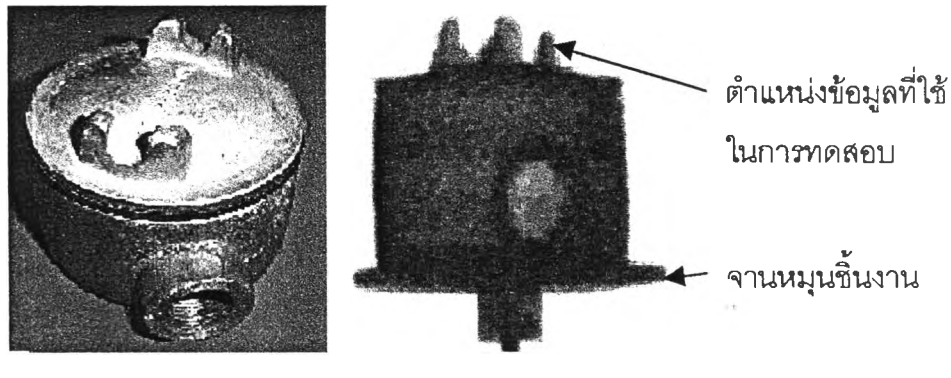
บทที่ 4
การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดสอบ

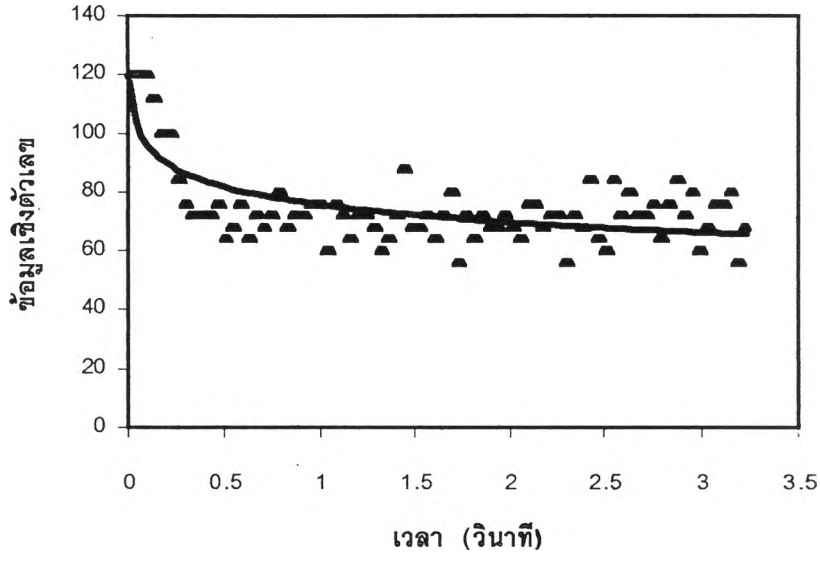
4.1 การทดสอบเพื่อหาเวลาในการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของฉากเรืองรังสี

เนื่องจากในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจะต้องหมุนวัตถุไปเป็นมุมทีละน้อย ๆ ภาพบนฉากเรืองรังสีก็มีการเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของวัตถุ ทำให้ข้อมูลเชิงตัวเลขจากภาพมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่ารหัสสีของภาพโดยจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปจนกระทั่งคงที่ ณ ระดับหนึ่ง ซึ่งในการเก็บข้อมูลสำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้นไม่ต้องการข้อมูลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ จึงต้องทดสอบหาเวลาที่ฉากเรืองรังสีตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ เพื่อคำนวณหาเวลาที่ใช้หน่วงในโปรแกรมก่อนการเก็บข้อมูล

การทดสอบเพื่อหาเวลาในการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของฉากเรืองรังสีจะอาศัยการเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขหนึ่งเรย์ซัมของภาพทางรังสีและข้อมูลของเวลาขณะที่เก็บข้อมูล โดยเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขจากจุดภาพที่มีการเปลี่ยนค่าสีของจุดภาพ ในการทดสอบนี้ได้ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ของวัตถุที่มีความหนาหลายระดับยึดติดอยู่บนแท่นหมุนของสเต็ปปิงมอเตอร์ดังรูปที่ 4.1 เมื่อหมุนมอเตอร์ไปเรื่อย ๆ ภาพจากระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จะเปลี่ยนตามไปด้วย จากนั้นหยุดการหมุนของวัตถุและเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขในตำแหน่งที่ภาพมีการเปลี่ยนแปลงพร้อมทั้งบันทึกเวลาในขณะเก็บข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลเชิงตัวเลขและข้อมูลเวลาที่บันทึกไว้มาเขียนเป็นกราฟ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพชิ้นงานทดสอบและภาพถ่ายด้วยรังสีของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

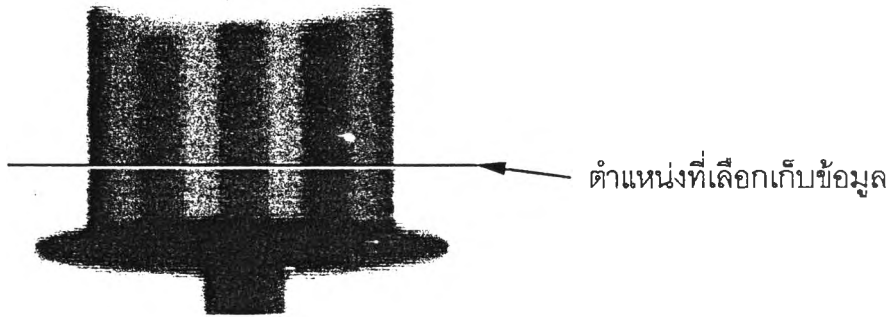


รูปที่ 4.2 กราฟผลการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของฉากเรืองรังสี

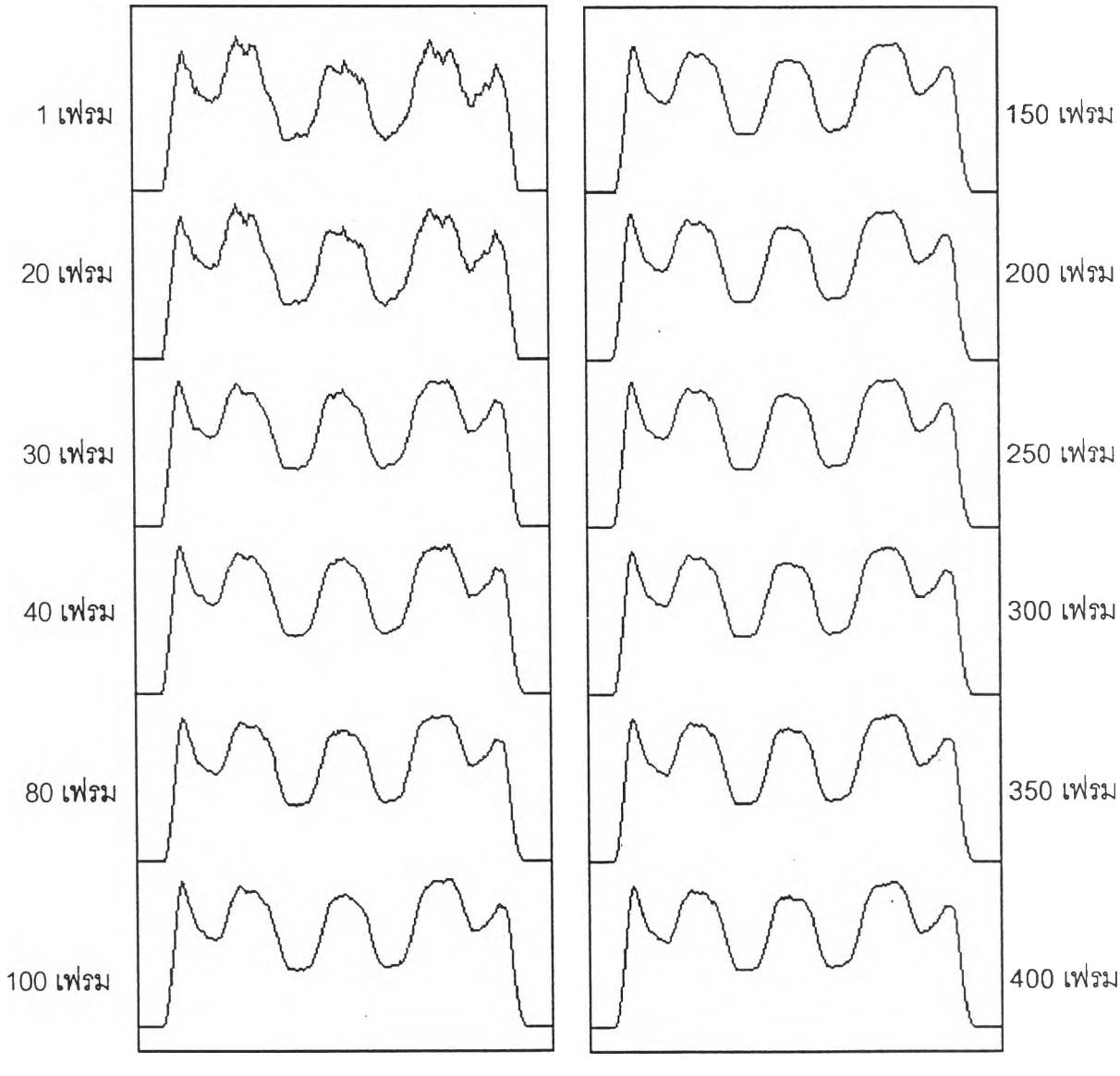
จากผลการทดลองเก็บข้อมูลจำนวน 400 ครั้ง ณ ตำแหน่งดังรูปที่ 4.1 ในระยะเวลา 3.24 วินาทีเห็นได้ว่าเมื่อช่วงแรกค่าสีเริ่มต้นของจุดภาพจะอยู่ที่ประมาณ 120 แล้วค่อย ๆ ลดลงไปคงที่อยู่ที่ประมาณ 68 ภายในระยะเวลา 0.324 วินาที ซึ่งจะได้ค่าการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของฉากเรืองรังสีมีค่าเท่ากับ 160 หน่วยต่อวินาที ความเป็นไปได้สูงสุดในการเปลี่ยนแปลงค่าสีของจุดภาพคือ 256 ระดับ (เปลี่ยนจาก 0 ถึง 255 หรือ 255 ไปเป็น 0) เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของค่าสีจะใช้เวลา 1.6 วินาที ดังนั้นในการเก็บข้อมูลโปรไฟล์จากเทคนิคโทรทัศน์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จึงควรจะหน่วงเวลาไว้ประมาณ 1.6 วินาที ก่อนที่จะอ่านข้อมูลโปรไฟล์หลังจากวัตถุหมุนเปลี่ยนมุมไป เมื่อพิจารณาเวลาที่ได้จากการทดลองเห็นได้ว่า 1.6 วินาทีเป็นเวลาที่ค่อนข้างนานทั้งนี้เพราะชนิดของฉากเรืองรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะกับรังสีเอกซ์

4.2 การทดลองปรับปรุงข้อมูลโปรไฟล์ด้วยเทคนิคการรวมเฟรม

การปรับปรุงคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่เก็บข้อมูลด้วยระบบโทรทัศน์สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการรวมเฟรม ในการทดลองอาศัยการเก็บข้อมูลโปรเจกชันด้วยเทคนิคการรวมเฟรมที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กัน ภาพถ่ายด้วยรังสีของวัตถุและตำแหน่งที่เลือกเก็บข้อมูลเป็นไปดังรูปที่ 4.3 จากข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณปรับแก้ค่าด้วยวิธี Shading correction จะได้โปรไฟล์ของข้อมูลที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยรังสีของวัตถุสำหรับทดลองเก็บข้อมูลด้วยเทคนิคการรวมเฟรม



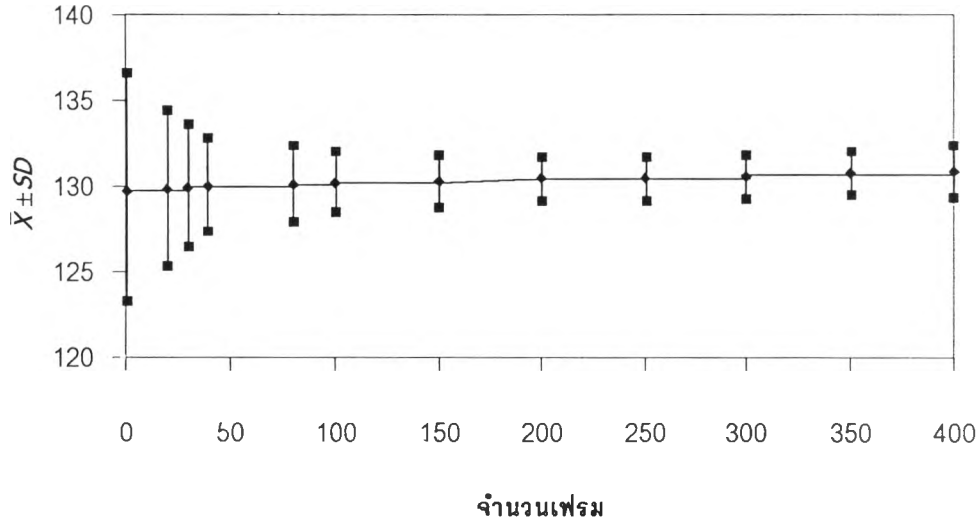
รูปที่ 4.4 ข้อมูลโปรไฟล์แบบรวมเฟรมที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กัน

