

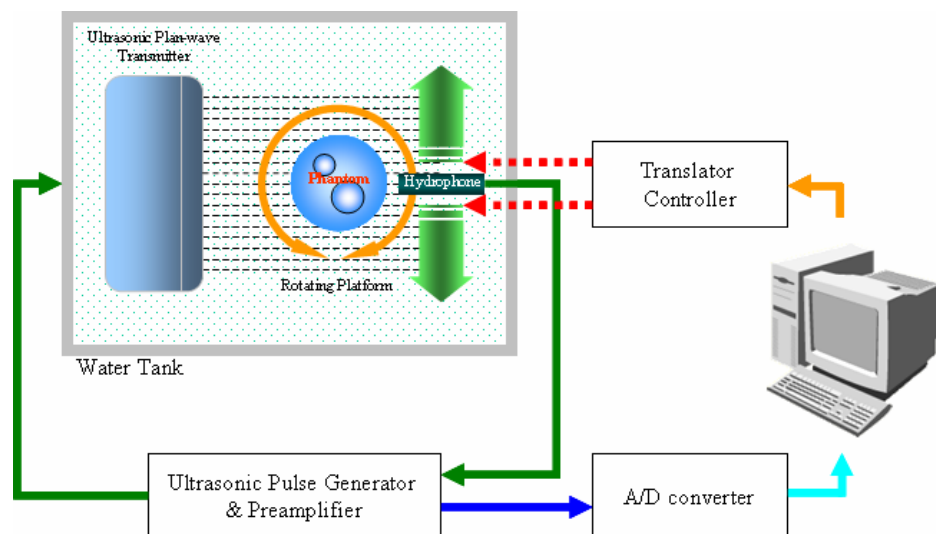
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

จากทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ได้นำเสนอไปนั้น ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีดังกล่าว ซึ่งจะมีการนำเสนอในส่วนของระบบที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองต่างๆ รวมไปถึงผลลัพธ์ที่เปรียบเทียบกับวิธีการเดิมเพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานที่กล่าวไว้เบื้องต้น

5.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้นั้นสามารถเขียนแทนด้วยแบบจำลองได้ดังรูปที่ 5.1 โดยมีหลักการคือ ทำการส่งสัญญาณกระตุ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าสู่อัลตราโซนิกทรานส์มิชเชอร์ โดยคลื่นที่กำเนิดขึ้นมานั้นจะถูกส่งผ่านวัตถุจำลองที่ใช้ในการทดสอบ หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า แฟนทอม (Phantom) ซึ่งแฟนทอมนี้จำเป็นที่จะต้องแช่อยู่ในน้ำเพื่อให้เป็นตัวกลางในการเดินทางของคลื่น สำหรับสัญญาณที่เดินทางผ่านวัตถุทดสอบมาได้นั้นจะถูกทำการบันทึกความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ตัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก หรือที่เรียกว่าไฮโดรโฟน (Hydrophone) การเก็บข้อมูลโปรเจกชันในแต่ละมุมนั้นจะทำการเก็บข้อมูลแบบขนาน ซึ่งจะต้องทำการสแกนครั้งละจุดตลอดความยาวของช่วงที่ต้องการเก็บข้อมูล โดยในที่นี้จะทำการควบคุมส่วนเคลื่อนเพื่อเลื่อนตำแหน่งของทรานส์มิชเชอร์และไฮโดรโฟนให้เป็นลักษณะการสแกนแบบขนาน



รูปที่ 5.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดลอง

ข้อมูลที่ได้รับมาในแต่ละจุดนั้นจะถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ เมื่อได้รับข้อมูลครบทุกจุดตลอดแนวระนาบที่พิจารณา จึงจะสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปคำนวณหาข้อมูลโปรเจกชันในมุนนั้นๆได้ หลังจากนั้นก็จะทำการหมุนแท่นหมุนวัตถุ (Rotating Platform) เพื่อทำการหาข้อมูลโปรเจกชันในมุนอื่นๆในลักษณะเดียวกัน เมื่อได้รับข้อมูลโปรเจกชันจนครบทุกมุมรอบวัตถุแล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดไปใช้ในกระบวนการสร้างภาพตัดขวางต่อไป

สำหรับส่วนประกอบต่างๆของระบบที่ใช้งานจริงนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์



รูปที่ 5.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบระนาบที่ใช้ในการทดลอง

อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้นั้น เป็นทรานส์ดิวเซอร์ที่ให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกแบบระนาบ (Plane-wave Ultrasonic Transducer) มีความถี่ตอบสนอง (Resonance Frequency) ที่ 3.5 MHz

5.1.2 ไฮโดรโฟน

ไฮโดรโฟนนี้นั้นถือเป็นอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์รูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรับคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลองนี้ มีความถี่กลางอยู่ที่ 3.5 MHz

5.1.3 เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้น

เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ (Ultrasonic Impulse Generator) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องของบริษัท Panametrics Model : 500PR ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลอง



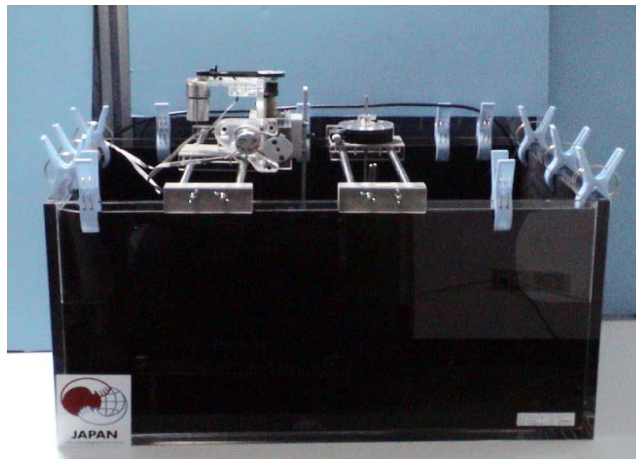
รูปที่ 5.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

5.1.4 อ่างบรรจุน้ำ

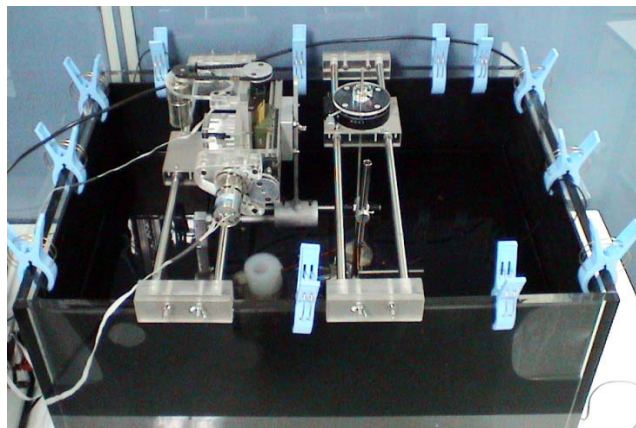
อ่างบรรจุน้ำนี้ใช้บรรจุน้ำเพื่อเป็นตัวกลางในการเดินทางของคลื่น โดยอ่างบรรจุน้ำนี้จะทำหน้าที่อีกส่วนหนึ่งคือเป็นโครงสร้างหลักในการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ ส่วนเลื่อน แท่นหมุน ฯลฯ ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 โดยจะเห็นได้ว่าในบริเวณผนังของอ่างนั้น จะมีวัสดุที่ใช้ในการดูดคลื่นคลื่นติดไว้ เพื่อป้องกันการเกิดการสะท้อนของคลื่นที่บริเวณผนังของอ่างเพื่อไม่ให้คลื่นนี้สะท้อนกลับเข้าไปรบกวนคลื่นภายในระบบได้

5.1.5 ส่วนเลื่อนและแท่นหมุน

ส่วนเลื่อน (Translator) ที่ใช้ในระบบการสแกนแบบขนานเพื่อเก็บผลของสัญญาณในแต่ละจุด และแท่นหมุน (Rotating Platform) ที่ใช้ในการหมุนแพลตฟอร์มเพื่อเปลี่ยนมุมในการเก็บข้อมูลโปรเจกชันนั้น จะถูกติดตั้งไว้กับอ่างบรรจุน้ำดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.6

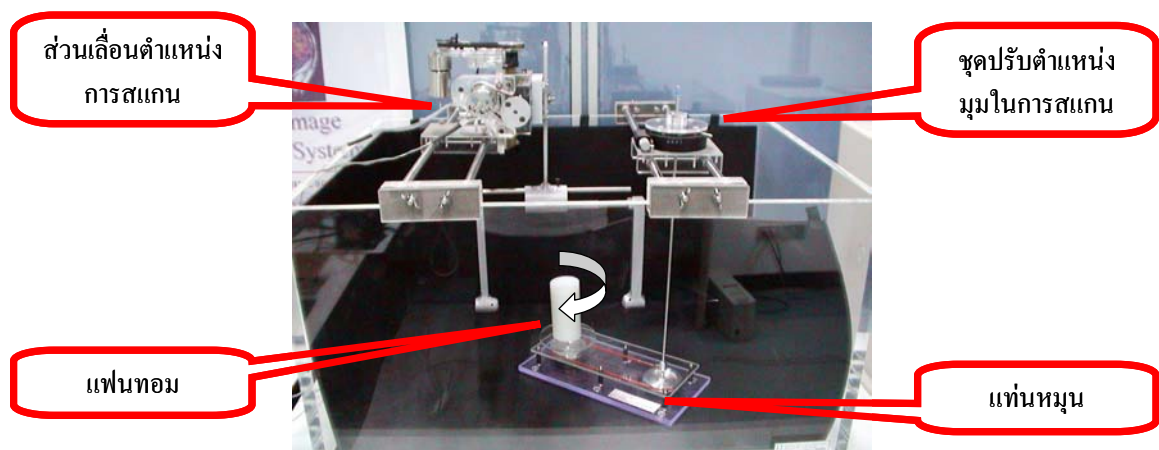


(a) Side View



(b) Over View

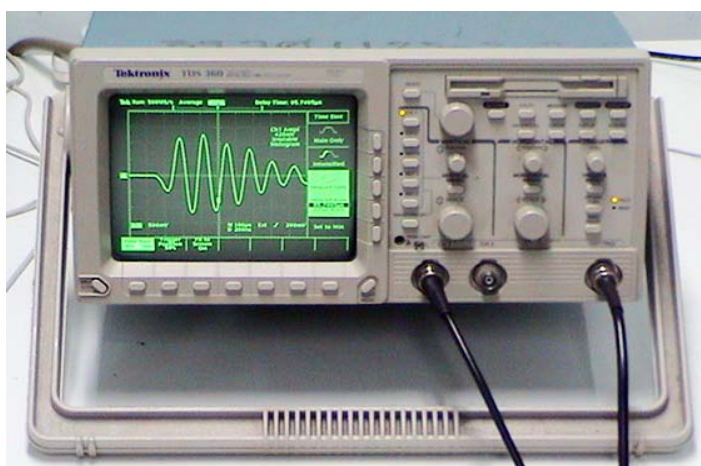
รูปที่ 5.5 อ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.6 ส่วนประกอบต่างๆภายในอ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง

5.1.6 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปนั้นถูกนำมาใช้ในการวัดและบันทึกค่าของสัญญาณต่างๆ รวมไปถึงการส่งข้อมูลสัญญาณต่าง ๆ นั้นเข้าไปประมวลผลที่คอมพิวเตอร์ สำหรับในที่นี้ได้ใช้ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 360 โดยทำการควบคุมผ่านพอร์ตสื่อสาร GPIB (IEEE-488 GPIB : General Purpose Interface Bus) ซึ่งข้อมูลที่ถูกส่งให้คอมพิวเตอร์ในแต่ละครั้งที่ทำการวัดสัญญาณนั้น จะเป็นข้อมูลจุดจำนวน 1000 จุด ที่มีจากการสุ่ม (Sampling) ด้วยความถี่สูง โดยข้อมูลในแต่ละจุดนั้นจะมีค่าที่เป็นไปได้ 256 ค่า โดยข้อมูลจะถูกส่งออกมาในรูปแบบของข้อมูลรหัสแอสกี 8 บิต (8bit ASCII) นั่นคือมีค่าตั้งแต่ 0x00 ไปจนถึง 0xFF



รูปที่ 5.7 ออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้งาน

เนื่องจากการอ่านสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกนั้น เป็นการอ่านสัญญาณที่ให้ความสนใจในแกนเวลาเป็นช่วงกว้าง จึงทำให้การอ่านสัญญาณในโหมดคาบเวลา (Period) ทั่วไปไม่สามารถพิจารณาสัญญาณที่ตรวจวัดได้ชัดเจน ดังนั้นออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้จึงต้องสามารถทำการวัดสัญญาณในโหมดการหน่วงเวลา (Delay Mode) ซึ่งทำให้สามารถเลื่อนจุดที่จะพิจารณาไปที่เวลาที่พบสัญญาณของแต่ละคาบเวลาได้

5.1.7 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer : PC) เป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของระบบ เนื่องจากต้องใช้ในการประมวลผลต่างๆ รวมไปถึงการรับค่าจากออสซิลโลสโคปเพื่อใช้ในการประมวลผล โดยคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU Intel® Pentium3 733 MHz มีหน่วยความจำในการประมวลผล (RAM) ขนาด 256 MB



รูปที่ 5.8 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง

5.2 การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ

การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุที่ใช้ในการทดลอง จะใช้หลักการเปรียบเทียบความเร็วในการเดินทางของคลื่นในขณะที่มีวัตถุ และไม่มีวัตถุ โดยหากเริ่มพิจารณาจากสมการที่ 5.1 ซึ่งเป็นสมการหาค่าของดัชนีหักเหจะได้ว่า

$$n_o = \frac{v_o}{v_w} \quad (5.1)$$

เมื่อ

n_o แทนค่าของดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ (Refractive Index of Object)

v_o แทนค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในเนื้อวัตถุ (Object Sound Velocity)

v_w แทนค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในตัวกลางซึ่งในที่นี้ ได้นำน้ำมาใช้เป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงเป็นความเร็วในการเดินทางของคลื่นเสียงในน้ำ (Sound Velocity of Water) โดยปกติที่อุณหภูมิห้องจะมีความเร็วประมาณ 1500 เมตรต่อวินาที

จากสมการที่ 5.1 นั้น จะพบว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นในวัตถุนั้นเป็นสิ่งที่ยังไม่ทราบค่า ต่างจากความเร็วในการเดินทางของคลื่นในน้ำ ซึ่งมีค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ

$$v = \frac{l}{t} \quad (5.2)$$

เมื่อ

l แทนค่าของระยะทางทั้งหมดที่คลื่นเดินทางได้ในช่วงเวลา t

t เวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปเป็นระยะทาง l

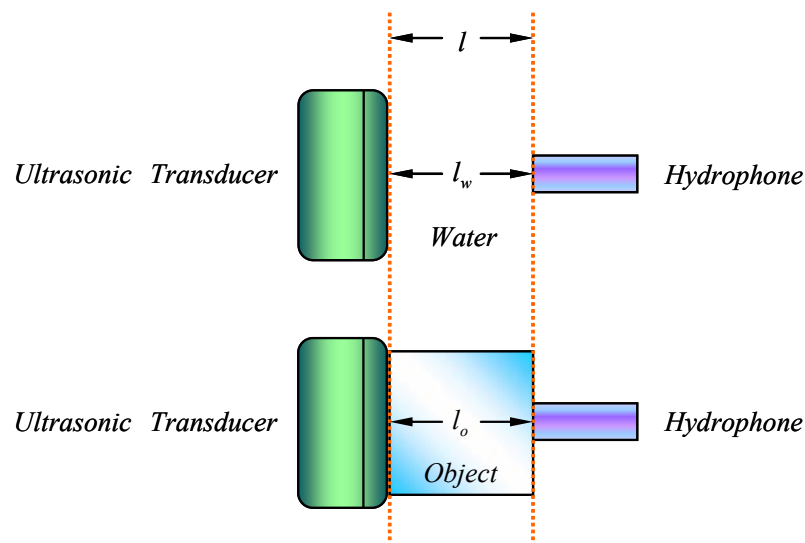
หากนำสมการหาค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นดังสมการที่ 5.2 แทนลงในสมการที่ 5.3 จะได้เป็น

$$n_o = \frac{v_o}{v_w} = \frac{l_o/t_o}{l_w/t_w} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ 5.3 จะพบว่าหากพิจารณาให้ระยะทางที่คลื่นเดินทางในน้ำ (l_w) และระยะทางที่คลื่นเดินทางในวัตถุ (l_o) มีค่าเท่ากัน ($l_o = l_w$) จะทำให้สมการในการหาค่าดัชนีหักเห นั้นขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นทั้งสอง นั่นคือ

$$n_o = \frac{t_w}{t_o} \quad (5.4)$$

สมการที่ 5.4 นี้เป็นการหาค่าดัชนีหักเหที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากค่าที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคปในโหมคนั้นจะ สามารถบันทึกค่าของเวลาที่พบคลื่นได้โดยตรงจึงทำให้สามารถหาค่าดัชนีหักเหของวัตถุจากข้อมูลดังกล่าวได้

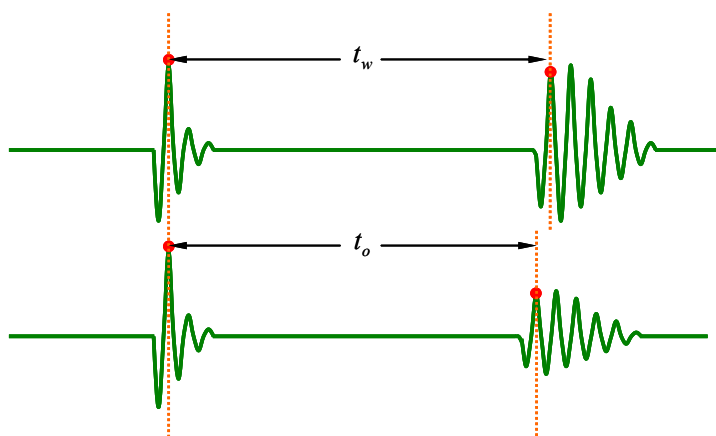


รูปที่ 5.9 แบบจำลองวิธีการวัดค่าดัชนีหักเหของวัตถุ

รูปที่ 5.9 นั้นเป็นแบบจำลองการหาค่าดัชนีหักเหของวัตถุ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุมคือระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยลักษณะของสัญญาณที่จะพิจารณาจะมีลักษณะดังเช่นแบบจำลองสัญญาณในรูปที่ 5.10

ในแบบจำลองสัญญาณในรูปที่ 5.10 นั้นจะเห็นถึงความแตกต่างระหว่างเวลาที่ใช้ในการเดินทางของคลื่นที่ระยะทางเท่ากัน ระหว่างคลื่นที่เดินทางผ่านน้ำและวัตถุ ซึ่งค่าเวลานี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัตถุ โดยคลื่นจะเดินทางผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าได้เร็วกว่าวัตถุที่มี

ความหนาแน่นต่ำกว่า ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำหรือตัวกลางที่นำมาใช้งานใดๆ จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าวัตถุ นั่นคือคลื่นที่เดินทางผ่านวัตถุจะใช้เวลาใช้น้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 5.10 การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ (บน : สัญญาณที่คลื่นเดินทางผ่านน้ำหรือตัวกลางใดๆ , ล่าง : สัญญาณที่คลื่นเดินทางผ่านวัตถุ)

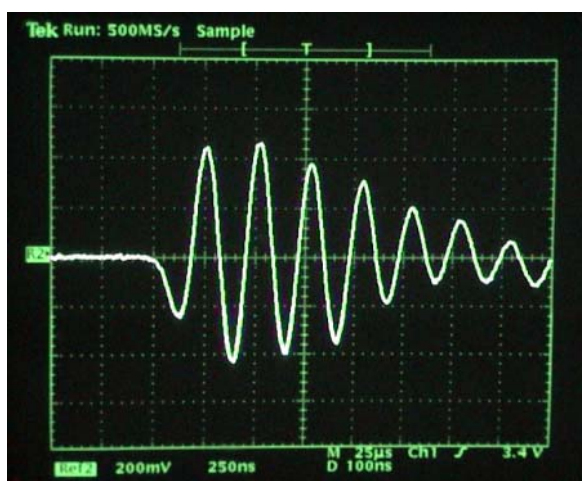
ถึงแม้ว่าหลักการดังกล่าวจะสามารถหาค่าของดัชนีหักเหได้ แต่สิ่งที่ยากในการนำไปใช้งานคือวัตถุที่ต้องการจะหาค่าดัชนีหักเห นั้นๆ ต้องเป็นวัตถุเนื้อเดียวที่มีรูปร่างที่สามารถแนบเข้ากับตัวทรานส์ดิวเซอร์ได้ ซึ่งสำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ที่ศึกษากับแผ่นทอมที่สร้างขึ้นจากเจลลาติน จะมีการนำน้ำเจลลาตินที่ใช้ในการหล่อแผ่นทอมที่ต้องการทราบค่าดัชนีหักเห นั้น ทำการหล่อลงในแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมด้วย เพื่อที่จะใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหด้วยวิธีดังกล่าว เนื่องจากแผ่นทอมที่ใช้ในการทดลองนั้นอาจมีรูปทรงที่ไม่สามารถแนบเข้ากับตัวทรานส์ดิวเซอร์ได้ อีกทั้งภายในของแผ่นทอมอาจมีช่องว่าง หรือมีสารที่มีความหนาแน่นอื่นๆ สอดแทรกอยู่ภายในทำให้ไม่สามารถหาค่าดัชนีหักเหได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 5.11 การหาค่าดัชนีหักเหของแผ่นทอมจากเจลลาตินสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากสารเดียวกัน

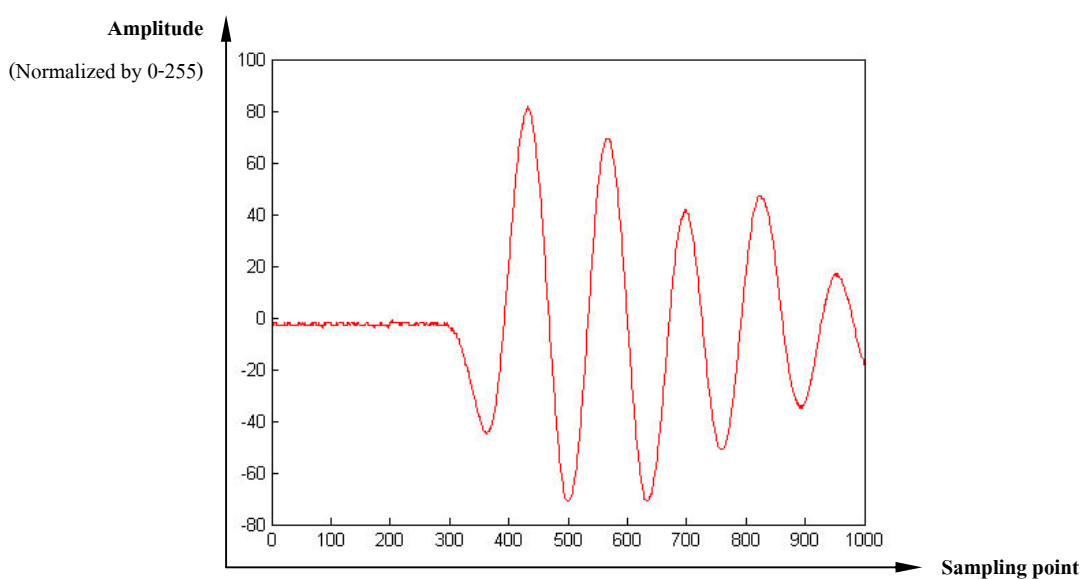
5.3 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ

ในการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนี้นั้น จะเริ่มจากการเก็บข้อมูลโปรเจกชันในแต่ละมุมของวัตถุ โดยข้อมูลแต่ละโปรเจกชันจะมาจากการเก็บผลแบบขนานเหมือนดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยลักษณะของข้อมูลแต่ละจุดที่พบบนออสซิลโลสโคปจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.12



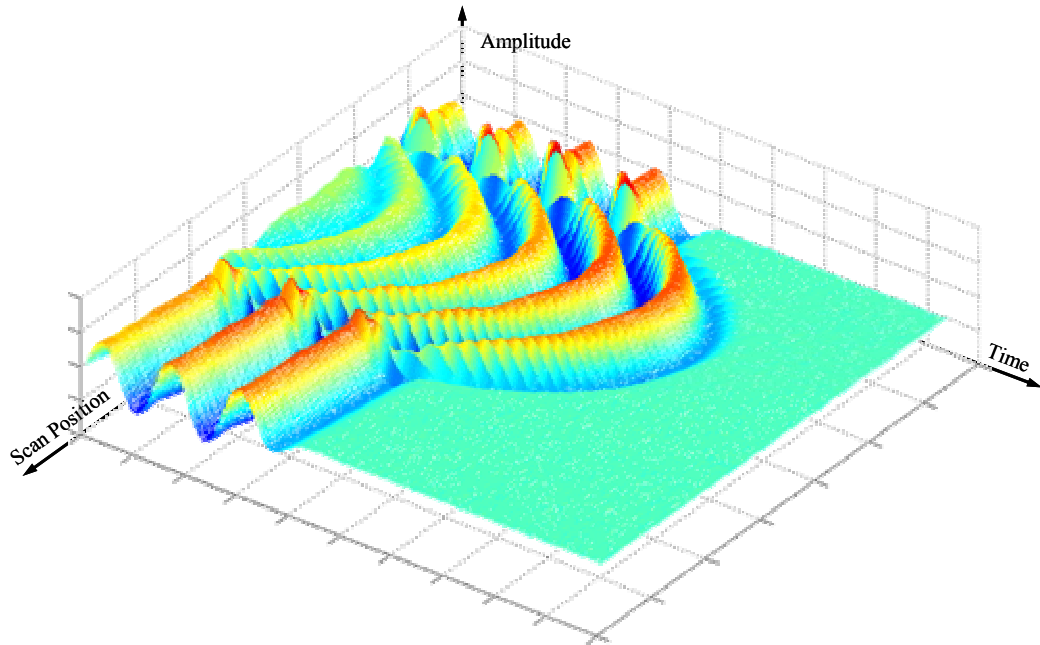
รูปที่ 5.12 ลักษณะของคลื่นที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป

ข้อมูลในแต่ละจุดนี้จะถูกนำไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตสื่อสาร GPIB ซึ่งข้อมูลที่อ่านเข้ามานั้นจะสามารถแสดงทางคอมพิวเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างข้อมูลที่อ่านเข้ามาแสดงผลยังเครื่องคอมพิวเตอร์

เมื่อทำการเก็บข้อมูลเหล่านี้ตลอดแนวระยะนาบที่พิจารณา ซึ่งถือเป็นข้อมูล 1 โปรเจกชันนั้น จะสามารถพล็อตลักษณะของระยะนาบคลื่นขึ้นได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นระยะนาบคลื่นที่สร้างขึ้นจากการ เก็บผลตลอดแนวระยะนาบจำนวน 80 จุด โดยมีแผ่นทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตรวางขวางอยู่ในสนามคลื่น



