

## การทดลองที่ 7 วงจรขยายทรานซิสเตอร์พื้นฐาน

วัตถุประสงค์ เพื่อให้ผู้เรียนมีทักษะในการวัดคุณสมบัติและวิเคราะห์วงจขยายไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบพื้นฐาน

### ทฤษฎี

#### 1) วงจรเสมือนของไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Transistor equivalent circuit)

เป็นวงจรเสมือนแทนทรานซิสเตอร์สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติในการขยายสัญญาณของวงจขยายไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจเสมือนนี้จะเปลี่ยนแปลงตามการไบอัส วงจรเสมือนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแบบที่เรียกว่า ไฮบริดพาย (Hybrid-pi) ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆดังในรูปที่ 1

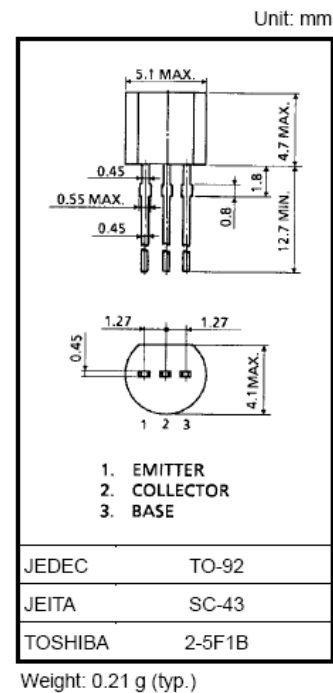
## 2SC1815

Audio Frequency General Purpose Amplifier Applications  
Driver Stage Amplifier Applications

- High voltage and high current:  $V_{CE0} = 50 \text{ V (min)}$ ,  
 $I_C = 150 \text{ mA (max)}$
- Excellent  $h_{FE}$  linearity:  $h_{FE} (\text{2}) = 100 \text{ (typ)}$   
at  $V_{CE} = 6 \text{ V}$ ,  $I_C = 150 \text{ mA}$   
:  $h_{FE} (I_C = 0.1 \text{ mA})/h_{FE} (I_C = 2 \text{ mA})$   
= 0.95 (typ.)
- Low noise:  $NF = 1 \text{ dB (typ)}$  at  $f = 1 \text{ kHz}$
- Complementary to 2SA1015 (O, Y, GR class)

#### Maximum Ratings ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

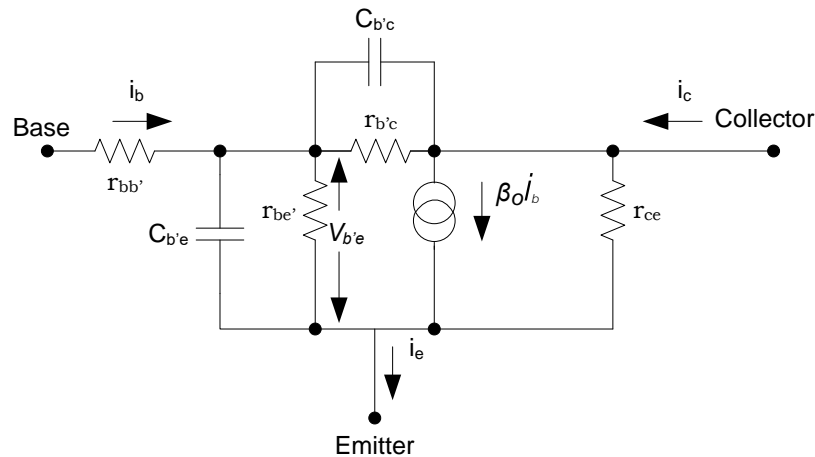
Characteristics	Symbol	Rating	Unit
Collector-base voltage	$V_{CB0}$	60	V
Collector-emitter voltage	$V_{CE0}$	50	V
Emitter-base voltage	$V_{EB0}$	5	V
Collector current	$I_C$	150	mA
Base current	$I_B$	50	mA
Collector power dissipation	$P_C$	400	mW
Junction temperature	$T_j$	125	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range	$T_{stg}$	-55~125	$^\circ\text{C}$



### Electrical Characteristics (Ta = 25°C)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Collector cut-off current	$I_{CBO}$	$V_{CB} = 60 \text{ V}, I_E = 0$	—	—	0.1	$\mu\text{A}$
Emitter cut-off current	$I_{EBO}$	$V_{EB} = 5 \text{ V}, I_C = 0$	—	—	0.1	$\mu\text{A}$
DC current gain	$h_{FE} (1)$ (Note)	$V_{CE} = 6 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}$	70	—	700	
	$h_{FE} (2)$	$V_{CE} = 6 \text{ V}, I_C = 150 \text{ mA}$	25	100	—	
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE} (\text{sat})$	$I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 10 \text{ mA}$	—	0.1	0.25	V
Base-emitter saturation voltage	$V_{BE} (\text{sat})$	$I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 10 \text{ mA}$	—	—	1.0	V
Transition frequency	$f_T$	$V_{CE} = 10 \text{ V}, I_C = 1 \text{ mA}$	80	—	—	MHz
Collector output capacitance	$C_{ob}$	$V_{CB} = 10 \text{ V}, I_E = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	2.0	3.5	pF
Base intrinsic resistance	$r_{bb'}$	$V_{CE} = 10 \text{ V}, I_E = -1 \text{ mA}$ $f = 30 \text{ MHz}$	—	50	—	$\Omega$
Noise figure	NF	$V_{CE} = 6 \text{ V}, I_C = 0.1 \text{ mA}$ $f = 1 \text{ kHz}, R_G = 10 \text{ k}\Omega$	—	1.0	10	dB

Note:  $h_{FE}$  classification O: 70~140, Y: 120~240, GR: 200~400, BL: 350~700



รูปที่ 1 วงจรเสมือนไฮบริดพาย

ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรไฮบริดพาย จำเป็นต้องทราบข้อมูลดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณหาค่าของ  $I_{CQ}$  จากวงจรขยาย  $I_{CQ}$  คือค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ในทางปฏิบัติอาจวัดค่า  $I_{CQ}$  จากวงจรถ่ายโดยตรงก็ได้ ค่า  $I_{CQ}$  นี้จะนำไปใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์  $r_{be'}$ ,  $g_m$  และ  $C$  ต่างๆ
- 2) เปิดคู่มือทรานซิสเตอร์ (Transistor Datasheet) เพื่อทราบค่าต่างๆต่อไปนี้

- $\beta_o$  หรือ  $h_{FE}$ : ค่าอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ต่ำหรือดีซีในกรณีที่มี Datasheet บอกค่า typ. มากก็ให้ใช้ค่า typ. แต่ถ้า Datasheet บอกค่ามาในลักษณะเป็นช่วงควรใช้ค่าต่ำสุด
- $F_T$ : ความถี่ที่  $\beta$  ต่ำมีค่าเท่ากับ 1
- $r_{bb'}$ : ค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำส่วนที่เป็นเบส