จากโปรไฟล์ของข้อมูลแบบรวมเฟรมในรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลลดลงตามจำนวนเฟรมที่เพิ่มขึ้น และในช่วงที่จำนวนเฟรมสูง ๆ โปรไฟล์ของข้อมูลแบบรวมเฟรมจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายของข้อมูลเชิงตัวเลขจึงทดลองเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ ในตำแหน่งเรย์ซัมเดียวกันทั้งหมด 500 ครั้งแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเชิงตัวเลขที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟแสดงการกระจายตัวของข้อมูลเชิงตัวเลขที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเชิงตัวเลขที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ

จำนวนเฟรม	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล*	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล
1 เฟรม	129.7	7.26
20 เฟรม	129.8	3.47
30 เฟรม	129.8	2.96
40 เฟรม	129.9	2.63
80 เฟรม	130.1	1.87
100 เฟรม	130.1	1.64
150 เฟรม	130.28	1.4
200 เฟรม	130.43	1.23
250 เฟรม	130.49	1.23
300 เฟรม	130.7	1.22
350 เฟรม	130	1.23
400 เฟรม	130.5	1.3

* เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลเชิงตัวเลขจากจำนวน 500 ครั้ง



รูปที่ 4.5 กราฟการกระจายตัวของข้อมูลเชิงตัวเลขที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ

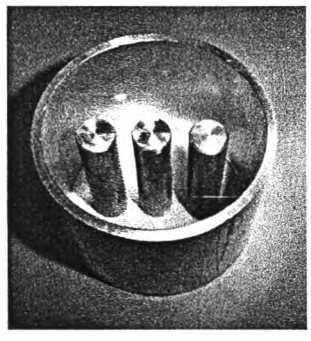
จากกราฟในรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าในช่วงแรก ๆ ข้อมูลจะมีความแปรปรวนลดลง และจะเริ่มคงที่ ๆ จำนวนเฟรมประมาณ 100 เฟรม การที่ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเชิงตัวเลขลดลงเป็นการแสดงให้เห็นว่าข้อมูลโปรไฟล์จะมีความแปรปรวนลดลงด้วย เมื่อนำข้อมูลโปรไฟล์ที่ผ่านการรวมเฟรมไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีแล้วภาพที่ได้จะมีคุณภาพที่ดีขึ้น

4.3 การทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลแบบรวมเฟรม

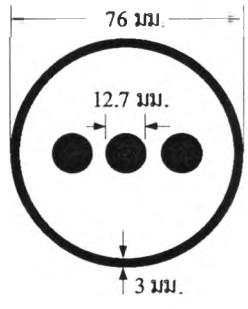
การทดสอบหาความเหมาะสมของจำนวนข้อมูลแบบรวมเฟรม เพื่อใช้ในการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยระบบโทรทัศน์ อาศัยการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ได้ในเชิงของ Pixel noise และค่า SNR ในการทดลองนี้ใช้ระบบเก็บข้อมูลภาพแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่พัฒนาขึ้นเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมจากชิ้นงาน 2 ชิ้น โดยสร้างภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กันจำนวน 12 ภาพต่อหนึ่งชิ้นงาน จากนั้นนำข้อมูล CT- number จำนวน 100 ค่าจากภาพโทโมกราฟีในบริเวณที่เป็นวัตถุชนิดเดียวกัน (ในที่นี้คือบริเวณที่เป็นสีดำ) มาคำนวณค่า pixel noise และค่า SNR จากนั้นนำค่าที่ได้แสดงผลบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรม กับ ค่า pixel noise และ จำนวนเฟรม กับ ค่า SNR เพื่อใช้วิเคราะห์หาจำนวนเฟรมที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยระบบโทรทัศน์

ชิ้นงาน A

ชิ้นงาน A เป็นชิ้นงานแรกที่ใช้ในการทดสอบทำจากอะลูมิเนียม มีรูปร่างเป็นวัตถุทรงกระบอก ซึ่งภายในบรรจุด้วยแท่งอะลูมิเนียมกลมตันจำนวน 3 แท่งวางเรียงในแนวเดียวกัน ซึ่งภาพและแผนภาพของชิ้นงาน A แสดงดังรูปที่ 4.6



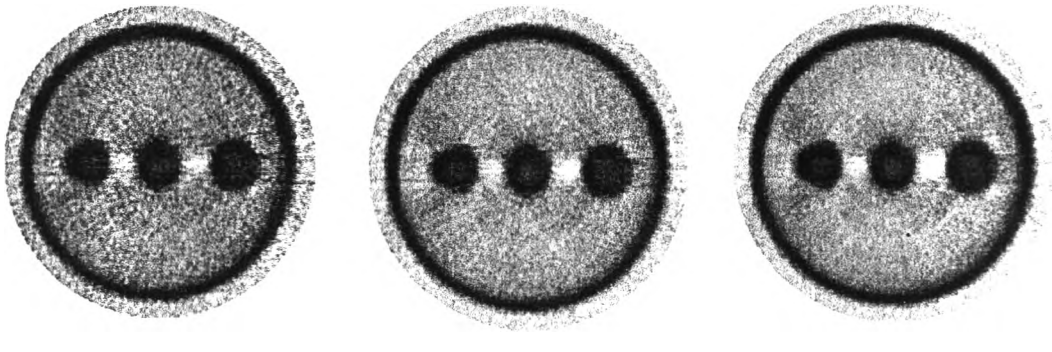
ภาพของชิ้นงาน A



แผนภาพของชิ้นงาน A

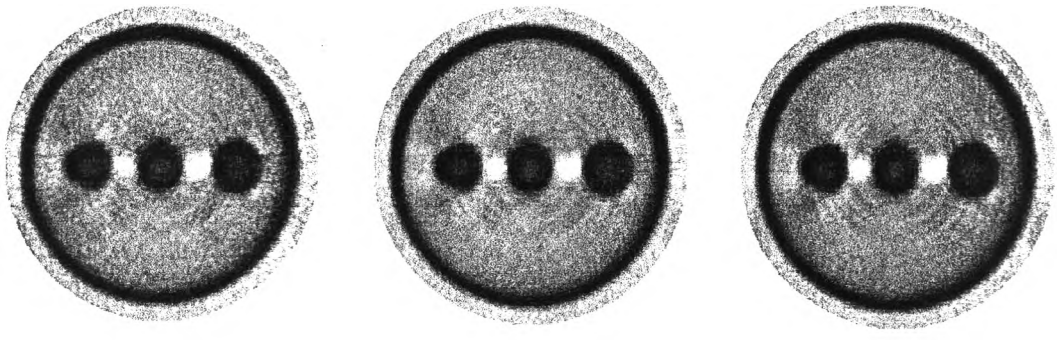
รูปที่ 4.6 ภาพและแผนภาพของชิ้นงาน A

การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน A ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ตั้งแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ โดยหมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 สำหรับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ค่า Pixel noise ค่า SNR และเวลาในการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรม กับ ค่า Pixel noise และจำนวนเฟรม กับ ค่า SNR แสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

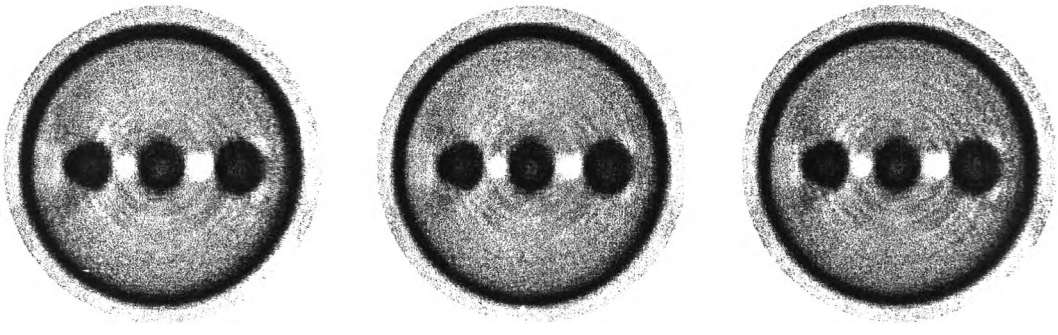


(a) 1 เฟรม **(b) 20 เฟรม** **(c) 30 เฟรม**

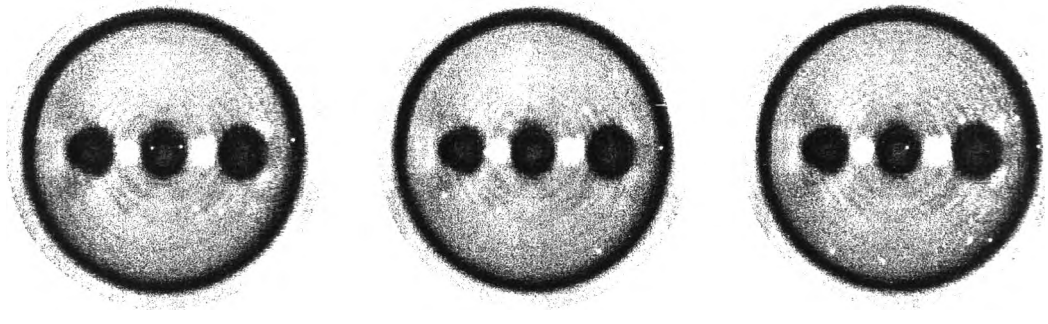
รูปที่ 4.7 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน A ที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ



(d) 40 เฟรม (e) 80 เฟรม (f) 100 เฟรม



(g) 150 เฟรม (h) 200 เฟรม (i) 250 เฟรม



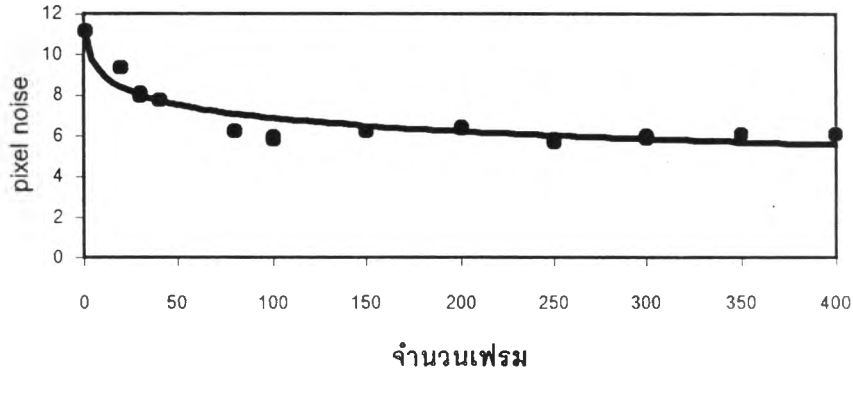
(j) 300 เฟรม (k) 350 เฟรม (l) 400 เฟรม

รูปที่ 4.7 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน A ที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ (ต่อ)

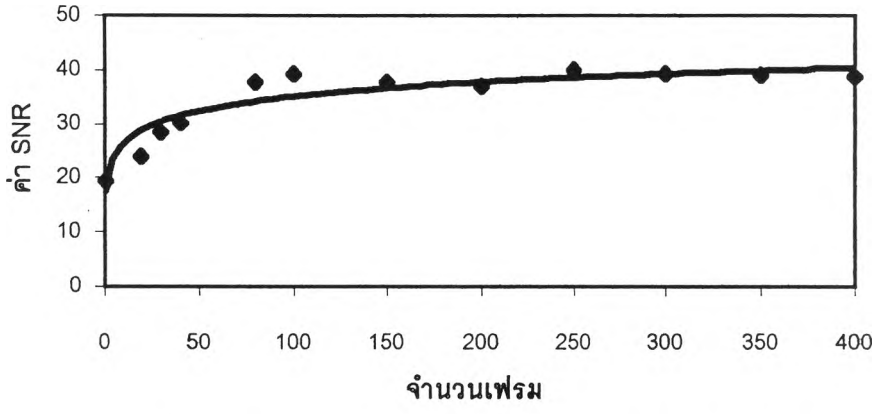
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบของชิ้นงาน A

จำนวนเฟรม	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล*	Pixel noise	ค่า SNR	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
1 เฟรม	229.2	11. 6	19.7	2 นาที 48 วินาที
20 เฟรม	231.2	9.36	24.7	3 นาที 7 วินาที
30 เฟรม	232	8.04	28.8	3 นาที 17 วินาที
40 เฟรม	233.5	7.76	30.09	3 นาที 27 วินาที
80 เฟรม	234	6.2	37.74	4 นาที 8 วินาที
100 เฟรม	232.5	5.95	39.07	4 นาที 28 วินาที
150 เฟรม	233	6.2	37.58	5 นาที 18 วินาที
200 เฟรม	236	6.4	36.875	6 นาที 9 วินาที
250 เฟรม	233	5.83	39.96	6 นาที 59 วินาที
300 เฟรม	235	6.01	39.1	7 นาที 50 วินาที
350 เฟรม	236	6.07	38.88	8 นาที 40 วินาที
400 เฟรม	236	6.1	38.69	9 นาที 31 วินาที

