สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	5
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ไฟฟ้าของกล้ามเนื้อและประสาท	6
2.1.1 ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (Action potential)	6
2.1.2 การเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (Generation of action potential)	7
2.1.3 การกระจายศักย์ไฟฟ้า (propagation of action potential)	7
2.1.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบ	7
2.1.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบภายใน	7
2.1.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบมัลติยูนิท	8
2.2 ความสัมพันธ์ของหัวใจกับคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	8
2.3 การส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ	9
2.4 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram, ECG)	10
2.5 การบันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	11
2.5.1. Bipolar recording	11
2.5.2. Unipolar recording	12
2.5.2.1 Unipolar limb lead	12

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2.2 Unipolar chest lead	13
2.6 คลื่นไฟฟ้าของกล้ามเนื้อ	15
2.7 สัญญาณรบกวนของวงจรขยายสัญญาณ	15
2.8 วงจรขยายสัญญาณคลื่นสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจและกล้ามเนื้อ	16
2.8.1 วงจรขยายผลต่าง(Differential Amplifier)	16
2.8.2 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน (Instrumentations amplifier)	18
3. การออกแบบวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล	20
3.1 การกำจัดสัญญาณรบกวน	20
3.1.1 วงจรกรองความถี่แบบแอนาลอก (Analog Filter)	21
3.1.2 วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล (Digital Filter)	22
3.1.3 อัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม (CMRR)	22
3.2 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier)	23
3.2.1 การเพิ่ม CMRR ด้วยการลดค่า $CMRR_R$	26
3.2.1 การเพิ่ม CMRR ด้วยการเพิ่มอัตราการขยายผลต่าง	26
3.3 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชั่น (Instrumentation Amplifier ; I.A.)	27
3.4 วงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม	28
3.5 การกำจัดแรงดันไฟตรง (DC Suppression)	30
3.5.1 การกำจัดแรงดันออฟเซ็ตของออปแอมป์	30
3.5.2 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยวงจรอินทิเกรต (Integrator)	32
3.5.3 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออฟโตคอปเปอร์	34
3.5.4 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้า	35
3.5.5 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ Rg	36
3.6 Driven Right Leg Circuit (DRL)	37
3.7 การชีลด์ป้องกันสัญญาณรบกวน	39
3.8 สรุปท้ายบท	41
4. การจำลองสัญญาณ และการทดลอง	42
4.1 วงจรขยายผลต่าง(Differential Amplifier ; DA)	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ผลกระทบเนื่องจากอัตราการขยายผลต่าง	43
4.1.2 ผลกระทบเนื่องจากค่าความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด	44
4.2 Instrumentation Amplifier (I.A.)	44
4.2.1 พิจารณาภาคอินพุทอย่างเดียว	44
4.2.2 พิจารณาทั้งวงจร	48
4.3 วงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม (CMRR enhancement Circuit)	52
4.3.1 พิจารณาภาคอินพุทอย่างเดียว	52
4.3.2 พิจารณาทั้งวงจร	55
4.4 การกำจัดแรงดันไฟตรง (DC Suppression)	59
4.4.1 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยวงจรอินทิเกรต (Integrator)	59
4.4.1.1 ผลการจำลองสัญญาณ	62
4.4.1.2 สรุปผลการทดลอง	63
4.4.2 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออฟโตคอปเปอร์	64
4.4.2.1 ผลการจำลองสัญญาณ	64
4.4.2.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง	67
4.4.2.3 สรุปผลการทดลอง	68
4.4.3 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้า	68
4.4.3.1 ผลการจำลองสัญญาณ	69
4.4.3.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง	73
4.4.3.3 สรุปผลการทดลอง	75
4.4.4 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ Rg	75
4.4.4.1 ผลการจำลองสัญญาณ	76
4.4.4.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง	80
4.4.4.3 สรุปผลการทดลอง	80
4.5 วงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล	81
4.5.1 การจำลองสัญญาณ	82

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.2 การทดลอง และผลการทดลอง	84
4.5.2.1 ให้ A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351	85
4.5.2.2 ให้ A1, A2,A5 ใช้ IC # LF351 และA3, A4 ใช้ IC # MAX430	86
4.5.2.3 ให้ A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27	88
4.5.2.4 ให้ A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ออปแอมป์เบอร์ TLC2652	89
4.5.2.5 ให้ A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ออปแอมป์เบอร์ H17741	90
4.5.2.6 ให้ A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF411	92
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายและข้อเสนอแนะ	95
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก ก.	101
ภาคผนวก ข.	113
ประวัติผู้เขียน	125

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 แสดงเวลาการตอบสนองของวงจรแต่ละแบบที่ได้จากการทดลอง	61
4.2 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล โดย A1, A2,A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351	84
4.3 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล โดย A1, A2. และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351 และ A3, A4 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ MAX430	86
4.4 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลโดย A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ OP27	87
4.5 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลโดย A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ TLC2652	89
4.6 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลธโดย A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ H17741	90
4.7 ผลของสัญญาณเอาท์พุทของวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลโดย A1, A2. A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF411	91
5.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการกำจัดสัญญาณไฟตรง	94

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	เปรียบเทียบการวัดคลื่นสัญญาณไฟฟ้าหัวใจในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนจากหลอดฟลูออเรสเซนต์(Fluorescent light EMI) โดย Classic DRL และ Transconductance DRL	2
1.2	R-C Network Front – End	3
2.1	โครงสร้างลักษณะการเกิดสัญญาณไฟฟ้าในหัวใจ	9
2.2	ระยะเวลาที่สัญญาณไฟฟ้าเดินทางผ่านส่วนต่าง ๆ ของ Conducting system (หน่วยเป็นวินาที)	10
2.3	ลักษณะสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้จากเครื่อง electrocardiograph	11
2.4	แสดงการต่อขั้วอิเล็กโทรดแบบ bipolar limb lead	12
2.5	การต่อขั้วอิเล็กโทรดบันทึกคลื่นไฟฟ้า	12
2.6	แสดงการต่อขั้วอิเล็กโทรดแบบ Unipolar chest lead	13
2.7	สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจทั้ง 12 ลักษณะ	14
2.8	Einthoven's triangle	14
2.9	ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อ	15
2.10	วงจรขยายความแตกต่าง	16
2.11	วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน(Instrumentations amplifier)	18
3.1	การแทรกแซงของสัญญาณรบกวน EMI ภายในอาคาร	20
3.2	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองอุดมคติ	21
3.3	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR	22
3.4	วงจรขยายความแตกต่าง	23
3.5	(a) วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน (b) วงจรสมมูลของ (a)	27
3.6	วงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม	29
3.7	การชดเชยแรงดันเอาท์พุทออฟเซ็ต โดยใช้ขา Offset Null ของไอซี	31
3.8	(a) การชดเชยแรงดันเอาท์พุทออฟเซ็ตโดยวงจรภายนอก (b) การเพิ่มความละเอียดในการปรับแรงดันชดเชย	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.9 (a) วงจรอินทิเกรต	32
(b) โมเดลของวงจรอินทิเกรต	
3.10 (a) โมเดลการต่อวงจรป้อนกลับแบบลบ ของวงจรขยายสัญญาณ	33
(b) การยุบโมเดลของวงจรขยายสัญญาณ	
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับเวลาการตอบสนอง ของวงจรอินทิเกรต	33
3.12 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออฟโตคอปเปอร์ (Optocouple DC Suppression Circuit)	34
3.13 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็น Front – End	35
3.14 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ Rg	36
3.15 แบบจำลองการเกิดสัญญาณรบกวนจาก EMI	37
3.16 รายละเอียดของวงจร DRL	38
3.17 วงจรเทียบเคียงของแรงดันคอมมอนโหมด	38
3.18 (ก) การเกิดค่าประจุแฝงในสายนำสัญญาณกับกราวด์หรือซีลด์	40
(ข) วงจรสมบูรณ์ของภาพประกอบ 3.18 (ก)	
3.19 (ก) การป้อนกลับมายังซีลด์แยกชุด	41
(ข) การป้อนกลับมายังซีลด์ร่วมชุดเดียว	
4.1 (ก) วงจรขยายความแตกต่าง	42
(ข) หาอัตราการขยายความแตกต่าง	
(ค) หาอัตราการขยายโหมดร่วม	
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz	43
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าความผิดพลาดความต้านทาน ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz	44
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324	45
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084	46

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความผิดพลาดของความต้านทาน ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324	47
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความผิดพลาดของความต้านทาน ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084	48
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 เป็นอินพุท	49
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 เป็นอินพุท	49
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 เป็นอินพุท	50
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 เป็นอินพุท	50
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 เป็นอินพุท	51
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 เป็นอินพุท	52
4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324	53
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084	53
4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าผิดพลาดของตัวต้านทานเป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324	54

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าผิดพลาดของตัวต้านทานเป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084	55
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้ออปแอมป์ # LM324	56
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้ออปแอมป์ # TL084	56
4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้ออปแอมป์ # LM324	57
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาท์พุทมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้ออปแอมป์ # TL084	57
4.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM324 เป็นภาคอินพุท และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาท์พุท	58
4.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง(G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ออปแอมป์ เบอร์ TL084 เป็นภาคอินพุท และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาท์พุท	59
4.24	วงจรอินทิเกรต	60
4.25	สัญญาณเอาท์พุทของวงจรอินทิเกรต	60
4.26	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบ Bessel – Thomson	60
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับเวลาการตอบสนองของวงจร	61
4.28	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองสัญญาณเอาท์พุทกับเวลาของวงจร Integrator และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแต่ละแบบ	61

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.29	การต่อวงจรอินทิเกรต เพื่อกำจัดแรงดันไฟตรง	62
4.30	อัตราการขยายความแตกต่าง	62
4.31	อัตราการขยายโหมดร่วม	63
4.32	อัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม(CMRR)	63
4.33	วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออฟโตคอปเปอร์	64
4.34	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)	64
4.35	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	65
4.36	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	65
4.37	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# TL084CN)	66
4.38	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	66
4.39	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# TL084CN)	67
4.40	ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL082CP	68
4.41	ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของวงจรโดยใช้ IC# MC1458P	68
4.42	วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็น Front – End	69
4.43	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	69
4.44	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	70
4.45	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	70
4.46	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
	กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	
4.47	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	71
4.48	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	72
4.49	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)	72
4.50	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	73
4.51	ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของวงจรโดยใช้ IC# LM324	74
4.52	ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL084CN	75
4.53	วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ Rg	75
4.54	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	76
4.55	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	76
4.56	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	77
4.57	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	77
4.58	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)	78
4.59	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)	78
4.60	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)	79
4.61	ความสัมพันธ์สัญญาณเอาท์พุทของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency	79

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
(เมื่อใช้ IC # TL084CN)	
4.62 ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL084CN	80
4.63 วงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลที่ใช้ในงานวิจัย	81
4.64 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์วงจรที่ประกอบแล้ว	82
4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาท์พุท กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่เวลา 0- 36000 sec. (0 –10 ชั่วโมง)	83
4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz	83
4.67 การต่อแรงดันอินพุทเพื่อวัดอัตราการขยายความแตกต่าง	84
4.68 การต่อแรงดันอินพุทเพื่อวัดอัตราการขยายโหมดร่วม	85
4.69 แสดงสัญญาณเอาท์พุทแบบ Differential mode gain โดย Vin = 1 mV	85
4.70 แสดงสัญญาณเอาท์พุทแบบ Common mode gain โดย Vin = 5 V	86
4.71 แสดงสัญญาณเอาท์พุท แบบ Differential mode gain โดย Vin = 1 mV	87
4.72 แสดงสัญญาณเอาท์พุท แบบ Common mode gain โดย Vin = 4 V	87
4.73 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย Vin = 1 mV	88
4.74 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย Vin = 6.5 V	88
4.75 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย Vin = 1 mV	89
4.76 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย Vin = 1 V	90
4.77 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย Vin = 1 mV	91
4.78 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย Vin = 1 V	91
4.79 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย Vin = 1 mV	92
4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายกับความถี่	92
4.81 กราฟสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จากเครื่อง ECG Simulatorโดยกราฟด้านบนเป็นสัญญาณ ECG ขนาด 1 V กราฟด้านล่างเป็นสัญญาณ ECG ที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	93
4.82 กราฟสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จากเครื่อง ECG Simulatorโดยกราฟด้านบนเป็นสัญญาณ ECG ขนาด 1 mV กราฟด้านล่างเป็นสัญญาณ ECG ที่ผ่านวงจรขยาย	94

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
สัญญาณไบโอโพเทนเชียล ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	
4.83 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจของอาสาสมัคร	94

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A_{cn}	=	อัตราการขยายโหมดร่วมของออปแอมป์
A_{dn}	=	อัตราการขยายผลต่างของออปแอมป์
$A_D(s)$	=	อัตราการขยายผลต่างของทั้งวงจร
A_{DO}	=	อัตราการขยายของ I.A.
C	=	capacitor
CMRR	=	อัตราการขจัดสัญญาณโหมดร่วม
DA	=	Differential Amplifier
dB	=	decibel
ECG	=	electrocadiogram
f_c	=	Cutoff frequency
G_d	=	อัตราการขยายผลต่างของ Differential amplifier
G_c	=	อัตราการขยายโหมดร่วมของ Differential amplifier
I.A.	=	Instrumentation Amplifier
I_{Rn}	=	กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ n
IC	=	Integrated Circuit
k	=	kilo
K_i	=	อัตราการขยายของวงจร integrator
K_{OP}	=	อัตราการขยายของออฟโตคอปเปอร์ (Optocoupler)
M	=	mega
R	=	ค่าความต้านทาน(Resistant)
R_g	=	ค่าความต้านทานปรับอัตราการขยาย
v_c	=	Common mode voltage
v_d	=	Differential voltage
v_0	=	Output voltage
δ	=	ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของ R_4