

RANGKAIAN ELEKTRONIKA II

Penguat Diferensial



Mifta Nur Farid, S.T., M.T.
miftanurfarid@lecturer.itk.ac.id

Teknik Elektro
Institut Teknologi Kalimantan
Balikpapan, Indonesia

Februari 22, 2021

Pengantar

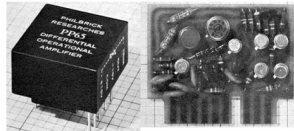
- Istilah Operational amplifier (op-amp) merujuk kepada sebuah amplifier/penguat yang menjalankan suatu operasi matematika.
- Dalam sejarahnya, op-amp pertama digunakan di dalam komputer analog untuk melakukan operasi penjumlahan, perkalian dan lainnya.
- Op-amp dibuat sebagai sirkuit diskrit → sekarang kebanyakan op-amp adalah sirkuit terintegrasi/ integrated circuits (IC).

Brief History of Op-Amp



Vacuum Tube Op-Amps (1930's-1940's)

Dual-supply voltage of $+300/-300$ V
Output swing ± 50 volts
Open-loop voltage gain of 15,000 to 20,000,
Slew rate of ± 12 volts/ μ second
Maximum output current of 1 mA
George Philbrick



Solid State Discrete Op-Amps (1960's)

Dual-supply voltage of ± 15 V
Output swing ± 11 volts
Open-loop voltage gain of 40,000,
Slew rate of ± 1.5 volts/ μ second
Maximum output current of 2.2 mA



Monolithic IC Op-Amp

- First created in 1963 μ A702 by Fairchild Semiconductor
- μ A741 created in 1968, became widely used due to its ease of use 8 pin, dual in-line package (DIP)
- Further advancements include use of field effects transistors (FET), greater precision, faster response, and smaller packaging

Gambar. 1: Perkembangan op-amp

Pengantar

- Op-amp → penguat DC/DC amplifier dengan voltage gain/penguatan tegangan yang sangat besar, impedansi input yang sangat besar, dan impedansi output yang sangat kecil.
- Frekuensi unity gain dari 1 hingga lebih dari 20 Mhz.
- IC op-amp adalah sebuah blok fungsional yang lengkap dengan pin eksternal.
- Hanya dengan menghubungkan pin tersebut ke suplai tegangan dan beberapa komponen, kita dapat dengan cepat membuat segala jenis rangkaian yang berguna.

Pengantar

- Rangkaian input yang paling banyak digunakan di op-amp adalah sebuah penguat diferensial/ differential amplifier.
- Konfigurasi dari penguat ini memberikan banyak karakteristik input di IC.
- Penguat diferensial juga dapat dikonfigurasi dalam bentuk diskrit untuk digunakan dalam komunikasi, instrumentasi, dan rangkaian kontrol industri.
- **Kita akan fokus pada penguat diferensial yang digunakan dalam IC.**

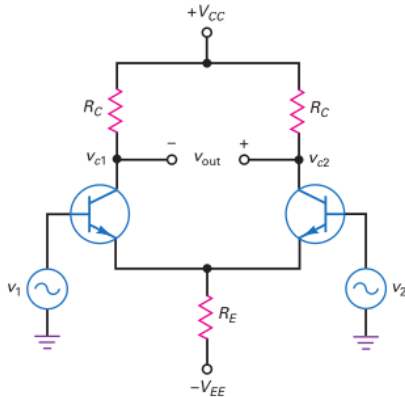
Pengantar

- Sub-CPMK:
 - Mahasiswa mampu menganalisis rangkaian penguat diferensial (C4, P3, A3)
- Bahan Kajian
 1. Konsep dasar penguat diferensial;
 2. Analisis DC dari penguat diferensial;
 3. Analisis AC dari penguat diferensial;
 4. Common-mode gain;