รูปที่ 5.14 ตัวอย่างระยะนาบคลื่นที่พล็อตขึ้นจากข้อมูล 1 โปรเจกชัน

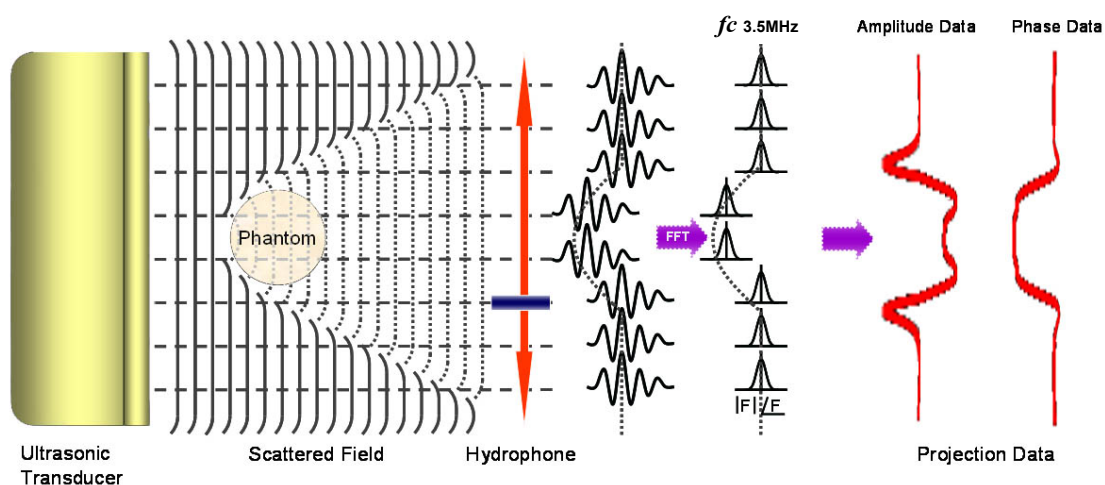
จากรูปที่ 5.14 นั้นจะพบว่าข้อมูลที่ได้นั้น ประกอบไปด้วยข้อมูลทางเวลา และทางขนาดซึ่ง ข้อมูลโปรเจกชันหนึ่งๆนั้น จำเป็นจะต้องวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแตกต่างทางเฟสและแอมพลิจูด ของสัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ และทำการเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ (Normalize) นั่นก็อยู่ใน ขณะที่ระยะนาบคลื่นนี้ไม่มีวัตถุ เพื่อหาความแตกต่างเฉพาะทางด้านเฟสและแอมพลิจูดออกมา โดย กระบวนการนี้ต้องกระทำที่แต่ละจุดที่ทำการเก็บผล (Scan Position) ตามสมการที่

$$AmplitudeData(ScanPosition) = \frac{abs(FFT(Data_o(ScanPosition), SelectFreq))}{abs(FFT(Data_w(ScanPosition), SelectFreq))} \quad (5.5)$$

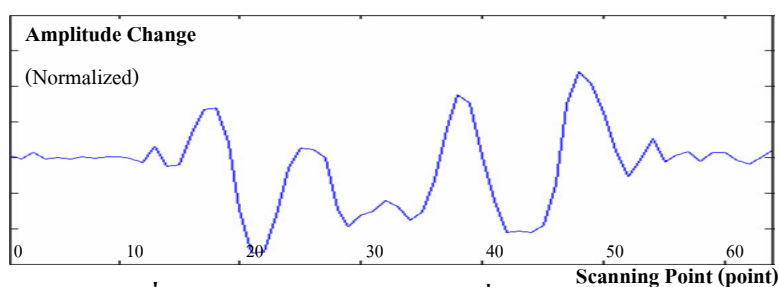
$$PhaseData(ScanPosition) = angle(FFT(Data_o(ScanPosition), SelectFreq)) - angle(FFT(Data_w(ScanPosition), SelectFreq)) \quad (5.6)$$

จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 นั่นคือสมการเพื่อหาข้อมูลทางแอมพลิจูดและเฟส ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงผลของแผ่นทอมโดย $Data(ScanPosition)$ นั้นแทนข้อมูลทั้ง 1000 จุดของสัญญาณ ที่ตำแหน่ง $ScanPosition$ ที่กำลังพิจารณา โดยแบ่งออกเป็น $Data_o$ ซึ่งเป็นข้อมูลในขณะที่มี

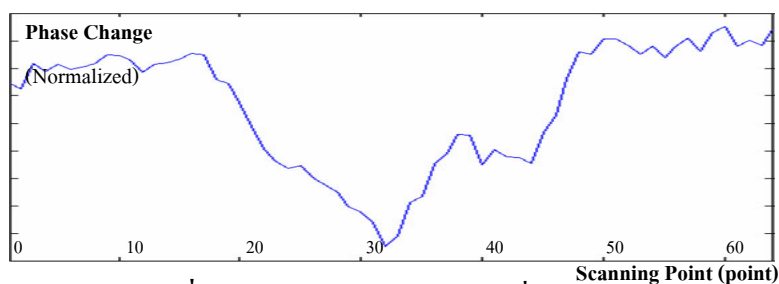
วัตถุ และ $Data_w$ นั้นแทนข้อมูลในกรณีที่ไม่มีวัตถุ ซึ่งการทำ FFT ทั้ง 1000 จุด ของข้อมูลทั้งสอง ณ.ตำแหน่งที่กำลังพิจารณานั้น จะทำให้ได้ข้อมูลออกมาเป็นจำนวนเชิงซ้อนค่าหนึ่ง โดยการเลือกค่าความถี่ในการทำ FFT นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการ sampling และ จำนวนจุดข้อมูลในแต่ละสัญญาณ ค่าจำนวนจริง (real) ที่ได้มาจะแทนข้อมูลทางแอมพลิจูดของสัญญาณ และค่าของจำนวนเชิงซ้อน (Img) จะแทนค่าของข้อมูลทางเฟส ซึ่งค่าทั้งสองจะถูกใช้เป็นข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส และข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด ในตำแหน่งที่กำลังพิจารณานั้นๆ ดังนั้นเมื่อทำการหาค่าดังกล่าวจนครบทุกจุดก็จะได้ข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส และข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด ของมมุนั้นๆออกมา ตัวอย่างของข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสและแอมพลิจูด แสดงดังรูปที่ 5.16 และ 5.17



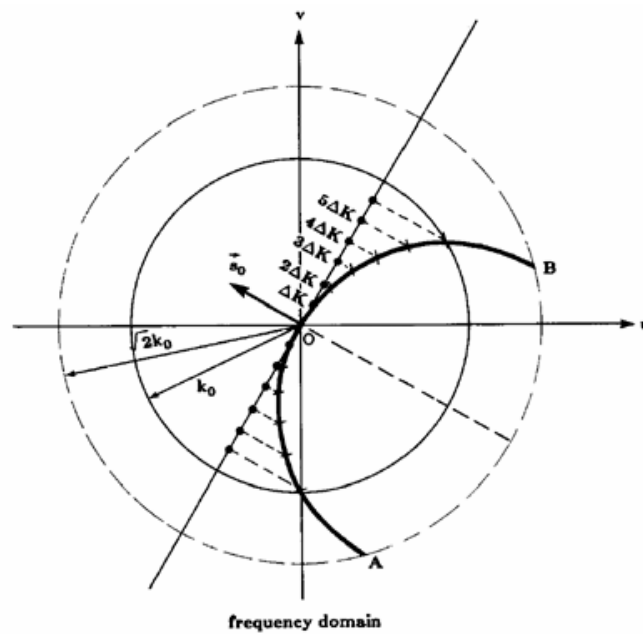
รูปที่ 5.15 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ



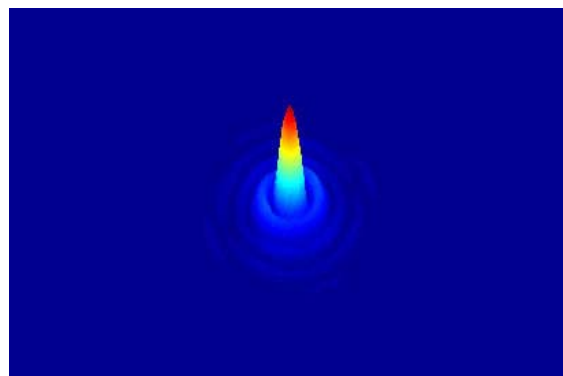
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด



รูปที่ 5.17 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส



รูปที่ 5.18 การวางข้อมูลโปรเจกชันลงบนโดเมนความถี่



รูปที่ 5.19 ตัวอย่างข้อมูลบนโดเมนความถี่หลังจากการวางข้อมูล

หลังจากที่ได้ข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสและทางขนาด ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปทำการแปลงฟูเรียร์เพื่อวางลงในโดเมนความถี่(ดังรายละเอียดในบทที่ 4) ซึ่งรูปที่ 5.18 นั้นแสดงการเทียบตำแหน่งของข้อมูลโปรเจกชันกับเส้นโค้ง โดยระยะ ΔK นั้นแทนระยะห่างระหว่างจุดข้อมูล $\vec{a}_0$ แทนทิศทางการพุ่งเข้าของสนามคลื่นของโปรเจกชันนั้นๆ สำหรับข้อมูลที่วางลงไปในนั้นจะวางลงไปในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนแบบเชิงขั้ว (Polar form) โดยมีข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูดเป็นค่าทางขนาด และข้อมูลโปรเจกชันทางเฟสเป็นค่ามุมนั่นเอง รูปที่ 5.19 นั้นแสดงตัวอย่างของโดเมนความถี่หลังจากวางข้อมูลจำนวน 36 โปรเจกชันลงไป

5.4 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนอนมที่เป็นสารเนื้อเดียว

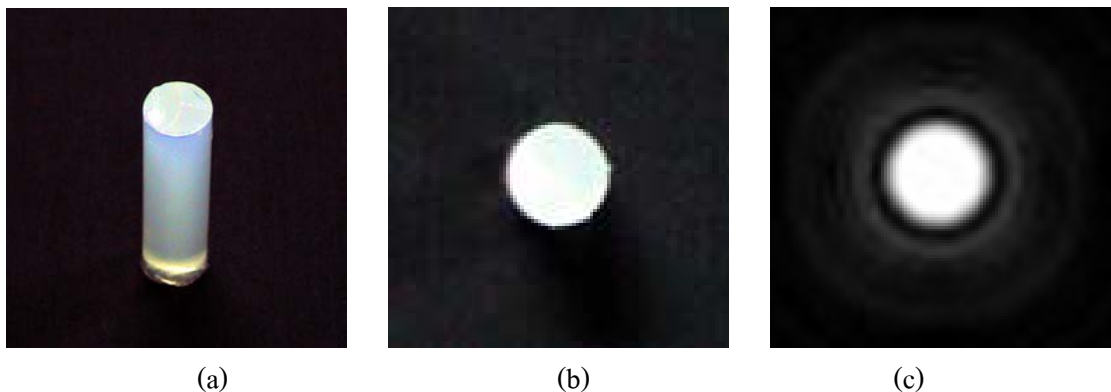
ในการทดลองสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนนั้น จะเริ่มจากการทดลองสร้างภาพตัดขวางของแฟนอนมที่เป็นสารเนื้อเดียว (Homogeneous Phantom) ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นภาพโครงสร้างของวัตถุ สำหรับวิธีการที่ใช้วัดความถูกต้องของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น จะใช้การหาค่าความผิดพลาดแบบ Mean Square Error (MSE) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าระดับเทา (Gray-scale) ระหว่างภาพตัดขวางที่ได้มากับภาพของวัตถุที่มาจากการจำลองจากวัตถุจริง สมการที่ 5.7 นั้นแสดงสมการในการหาค่า Mean Square Error

$$MSE = \frac{\sum_{y=0}^j \sum_{x=0}^i [o(x,y) - o'(x,y)]^2}{\sum_{y=0}^j \sum_{x=0}^i [o(x,y)]^2} \times 100 \quad (5.7)$$

โดยที่

$o(x,y)$ แทนค่าฟังก์ชันวัตถุของวัตถุจริง (ในที่นี้คือค่าระดับเทา) ที่ตำแหน่ง x,y ใดๆ

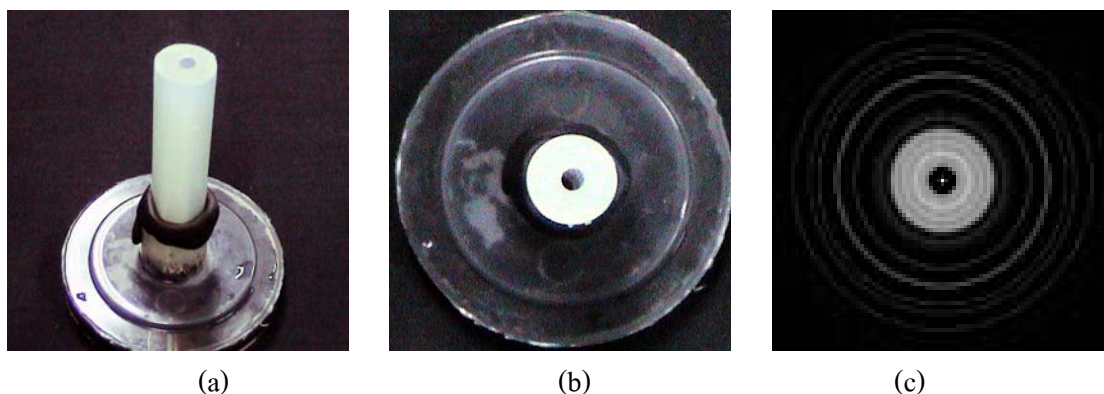
$o'(x,y)$ แทนค่าฟังก์ชันวัตถุที่ได้รับจากภาพตัดขวางที่ตำแหน่ง x,y ใดๆ



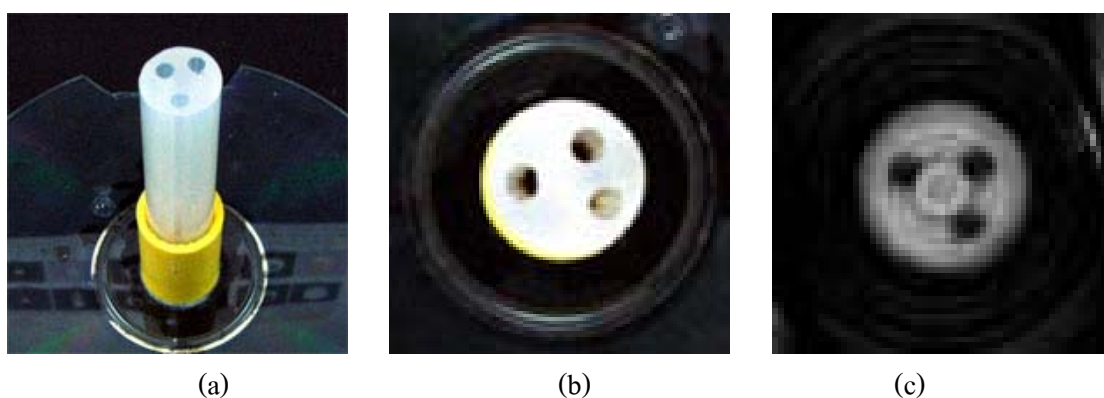
รูปที่ 5.20 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนอนมทรงกระบอกตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร

(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนอนม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนอนม

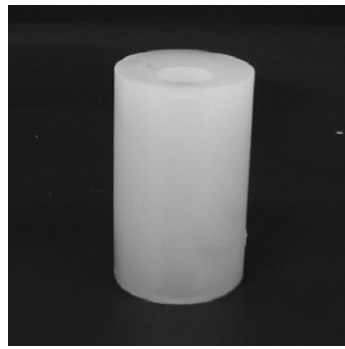
(c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ดัชนีหักเหของแฟนอนม 1.055, MSE = 13.81%]



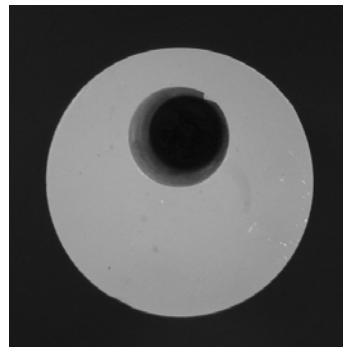
รูปที่ 5.21 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนอนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนอนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนอนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ดัชนีหักเหของแฟนอนทอม 1.083 ค่าวนควค่า MSE ได้ 9.47%]



รูปที่ 5.22 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนอนทอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนอนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนอนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ดัชนีหักเหของแฟนอนทอม 1.022 ค่า MSE = 16.92%]



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนอนม

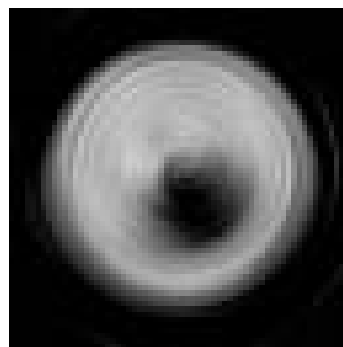


(b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนอนม



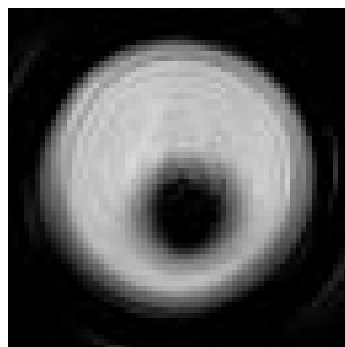
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 42.33%



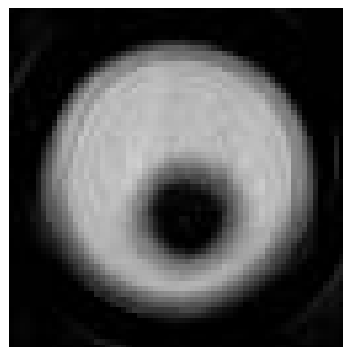
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 29.71%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

MSE : 16.11%



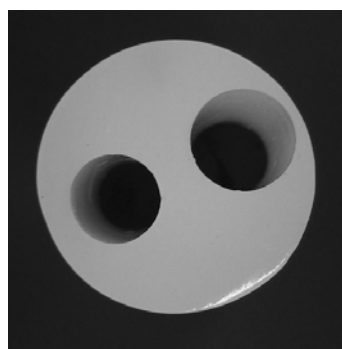
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 13.29%

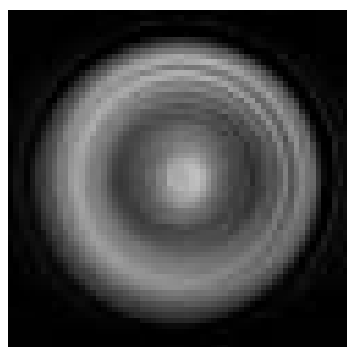
รูปที่ 5.23 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแฟนอนมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟ้นทอม

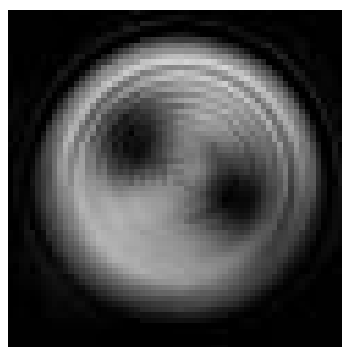


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟ้นทอม



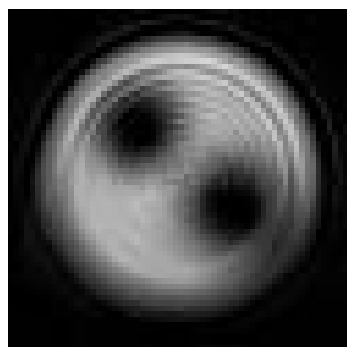
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 56.27%



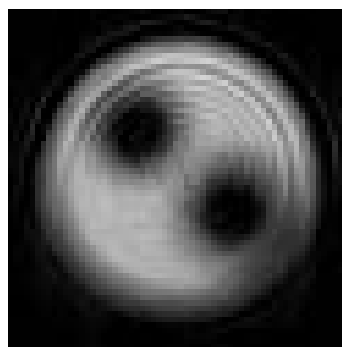
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 33.04%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

MSE : 20.73%



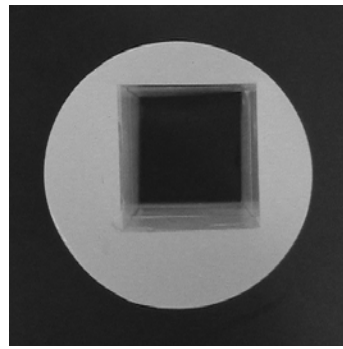
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 18.86%

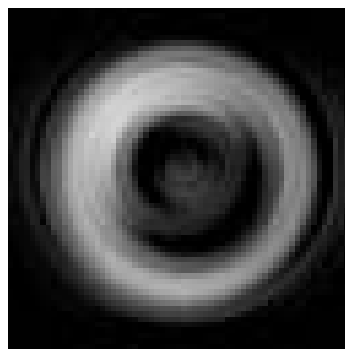
รูปที่ 5.24 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวน โปรเจกชันของเฟ้นทอมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในถูกเจาะเป็นรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และ 1.8 เซนติเมตร



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟ้นทอม

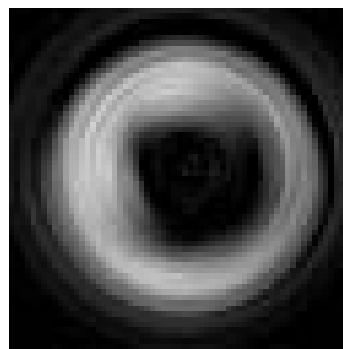


(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟ้นทอม



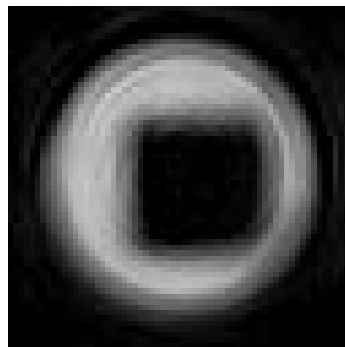
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 58.77%



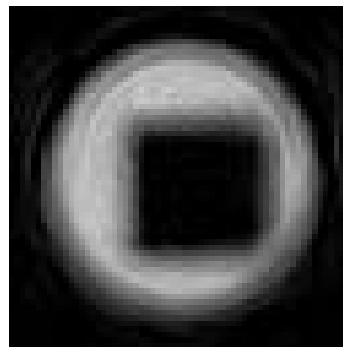
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 38.16%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

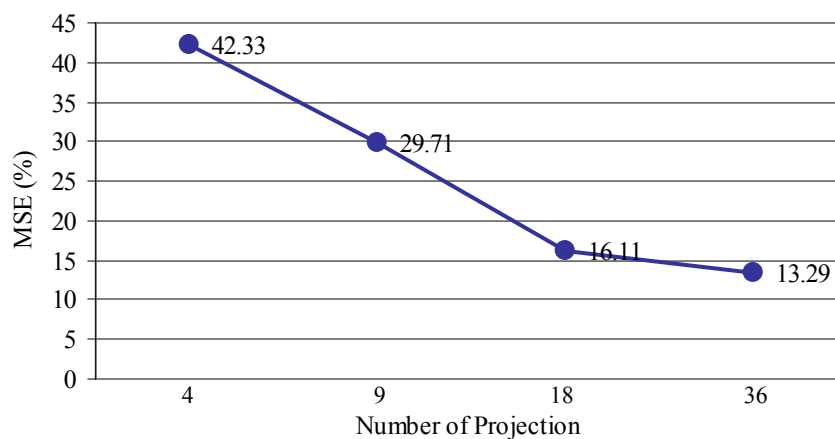
MSE : 21.13%



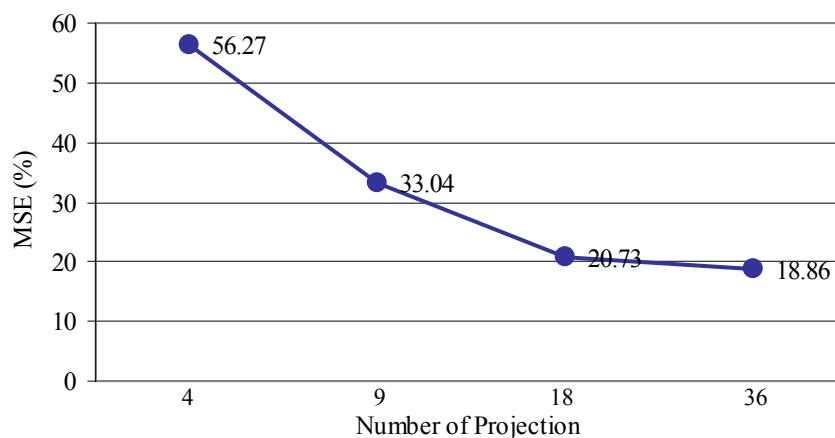
(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 19.41%

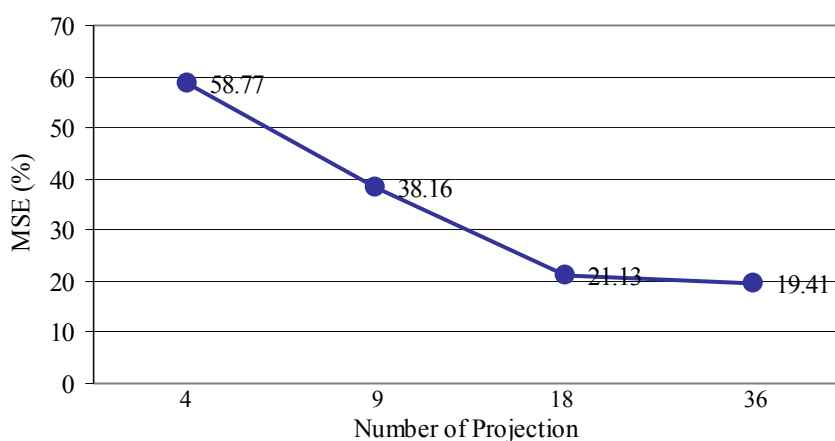
รูปที่ 5.25 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวน โปรเจกชันของเฟ้นทอมทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีช่องรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผนทอมรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผนทอมรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผนทอมรูปที่ 5.25

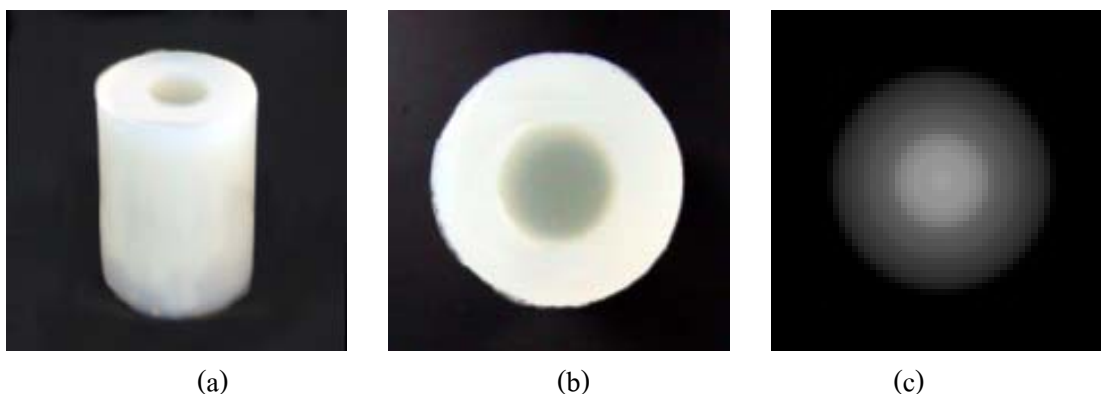
จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอมานั้น ทำให้พบว่าทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบน สามารถที่จะสร้างภาพตัดขวางจากคลื่นอัลตราโซนิกในกรณีที่เป็นแผนทอมเนื้อเดียวได้เป็นอย่างดี โดยจากกราฟรูปที่ 5.26-5.28 นั้นทำให้เห็นว่าจำนวน

โปรเจกชันรอบวัตถุนั้นมีผลต่อคุณภาพของภาพตัดขวางโดยตรง เมื่อจำนวนโปรเจกชันมีน้อยเกินไป จะส่งผลให้ไม่สามารถให้รายละเอียดภายในของวัตถุได้ โดยข้อมูลภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางที่ได้มาจากการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนต่อไป

5.5 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน

การสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน (Heterogeneous Phantom) นั้น ค่าระดับเทาที่ได้จากภาพตัดขวางถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากค่าของระดับเทาจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของความหนาแน่น ณ จุดต่างๆภายในวัตถุ โดยการทดลองในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบว่า ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่นำมาใช้นี้ จะสามารถให้รายละเอียดของเนื้อสารที่แตกต่างกันดังกล่าวได้หรือไม่

สำหรับการสร้างแฟนทอมที่มีเนื้อสารแตกต่างไปจากเดิม นั้น จะใช้การผสมสารละลายต่างๆ เช่น น้ำตาล เกลือ ฯลฯ ลงไปในขณะที่เจลลาตินยังคงสถานะเป็นของเหลว ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของแฟนทอมที่มีการผสมสารละลายเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยสามารถนำเจลลาตินที่ยังเป็นของเหลวนี้นำไปใช้ในเพิ่มเติมรายละเอียดภายในของแฟนทอมที่มีอยู่เดิมได้

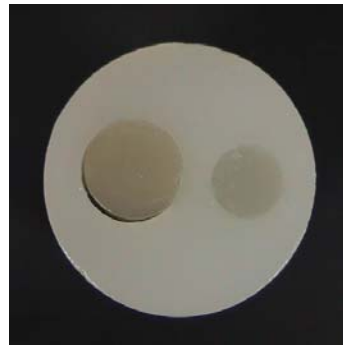


รูปที่ 5.29 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน

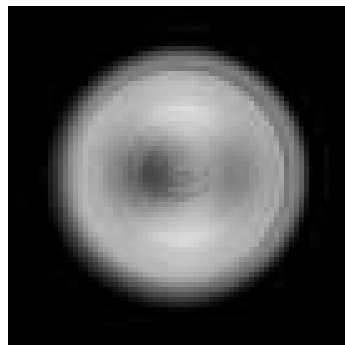
ทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร (a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนทอม (b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนทอม (c) ผลการสร้างภาพตัดขวาง [ค่าวนค่า MSE ได้ 11.68%]



(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเทียนหอม



(b) ภาพถ่ายด้านบนของเทียนหอม



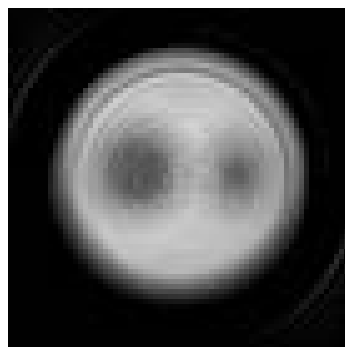
(c) ภาพตัดขวาง (4 Projections)

MSE : 31.31%



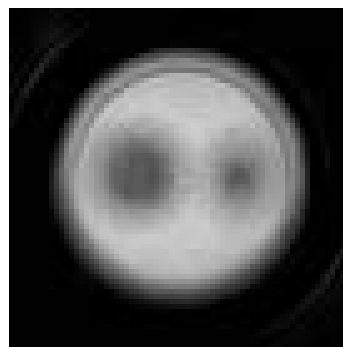
(d) ภาพตัดขวาง (9 Projections)

MSE : 26.29%



(e) ภาพตัดขวาง (18 Projections)

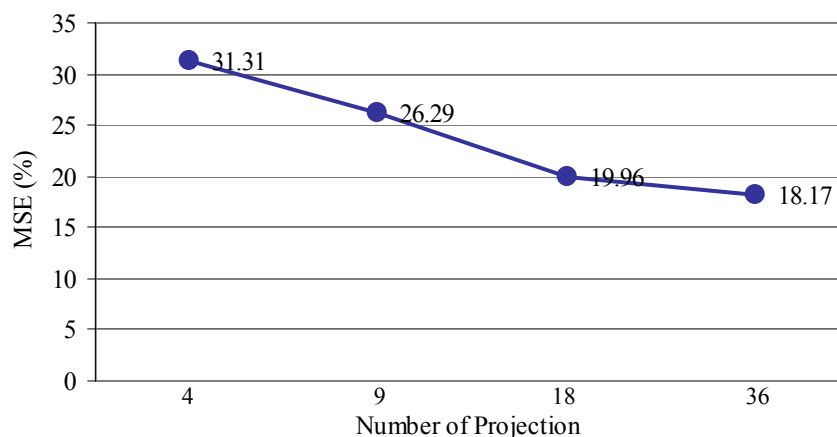
MSE : 19.96%



(f) ภาพตัดขวาง (36 Projections)

MSE : 18.17%

รูปที่ 5.30 ผลการสร้างภาพตัดขวางของเทียนหอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวน โปรเจกชันของเทียนหอมทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร



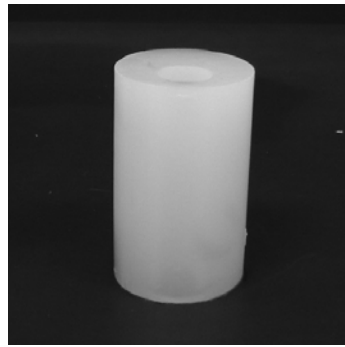
รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแพนทอมรูปที่ 5.30

จะเห็นได้ว่าผลของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น สามารถเห็นถึงความแตกต่างกันระหว่างชั้นวัตถุที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ โดยบริเวณระดับเทาที่มีค่าใกล้เคียงสีขวานั้นจะบ่งบอกถึงจุดที่มีความหนาแน่นสูงกว่าบริเวณที่เป็นสีเทา และสีดำ ผลลัพธ์นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการสร้างภาพตัดขวางจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ในหัวข้อถัดไป

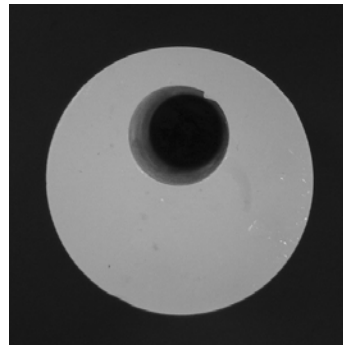
5.6 การเปรียบเทียบคุณภาพภาพตัดขวางระหว่างวิธีการทั้งสอง

จากสมมุติฐานที่ตั้งไว้เบื้องต้น ที่ว่าในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน เมื่อกระทบรอยต่อระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกันนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวาง สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดการเลี้ยวเบนโดยเฉพาะ ซึ่งต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่ประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกให้เป็นเส้นตรงเพื่อที่จะสามารถใช้ กระบวนการสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนทั่วไปในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกได้ ซึ่งการประมาณการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเส้นตรงดังกล่าวจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่มีข้อผิดพลาดบางประการที่สามารถเห็นได้ สำหรับในที่นี้การวัดคุณภาพของภาพตัดขวางจะอ้างอิงค่าของ MSE เป็นหลัก

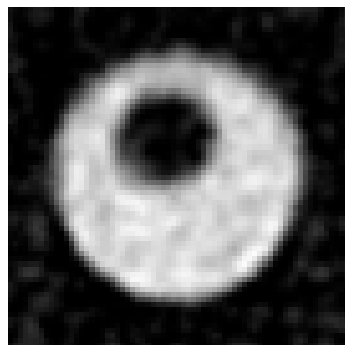
สำหรับผลลัพธ์ที่นำมาเทียบคุณภาพกันนั้น มีจำนวนโปรเจกชัน 36 โปรเจกชัน จำนวนจุดต่อข้อมูลโปรเจกชัน 80 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 1 มิลลิเมตร โดยเป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีการฟิเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป



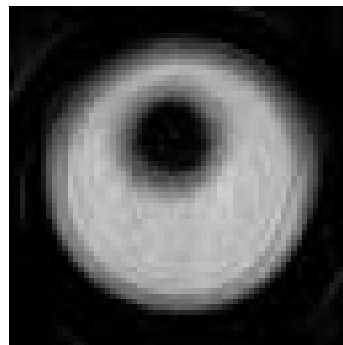
(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟ้นทอม



(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟ้นทอม



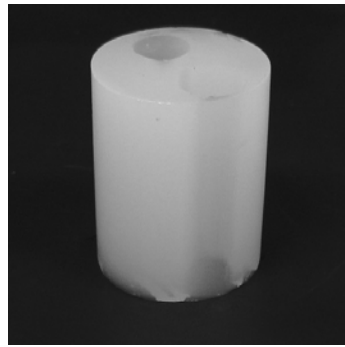
(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

MSE : 19.52%

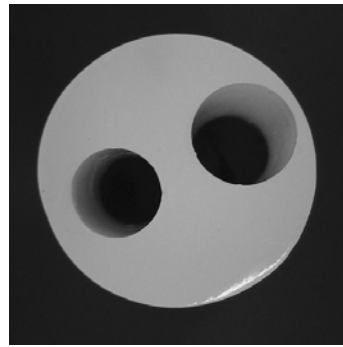
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 13.29%

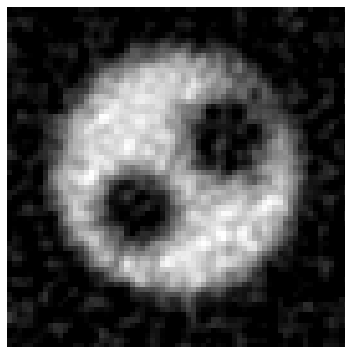
รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน
และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของเฟ้นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



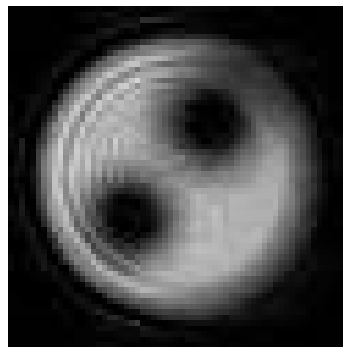
(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟนทอม



(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

MSE : 31.85%

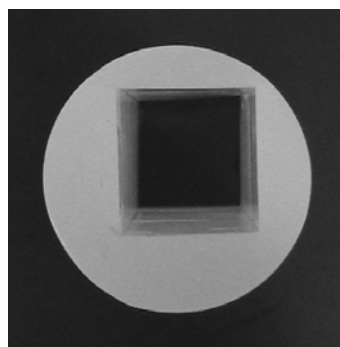
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 18.86%

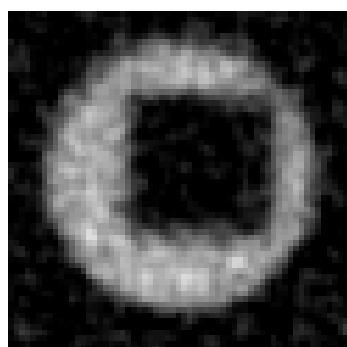
รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน
และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของเฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



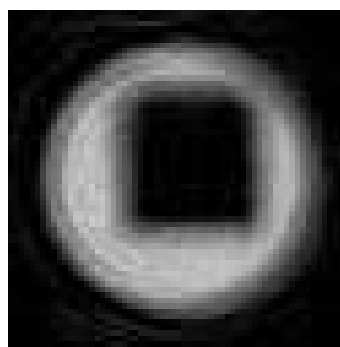
(a) ภาพถ่ายด้านข้างของเฟนทอม



(b) ภาพถ่ายด้านบนของเฟนทอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

MSE : 26.63%

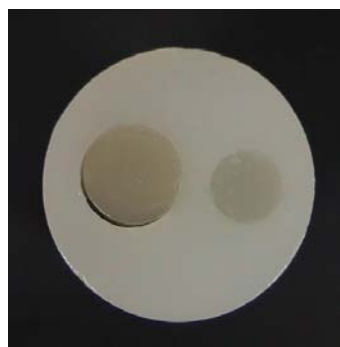
(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 19.41%

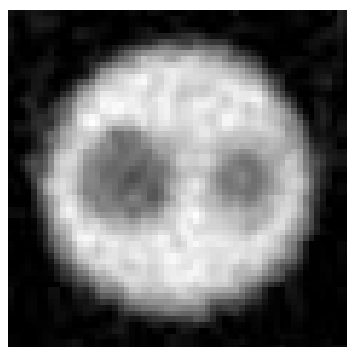
รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน
และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของเฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก



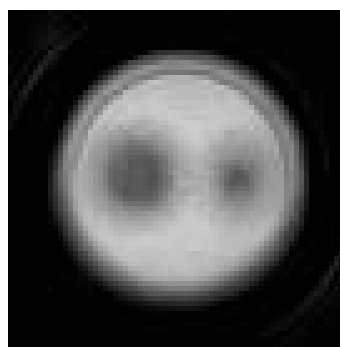
(a) ภาพถ่ายด้านข้างของแฟนนอม



(b) ภาพถ่ายด้านบนของแฟนนอม



(c) ภาพตัดขวาง (FBP)

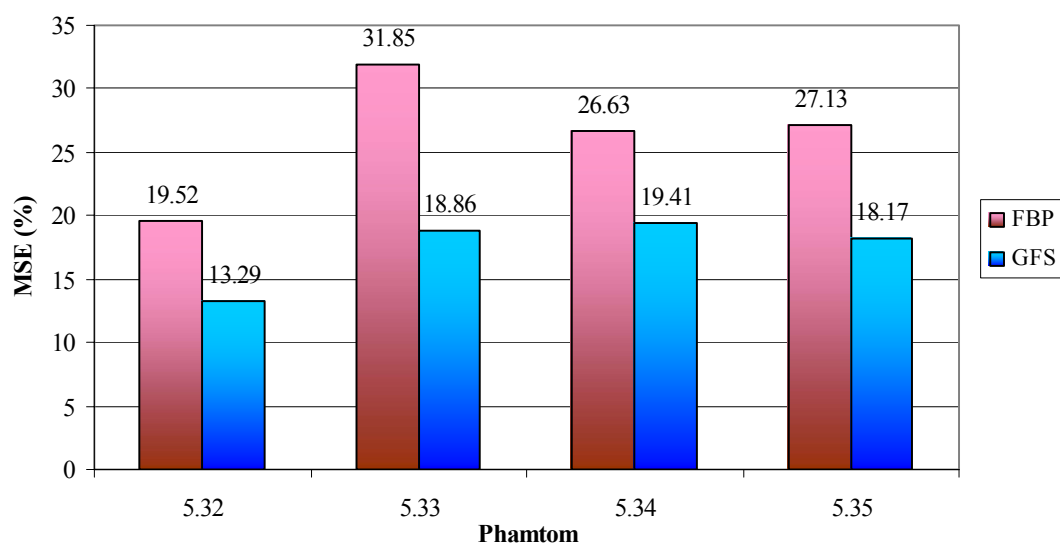


(d) ภาพตัดขวาง (Diffraction)

MSE : 27.13%

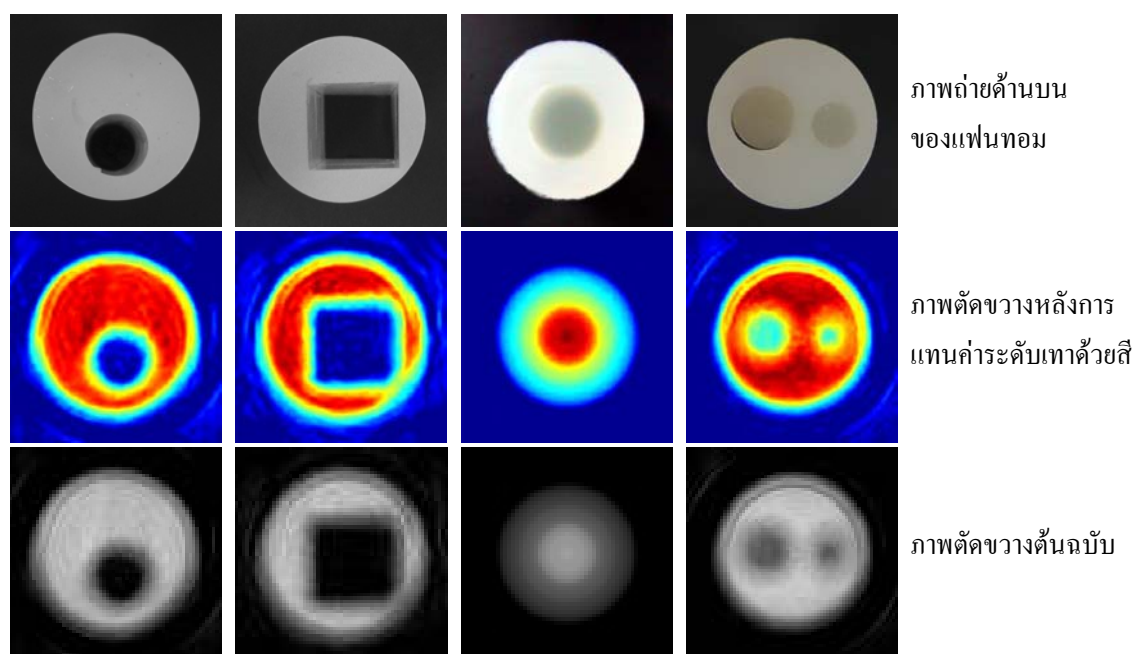
MSE : 18.17%

รูปที่ 5.35 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป ของแฟนนอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ระหว่างวิธีการ FBP และ GFS ของแฟนนอมรูปที่ 5.32-5.35

จากกราฟสรุปผลค่าของ MSE ที่เกิดขึ้นในการสร้างภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน (Filtered Backprojection : FBP) อันเป็นทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน และวิธีการฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป (Generalized Fourier Slice : GFS) ซึ่งเป็นทฤษฎีสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ทำให้สามารถที่จะสรุปได้ว่า ในการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนั้น การใช้ทฤษฎีสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบนนั้นให้ภาพตัดขวางที่มีคุณภาพดีกว่าภาพตัดขวางที่ได้จากการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดที่ไม่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 5.37 การแทนภาพตัดขวางระดับเทาด้วยระดับสี

สำหรับการพิจารณารายละเอียดของภาพตัดขวางที่ได้รับมานั้น เราสามารถใช้เทคนิคแทนค่าระดับเทาด้วยระดับสี (Colormap) ซึ่งช่วยให้สามารถพิจารณาระดับเทาที่มีระดับความแตกต่างกันไม่มากนักของภาพตัดขวางได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 5.37