



242465



การสอบเทียบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้ในทางการแพทย์

นางสาวนิษฐา สวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาอุปกรณ์การแพทย์ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การสอบเทียบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้ในทางการแพทย์
โดย นางสาวณิษฐา สวัสดิ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอุปกรณ์การแพทย์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

2 พฤษภาคม 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ ปัญญพผล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ อ่ำจิต)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ทิพยา จินตโกวิท)



การสอบเทียบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้ในทางการแพทย์



นางสาวชนิษฐา สวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาอุปกรณ์การแพทย์ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวณิษฐา สวัสดิ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การสอบเทียบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้
ในทางการแพทย์
สาขาวิชา : อุปกรณ์การแพทย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ อ่ำจิต
ปีการศึกษา : 2553

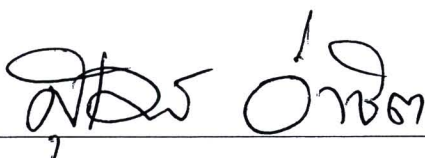
242465

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสอบเทียบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound Power Meters) โดยใช้หลักการแรงการแผ่รังสี (Radiation Force Balance) ซึ่งปัจจุบันยังไม่มี การสอบเทียบในประเทศไทย โดยการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ได้ นำเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ จำนวน 3 เครื่องมาใช้ในการสอบเทียบ โดยการนำทรานสดิวเซอร์ที่มีค่าความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz), 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ มาป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าให้ได้ค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์อยู่ในช่วง 10 มิลลิวัตต์ (mW) ถึง 500 มิลลิวัตต์ จากนั้นนำเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์มาวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จากระบบปฐมภูมิ (Primary System) ที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ จากนั้นทำการทดสอบเครื่องมือวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ขั้นต้นโดยการนำไปวัดค่ากำลังจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Ultrasound Therapy) ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว และหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ ผลจากการสอบเทียบและการทดสอบ พบว่าเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้ง 3 เครื่อง แสดงผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ได้สอดคล้องกันกับระบบปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งจากผลของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อระบบปฐมภูมิพัฒนาช่วงการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ได้ถึง 20 วัตต์ และช่วงความถี่ได้ถึง 20 เมกะเฮิร์ตซ์แล้ว เครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์จะสามารถทำการสอบเทียบได้ในประเทศไทย ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 111 หน้า)

คำสำคัญ: Ultrasound Power Meter, Ultrasound Therapy, Radiation Force Balance



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Miss Khanittha Sawaddee
Thesis Title : The Calibration of the Medical Ultrasound Power Meters
Major Field : Medical Instrumentation
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr.Sumet Umchid
Academic Year : 2010

242465

Abstract

The Ultrasound Power Meter is designed to measure the ultrasound power output of diagnostic or therapeutic transducers. In addition, this Ultrasound Power Meter should be calibrated at least once a year; however there is currently no Ultrasound Power Meter calibration in Thailand. Therefore, the objective of this research is to develop a calibration technique for the Ultrasound Power Meter by using a primary level ultrasound power measurement system developed at the National Institute of Metrology, Thailand (NIMT) as a reference. The calibration was performed in the frequency range from 1 MHz to 10 MHz and in the power range from 10 mW to 500 mW. It is shown that the power measurements from the Ultrasound Power Meters yield results that were consistent with the results from the primary system. An additional testing using an Ultrasound Therapy system and the evaluation of the measurement uncertainty for each component of the system were also described. The outcome of this research indicates that once fully developed and calibrated, the Ultrasound Power Meter will be calibrated in Thailand at the National Institute of Metrology, Thailand (NIMT).

(Total 111 pages)

Keywords: Ultrasound Power Meter, Ultrasound Therapy, Radiation Force Balance



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์จากองค์ความรู้ที่ได้ศึกษามาตั้งแต่หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต และระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ซึ่งผู้จัดทำขอขอบคุณผู้ที่อยู่เบื้องหลังแห่งความสำเร็จ และจารึกไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือบิดา มารดา และบุคคลภายในครอบครัวผู้ให้การสนับสนุน และที่ต้องกล่าวขอบคุณเป็นอย่างยิ่งคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ อ่ำจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ และขอบคุณคุณวิรัตน์ ปลั่งแสงมาศ คุณคมกฤษณ์ จักษุคำ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายมาตรฐานวิทยาเสียงและการสื่อสาร สหพันธ์วิทยานิพนธ์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขออำนาจบารมีคุณพระศรีรัตนตรัย จงดลบันดาลให้บุคคลเหล่านี้จะมีชีวิตที่มีความสุขในด้านหน้าที่การงาน ชีวิตส่วนตัว และชีวิตครอบครัว

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขนิษฐา สวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 การเกิดและการแผ่กระจายของคลื่นอัลตราซาวด์	5
2.2 การแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่นอัลตราซาวด์	9
2.3 การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นอัลตราซาวด์	10
2.4 การหักเหของคลื่นอัลตราซาวด์	11
2.5 ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์	12
2.6 ลักษณะลำคลื่นอัลตราซาวด์	14
2.7 การสอบเทียบ (Calibration)	16
2.8 การวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์	18
2.9 เป้าหมายที่ใช้ในการสอบเทียบ (Target)	21
2.10 ปรากฏการณ์แคปวิเทชัน (Cavitation)	22
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง และวิธีการทดลอง	25
3.1 การสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์	25
3.2 การทดสอบเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ด้วย เครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Ultrasound Therapy)	31
3.3 โปรแกรม LabVIEW	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ	55
4.2 การประเมินความไม่แน่นอนของผลการวัด	56
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง	73
5.1 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก	77
Block Diagram โปรแกรมควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า	77
ภาคผนวก ข	81
ใบรับรองผลจากห้องปฏิบัติการ	81
ภาคผนวก ค	83
คู่มือการใช้งานเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์	83
ภาคผนวก ง	99
คุณลักษณะของหัวทรานสดิวเซอร์	99
ประวัติผู้วิจัย	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงความเร็วและค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของคลื่นอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อต่างๆ	13
2-2 ผลการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์โดยใช้ค้อนน้ำหนัก	20
4-1 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	39
4-2 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ที่ความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์	41
4-3 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ที่ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์	42
4-4 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 10	43
4-5 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5	44
4-6 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2	45
4-7 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง	46
4-8 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 10	47
4-9 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5	48
4-10 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2	49
4-11 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง	50
4-12 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 10	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-13 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5	52
4-14 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2	53
4-15 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง	54
4-16 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยเครื่อง อัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10	64
4-17 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่อง อัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ภาพตัดของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สร้างคลื่นอัลตราซาวด์	6
2-2 รูปร่างของโมเลกุลในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงการหดตัวของโมเลกุลเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าป้อนเข้าไป	6
2-3 ลิควิดไดรฟ์เวนทรานสดิวเซอร์ (Liquid Driven Transducer)	7
2-4 แมกนีโตสทริกทีฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer)	7
2-5 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer)	9
2-6 การแผ่กระจายของอัลตราซาวด์ในตัวกลางที่เป็นของเหลว	10
2-7 ลักษณะของอะคูสติคิมพีแดนซ์ของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นทะลุผ่าน	11
2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นทะลุผ่าน	12
2-9 ลักษณะลำคลื่นอัลตราซาวด์	14
2-10 ความสัมพันธ์ของความสูงของคลื่นกับระยะทางบนแนวแกนของทรานสดิวเซอร์ความสูงจะลดลงไปเรื่อยๆ ในระยะทางที่มากกว่า a^2/λ	15
2-11 ความสัมพันธ์ของความสูงของคลื่นกับระยะทางบนแนวแกนของทรานสดิวเซอร์ความสูงจะลดลงไปเรื่อยๆ ในระยะทางที่มากกว่า a^2/λ	16
2-12 แสดงความสูงของคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างออกไปจากทรานสดิวเซอร์	17
2-13 ความหนาแน่นของพลังงานคลื่นในแนวระนาบผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดซับ	19
2-14 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์	22
2-15 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์	22
3-1 ภาพ Block Diagram ของการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์	26
3-2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ	27
3-3 หัวทรานสดิวเซอร์	29
3-4 การติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์กับเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ UPM-DT 1	29
3-5 การติดตั้งหัวทรานสดิวเซอร์กับเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ UPM-DT 10	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-6 Block Diagram ของการทดสอบเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ ด้วย เครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด	31
3-7 เครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัดที่ใช้ในการทดลอง	32
3-8 การต่อเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ UPM-DT 1 กับเครื่อง อัลตราซาวด์ ทางกายภาพบำบัด	33
3-9 การต่อเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ UPM-DT 10 กับเครื่อง อัลตราซาวด์ ทางกายภาพบำบัด	34
3-10 หน้าจอโปรแกรมการควบคุมการเปิด – ปิด เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า	35
3-11 Flow Chart ควบคุมการเปิด – ปิด เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า	37
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาว เวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมดิคอล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)	40
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาว เวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมดิคอล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)	41
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาว เวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมดิคอล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	43
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	44
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	45
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	46
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1:10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	48
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	49
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	50
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	51
4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4-14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	53
4-15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)	54
ก-1	Block Diagram ของโปรแกรมควบคุมการเปิด – ปิด เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า	78