

## ใบงานประกอบการทดลอง เรื่อง วงจรกรองสัญญาณ

ชื่อ นามสกุล ธีรวัฒน์ เลิศอัมพรวิทย์ รหัสสถิติ 643013721 ตอนเรียนที่ 1 กลุ่มที่ 8

ชื่อ นามสกุล จิโรติ ศรีจันทน์ รหัสสถิติ 6430043521

ชื่อ นามสกุล จตุรกร โมรา รหัสสถิติ 6430036121

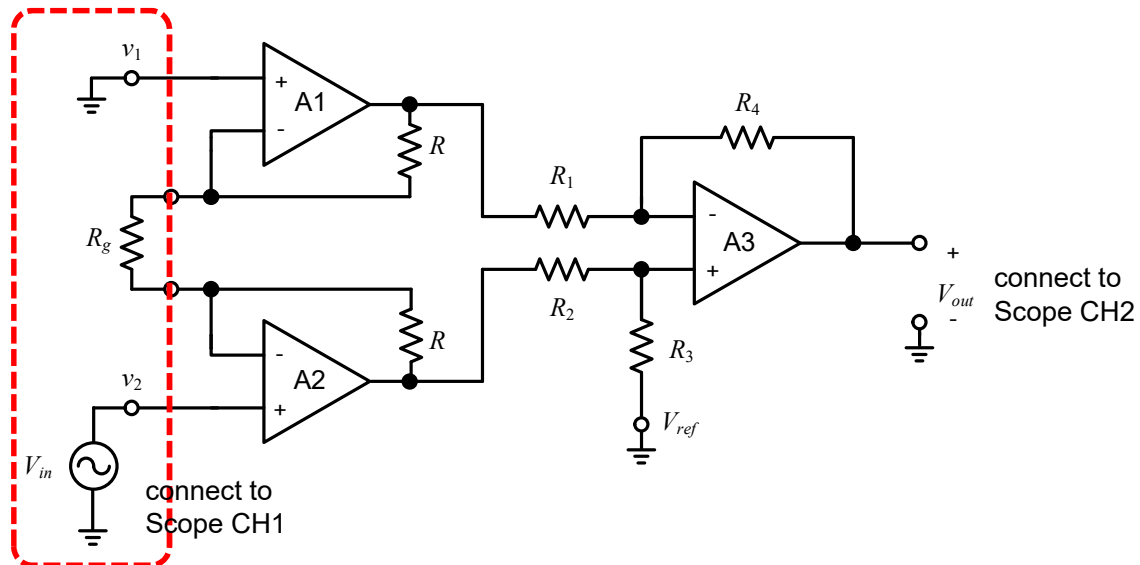
ลายเซ็นอาจารย์ผู้ตรวจ \_\_\_\_\_



### การทดลองที่ 1:      วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชันที่ใช้โอปแอมป์ 3 ตัว

ให้ออกแบบและสร้างวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชัน ที่ใช้โอปแอมป์ 3 ตัว กำหนดให้ วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชัน มีอัตราขยาย เท่ากับ 5

- ใช้แรงดันอ้างอิง เท่ากับ 0 โวลต์
- แรงดันของแหล่งจ่าย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\pm 9\text{ V}$
- ค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร สามารถเลือกใช้ได้ คือ ค่า  $10\text{ k}\Omega - 500\text{ k}\Omega^{***}$
- ไอซีของโอปแอมป์ที่ใช้ในการทดลองกำหนดให้ คือ TL064



รูปที่ 2: วงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราขยายผลต่าง

หลักการ อัตราขยายของ Instrument Amplifier ทั่วไป  $1 + \frac{2R}{R_g} = 5$  โดยให้  $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 20\text{ k}\Omega$

จะได้  $1 + \frac{2(20\text{ k})}{R_g} = 5$  ดังนั้น  $R_g = 10\text{ k}\Omega$

บันทึกค่าความต้านทานที่ได้ออกแบบไว้ เทียบกับค่าความต้านทานจริงที่ได้จากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์\*\*\*

ตัวต้านทาน	ค่าที่ออกแบบไว้ (k $\Omega$ )	ค่าที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ (k $\Omega$ )
$R$	20	19.52, 19.50
$R_g$	10	9.76
$R_1$	20	19.72
$R_2$	20	19.62
$R_3$	20	19.67
$R_4$	20	20.00

**หมายเหตุ** ตัวต้านทาน  $R$  ที่ใช้ในวงจร ให้ระบุค่าทั้งสองตัว คำนวณด้วยเครื่องหมายจุลภาค “,”

### การวัดอัตราขยายผลต่าง

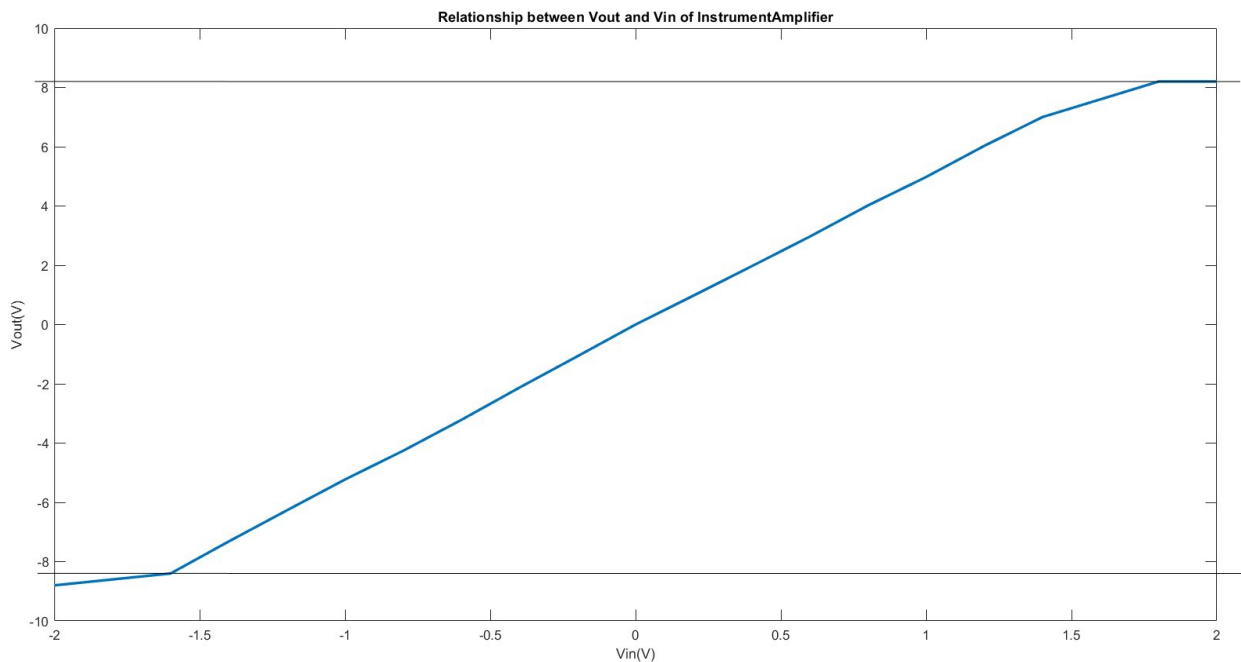
ต่อวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันลงบน breadboard เมื่อต่อเรียบร้อยแล้ว ตรวจสอบว่า วงจรทำงานถูกต้อง ให้วัดค่าอัตราขยายผลต่างโดยใช้วงจรในรูปที่ 2 ด้วยการป้อนสัญญาณไซน์ ความถี่ 1000 Hz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ซึ่งมีค่าสอดคล้องตามที่กำหนดไว้ในตาราง แล้วใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปวัดค่ายอดของแรงดันขาเข้า  $V_{in}$  และแรงดันขาออก  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองลงในตาราง

**หมายเหตุ** ให้สังเกตค่ายอดของแรงดันขาเข้าที่เป็นบวก เทียบกับ ค่ายอดของแรงดันขาออกที่เป็นบวก ให้สังเกตค่ายอดของแรงดันขาเข้าที่เป็นลบ เทียบกับ ค่ายอดของแรงดันขาออกที่เป็นลบ

$V_{in}$ (V <sub>p</sub> )	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0
$V_{out}$ (V <sub>p</sub> )	-8.8	-8.6	-8.4	-7.32	-6.27	-5.23	-4.26	-3.22	-2.13	-1.07	0

$V_{in}$ (V <sub>p</sub> )	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
$V_{out}$ (V <sub>p</sub> )	0.98	1.97	2.97	4.02	4.98	6.03	7	7.6	8.2	8.2

วาดกราฟของสัญญาณขาเข้าเทียบกับสัญญาณขาออก คำนวณอัตราขยายผลต่างในช่วงที่วงจรทำงานเชิงเส้น



เปรียบเทียบค่าอัตราขยายผลต่างในทางทฤษฎี กับค่าได้จากการทดลอง บันทึกผลลงในตาราง

	ค่าทางทฤษฎี: $Adm = 1 + \frac{2R}{R_g}$	ค่าจากการทดลอง: ความชันของกราฟ
ค่าอัตราขยายผลต่าง	$1 + \frac{2(19.51)}{9.67} = 5.08$	5.08

ค่าแรงดันอินพุตด้านบวก 8.2 V

ค่าแรงดันอินพุตด้านลบ -8.6 V

อภิปรายและตอบคำถาม

นิสิตคิดว่า เหตุใดแรงดันอินพุตด้านบวกหรือด้านลบจึงไม่เท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงบวกหรือลบ

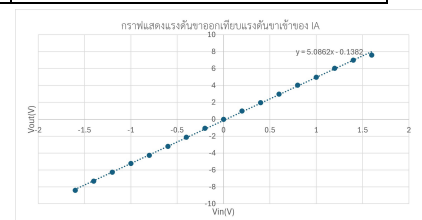
หมายเหตุ: ernel fitting คัดส่วน saturation ออกแล้ว

เพราะค่าตัวต้านทานที่ใช้จริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไว้ และ opamp เกิดแรงดันตก จึงทำให้แรงดัน

อินพุตด้านบวกหรือด้านลบ ไม่สามารถมีค่าถึงค่าแรงดันไฟเลี้ยงบวกหรือลบคือ  $\pm 9V$  โดยค่าแรงดันอินพุตด้านบวก = 8.2 V

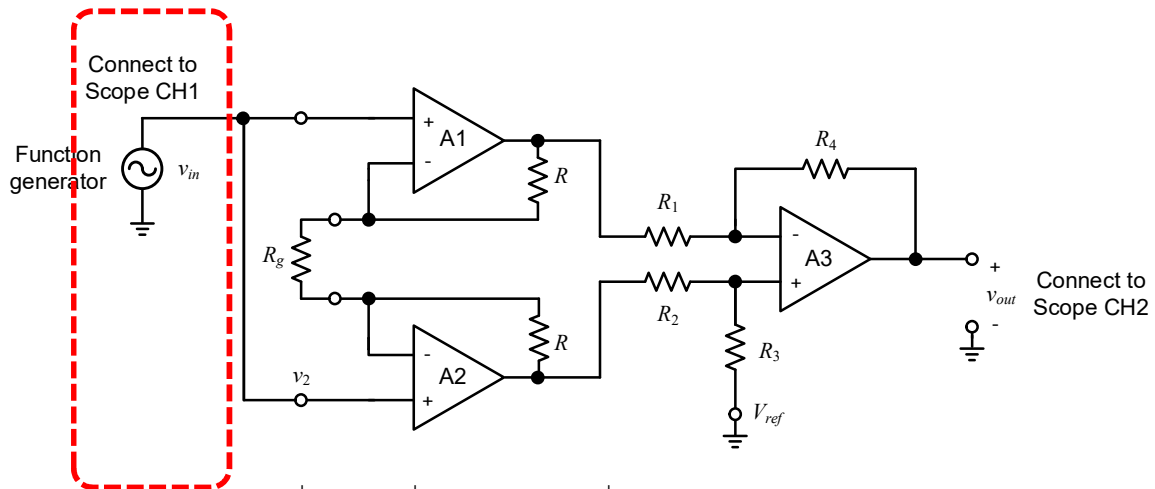
จึงความคลาดเคลื่อนจากแรงดันไฟเลี้ยง =  $\frac{|8.2-9|}{9} \times 100\% = 8\%$  และค่าแรงดันอินพุตด้านลบ = -8.6 V จึงความคลาดเคลื่อน

จากแรงดันไฟเลี้ยง =  $\frac{|-8.6-(-9)|}{1-91} \times 100\% = 9.4\%$



### การวัดอัตราขยายผลรวม

ต่อวงจรตามรูปที่ 3 ลัดขั้วเข้าทั้งสองของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเข้าด้วยกัน ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz เพิ่มขนาดของสัญญาณไซน์จนกระทั่งสามารถสังเกตเห็นสัญญาณขาออกที่ขั้วออก (อาจจะใช้การปรับสเกลแกนตั้งของดิจิทัลออสซิลโลสโคป (DSO) ช่วยด้วย) วัดขนาดจากยอดถึงยอด (peak-to-peak value) ของสัญญาณขาเข้าและขาออกเพื่อใช้คำนวณหาอัตราขยายผลรวม



รูปที่ 3: วงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราขยายผลรวม

	<p>คำนวณจากความไม่เข้าคู่ (mismatch) ของค่าความต้านทาน โดยใช้ค่าความต้านทานในตารางที่ 1</p> $A_{cm} = \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_1} \right) - \frac{R_4}{R_1}$	<p>ค่าจากการทดลอง:</p> $A_{cm} = \frac{ v_{out} }{ v_{in} }$
ค่าอัตราขยายผลรวม	$5.8178 \times 10^{-3}$	$5.734 \times 10^{-3}$

ให้ใช้ค่าอัตราขยายผลต่างและผลรวมที่ได้จากการทดลอง คำนวณค่า CMRR ตามสมการ

$$CMRR = 20 \log \left( \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right)$$

ค่า CMRR จากการทดลอง 58.73 dB

ค่า CMRR จากการคำนวณ 58.94 dB

อภิปรายผลการทดลองเทียบกับค่าจากการคำนวณ

จากการทดลองพบว่าค่า CMRR จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่า CMRR จากการคำนวณเล็กน้อย เนื่องจาก ความคลาดเคลื่อน  
ของตัวต้านทานที่ใส่ทดลอง และ ตัว opamp ที่ใช้ ทำให้ได้ค่าอัตราขยายผลต่างและค่าอัตราขยายผลรวมซึ่งมีความคลาดเคลื่อน  
ซึ่งทำให้ค่า CMRR คลาดเคลื่อนตามไปด้วย โดยที่

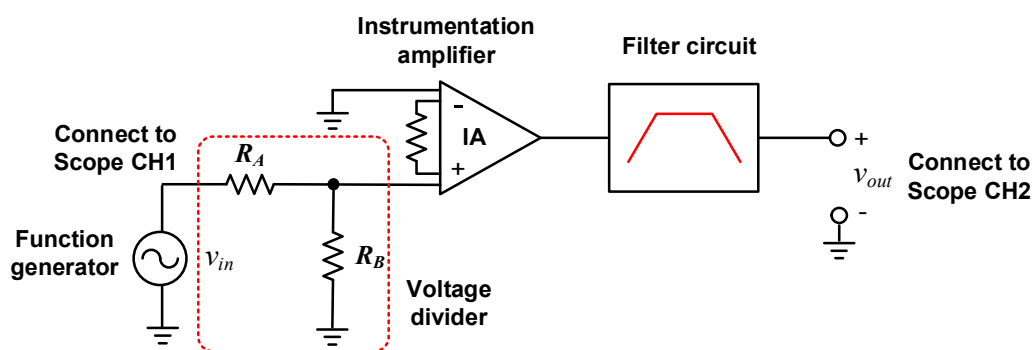
$$\% \text{ error ค่าอัตราขยายผลต่าง} = \frac{|5.03 - 5.03|}{5.03} \times 100\% = 0.99\%$$

$$\% \text{ error ค่าอัตราขยายผลรวม} = \frac{|5.934 \times 10^{-3} - 5.9179 \times 10^{-3}|}{5.9179 \times 10^{-3}} \times 100\% = 1.99\%$$

$$\% \text{ error ค่า CMRR} = \frac{|58.73 - 58.94|}{58.94} \times 100\% = 0.36\%$$

## การทดลองที่ 2: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

- 1) นำวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันที่ได้มาต่อเข้ากับวงจรกรองที่ได้จากการทดลองในครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 4 (ให้ขาออกของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเป็นขาเข้าของวงจรกรอง)
- 2) ต่อวงจรแบ่งแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4 เลือกอัตราส่วนการแบ่งแรงดันประมาณ 50 เท่า คำนวณค่าความต้านทานที่ต้องนำมาใช้ สาเหตุที่ต้องแบ่งแรงดันเนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในห้องปฏิบัติการฯ สามารถกำเนิดสัญญาณได้ขนาดเล็กสุด 100 mVpp ซึ่งถ้าป้อนเข้าวงจรโดยตรงจะเกิดการอิ่มตัวของวงจรได้ ค่าอัตราการลดทอน  $Atten = \frac{R_B}{R_A + R_B}$
- 3) ต่อขาเข้าของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ผ่านทางวงจรแบ่งแรงดัน
- 4) วัดแรงดันขาเข้าและขาออก โดยต่อ CH1 ของ DSO เข้ากับขาเข้าของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน และต่อ CH2 ของ DSO เข้ากับขาออกของวงจรกรอง
- 5) ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ บันทึกขนาดของสัญญาณขาเข้าและขาออกลงในตาราง โดยให้บันทึกเป็นค่ายอดถึงยอด คำนวณค่าอัตราขยายตามสมการ  $Gain(dB) = 20 \log \left( \frac{V_{out}}{V_{in} \times Atten} \right)$  เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 4: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันและวงจรกรอง และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่

### หมายเหตุ

- 1) ในการใช้ DSO (Digital storage oscilloscope) วัดสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของ DSO ต้องถูกตั้งการเชื่อมโยงแบบ **DC (direct coupling)** เพื่อให้การวัดค่าอัตราขยายมีความถูกต้องที่ความถี่ต่ำมาก หากตั้งเป็นแบบ AC ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ต่ำจะมีค่าลดลงเนื่องจากมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ต่อระหว่างขั้วเข้ากับวงจรภายในตัวเครื่อง

ค่า  $R_A = 560 \text{ k}\Omega$     ค่า  $R_B = 10 \text{ k}\Omega$     ค่า  $Atten = \frac{R_B}{R_A + R_B} = 0.01754$

$f$ (Hz)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$V_{in}$ (mV <sub>pp</sub> )	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$V_{out}$ (mV <sub>pp</sub> )	0.19	0.3	0.4	0.48	0.52	0.53	0.58	0.58	0.59
Gain (dB)	46.71	56.68	58.18	59.76	55.46	55.62	56.40	56.40	56.55

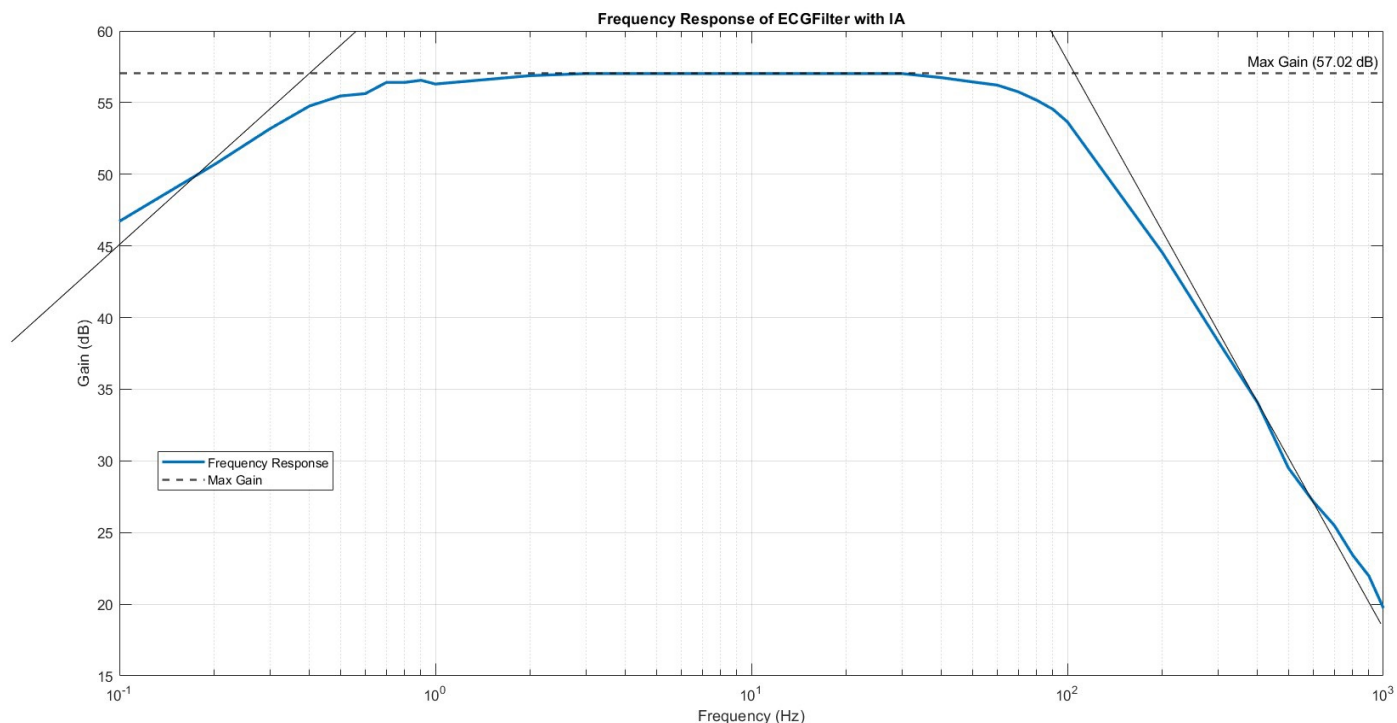
$f$ (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{in}$ (mV <sub>pp</sub> )	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$V_{out}$ (V <sub>pp</sub> )	2.25	2.45	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
Gain (dB)	56.29	56.88	57.02	57.02	57.02	57.02	57.02	57.02	57.02

$f$ (Hz)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$V_{in}$ (mV <sub>pp</sub> )	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$V_{out}$ (V <sub>pp</sub> )	2.49	2.49	2.49	2.41	2.33	2.24	2.15	2.01	1.87
Gain (dB)	57.02	57.02	57.02	56.74	56.44	56.21	55.74	55.16	54.53

$f$ (Hz)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$V_{in}$ (mV <sub>pp</sub> )	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$V_{out}$ (V <sub>pp</sub> )	1.89	0.59	0.29	0.18	0.11	0.08	0.066	0.052	0.044	0.034
Gain (dB)	53.65	44.52	38.34	34.06	29.52	27.16	25.49	23.42	21.97	19.73

**หมายเหตุ**      นิสิตสามารถใช้โปรแกรม Excel หรือโปรแกรมอื่นช่วยวาดกราฟได้ แต่ต้องระบุข้อมูลให้ถูกต้องและครบถ้วน เช่น ชื่อแกน หน่วยของแกน

### กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรอง



ให้ใช้เส้นตรงใกล้เคียงเพื่อหาความถี่ตัดมุมที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง    เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของวงจรกรองในครั้งที่แล้ว

(แสดงการวัดความถี่ตัดผ่าน โดยการใช้เส้นตรงใกล้เคียงบนกราฟ)

ค่าอัตราขยาย (จากการวัด) 57.02 dB

ค่าอัตราขยายจากการออกแบบ (อัตราขยายของ IA x อัตราขยายวงจรกรอง) 56.52 dB

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านต่ำ

ค่าที่วัดได้จากการวัด 400 mHz    เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวงจรกรอง 400 mHz

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านสูง

ค่าที่วัดได้จากการวัด 101 Hz    เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวงจรกรอง 100 Hz



อภิปรายผลของค่าความถี่ตัดผ่านของวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ เหมือนหรือแตกต่างจากวงจรกรองในการทดลองที่แล้ว หรือไม่ พร้อมทั้งให้เหตุผลประกอบ

ความถี่ตัดผ่านของวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ มีค่าใกล้เคียงกับวงจรกรองในการทดลองที่แล้ว เพราะ วงจรขยาย

อินสตรูเมนต์เรชั่นที่ได้ค่าใกล้เคียงกับวงจรกรองการทดลองแรก ไม่มีส่วนผิดในการกรอง ความถี่ที่ได้ จึงมาจากวงจรกรองข้างเดียว

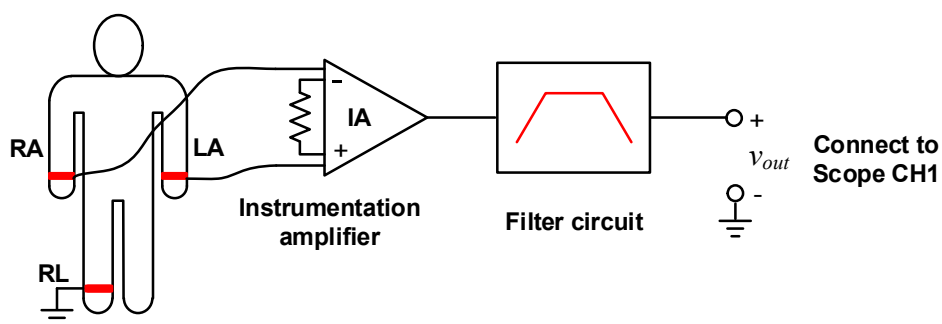
$$\% \text{ Error ความถี่ตัดผ่านด้านต่ำ} = \frac{1400-1401}{1400} \times 100\% = 14.89\%$$

$$\% \text{ Error ความถี่ตัดผ่านด้านสูง} = \frac{101-100}{100} \times 100\% = 1\%$$

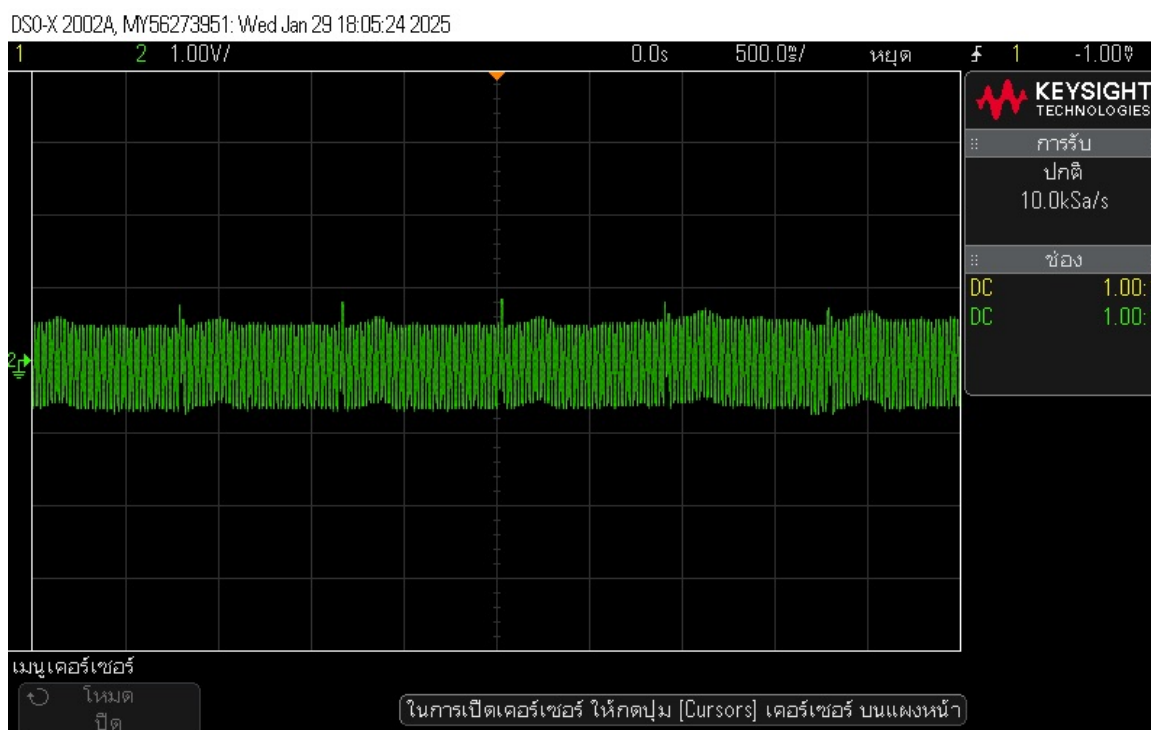
### การทดลองที่ 3: การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ให้อาสาสมัครในกลุ่ม 1 คน เป็นตัวอย่าง นำสายสัญญาณและขั้วอิเล็กโทรดที่กำหนดให้ ต่อเข้ากับ แขนซ้าย แขนขวา และขาขวาดังรูปที่ 5 ต่อขาออกของวงจรเข้ากับ DSO CH1

- ปรับสเกลแนวนอนของออสซิลโลสโคป เป็น 200 ms/Div (จะเห็นรูปคลื่น ECG ประมาณ 2-4 รูปคลื่น)
- ปรับสเกลแกนตั้งของออสซิลโลสโคป เป็น 1 V/Div หรือสามารถใช้สเกลอื่นได้ให้เห็นสัญญาณชัดเจน
- บันทึกรูปคลื่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจลงใน thumb drive **โดยบันทึกแบบเป็นไฟล์รูปภาพ (นามสกุล .png หรือ .jpg) และ บันทึกแบบเป็นไฟล์ข้อมูล (นามสกุล .CSV)**



รูปที่ 5: การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ



รูปที่ 6: สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้

อภิปรายผลการทดลองเกี่ยวกับรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้

สัญญาณรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้จากหัวใจของสัตว์ทดลอง พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น  
โดยการเฟสสัญญาณมีลักษณะที่ไม่เรียบ เนื่องจากเกิดการรบกวนจากแหล่งรบกวนหรืออุปกรณ์ที่ใช้  
ทำการทดลอง จึงควรจะมีวงจรกรองเพิ่มเติม เพื่อให้ได้สัญญาณที่เรียบขึ้น และสัญญาณ  
ที่ได้จะมีลักษณะเป็นคาบ โดยที่จำนวนที่ยอดสูงนั้นมาในแต่ละคาบ แสดงว่าวงจรได้วัดสัญญาณคลื่น  
ไฟฟ้าหัวใจได้