่สูง ๆ



รูปที่ 2.20 ผลของจำนวนเรย์ซั่มต่อภาพโทโมกราฟี

ปัจจัยที่เกิดจากความคลาดจุดหมุน ความคลาดจุดหมุนคือการที่จุดกึ่งกลางของการหมุนไม่ตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ การที่จุดหมุนผิดตำแหน่งนั้นจะส่งผลให้การแบ็กโปรเจกชันผิดพลาด ภาพโทโมกราฟีที่ได้จึงผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงดังรูปที่ 2.21 และ 2.22 จากรูปดังกล่าวยิ่งความคลาดจุดหมุนของข้อมูลมากขึ้นภาพโทโมกราฟีที่ได้ก็จะมีส่วนโค้งเว้ามากขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่ดีจึงควรจัดวางจุดหมุนให้ตรงกับจุดกึ่งกลางของข้อมูลโปรไฟล์ ก่อนนำข้อมูลโปรไฟล์ไปคำนวณสร้างภาพ



รูปที่ 2.21

รูปที่ 2.22

ผลจากความคลาดจุดหมุน (a) 0.5% (b) 1.0% (c) 2.5% (d) 5.0%

ของมุมโปรไฟล์จาก 0 - 180 องศา และ 0 - 360 องศา ตามลำดับ