* เป็นค่าเฉลี่ยของ CT-number จากจำนวน 100 จุดภาพ ณ บริเวณเดียวกันทุกภาพ



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรมกับค่า Pixel noise

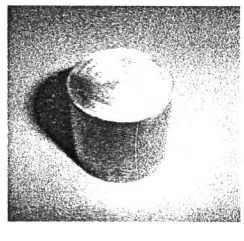


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรมกับค่า SNR

ผลการทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลแบบรวมเฟรมทดลองเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมของชิ้นงาน A ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน A มีความละเอียดของภาพขนาด 211 x 211 เรย์ซัมใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยที่สุดที่ 1 เฟรมเป็นเวลา 2 นาที 48 วินาที และใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมากที่สุดที่ 400 เฟรมเป็นเวลา 9 นาที 31 วินาที จากจำนวนโปรไฟล์ทั้งหมด 100 โปรไฟล์ พบว่าเมื่อจำนวนเฟรมเพิ่มขึ้นเวลาในการเก็บข้อมูลก็มากขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่า Pixel noise ในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะคงที่ตั้งแต่จำนวนเฟรมที่ 100 เฟรม เป็นต้นไป ทำนองเดียวกันค่า SNR มีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะคงที่ ณ จำนวนเฟรมที่ 100 เฟรม เช่นกัน การลดลงของค่า Pixel noise แสดงถึงการลดลงของความมัวในภาพโทโมกราฟี

ชิ้นงาน B

ชิ้นงาน B เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ภาพและแผนภาพของชิ้นงาน B แสดงดังรูปที่ 4.10



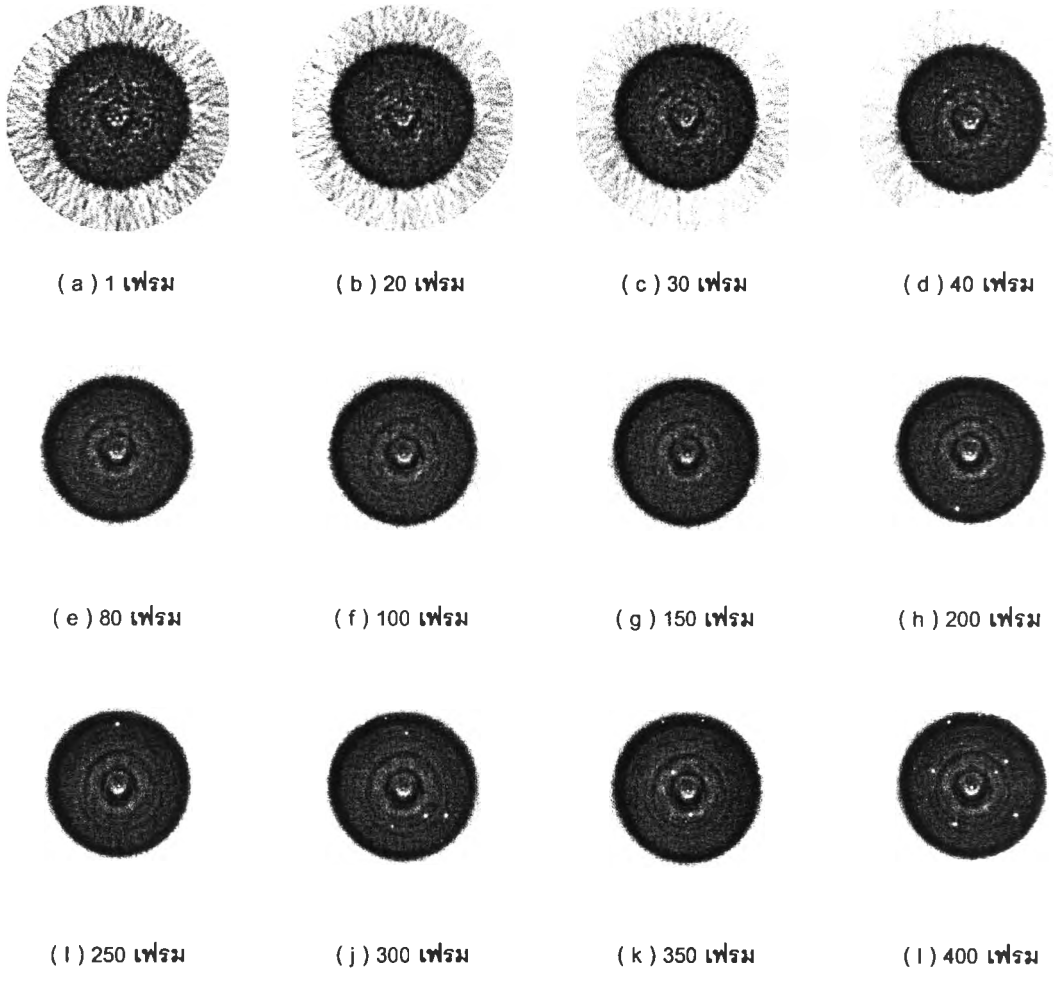
ภาพของชิ้นงาน B

แผนภาพของชิ้นงาน B

รูปที่ 4.10 ภาพและแผนภาพของชิ้นงาน B

การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน B ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ หมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้ง

ละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 สำหรับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ค่า Pixel noise ค่า SNR และเวลาในการเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรม กับ ค่า Pixel noise และจำนวนเฟรม กับ ค่า SNR แสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



(a) 1 เฟรม (b) 20 เฟรม (c) 30 เฟรม (d) 40 เฟรม

(e) 80 เฟรม (f) 100 เฟรม (g) 150 เฟรม (h) 200 เฟรม

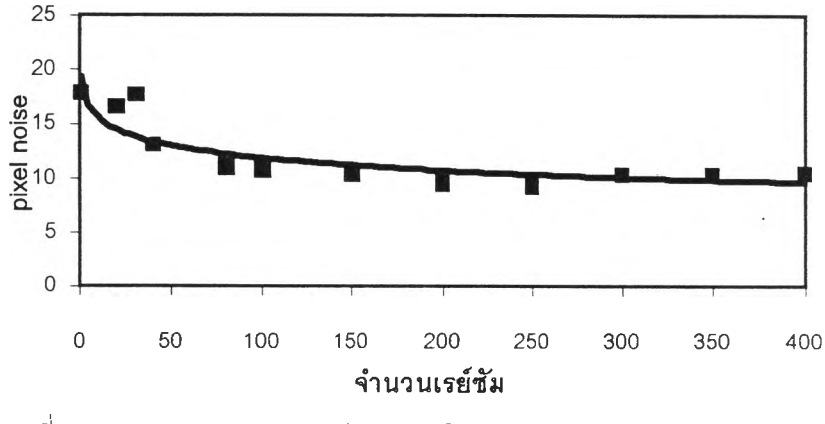
(I) 250 เฟรม (j) 300 เฟรม (k) 350 เฟรม (l) 400 เฟรม

รูปที่ 4.11 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน B ที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ

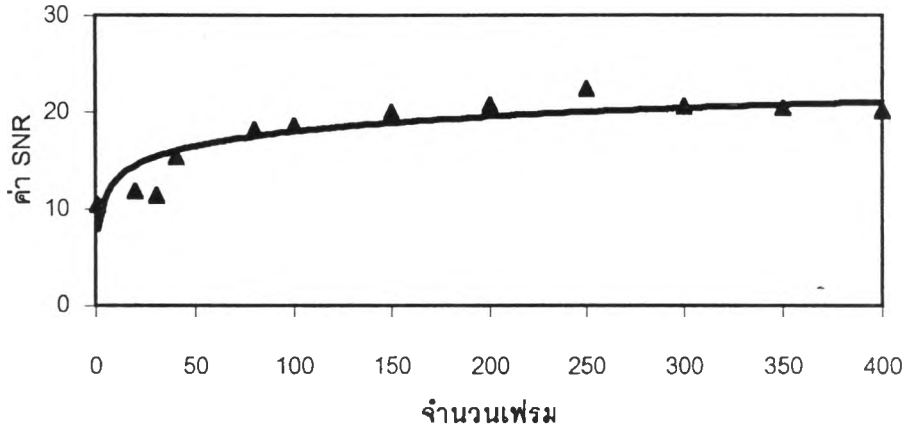
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบของชิ้นงาน B

จำนวนเฟรม	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล*	Pixel noise	ค่า SNR	เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
1	186	17.76	10.47	2 นาที 47 วินาที
20	195.5	16.5	11.84	3 นาที 3 วินาที
30	199.3	17.57	11.34	3 นาที 11 วินาที
40	197.96	12.95	15.28	3 นาที 20 วินาที
80	201.6	11.1	18.16	3 นาที 52 วินาที
100	202.9	10.9	18.6	4 นาที 8 วินาที
150	204.4	10.2	20.03	4 นาที 48 วินาที
200	200	9.63	20.77	5 นาที 29 วินาที
250	208.25	9.32	22.35	6 นาที 9 วินาที
300	212	10.3	20.58	6 นาที 50 วินาที
350	211	10.3	20.49	7 นาที 30 วินาที
400	209	10.4	20.09	8 นาที 10 วินาที

* เป็นค่าเฉลี่ยของ CT-number จากจำนวน 100 จุดภาพ ณ บริเวณเดียวกันทุกภาพ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรมกับค่า Pixel noise



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเฟรมกับค่า SNR

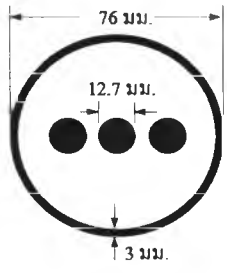
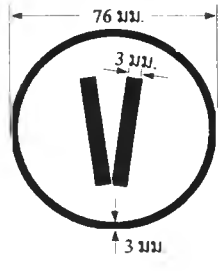
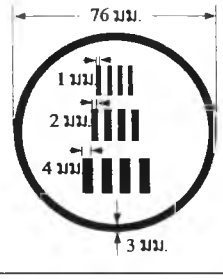
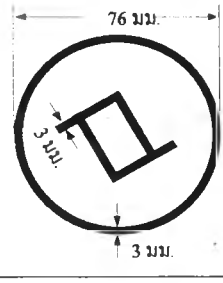
ผลการทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลแบบรวมเฟรมทดลองเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมของชิ้นงาน B ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน B มีความละเอียดของภาพขนาด 141 x 141 เรย์ซัมใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยที่สุดที่ 1 เฟรม เป็นเวลา 2 นาที 47 วินาที และใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมากที่สุด ที่ 400 เฟรม เป็นเวลา 8 นาที 10 วินาทีจากข้อมูลโปรไฟล์ 100 ข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน A เห็นได้ว่าที่จำนวนเฟรมเท่ากันชิ้นงาน B จะใช้เวลาน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะความละเอียดของภาพชิ้นงาน B น้อยกว่าจึงใช้เวลาในการเก็บข้อมูลน้อยกว่า และจากผลการทดลองค่า Pixel noise ที่ 20 เฟรม และ 30 เฟรมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่จำนวนเฟรมน้อย ๆ ความแปรปรวนจากการสุ่ม (random) ของข้อมูลมีอิทธิพลมากกว่าการเพิ่มจำนวนเฟรมที่ใช้ เมื่อเพิ่มจำนวนเฟรมขึ้นเรื่อย ๆ พบว่า ค่า Pixel noise และค่า SNR เริ่มจะคงที่ ๆ 100 เฟรม ทั้งชิ้นงาน A และ B จากผลการทดลองหาจำนวนเฟรมที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิคการรวมเฟรมจากระบบที่พัฒนาขึ้นจึงควรเลือกให้มากกว่าที่ 100 เฟรม สำหรับงานวิจัยนี้เลือกที่จำนวนเฟรม 250 เฟรม ในการทดลองสร้างภาพโทโมกราฟี

4.4 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบ

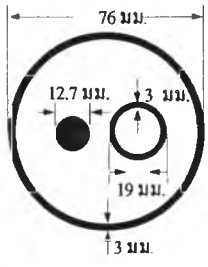
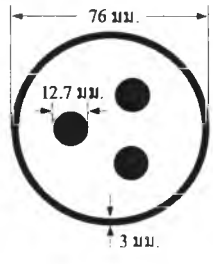
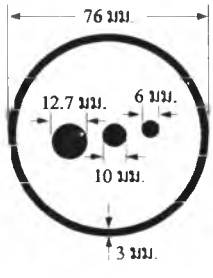
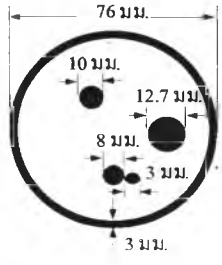
4.4.1 การออกแบบชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ในงานงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ชิ้นงานที่ออกแบบขึ้นเอง และชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด สำหรับชิ้นงานที่ออกแบบขึ้นเองนี้แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งในตารางจะแสดงชื่อของชิ้นงานทดสอบ แผนภาพของชิ้นงานทดสอบ และคำอธิบายรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ และสำหรับชิ้นงานอุตสาหกรรมบางชนิดจะแสดงในภายหลัง

