

Name	โสมณัฐ สุขสมบูรณ์	Student ID	6201011631188	Section : 7
Table	1	Period		Semester
Lecturer	KDS			

วัตถุประสงค์ :

เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ และเข้าใจในคุณสมบัติของวงจรรวมออปแอมป์ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานของวงจรรวมออปแอมป์
2. การหาค่า Input Bias Current, Input Offset Voltage, Slew Rate
3. คุณสมบัติการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรวมออปแอมป์
4. วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator)

อุปกรณ์การทดลอง :

- |  |             |
|--|-------------|
| 1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LTspice IV   | 1 ชุด       |
| 2. Op-amp เบอร์ TL071CP, LM741 (หรือ UA741)  | 1 ตัว       |
| 3. ตัวต้านทาน 1 k $\Omega$ , 2.2 k $\Omega$ , 5.6 k $\Omega$ , 22 k $\Omega$ , 56 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ , 10 M $\Omega$ | ค่าละ 1 ตัว |
| 4. ตัวต้านทาน 3.3 k $\Omega$ , 9.1 k $\Omega$ , 20 k $\Omega$ , 39k $\Omega$   | ค่าละ 3 ตัว |
| 5. ตัวต้านทาน 10 k $\Omega$  | 4 ตัว       |
| 6. ตัวเก็บประจุ 1 nF   | 1 ตัว       |
| 10 nF  | 3 ตัว       |
| 47 nF  | 1 ตัว       |
| 4. DC Power Supply   | 1 เครื่อง   |
| 5. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator)  | 1 เครื่อง   |
| 6. ออสซิลโลสโคป  | 1 เครื่อง   |
| 7. แผงวงจร (Prototype Board)   | 1 แผ่น      |
| 8. มัลติมิเตอร์  | 2 เครื่อง   |

## 4.1 Operational Amplifier

### ทฤษฎี

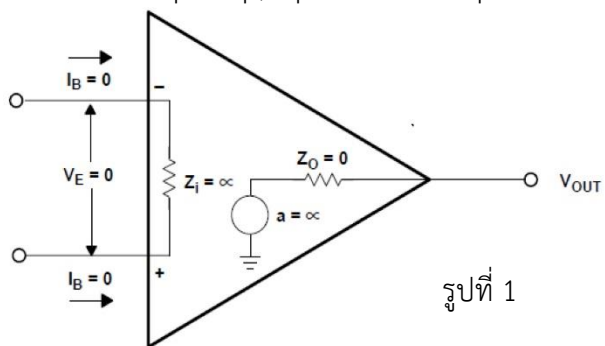
ออปแอมป์ (Op-Amp, Operational Amplifier) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทวงจรรวม (IC, Integrated Circuit)

ที่ถูกออกแบบมาเพื่อเป็นวงจรขยายสัญญาณ โดยมีวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติในทางอุดมคติ คือ

Input Impedance  $Z_i = \infty \Omega$

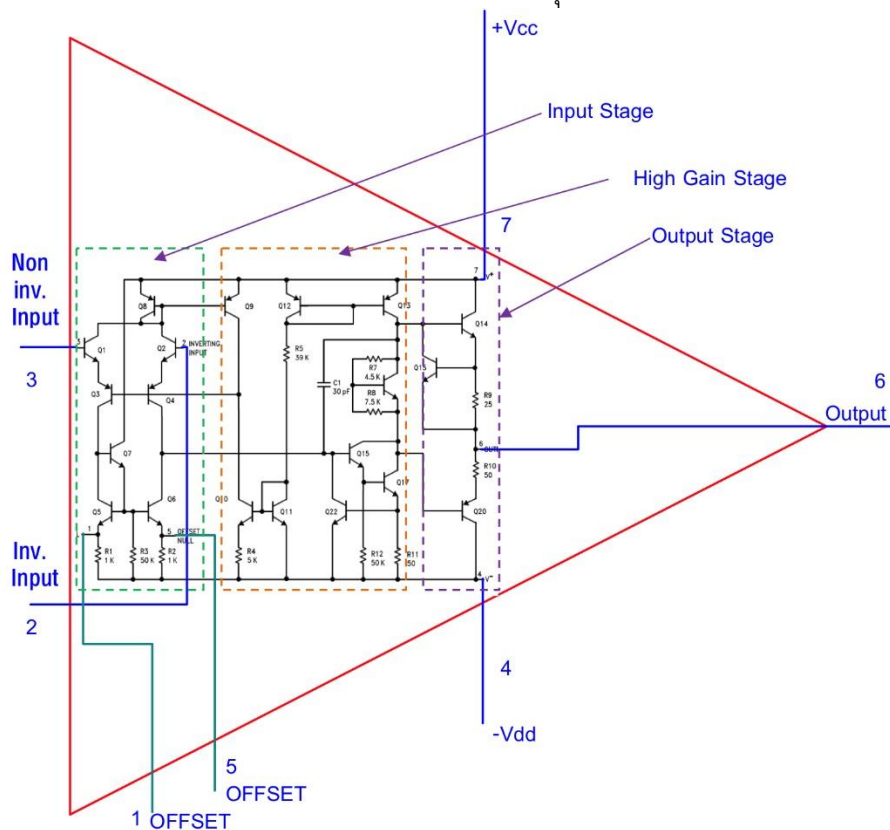
Output Impedance  $Z_o = 0 \Omega$

Open Loop Voltage Gain  $A, a = \infty$  เท่า



รูปที่ 1

โครงสร้างวงจรออปแอมป์ เบอร์ 741 แสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นว่า วงจรภายในของออปแอมป์เกิดจากการนำไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟต มาต่อเป็นวงจรขยายหลายชั้นเพื่อให้วงจรมีคุณสมบัติของอัตราขยายได้สูงตามต้องการ



รูปที่ 2

วงจรภายในของออปแอมป์แบ่งออกเป็น 3 ภาคที่สำคัญ คือ

ภาคสัญญาณอินพุต (Input Stage)

ภาคขยายสัญญาณแรงดัน (Gain Stage)

ภาคสัญญาณเอาต์พุต (Output Stage)

**ภาคสัญญาณอินพุต (Input Stage)** มีขาอินพุต 2 ขา คือ Inverting และ Non-inverting เชื่อมต่อเข้าสู่วงจร Differential Amplifier จึงทำให้มีค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance,  $Z_i$ ) ที่มีค่าสูงมาก

**ภาคขยายสัญญาณแรงดัน (Gain Stage)** ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดัน จึงมีอัตราการขยายแรงดัน (Voltage Gain) สูง และ ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ที่ดีตลอดย่านใช้งาน

**ภาคสัญญาณเอาต์พุต (Output Stage)** ทำหน้าที่ขยายกำลัง (ขยายทั้งกระแสและแรงดัน) ของสัญญาณเอาต์พุตให้มีขนาดที่สูงขึ้น และมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output Impedance,  $Z_o$ ) ต่ำ สำหรับเบอร์ 741 ในภาคสัญญาณเอาต์พุตจะใช้ วงจรขยายแบบ Class AB

## คุณลักษณะเฉพาะของออปแอมป์เชิงอุดมคติ (Ideal Op-Amp)

1. มีค่าอัตราขยายสัญญาณแรงดัน (ในโหมด Open Loop Gain) เป็นอนันต์ (Infinity)
2. มีความกว้างของแถบความถี่ใช้งาน (Bandwidth) เป็นอนันต์
3. มีอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) เป็นอนันต์
4. มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output Impedance) เป็นศูนย์

ในขณะที่ออปแอมป์ที่ใช้งานจริง (Partial Op-Amp) จะมีค่าแรงดันและกระแสที่จำกัด ดังนั้นจะไม่เกิดค่าอนันต์เหมือนเชิงอุดมคติ แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับเชิงอุดมคติ

## คุณลักษณะที่สำคัญของออปแอมป์

1. กระแสไบอัสด้านอินพุต (Input Bias Current) เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของออปแอมป์ มีขนาดเท่ากันของสัญญาณขา Inverting และ Non-inverting ในทางทฤษฎีจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ สัญญาณไฟฟ้านี้ยังคงมีอยู่แต่ค่าน้อยๆ ระดับ  $10^{-12}$  A
2. แรงดันยกตัวด้านอินพุต (Input Offset Voltage) เป็นความแตกต่างของระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขา Inverting และ Non-inverting ในทางทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับศูนย์แต่ในการผลิตจริงไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้ แต่ค่าก็ต่ำมาก ออปแอมป์ส่วนใหญ่จะมีค่าแรงดัน Input Offset ต่ำกว่า  $10^{-3}$  V
3. ค่าสเลวเรต (Slew Rate) เป็นความไวในการปรับตัวของออปแอมป์ในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต เมื่อสัญญาณอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทันทีทันใด ออปแอมป์ที่มีค่า Slew Rate ที่ดีจะสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ทันที การทดสอบค่า Slew Rate ของออปแอมป์นิยมทดสอบด้วยการป้อนสัญญาณอินพุตเป็น Unit Step
4. ความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth) เป็นย่านความถี่ที่ออปแอมป์สามารถให้อัตราการขยายสัญญาณได้เท่ากันตลอดทั้งย่าน โดยไม่เกิดความผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามออปแอมป์มีข้อจำกัดในย่านความถี่สูง ดังนั้นความกว้างของแถบความถี่จึงจะเริ่มนับจากศูนย์เฮิรตซ์ไปจนถึงค่าความถี่ที่สัมพันธ์กับค่า Slew Rate ดังสมการ

$$FPBW = \frac{\text{Slew Rate}}{2\pi V_p}$$

เมื่อ  $FPBW$  = Full-power Bandwidth

$\text{Slew rate}$  = อัตราการปรับตัวสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ (V/ $\mu$ s)

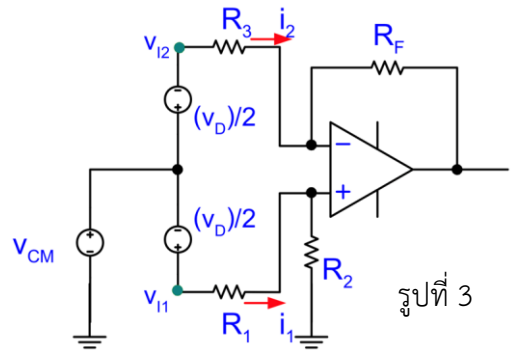
$V_p$  = Peak Output Voltage

5. อัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนโหมตร่วม (Common-Mode Rejection Ratio, CMRR) เป็นความสามารถของออปแอมป์ในการจำกัดสัญญาณรบกวนที่ผ่านเข้ามาทางขาสัญญาณอินพุตทั้งสองขา สามารถทดสอบได้โดยการป้อนสัญญาณที่เหมือนกันเข้าที่ขาอินพุตทั้งสอง ในทางทฤษฎีสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าไม่เป็นศูนย์ การหาค่า CMRR สามารถทำได้ดังรูปที่ 3

$$\begin{aligned} \text{จากรูป } v_{I1} &= v_{CM} + \frac{v_D}{2} \\ v_{I2} &= v_{CM} - \frac{v_D}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } v_D &= v_{I1} - v_{I2} \\ v_{CM} &= \frac{v_{I1} + v_{I2}}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงดันเอาต์พุตหาได้จาก } v_o &= (v_+) \left( 1 + \frac{R_F}{R_3} \right) - v_{I2} \frac{R_F}{R_3} \\ v_o &= v_{I1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 + \frac{R_F}{R_3} \right) - v_{I2} \frac{R_F}{R_3} \\ v_o &= \left( v_{CM} + \frac{v_D}{2} \right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 + \frac{R_F}{R_3} \right) - \left( v_{CM} - \frac{v_D}{2} \right) \frac{R_F}{R_3} \\ v_o &= v_{CM} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 - \frac{R_F R_1}{R_2 R_3} \right) + \frac{v_D}{2} \frac{R_F}{R_3} \left[ 1 + \frac{R_2 (R_3 + R_F)}{R_F (R_1 + R_2)} \right] \end{aligned}$$



จัดรูปสมการใหม่โดยแยกเป็น  $A_d$  คือ Differential Gain และ  $A_{cm}$  คือ Common-Mode Gain จะได้

$$A_d = \frac{v_o}{v_D} = \frac{R_F}{2R_3} \left[ 1 + \frac{R_2 (R_3 + R_F)}{R_F (R_1 + R_2)} \right]$$

$$A_{cm} = \frac{v_o}{v_{CM}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 - \frac{R_F R_1}{R_2 R_3} \right)$$

ถ้ากำหนดให้  $\frac{R_F}{R_2} = \frac{R_3}{R_1}$  จะทำให้ได้  $A_d = \frac{R_F}{R_3}$  และ  $A_{cm} = 0$  ดังนั้น

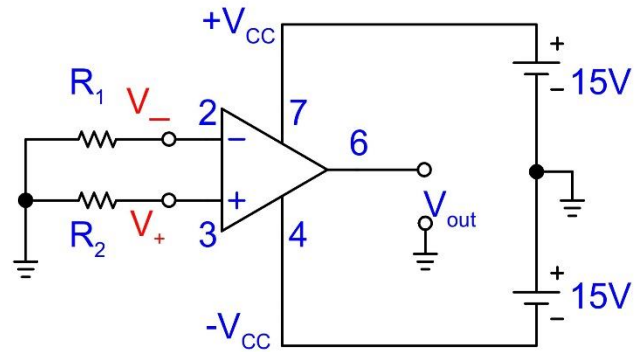
$$CMRR = \frac{\frac{R_F}{2R_3} \left[ 1 + \frac{R_2 (R_3 + R_F)}{R_F (R_1 + R_2)} \right]}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( 1 - \frac{R_F R_1}{R_2 R_3} \right)}$$

เนื่องจาก CMRR ไม่มีหน่วยทางฟิสิกส์ แต่เป็นอัตราส่วนจำนวนเท่า บ่อยครั้งที่เราจะพบสมการอยู่ในรูปลอการิทึมของอัตราส่วนจำนวนเท่า  $20 \log CMRR$

## การทดลอง

### 1. วัดค่ากระแสไบอัสด้านอินพุต

- 1.1 ประกอบวงจรตามรูปที่ 4 ลงบนโปรโตบอร์ดโดยใช้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ที่มีค่าเท่ากันตามที่กำหนดในตารางที่ 1
- 1.2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ขา  $V_+$  และ  $V_-$  เทียบกับกราวด์ พร้อมบันทึกผลลงในตารางที่ 1
- 1.3 เปลี่ยนเบอร์ไอซีออปแอมป์เป็นเบอร์ TL071 ตามตารางที่ 1 และทำการทดลองซ้ำ



LM741

รูปที่ 4

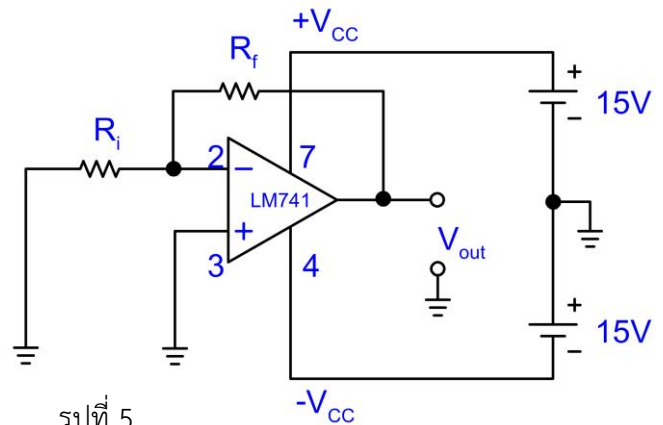
ตารางที่ 1

$R_1, R_2$	LM741		TL071	
	$V_+$	$V_-$	$V_+$	$V_-$
100 k $\Omega$	-4.0 mV	-4.3 mV	-0.0 mV	-0.0 mV
1 M $\Omega$	-40.3 mV	-39.9 mV	-0.0 mV	-0.0 mV
10 M $\Omega$	-394.6 mV	-389.4 mV	-0.7 mV	-0.5 mV

ข้อสังเกต ผลการทดลองได้มาจากผลคูณของความต้านทานกับกระแสไบอัสทางด้านอินพุต ซึ่ง น.ศ. ดูได้จาก Data Sheet ของออปแอมป์

### 2. วัดค่า Input Offset Voltage

- 2.1 ประกอบวงจรตามรูปที่ 5 โดยใช้  $R_f = R_i$  จำนวน 3 ค่า คือ 100 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$  และ 10 M $\Omega$  ตามลำดับ
- 2.2 วัดค่าแรงดันไฟตรง หรือค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับกราวด์บันทึกผลการทดลอง
- 2.3 เปลี่ยนเบอร์ไอซีออปแอมป์เป็น TL071 และวัดค่าแรงดันไฟตรงหรือค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับกราวด์บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 5

### บันทึกผลการทดลอง

เบอร์ LM741

- ครั้งที่ 1 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 100 k $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 4.5 mV
- ครั้งที่ 2 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 1 M $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 56.3 mV
- ครั้งที่ 3 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 10 M $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0.591 V

เบอร์ TL071

- ครั้งที่ 1 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 100 k $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0.9 mV
- ครั้งที่ 2 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 1 M $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 1.0 mV
- ครั้งที่ 3 : ใช้ตัวต้านทานขนาด 10 M $\Omega$  และวัดแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 1.3 mV

### 3. วัดค่า Slew Rate

3.1 ประกอบวงจรตามรูปที่ 6

3.2 ปรับเครื่องกำเนิดสัญญาณให้จ่ายสัญญาณ  $V_i$  ด้วยสี่เหลี่ยม (Square Wave) ดังนี้

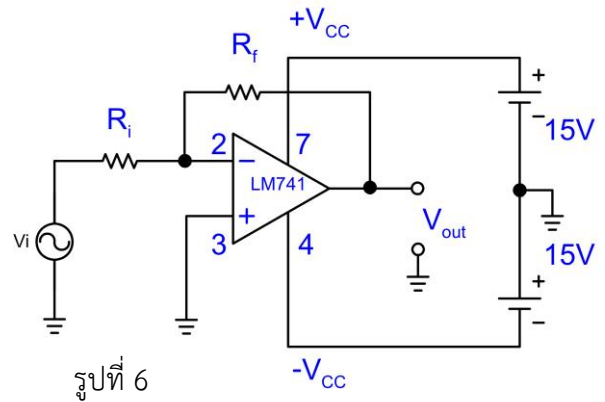
ก) ค่าความถี่ต่ำ (ระดับ 10 Hz ... 90 Hz) โดยเลือกความถี่ที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตไม่ผิดเพี้ยน หรือเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมรูปร่างเหมือนเดิม

ข) ขนาดของแรงดันไม่สูงมาก สามารถอ่านค่าได้อย่างชัดเจน

3.3 ปรับขนาดของสัญญาณอินพุต ( $V_i$ ) ไปจนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าประมาณ 20 V<sub>p-p</sub> (Peak-to-peak)

3.4 ทำการเพิ่มความถี่ขึ้นจนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตผิดเพี้ยนจากสี่เหลี่ยม หรือมี Slope จนกลายเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม ยอดแหลมพอดี

3.5 บันทึกรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตพร้อมบันทึกความสูงและความยาวฐานของสามเหลี่ยม เพื่อนำไปคำนวณค่าสโลว์เรต (dv/dt)



#### บันทึกผลการทดลอง

เบอร์ LM741

ใช้ตัวต้านทานขนาด 100 k $\Omega$

$$\text{ค่า } \Delta v = \frac{9}{28.8} \text{ V}$$

$$\text{ค่า } \Delta t = 28.8 \mu\text{s}$$

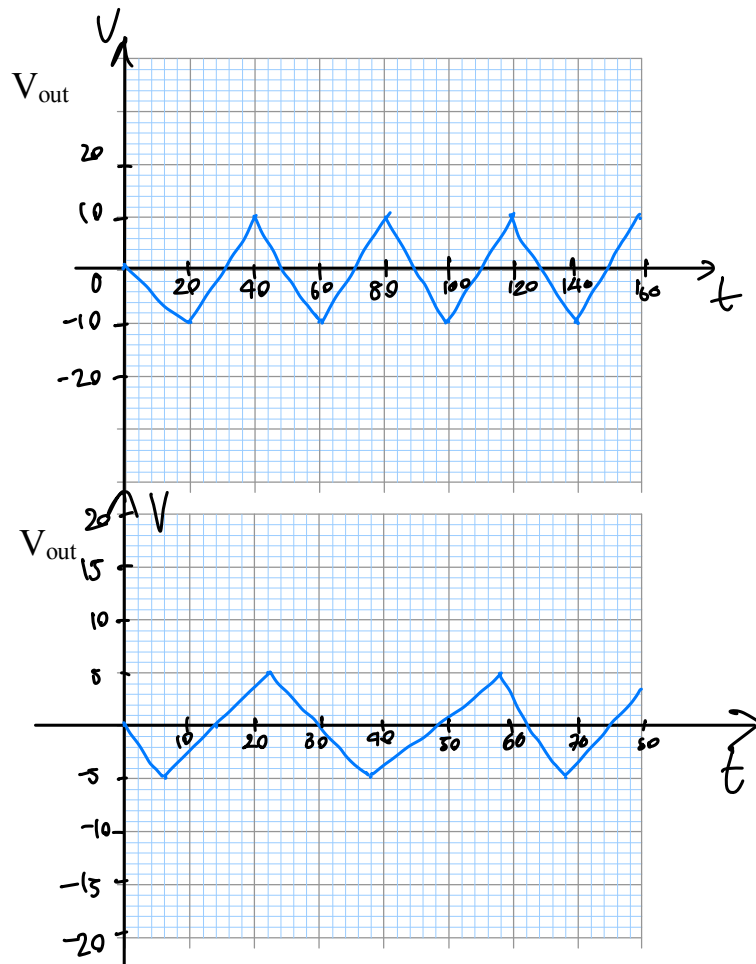
$$\text{ค่า Slew Rate} = 0.313$$

ใช้ตัวต้านทานขนาด 1 M $\Omega$

$$\text{ค่า } \Delta v = \frac{10.20}{83.4} \text{ V}$$

$$\text{ค่า } \Delta t = 83.4 \mu\text{s}$$

$$\text{ค่า Slew Rate} = 0.305$$



ใช้ตัวต้านทานขนาด  $10 \text{ M}\Omega$

ค่า  $\Delta v = \underline{22.4} \text{ V}$

ค่า  $\Delta t = \underline{76.4} \mu\text{s}$

ค่า Slew Rate =  $\underline{0.293}$

เบอร์ TL071

ใช้ตัวต้านทานขนาด  $100 \text{ k}\Omega$

ค่า  $\Delta v = \underline{20.5} \text{ V}$

ค่า  $\Delta t = \underline{4} \mu\text{s}$

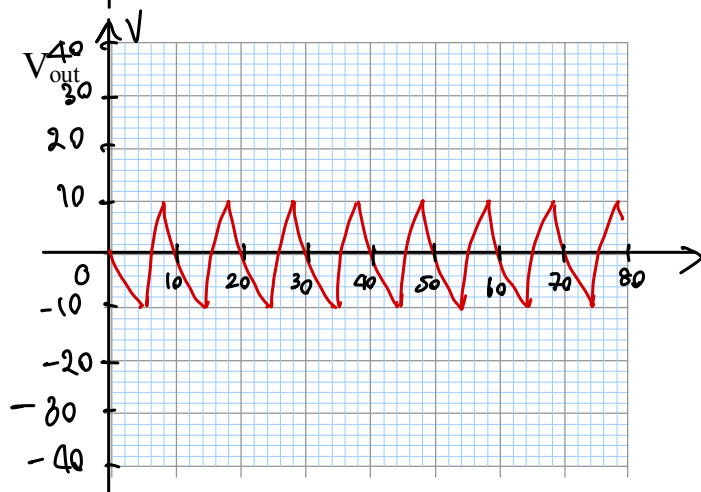
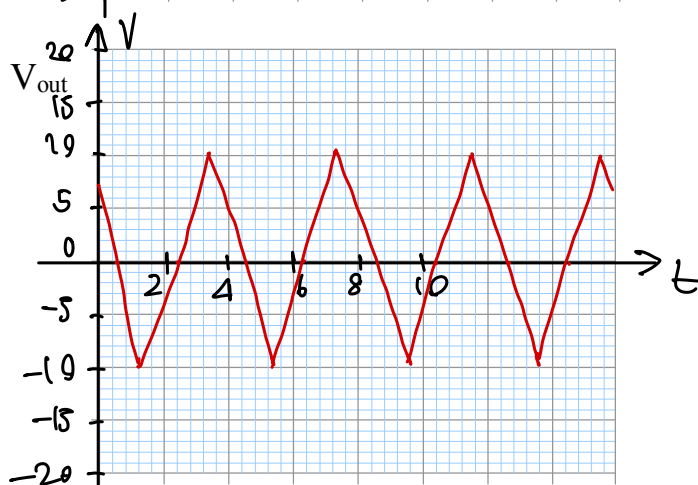
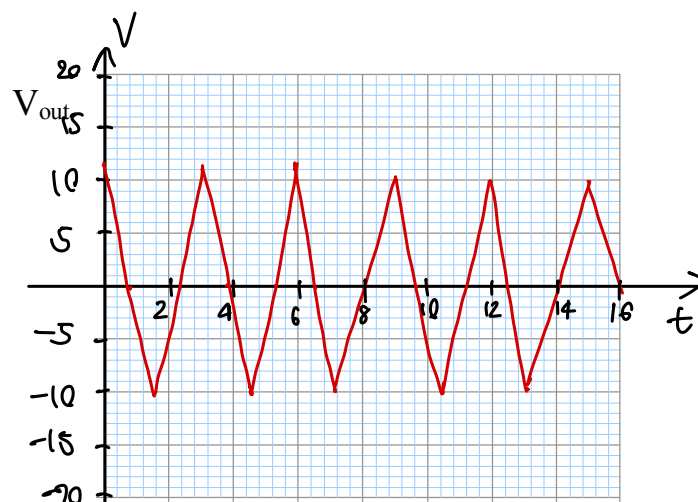
ค่า Slew Rate =  $\underline{5.125}$

ใช้ตัวต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega$

ค่า  $\Delta v = \underline{20} \text{ V}$

ค่า  $\Delta t = \underline{11} \mu\text{s}$

ค่า Slew Rate =  $\underline{1.81} \text{ MV/s}$



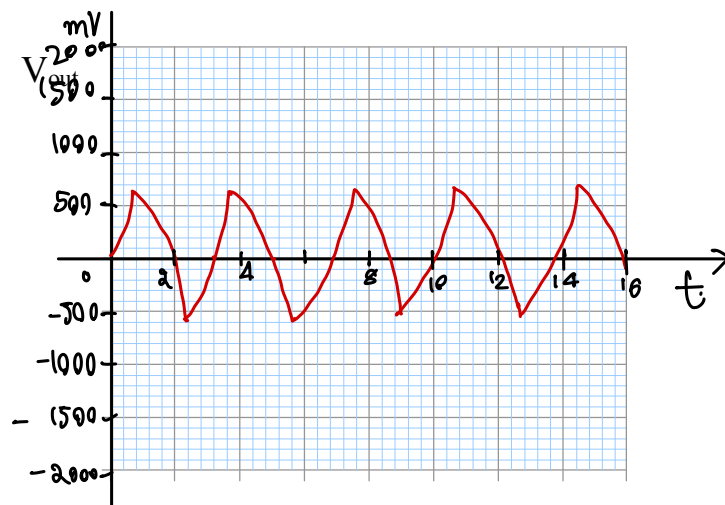


ใช้ตัวต้านทานขนาด  $10\text{ M}\Omega$

$$\text{ค่า } \Delta v = \underline{1.19} \text{ V}$$

$$\text{ค่า } \Delta t = \underline{3.56} \mu\text{s}$$

$$\text{ค่า Slew Rate} = \underline{0.334} \text{ MV/s}$$



### 5. หาผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response)

5.1 ใช้วงจรตามรูปที่ 7

5.2 เลือกค่า  $R_f$  ให้เท่ากับค่า  $R_i$  ในย่าน  $1\text{ M}\Omega \dots 10\text{ M}\Omega$  ( $R_f/R_i = 1$ )

5.3 สัญญาณ  $V_i$  ให้ใช้สัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave) จาก Function Generator ขนาด  $4\text{ V}_{p-p}$

5.4 ให้ตรวจสอบค่า Bandwidth ของ IC ในเอกสาร Data Sheet ด้วยว่ามีค่าสูงสุดเท่าใด

5.5 ทดลองเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ  $V_i$  แต่ไม่ให้เกินค่า Bandwidth ของ IC ในเอกสาร Data Sheet ในระหว่างนี้ให้คอยสังเกตขนาดของสัญญาณเอาต์พุต อัตราส่วนแรงดันจะค่อย ๆ ลดลงจนต่ำกว่าครึ่งหรือเหลือสัก 30% และรูปร่างต้องไม่ผิดเพี้ยน บันทึกผลที่ได้ที่ช่องเติมค่าได้ตารางที่ 3 ที่ช่อง  $f$  [Hz]

5.6 ทดลองวัดค่าขนาดของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต อย่างละเอียดทุกค่าความถี่ (15 ค่า ตามที่ได้จากข้อ 5.5) แต่บันทึกผลลงในตารางที่ 4

5.7 เปลี่ยนเบอร์ไอซีออปแอมป์เป็น TL071 ทำการทดลองซ้ำข้อ 5.1 ถึง 5.6 พล็อตกราฟการตอบสนองทางความถี่จากผลการทดลองของ TL071 และ LM741 (ให้ใช้สีต่างกัน) โดยให้ระบุตำแหน่งที่อัตราส่วนของแรงดัน ( $V_o/V_i$ ) ลดลงเหลือ 70%

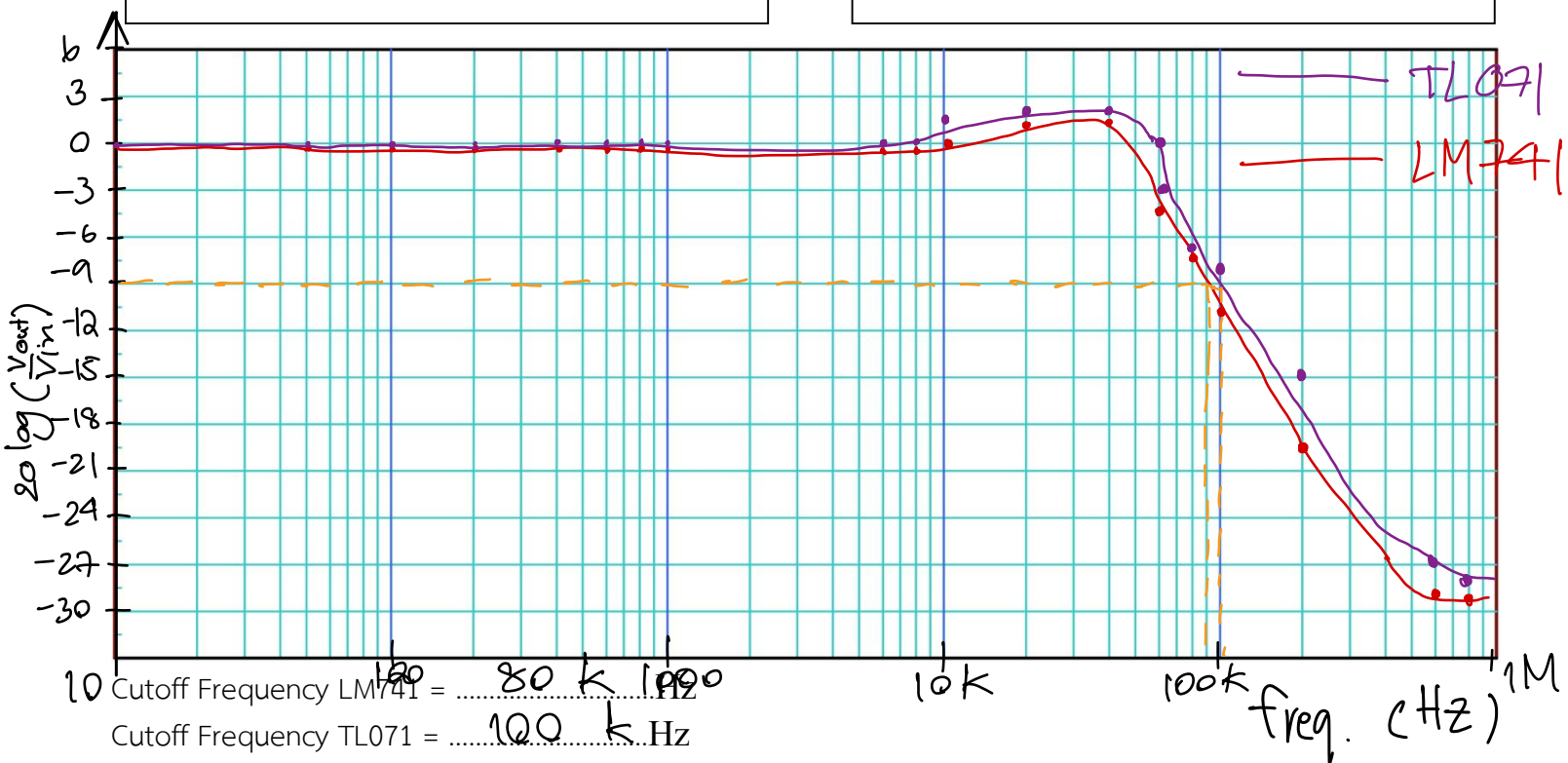


ตารางที่ 3 LM741 (ตัวต้านทานขนาด 10 MΩ)

F [Hz]	V <sub>i</sub> (V)	V <sub>o</sub> (V)	V <sub>o</sub> /V <sub>i</sub>	20log(V <sub>o</sub> /V <sub>i</sub> )
50	4.32	4.08	0.944	-0.501
100	4.32	4.08	0.944	-0.501
200	4.32	4.08	0.944	-0.501
400	4.40	4.16	0.945	-0.491
600	4.40	4.16	0.945	-0.491
800	4.40	4.16	0.945	-0.491
1 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
2 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
4 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
6 k	4.40	4.32	0.982	-0.158
8 k	4.40	4.32	0.982	-0.158
10 k	4.40	4.40	1.000	0.000
20 k	4.40	5.21	1.184	1.467
40 k	4.40	5.28	1.20	1.584
60 k	4.40	2.64	0.6	-4.437
80 k	4.40	1.80	0.364	-8.778
100 k	4.32	1.13	0.262	-11.634
200 k	4.40	0.44	0.10	-20
400 k	4.40	0.208	0.047	-26.558
600 k	4.40	0.194	0.033	-29.630
800 k	4.40	0.152	0.035	-29.119

ตารางที่ 4 TL071 (ตัวต้านทานขนาด 10 MΩ)

F [Hz]	V <sub>i</sub> (V)	V <sub>o</sub> (V)	V <sub>o</sub> /V <sub>i</sub>	20log(V <sub>o</sub> /V <sub>i</sub> )
50	4.24	4.16	0.981	-0.167
100	4.24	4.16	0.981	-0.167
200	4.24	4.16	0.981	-0.167
400	4.24	4.16	0.981	-0.167
600	4.24	4.16	0.981	-0.167
800	4.24	4.16	0.981	-0.167
1 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
2 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
4 k	4.40	4.16	0.945	-0.491
6 k	4.40	4.24	0.964	-0.318
8 k	4.40	4.32	0.981	-0.167
10 k	4.40	4.48	1.018	0.155
20 k	4.40	5.20	1.182	1.452
40 k	4.40	10.2	2.318	7.532
60 k	4.32	4.32	1	0
80 k	4.40	2.4	0.545	-5.272
100 k	4.40	1.76	0.4	-7.959
200 k	4.40	0.76	0.173	-15.239
400 k	4.40	0.376	0.085	-21.412
600 k	4.40	0.264	0.06	-24.437
800 k	4.40	0.20	0.045	-26.938



## ตอนที่ 2. ออปแอมป์ที่มีฟังก์ชันการทำงานแบบพิเศษ (Special Purpose Op-Amp)

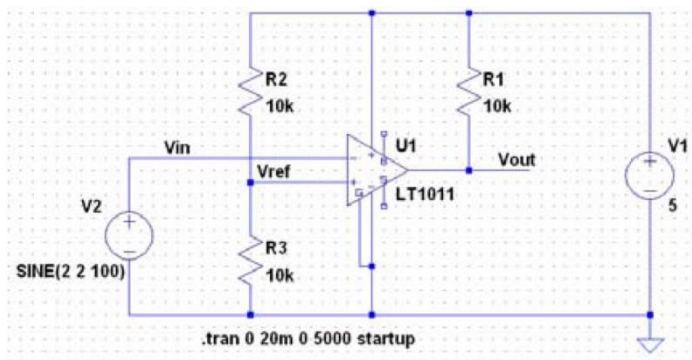
ในปัจจุบัน วงจรรวม (IC) ประเภทออปแอมป์มีการใช้งานในกลุ่มอุตสาหกรรมจำนวนมาก เนื่องจาก IC สามารถออกแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานพิเศษ (Special Purpose) ที่รองรับการทำงานเฉพาะทางที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผู้ที่สนใจหรือวิศวกรผู้ทำหน้าที่ออกแบบวงจรจำเป็นจะต้องหมั่นติดตามข่าวสารในแวดวงอุตสาหกรรมรวมทั้งศึกษาเพิ่มเติมความรู้อยู่เสมอ

ออปแอมป์เบอร์ LM311 หรือ LT1011 เป็นออปแอมป์ที่มีฟังก์ชันการทำงานแบบพิเศษ (Special Purpose) ซึ่งถูกออกแบบมาให้ทำงานเป็นตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ไม่เหมือนกับออปแอมป์เบอร์ LM741 หรือ TL071 ที่ออกแบบมาให้ทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

ดังนั้น การจัดวงจรจะไม่เหมือนทั่ว ๆ ไป ขอให้ศึกษาระมัดระวังและศึกษาคู่มือการใช้งานของ IC ในเอกสาร Data Sheet ควบคู่ไปกับการทดลองจะช่วยให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น

### ก) คุณสมบัติของตัวเปรียบเทียบ (Comparator)

1. ให้นักศึกษาเขียนวงจรในรูปที่ 7 ด้วย LTspice IV โดยกำหนดค่าแหล่งจ่าย  $V_2$  ให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 100 Hz มีขนาด  $2\text{ V}_{p-p}$  และ DC Offset 2 V พร้อมให้นักศึกษาทำการจำลองการทำงานในโหมด Transient และบันทึกผลการทดลองค่าของ  $V_{out}$ ,  $V_{in}$  และ  $V_{ref}$  ที่ได้ลงในกราฟ (ให้เขียนลงในรูปเดียวกันและ **แยกสีให้เห็นความแตกต่าง**)



รูปที่ 7a) วงจร Comparator



รูปที่ 7b) ตั้งค่าแหล่งจ่าย  $V_2$

### ผลการทดลอง

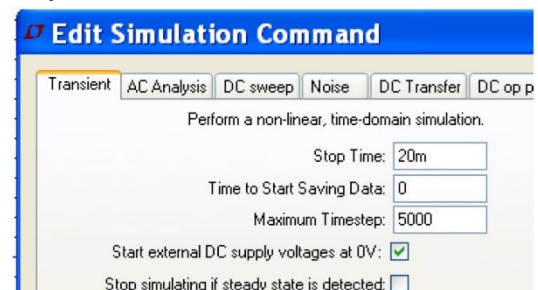
จากวงจรของ LT1011

ขา Inverting Input ต่ออยู่กับสัญญาณ  $V_{in}$

ขา Non-inverting Input ต่ออยู่กับสัญญาณ  $V_{ref}$

### จากกราฟผลการทดลอง

ถ้าระดับสัญญาณ  $V_{in}$  มีค่ามากกว่าสัญญาณ  $V_{ref}$  สัญญาณทางเอาต์พุตมีค่า  $15.533\text{ mV}$



รูปที่ 7c) จำลองใน Transient Mode

เทียบกับค่าลอจิก ..... 0 ..... ถ้าเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล  
ถ้าระดับสัญญาณ  $V_{in}$  มีค่าน้อยกว่าสัญญาณ  $V_{ref}$  สัญญาณทาง  
เอาต์พุตมีค่า ..... 5 V

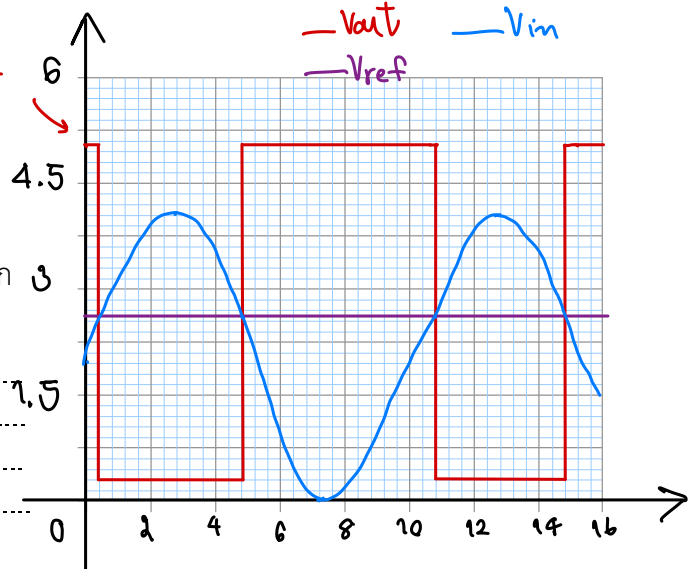
เทียบกับค่าลอจิก ..... 1 ..... ถ้าเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล  
ตัดวงจรไม่ให้  $R_1$  เชื่อมต่อกับขาเอาต์พุตและจำลองการทำงานซ้ำอีก  
ครั้ง เกิดผลอย่างไรกับสัญญาณเอาต์พุต

$$V_{out} = 0.01 \text{ V ตลอด}$$

เพราะเหตุใด ..... เนื่องจาก  $R_3$  เป็นตัวเชื่อม  $V_{out}$  และ  $V_{ref}$

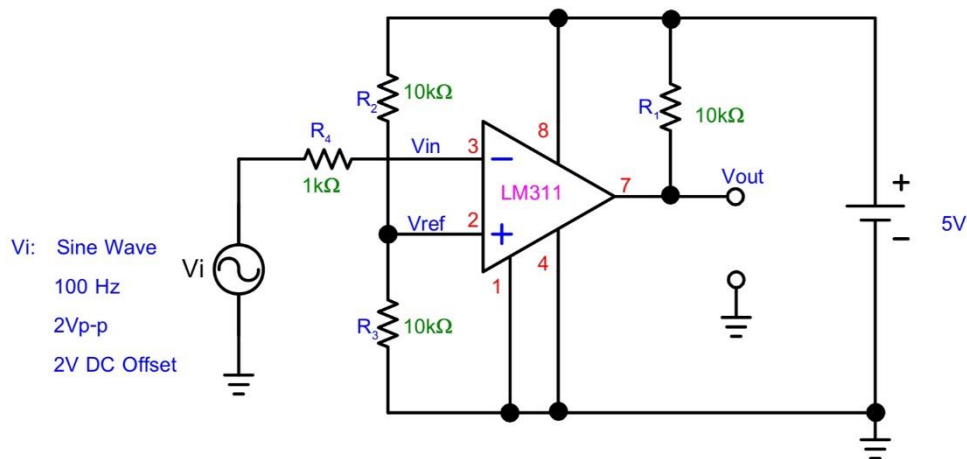
ทำให้ไม่สามารถเสถียรในวงจร  $V_{out}$  แต่ที่  $V_{out} = 0.01$

จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ออกมาที่ Output



2. ทดสอบวงจรจริงของวงจรเปรียบเทียบ ด้วยไอซีเบอร์ LM311

ต้องจรรยาบรรณรูปที่ 8 ให้ใช้ไอซี Comparator เบอร์ LM311 ของบริษัท National Semiconductor ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเคียง  
กับไอซีเบอร์ LT1011 ของบริษัท Linear Technology ที่เคยจำลองใน LTspice IV



รูปที่ 8

### ผลการทดลอง

จากวงจรของ LM311

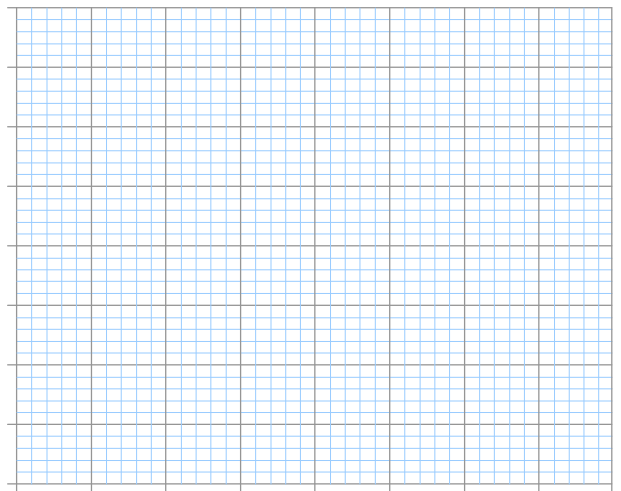
ขา Inverting Input ต่ออยู่กับสัญญาณ .....

ขา Non-inverting Input ต่ออยู่กับสัญญาณ .....

### จากกราฟผลการทดลอง

ถ้าระดับสัญญาณ  $V_{in}$  มีค่ามากกว่าสัญญาณ  $V_{ref}$  สัญญาณทาง  
เอาต์พุตมีค่า ..... V

เทียบกับค่าลอจิก ..... ถ้าเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล

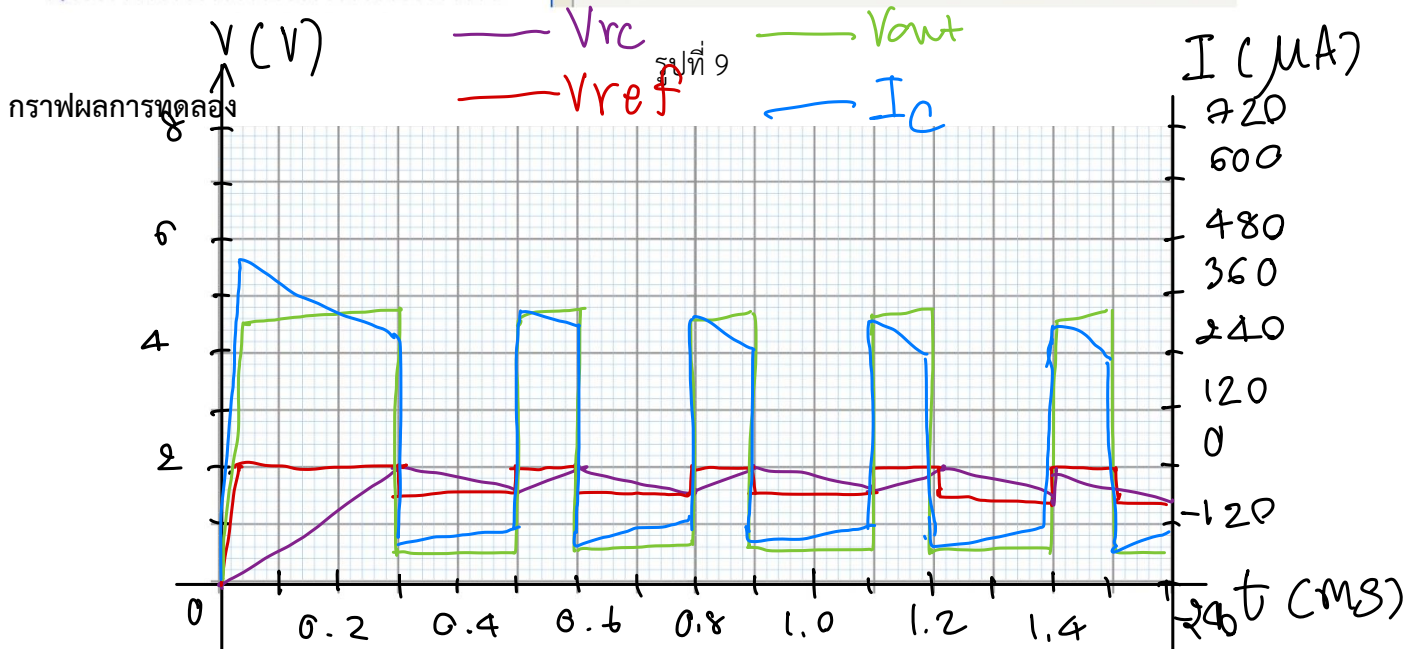
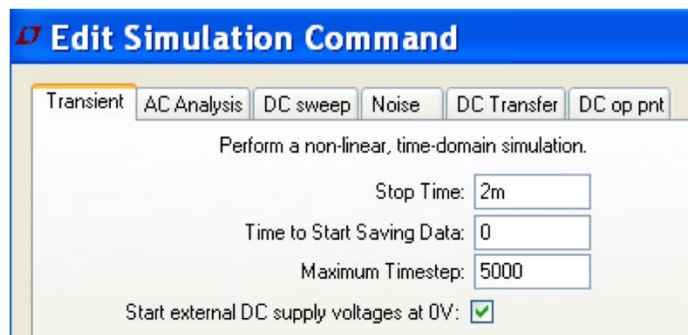
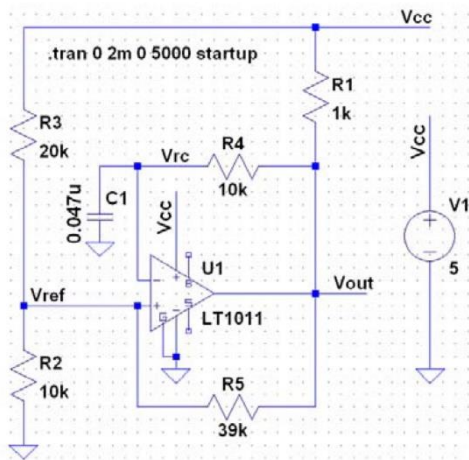


ถ้าระดับสัญญาณ  $V_{in}$  มีค่าน้อยกว่าสัญญาณ  $V_{ref}$  สัญญาณทางเอาต์พุตมีค่า ..... V  
เทียบเท่ากับค่าลอจิก ..... ถ้าเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล

ตัดวงจรไม่ให้  $R_1$  เชื่อมต่อกับขาเอาต์พุตและจำลองการทำงานซ้ำอีกครั้ง เกิดผลอย่างไรกับสัญญาณเอาต์พุต  
ให้นักศึกษาเปิดเอกสาร Data Sheet ของไอซี LM311 หน้า 16 และให้ใช้ความรู้ทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำการ  
วิเคราะห์เหตุผลที่ผู้ผลิตไอซีได้ออกแบบให้วงจรทางด้านเอาต์พุต (ขา 7) ต้องมีลักษณะเช่นนั้น

### ข) การประยุกต์ใช้ Comparator เพื่อสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse)

3. ให้นักศึกษาเขียนวงจรในรูปที่ 9 ด้วย LTSpice IV และจำลองการทำงานในโหมด Transient พร้อมบันทึกผลการทดลอง  
ค่าของ  $V_{out}$ ,  $V_{RC}$ ,  $V_{ref}$  และกระแส  $I_{C1}$  ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C1$  ที่ได้ลงในกราฟผลการทดลอง  
(ให้เขียนลงในรูปเดียวกันและแยกสีให้เห็นความแตกต่าง)





จากกราฟให้นักศึกษาทำการสังเกตและศึกษาพฤติกรรมของความสัมพันธ์กันระหว่าง  $V_{out}$ ,  $V_{RC}$ ,  $V_{ref}$  และกระแส  $I_{C1}$  ให้เข้าใจ แล้วให้ใช้ความรู้ด้านวงจรไฟฟ้า อธิบายการทำงานของวงจร (หรือสิ่งที่เกิดขึ้นในวงจร) ในช่วงเวลาต่าง ๆ (ช่วงเวลา โดยประมาณ ตามการเปลี่ยนค่าของแรงดัน  $V_{out}$ ) ดังต่อไปนี้

ช่วงเวลา  $t = 0 \text{ ms}$  ถึง  $t = 0.3 \text{ ms}$  ช่วงนี้  $V_{ref} > V_{RC}$   $\Rightarrow$  Output Signal เป็น +

ช่วงเวลา  $t = 0.3 \text{ ms}$  ถึง  $t = 0.5 \text{ ms}$  ช่วงนี้  $V_{ref} < V_{RC}$   $\Rightarrow$  Output Signal เป็น -

ช่วงเวลา  $t = 0.5 \text{ ms}$  ถึง  $t = 0.6 \text{ ms}$  ช่วงนี้  $V_{ref} > V_{RC}$   $\Rightarrow$  Output Signal เป็น +

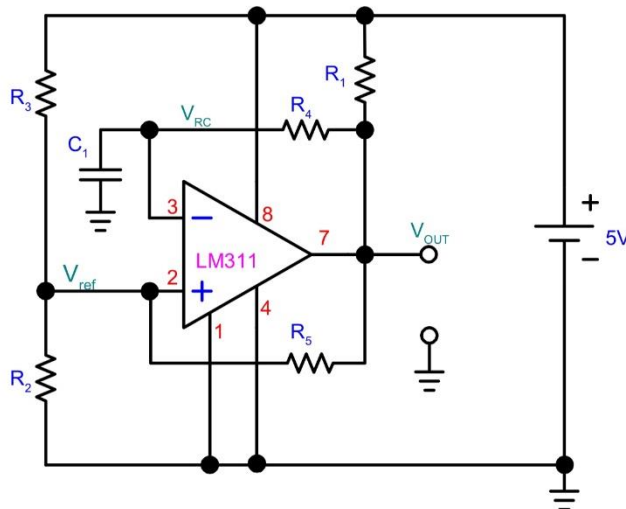
ช่วงเวลา  $t = 0.6 \text{ ms}$  ถึง  $t = 0.8 \text{ ms}$  ช่วงนี้  $V_{ref} < V_{RC}$   $\Rightarrow$  Output Signal เป็น -

เพราะเหตุใดความกว้างของสัญญาณพัลส์เอาต์พุตในช่วงเวลา  $t = 0$  ถึง  $t = 0.3 \text{ ms}$  มีค่าไม่เท่ากับช่วงเวลาอื่น

เป็นช่วงที่ C เริ่มเก็บประจุ ซึ่งใช้เวลาในการชาร์จประจุมากกว่าช่วงอื่น เนื่องจากเริ่มที่ 0V

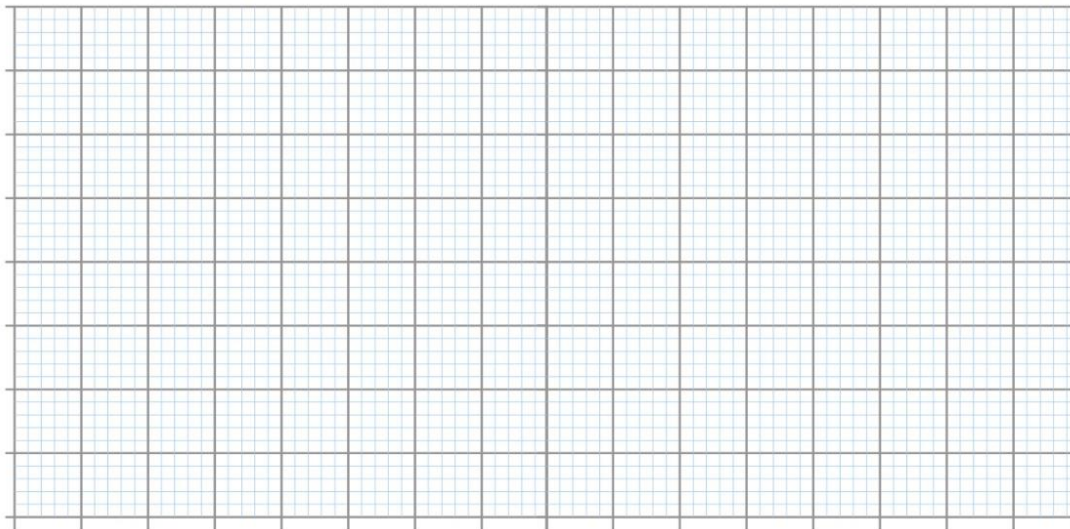
4. ให้นักศึกษาทดสอบวงจรจริงของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse) ด้วยไอซีเบอร์ LM311 โดยทำการต่อวงจรทดลองตามรูปที่ 10 ให้ใช้ไอซี Comparator เบอร์ LM311 บันทึกการเปลี่ยนแปลง  $V_{out}$ ,  $V_{RC}$ ,  $V_{ref}$  ลงในกราฟ

$R_1 = 1\text{k}\Omega$   
 $R_2 = 10\text{k}\Omega$   
 $R_3 = 20\text{k}\Omega$   
 $R_4 = 10\text{k}\Omega$   
 $R_5 = 39\text{k}\Omega$   
 $C_1 = 0.047\mu\text{F}$



รูปที่ 10

กราฟผลการทดลอง



จากกราฟผลการทดลอง สัญญาณพัลส์  $V_{out}$  มี

ค่าความกว้างคาบ (Period) = ..... ms

ค่า Duty Cycle (ค่า % ของช่วงที่เป็น '1' ต่อเวลาทั้งคาบ) = ..... %

จากวงจรในรูปที่ 6 ถ้าต้องการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างคาบของรูปพัลส์  $V_{out}$  จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ตัวใด

เพราะเหตุใด.....

ถ้าต้องการปรับเปลี่ยนค่า Duty Cycle ของรูปพัลส์  $V_{out}$  จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ตัวใด

เพราะเหตุใด.....

..... ลายเซ็นอาจารย์ผู้ควบคุม

คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้เปรียบเทียบ และวิเคราะห์สาเหตุวิจารณ์ผลการทดลอง ค่าจากผลการทดลองและค่าที่ได้จาก Data Sheet ในด้านคุณสมบัติของ Input Bias Current, Input Offset Voltage, Slew Rate และ Bandwidth

.....

.....

.....

.....

.....

- 2 ให้นักศึกษาสรุปความรู้ที่ได้จากการทดลองนี้

.....

.....

.....

.....

.....

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

.....

.....

.....

.....