Penguat Diferensial

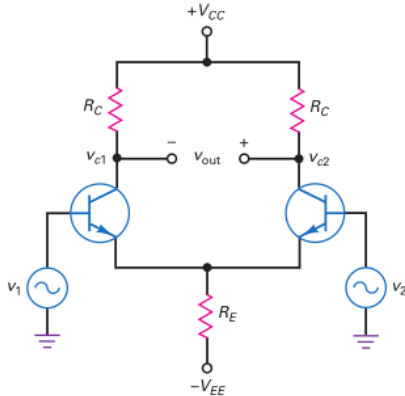
1. Transistor, dioda, dan resistor adalah komponen-komponen praktis yang ada di dalam IC.
2. Kapasitor mungkin dapat digunakan, tapi ukurannya sangat kecil, $< 50 \text{ pF}$.
3. Sehingga tidak bisa menggunakan kapasitor kopling dan kapasitor bypass seperti pada rangkaian diskret.
4. Harus menggunakan kopling langsung antara stage-nya + menghilangkan kapasitor bypass emitter.
5. Solusinya? \rightarrow penguat diferensial
6. Penguat diferensial \rightarrow menghilangkan kebutuhan terhadap kapasitor bypass emitter
7. Penguat diferensial \leftarrow banyak digunakan sebagai input stage hampir di setiap IC op-amp

Difderential Input dan Output



- Ada 2 CE stage yang paralel terhadap resistor *common emitter* R_E
- Meskipun ada 2 tegangan *input* (v_1 , v_2) dan 2 tegangan *collector* (v_{c1} , v_{c2}), keseluruhan rangkaian dianggap 1 stage.
- Tidak ada kapasitor kopling dan bypass
→ tidak ada lower cutoff frequency

Diferential Input dan Output

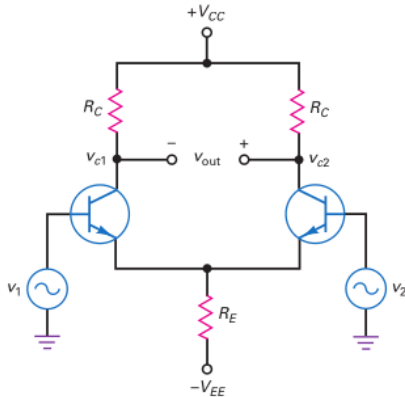


- Tegangan output AC :

$$V_{out} = v_{c2} - v_{c1} \quad (1)$$

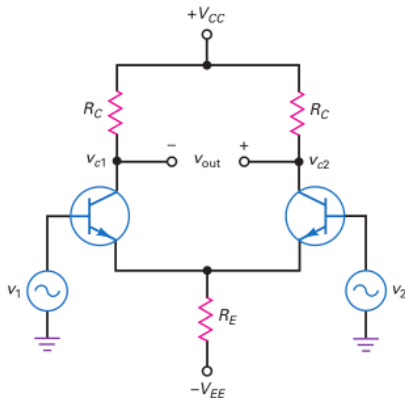
- V_{out} = differential output, karena menggabungkan 2 tegangan collector.
- Transistor yang identik + resistor collector yang sama \rightarrow ideal
- $v_1 = v_2 \rightarrow v_{out} = 0$
- $v_1 > v_2 \rightarrow v_{out}$ memiliki polaritas seperti gambar di samping.
- $v_1 < v_2 \rightarrow v_{out}$ inverted + polaritas yang berkebalikan

Differential Input dan Output



- $v_1 = \text{noninverting input}$ karena v_{out} memiliki fasa yang sama dengan v_1
- $v_2 = \text{inverting input}$ karena v_{out} memiliki fasa yang berbeda 180° dengan v_2
- Terkadang, noninverting input yang digunakan dan inverting input di-grounding, terkadang juga sebaliknya.