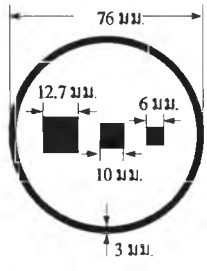
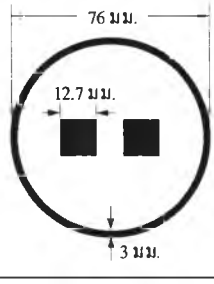
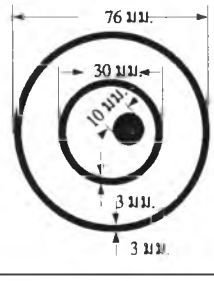
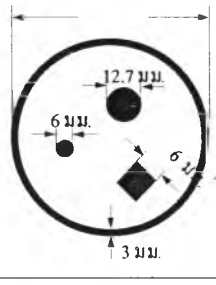
ตารางที่ 4.4 บอกรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบขึ้น

ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงาน	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
1. ชิ้นงาน A		ชิ้นงาน A เป็นท่ออะลูมิเนียมที่มีแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกตันขนาดเท่ากันจำนวน 3 อัน จัดเรียงในแนวเดียวกันดังในแผนภาพชิ้นงาน
2. ชิ้นงาน B		ชิ้นงาน B เป็นแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกตัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 32 มิลลิเมตร ใช้ในทดสอบเทคนิคการรวมเฟรม
3. ชิ้นงาน C		ชิ้นงาน C ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนา 3 มม. จำนวน 2 แผ่นจัดเรียงเป็นรูปตัววีทำมุม 10 องศา อยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
4. ชิ้นงาน D		ชิ้นงาน D มีลักษณะเป็นแผ่น slit ทำจากอะลูมิเนียมวางเรียงกัน 3 แถว แต่ละแถวมีความหนาของ slit 1 มม. 2 มม. และ 4 มม. ตามลำดับ จัดเรียงอยู่ในท่ออะลูมิเนียม มีประโยชน์ในการหาค่า MTF
5. ชิ้นงาน E		ชิ้นงาน E เป็นอะลูมิเนียมรูปฉากวางประกบกันคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจัดเรียงกันภายในท่ออะลูมิเนียม

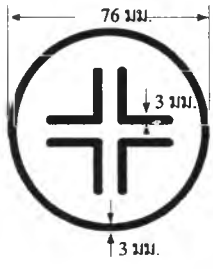
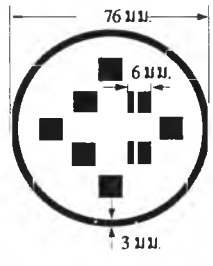
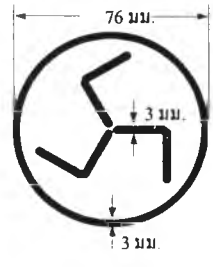
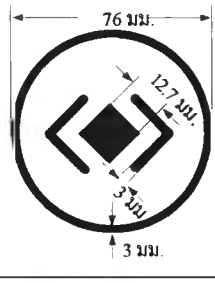
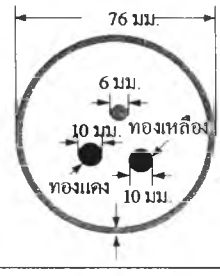
ตารางที่ 4.4 บอกรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบขึ้น (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงาน	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
6. ชิ้นงาน F		ชิ้นงาน F เป็นแท่งอะลูมิเนียมทรงกระบอกตันและกลวงจัดวางอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
7. ชิ้นงาน G		ชิ้นงาน G เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน 3 แท่งขนาดเท่ากันจัดเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมภายในท่ออะลูมิเนียม
8. ชิ้นงาน H		ชิ้นงาน H เป็นแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกตันขนาดต่างกัน 3 แท่ง จัดเรียงภายในท่ออะลูมิเนียม
9. ชิ้นงาน I		ชิ้นงาน I เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน 2 แท่ง ขนาดเท่ากันจัดเรียงในแนวเดียวกันภายในท่ออะลูมิเนียม
10. ชิ้นงาน J		ชิ้นงาน J เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน 4 แท่ง ขนาดต่างกัน จัดเรียงภายในท่ออะลูมิเนียมโดยให้แท่งอะลูมิเนียม โดยให้แท่งอะลูมิเนียมขนาด 3 มม. อยู่ติดกันแท่งอะลูมิเนียมขนาด 8 มม.

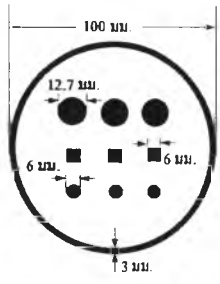
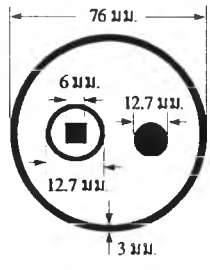
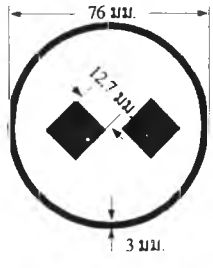
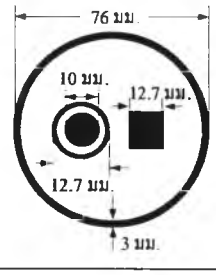
ตารางที่ 4.4 บอกรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบขึ้น (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงาน	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
11. ชิ้นงาน K		ชิ้นงาน K เป็นท่ออะลูมิเนียม ซึ่งภายในเคลือบด้วยปูนปลาสเตอร์หนา ๆ
12. ชิ้นงาน L		ชิ้นงาน L เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันรูปแท่งสี่เหลี่ยม 3 แท่งขนาดต่างกัน จัดเรียงในแนวเดียวกันอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
13. ชิ้นงาน M		ชิ้นงาน M เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันรูปแท่งสี่เหลี่ยม 2 แท่งขนาดเท่ากัน จัดเรียงในแนวเดียวกันอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
14. ชิ้นงาน N		ชิ้นงาน N เป็นท่ออะลูมิเนียมขนาด 30 มม. สอดอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมขนาด 76 มม. และมีแท่งอะลูมิเนียมตันขนาด 10 มม. อยู่ภายในของท่อขนาดเล็ก
15. ชิ้นงาน O		ชิ้นงาน O เป็นแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมหนึ่งแท่ง และแท่งอะลูมิเนียมตัน 2 แท่ง ขนาดต่างกันอีก จัดเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยมอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.4 บอกรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบขึ้น (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงาน	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
16. ชิ้นงาน P		ชิ้นงาน P เป็นอะลูมิเนียมรูปฉาก 4 อัน ขนาดเท่ากัน จัดเรียงเป็นรูปกากบาท อยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
17. ชิ้นงาน Q		ชิ้นงาน Q เป็นแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยม 8 แท่ง ขนาดเท่ากัน จัดเรียงเป็นรูปสี่เหลี่ยม อยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
18. ชิ้นงาน R		ชิ้นงาน R เป็นอะลูมิเนียมรูปฉาก 3 อัน ขนาดเท่ากัน จัดเรียงกันคล้ายกับรูปใบพัดอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม
19. ชิ้นงาน S		ชิ้นงาน S เป็นอะลูมิเนียมรูปฉากวางอยู่ข้างแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมภายในท่ออะลูมิเนียม
20. ชิ้นงาน T		ชิ้นงาน T เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันขนาด 6 มม. แท่งทองแดงขนาด 10 มม. และแท่งทองเหลืองขนาด 10 มม. จัดเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยมอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม

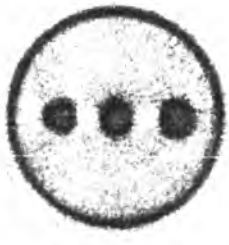
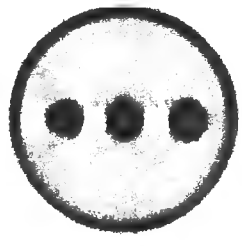
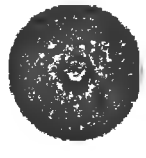
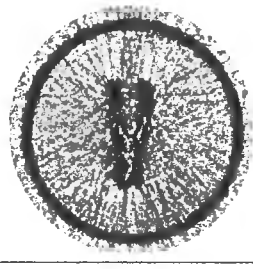
ตารางที่ 4.4 บอกรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบขึ้น (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	แผนภาพชิ้นงาน	รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบ
21. ชิ้นงาน U		ชิ้นงาน U เป็นแท่งอะลูมิเนียมที่มีขนาดและรูปทรงต่าง ๆ กันจำนวน 9 แท่ง จัดเรียงเป็น 3 แถวอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมดังในแผนภาพชิ้นงาน
22. ชิ้นงาน V		ชิ้นงาน V เป็นแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมขนาดเล็ก ด้านข้างมีแท่งอะลูมิเนียมตันอยู่หนึ่งแท่ง และทั้งหมดถูกจัดเรียงอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมขนาด 76 มม.
23. ชิ้นงาน W		ชิ้นงาน W เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันรูปแท่งสี่เหลี่ยม 2 แท่งขนาดเท่ากัน จัดเรียงแบบเฉียงอยู่ในแนวเดียวกันภายในท่ออะลูมิเนียม
24. ชิ้นงาน X		ชิ้นงาน X เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันจัดอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมขนาดเล็ก ด้านข้างมีแท่งอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมอยู่หนึ่งแท่ง และทั้งหมดถูกจัดเรียงอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียมขนาด 76 มม.

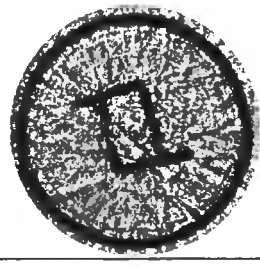
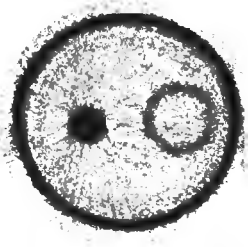
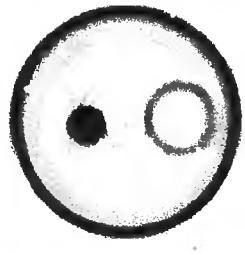
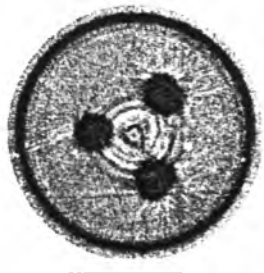
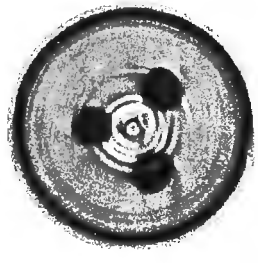
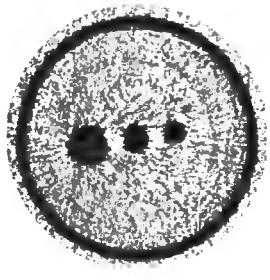
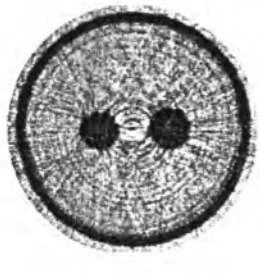
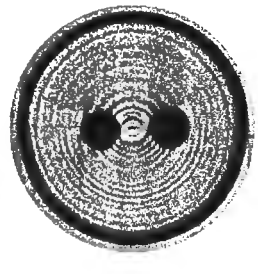
4.4.2 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบที่ออกแบบ

การทดลองสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ A ถึง X ใช้ข้อมูลทั้งหมด 100 โปรเจกชัน โดยหมุนวัตถุด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และทำการสร้างภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคการรวมเฟรมและข้อมูลที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคการรวม-เฟรมเพื่อให้เห็นความแตกต่างของภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรม ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X แสดงในตารางที่ 4.5

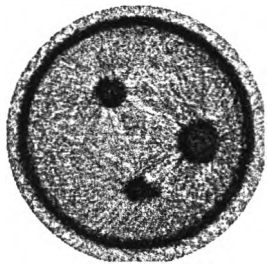
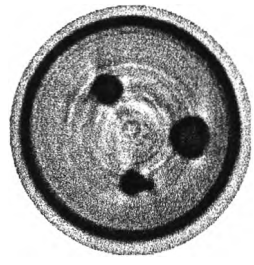
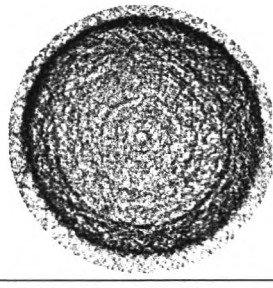
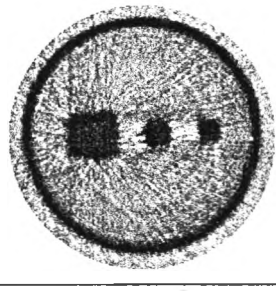
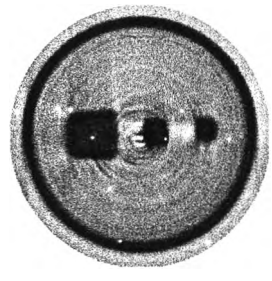
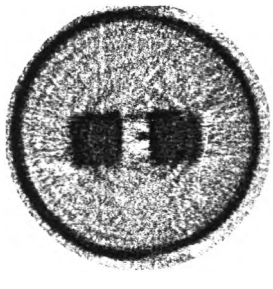
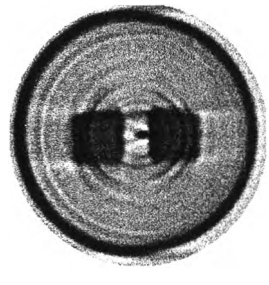
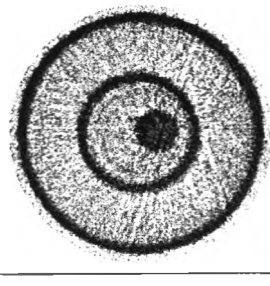
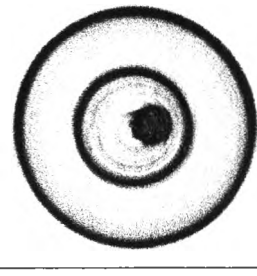
ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรมจำนวน 250 เฟรม	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน A			ภาพที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรมจะมีความมัวมากกว่าภาพที่ผ่านการรวมเฟรม
ชิ้นงาน B			จากภาพที่ได้บริเวณขอบของภาพจะมีความคมชัดมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนเฟรมในการรวมเฟรม
ชิ้นงาน C			ภาพที่ผ่านการรวมเฟรมสามารถมองเห็นรูปตัววีได้ชัดเจนกว่าภาพที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม
ชิ้นงาน D			แม้เทคนิคการรวมเฟรมจะช่วยลดความมัวของภาพโทโมกราฟี แต่จำนวนความถี่ของ slit ที่ตามองเห็นก็ยังคงเท่าเดิม

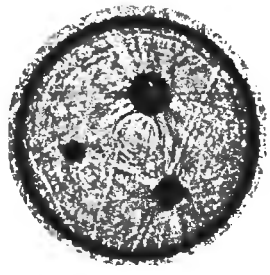
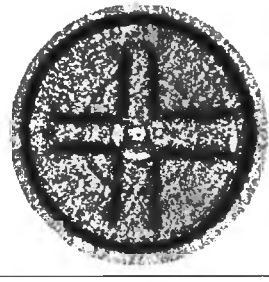
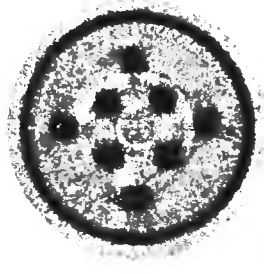
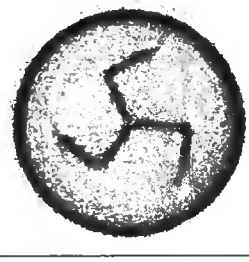
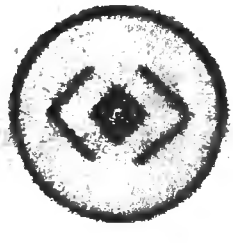
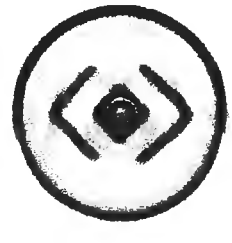
ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรมจำนวน 250 เฟรม	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน E			ภาพที่ผ่านการรวมเฟรมจะสามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพสี่เหลี่ยมในวงกลมได้อย่างชัดเจน
ชิ้นงาน F			จากภาพที่ผ่านการรวมเฟรมจะสามารถมองเห็นวงกลมเล็กด้านในได้เด่นชัดมากกว่าภาพที่ไม่ผ่านการรวมเฟรม
ชิ้นงาน G			Ring artifact ของภาพโทโม-กราฟีที่เกิดจากผลของ Dark current ซึ่งเทคนิคการรวมเฟรมก็ไม่สามารถลดผลกระทบนี้ได้
ชิ้นงาน H			ภาพที่ได้จะเห็นจุด 3 จุดที่มีขนาดต่างกันวางเรียงในแนวเดียวกันได้อย่างชัดเจนแต่ยังคงมี ring artifact อยู่บนภาพ
ชิ้นงาน I			สามารถเห็นจุดกลม 2 จุดได้ชัดเจน แต่มี ring artifact ของภาพ ซึ่งเกิดจากเก็บข้อมูล dark current ที่ไม่ดีพอ

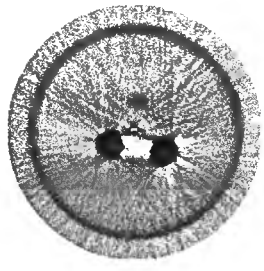
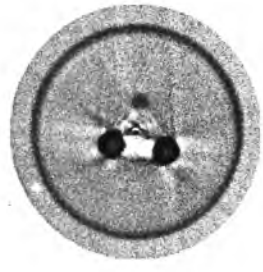
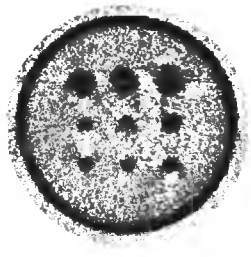
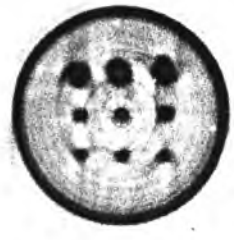
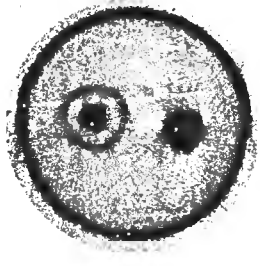
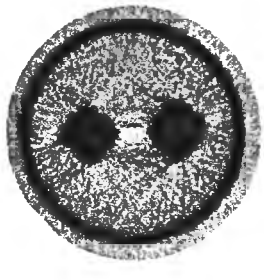
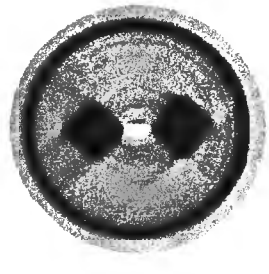
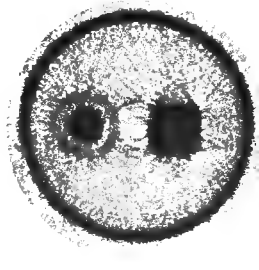
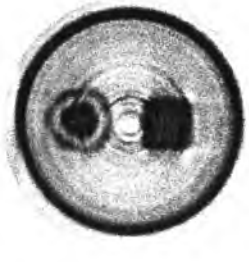
ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรมจำนวน 250 เฟรม	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน J			จากภาพที่ได้สามารถมองเห็นแท่งอะลูมิเนียมเล็ก ๆ ที่มีขนาด 3 มม. ได้แต่ไม่อาจสังเกตเห็นรูปร่างได้อย่างชัดเจน
ชิ้นงาน K			สามารถเห็นปูนปลาสเตอร์ที่เคลือบอยู่ในท่ออะลูมิเนียม แต่ ring artifact ของภาพก็มาก เนื่องจากการปรับแก้ด้วยวิธี Shading correction ที่ไม่ดี
ชิ้นงาน L			ภาพแท่งอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยม 3 แท่งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีขอบไม่คมชัด ซึ่งอาจเกิดจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ แต่ท่ออะลูมิเนียมมีความคมชัด
ชิ้นงาน M			จากภาพสามารถมองเห็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากัน 2 อันภายในวงกลมได้แต่ภาพที่ได้มี artifact อยู่พอสมควร
ชิ้นงาน N			ภาพที่ได้สามารถมองเห็นแท่งอะลูมิเนียมและท่ออะลูมิเนียมภายในวงกลมได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรมจำนวน 250 เฟรม	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน O			จากภาพที่ได้สามารถแสดงความแตกต่างของขนาดและรูปทรงได้ดีพอสมควร
ชิ้นงาน P			ภาพเกิดผิดเพี้ยนและเกิดการขยาย เนื่องจากการหมุนชิ้นงานทำให้ด้านหนึ่งของชิ้นงานอยู่ห่างจากฉากเรืองรังสีมากกว่าอีกด้าน
ชิ้นงาน Q			สามารถเห็นจุดทั้ง 8 จุดบนภาพได้ แต่บางจุดจะมีความบิดเบี้ยวเนื่องจากมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายใน วัตถุ
ชิ้นงาน R			ตอนปลายของรูปฉากจะเกิด artifact เนื่องจากมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์
ชิ้นงาน S			จากภาพจะเห็นรูปฉากด้านซ้ายเล็กกว่าด้านขวาเล็กน้อย เนื่องจากการเก็บข้อมูลต้องหมุนชิ้นงานทำให้ขนาดของภาพด้านขวาขยายใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบจาก A ถึง X (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	ภาพโทโมกราฟีที่ไม่ได้ผ่านการรวมเฟรม	ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวม เฟรมจำนวน 250 เฟรม	รายละเอียดของภาพ
ชิ้นงาน T			จากภาพสามารถเห็นจุดที่มีความเข้มของสีต่างกันเนื่องจากเป็นวัตถุต่างชนิดกันโดยสีจาง ๆ คืออะลูมิเนียมส่วนด้านล่างเป็นแท่งทองเหลือง
ชิ้นงาน U			สามารถเห็นจุดทั้ง 9 จุดภายในวงกลมแต่ภาพก็ไม่คมชัดพอที่จะแยกแยะรูปทรงของของแต่ละจุดในภาพ
ชิ้นงาน V			แท่งสี่เหลี่ยมไม่ชัดเจนเนื่องจากข้อมูลโปรไฟล์ที่ได้จากการถ่ายภาพให้รายละเอียดไม่ดีพออาจเป็นเพราะพลังงานของรังสีเอกซ์มากเกินไป
ชิ้นงาน W			รูปสี่เหลี่ยมด้านขวาจะมีความบิดเบือนกว่าด้านซ้ายเนื่องจากการหมุนของวัตถุทำให้ด้านซ้ายของวัตถุเข้าใกล้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์มากกว่าด้านขวา
ชิ้นงาน X			จุดกึ่งกลางของภาพจะเกิดจุดขาวและ ring artifact ซึ่งเกิดจากข้อมูลของ Dark current ในการปรับแก้ค่าด้วยวิธี Shading correction

เมื่อพิจารณาภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน A ถึง X เห็นได้ว่าเทคนิคการรวมเฟรมสามารถลดความมัวของภาพโทโมกราฟี ทำให้ภาพโทโมกราฟีมีความคมชัดมากขึ้นสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพโทโมกราฟีได้ง่ายขึ้น แต่ภาพโทโมกราฟียังคงมีข้อบกพร่องอื่น ๆ ดังนี้

1. จากภาพถ่ายรังสีดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาบริเวณส่วนที่เป็นจานหมุนชิ้นงานของภาพเห็นได้ว่าภาพที่ได้มีลักษณะขยายทั้งนี้เนื่องจากรังสีเอกซ์ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีลักษณะเป็นลำขนานทำให้ภาพถ่ายรังสีเกิดการขยายตัวส่งผลให้ภาพโทโมกราฟีที่ได้จากระบบนี้เกิดการบิดเบือน

2. ring artifact สาเหตุเกิดจาก ข้อมูล dark current ในการปรับแก้ค่าข้อมูลโปรไฟล์ เพราะเก็บข้อมูลทุกอย่างเพียงแค่แถวเดียวไม่ได้เกิดจากการเฉลี่ยจากหลาย ๆ แถวในแนวนอน

3. ขนาดของภาพด้านซ้ายที่ใหญ่กว่าด้านขวา สาเหตุเนื่องจากในการเก็บข้อมูลจะต้องทำการหมุนวัตถุไปเป็นมุม 180 องศา ทำให้ชิ้นงานด้านหนึ่งจะเข้าใกล้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์มากกว่าอีกด้านตรงข้าม ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ที่ปรากฏบนฉากเรืองรังสีที่มุมต่าง ๆ กันจึงมีขนาดไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.14 การลดความบิดเบือนลักษณะดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มความห่างของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์กับชิ้นงานให้มากขึ้น

รูปที่ 4.14 สาเหตุความบิดเบือนเนื่องจากลำรังสีไม่เป็นลำรังสีขนาน

4. artifact ที่เกิดในชิ้นงาน K เป็นผลมาจากการปรับแก้ค่าด้วยวิธี Shading correction รวมทั้งระดับพลังงานที่ใช้ไม่เหมาะสมกับชนิดและความหนาของชิ้นงานทดสอบ

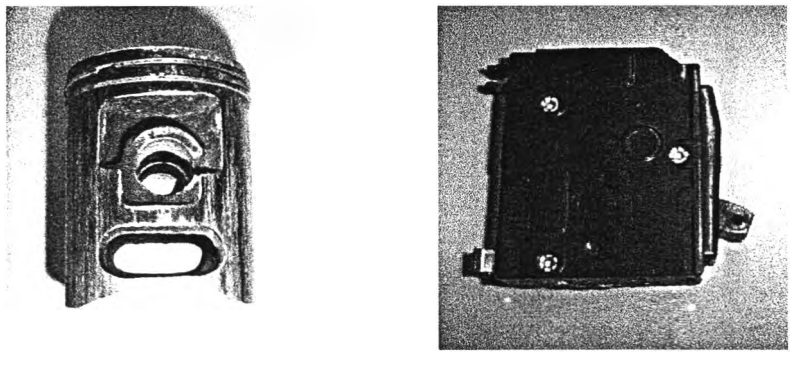
5. ความบิดเบี้ยวของภาพโทโมกราฟี เนื่องจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ภายในชิ้นงาน