- $C_{ob}$  และ  $V_{CB}$  ที่ใช้ในการวัดค่า  $C_{ob}$ ,  $C_{ob}$  คือค่า  $C$  ของรอยต่อ B-C

จากข้อมูลข้างต้นนี้จะสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรถ่ายไฮบริดพายทั้งหมดได้ดังตารางที่ 1

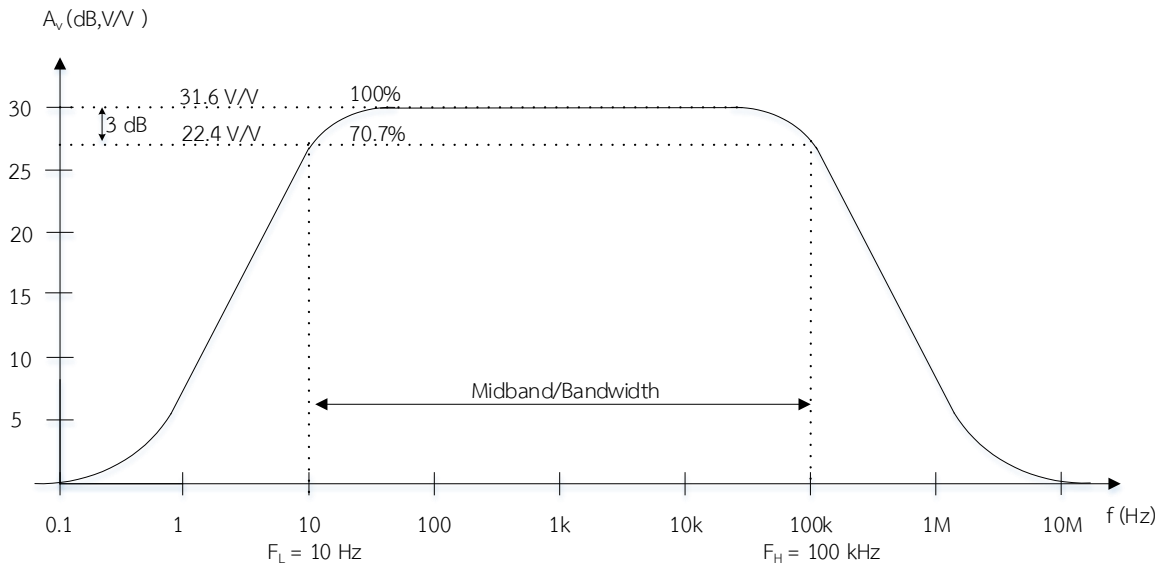
ตารางที่ 1 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรถ่ายไฮบริดพาย

พารามิเตอร์	ความหมาย	หาได้โดย
$r_{bb'}$	ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เป็นเบส	จาก Datasheet ถ้า Datasheet ไม่ระบุค่า $r_{bb'}$ มาให้สามารถประมาณค่า $r_{bb'} \approx 100$
$r_{b'e}$	ความต้านทานของรอยต่อ B-E	$r_{b'e} = 0.026 \beta_o / I_{CQ} \Omega$
$g_m$	ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์	$g_m = 0.026 \beta_o / r_{b'e}$
$r_{ce}$	อิมพีแดนซ์ของแหล่งกระจายกระแส $i_c$	$r_{ce}$ โดยปรกติมีค่ามากกว่า $200 \text{ k}\Omega$ สามารถที่จะตัดออกจากวงจรได้
$r_{b'c}$	ความต้านทานของรอยต่อ B-C	$r_{b'c}$ โดยปรกติมีค่ามากกว่า $1 \text{ M}\Omega$ สามารถที่จะตัดทิ้งออกจากวงจรได้
$C_{b'c}$	ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ B-C	จาก Datasheet โดยจะบอกค่า $C_{ob}$ และ $V_{CB}$ ที่ใช้วัดค่า $C_{ob}$ ค่าของ $C_{b'c}$ จะมีค่าประมาณ $\approx C_{ob} [V_{CB} \text{ ที่ใช้วัด } C_{ob} / V_{CB} \text{ ของวงจร}]^3$
$C_{b'e}$	ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ B-E	$C_{b'e} \approx g_m / 2\pi f_T - C_{b'c}$

จากกล่าวมานี้ ค่าของ  $r_{ce}$  และ  $r_{b'c}$  สามารถที่จะตัดออกได้ (สำหรับการวิเคราะห์ห้วงจรอย่างละเอียดหรือเมื่อ  $I_{CQ}$  มีค่าต่ำมากๆเช่นวงจรภายใน IC อาจต้องนำค่า  $r_{ce}$  และ  $r_{b'c}$  มารวมด้วย)

ในกรณีที่วงจรถ่ายยบายที่ใช้งานที่ความถี่ต่ำก็ยังสามารถตัดค่า  $C$  ทั้งหมดออกได้  $C_{b'e}$  และ  $C_{b'c}$  นี้จะมีผลต่อวงจรมือความถี่ของสัญญาณมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ High Frequency Cutoff หรือมีผลต่อความเร็วในการสวิตซ์ของทรานซิสเตอร์นั้นๆ

2) การตอบสนองความถี่ของวงจรขยาย (Frequency Response)



รูปที่ 2 ตัวอย่างการตอบสนองความถี่ของวงจร

ที่ความถี่ปานกลาง (Midband) วงจรจะมีอัตราขยายสูงที่สุดซึ่งจะเท่ากับ  $A_{v_{mid}}$  : Midband Gain เมื่อสัญญาณมีความถี่ต่ำลงอัตราขยายของวงจรก็จะมีค่าลดลงเนื่องจาก C ทำหน้าที่คัปปลิ่ง (Coupling) และบายพาส (Bypass) มีค่าอิมพีแดนซ์มากขึ้น จนถึงที่ความถี่  $F_L$  อัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 70.7% ของ  $A_{v_{mid}}$  หรือลดลงจาก  $A_{v_{mid}}$  มา 3 dB ความถี่  $F_L$  นี้เรียกว่าจุดคutoffความถี่ต่ำ (Low Frequency Cutoff) และในทำนองเดียวกันเมื่อความถี่ของสัญญาณสูงขึ้น C ของรอยต่อภายในตัวทรานซิสเตอร์ และ Stray capacitance จะทำให้อัตราการขยายลดลงเช่นเดียวกันที่ความถี่  $F_H$  นี้เรียกว่าจุดคutoffความถี่สูง (High Frequency Cutoff) ในวงจรขยายทุกวงจรจะมีจุดคutoffความถี่สูงเสมอ ส่วนจุดคutoffที่ความถี่ต่ำถ้าเป็นวงจร Direct Coupling (ไม่มี C) วงจรจะสามารถตอบสนองความถี่ต่ำมากๆ ได้จนถึงกระแสตรง (0 Hz)

ในวงจรขยายมักประกอบด้วย C มากกว่า 1 ตัว ในการวิเคราะห์หาค่าความถี่คutoffจะทำได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาค่าประมาณของความถี่คutoffได้โดยการแยกคิดผลที่เกิดจาก C แต่ละตัวโดยอิสระ ดังต่อไปนี้

**จุดคutoffความถี่ต่ำ**

คิดผลที่เกิดจาก C แต่ละตัวโดยอิสระโดยในขณะที่คิดผลของ C ตัวใด ทำให้การลัดวงจรของ C ที่ทำให้เกิดจุดคutoffความถี่ต่ำในวงจรนั้นที่เหลือทุกตัว และเปิดวงจร C ที่ทำให้เกิดจุดคutoffความถี่สูง ค่าคutoffความถี่ต่ำของวงจรจะมีค่าเป็น

$$F_{L \text{ วงจร}} \approx F_{L(C1)} + F_{L(C2)} + F_{L(C3)} + \dots \dots \dots (1)$$

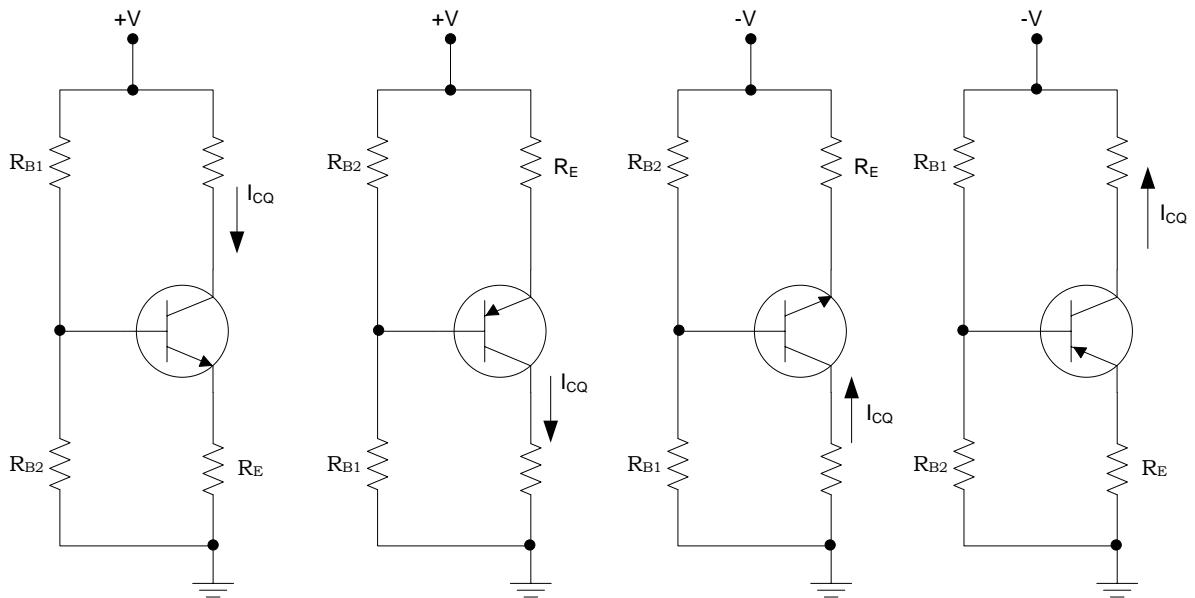
**จุดคัทออฟความถี่สูง**

คิดผลของ C แต่ละตัว โดยขณะที่คิดผลของ C ตัวใด ให้เปิดวงจรของ C ที่ทำให้เกิดจุดคัทออฟความถี่สูง ใน วงจรนั้นเหลือทุกตัวและลัดวงจร C ที่ทำให้เกิด จุดคัทออฟความถี่ต่ำทุกตัว ค่าคัทออฟความถี่สูงของวงจรมีค่าเป็น

$$(F_{H \text{ วงจร}})^{-1} \approx F_{H(C1)}^{-1} + F_{H(C2)}^{-1} + F_{H(C3)}^{-1} + \dots \dots \dots (2)$$

**3) การคำนวณหาค่ากระแสไบอัส  $I_{CQ}$**

ในวงจรขยายพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไม่ว่าจะเป็นแบบคอมมอนเอมิเตอร์จะมีลักษณะไบอัสดังในรูปที่ 3 ในการ คำนวณค่ากระแสไบอัส  $I_{CQ}$  ให้เปิดวงจร C ทุกตัวในวงจร แล้วใช้ KVL โดยให้มี  $V_{BE}$  อยู่ใน Loop ก็จะสามารถแก้สมการหา ค่าของ  $I_{CQ}$  ได้ ค่ากระแสไบอัส  $I_{CQ}$  ของวงจรในรูปที่ 3 จะเป็นดังสมการที่ 3



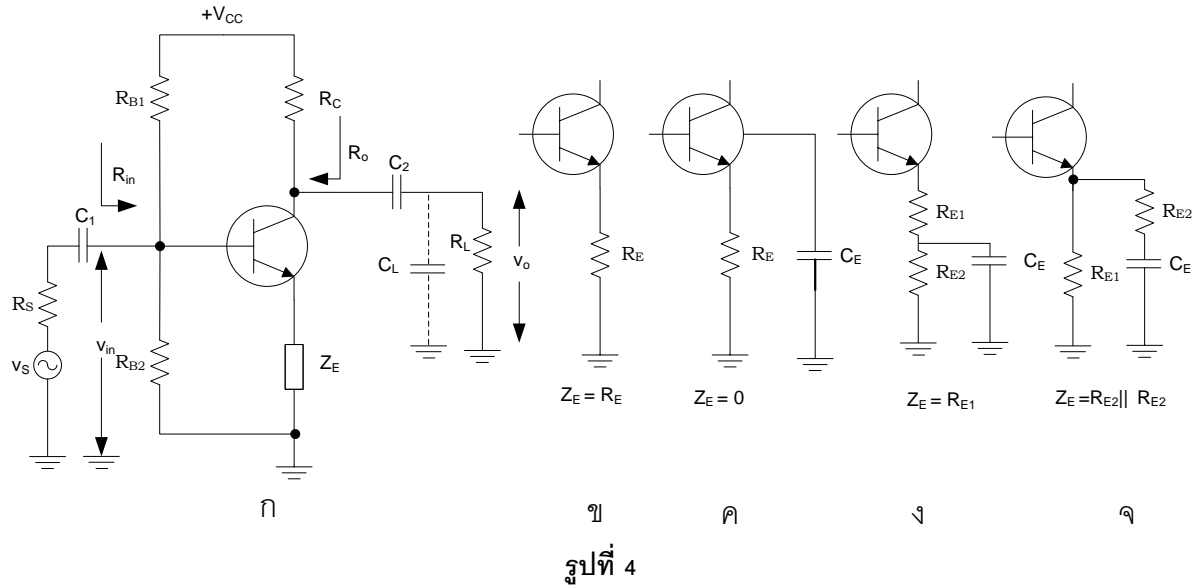
รูปที่ 3

$$I_{CQ} = \frac{V_{BB} - 0.6}{\frac{R_{BB}}{\beta_o} + R_E} \dots \dots \dots (3)$$

โดย  $V_{BB} = \frac{|V| R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, R_{BB} = R_{B1} // R_{B2}$

4) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter)

เป็นแบบที่ถูกรู้ไปใช้มากที่สุด เนื่องจากมีอัตราขยายกำลังมากที่สุด สัญญาณอินพุตจะป้อนเข้าที่เบส และ สัญญาณเอาต์พุตจะนำออกมาที่คอลเลคเตอร์ สัญญาณที่เอาต์พุตกลับเฟสกับอินพุต คุณสมบัติในการขยายสัญญาณ เป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 4

$$|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{\beta_o Z_c}{(r_{bb'} + r_{b'e}) + (\beta_o + 1)R_E} \quad , \quad Z_c = R_c // R_L \dots \dots \dots (4)$$

$$R_o = R_c \dots \dots \dots (5)$$

$$R_{in} = R_{BB} // [r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1)Z_E] \dots \dots \dots (6)$$

ค่าคัทออฟความถี่ต่ำ

$$F_{L(C1)} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_s + R_{in})} \dots \dots \dots (7) \quad F_{L(C2)} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_s + R_{in})} \dots \dots \dots (8)$$

$$F_{L(C_E)} = \frac{1}{2\pi C_E R_{FL}} \text{ โดยค่าของ } R_{FL} \text{ เป็นดังนี้} \dots \dots \dots (9a)$$

$$\text{วงจรในรูปที่ 4ค } R_{FL} = R_E // \left[ \frac{r_{bb'} + r_{b'e} + (R_s // R_{BB})}{\beta_o + 1} \right] \dots \dots \dots (9a)$$

$$\text{วงจรในรูปที่ 4ง } R_{FL} = R_{E2} // \left[ R_{E1} + \frac{r_{bb'} + r_{b'e} + (R_s // R_{BB})}{\beta_o + 1} \right] \dots \dots \dots (9b)$$

$$\text{วงจรในรูปที่ 4จ } R_{FL} = R_{E2} + \left[ R_{E1} // \frac{r_{bb'} + r_{b'e} + (R_s // R_{BB})}{\beta_o + 1} \right] \dots \dots \dots (9c)$$

ซึ่งจะได้ค่าความถี่คutoffความถี่ต่ำของวงจรเป็น

$$F_{L\text{วงจร}} \approx F_{L(C1)} + F_{L(C2)} + F_{L(C3)} \dots\dots\dots(10)$$

**ค่าคutoffความถี่สูง**

$$F_{H1} \approx 1/(2\pi R_{H1} C_1) \dots\dots\dots(11a)$$

โดย  $R_{H1} = [r_{be} + (\beta_o + 1)Z_E] / [r_{bb'} + R_s // R_{BB}] \dots\dots\dots(11b)$

$$C_1 \approx K_H C_{b'e} + C_{b'c} (1 + K_H q_m Z_c) \dots\dots\dots(11c)$$

$$K_H = r_{be} / (r_{be} + (\beta_o + 1)Z_E) \dots\dots\dots(11d)$$

$$F_{Ho} \approx 1/2\pi Z_c C_o \dots\dots\dots(12a)$$

$$C_o = C_{b'e} (1 + 1/A_{v\text{mid}}) + C_L \dots\dots\dots(12b)$$

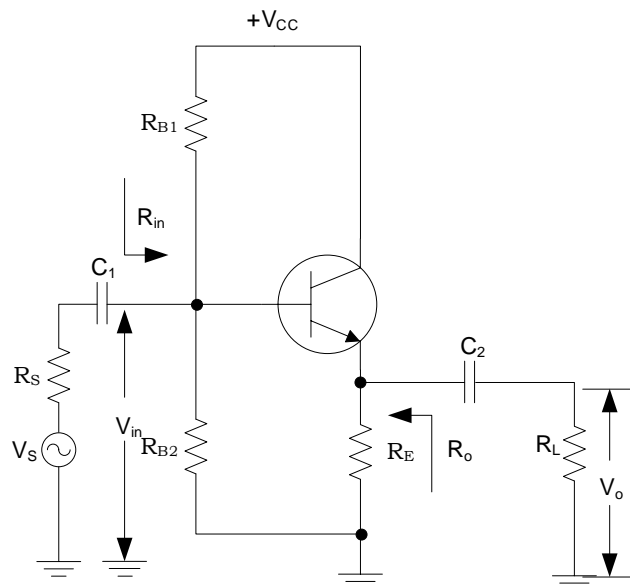
$A_{v\text{mid}}$  หรือโดยทั่วไปเขียนว่า  $A_v$  : ค่าอัตราขยายแรงดันที่ mid band (สมการ 4)

$C_L$  : Loading Capacitance

ซึ่งจะได้ค่าคutoffความถี่สูงเป็น

$$(F_{H\text{วงจร}})^{-1} = (F_{H1})^{-1} + (F_{Ho})^{-1} \dots\dots\dots(13)$$

**5) วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม (Common Collector หรือ Emitter Follower)**



$$|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{\beta_o Z_c}{r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1)Z_E} \approx 1.0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$Z_E = R_E // R_L$$

$$R_{in} = R_{BB} // [r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1)Z_E] \quad \dots\dots\dots(15)$$

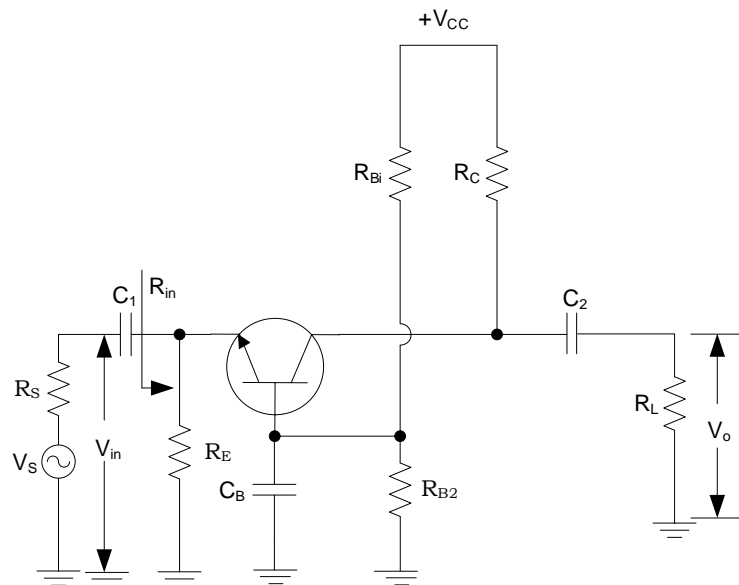
$$R_o = R_E // \left[ \frac{r_{bb'} + r_{b'e} + R_S // R_{BB}}{\beta_o + 1} \right] \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$F_{L(c1)} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_S + R_{in})} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$F_{L(c2)} = \frac{1}{2\pi C_2 R_L} \quad \dots\dots\dots(18)$$

มีค่าอัตราขยายแรงดันประมาณ 1 (0.9...) ศักย์ต่ำที่เอาท์พุทที่ขาอีมิสเตอร์ มีเฟสเหมือนกับที่อินพุทที่เบส เป็นวงจรขยายที่มีค่าเอาท์พุทริซีสแตนซ์ต่ำสุด ค่าคัทออฟความถี่สูงมีค่าประมาณเท่ากับ  $F_T$  ของทรานซิสเตอร์ในวงจร

6) วงจรขยายเบสร่วม (Common Base)



$$|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{\beta_o Z_c}{r_{bb'} + r_{b'e}} \quad , \quad Z_c = R_C // R_L \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$R_{in} = R_E // \left[ \frac{r_{bb'} + r_{b'e}}{\beta_o + 1} \right] \approx \frac{r_{bb'} + r_{b'e}}{\beta_o + 1} \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$R_o = R_C \quad \dots\dots\dots(21)$$



$$F_{L(C_1)} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_S + R_{in})} \dots\dots\dots(22a)$$

$$F_{L(C_2)} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_C + R_L)} \dots\dots\dots(22b)$$

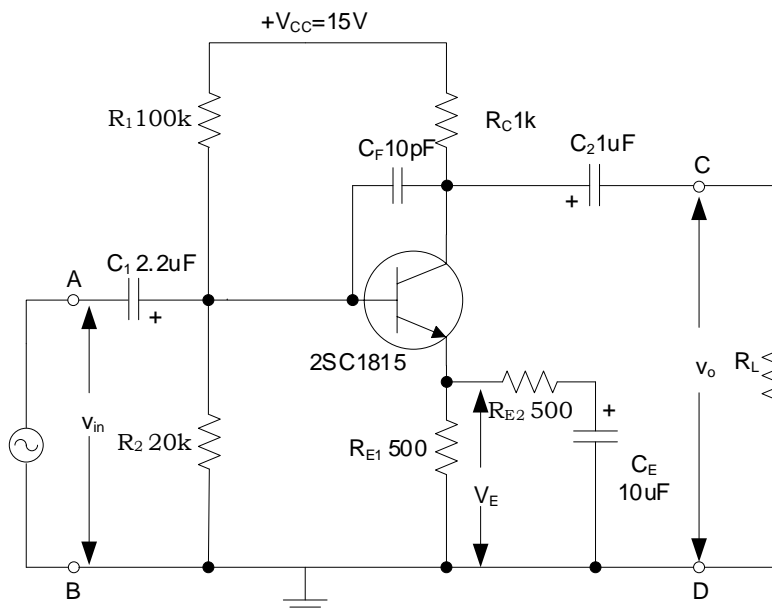
$$F_{L(C_B)} = \frac{1}{2\pi C_B R_{FL}} \dots\dots\dots(22c)$$

$$R_{FL} = R_{BB} // [r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1)(R_E // R_S)] \dots\dots\dots(22d)$$

เป็นวงจรที่ไม่นิยมนำมาใช้ทางด้านความถี่เนื่องจากมีอินพุทรีซิสแตนซ์ต่ำไม่เหมาะกับการใช้งานวงจขยายแรงดัน แต่เหมาะสมในการใช้ในการขยายความถี่สูง เพราะมีค่าความถี่คutoffความถี่สูงประมาณเท่ากับค่า  $F_T$  ของทรานซิสเตอร์ สัญญาณเอาต์พุทที่คอลเลคเตอร์ มีเฟสเหมือนกับที่อินพุทที่อิมิตเตอร์

**การทดลองตอนที่ 1 วงจขยายอิมิตเตอร์ร่วม**

1.1 ต่อวงจรตามรูปที่ 7 โดยไม่ต้องต่อสัญญาณอินพุท  $v_{in}$  และยังไม่ต้องต่อโหลด  $R_L$



**รูปที่ 7 วงจขยายอิมิตเตอร์ร่วมแบบบายพาสบางส่วน**

1.1.1 บั๊นไฟ 15.0 V เล็ยวงจร

1.1.2 ใช้ VOM หรือ Oscilloscope วัดคักดา DC \*\*\* คร้อม  $R_{E1}$  ( $V_E$  ในรูปที่ 7) และค่านวนหาค่ากระแส  $I_{CQ}$

$$V_E = \dots\dots\dots V \text{ ดังนั้นค่ากระแสไบอัส } I_{CQ} \approx V_E / R_{E1} = \dots\dots\dots \mu A$$

\*\*\* เล็ยกแสดง Average-full screen

1.1.3 คำนวณวิเคราะห์หาค่ากระแสไปอัล  $I_{CQ}$  จากสมการที่ 3

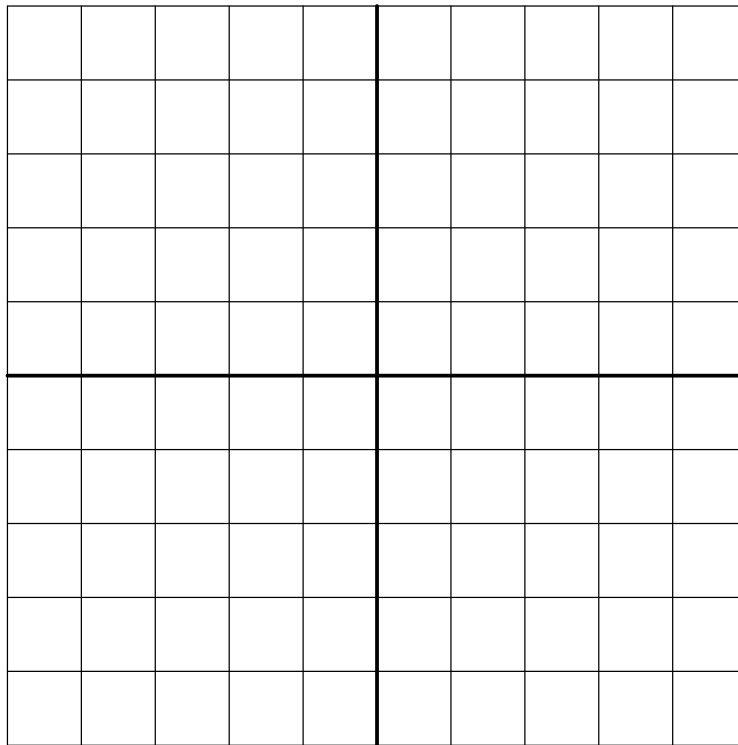
$$V_{BB} = V_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = \dots\dots\dots V, R_{BB} = (R_1 // R_2) = \dots\dots\dots k\Omega$$

$$\text{จะได้ } |I_{CQ}'| = (V_{BB} - 0.6) / ((R_{BB} / \beta_o) + R_{E1}) = \dots\dots\dots \mu A (\beta_o = \dots\dots\dots)$$

$$\text{แตกต่างที่วัดได้ในข้อ 1.2 อยู่ } = \left[ \frac{I_{CQ} - |I_{CQ}'|}{I_{CQ}} \right] \times 100 = \dots\dots\dots \%$$

**1.2 ทดลองวัดค่าอัตราขยายแรงดัน**

1.2.1 บ้อนสัญญาณอินพุท  $v_{in}$  ให้แก่วงจรขนาดประมาณ 400 mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz ยังไม่ต้องต่อโหลด  $R_L$  วัดขนาดเอาต์พุท  $v_o$  และเปรียบเทียบเฟสของ  $v_{in}$  (ใช้ scope พร้อมกัน 2 ch) บันทึกขนาด และ Waveform ของ  $v_{in}$  และ  $v_o$



CH<sub>1</sub> ..... V/Div

CH<sub>2</sub> ..... V/Div

Time Base.....s/Div

$v_{in} = \dots\dots\dots$  mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz, เฟสระหว่าง  $v_o$  กับ  $v_{in} \dots\dots\dots$

1.2.2 ป้อนสัญญาณ  $v_{in}$  ขนาด 400 mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz และต่อโหลด  $R_L$  ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 2 วัดค่าของ  $v_o$  ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

**ตารางที่ 2** ผลการทดลองวัดค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรรูปที่ 7 ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

$v_{in} = 400 \text{ mV}_{pp}$  ความถี่ 10 kHz

$R_L (\Omega)$	No Load	68 k	47 k	33 k	22 k
ขนาดของ $v_o (V_{pp})$					
$ A_v  = v_o/v_{in} (V/V)$					

จากข้อ 1.2.2  $I_{CQ} = \dots\dots\dots \mu A$       $\beta_o = \dots\dots\dots$

จะได้  $r_{b'e} = 0.026 \beta_o / I_{CQ} = \dots\dots\dots k\Omega$  และ  $r_{bb'} = 10k+50 = 10.05 k\Omega$

$Z_E = R_{E1} // R_{E2} = \dots\dots\dots \Omega$

**ตาราง 3** ผลการคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของรูปวงจรรูปที่ 7

$R_L (\Omega)$	No Load	68 k	47 k	33 k	22 k
$Z_C = R_C // R_L$					
$ A_v  = \frac{\beta_o Z_C}{r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1) Z_E}$					
$ A_v $ ที่วัดได้จากตารางที่ 2					
ความแตกต่าง (%)					

ความแตกต่าง =  $[(|A_v| \text{ คำนวณ} - |A_v| \text{ วัด}) / |A_v| \text{ วัด}] \times 100\%$

1.3 ทดลองวัดค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่ไม่บายพาส

1.3.2 จากวงจรรูปที่ 7 นำ  $R_{E2}$  และ  $C_E$  ออก บ้อนสัญญาณ  $v_{in}$  ขนาด 400 mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz และต่อโหลด  $R_L$  ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 2 วัดค่าของ  $v_o$  ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

ตารางที่ 4 ผลการทดลองวัดค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

$v_{in} = 400 \text{ mV}_{pp}$  ความถี่ 10 kHz

$R_L (\Omega)$	No Load	68 k	47 k	33 k	22 k
ขนาดของ $v_o (V_{pp})$					
$ A_v  = v_o/v_{in} (V/V)$					

จากข้อ 1.2.2  $I_{CQ} = \dots\dots\dots \mu A$   $\beta_o = \dots\dots\dots$

จะได้  $r_{be} = 0.026 \beta_o / I_{CQ} = \dots\dots\dots k\Omega$  และ  $r_{bb'} = 10k+50 = 10.05 k\Omega$

$Z_E = R_{E1} = \dots\dots\dots \Omega$

ตาราง 5 ผลการคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของรูปวงจร

$R_L (\Omega)$	No Load	68 k	47 k	33 k	22 k
$Z_C = R_C // R_L$					
$ A_v  = \frac{\beta_o Z_C}{r_{bb'} + r_{be} + (\beta_o + 1) Z_E}$					
$ A_v $ ที่วัดได้จากตารางที่ 2					
ความแตกต่าง (%)					

ความแตกต่าง =  $[(|A_v| \text{ คำนวณ} - |A_v| \text{ วัด}) / |A_v| \text{ วัด}] \times 100\%$

#### 1.4 วัดความถี่ที่คัตออฟของวงจร

โดยการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ต่างๆ ให้กับวงจรแล้ววัดค่าเอาต์พุต คำนวณค่าอัตราขยาย แล้วนำไปพลอตบนกระดาษกราฟ Semilog โดยแกนความถี่อยู่ด้าน Log และควรทำให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้วงจรมีค่าคงที่ทุกความถี่

1.4.1 ใช้วงจรในรูปที่ 7 ต่อ  $R_L = 47\text{k}\Omega$  ป้อนสัญญาณอินพุต  $400\text{ mV}_{pp}$  ความถี่ต่างๆ ตามตารางที่ 4 และวัดค่าของเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ บันทึกลงในตารางที่ 5

#### ตารางที่ 6 การตอบสนองของความถี่ของวงจรในรูปที่ 7

$v_{in} = 400\text{ mV}_{pp}$  คงที่ทุกความถี่  $R_L = 47\text{ k}\Omega$

f(Hz)	1k	700	500	300	200	150	100	70	50	30	20
$v_o(V_{pp})$											
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v\text{ dB} = 20\log A_v$											

f(Hz)	1k	1.5k	2k	3k	5k	7k	10k	15k	20k	25k	30k
$v_o(V_{pp})$											
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v\text{ dB} = 20\log A_v$											

1.4.2 นำข้อมูลจากตารางที่ 6 ไปพล็อตในกระดาษกราฟ Semi-log โดยแกน Log เป็นค่าความถี่ และแกน Linear เป็นค่า  $A_v\text{ dB}$  แล้วหาค่าคัตออฟความถี่ต่ำและ คัตออฟความถี่สูง

จากกราฟได้ คัตออฟความถี่ต่ำ = .....Hz

คัตออฟความถี่สูง = .....Hz

## 1.4.3 คำนวณค่าคutoffความถี่ต่ำ

$$I_{CQ} = \dots \text{uA} \text{ (ในข้อ 1.1.3), } \beta_o = \dots, Z_C = R_L // R_C = \dots \Omega$$

$$r_{b'e} = \dots \Omega \text{ (จาก 1.2.2), } r_{bb'} = 10.05\text{k}, Z_E = R_{E1} // R_{E2} = \dots \Omega$$

$$R_{IN} = \dots \Omega \text{ (จาก 1.4.4)}$$

$$F_{L(C1)} = \frac{1}{2\pi R_{IN} C_1} = \dots \text{Hz}$$

$$F_{L(C2)} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_C + R_L)} = \dots \text{Hz}$$

$$R_{FL} = R_{E2} + \left[ R_{E1} // \frac{r_{b'e} + r_{bb'}}{\beta_o + 1} \right] = \dots \Omega$$

$$F_L = \frac{1}{2\pi R_{FL} C_E} = \dots \text{Hz}$$

$$\text{คutoffความถี่ต่ำของวงจร} \approx F_{L(C1)} + F_{L(C2)} + F_{L(C_E)} = \dots \text{Hz}$$

## 1.4.4 คำนวณค่าคutoffของความถี่สูง

$$g_m = I_{CQ} / 0.026 = \dots, F_T = \dots \text{MHz}$$

$$C_{ob} = \dots \text{pF at } V_{CB} = \dots \text{V}$$

$$V_{CB \text{ วงจร}} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_{E1}) - 0.6 = \dots \text{V}$$

$$C_{b'c} \approx C_{ob} = \dots \text{pF (จาก datasheet หรือ } [(V_{CB} \text{ ที่วัด } C_{ob}) / (V_{CB \text{ วงจร}})]^3)$$

$$C_{b'e} = g_m / 2\pi F_T - C_{b'c} = \dots \text{pF}$$

เนื่องจากในวงจรรูปที่ 7 มี  $C_f$  ต่ออยู่ระหว่าง B-C จึงต้องนำค่าของ  $C_f$  นี้มาคิดรวมด้วย

$$K_H = r_{b'e} / (r_{b'e} + (\beta_o + 1)Z_E) = \dots, (1 + K_H g_m Z_C) = \dots$$

$$C_1 = K_H C_{b'e} + (C_{b'c} + C_f)(1 + K_H g_m Z_C) = \dots \text{pF}$$

$$R_{H1} = r_{b'e} + [(\beta_o + 1)Z_E // r_{bb'}] = \dots (R_S = 0)$$

$$F_{H1} = 1 / 2\pi C_1 R_{H1} = \dots \text{kHz}$$

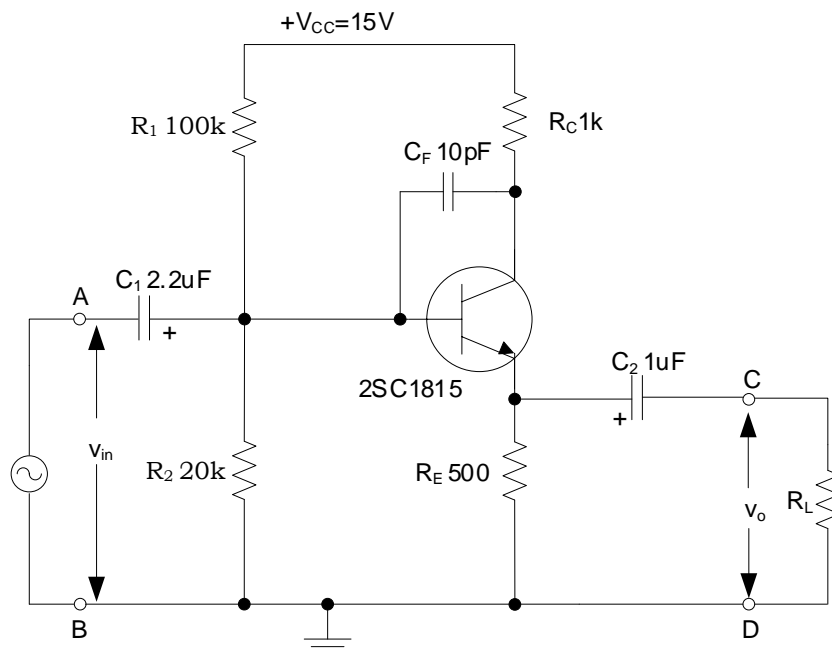
$$C_o \approx C_{b'e} + C_F + C_L \approx \dots \text{pF} \quad (C_L \approx 200 \text{ pF})$$

$$F_{H_o} \approx 1/2 \pi C_o Z_C \approx \dots \text{kHz}$$

$$\text{คัตออฟความถี่สูงของวงจร} \approx (F_{H1} \cdot F_{H_o}) / (F_{H1} + F_{H_o}) \approx \dots \text{kHz}$$

**การทดลองตอนที่ 3 วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม**

3.1 เปลี่ยนตำแหน่งของ  $R_L$  ดังรูปที่ 8 ซึ่งวงจรจะทำงานในลักษณะของวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม



**รูปที่ 8** วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม

เนื่องจากวงจรไบอัสเหมือนกับวงจรในรูปที่ 7 ดังนั้นกระแสไบอัส  $I_{CQ}$  ก็จะมีค่าเท่ากับคือ  $I_{CQ}$

$$= \dots \text{uA}$$

**3.2 วัดอัตราขยายแรงดัน**

3.2.1 บ่อนสัญญาณอินพุต  $v_{in}$  แก้ววงจรมีขนาดประมาณ 400 mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz ต่อโหลด  $R_L$  ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 7 วัดขนาดของ  $V_o$  ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

$$v_{in} = \dots \text{mV}_{pp} \text{ ความถี่ } 10 \text{ kHz, เฟสระหว่าง } v_o \text{ กับ } v_{in} \dots$$

ตารางที่ 7 ขนาดของ  $V_o$  ที่  $R_L$  ค่าต่างๆ

$R_L (\Omega)$	No Load	68 k	22 k	2 k	500
ขนาดของ $v_o (V_{pp})$					
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $					

3.2.2 คำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรเปรียบเทียบกับค่าวัดได้

$$I_{CQ} = \dots \mu A, \beta_o = \dots, \text{ จะได้ } r_{b'e} = 0.026 \beta_o / I_{CQ} = \dots k\Omega$$

$$\text{และ } r_{bb'} = 10k + 50 \Omega = 10.05k\Omega$$

ตารางที่ 8 ผลคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร รูปที่ 8

$R_L (\Omega)$	No Load	68k	22k	2k	500
$Z_E = R_E // R_L$					
$ A_v  = \frac{Z_E}{r_{bb'} + r_{b'e} + (\beta_o + 1)Z_E}$					
$ A_v $ ที่วัดได้จากตารางที่ 10					
ความแตกต่าง %					

### 3.3 วัดความถี่ที่คัตออฟของวงจร

โดยการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ต่างๆ ให้กับวงจรแล้ววัดค่าเอาต์พุต คำนวณค่าอัตราขยาย แล้วนำไปพลอตบนกระดาษกราฟ Semilog โดยแกนความถี่อยู่ด้าน Log และควรทำให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้วงจรมีค่าคงที่ทุกความถี่

3.3.1 ใช้วงจรในรูปที่ 8 ต่อ  $R_L = 47k\Omega$  ป้อนสัญญาณอินพุต  $400 mV_{pp}$  ความถี่ต่างๆ ตามตารางที่ 9 และวัดค่าของเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ บันทึกลงในตารางที่ 9



ตารางที่ 9 การตอบสนองของแอมพลิจูดของวงจรในรูปที่ 8  $v_{in} = 400 \text{ mV}_{pp}$  คงที่ทุกความถี่  $R_L = 47 \text{ k}\Omega$

f(Hz)	1k	700	500	300	200	150	100	70	50	30	20
$v_o(V_{pp})$											
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v \text{ dB} = 20 \log A_v$											

f(Hz)	1k	1.5k	2k	3k	5k	7k	10k	15k	20k	25k	30k
$v_o(V_{pp})$											
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v \text{ dB} = 20 \log A_v$											

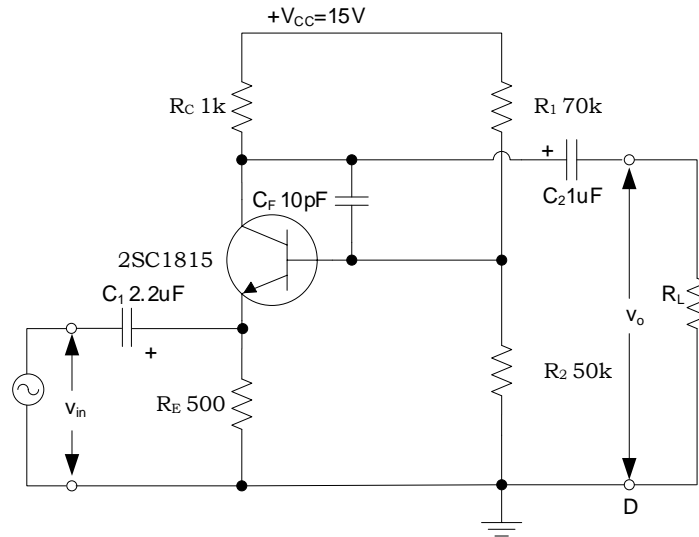
3.3.2 นำข้อมูลจากตารางที่ 9 ไปพล็อตในกระดาษกราฟ Semi-log โดยแกน Log เป็นค่าความถี่ และแกน Linear เป็นค่า  $A_v \text{ dB}$  แล้วหาค่าคutoff ความถี่ต่ำและ คutoff ความถี่สูง

จากกราฟได้      คutoff ความถี่ต่ำ = .....Hz

                         คutoff ความถี่สูง = .....Hz

**การทดลองตอนที่ 4 วงจรขยายเบสร่วม**

4.1 ย้ายจุดป้อนสัญญาณอินพุตและตำแหน่งของ  $R_L$  ใหม่ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9

4.2 ผลของ RL ต่ออัตราขยายแรงดัน

4.2.1 ป้อนสัญญาณอินพุต  $v_{in}$  แก่วงจร ขนาดประมาณ 400 mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz ต่อโหลด RL ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 10 วัดขนาดของ  $v_o$  ที่ RL ค่าต่างๆ

$v_{in}$  = .....mV<sub>pp</sub> ความถี่ 10 kHz, เฟสระหว่าง  $v_o$  กับ  $v_{in}$  .....

ตารางที่ 10 ขนาดของ  $v_o$  ที่ RL ค่าต่างๆ

$R_L(\Omega)$	No Load	68k	47k	33k	22k
ขนาดของ $V_o$					
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $					

4.2.2 คำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้

$I_{CQ}$  = ..... $\mu$ A,  $\beta_o$  = .....,  $Z_E = 0$  จะได้  $r_{b'e} = 0.026 \beta_o / I_{CQ}$  = .....k $\Omega$

และ  $r_{bb'}$  = 10k + 50  $\Omega$  = 10.05k $\Omega$

ตารางที่ 11 ผลคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร รูปที่ 10

$R_L (\Omega)$	No Load	68k	47k	33k	22k
$Z_c = R_c // R_L$	15k				
$ A_v  = (\beta_o Z_c) / (r_{be} + r_{be})$					
$ A_v $ ที่วัดได้จาก ตารางที่ 6					
ความแตกต่าง %					

#### 4.3 วัดความถี่ที่คัตออฟของวงจร

โดยการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ต่างๆ ให้กับวงจรแล้ววัดค่าเอาต์พุต คำนวณค่าอัตราขยาย แล้วนำไปพลอตบนกระดาษกราฟ Semilog โดยแกนความถี่อยู่ด้าน Log และควรทำให้สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้วงจรมีค่าคงที่ทุกความถี่

4.3.1 ใช้วงจรในรูปที่ 9 ต่อ  $R_L = 47k\Omega$  ป้อนสัญญาณอินพุต  $400\text{ mV}_{pp}$  ความถี่ต่างๆ ตามตารางที่ 12 และวัดค่าของเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ บันทึกลงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การตอบสนองความถี่ของวงจรในรูปที่ 8  $v_{in} = 400\text{ mV}_{pp}$  คงที่ทุกความถี่  $R_L = 47\text{ k}\Omega$

f(Hz)	1k	700	500	300	200	150	100	70	50	30	20
$v_o (V_{pp})$											
$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v \text{ dB} = 20 \log A_v$											

f(Hz)	1k	1.5k	2k	3k	5k	7k	10k	15k	20k	25k	30k
$v_o (V_{pp})$											

$ A_v  = \left  \frac{v_o}{v_{in}} \right $											
$A_v \text{ dB} = 20 \log A_v$											

4.3.2 นำข้อมูลจากตารางที่ 12 ไปพล็อตในกระดาษกราฟ Semi-log โดยแกน Log เป็นค่าความถี่ และแกน Linear เป็นค่า  $A_v$  dB แล้วหาค่าคutoff ความถี่ต่ำและ คutoff ความถี่สูง

จากกราฟได้      คutoff ความถี่ต่ำ = .....Hz

                         คutoff ความถี่สูง = .....Hz

วิเคราะห์ผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง