

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างภาพตัดขวางในโหมดส่งผ่านด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการเลี้ยวเบน
โดยการใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป

นักศึกษา นายคทา จารุงศรีรังสี

รหัสนักศึกษา 47060407

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ. 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอ การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่น ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถสร้างภาพจากค่าตัวแปรต่างๆในสนามคลื่น เช่น ค่าดัชนีหักเห, ความเร็วในการเดินทางของคลื่น ฯลฯ ที่สามารถตรวจวัดได้จากผลการกระเจิงของระนาบคลื่นที่กระทบวัตถุที่ถูกวางอยู่ในสนามคลื่น ณ ความถี่มูลฐานค่าใดค่าหนึ่ง โดยจากการศึกษาพบว่าปัญหาของการกระเจิงของคลื่นนั้น สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยสมการที่ประกอบไปด้วยตัวแปรต่างๆ อันเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้อง แต่สมการที่ใช้ในการอธิบายการกระเจิงของคลื่นนี้นั้น ไม่สามารถหาค่าในลักษณะของสมการเชิงเส้นได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องอธิบายด้วยสมการการแพร่ของคลื่นซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งในกรณีที่ผลของการกระเจิงนี้มีค่าต่ำ จะสามารถใช้การประมาณค่าของ บอร์น(Born) หรือ ไรทอฟ(Rytov) ในการพิจารณาหาผลของสนามที่เกิดการกระเจิงนี้ได้ จึงทำให้สามารถใช้ค่าที่ได้จากการประมาณค่าดังกล่าวเป็นข้อมูลในการสร้างภาพตัดขวางด้วยทฤษฎีทางฟูเรียร์ได้ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นได้นำเสนอผลการทดลองการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ทั้งในส่วนผลการทดลองของวัตถุที่เป็นสารเนื้อเดียว และผลการทดลองของวัตถุที่มีที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน อีกทั้งผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางที่ได้รับจากทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางที่ใช้สำหรับแหล่งกำเนิดซึ่งไม่มีผลกระทบของการเลี้ยวเบน ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคการสร้างภาพตัดขวางสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่มีผลกระทบจากการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้น สามารถให้ภาพตัดขวางที่มีคุณภาพสูงกว่า

Thesis Title	TRANSMISSION MODE ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY USING GENERALIZED FOURIER SLICE THEORY
Student	Mr. Kata Jaruwongrunsee
Student ID.	47060407
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronics Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Chuchart Pintavirooj

ABSTRACT

This thesis concerns about ultrasonic diffraction tomography which is a technique for imaging with acoustic fields in which parameter, such as reflective index, sound velocity, etc., can be mapped from scatter wave resulting from insonifying the object with a plane wave at a single temporal frequency. By solving the direct scattering problem, the scattered field can be presented in term of scattering parameters. Different inversion techniques can be applied to takes advantage of the linearization process of the non-linear wave equation describing wave propagation in heterogeneous media under for limited class of scattering. Specifically, when the scattering effect is weak, one can invoke the Born or Rytov approximation and thus derive the generalized Fourier Slice Theorem to reconstruct the cross-section of the insonified object. In this thesis, experimental results of ultrasonic diffraction tomography for both homogenous and heterogeneous materials have been presented. Compared with non-diffraction tomography, it can be shown that ultrasonic diffraction tomography provide a significantly-improved results.

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่ได้มีส่วนร่วมในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ที่ได้ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน เลี้ยงดูข้าพเจ้าจนเติบโตใหญ่ และให้โอกาสในการศึกษาดังเช่นที่ข้าพเจ้าตั้งใจ รวมไปถึงกำลังใจที่ท่านได้มอบให้ตลอดเวลา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนในการทำงานวิจัยทุกๆด้าน ตลอดช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร. มนต์ สังวรศิลป์ ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนการทำงานต่างๆในทุกด้าน ให้คำแนะนำที่ดีต่างๆ ตลอดจนมอบประสบการณ์ และโอกาสอันมีค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ศิริเดช บุญแสง ซึ่งได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่ง ต่องานวิจัยของข้าพเจ้า รวมถึงทำให้ข้าพเจ้าทราบถึงแนวคิดทฤษฎีพื้นฐานที่ข้าพเจ้าเคยมองข้ามไป

ขอขอบพระคุณ Dr.Hamamoto K. และ นายแก้วกล้า ดังติสานนท์ จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้ให้ความรู้ และความร่วมมือในการทำงานวิจัยร่วมกันขึ้นนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายวลิตะ นาคบัวแก้ว เพื่อนคู่คิดซึ่งให้คำปรึกษาคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ นายบุญญฤทธิ์ ลักษณะประณัย เพื่อนที่พร้อมจะก้าวไปด้วยกันทุกที่ และขอขอบคุณ อ.เพชร นันทิวัฒนา นายจตุรธร ชีรพัฒน์กุล และนายโกสินทร์ กาพรัตน์ เพื่อนผู้ให้การช่วยเหลือเกื้อกูลกันตลอดเวลา

ขอขอบคุณ นายอดิศักดิ์ ร่มพุดตาล รุ่นพี่ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือข้าพเจ้า ในช่วงแรกที่ข้าพเจ้าเริ่มทำงานวิจัยขึ้นนี้

ขอขอบคุณ อ.วิวัฒน์ วิทยชำนาญกุล และนางสาวปาริชาติ พุทธิจารุพงศ์ สำหรับคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงเครื่องมือที่จำเป็นต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ร่วมห้องปฏิบัติการวิจัยสัญญาณชีวภาพ และประมวลภาพ (Bio-Lab) ที่มอบประสบการณ์ที่ดี และให้การช่วยเหลือด้านต่างๆ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กทา จารุงศ์รังสี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานในการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก.....	4
2.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....	4
2.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.1.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตสทริกทีฟ.....	7
2.2 การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกทางการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์.....	9
2.3 การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแรงสูง.....	14
บทที่ 3 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	
โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่ไม่เกิดผลการเลี้ยวเบน.....	17
3.1 ความหมายของภาพตัดขวาง.....	17
3.2 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	18
3.2.1 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์.....	24
3.2.2 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้แบคโปรเจกชัน.....	28
3.2.3 วิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การสร้างภาพตัดขวางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	
โดยใช้เทคนิคสำหรับแหล่งกำเนิดชนิดที่เกิดผลการเลี้ยวเบน.....	32
4.1 การเดินทางของคลื่นที่เกิดการเลี้ยวเบน.....	32
4.1.1 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางเนื้อเดียว.....	32
4.1.2 สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่มีเนื้อสารแตกต่าง.....	34
4.2 การประมาณค่าเข้าสู่สมการคลื่น.....	37
4.2.1 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของบอร์น.....	37
4.2.2 การประมาณค่าอันดับหนึ่งของไรทอฟ.....	40
4.3 การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป.....	43
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	52
5.1 ระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	52
5.1.1 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....	53
5.1.2 ไฮโดรโฟน.....	53
5.1.3 เครื่องให้กำเนิดสัญญาณกระตุ้น.....	53
5.1.4 อ่างบรรจุน้ำ.....	54
5.1.5 ส่วนเลื่อนและแท่นหมุน.....	54
5.1.6 ออสซิลโลสโคป.....	56
5.1.7 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	56
5.2 การวัดค่าดัชนีหักเหสัมพันธ์กับน้ำของวัตถุ.....	57
5.3 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ.....	60
5.4 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากเฟ้นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียว.....	64
5.5 การทดลองสร้างภาพตัดขวางจากเฟ้นทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน....	70
5.6 การเปรียบเทียบคุณภาพภาพตัดขวางระหว่างวิธีการทั้งสอง.....	72
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก..... 81

ประวัติผู้เขียน..... 83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก..... 5
2.2	การยัดชิ้นวัสดุเปียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้งานโดยทั่วไป..... 5
2.3	โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก..... 6
2.4	ลักษณะการยัดทรานส์ดิวเซอร์ชนิดที่ใช้หลักการโค้งงอของวัสดุเปียโซอิเล็กทริก..... 6
2.5	ปรากฏการณ์แมกนีโตรสทริกชัน..... 7
2.6	ความสัมพันธ์ของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กของสารของสารเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละชนิด..... 8
2.7	โครงสร้างทั่วไปของทรานส์ดิวเซอร์แบบแมกนีโตรสทริกทีฟ..... 8
2.8	วิธีการสะท้อนของสัญญาณกระตุ้น..... 9
2.9	แบบจำลองของทรานส์ดิวเซอร์แบบอาร์เรย์ที่ใช้สำหรับการสแกนแบบขนาน..... 10
2.10	ลักษณะการสแกนสัญญาณแบบต่างๆ..... 11
2.11	การสแกนแบบขนานที่ใช้ทรานส์ดิวเซอร์ที่สามารถหมุนได้ เพื่อให้คลื่นที่ตกกระทบกับแผ่นโค้งสะท้อนคลื่นหักเหไปเป็นเส้นขนาน..... 11
2.12	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจหารากที่อยู่ในครกมัลดรา..... 12
2.13	การใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพในการสร้างภาพเสมือนของทารก..... 12
2.14	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกตรวจหาก้อนน้ำในถุงน้ำดี..... 13
2.15	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจหามะเร็งต่อมลูกหมาก..... 13
2.16	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจถุงรังไข่..... 13
2.17	หลักการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อทำความสะอาดพื้นผิว..... 14
2.18	รูปแบบของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์สำหรับงานทำความสะอาดพื้นผิว..... 14
2.19	ภาพจำลองการเชื่อมพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก..... 15
2.20	จุดรวมพลังงานในการเชื่อมชิ้นงานขนาดเล็ก..... 15
2.21	การอำมหุคพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก..... 16
2.22	การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อฝังหลอดโลหะลงในเนื้อพลาสติก..... 16
3.1	การฉายรังสีไปสู่วัตถุเพื่อสร้างภาพ..... 19
3.2	ลักษณะของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพตัดขวาง..... 19
3.3	การคลื่นอัลตราโซนิกจากหัวส่งไปยังหัวรับโดยมีน้ำเป็นตัวกลาง..... 20
3.4	การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นค่าเดียว..... 21
3.5	การส่งคลื่นอัลตราโซนิกผ่านน้ำและวัตถุที่มีความหนาแน่นหลายค่า..... 22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 หลักการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์.....	24
3.7 Block diagram แสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การแปลงฟูเรียร์.....	27
3.8 ราสเตอร์รูปแบบต่างๆ.....	27
3.9 การประมาณค่าจุด Q	27
3.10 แสดงโปรเจกชันของฟังก์ชัน 2 มิติ.....	28
3.11 Block diagram แสดงวิธีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบคโปรเจกชัน.....	29
3.12 ภาพแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของ Ram-Lak Filter.....	30
4.1 ทฤษฎีการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์สไลซ์ทั่วไป.....	44
4.2 การวัดสัญญาณที่เกิดการกระเจิงของวัตถุที่ถูกวางไว้ในสนามคลื่น.....	45
4.3 สัญญาณที่ถูกพลอตในระนาบของฟูเรียร์สองมิติ.....	46
4.4 ขั้วที่เกิดขึ้นในระนาบเชิงซ้อนจากส่วนของผลรวมเชิงเส้น.....	49
4.5 การวางข้อมูลลงในโดเมนความถี่.....	50
4.6 ความสัมพันธ์ของขนาดส่วนโค้งที่เปลี่ยนไปเมื่อความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง.....	51
5.1 แบบจำลองของระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	52
5.2 อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์แบบระนาบที่ใช้ในการทดลอง.....	53
5.3 ไฮโดรโฟนที่ใช้ในการทดลอง.....	54
5.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์.....	54
5.5 อ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	55
5.6 ส่วนประกอบต่างๆภายในอ่างบรรจุน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	55
5.7 ออสซิลโลสโคปที่นำมาใช้งาน.....	56
5.8 ภาพรวมของระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	57
5.9 แบบจำลองวิธีการวัดค่าดัชนีหักเหของวัตถุ.....	58
5.10 การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ.....	59
5.11 การหาค่าดัชนีหักเหของแผ่นทอมจากเงาคลื่นสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากสารเดียวกัน.....	59
5.12 ลักษณะของคลื่นที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป.....	60
5.13 ตัวอย่างข้อมูลที่อ่านเข้ามาแสดงผลยังเครื่องคอมพิวเตอร์.....	60
5.14 ตัวอย่างระนาบคลื่นที่พล็อตขึ้นจากข้อมูล 1 โปรเจกชัน.....	61
5.15 กระบวนการหาข้อมูลโปรเจกชันจากสัญญาณที่ได้รับ.....	62
5.16 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางแอมพลิจูด.....	62
5.17 ตัวอย่างข้อมูลโปรเจกชันทางเฟส.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 การวางข้อมูลโปรเจกชันลงบนโดเมนความถี่.....	63
5.19 ตัวอย่างข้อมูลบนโดเมนความถี่หลังจากการวางข้อมูล.....	63
5.20 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแผ่นทอมทรวงกระบอกตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร.....	64
5.21 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแผ่นทอมทรวงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร.....	65
5.22 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแผ่นทอมทรวงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู.....	65
5.23 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแผ่นทอมทรวงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร.....	66
5.24 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแผ่นทอมทรวงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในถูกเจาะเป็นรูขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และ 1.8 เซนติเมตร.....	67
5.25 ผลการสร้างภาพตัดขวาง และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแผ่นทอมทรวงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ภายในมีช่องรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	68
5.26 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผ่นทอมรูปที่ 5.23.....	69
5.27 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผ่นทอมรูปที่ 5.24.....	69
5.28 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผ่นทอมรูปที่ 5.25.....	69
5.29 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแผ่นทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายในทรวงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ภายในมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร.....	70
5.30 ผลการสร้างภาพตัดขวางของแผ่นทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชัน ของแผ่นทอมทรวงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร.....	71
5.31 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ที่ขึ้นกับจำนวนโปรเจกชันของแผ่นทอมรูปที่ 5.30.....	72
5.32 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแผ่นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรวงกระบอก.....	73
5.33 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแผ่นทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรวงกระบอก.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่เป็นสารเนื้อเดียวทรงกระบอก.....	75
5.35 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพตัดขวางระหว่างวิธีการฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน และวิธีการแปลงฟูเรียร์ทั่วไป ของแฟนทอมที่มีความแตกต่างของเนื้อสารภายใน.....	76
5.36 กราฟเปรียบเทียบค่า MSE ระหว่างวิธีการ FBP และ GFS ของแฟนทอมรูปที่ 5.32-5.35.....	76
5.37 การแทนภาพตัดขวางระดับเทาด้วยระดับสี.....	77