

เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์ของจุลควาซาร์เพื่อการวัดการไหลเวียนของโลหิต



นายวิทย์ จุตมทรัพย์ากร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2527

ISBN 974-563-233-3

013321

i16682348

AN ULTRASOUND DOPPLER EFFECT DETECTOR FOR BLOOD FLOW
MEASUREMENT

MR. WIT UDOMTRUPAYAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1984

ISBN 974-563-233-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอุลตราซาวน์ เพื่อวัด
การไหลของโลหิต

โดย นายจิทย์ อุดมทรัพย์ากุล

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนัส สังวรศิลป์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... *สุประดิษฐ์ นุนาค* คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ นุนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... *ชาตรี ศรีไพพรรณ* ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ)

..... *โคทม อาริยา* กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา)

..... *มนัส สังวรศิลป์* กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนัส สังวรศิลป์)

..... *กฤษดา วิศวธีรานนท์* กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

..... *แพทย์ชุกดิ์ เวชแพศย์* กรรมการ
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ชุกดิ์ เวชแพศย์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอัลตราซาวด์เพื่อการ

วัดการไหลเวียนของโลหิต

ชื่อนักศึกษา

นายวิทย์ อุทุมพรพญากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนัส สังวรศิลป์

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา

2526



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการออกแบบและสร้าง เครื่องต้นแบบของ เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอัลตราซาวด์ เพื่อวัดการไหลเวียนของโลหิต โดยใช้เทคนิคของระบบพัลส์คอปเปิลอร์แบบโคฮีเรนต์ การวิจัยเน้นหนักถึงเทคนิคการสร้างและการทดลอง เพื่อหาข้อมูลและการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพัฒนา เครื่องคอปเปิลอร์อัลตราซาวด์ขึ้นใช้ในวงการแพทย์

ได้มีการนำ เครื่องที่สร้างขึ้นไปวัดความเร็วของน้ำในท่อ การไหลของโลหิตในร่างกายผู้ป่วย จากการทดลองพบว่า เครื่องที่สร้างขึ้นให้ผลการวัดใกล้เคียงกับเครื่องของต่างประเทศ และค่าที่ได้จากการคำนวณ

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า เครื่องที่สร้างขึ้นเป็น เครื่องต้นแบบที่ใช้งานได้

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title An ultrasound doppler effect detector for blood
 flow measurement

Name Mr. Wit Udomtrupayakul

Thesis Advisor Assistant Professor Gothom Arya

Thesis Co-advisor Assistant Professor Manus Sungwornsilp

Department Electrical Engineering

Academic Year 1983

ABSTRACT

This thesis describes the theory, design, and construction of an ultrasound doppler effect detector for the measurement of blood flow velocity using coherent pulsed doppler technique. The research emphasized construction techniques, experimental measurements, and the resolution of problems encountered during the design and construction of the instrument. The purpose was to develop an ultrasound doppler effect blood flow velocity instrument for medical use.

The instrument constructed was used to measure the velocity of fluid flowing within a pipe as well as on hospital patients. All tests showed the constructed instrument produced readings very similar to commercial instruments and calculated expected results.

From the performance of the constructed instrument in this study, the author feels confident that the constructed is a workable prototype.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ต่าง ๆ ต่อการวิจัย ชี้แนะข้อบกพร่องที่ควรแก้ไข รวมทั้งเสียสละ เวลาคอยติดตามผลการวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนัส สังวรศิลป์ ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติม และสนับสนุนการวิจัย ตลอดจนช่วยหาอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อมูล และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ นายแพทย์ไพศาล พงศ์ชัยฤกษ์ ภาควิชาศัลยศาสตร์ โรงพยาบาล รามาธิบดี ที่ให้ข้อมูลที่ประโยชน์ในการวิจัย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลงด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตารางประกอบ.....	ญ
สารบัญรูปประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไปของคลื่นอัลตราซาวด์และกายวิภาคสรีรวิทยาของหลอดเลือด	
2.1 คลื่นเสียง.....	8
2.2 คลื่นอัลตราซาวด์.....	8
2.3 ความสัมพันธ์ของระยะทางและเวลาในการส่งและรับคลื่น.....	9
2.4 การเดินทางผ่านตัวกลางและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง....	10
2.5 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์.....	11
2.5.1 ผลของดอปเปลอร์เมื่อต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เข้าหาผู้ฟังที่อยู่นิ่ง.....	11
2.5.2 ผลของดอปเปลอร์เมื่อต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ออกห่างจากผู้ฟัง.....	12
2.5.3 ผลของดอปเปลอร์เมื่อผู้ฟังและต้นกำเนิดเสียงต่างเคลื่อนที่ในตัวกลางเดียวกัน.....	12
2.6 สาร PIEZOELECTRIC.....	13
2.6.1 การส่งคลื่นโดยใช้สาร PIEZOELECTRIC.....	13
2.6.2 การรับคลื่นโดยใช้สาร PIEZOELECTRIC.....	14
2.7 การทำงานของระบบการไหลเวียนเลือด	14
2.7.1 Systemic circulation.....	14

	หน้า
2.7.2 Pulmonary circulation.....	15
2.8 ตำแหน่งที่ตั้งและขนาดของหลอดเลือดในร่างกายมนุษย์.....	17
บทที่ 3 การออกแบบสร้างและทดลอง เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ของอุลตรา ซาวน์เพื่อวัดการไหลของโลหิต.....	19
3.1 ภาคกำเนิดความถี่หลัก.....	25
3.1.1 การเลือกความถี่สำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ คอปเปเลอร์.....	25
3.1.1.1 ความลึกของหลอดเลือดที่จะวัด.....	25
3.1.1.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเลือด.....	26
3.1.2 ความถี่ของทรานซิวเซอรัตัวส่งและตัวรับ.....	26
3.1.2.1 วัดแรงดันตกคร่อมระหว่างความต้านทานกับ ทรานซิวเซอรัที่ต่ออนุกรมกัน.....	27
3.1.3 วงจรกำเนิดความถี่หลัก.....	31
3.2 ภาคหารความถี่.....	33
3.2.1 การเลือกความถี่ PRF สำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับ ปรากฏการณ์คอปเปเลอร์โดยทั่ว ๆ ไป.....	34
3.2.1.1 ระยะทางของหลอดเลือดที่จะวัด.....	34
3.2.1.2 ความถี่คอปเปเลอร์ที่คาดว่าจะวัดได้.....	35
3.2.1.3 การสูญเสียพลังงานของสัญญาณที่ส่ง.....	36
3.2.2 ความถี่ PRF ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอป เปเลอร์.....	37
3.2.3 การออกแบบวงจรหารความถี่.....	38
3.2.3.1 ภาคขยาย.....	39
3.2.3.2 วงจรหารสิบ.....	39
3.2.3.3 วงจรหารที่โปรแกรมได้.....	40
3.2.3.4 วงจรหารสอง.....	41

	หน้า
3.3 ภาค เกทสัญญาณ.....	45
3.3.1 การออกแบบวงจร เกท.....	47
3.3.2 การออกแบบวงจร เกทสัญญาณเบิรท์ (TW_1).....	49
3.3.3 การออกแบบวงจรหน่วง เวลาการ เกทสัญญาณอ้างอิง (TW_2).....	50
3.3.4 การออกแบบวงจร เกทสัญญาณอ้างอิง (TW_3).....	51
3.3.5 การออกแบบวงจรหน่วง เวลาของวงจร เกทสัญญาณลุ่มและ วงจรถูกสัญญาณลุ่ม.....	52
3.4 ภาคสวิตช์สัญญาณต่าง ๆ.....	55
3.4.1 ภาคสวิตช์สัญญาณ เบิรท์.....	55
3.4.2 ภาคสวิตช์สัญญาณอ้างอิง.....	57
3.4.3 ภาคสวิตช์สัญญาณลุ่ม.....	58
3.5 ภาคขับและขยายกำลัง.....	60
3.5.1 ทรานซิวเซอร์ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอป เปลอร์.....	60
3.5.1.1 ส่วนประกอบของทรานซิวเซอร์.....	60
3.5.2 การออกแบบวงจรขยายกำลัง.....	63
3.5.2.1 แมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3	63
3.5.2.2 การพันแมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3	64
3.5.2.3 การไบแอสวงจรถ่ายกำลัง.....	64
3.5.3 ภาคขับกำลัง.....	66
3.5.4 การทดลองวัดความแรงของคลื่นสะท้อนกับความถี่ของ คลื่นส่ง.....	66
3.5.5 กำลังงานของทรานซิวเซอร์.....	68
3.6 ภาคขยายสัญญาณคอปเปลอร์และภาคจำกัดส่วนสูงของสัญญาณคอป เปลอร์.....	70
3.6.1 การออกแบบวงจรภาครับและขยายสัญญาณคอปเปลอร์..	71

	หน้า
3.6.2 การทดลองและผลที่ได้จากการนำภาคขยายสัญญาณ คอปเปอเรอร์ไปใช้งาน.....	75
3.7 ภาคเฟสดีเทคเตอร์.....	80
3.7.1 การออกแบบวงจรเฟสดีเทคเตอร์.....	82
3.7.2 การทดสอบคุณสมบัติของวงจร.....	84
3.7.3 การปรับแต่งวงจรเพิ่มเติมให้ทำงานได้ดีขึ้น.....	86
3.7.4 วงจรเลื่อนเฟส.....	90
3.7.4.1 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส.....	90
3.8 ภาคสุ่มและรักษาระดับ.....	96
3.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านความถี่สูง.....	99
3.9.1 วงจรกรองผ่านความถี่สูง.....	99
3.9.2 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ.....	102
3.10 ภาคขยายเสียง.....	105
3.11 ภาคแสดงผล.....	106
3.12 ภาคจ่ายกำลังไฟ.....	110
3.12.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟ +28 โวลต์.....	111
3.12.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟ +12 โวลต์.....	111
3.12.3 แหล่งจ่ายกำลังไฟ ± 12 โวลต์.....	111
3.12.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟ +5 โวลต์.....	111
3.13 วงจรสมบูรณ์ของภาคต่าง ๆ ของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ ของอุลตราซาวน์เพื่อวัดการไหลของโลหิต.....	113
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลองของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์	
คอปเปอเรอร์อัลตราซาวน์.....	120
4.1 การทดลองและวัดผลของปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์.....	121
4.1.1 การทดลองวัดแรงดันขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์ เทียบกับความเร็วของน้ำเมื่อมุมของลำคลื่นส่งกับท่อ คองที.....	121

4.1.2	การวัดแรงดันขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์เทียบกับมุม ของลำคลื่นกับท่อของน้ำที่ไหลต่าง ๆ กัน.....	123
4.2	การทำเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อน้ำ.....	124
4.3	การคำนวณค่าปริมาตรของน้ำที่ไหลในท่อ.....	126
4.4	การทดลองนำเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ที่ออกแบบสร้างไปใช้ใน การวัดการไหลของเลือดในร่างกายมนุษย์.....	126
4.4.1	การวัดความเร็วของเลือดเทียบกับความเร็วของน้ำในท่อ....	126
4.4.2	การวัดการไหลของเลือดจากเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ ที่สร้างเทียบกับเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์จากต่าง ประเทศ.....	129
4.4.3	การนำเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ที่สร้างไปทดลองวัด กับคนทั่ว ๆ ไป.....	131
4.4.4	การทดลองวัดความเร็วของการไหลของเลือดภายในหลอด เลือดตั้งแต่ภายในท่อจนถึงกลางท่อ.....	133
4.4.5	การทำเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหลอดเลือด.....	134
4.4.6	การทำอัตราการไหลของปริมาตรของเลือดที่ไหล.....	134
4.4.7	ข้อมูลบางอย่างเกี่ยวกับรูปคลื่นความถี่คอปเปอเรอร์ที่ได้จากการวัด การไหลของเลือดจากเครื่องของต่างประเทศเพื่อใช้เป็นตัว อย่างเปรียบเทียบกับเครื่องที่ออกแบบสร้าง.....	135
บทที่ 5	บทวิจารณ์ และบทสรุป	138
5.1	บทวิจารณ์.....	138
5.2	บทสรุป.....	140
	ข้อเสนอแนะ.....	143
	เอกสารอ้างอิง.....	143
	ภาคผนวก ก.	146
	ภาคผนวก ข.	148
	ภาคผนวก ค.	149
	ภาคผนวก ง.	150

	หน้า
ภาคผนวก จ.	152
ภาคผนวก ฉ.	154
ภาคผนวก ช.	157
ภาคผนวก ซ.	161
ภาคผนวก ฅ.	166
ภาคผนวก ฌ.	170
ภาคผนวก ฎ.	172
ภาคผนวก ฏ.	175
ภาคผนวก ฐ.	179
ประวัติผู้เขียน.....	188



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 3.1.1	26
3.1.1	26
3.1.2	28
3.1.3	30
3.2.1	37
A	185
B	186
C	187

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1.1	2
แสดงให้เห็นถึงกราฟที่ได้จากการวัดการไหลของเลือดในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางปกติที่ได้ผลออกมา เหมือนกับการวัดในทิศทางปกติด้วย เครื่องดอปเพลอร์อัลตราซาวด์รุ่นแรก ๆ.....	2
1.2	3
สัญญาณที่ได้จากหลอดเลือด BRACHIAL.....	3
2.1	9
แสดงให้เห็นถึงการ เดินทางของคลื่นจากทรานซิว เซอร์ตัวส่งไปยังทรานซิว เซอร์ตัวรับ.....	9
2.2	10
แสดงการวางทรานซิว เซอร์ตัวส่งและตัวรับไว้ในตัวเดียวกัน...	10
2.3	10
แสดงให้เห็นถึงการ เดินทางผ่านตัวกลางและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง.....	10
2.4	13
แสดงโครงสร้างของผลึกสาร PIEZOELECTRIC.....	13
2.5	14
แสดงการส่งคลื่นของสาร PIEZOELECTRIC เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับ เข้าไปให้ที่ขั้วของสาร.....	14
2.6	16
แสดงระบบการไหลเวียนเลือด.....	16
2.7	17
แสดงบริเวณตำแหน่งของหลอดเลือดที่อยู่ในร่างกายมนุษย์.....	17
2.8	18
แสดงขนาดของหลอดเลือดต่าง ๆ	18
3.1	19
แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของอัลตราซาวด์ เพื่อวัดการไหลของโลหิต	19
3.2	20
แสดงรูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ ที่ได้จากบล็อกไดอะแกรมรูป 3.1.....	20
3.3	21
แสดงการส่งคลื่นสัญญาณ เบิสร்தลงไปยังหลอดเลือดใต้ผิวหนังบริเวณที่วัดการไหลของ เลือดและสัญญาณดอปเพลอร์ที่สะท้อนจากโม เลกุลของ เลือดกลับไปยังทรานซิว เซอร์ตัวรับ.....	21
3.1.1	25
กราฟแสดงความถี่ที่ เหมาะสมของดอปเพลอร์อัลตราซาวด์ที่ใช้วัดการไหลของ เลือดที่อยู่ลึกขนาดต่าง ๆ กัน.....	25

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1.2 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานซิดิว เซอร์ที่จะนำไปใช้กับ เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์	27
3.1.3 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานซิดิว เซอร์.....	27
3.1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่วัด ได้จากวงจรในรูป 3.1.2	29
3.1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่ได้ จากการวัดในวงจรรูปที่ 3.1.3	30
3.1.6 แสดงวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ผลึก.....	31
3.1.7 แสดงวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ใน เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ คอปเปอเรอร์.....	31
3.2.1 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรหารที่จะนำไปใช้งาน.	33
3.2.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณที่ เลือกใช้ช่วงระหว่างของการส่งคลื่น (T) น้อยกว่าเวลาที่คลื่นสะท้อนใช้เดินทาง (T).....	35
3.2.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรหารความถี่.....	38
3.2.4 แสดงวงจรขยายสัญญาณความถี่หลักให้แรงขึ้นก่อนนำไปป้อน ให้กับวงจรหารสิบ.....	39
3.2.5 แสดงวงจรหารสิบที่ใช้งาน.....	39
3.2.6 แสดงรูปคลื่นสัญญาณขาเข้าและขาออกของวงจรหารสิบ....	40
3.2.7 แสดงวงจรหาร 1-255 ที่สามารถโปรแกรมได้.....	40
3.2.8 รูปคลื่นสัญญาณขาเข้าและออกของวงจรหารที่โปรแกรมได้	41
3.2.9 แสดงวงจรหารสองที่ใช้ D-Flip-flop เบอร์ 7474...	42
3.2.10 แสดงวงจรหารสองที่ใช้ใน เครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวนด์..	42
3.2.11 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากจุดต่าง ๆ ของวงจรหาร.....	43

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2.12 วงจรสมบูรณ์ของภาคการควมถี่ที่ใช้ใน เครื่องคอปเปอเรอร์อัลตรา ซาวน์.....	44
3.3.1 แสดงสัญญาณของวงจร เกททั้งขา เข้าและออกที่มีช่วงเวลาของ สัญญาณออก (TW) ตามต้องการ.....	45
3.3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ ที่ใช้ในเครื่อง ตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์.....	46
3.3.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ของวงจร เกททั้งหมดที่ใช้ในเครื่อง	46
3.3.4 แสดงวงจรโมโนสเต เบิ้ลกับค่าความต้านทาน (R) และตัวเก็บ ประจุ (C) ที่ต่อร่วมกัน.....	47
3.3.5 สัญญาณเข้าและออกของวงจร เกทตามขาต่าง ๆ ของวงจรประ มวล เบอร์ 74121.....	48
3.3.6 แสดงวงจร เกทสัญญาณ เบิสรท์และรูปคลื่นสัญญาณ เบิสรท์.....	49
3.3.7 แสดงวงจรหน่วง เวลาการ เกทสัญญาณอ้างอิง.....	50
3.3.8 แสดงวงจร เกทสัญญาณอ้างอิง.....	51
3.3.9 แสดงวงจรหน่วง เวลา และวงจร เกทการลุ่มตัวอย่าง.....	52
3.3.10 แสดงวงจรสมบูรณ์ของภาค เกทสัญญาณที่ใช้ใน เครื่องตรวจจับ ปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์.....	53
3.3.11 แสดงรูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่าง ๆ ของวงจร เกทสัญญาณ.....	54
3.4.1 แสดงวงจรสวิทซ์ที่ทำงานได้โดย สัญญาณควบคุม.....	55
3.4.2 แสดงวงจรสวิทซ์สัญญาณ เบิสรท์.....	56
3.4.3 แสดงสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากวงจร เกทสัญญาณเบิสรท์.....	56
3.4.4 แสดงวงจรและรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากวงจรสวิทซ์สัญญาณอ้างอิง.	57
3.4.5 แสดงวงจรสวิทซ์การลุ่มและสัญญาณต่าง ๆที่ใช้งาน.....	58
3.5.1 ภาพแสดงส่วนประกอบของทรานซิว เซอร์.....	61
3.5.2 แสดงจุดโฟกัสของ เลนส์.....	61

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5.3 ภาพแสดงทรานซิวเซอร์ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ คอปเปิลอร์.....	62
3.5.4 แสดงวงจรขยายกำลังที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอป เปิลอร์.....	63
3.5.5 แสดงการพันแม่ขึงอิมพีแดนซ์ทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3 ชนิดอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ 4:1.....	64
3.5.6 กราฟแสดงอัตราการขยายกำลังของภาคขยายกำลัง.....	65
3.5.7 แสดงวงจรขับกำลัง.....	66
3.5.8 แสดงการต่อวงจรที่ใช้วัดความแรงของสัญญาณคลื่นสะท้อนเมื่อ ปรับความถี่ต่าง ๆ กัน.....	67
3.5.9 แสดงความสัมพันธ์ของการส่ง การรับคลื่น และเวลาของคลื่น สะท้อนที่ใช้เดินทางในน้ำจากพลาสติกถึงทรานซิวเซอร์ทั้งไป และกลับ.....	67
3.5.10 ภาพแสดงแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่รับได้โดยทรานซิว เซอร์ตัวรับ เมื่อปรับความถี่ต่าง ๆ กัน.....	68
3.6.1 กราฟแสดงค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่างๆ	71
3.6.2 แสดงวงจรขยายสัญญาณคอปเปิลอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3.....	72
3.6.3 กราฟแสดงอัตราการขยายแรงดันของวงจรขยายชุดที่ 1 และ 3	73
3.6.4 กราฟแสดงอัตราการขยายแรงดันของวงจรขยายชุดที่ 2.....	74
3.6.5 แสดงวงจรสมรรถนะของภาคขยายสัญญาณคอปเปิลอร์และภาคจำกัด ส่วนสูง.....	74
3.6.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทดลอง เพื่อหาคุณสมบัติของภาค ขยายสัญญาณคอปเปิลอร์.....	75
3.6.7 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ที่วัดได้จากภาคขยายสัญญาณคอป เปิลอร์.....	76

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.6.8	ภาพแสดงสัญญาณแอมป์ของคลื่นรับที่เกิดขึ้นที่ทรานซิวเซอร์ตัวรับ.....	76
3.6.9	แสดงรูปคลื่นของสัญญาณที่วัดได้หลังจากการต่อขดลวดความนำขานานกับวงจรขยายเข้าของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์.....	77
3.6.10	กราฟแสดงผลของการปรับค่า L กับความแรงของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่รับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับ	78
3.6.11	ภาพถ่ายของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป	78
3.7.1	แสดงสัญญาณที่จำเป็นของเครื่องอัลตราซาวนด์พัลส์คอปเปอเรอร์ที่วงจรเฟสดีเทคเตอร์ตรวจจับความต่างเฟสของสัญญาณคอปเปอเรอร์กับสัญญาณอ้างอิง.....	80
3.7.2	แสดงขบวนการเกิดสัญญาณ.....	81
3.7.3	แสดงการต่อวงจรเฟสดีเทคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	82
3.7.4	แสดงวงจรเลื่อนเฟสและวงจรขยายที่ใช้ในการทดสอบวงจรเฟสดีเทคเตอร์.....	85
3.7.5	แสดงการต่อวงจรเพื่อทดสอบเฟสดีเทคเตอร์.....	85
3.7.6	แสดงความสัมพันธ์ของเฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดที่ขา 6 (V_{O1})	85
3.7.7	แสดงความสัมพันธ์ของเฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดที่ขา 12 (V_{O2})	86
3.7.8	แสดงความสัมพันธ์ของเฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดระหว่างขา 6 กับขา 12 ของวงจรประมวล.....	86
3.7.9	แสดงวงจรเฟสดีเทคเตอร์ต่อกับวงจรขยาย.....	87
3.7.10	แสดงวงจรเฟสดีเทคเตอร์และวงจรขยายที่สามารถปรับค่าดีซีออฟเซตได้.....	88
3.7.11	แสดงวงจรสมบูรณ์ของเฟสดีเทคเตอร์ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์.....	89

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต่าง เฟสของสัญญาณขา เข้ากับ แรงดันขาออกของวงจร เฟสดี เทคเตอร์ เมื่อแรงดันอ้างอิงมี แอมพลิจูดคงที่ เท่ากับ 500 mV.....	89
3.7.13 แสดงการต่อวงจร เลื่อน เฟสกับภาคกำเนิดความถี่หลักและภาค เฟสดี เทคเตอร์.....	90
3.7.14 แสดงวงจร Split - load ที่นำมาดัดแปลงเป็นวงจรเลื่อน เฟส.....	90
3.7.15 แสดงวงจรแยก เฟสของสัญญาณที่ออกแบบ.....	93
3.7.16 แสดงรูปคลื่นสัญญาณขา เข้าและขาออกตามจุดต่าง ๆ.....	93
3.7.17 แสดงวงจร เลื่อน เฟสที่ออกแบบสำหรับใช้.....	94
3.7.18 แสดงค่ามุมของสัญญาณขาออก θ ที่ปรับได้.....	94
3.7.19 แสดงการต่อวงจรบัฟเฟอร์กับวงจร เลื่อน เฟสทั้งขา เข้าและ ขาออก.....	95
3.8.1 แสดงวงจรลุ่มและรักษาระดับและสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ.....	96
3.8.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของภาคลุ่มและรักษาระดับช่วงลุ่มตัวอย่าง..	97
3.8.3 แสดงวงจรสมมูลย์ของภาคลุ่มและรักษาระดับช่วงรักษาระดับ..	97
3.8.4 แสดงวงจรสมมูลย์ของภาคลุ่มและรักษาระดับช่วงที่ใช้ในเครื่อง ตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์.....	98
3.9.1 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสาม.....	99
3.9.2 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่สูงอันดับสามมีความถี่คัตออฟที่ 1 rps	100
3.9.3 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่สูงและค่าอุปกรณ์.....	101
3.9.4 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่สูง ที่ความถี่คัตออฟ 50 เฮิรตซ.....	101
3.9.5 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสามมีความถี่คัตออฟ 1 rps	102
3.9.6 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำพร้อมทั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้งาน.....	103

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9.7 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่คัตออฟต่าง ๆ ของวงจรกรองผ่าน ผ่านความถี่ต่ำรูป 3.9.6.....	104
3.10.1 แสดงวงจรขยายเสียงที่ใช้ใน เครื่องคอปเปิลอร์อัลตราซาวด์.....	105
3.10.2 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่และอัตราขยายของภาค ขยายเสียง.....	105
3.11.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วกับแรงดันขาออกที่วัดได้.....	106
3.11.2 แสดงวงจรของภาคแสดงผล LED.....	107
3.12.1 แสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	110
3.13.1 วงจรสมรรถนะของ เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอัลตราซาวด์ เพื่อวัดการไหลของโลหิต.....	113
3.13.2 แสดงภาพถ่ายปริ้นซ์บอร์ดของภาคขยายกำลัง.....	114
3.13.3 แสดงลายปริ้นซ์ของภาคขยายกำลัง.....	114
3.13.4 แสดงภาพถ่ายของปริ้นซ์ภาคกำเนิดความถี่และภาคหารความถี่.....	115
3.13.5 แสดงลายปริ้นซ์ของภาคกำเนิดความถี่และภาคหารความถี่.....	115
3.13.6 แสดงภาพถ่ายปริ้นซ์บอร์ดของภาค เกทสัญญาณต่าง ๆ.....	116
3.13.7 แสดงลายปริ้นซ์ของภาค เกทสัญญาณต่าง ๆ.....	116
3.13.8 แสดงภาพถ่ายปริ้นซ์บอร์ดของภาครับและขยายสัญญาณคอปเปิลอร์ และภาค เฟสดีเทคเตอร์.....	117
3.13.9 แสดงลายปริ้นซ์ของภาค เฟสดีเทคเตอร์และภาคขยายสัญญาณคอปเปิลอร์.....	117
3.13.10 ภาพถ่ายของส่วนประกอบของภาคต่าง ๆ ภายในเครื่องคอปเปิลอร์ อัลตราซาวด์.....	118
3.13.11 แสดงลายปริ้นซ์ของ MAIN BOARD ของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ คอปเปิลอร์.....	119

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ภาพของชุดทดลองสำหรับวัดความเร็วของน้ำในท่อ.....	120
4.1.1 แสดงสัญญาณขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์ที่วัดได้เมื่อเกิดการไหล ของน้ำในท่อ.....	121
4.1.2 ภาพแสดงแรงดันขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์ที่เกิดขึ้นเมื่อปรับเวลา ของสัญญาณอ้างอิงเฟสตามเวลาต่าง ๆ ของสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่สะท้อน กลับมา.....	122
4.1.3 รูปแสดงแรงดันขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์เมื่อปรับความเร็วของ น้ำที่ไหลต่าง ๆ กัน.....	123
4.1.4 แสดงค่าของแรงดันขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์เมื่อเปลี่ยนมุมของ ทรานซิวเซอร์ที่ทำกับท่อต่าง ๆ กัน.....	124
4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ของการปรับความต้านทานกับเวลาที่เกิดขึ้น.....	125
4.4.1 กราฟแสดงแรงดันขาออกที่ได้จากเครื่องบันทึกกระดาษ เมื่อปรับความเร็ว ของเข็มต่าง ๆ กัน.....	127
4.4.2 ภาพแสดงการต่อสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจและสัญญาณจากเครื่องคอปเปอเรอร์ อัลตราซาวด์กับเครื่องบันทึกกระดาษ.....	127
4.4.3 ภาพแสดงรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจและสัญญาณความถี่คอปเปอเรอร์ที่ได้จากเครื่อง บันทึกกระดาษ.....	128
4.4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเลือดกับความถี่คอปเปอเรอร์ ที่ได้จากเครื่องของต่างประเทศ.....	129
4.4.5 ภาพแสดงรูปคลื่นความถี่คอปเปอเรอร์และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดจาก การไหลของเลือดในร่างกายมนุษย์โดยเครื่องจากต่างประเทศ.....	130
4.4.6 ภาพแสดงสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจและความถี่คอปเปอเรอร์ที่ได้จากเครื่อง คอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ที่ออกแบบสร้างความเร็วของเลือดที่ไหลประมาณ 90 ซม/วินาที.....	131

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4.7 ภาพแสดงรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และความถี่คอปเปอเรอร์ที่ได้จากเครื่อง คอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ที่ออกแบบสร้างโดยการวัดกับคนที่วิ่ง.....	132
4.4.8 กราฟแสดงการวัดสัญญาณความถี่คอปเปอเรอร์ที่ได้จากการปรับสัญญาณ อ้างอิงไปตามจุดต่าง ๆ ภายในหลอดเลือด.....	133
4.4.9 ภาพแสดงรูปคลื่นความถี่คอปเปอเรอร์ที่วัดได้จากเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตรา ซาวด์ชนิดคลื่นต่อเนื่องยี่ห้อ "Park Model 806".....	136
4.4.10 แสดงความถี่คอปเปอเรอร์ที่วัดได้จากการไหลของเลือดจากหลอดเลือดแดง Brachill.....	136
4.4.11 ภาพแสดงรูปคลื่นความถี่คอปเปอเรอร์ที่วัดได้จากเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตรา ซาวด์ยี่ห้อ "UNIDOP"	137
5.1 สัญญาณความถี่คอปเปอเรอร์ของ เครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์ชนิดคลื่นต่อเนื่อง เนื่องที่ เกิดจากการวัดหลอดเลือด 2 หลอดพร้อมกัน.....	137