6. ความเปรียบต่างของภาพโทโมกราฟีไม่ดีพอ จากชิ้นงาน T ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสีในบริเวณที่เป็นทองเหลืองกับทองแดง เนื่องจากฉากเรืองรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสม

ทำให้ไม่สามารถแยกความเข้มของภาพบริเวณที่เป็นทองเหลืองและทองแดงได้ แต่ยังคงสามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นอากาศและอะลูมิเนียมภายในภาพได้

4.5 การทดลองสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด

ชิ้นงานทางอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ชิ้น ชิ้นแรกคือ ลูกสูบรถจักรยานยนต์ ทำจากโลหะชนิดเดียวมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีรูตรงกลางชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่สอง คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด 1 ชั้ว ซึ่งใช้กันทั่วไป ภายนอกเป็นโครงพลาสติกสี่เหลี่ยมสีดำมีก้านสำหรับปิด-เปิดอยู่ตรงด้านหน้า ภายในมีอุปกรณ์ตัดวงจรที่ทำจากโลหะหลายชนิด ภาพของชิ้นงานทั้ง 2 แสดงไว้ดังรูปที่ 4.15 ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงดังรูปในตารางที่ 4.5

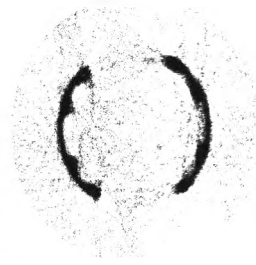
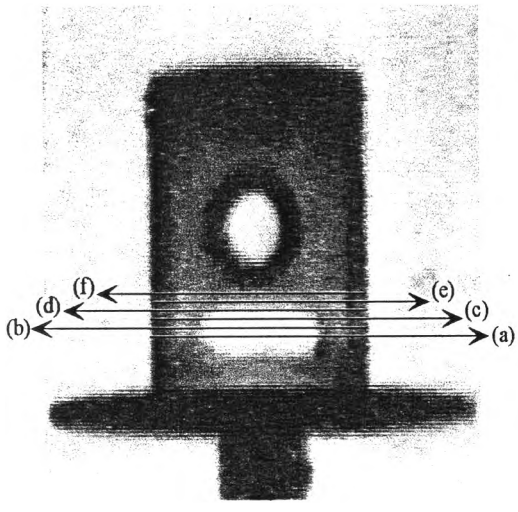
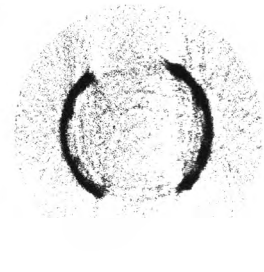
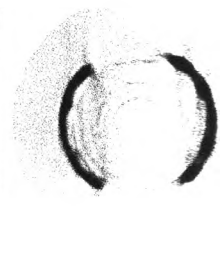
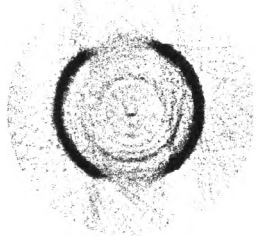
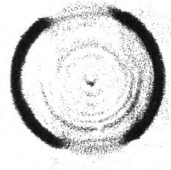
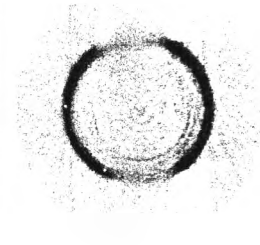
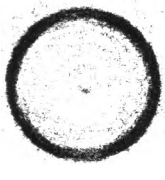
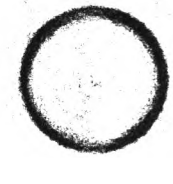
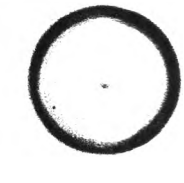


ลูกสูบรถจักรยานยนต์ เซอร์กิตเบรคเกอร์

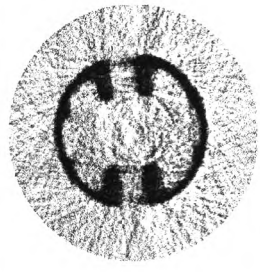
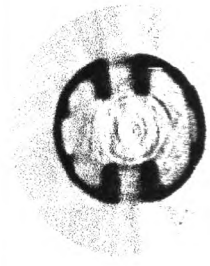
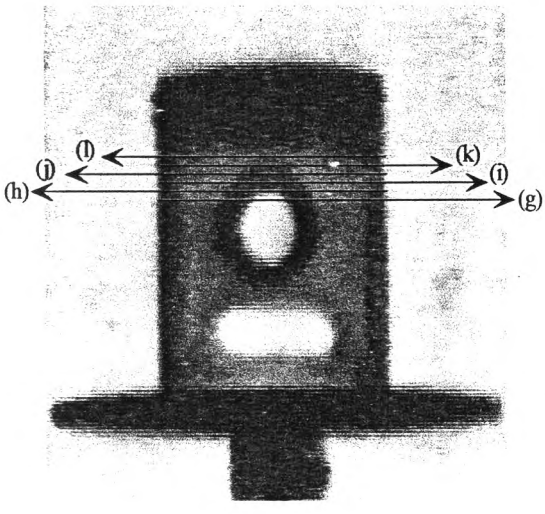
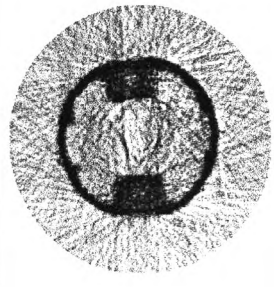
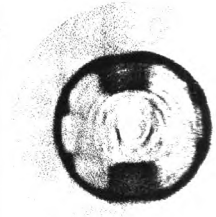
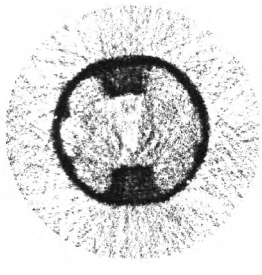
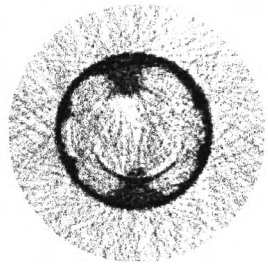
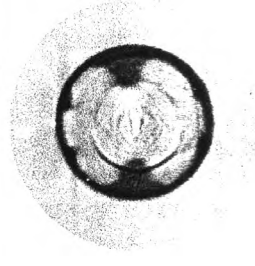
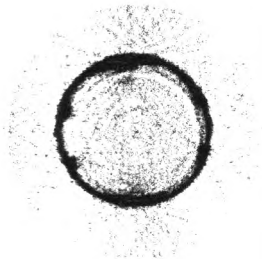
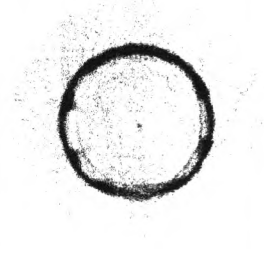
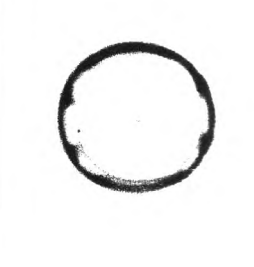
รูปที่ 4.15 ภาพชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด

การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรม สำหรับชิ้นงานแรกซึ่งเป็นลูกสูบใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 140 กิโลโวลต์ ส่วนชิ้นงานที่สองซึ่งเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ และทั้งสองชิ้นงานจะตั้งกระแสที่ 7 มิลลิแอมแปร์ หมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่ตำแหน่งแถวต่าง ๆ ของชิ้นงานทั้งสองแสดงในตารางที่ 4.6

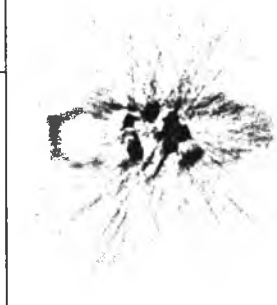
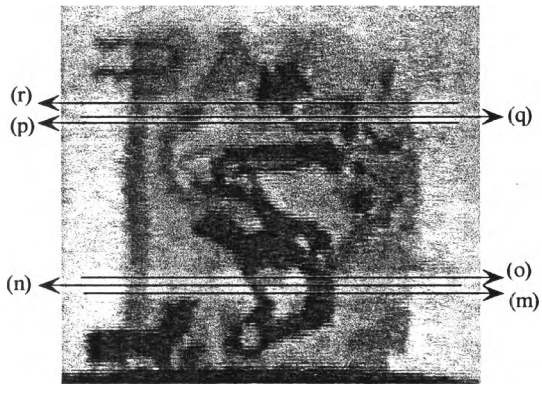
ตารางที่ 4.6 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด

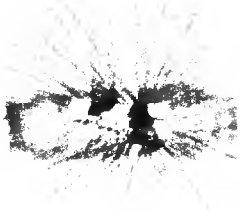
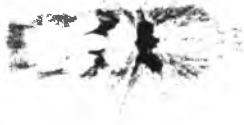
<table>
<tr><td colspan="2">ลูกสูบรถจักรยานยนต์</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td>(a) 1 เฟรม</td><td>(a) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td colspan="2">ตำแหน่งที่สร้างภาพโทโมกราฟี</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>(b) 1 เฟรม</td><td>(b) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td>(c) 1 เฟรม</td><td>(c) 250 เฟรม</td><td>(d) 1 เฟรม</td><td>(d) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td> </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(e) 1 เฟรม</td><td>(e) 250 เฟรม</td><td>(f) 1 เฟรม</td><td>(f) 250 เฟรม</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4.6 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด (ต่อ)

<table>
<tr><td colspan="2">ลูกสูบรถจักรยานยนต์</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"> 
</td><td>(g) 1 เฟรม</td><td>(g) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">ตำแหน่งที่สร้างภาพโทโมกราฟี</td><td>(h) 1 เฟรม</td><td>(h) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td> </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(i) 1 เฟรม</td><td>(i) 250 เฟรม</td><td>(j) เฟรม</td><td>(j) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td> </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(k) 1 เฟรม</td><td>(k) 250 เฟรม</td><td>(l) 1 เฟรม</td><td>(l) 250 เฟรม</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4.6 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรมบางชนิด (ต่อ)

<table>
<tr><td colspan="2">เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด 1 ขั้ว</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"> 

ตำแหน่งที่สร้างภาพโทโมกราฟี</td><td>(m) 1 เฟรม</td><td>(m) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td>(n) 1 เฟรม</td><td>(n) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td>  </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>(o) 1 เฟรม</td><td>(o) 250 เฟรม</td><td>(p) 1 เฟรม</td><td>(p) 250 เฟรม</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>(q) 1 เฟรม</td><td>(q) 250 เฟรม</td><td>(r) 1 เฟรม</td><td>(r) 250 เฟรม</td></tr>
</table>

ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทางอุตสาหกรรม สำหรับชิ้นงานแรกซึ่งเป็นลูกสูบรถจักรยานยนต์ ภาพโทโมกราฟีที่สร้างจากแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานสามารถมองเห็นรายละเอียดภายในภาพได้อย่างถูกต้องและชัดเจน ส่วนชิ้นงานที่ 2 เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำจากวัสดุหลายชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นแตกต่างกัน ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงมีความเข้มของจุดภาพหลายระดับ จากภาพโทโมกราฟีบริเวณสีเทาอ่อนแสดงส่วนที่เป็นกรอบพลาสติกสี่เหลี่ยมของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ส่วนบริเวณสีเข้มแสดงส่วนที่เป็นโลหะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และเมื่อเปรียบเทียบภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทั้งสองที่ตำแหน่งเดียวกัน ภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยเทคนิคการรวมเฟรมสามารถมองเห็นรายละเอียดได้ชัดเจนกว่าภาพที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยเทคนิคการรวมเฟรม

4.6 การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟี

การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 วิธีคือ ค่า Pixel noise กราฟ PDF PSF และ ESF สำหรับสองวิธีแรกจะใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของข้อมูล CT-number ส่วนสองวิธีหลังใช้สำหรับหาความสามารถในการแจกแจงของระบบ (System Resolution) การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยค่า Pixel noise ได้ทำแล้วในหัวข้อที่ 4.3 การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีอีกสามวิธีมีดังนี้

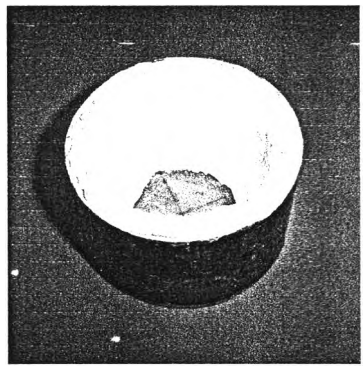
4.6.1 การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยกราฟ PDF

การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยกราฟ PDF ในการทดลองนี้ใช้ระบบเก็บข้อมูลภาพแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีที่พัฒนาขึ้นเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมจากชิ้นงาน K โดยสร้างภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กันจำนวน 4 ภาพ จากนั้นนำข้อมูล CT-number ทุกค่าจากภาพโทโมกราฟีมาเขียนเป็นกราฟ PDF

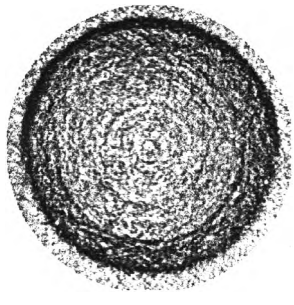
ชิ้นงาน K

ชิ้นงาน K เป็นท่ออะลูมิเนียมที่ภายในเคลือบด้วยปูนปลาสเตอร์หนา ๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน K ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 110 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ หมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ

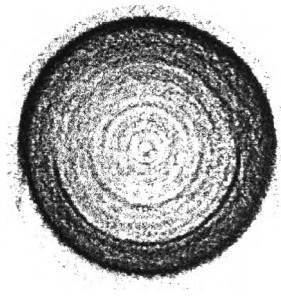
แสดงไว้ดังรูปที่ 4.17 จากภาพโทโมกราฟีที่ได้เมื่อนำข้อมูล CT-number ทุกค่ามาเขียนเป็นกราฟ PDF จะได้กราฟดังรูปที่ 4.18



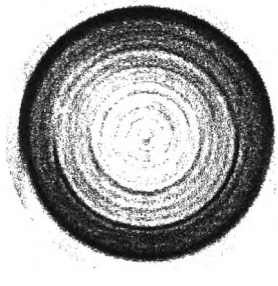
รูปที่ 4.16 ภาพชิ้นงาน K



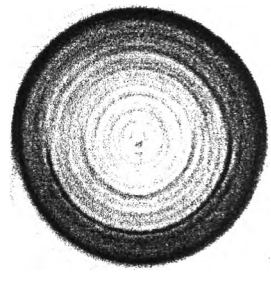
(ก) 1 เฟรม



(ข) 40 เฟรม

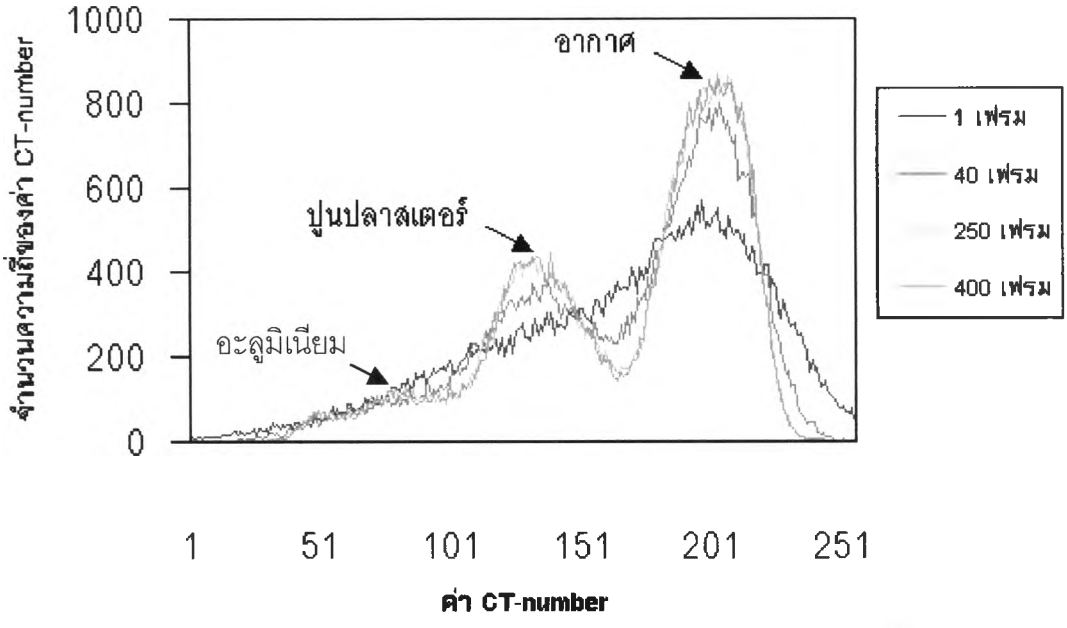


(ค) 250 เฟรม



(ง) 400 เฟรม

รูปที่ 4.17 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน K ที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.18 กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีที่จำนวนเฟรมต่าง ๆ กัน

จากทฤษฎีในบทที่ 2 กราฟ PDF ของชิ้นงาน K ควรจะเห็นจุดยอดของโปรไฟล์ 3 จุด ซึ่งเป็นข้อมูล CT-number ของอากาศ ปูนปลาสเตอร์ และอะลูมิเนียมของชิ้นงาน เมื่อพิจารณากราฟ PDF ที่ได้จากการทดลองเห็นได้ว่า

ที่ 1 เฟรม สามารถเห็นจุดยอดเพียงจุดเดียวทางด้านขวา ซึ่งเป็นบริเวณข้อมูล CT-number ของอากาศ

ที่ 40 เฟรม สามารถเห็นจุดยอด 2 จุด ซึ่งเป็น ซึ่งเป็นบริเวณข้อมูล CT-number ของอากาศ และปูนปลาสเตอร์

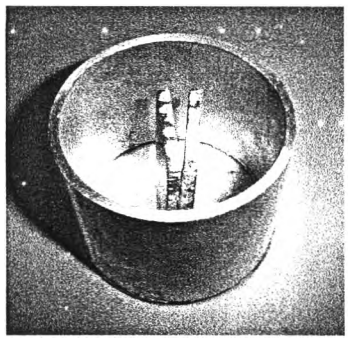
ที่ 250 และ 400 เฟรม สามารถเห็นจุดยอดครบทั้ง 3 จุด แม้จุดยอดของอะลูมิเนียมจะไม่สูงนัก แต่ก็เพียงพอในการแยกความเปรียบต่างของวัตถุได้

จากผลการทดลองเมื่อจำนวนเฟรมที่ใช้ในเทคนิคการรวมเฟรมเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของข้อมูล CT-number จะลดลงทำให้ความเปรียบต่างของภาพโทโมกราฟีดีขึ้น และจากกราฟ PDF ที่ 250 และ 400 เฟรม เห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับที่ 1 และ 4 เฟรม จากลักษณะดังกล่าวเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าภาพโทโมกราฟีที่ผ่านการรวมเฟรมที่ 250 และ 400 เฟรม มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จำนวนเฟรมที่เหมาะสมในเทคนิคการรวมเฟรมจึงควรใช้ที่ 250 เฟรม

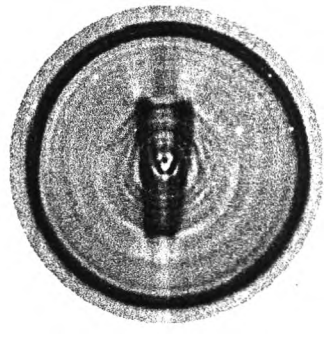
4.6.2 การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี Point Spread Function (PSF)

การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี PSF ใช้สำหรับหาค่า Resolution ของระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ในทางทฤษฎีจะใช้การอ่านโปรไฟล์ของข้อมูล CT-number จากตำแหน่งแถวในภาพโทโมกราฟีที่มีลักษณะเป็นจุด แต่ในทางปฏิบัติการหาชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นจุดและมีขนาดตามที่ต้องการนั้นเป็นเรื่องที่ยาก ด้วยสาเหตุนี้จึงได้ออกแบบชิ้นงานทดสอบให้มีลักษณะเป็นรูปตัววี ซึ่งโปรไฟล์ของข้อมูล CT-number จากชิ้นงานรูปตัววีจะมีลักษณะเดียวกับที่ได้จากการชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นจุด ในการทดลองจึงใช้ชิ้นงานทดสอบ C ในการทดสอบคุณภาพ

ชิ้นงานทดสอบ C ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มม. จัดเรียงเป็นรูปตัววีอยู่ภายในท่ออะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.19 (ก) การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน C ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ หมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีที่ 250 เฟรม แสดงไว้ดังรูป 4.19 (ข) โปรไฟล์ของข้อมูล CT-number จากตำแหน่งแถวต่าง ๆ บริเวณมุมแหลมของตัววีแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่งค่า Resolution ของระบบได้จากความกว้างที่ค่า CT-number สูงสุดของโปรไฟล์ลดเหลือ 20 % จากค่าที่คงที่



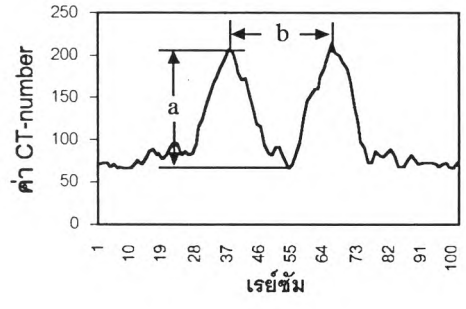
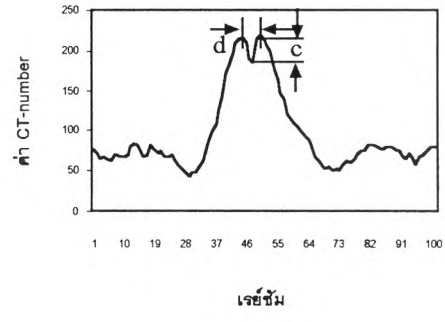
(ก) ภาพชิ้นงานทดสอบ C



(ข) ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน C

รูปที่ 4.19 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ Point Spread Function

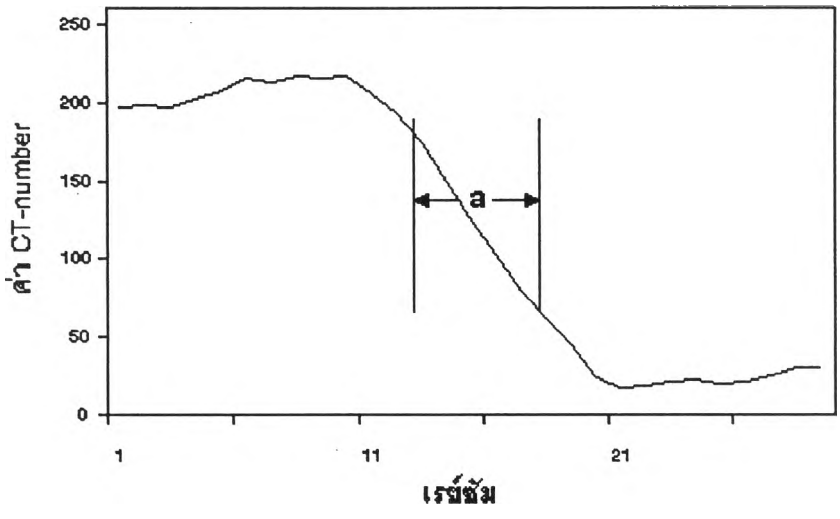
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Point spread function

	
PSF ที่ 100 % ของค่า CT-number สูงสุด	PSF ที่ 22.2 % ของค่า CT-number สูงสุด
ค่า a = 135 / ค่า b = 29 เรย์ซัม	ค่า c = 30 / ค่า d = 5 เรย์ซัม

ผลการทดลองค่าความเปรียบต่างของข้อมูล CT-number จาก Point Spread Function ที่ 100% (a) มีค่าเท่ากับ 135 หน่วย และค่าความเปรียบต่างของข้อมูล CT-number จาก Point Spread Function ที่ใกล้เคียง 20 % (b) มีค่าเท่ากับ 30 หน่วย ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้มีความกว้างของข้อมูลเท่ากับ 5 เรย์ซัม เมื่อขนาด Pixel Interval มีค่าเท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อเรย์ซัม ค่า Resolution ของระบบจึงมีค่าเท่ากับ 0.125 มิลลิเมตร

4.6.3 การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี Edge Spread Function

การทดสอบคุณภาพของภาพโทโมกราฟีด้วยวิธี Edge Spread Function เป็นวิธีการหาค่า Resolution ของระบบเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยอาศัยโปรไฟล์ของข้อมูล CT-number จากตำแหน่งของขอบชิ้นงานทดสอบในภาพโทโมกราฟี จากนั้นหาจำนวนเรย์ซัมที่ค่า CT-number เพิ่มจาก 25% ไปถึง 75% ซึ่งค่า Resolution มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนเรย์ซัมที่เพิ่มขึ้นคูณกับค่า Pixel Interval (สำหรับระบบโทรทัศน์ค่า Pixel Interval มีค่าเท่ากับ 0.025 มม.ต่อเรย์ซัม) การทดลองอาศัยชิ้นงานทดสอบ B ซึ่งเป็นแท่งอะลูมิเนียมต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มม. โปรไฟล์ของข้อมูลCT-number จากภาพโทโมกราฟีชิ้นงาน B แสดงดังรูปที่ 4.20



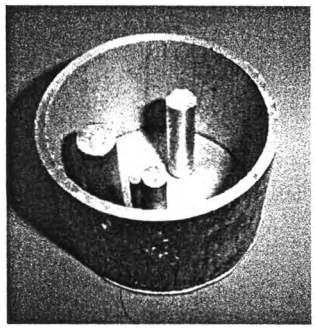
รูปที่ 4.20 โปรไฟล์ของการทดสอบสำหรับวิธี Edge Spread Function

จากโปรไฟล์ในรูป 4.20 จำนวนเรย์ซัมที่ค่า CT-number เพิ่มจาก 25% ไปถึง 75% (a) เท่ากับ 5 เรย์ซัม ค่า Resolution ของระบบที่ได้จากวิธี Edge Spread Function มีค่าเท่ากับ 0.125 มม. เมื่อพิจารณาค่า Resolution ที่ได้จากวิธี Edge Spread Function กับค่าที่ได้จากวิธี PSF จะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากัน จึงสรุปได้ว่าค่า Resolution ของระบบเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์ที่พัฒนาขึ้นมีค่า Resolution ของระบบเท่ากับ 0.125 มม.

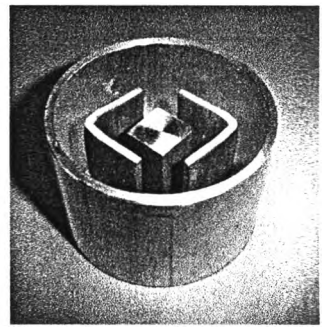
4.7 การทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บจากกล้องวีดิทัศน์และเครื่องวีดิทัศน์

ระบบเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ระบบโทรทัศน์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเก็บข้อมูลได้จากกล้องวีดิทัศน์โดยตรง และจากเครื่องวีดิทัศน์ การทดสอบการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บจากทั้งสองวิธี เพื่อเปรียบเทียบภาพโทโมกราฟีที่ได้จากทั้งสองวิธี การทดสอบใช้การสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน J และ S ด้วยข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บจากทั้งสองวิธี และเปรียบเทียบภาพโทโมกราฟีที่สร้างด้วยข้อมูลที่เก็บจากทั้งสองวิธีด้วยค่า Pixel noise และค่า SNR

ชิ้นงาน J เป็นแท่งอะลูมิเนียมตันขนาดต่างกัน 4 แท่ง จัดเรียงภายในท่ออะลูมิเนียม และชิ้นงานทดสอบ S เป็นอะลูมิเนียมรูปฉาก 2 แท่งวางอยู่ด้านข้างของอะลูมิเนียมแท่งสี่เหลี่ยมโดยจัดเรียงภายในท่ออะลูมิเนียม ภาพของชิ้นงาน J และ S แสดงดังรูปที่ 4.21



ชิ้นงานทดสอบ J

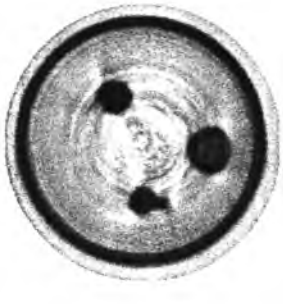
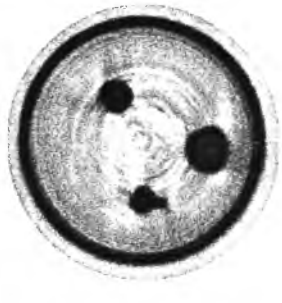


ชิ้นงานทดสอบ S

รูปที่ 4.21 ภาพชิ้นงานทดสอบ J และ S

การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ J และ S ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ โดยหมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา จำนวนเฟรมที่ใช้สำหรับเทคนิคการรวมเฟรมจำนวน 250 เฟรม และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลที่เก็บจากกล้องวีดิทัศน์และเครื่องวีดิทัศน์พร้อมข้อมูลต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์และเครื่องวีดิทัศน์

ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ J	
เก็บข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์	เก็บข้อมูลจากเครื่องวีดิทัศน์
	
ค่าเฉลี่ยของข้อมูล* = 207	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล* = 207
ค่า Pixel noise = 6.8	ค่า Pixel noise = 7
ค่า SNR = 30.4	ค่า SNR = 29.6

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์และเครื่องวีดิทัศน์ (ต่อ)

ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ S	
เก็บข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์	เก็บข้อมูลจากเครื่องวีดิทัศน์
ค่าเฉลี่ยของข้อมูล* = 221	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล* = 218.9
ค่า Pixel noise = 24.5	ค่า Pixel noise = 24.5
ค่า SNR = 9	ค่า SNR = 8.9

* เป็นค่าเฉลี่ยของ CT-number จากจำนวน 100 จุดภาพ ณ บริเวณเดียวกันทุกภาพ

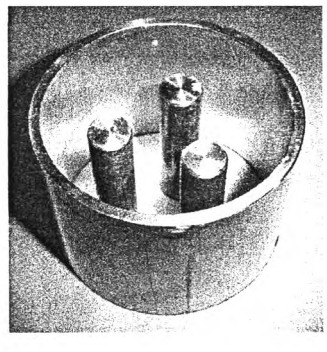
ค่า Pixel noise และ ค่า SNR ซึ่งได้จากภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน J และ S ที่สร้างด้วยข้อมูลที่เก็บจากกล้องวีดิทัศน์โดยตรงและจากเครื่องวีดิทัศน์มีค่าต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาที่ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน J จะสามารถมองเห็นจุดเล็กบริเวณด้านล่างของภาพโทโมกราฟีที่สร้างด้วยข้อมูลที่เก็บจากทั้งสองวิธี ส่วนภาพโทโมกราฟีของชิ้นงาน S ก็ไม่มีความแตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงว่าภาพโทโมกราฟีที่สร้างด้วยข้อมูลโปรไฟล์ที่เก็บจากกล้องวีดิทัศน์และเครื่องวีดิทัศน์ให้ผลของภาพที่ไม่แตกต่างกันนัก เพราะฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์โดยตรงเพียงอย่างเดียวแต่ยังสามารถเก็บข้อมูลจากเครื่องวีดิทัศน์ได้อีกด้วย การเก็บข้อมูลจากเครื่องวีดิทัศน์มีข้อดีที่สามารถนำภาพที่บันทึกไว้บนแถบวีดิทัศน์มาเก็บข้อมูลเพื่อ สร้างภาพโทโมกราฟีได้ในภายหลัง ทำให้สามารถเก็บข้อมูลจากชิ้นงานเดียวกันซ้ำ ๆ ได้โดยไม่ต้องเดินเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์หลาย ๆ ครั้งซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลเป็นอย่างมาก แต่การเก็บข้อมูลจากเครื่องวีดิทัศน์ก็มีข้อเสียเนื่องจากต้องเก็บข้อมูลลงบนแถบวีดิทัศน์ก่อนแล้วจึงเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีจากเครื่องวีดิทัศน์อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งต้องใช้เวลา

มากกว่าการเก็บข้อมูลจากกล้องวีดิทัศน์โดยตรง การเลือกวิธีการเก็บข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมตามลักษณะงานที่ใช้

4.8 การแก้ปัญหาการเกิด ring artifact โดยการเฉลี่ยค่าข้อมูลโปรไฟล์จากสามแถว (row)

การสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลโปรไฟล์ที่เกิดจากการเฉลี่ยข้อมูลหลายแถว คือ การนำข้อมูลหลายแถวในแนวนอนที่ตำแหน่งเรย์ซัมเดียวกันมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล แล้วจึงคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี เพื่อลด ring artifact ของภาพโทโมกราฟี สำหรับการทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานทดสอบ G ซึ่งมี ring artifact บริเวณกลางภาพโทโมกราฟีค่อนข้างมาก (จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4) ชิ้นงานทดสอบ G เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน 3 แท่งขนาดเท่ากันจัดเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมภายในท่ออะลูมิเนียม ภาพของชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.22

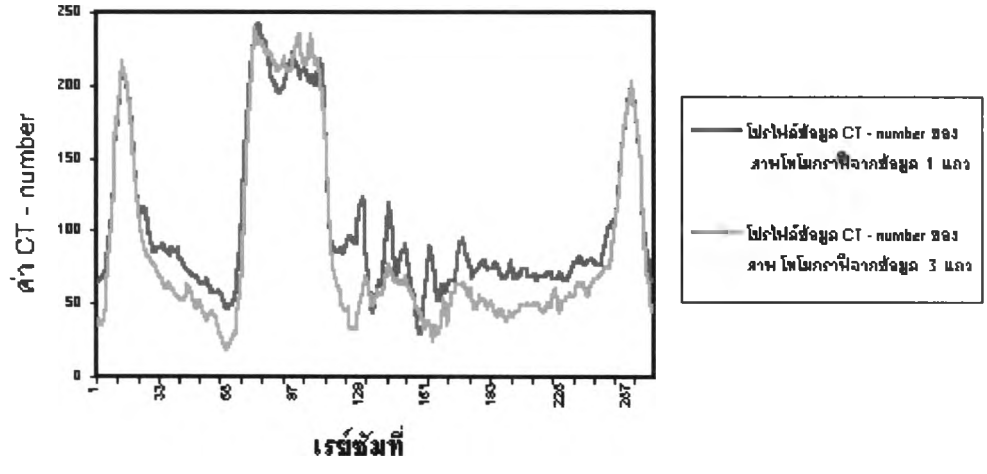
การเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานทดสอบ G ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ปรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 130 กิโลโวลต์ กระแส 7 มิลลิแอมแปร์ โดยหมุนชิ้นงานทดสอบด้วยมุมครั้งละ 1.8 องศา และเก็บข้อมูลจำนวน 100 โปรเจกชัน ซึ่งเก็บข้อมูลจากเครื่องวิดีทัศน์สำหรับการทดลองจะอาศัยการสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยข้อมูลที่ไม่ผ่านการเฉลี่ยหลายแถวและข้อมูลที่ผ่านการเฉลี่ยของข้อมูลจำนวนสามแถวติดกันโดยเก็บข้อมูลแบบรวมเฟรมที่ 150 เฟรมเท่ากันทั้งสองภาพ ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีแสดงไว้ในรูปที่ 4.23



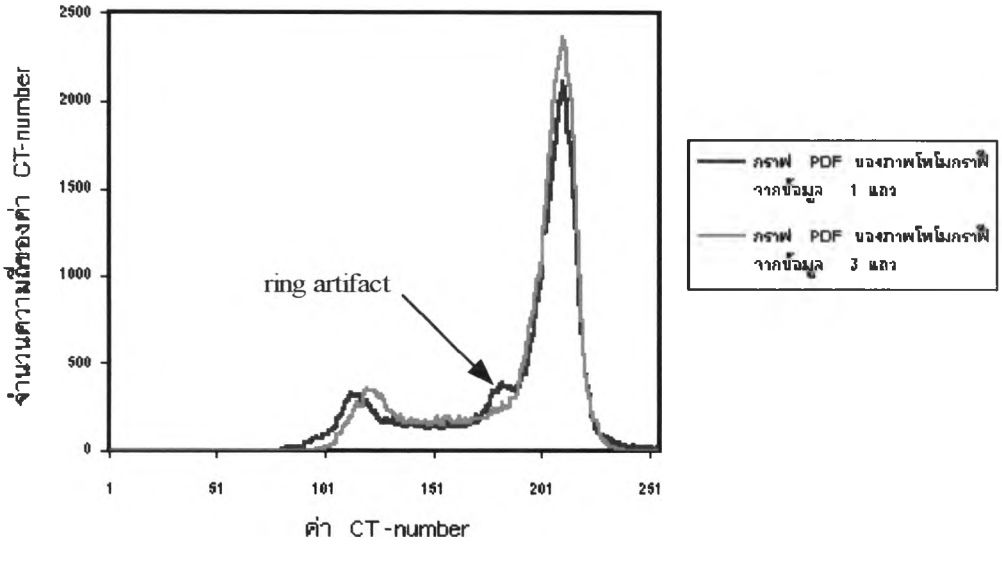
รูปที่ 4.22 ภาพชิ้นงานทดสอบ G

(a) ภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ 1 แถว (b) ภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ 3 แถว

รูปที่ 4.23 ผลการสร้างภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ที่จำนวนแถวต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 โปรไฟล์ข้อมูล CT- number ของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลแถวต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลโปรไฟล์ที่จำนวนแถวต่าง ๆ

จากภาพโทโมกราฟีในรูปที่ 4.23 (a) กับ 4.23 (b) เพื่อเปรียบเทียบ ring artifact ของทั้ง 2 ภาพ จึงนำโปรไฟล์ของค่า CT–number มาเขียนเป็นกราฟดังรูปที่ 4.24 พบว่าโปรไฟล์ข้อมูล CT-number ของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูล 3 แถวมีการกระจายตัวที่น้อยกว่าโปรไฟล์ข้อมูลอีกชุดหนึ่ง และจากข้อมูล CT-number ของภาพทั้งสองนำมาแสดงในกราฟ PDF ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งได้ผลการทดลอง คือ เมื่อพิจารณากราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูลหนึ่งแถวจะมีจุดยอดซึ่งเป็นบริเวณของ ring artifact ในขณะที่กราฟ PDF ของภาพโทโมกราฟีจากข้อมูล 3 แถวไม่มีจุดยอดดังกล่าว จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าการเฉลี่ยค่าข้อมูลโปรไฟล์จาก 3 แถวสามารถลด ring artifact ของภาพโทโมกราฟีได้ เพราะการเฉลี่ย ข้อมูลหลาย ๆ แถวในตำแหน่งเรย์ซัมเดียวกันจะช่วยลดความแปรปรวนจากเก็บข้อมูล dark current ได้เป็นอย่างดีแม้การปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยวิธีการเฉลี่ยหลายแถวจะสามารถช่วยให้ภาพโทโมกราฟีมีคุณภาพที่ดีขึ้นแต่การปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลด้วยวิธีนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละโปรเจกชันมากขึ้น