

Name	นีสตาน	สาสัมบูรณ์	Student ID	6201011631188	Section : 7
Table	1	Period	Mon : 09.00-12.00	Semester	
Lecturer		KDS			

วัตถุประสงค์ :

เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ และเข้าใจในคุณสมบัติของวงจรรวมอปแอมป์ดังต่อไปนี้

1. วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมอย่างง่าย
2. วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไข่นแบบ Phase-shift Oscillator
3. วงจรกรองแบบ Active Filter ดังต่อไปนี้
 - วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)
 - วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)
 - วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Band Pass Filter)

อุปกรณ์การทดลอง :

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LTspiceIV	เบอร์คละ	1 ชุด
2. Op-Amp เบอร์ LT071, LM741, LM311		1 ตัว
3. ตัวต้านทาน $1\text{ k}\Omega$, $2.2\text{ k}\Omega$, $5.6\text{ k}\Omega$, $22\text{ k}\Omega$, $56\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$, $1\text{ M}\Omega$, $10\text{ M}\Omega$	ค่าละ	1 ตัว
4. ตัวต้านทาน $3.3\text{ k}\Omega$, $9.1\text{ k}\Omega$, $20\text{ k}\Omega$, $39\text{k}\Omega$	ค่าละ	3 ตัว
5. ตัวต้านทาน $10\text{ k}\Omega$		4 ตัว
6. ตัวเก็บประจุ 1 nF		1 ตัว
10 nF		3 ตัว
47 nF		1 ตัว
7. ตัวต้านทานเพิ่มเติม	ค่าและจำนวนตามที่นักศึกษากำหนด	
8. ตัวเก็บประจุ 1nF , 10nF , 100nF	จำนวนตามที่นักศึกษากำหนด	
9. แผงวงจร (Prototype Board)		1 แผง
10. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator)		1 เครื่อง
11. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้		1 เครื่อง
12. มัลติมิเตอร์		2 เครื่อง
13. ออสซิลโลสโคป		1 เครื่อง

5.1 Operational Amplifier

ทฤษฎี

ในปัจจุบัน วงจรรวม (IC) ประเภทอปแอมป์มีการใช้งานในกลุ่มอุตสาหกรรมจำนวนมาก เนื่องจาก IC สามารถออกแบบแบบใหม่มีฟังก์ชันการทำงานพิเศษ (Special Purpose) ที่รองรับการทำงานเฉพาะทางที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผู้ที่สนใจหรือวิศวกรผู้ทำหน้าที่ออกแบบจะจำเป็นจะต้องหมั่นติดตามข่าวสารในแวดวงอุตสาหกรรมรวมทั้งศึกษาเพิ่มเติมความรู้อยู่เสมอ

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาการประยุกต์ใช้งานอปแอมป์เพียงบางชนิดและบางตัวอย่างเท่านั้น เพื่อเป็นแนวทางให้นักศึกษาได้ค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมได้ในภายหลัง โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นสองตอน คือ

ตอนที่ 1 การประยุกต์ใช้อปแอมป์ทั่วไปที่มีฟังก์ชันการทำงานแบบ Signal Amplifier

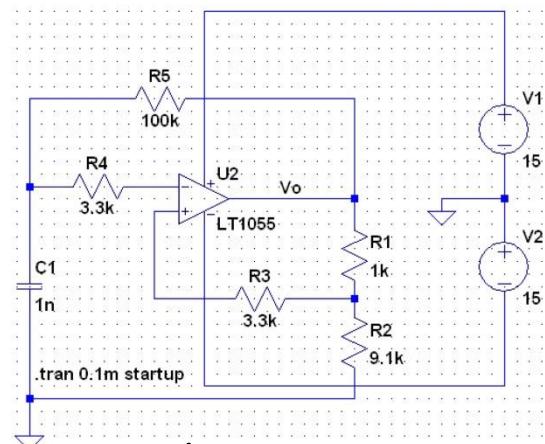
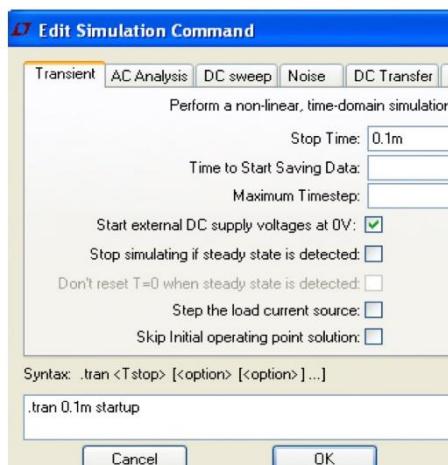
ตอนที่ 2 วงจรกรองความถี่ (Filter)

ตอนที่ 1. การประยุกต์ใช้อปแอมป์ทั่วไป

ก) วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave Generator)

การทดลอง

1. ให้นักศึกษาทำการจำลองวงจรตามรูปที่ 1 โดยใช้อีซีเบอร์ LT1055 (ไอซีเบอร์ LT1055 มีคุณสมบัติเป็น Precision, High Speed, JFET Input Op-Amp เช่นเดียวกับไอซีเบอร์ LT071)



รูปที่ 1

ให้นักศึกษาทำการจำลองการทำงานของวงจรในโหมด Transient

และให้เริ่มจำลองตั้งแต่เวลา $t = 0$ ซึ่งเป็นสภาพที่ทำการจ่ายไฟให้แก่วงจร

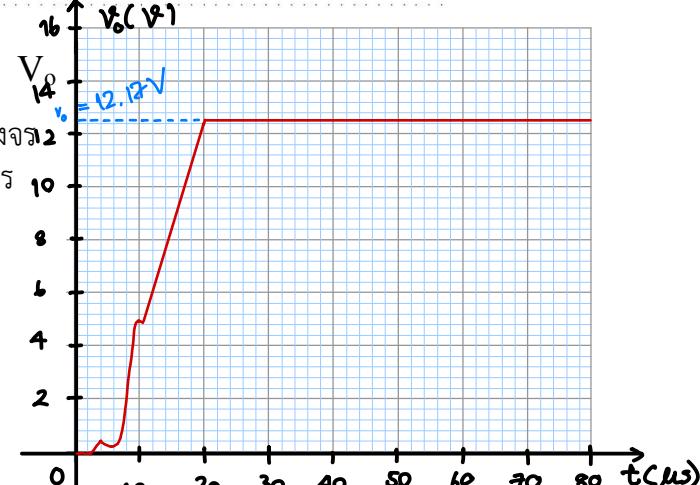
(เพื่อให้ครอบคลุมสภาพ Transient State ของวงจร) และบันทึกผลการ

ทดลองคำนวณค่าความถี่ของการอสซิลเลตจากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi R_5 C_1}$$

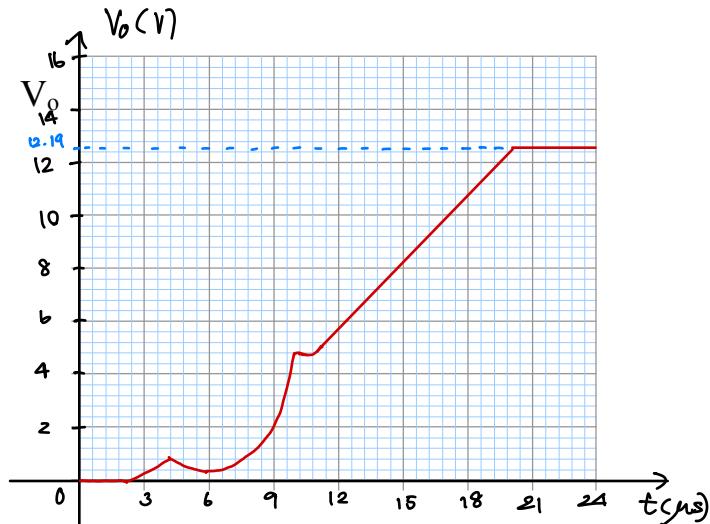
$$\text{ความถี่ที่คำนวณได้} = 1591.549 \text{ Hz}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \times 100k \times 1n} = 1591.549 \text{ Hz}$$



ขนาดของแรงดัน $V_o = 12.17 \text{ V}$

2. ให้นักศึกษาเปลี่ยนเวลา Stop Time เป็น 0.03 ms เพื่อดูสภาวะของ Transient State ในช่วง 0 - 30 μs และทำการจำลองการทำงานของวงจร บันทึกผลที่ได้
ให้นักศึกษาใช้ความรู้ทางทฤษฎีวิ่งจริงไฟฟ้า "Transient Analysis" มาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจร เทียบกับผลการจำลอง
ช่วง 0-20 μs รวมทั้งถ่ายไฟ เลื่อนๆ ที่
C คือรุ่น LM741 ที่ 220 μs ห้องที่ 2
แกะตัวในห้องทดลอง ที่หน้างาน

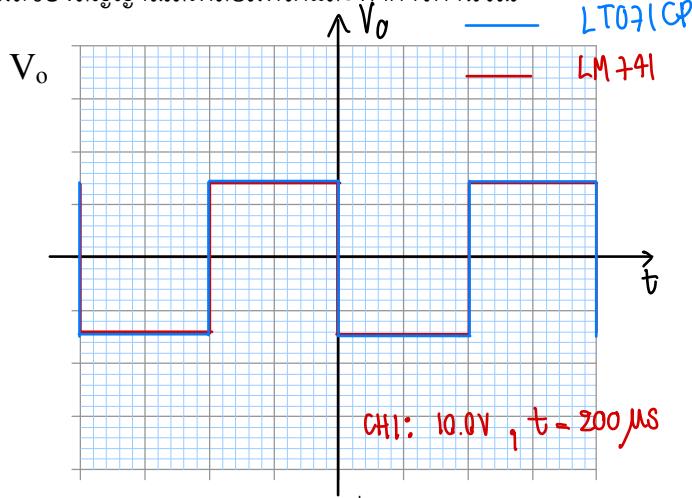


Q3 ผลใน Lab

3. ให้นักศึกษาประกอบวงจรตามรูปที่ 1 ลงบนprotoboard โดยใช้อิอยซีเบอร์ TL071 แทน LT1055
4. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณขากองของวงจร ทำการบันทึกความถี่ของสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้และทำการคำนวณค่าความถี่ของการօอสซิลเลตจากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi R_5 C_1}$$

ความถี่ที่คำนวณได้ = 1.591.549 Hz
ขนาดของแรงดัน $V_o = 13.60 \text{ V}$ (LT071CP)
ขนาดของแรงดัน $V_o = 13.70 \text{ V}$ (LM741)
ความถี่ที่วัดได้ = 1.27 kHz (LT071CP)
ความถี่ที่วัดได้ = 1.21 kHz (LM741)



5. ให้นักศึกษาปลดตัวต้านทานขนาด 9.1 kΩ ออก (**ไม่ต้องมีการต่อวงจรลงกราวด์**) สังเกตความเปลี่ยนแปลงพร้อมบันทึกผลที่ได้

TL071 & LM741 กราฟ f สูงสุดเท่าไร
ตัวต้านทาน 14.25 นาที 14.32 นาที

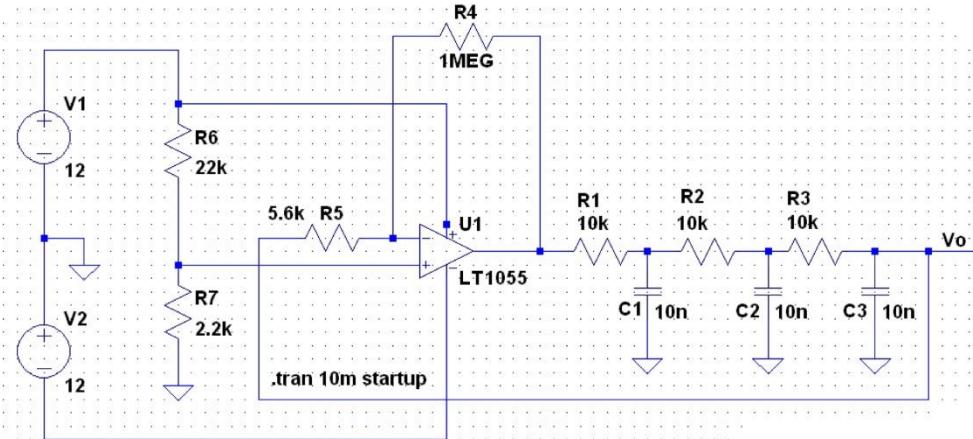
6. ลัดวงจร (Short Circuit) ตัวต้านทาน 3.3 kΩ ทั้งสอง สังเกตความเปลี่ยนแปลงพร้อมบันทึกผลที่ได้
Op-Amp ที่สองเป็น Output จะเป็น

7. เปลี่ยนอิอยซีเป็นเบอร์ LM741 จากนั้นให้ทำการทดลองเป็นแบบเดียวกับบันทึกผลการทดลองเพิ่มเติม หากผลที่ได้จากการทดลองของ Op-Amp ทั้ง 2 ตัว มีความแตกต่างกัน
ความถี่ f นี้ควรจะอยู่ที่ใด

ข) วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไน์ (Sine wave generator)

การทดลอง

1 ให้นักศึกษาจำลองวงจรตามรูปที่ 2 โดยใช้อิซีเบอร์ LT1055



รูปที่ 2

 หมายเหตุ ค่า R อาจจะเปลี่ยนได้โดย $R4$ ให้ใช้ค่าในช่วง $1\text{-}2 \text{ M}\Omega$ หรือสูงกว่าได้

 $R5$ ให้ใช้ค่าในช่วง $5.6\text{-}56 \text{ k}\Omega$ หรือต่ำกว่าได้

ให้นักศึกษาจำลองการทำงานของวงจรในโหมด Transient และให้เริ่มจำลองตั้งแต่เวลา $t = 0$ ซึ่งเป็นสภาพที่เริ่มทำการจ่ายไฟให้แก่วงจร (ให้ครอบคลุมสภาพ Transient State)

บันทึกผลการทดลอง

คำนวณค่าความถี่ของการอสัลเลตจากสมการ

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{3}R_1C_1} \quad \text{หมายเหตุ } (\tan 60^\circ = 1.732)$$

ผลการทดลอง

$$\text{ความถี่ที่ได้จากการคำนวณ} = 5773.502 \text{ Hz}$$

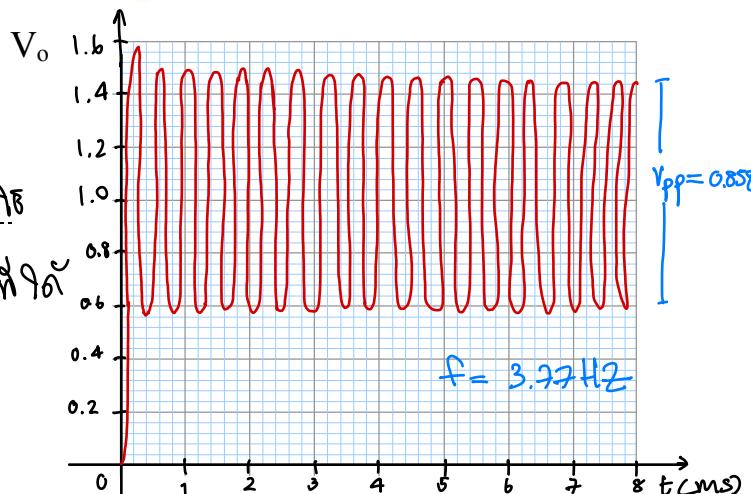
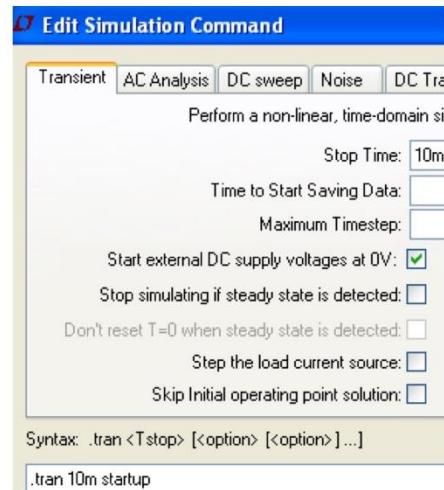
$$\text{ความถี่ที่ได้จากการจำลอง} = 3.77 \text{ kHz}$$

$$\text{ขนาด } V_{p-p} (\text{เฉพาะของไฟลับ}) \text{ ของ } V_o = 0.858 \text{ V}_{pp}$$

$$\text{ค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณและการจำลองมีค่าต่างกัน} \\ \text{คิดเป็น } 34.701 \% \text{ เพราะเหตุใด } \text{ เป็นไปได้ที่จะมีผลต่อ} \\ \text{ค่าความถี่ที่ได้จากการจำลอง} \text{ อย่างไร}?$$

พิจารณา วงจรที่ได้มาเป็น Ideal Op-Amp ไม่มีหน่วยนำร่อง เวลาในการแก้ IC Op-Amp ก็ต้องตั้งค่าที่ดี

เพื่อให้เกิดการปรับด้านหน้า.



2. ให้นักศึกษาทดลองต่อ Coupling Capacitor $1.0 \mu F$ ที่โคนด V_o และต่อด้วย ความต้านทานโหลด R_L ลงกราว์ด จากนั้นทำการจำลองและวัดค่าความถี่ V_o เมื่อ $R_L = 10 k\Omega, 100 k\Omega$

ผลการทดลอง

$$R_L = 10 k\Omega$$

$$\text{ความถี่ที่ได้จากการจำลอง} = 4.63 \text{ kHz}, \text{ ต่างจากการคำนวณ} = 19.8 \%$$

$$\text{ขนาด } V_{p-p} \text{ ของสัญญาณ AC ของ } V_o = 404.2 \text{ mVpp} = 0.404 \text{ Vpp}$$

$$R_L = 100 k\Omega$$

$$\text{ความถี่ที่ได้จากการจำลอง} = 3.73 \text{ kHz}, \text{ ต่างจากการคำนวณ} = 35.39 \%$$

$$\text{ขนาด } V_{p-p} \text{ ของสัญญาณ AC ของ } V_o = 783.7 \text{ mVpp} = 0.784 \text{ Vpp}$$

อยู่ใน Lab

3. ให้นักศึกษาประกอบวงจรตามรูปที่ 2 ลงบนprotoboard โดยใช้อิซิเบอร์ TL071 แทน LT1055

4. ให้นักศึกษาใช้อุปกรณ์สิลิโคลีสโคปวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร (เมื่อ No Load) ทำการบันทึกความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ที่ได้ และทำการหาค่าความถี่ของการออสซิลเลเตในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

$$R_L = 10 k\Omega \text{ ความถี่ที่ได้} = 4.167 \text{ kHz}$$

$$\text{ต่างจากการคำนวณ} = 47.845 \%$$

$$\text{ขนาด } V_{p-p} \text{ ของสัญญาณ AC ของ } V_o = 0.68 \text{ Vpp}$$

$$R_L = 100 k\Omega \text{ ความถี่ที่ได้} = 3.288 \text{ kHz}$$

$$\text{ต่างจากการคำนวณ} = 43.050 \%$$

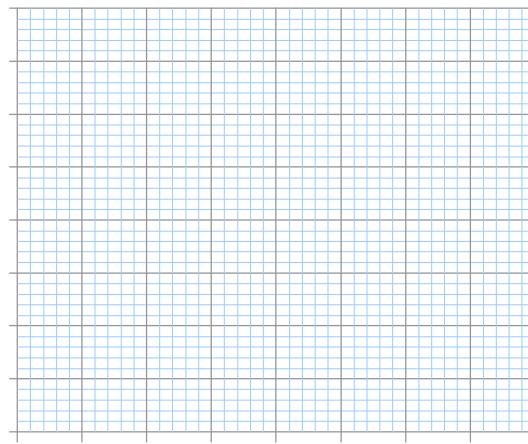
$$\text{ขนาด } V_{p-p} \text{ ของสัญญาณ AC ของ } V_o = 1.18 \text{ Vpp}$$

$$R_L = \infty \Omega \text{ ความถี่ที่ได้} = 3.249 \text{ kHz}$$

$$\text{ต่างจากการคำนวณ} = 43.436 \%$$

$$\text{ขนาด } V_{p-p} \text{ ของสัญญาณ AC ของ } V_o = 1.37 \text{ Vpp}$$

V_o



5. ให้นักศึกษาปลดโหลด R_L ออกและทดลองเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน R_4, R_5 ให้มีค่ามากขึ้น 2-5 เท่า สังเกตผลการทดลองจากนั้น ให้นักศึกษาลดค่าตัวต้านทานลง 2-3 เท่า แล้วสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงพร้อมอธิบายผลที่สังเกตได้ (ทั้งขนาดของ V_o และความถี่)

เมื่อเพิ่มตัวต้านทาน 2 เท่า ทางเดินสัญญาณ จึงได้ $V_{out} = 1.24 \text{ V}$, $f = 3.05 \text{ kHz}$

เมื่อลดตัวต้านทาน 2 เท่า ทางเดินสัญญาณ จึงได้ $V_{out} = 0.95 \text{ V}$, $f = 3.82 \text{ kHz}$

สรุปผลว่า คราฟเฟิล์ด ภาคต่อตัวต้านทาน จึงส่งผลต่อตัว V_{out} ท่องทางรายละเอียด

อย่างไร จึงทำให้ f_{req} เก็บอย่างต่อเนื่อง.

ตอนที่ 2. วงจรกรองความถี่ (Filter)

ทฤษฎี

วงจรกรองความถี่ (Filter) คือ วงจรที่ถูกออกแบบมาเพื่อกรองความถี่ของสัญญาณอินพุตให้ตรงกับคุณสมบัติการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านออกไปยังเอาร์พุตได้ ความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่ผ่านของวงจรกรองความถี่จะถูกลดทอนลงอย่างมาก ส่วนจะลดทอนมากหรือน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับการออกแบบ รูปที่ 3 เป็นวงจรกรองชนิดที่ให้ความถี่สูงผ่าน กล่าวคือ ตัวกรองความถี่จะยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านออกไปได้มากกว่าสัญญาณช่วงย่านความถี่ต่ำ



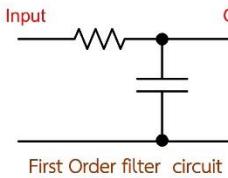
รูปที่ 3

ชนิดของวงจรกรองมี 2 ชนิดคือ

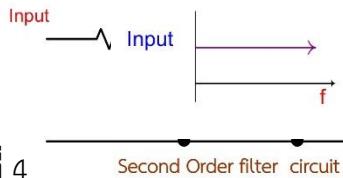
1. วงจรกรองแบบ Passive (Passive Filter) เป็นวงจรกรองที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ R , L , C เท่านั้น ซึ่งวงจรแบบนี้จะมีอัตราขยายแรงดันน้อยกว่า 1
2. วงจรกรองแบบ Active (Active Filter) เป็นวงจรกรองที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ R , L , C ที่ทำงานร่วมกับอปเอมป์ (Op-Amp) หรือทรานซิสเตอร์ ซึ่งวงจรแบบนี้จะสามารถออกแบบให้มีอัตราขยายแรงดันได้ตามกำหนดขึ้นอยู่กับการออกแบบ

คุณสมบัติการกรองของวงจรกรองแบ่งได้เป็น 4 แบบคือ

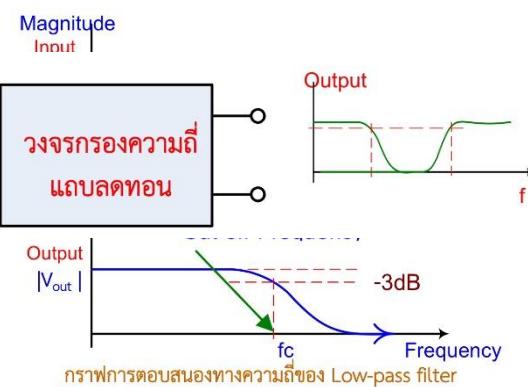
1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)



รูปที่ 4



Second Order filter circuit

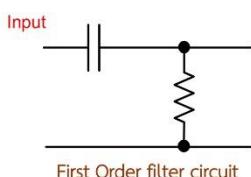


การจัดวงจร R, C ดังรูปที่ 4 จะทำให้สัญญาณความถี่สูงส่วนใหญ่ผ่านตัวเก็บประจุลงกราวด์ไปบางส่วน จึงเหลือเพียงสัญญาณส่วนที่เป็นความถี่ต่ำออกไปยังเอาต์พุต ในรูปกราฟแสดงการตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ของวงจรและ **เราเรียกค่าความถี่ที่ทำให้กำลังของสัญญาณเอาต์พุตลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง (จากปกติ) ว่า ค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency)**

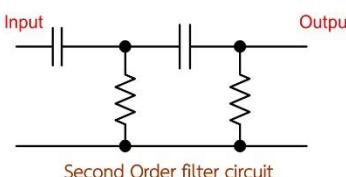
2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

การจัดวงจร R, C ดังรูปที่ 5 จะทำให้สัญญาณความถี่สูงไหลผ่านตัวเก็บประจุออกไปยังเอาต์พุตได้ดีกว่าความถี่ต่ำซึ่งถูกตัวเก็บประจุกันไว้ไม่ให้ผ่านไปเอาต์พุต จึงได้สัญญาณการตอบสนองดังแสดงในรูปกราฟ

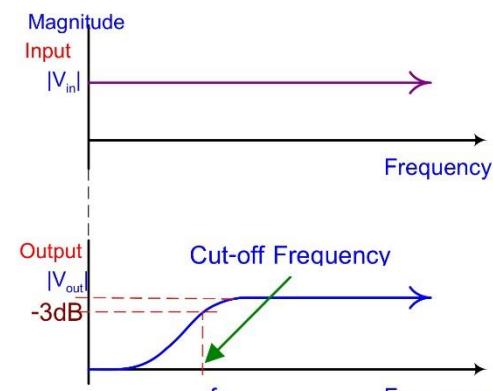
3. วงจรกรองความถี่แคบผ่าน (Band Pass Filter)



รูปที่ 5



Second Order filter circuit

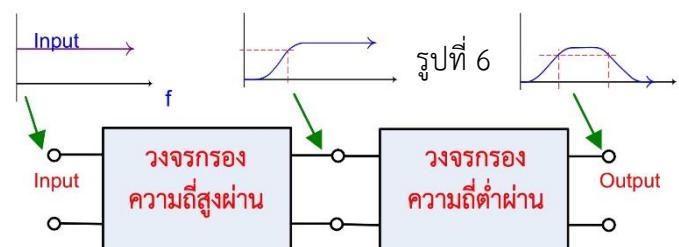


กราฟการตอบสนองทางความถี่ของ High-pass filter

เป็นการนำเอาวงจรกรองความถี่ทั้งแบบความถี่ต่ำผ่านและแบบความถี่สูงผ่านมาต่อแบบ Cascade เพื่อทำงานร่วมกันดังในรูปที่ 6 ซึ่งจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางความถี่โดยรวมของระบบคือจะมีเพียงแค่ความถี่ในบาง

4. วงจรกรองความถี่แคบลดตอน (Band Reject Filter)

เป็นวงจรกรองที่ออกแบบให้มีการลดตอนเฉพาะบางช่วงของแบบความถี่ ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรดังแสดงรูปที่ 7

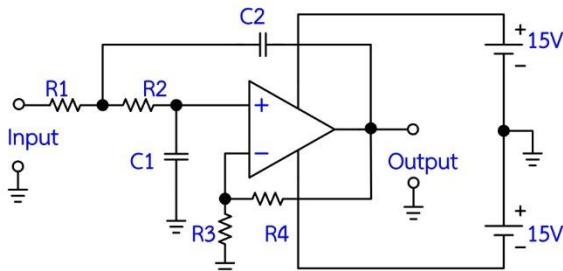


หมายเหตุ

วิธีการออกแบบวงจรกรองแบบ Band Pass Filter และ Band Reject Filter ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงแนวคิดเบื้องต้นเท่านั้น

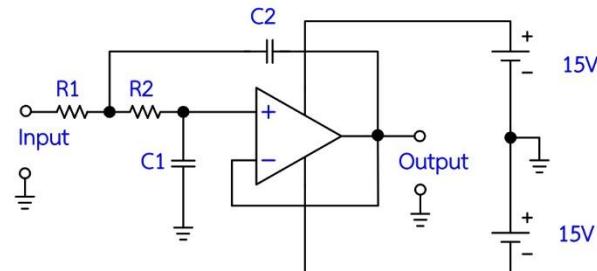
วงจรกรองแบบ Sallen-key Low Pass Filter (Second-order)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่มีการจัดวงจรแบบ Sallen-key Low Pass Filter แสดงดังรูปที่ 8



$$R_1 = R_2, C_1 = C_2$$

$$a (A_0 = 1 + R_4/R_3)$$



$$b (A_0 = 1)$$

รูปที่ 8

$$\text{Transfer Function ของวงจร} = H(S) = \frac{A_0}{1 + \omega_c RC(3 - A_0)S + (\omega_c RC)^2 S^2}$$

โดยที่ $A_0 = 1 + \frac{R_4}{R_3}$ สำหรับวงจรในรูปที่ 6(a) และ $A_0 = 1$ สำหรับวงจรในรูปที่ 6(b)

ถ้าให้

$$a_1 = \omega_c RC(3 - A_0)$$

$$b_1 = (\omega_c RC)^2$$

ในทางปฏิบัติหากเรากำหนดค่า C จะทำให้สามารถหาค่าของ R ได้จาก $R = \frac{\sqrt{b_1}}{2\pi f_c C}$

$$\text{ค่าของ } A_0 \text{ สามารถหาได้จาก } A_0 = 3 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}} = 3 - \frac{1}{Q}$$

$$\text{เมื่อ } Q \text{ คือ Pole Quality มีค่าเท่ากับ } Q = \frac{\sqrt{b_1}}{a_1} \text{ ดังแสดงค่าในตารางที่ 1}$$

โดยที่ไปแล้วการออกแบบวงจรกรองแบบ Sallen and Key จะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

Butterworth, Bessel และ 3dB Tschebyscheff โดยสามารถกำหนดได้จากพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ a_1 b_1 Q และ $\frac{R_4}{R_3}$

โดยในการทดลองนี้จะทดสอบตัวกรองแบบ Sallen and Key ในกรณีที่จุนพารามิเตอร์ตาม Butterworth เท่านั้น ดังนั้นแล้ว จึงกำหนดค่าได้ดังนี้

$$a_1 = 1.4142 \quad b_1 = 1 \quad Q = 0.71 \quad \frac{R_4}{R_3} = 0.568$$

การทดลอง 1

1. ให้นักศึกษาจำลองวงจรตามรูปที่ 8(a), 8(b) โดยใช้ไอซีเบอร์ LT1055 (ไอซีเบอร์ LT1055 มีคุณสมบัติเป็น Precision, High Speed, JFET Input Op-Amp เช่นเดียวกันกับไอซีเบอร์ TL071) โดยให้นักศึกษาเลือกค่า **R, C** ดังนี้

a) ให้เลือกค่า **C** เป็นค่า 1 nF หรือ 10 nF หรือ 100 nF ซึ่งเป็นค่าที่มีในห้องปฏิบัติการ

b) ให้เลือกค่าความถี่เป็น $f = 1000 * N + 2000 \text{ Hz}$ โดยที่ **N** คือหมายเลขทดลองที่ น.ศ. นั่งทำงาน

c) ให้คำนวณจากสมการ และเลือกค่าจากตารางที่ 1 เพื่อหาค่าอุปกรณ์ **R, C** ที่จะทำให้วงจรสามารถทำงานได้

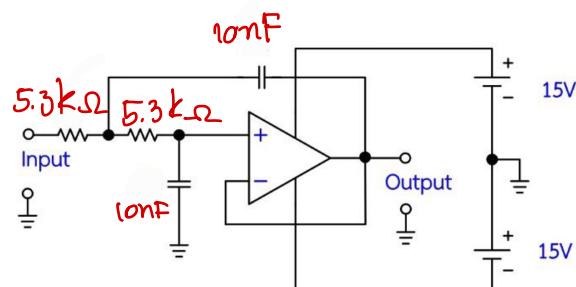
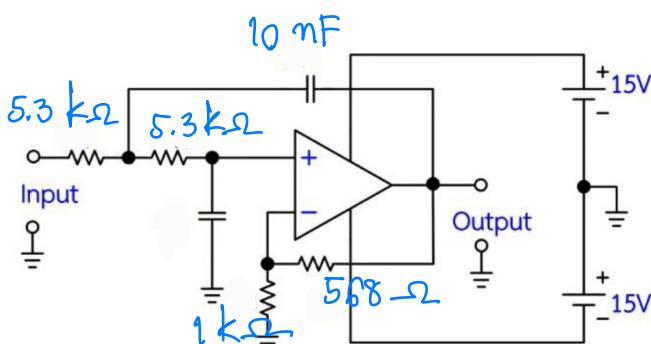
$$f = 1000(1) + 2000 \text{ Hz} = 3000 \text{ Hz} \quad \begin{matrix} (a) \\ (b) \end{matrix}$$

ตามที่ได้คำนวณในข้อ b) อย่างสมบูรณ์ $\text{Cutoff Frequency} = 3000 \text{ Hz}$ $A_0 = 1.568, 1$

$$\text{Transfer Function} = \frac{1.568}{(s+0.707)^2 + 0.5}, \quad \begin{matrix} (a) \\ (b) \end{matrix} \quad C_1 = 10 \text{ nF}$$

$$C_2 = 10 \text{ nF}, \quad R_1 = 5.3 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 5.3 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

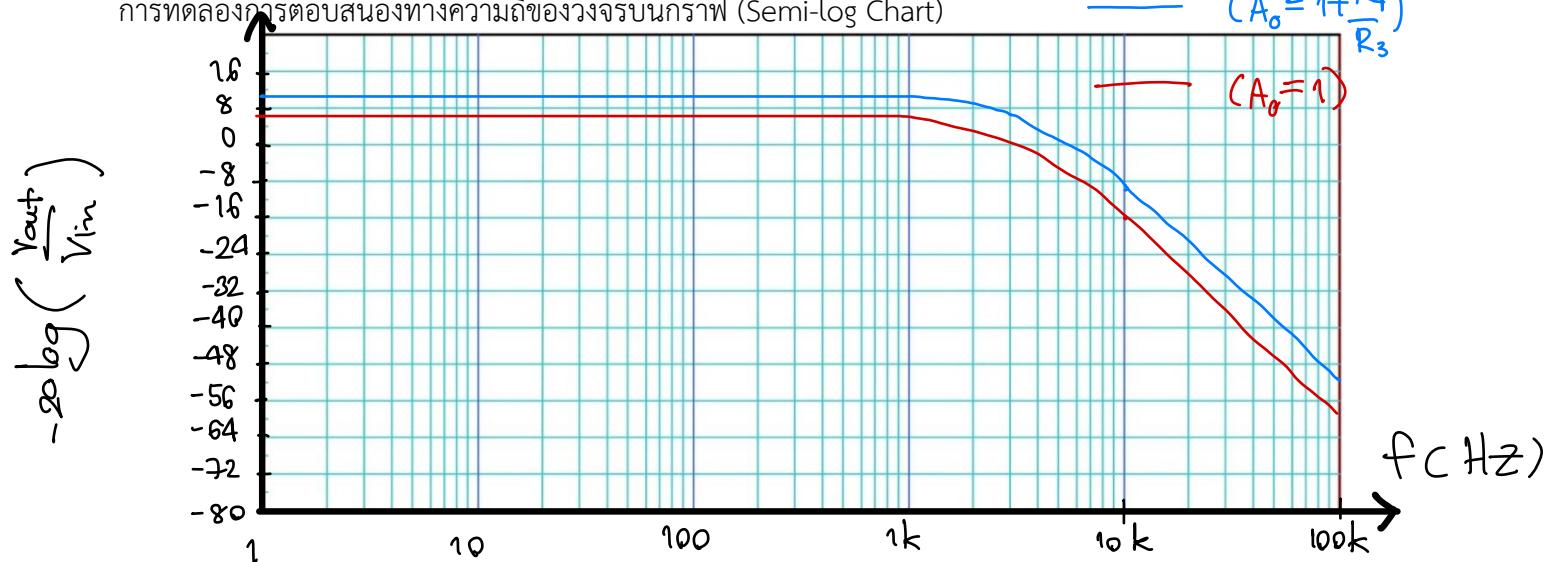
$$R_4 = 568 \Omega$$



จงวาดรูปวงจรที่ออกแบบ (ที่มีค่าของอุปกรณ์)

2. ให้นักศึกษาจำลองการทำงานของวงจรในโหมด AC Analysis ให้เริ่มตั้งแต่ความถี่ 1 Hz ไปจน 300 kHz และบันทึกผลการทดลองการตอบสนองทางความถี่ของวงจรบนกราฟ (Semi-log Chart)

$$(A_o = 1 + \frac{R_4}{R_3})$$



(ห้องทดลอง Lab)

2. ให้นักศึกษาต่อวงจรบันวัดทดลอง โดยพยายามเลือกค่าอุปกรณ์ R , C ให้ได้ใกล้เคียงกับที่นักศึกษาคำนวณมากที่สุด ใช้ไอซีบอร์ด TL071 จากนั้นป้อนอินพุตขนาด 2 ถึง 4 V_{p-p} ให้แก่วงจร (เลือกแรงดันที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าได้ง่าย) ส่วนค่าความถี่ของฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ที่จะใช้ป้อนให้วงจรกรองนั้น ให้นักศึกษาเลือกค่าความถี่ที่คิดว่ามีความเหมาะสม

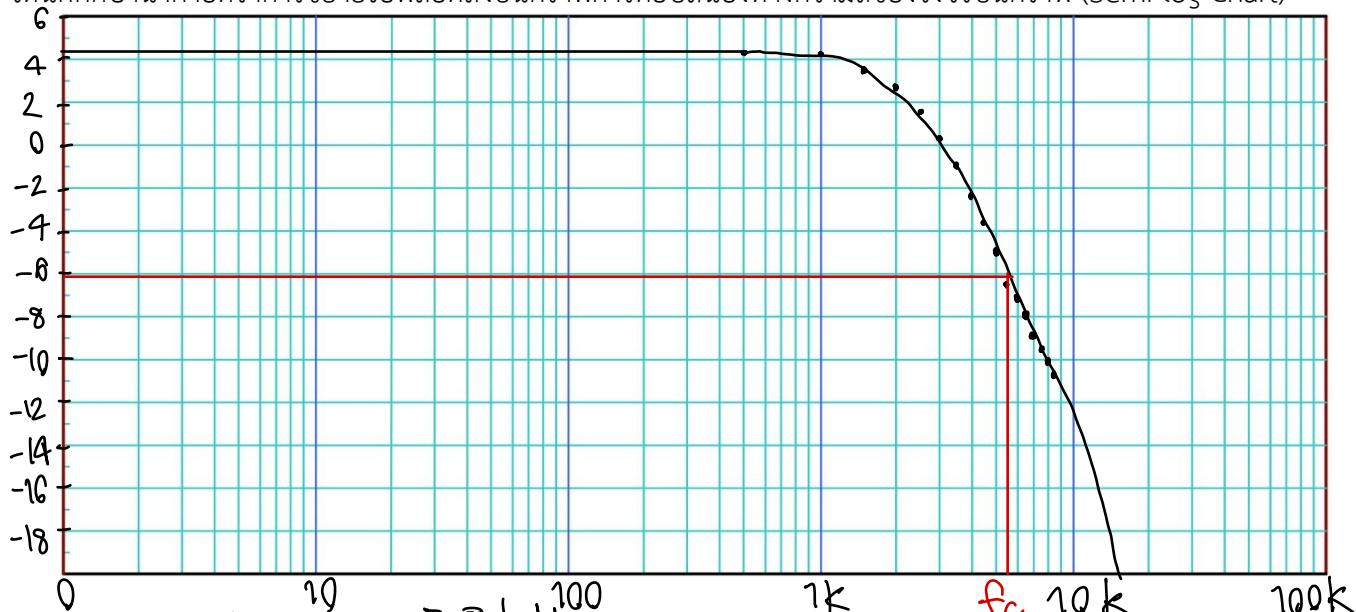
(ให้อธิบายเหตุผลด้วย) กับวงจรของนักศึกษาแต่ละโต๊ะทดลองเองและบันทึกผลการทดลอง

ความถี่ (Hz)	ขนาด Input (V_{p-p})	ขนาด Output (V_{p-p})	$\frac{V_o}{V_i}$	อัตราขยาย $\frac{V_o}{V_i}$
500	2	3.24	1.62	4.19
1000	2	3.20	1.60	4.08
1500	2	3.04	1.52	3.64
2000	2	2.76	1.38	2.80
2500	2	2.40	1.20	1.58
3000	2	2.04	1.02	0.17
3500	2	1.76	0.88	-1.11
4000	2	1.52	0.76	-2.38
4500	2	1.28	0.64	-3.88
5000	2	1.12	0.56	-5.04
5500	2	0.96	0.48	-6.38
6000	2	0.88	0.44	-7.13
6500	2	0.8	0.4	-7.99
7000	2	0.72	0.36	-8.87
7500	2	0.68	0.34	-9.37
8000	2	0.64	0.32	-10.00
8500	2	0.6	0.3	-10.45

เหตุผลที่นักศึกษาเลือกย่านความถี่ทดสอบดังตารางนี้ เพราะ

หากเราต้อง frequency เท่าที่นี่ขนาดตัวกำลังไฟฟ้าจะต้องลดลงมาก
แต่เมื่อเทียบขนาด 4000+ ถึง 7500 ยานความถี่จะลดลง

ให้นักศึกษานำค่าอัตราการขยายไปพล็อตลงบนกราฟการตอบสนองทางความถี่ของวงจรบันกราฟ (Semi-log Chart)



จากราฟ ค่าความถี่ผัด มีค่า = 5.5 kHz

หาได้จาก (อธิบายวิธีการหาค่า Cutoff Frequency)

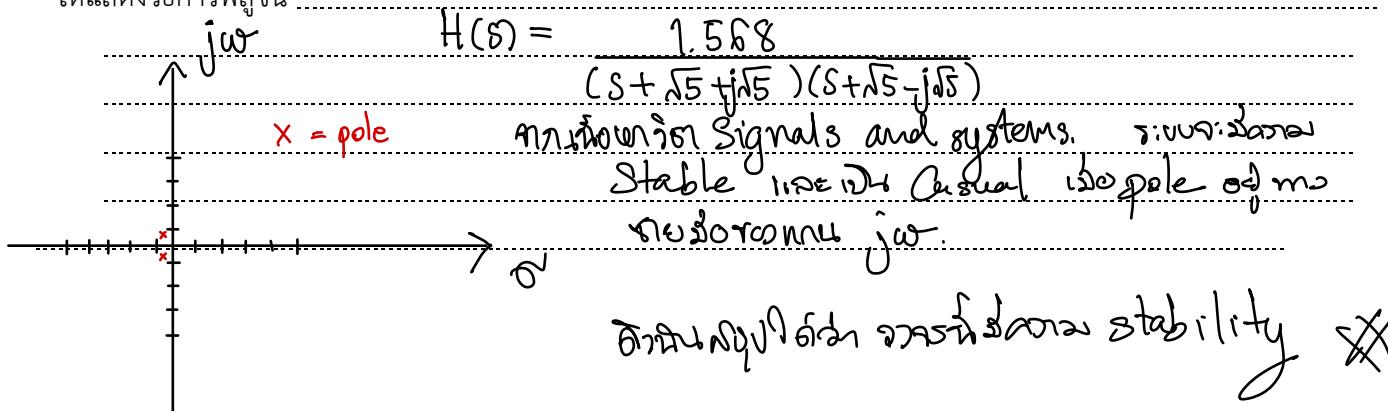
จาก V_{in} ต้องเท่า ratio ของ V_o/V_i แล้ว take log จะได้ค่านี้
 $10 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \Rightarrow 6.02 \text{ dB}$ ภาระต่อตัวกราฟ และสูงต่ำสุดก็เป็น dB
 จะได้ $f_c = 5500 \text{ Hz}$

วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองในข้อ 2 กับข้อ 3

หากทดลองที่ 2 เรากำหนด $f_c = 3000 \text{ Hz}$ และได้ผลิตุณวัสดุที่พนัก
 ใจ f_c คาดว่าคือ 5500 Hz สาเหตุที่เกิดคาดคะเนมาดังนี้
 1. หาก Resister ที่ใช้มาก 100 %. หากติดปัจจุบัน
 2. แหล่งจ่าย function generator อาจไฟฟ้าไม่เพียงพอ

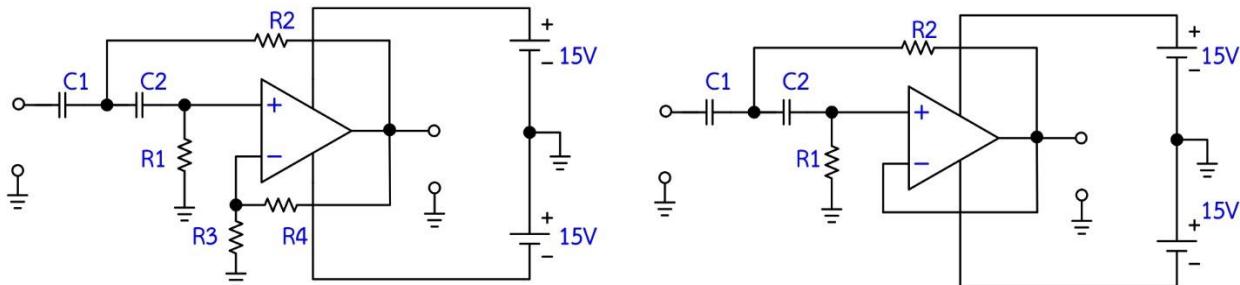
วงจรที่ออกแบบมีความเสถียร (Stability) หรือไม่ (นักศึกษาอาจจะพิสูจน์จากตำแหน่งของ Pole, Zero ของวงจร)

ให้แสดงวิธีการพิสูจน์



วงจรกรองแบบ Sallen-key High Pass Filter (Second-order)

วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่มีการจัดวงจรแบบ Sallen-key High Pass Filter แสดงดังรูปที่ 9



$$R_1 \neq R_2, C_1 = C_2$$

Op-Amp TL071C

a) ($\alpha = 1 + R_4/R_3$)

b) ($\alpha = 1$)

รูปที่ 9

$$\text{Transfer Function ของวงจร} = H(S) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_2(C_1+C_2)+R_1C_2(1-\alpha)}{\omega_c R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{S} + \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{S^2}}$$

โดยที่ $\alpha = 1 + \frac{R_4}{R_3}$ สำหรับวงจรในรูปที่ 7(a) และ $\alpha = 1$ สำหรับวงจรในรูปที่ 7(b)

$$\text{ถ้าให้ } C_1 = C_2, \alpha = 1 \text{ และ } a_1 = \frac{2}{\omega_c R_1 C}$$

$$b_1 = \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C^2}$$

$$R_1 = \frac{1}{\pi(1000)(10^{-9})} \\ 1.4142$$

ด้วยการเลือกกำหนดค่า C ในการออกแบบจะทำให้สามารถหาค่าของ R_1, R_2 ได้จาก

$$R_1 =$$

$$R_1 = \frac{1}{\pi f_c C a_1}$$

$$R_2 = \frac{a_1}{4\pi f_c C b_1}$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรอง a_1, b_1 สามารถหาได้จากตารางที่ 1 ในหน้า 3

$$= 225 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 113 \text{ k}\Omega \quad R_2 = \frac{1.4142}{4\pi(1000)(10^{-9})} \\ 1.4142$$

การทดลอง II

1. ให้นักศึกษาจำลองวงจรตามรูปที่ 9(a) หรือ 9(b) โดยใช้อิซีเบอร์ LT1055 (ไอซีเบอร์ LT1055 มีคุณสมบัติเป็น Precision, High Speed, JFET Input Op-Amp เช่นเดียวกันกับไอซีเบอร์ TL071) โดยให้นักศึกษาเลือกค่า R, C ดังนี้

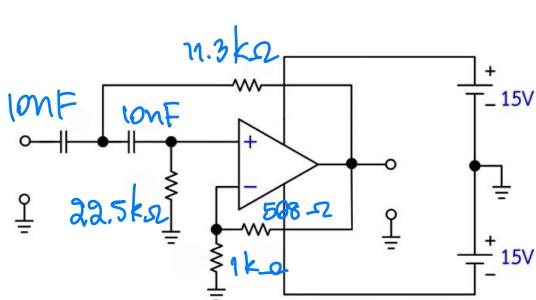
- ให้นักศึกษาเลือกค่า C เป็นค่า 1 nF หรือ 10 nF หรือ 100 nF ซึ่งเป็นค่าที่มีในห้องปฏิบัติการ
- ให้นักศึกษาเลือกค่าความถี่เป็น $f = 1000 * N \text{ Hz}$ โดยที่ N คือหมายเลขตัวทดลองที่นักศึกษานั้นทำงาน
- ให้นักศึกษาคำนวณวงจรจากสมการ เลือกค่าจากตารางที่ 1 เพื่อหาค่าอุปกรณ์ที่จะทำให้วงจรสามารถทำงานถูกต้องตาม วัตถุประสงค์ของการออกแบบในข้อ b) ได้อย่างสมบูรณ์

$$\alpha_a = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

บันทึกผลการออกแบบ

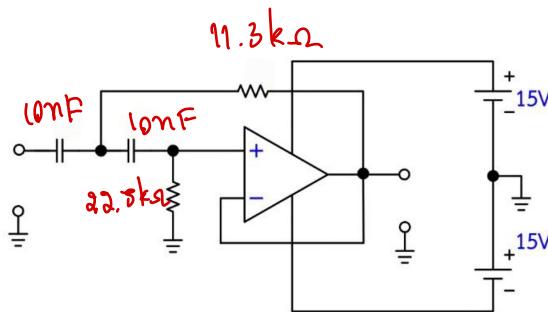
 ชนิดของการกรอง (วงจรในรูปที่ 9(a) และ 9(b)) Cutoff Frequency = $\frac{1.568}{1} \text{ Hz}$ $\alpha = 1.568$

Transfer Function = (a) $1 - \frac{0.62 + \frac{99.63}{s^2}}{s}$ (b) $1 + \frac{1.4147 + \frac{0.99}{C_1 s^2}}{s}$
 $C_2 = 10 \text{ nF}$ $R_1 = 22.5 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 11.3 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$
 $R_4 = 568 \text{ }\Omega$



$$R_1 \neq R_2, C_1 = C_2$$

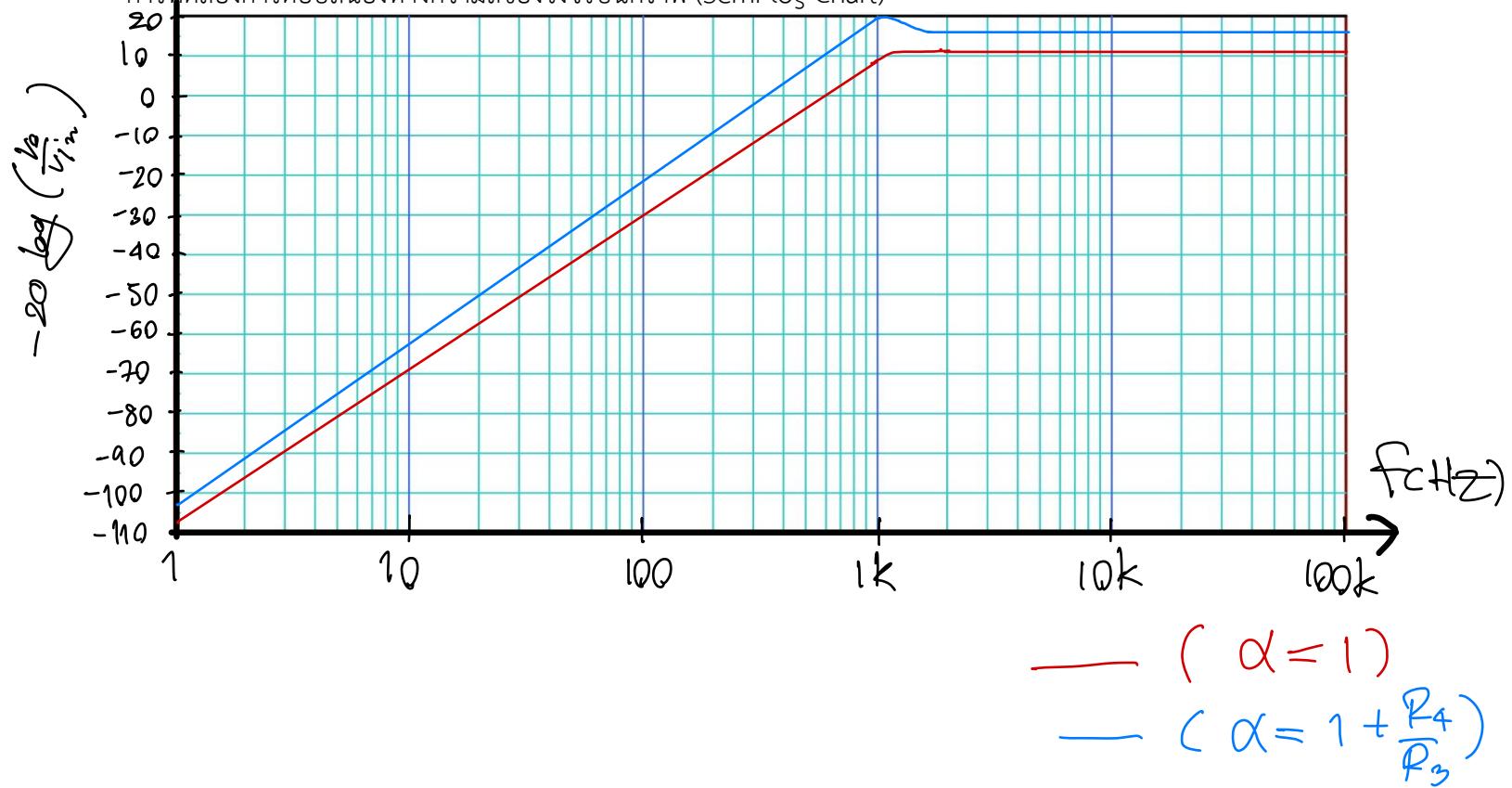
$$\alpha = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$



$$\alpha = 1$$

จงวัดรูปวงจรที่ออกแบบ (ที่มีค่าของอุปกรณ์)

2. ให้นักศึกษาจำลองการทำงานของวงจรในหมวด AC Analysis ให้เริ่มตั้งแต่ความถี่ 1 Hz ไปจน 300 kHz และบันทึกผลการทดลองการตอบสนองทางความถี่ของวงจรบนกราฟ (Semi-log Chart)



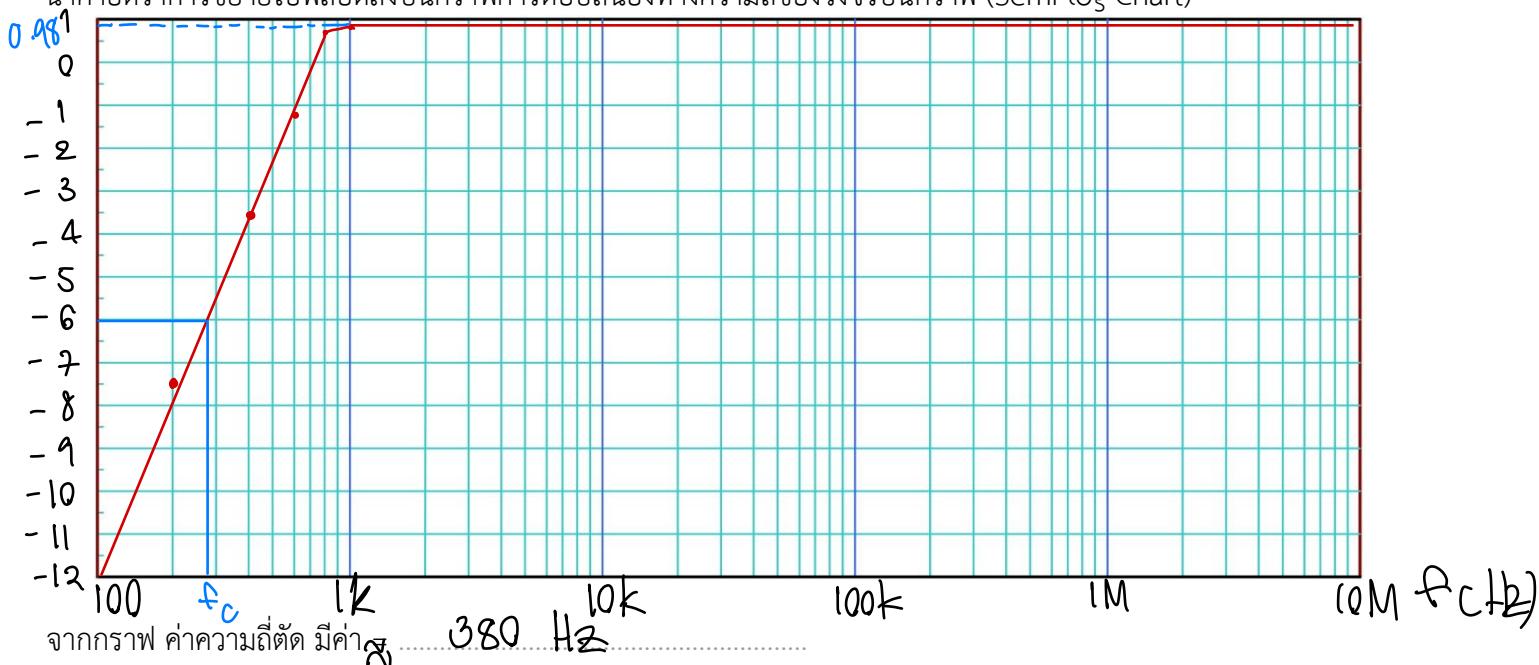
In Lab

3. ให้นักศึกษาต้องจربนบอร์ดทดลอง พยายามเลือกค่าอุปกรณ์ R , C ให้ได้ใกล้เคียงกับที่นักศึกษาคำนวณมากที่สุด ใช้อีซี TL071 จากนั้นป้อนอินพุตขนาด 2 ถึง 4 V_{p-p} ให้แก่วงจร (เลือกระดับที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าได้ง่าย) ส่วนค่าความถี่ของฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ที่จะใช้ป้อนให้วงจรร่องนั้น ให้นักศึกษาเลือกค่าความถี่ที่คิดว่ามีความเหมาะสม (ให้อธิบายเหตุผลด้วย) กับวงจรของนักศึกษาแต่ละตัวทดลองเอง และบันทึกผลการทดลอง $\frac{V_o}{V_i}$

ความถี่ (Hz)	ขนาด Input (V_{p-p})	ขนาด Output (V_{p-p})	V_i อัตราขยาย	$20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right)$
200	2	0.84	0.42	-7.54
400	2	1.32	0.66	-3.81
600	2	1.76	0.88	-1.11
800	2	2.2	1.1	0.83
1k	2	2.24	1.12	0.98
1.2k	2	2.24	1.12	0.98
1.4k	2	2.24	1.12	0.98
1.6k	2	2.24	1.12	0.98
1.8k	2	2.24	1.12	0.98
2.0k	2	2.24	1.12	0.98
2.2k	2	2.24	1.12	0.98
2.4k	2	2.24	1.12	0.98

เหตุผลที่นักศึกษาเลือกว่าความถี่ทดสอบดังตารางนี้ เพราะ กราฟที่ทำได้ แสดงผลลัพธ์ที่ดี. แต่ เพิ่มค่า f_c ให้มากขึ้น ค่า f_c ได้เป็น 380 Hz.

นำค่าอัตราการขยายไปplotลงบนกราฟการตอบสนองทางความถี่ของวงจรบันกราฟ (Semi-log Chart)



วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองในข้อ 2 กับข้อ 3

ค่า f_c ที่ได้จากการทดลองในข้อ 2 คือ 1000 Hz ซึ่งต่ำกว่า
ที่ทางครุภัณฑ์ระบุไว้แล้ว ใจคิด จากราฟประวัติ 380 Hz ค่าความ
ถ่วงเฉลี่ย 62 % จากราฟที่ 2

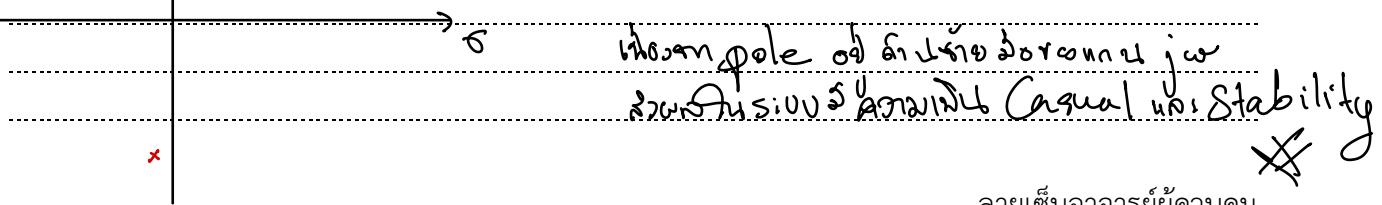
วงจรที่นักศึกษาได้ออกแบบมีความเสถียร (Stability) หรือไม่ (นักศึกษาอาจจะพิสูจน์จาก Pole, Zero ของระบบ)

$$H(s) = \frac{1.568}{1 - \frac{0.62}{s} + \frac{99.63}{s^2}} = \frac{1.568 s^2}{s^2 - (0.62)s + 99.63}$$

$\times j\omega$

$x = \text{pole}$

$$= \frac{(1.568s)(s)}{(s - 0.3 - j9.98)(s - 0.3 + j9.98)}$$



ลายเซ็นอาจารย์ผู้ควบคุม

คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้นักศึกษาสรุปความรู้ที่ได้จากการทดลองนี้

(ตอนที่ 1)

Op-Amp สามารถรับสัญญาณ Output ต้องมีรูป Sinusoidal หรือ Square Wave
ได้ เมื่อต่อ Resister ก็คือเนื่องจากค่าความถี่ของสัญญาณไม่แน่นอน
หาก บีบอัดไฟฟ้าคงต้องการตัวปรับแต่งอัตราส่วนเพื่อให้ได้

(ตอนที่ 2)

Op-Amp สามารถขยาย - ลด ขนาดของ สัญญาณ Input ได้ นำไปใช้กับ
บีบอัดปรับอัตรานิ่ง แต่ จุดเดียว เท่านั้น

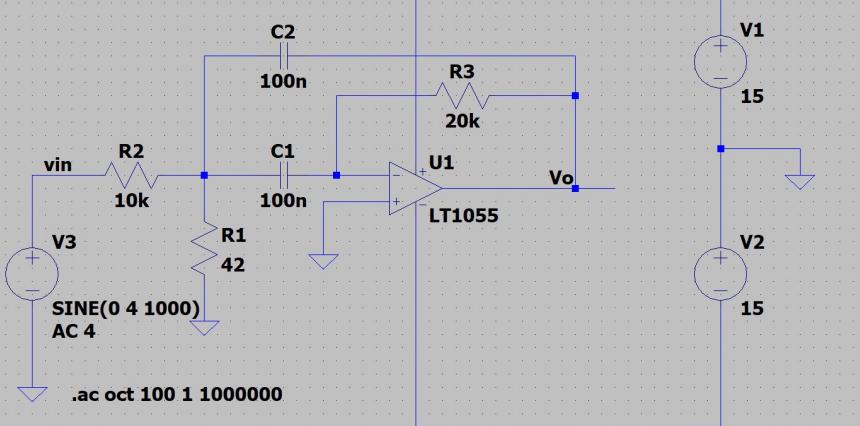
2. จากการทดลองในตอนที่ 1 ให้นักศึกษาอธิบายสาเหตุที่ต้องกำหนดค่าในการจำลอง LTspice เป็น “start external DC power supply voltages at 0 V”

แรงดันไฟ Volt เมื่อที่ 0V เพื่อในแต่ละการจำลอง C เมื่อเริ่มต้นจะ

3. ให้นักศึกษาเขียนวิธีการวิเคราะห์ในสภาวะ Transient State ของวงจรไฟฟ้าที่มี R, L, C เป็นส่วนประกอบด้วยโปรแกรม LTspice IV (โดยยกตัวอย่างจะร่าย ๆ แสดงวิธีการคำนวณและผลการจำลองวงจร)

4. ให้นักศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมและเขียนรายงานแสดงวิธีการออกแบบพร้อมทั้งวิเคราะห์ความเสถียรของวงจรรองความถี่แบบแบนผ่าน (Band Pass Filter) ขนาด Order 2 (**ในวงจรต้องมี RC เพียง 2 ชุดเท่านั้น**) ค่าความถี่แบนผ่านให้ใช้ค่าเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองนี้ พร้อมทั้งผลการจำลองด้วย LTspice IV

Band Pass Filter



} Circuit
Fig 1.7

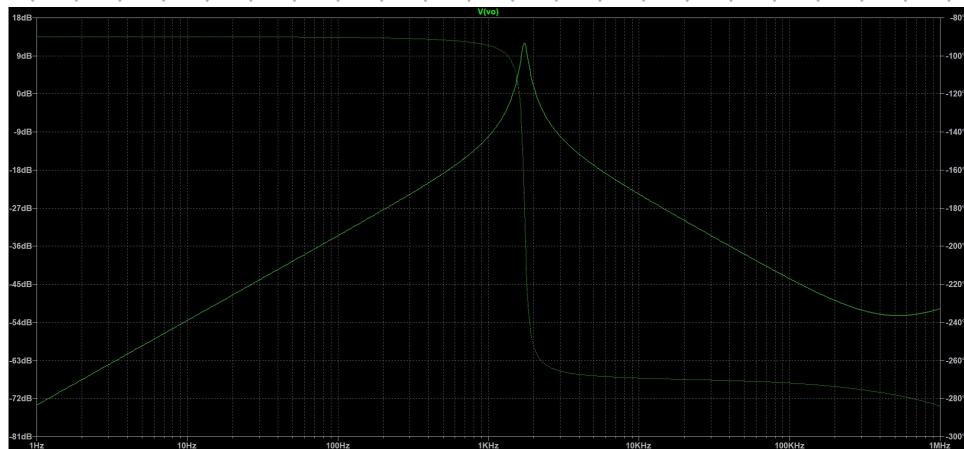


Fig. 1.8

ເຮັດວຽກ $R_1 = \frac{R}{2Q^2 - 1}$ ຖະໜົນ Q ສິ່ງປະຕິບັດພາຫວານ.

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad \text{ທະນີ } BW \text{ ດີວຸນຄວາມກຳອົງຕອນດູຈິນ}$$

ສິນຄະນິດ $BW = f_2 - f_1$ ແລະ $f_0 = \sqrt{f_2 f_1}$

ເຮັດວຽກ $f_1 = 1000$ (as High pass filter) ແລະ:

$f_2 = 3000$ (as Low pass filter)

ໃນ C ອື່ນທີ່ 100 nF ທານ $Q = C_2$

ເນື້ອງກີ່າການອື່ນທີ່ ລົງທຶນ Characteristic ຕະຫຼາກຕົວລາ 1.8.