Differential Input dan Output

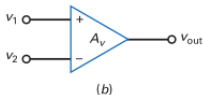
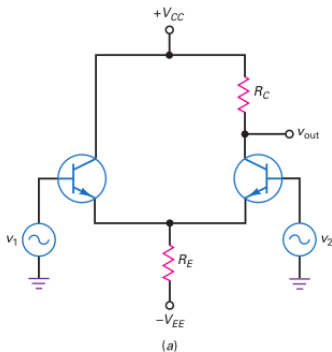


- Jika kedua input-nya ada, input totalnya disebut differential input karena tegangan output sama dengan penguatan tegangan (voltage gain) \times selisih dari kedua tegangan input.

$$v_{out} = A_v(v_1 - v_2) \quad (2)$$

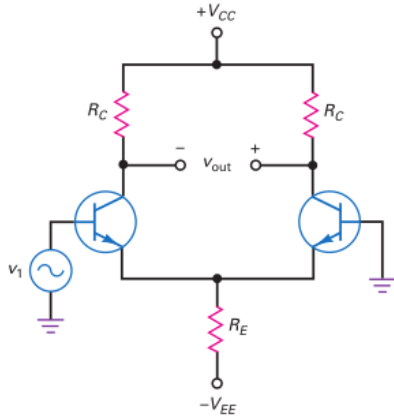
- A_v = penguatan tegangan/ voltage gain

Single-Ended Output



- Differential output (gambar sebelumnya) membutuhkan floating load, karena kedua ujung dari load tidak ke ground.
- Umumnya, load/ beban adalah single-ended, salah satu ujungnya ke ground. Seperti pada gambar (a).
- $V_{out} = A_v(v_1 - v_2)$, tapi voltage gain (A_v) hanya setengah
- Blok-diagram, gambar (b), sama dengan op-amp

Konfigurasi Noninverting-Input



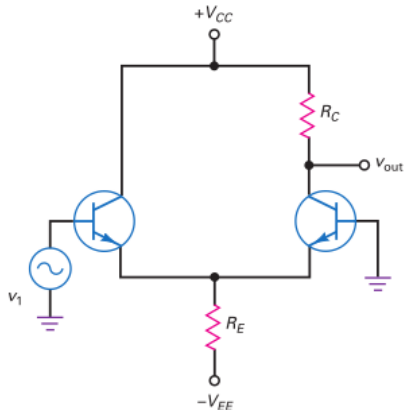
- Konfigurasi ini memiliki

- Noninverting input
- Differential output

- Karena $v_2 = 0$, maka

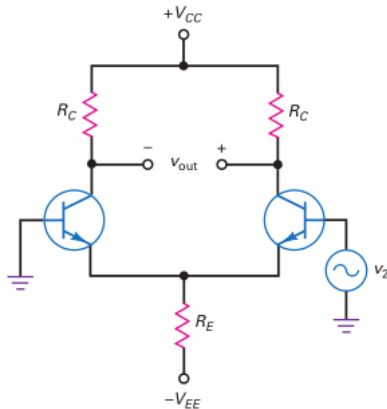
$$v_{out} = A_v(v_1) \quad (3)$$

Konfigurasi Noninverting-Input



- Konfigurasi ini memiliki
 - Noninverting input
 - Single-ended output
- Karena v_{out} adalah tegangan output AC, maka v_{out} tetap sama seperti sebelumnya yaitu $v_{out} = A_v(v_1)$
- Tapi A_v akan bernilai setengahnya karena output hanya diambil dari satu sisi dari diff-amp

Konfigurasi Inverting-input

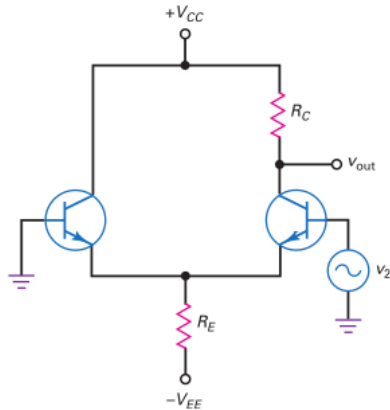


- v_2 adalah active input dan v_1 adalah grounded input, maka

$$v_{out} = -A_v(v_2) \quad (4)$$

- Tanda minus (-) menunjukkan fasa yang berkebalikan

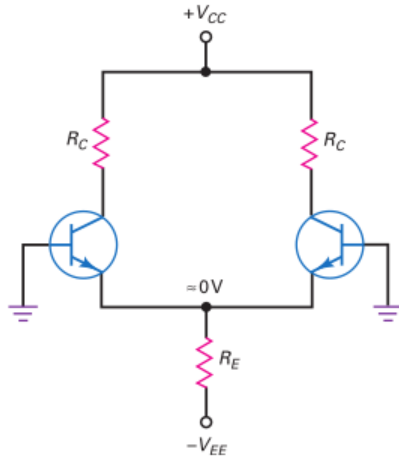
Konfigurasi Inverting-input



- Tegangan output juga sama dengan sebelumnya, yaitu $v_{out} = -A_v(v_2)$

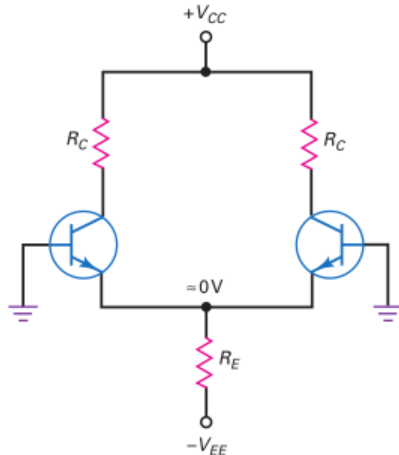
Summary Table 15-1		Diff-Amp Configurations	
Input	Output	V_{in}	V_{out}
Differential	Differential	$v_1 - v_2$	$V_{c2} - V_{c1}$
Differential	Single-ended	$v_1 - v_2$	V_{c2}
Single-ended	Differential	v_1 or v_2	$V_{c2} - V_{c1}$
Single-ended	Single-ended	v_1 or v_2	V_{c2}

Analisis DC dari Diff Amp



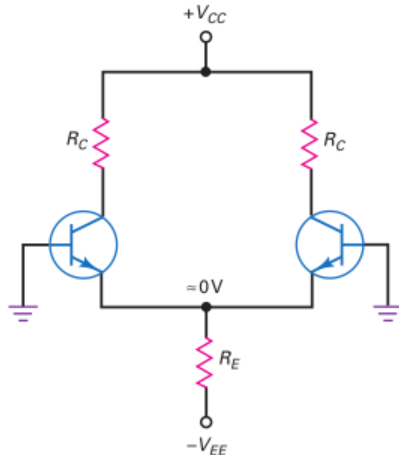
- Rangkaian ekivalen DC dari diff amp.
- Pada pembahasan berikutnya, kita akan mengasumsikan transistornya identik dan resistor collectornya sama.
- Kita asumsikan juga kedua base di-grounded

Analisis Ideal



- Diff amp disebut juga long-tail pair karena kedua transistor saling berbagi satu common resistor R_E .
- Arus yang mengalir melalui common resistor ini disebut tail current.
- Jika kita mengabaikan V_{BE} drop sepanjang dioda emitter, maka di atas emitter resistor idealnya adalah sebuah titik ground DC.

Analisis Ideal



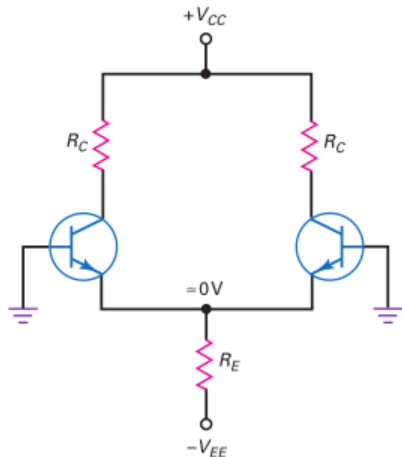
- Sehingga semua V_{EE} ada di seberang R_E dan arus tail bernilai

$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} \quad (5)$$

- Ketika keduanya benar-benar sama, maka arus tail akan terbagi sama, sehingga tiap transistor memiliki arus emitter sebesar

$$I_{EE} = \frac{I_T}{2} \quad (6)$$

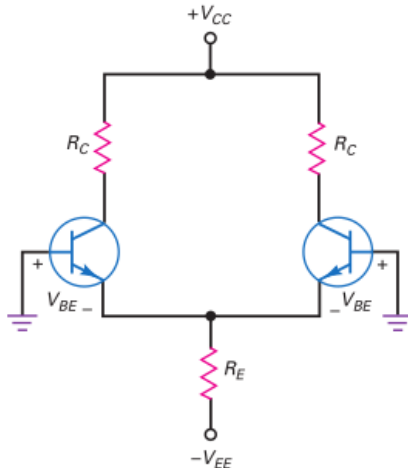
Analisis Ideal



- Tegangan DC pada kedua collector sebesar

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (7)$$

Metode perkiraan kedua

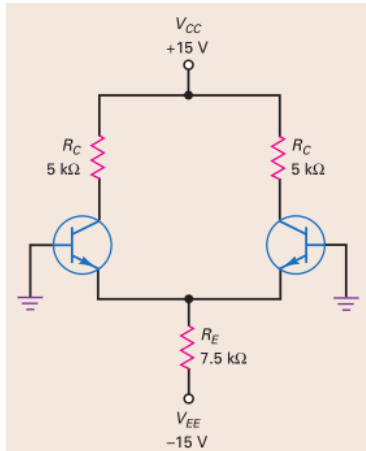


- Kita bisa meningkatkan analisis DC dengan cara menyertakan V_{BE} drop di setiap dioda emitter

$$I_T = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \quad (8)$$

dimana $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ untuk transistor silikon.

Contoh Soal 1



■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

■ Jawaban:

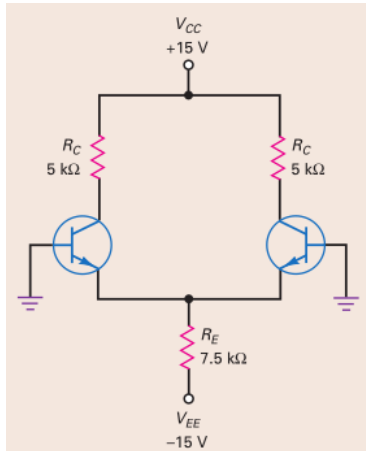
- Berdasarkan persamaan 5, arus tail adalah:

$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} = \frac{15 \text{ v}}{7.5 \text{ m}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

- Tiap arus emitter adalah separuh dari arus tail:

$$I_E = \frac{I_T}{2} = \frac{2 \text{ mA}}{2} = 1 \text{ mA}$$

Contoh Soal 1

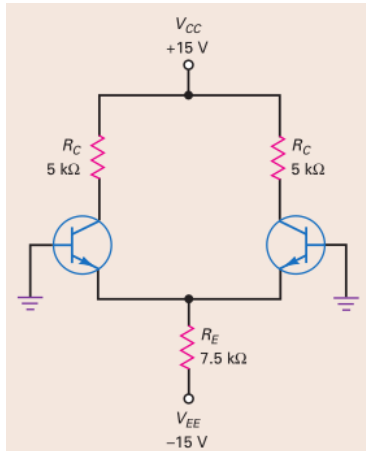


■ Jawaban:

- Setiap tegangan collectornya adalah:

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 15 \text{ V} - (1 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega)$$

Latihan Soal 1



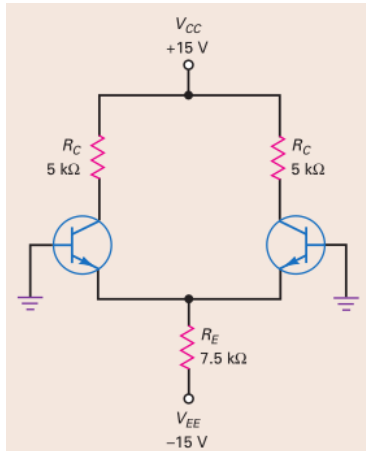
■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan ideal jika $R_E = 5 \text{ k}\Omega$

■ Jawaban: ??

- *Silakan dikerjakan*

Contoh Soal 2



■ Pertanyaan:

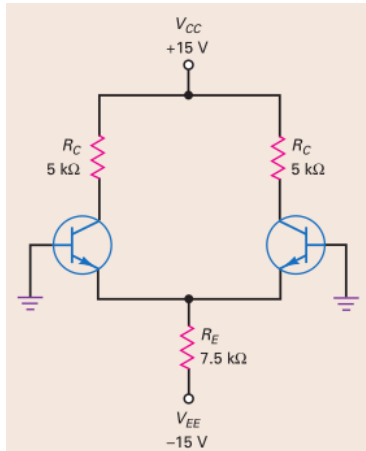
- Dengan menggunakan metode kedua, berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

■ Jawaban:

- Arus tail-nya adalah:

$$I_T = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} = \frac{15 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{7.5 \text{ k}\Omega} = 1.91 \text{ mA}$$

Contoh Soal 2



■ Jawaban:

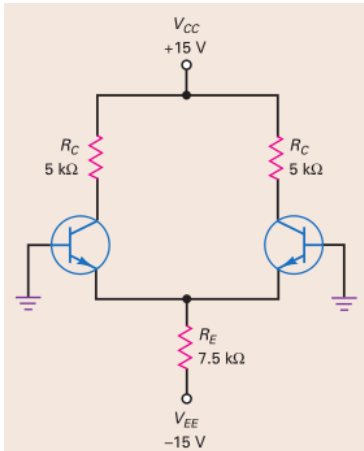
- Setiap arus emitternya adalah setengah dari arus tailnya:

$$I_E = \frac{I_T}{2} = \frac{1.91 \text{ mA}}{2} = 0.955 \text{ mA}$$

- Tegangan collectornya sebesar:

$$\begin{aligned} V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 15 \text{ V} - (0.955 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) \\ &= 10.2 \text{ V} \end{aligned}$$

Latihan Soal 2



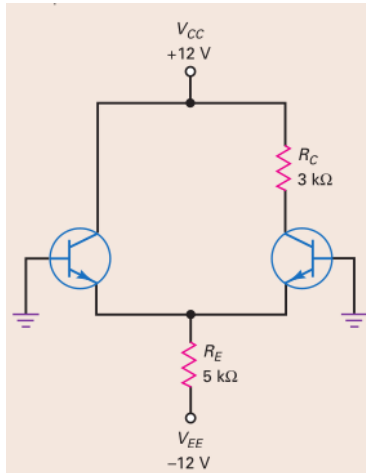
■ Pertanyaan:

- Dengan menggunakan metode kedua, berapa arus dan tegangan ideal jika $R_E = 5\text{ k}\Omega$

■ Jawaban:

- *Silakan dikerjakan*

Contoh Soal 3



■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan di dalam rangkaian single-ended output di samping

■ Jawaban:

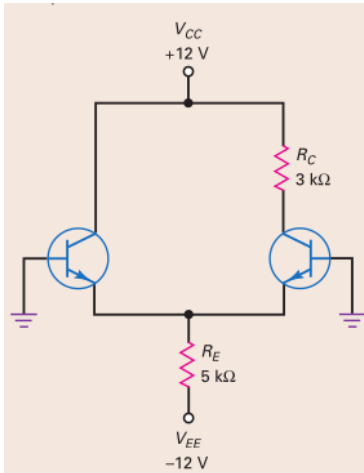
- Idealnya, arus tail:

$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} = \frac{12 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 2.4 \text{ mA}$$

- Setiap arus emitter adalah setengah dari arus tailnya:

$$I_E = \frac{I_T}{2} = \frac{2.4 \text{ mA}}{2} = 1.2 \text{ mA}$$

Contoh Soal 3



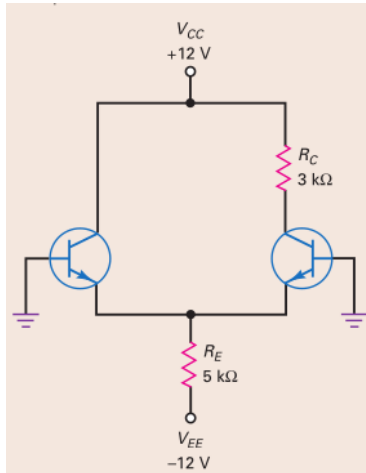
■ Jawaban:

- Tegangan collector yang sebelah kanan adalah:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\
 &= 12 \text{ V} - (1.2 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) \\
 &= 8.4 \text{ V}
 \end{aligned}$$

- Sedangkan tegangan collector sebelah kiri adalah 12 V.

Contoh Soal 3



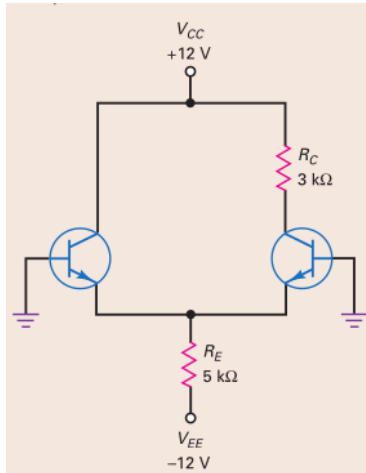
■ Jawaban:

- Jika kita gunakan metode yang kedua, kita dapatkan:

$$\begin{aligned}
 I_T &= \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \\
 &= \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} \\
 &= 2.26 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$I_E = \frac{I_T}{2} = \frac{2.26 \text{ mA}}{2} = 1.13 \text{ mA}$$

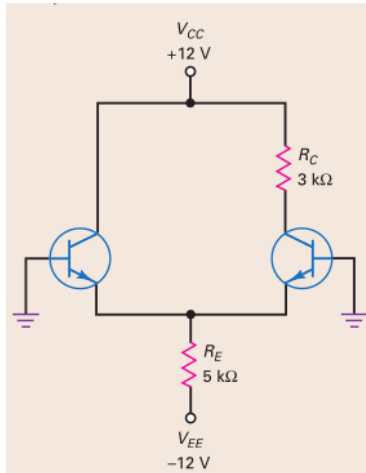
Contoh Soal 3



■ Jawaban:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\
 &= 12 \text{ V} - (1.13 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) \\
 &= 8.61 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Latihan Soal 3



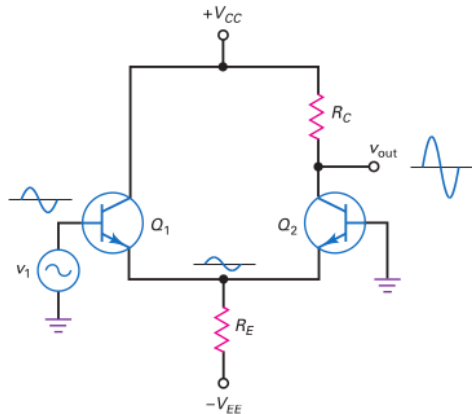
■ Pertanyaan:

- Jika $R_E = 3 \text{ k}\Omega$, tentukan arus dan tegangan dengan menggunakan metode kedua.

Analisis AC dari Diff Amp

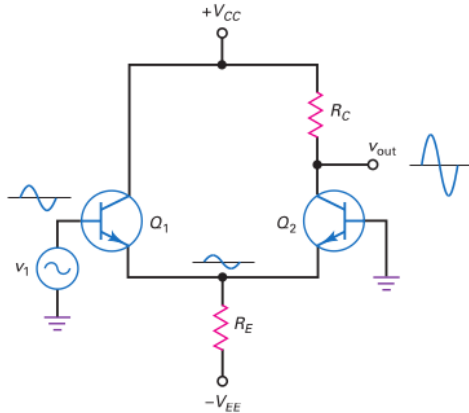
- Pada bagian ini, kita akan menurunkan persamaan untuk penguatan tegangan (voltage gain) dari diff amp.
- Kita mulai dengan konfigurasi yang paling sederhana, noninverting input dan single-ended output.
- Setelah menurunkan penguatan tegangan, kita akan kembangkan hasilnya ke konfigurasi yang lain.

Teori Operasi



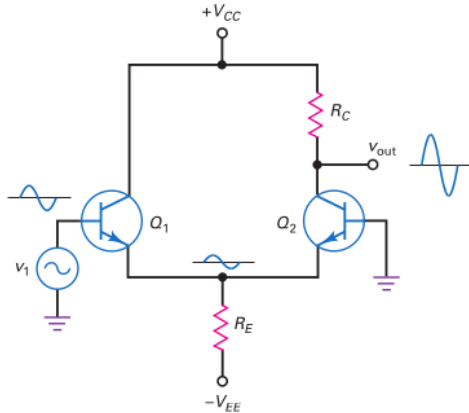
- Gambar di samping adalah noninverting input dan single-ended output.
- Dengan R_E yang besar, arus tail hampir konstan saat ada sinyal AC yang kecil.
- Jika arus emitter di Q_1 meningkat maka arus emitter di Q_2 menurun, dan sebaliknya.

Teori Operasi



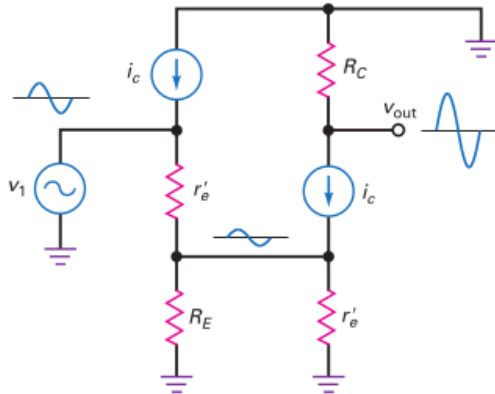
- Transistor Q_1 bertindak seperti emitter follower yang menghasilkan tegangan AC di seberang resistor emitter.
- Tegangan AC ini bernilai setengah dari tegangan input v_1
- Pada setengah siklus positif dari tegangan input, arus emitter Q_1 meningkat, arus emitter Q_2 menurun, dan tegangan collector Q_2 meningkat.

Teori Operasi



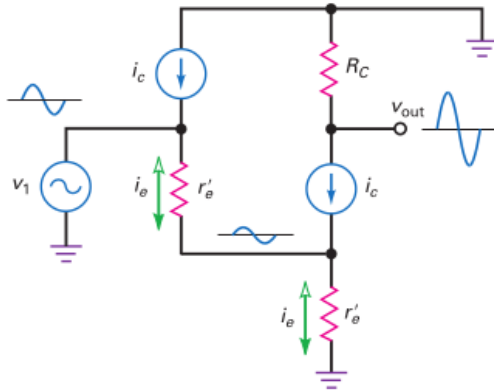
- Sama halnya pada setengah siklus negatif dari tegangan input, arus emitter Q_1 menurun, arus emitter Q_2 meningkat, dan tegangan collector Q_2 menurun.
- Hal ini yang menyebabkan gelombang sinus yang dikuatkan memiliki fasa yang sama dengan noninverting input.

Single-ended output gain



- Gambar di samping adalah rangkaian ekivalennya
- Setiap transistor memiliki r'_e
- R_E paralel dengan r'_e pada transistor kanan karena base dari Q_2 di-grounding.
- Karena R_E jauh lebih besar dari r'_e maka R_E bisa diabaikan.
- Sehingga kita dapat rangkaian yang lebih sederhana sebagai berikut:

Single-ended output gain



- Tegangan input v_1 sepanjang kedua r'_e
- Karena kedua r'_e bernilai sama, maka tegangan pada r'_e adalah setengah dari tegangan inputnya.
- Ini lah mengapa tegangan AC sepanjang resistor tail adalah setengah dari tegangan input.
- Tegangan output AC: $v_{out} = i_c R_C$
- Tegangan input AC:

$$v_{in} = i_e r'_e + i_e r'_e = 2i_e r'_e$$
- Penguatan tegangan (voltage gain):

1. test