

# RANGKAIAN ELEKTRONIKA II

## Penguat Diferensial



Mifta Nur Farid, S.T., M.T.  
[miftanurfarid@lecturer.itk.ac.id](mailto:miftanurfarid@lecturer.itk.ac.id)

Teknik Elektro  
Institut Teknologi Kalimantan  
Balikpapan, Indonesia

Februari 22, 2021

# Pengantar

---

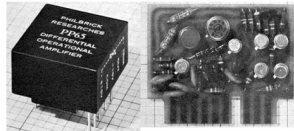
- Istilah Operational amplifier (op-amp) merujuk kepada sebuah amplifier/penguat yang menjalankan suatu operasi matematika.
- Dalam sejarahnya, op-amp pertama digunakan di dalam komputer analog untuk melakukan operasi penjumlahan, perkalian dan lainnya.
- Op-amp dibuat sebagai sirkuit diskrit → sekarang 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/ $\mu$ second  
Maximum output current of 1 mA  
George Philbrick



### Solid State Discrete Op-Amps (1960's)

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



### Monolithic IC Op-Amp

- First created in 1963  $\mu$ A702 by Fairchild Semiconductor
- $\mu$ 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

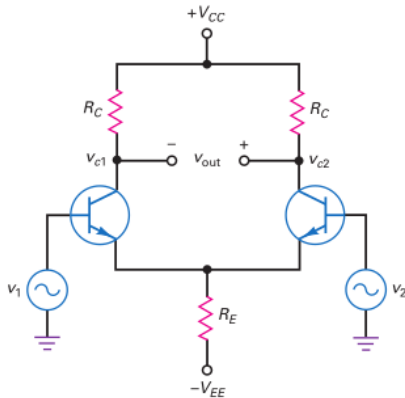
---

- 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

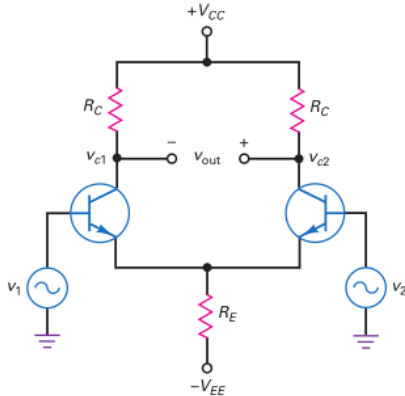
# Difderential Input dan Output



- 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

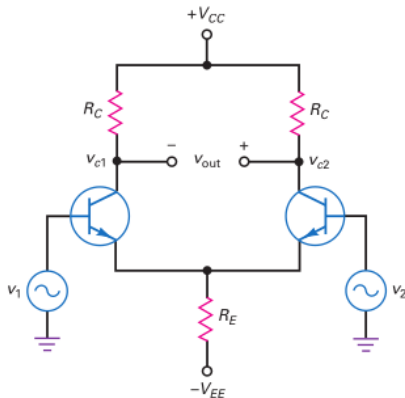


- Tegangan output AC :

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

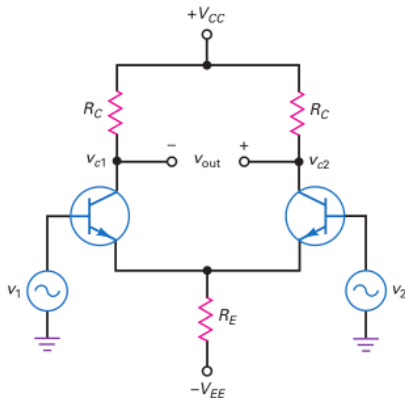
- $v_{out}$  = differential output, karena menggabungkan 2 tegangan collector.
- Transistor yang identik + resistor collector yang sama  $\rightarrow$  ideal
- $v_1 = v_2 \rightarrow v_{out} = 0$
- $v_1 > v_2 \rightarrow v_{out}$  memiliki polaritas seperti gambar di samping.
- $v_1 < v_2 \rightarrow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

## Diferential 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  $180^\circ$  dengan  $v_2$
- Terkadang, noninverting input yang digunakan dan inverting input di-grounding, terkadang juga sebaliknya.

## Diferential Input dan Output

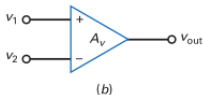
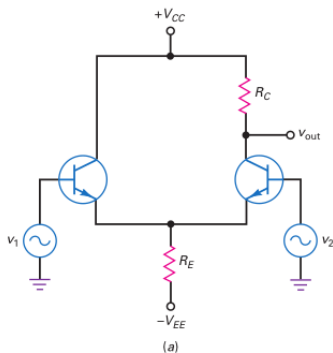


- Jika kedua input-nya ada, input totalnya disebut differential input karena tegangan output sama dengan penguatan tegangan (voltage gain)  $\times$  selisih dari kedua tegangan input.

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

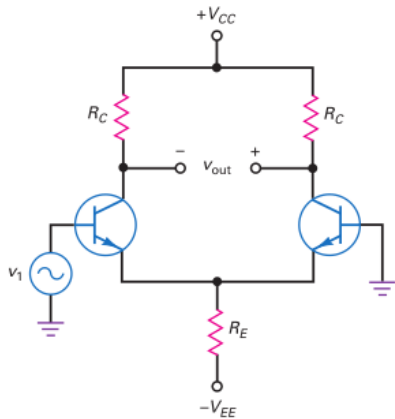
- $A_v$  = penguatan tegangan/ voltage gain

## 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



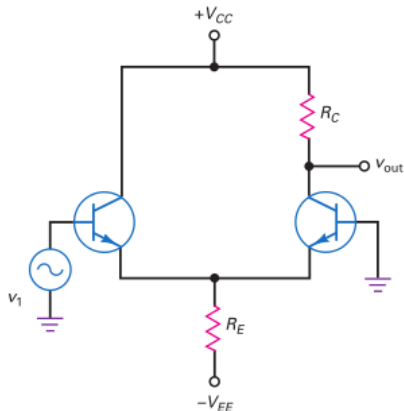
- Konfigurasi ini memiliki

- Noninverting input
- Differential output

- Karena  $v_2 = 0$ , maka

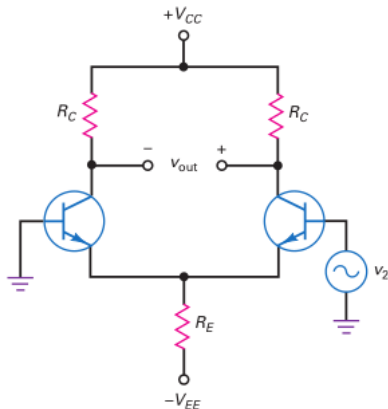
$$v_{out} = A_v(v_1) \quad (3)$$

## 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

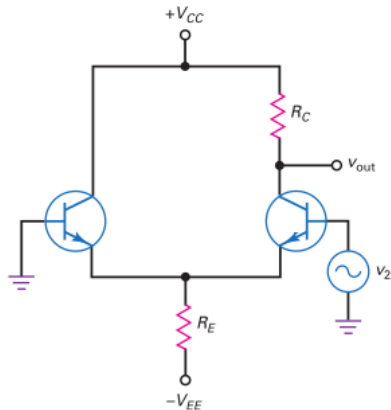


- $v_2$  adalah active input dan  $v_1$  adalah grounded input, maka

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

- Tanda minus (-) menunjukkan fasa yang berkebalikan

## Konfigurasi Inverting-input

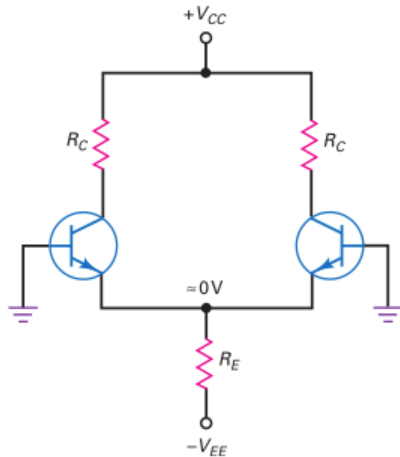


- Tegangan output juga sama dengan sebelumnya, yaitu  $v_{out} = -A_v(v_2)$



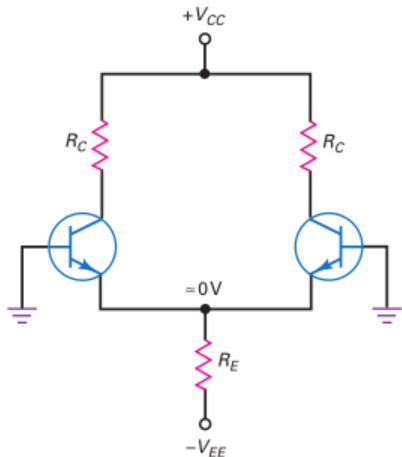
Summary Table 15-1		Diff-Amp Configurations	
Input	Output	$V_{in}$	$V_{out}$
Differential	Differential	$v_1 - v_2$	$V_{c2} - V_{c1}$
Differential	Single-ended	$v_1 - v_2$	$V_{c2}$
Single-ended	Differential	$v_1$ or $v_2$	$V_{c2} - V_{c1}$
Single-ended	Single-ended	$v_1$ or $v_2$	$V_{c2}$

## Analisis DC dari Diff Amp



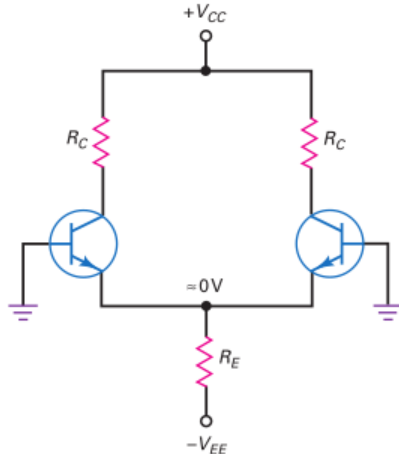
- Rangkaian ekivalen DC dari diff amp.
- Pada pembahasan berikutnya, kita akan mengasumsikan transistornya identik dan resistor collectornya sama.
- Kita asumsikan juga kedua base di-grounded

## 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



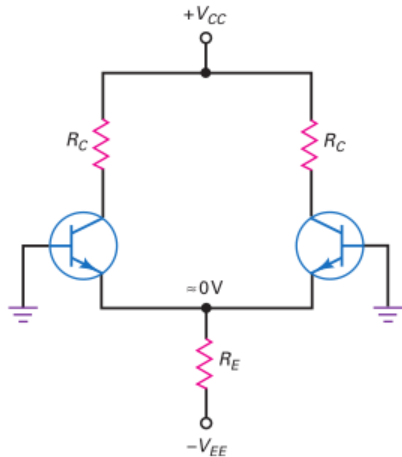
- Sehingga semua  $V_{EE}$  ada di seberang  $R_E$  dan arus tail bernilai

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

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

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

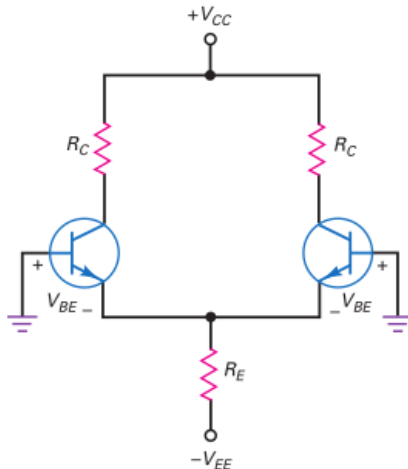
## Analisis Ideal



- Tegangan DC pada kedua collector sebesar

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

## Metode perkiraan kedua

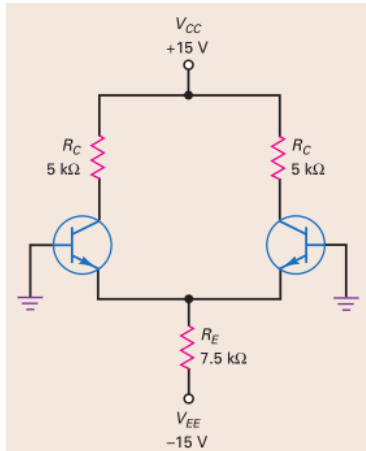


- Kita bisa meningkatkan analisis DC dengan cara menyertakan  $V_{BE}$  drop di setiap dioda emitter

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

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

## Contoh Soal 1



### ■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

### ■ Jawaban:

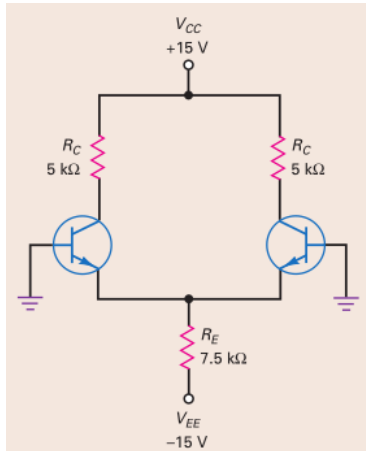
- Berdasarkan persamaan 5, arus tail adalah:

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

- 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



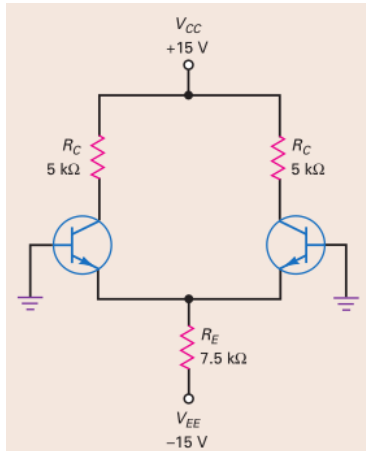
### ■ Jawaban:

- Setiap tegangan collectornya adalah:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\
 &= 15 \text{ V} - (1 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) \\
 &= 10 \text{ V}
 \end{aligned}$$

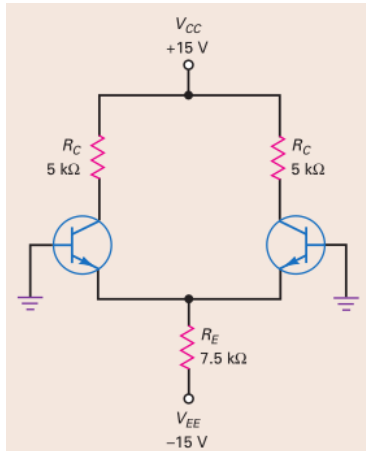


## Latihan Soal 1



- Pertanyaan:
  - Berapa arus dan tegangan ideal jika  $R_E = 5 \text{ k}\Omega$
- Jawaban: ??
  - *Silakan dikerjakan*

## Contoh Soal 2



### ■ Pertanyaan:

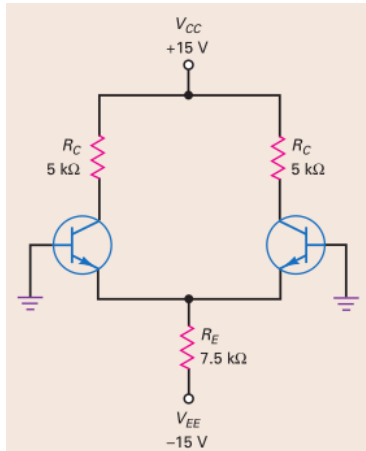
- Dengan menggunakan metode kedua, berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

### ■ 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:

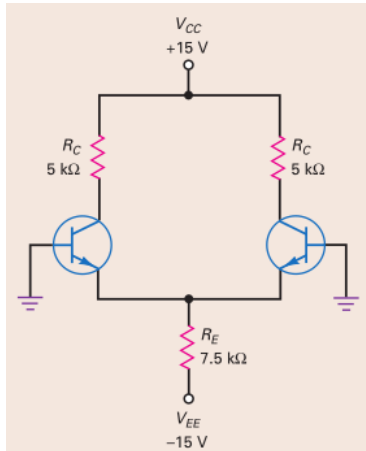
- Setiap arus emitternya adalah setengah dari arus tailnya:

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

- 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



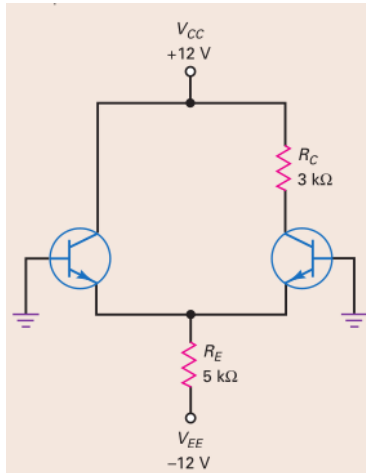
### ■ Pertanyaan:

- 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:

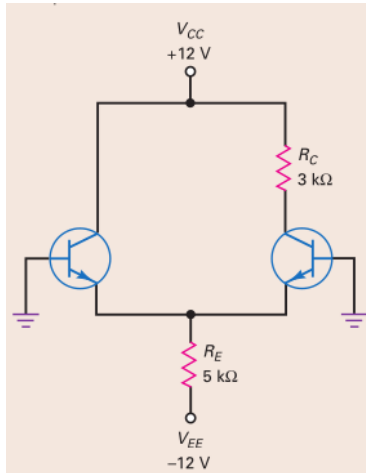
- Idealnya, arus tail:

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

- 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



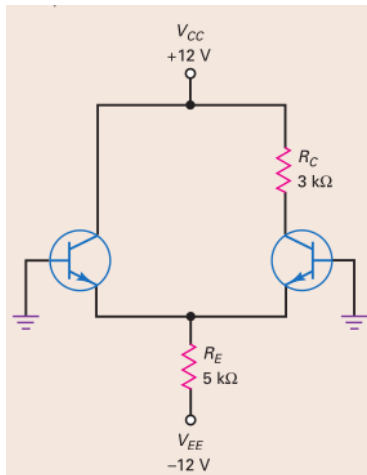
### ■ Jawaban:

- 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



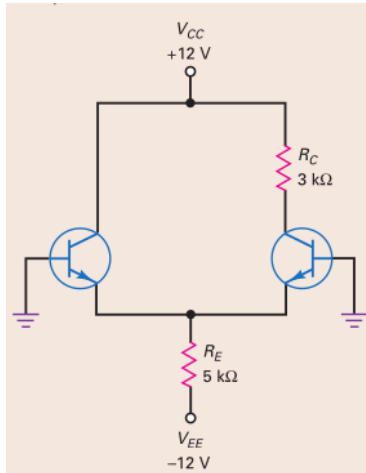
### ■ Jawaban:

- 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

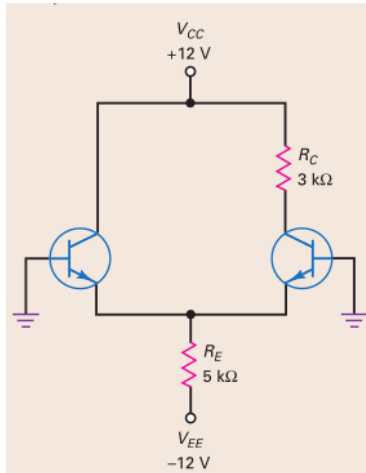


■ Jawaban:

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



## Latihan Soal 3



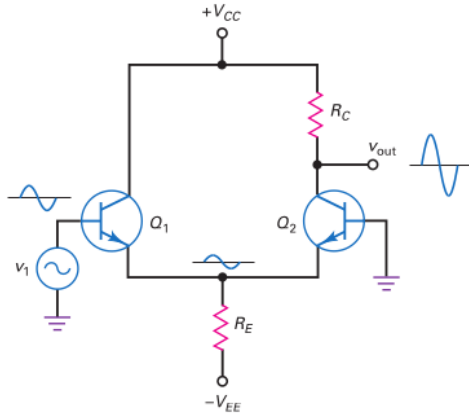
### ■ Pertanyaan:

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

## Analisis AC dari Diff Amp

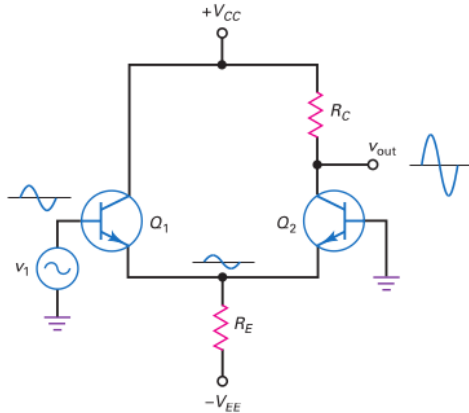
- Pada bagian ini, kita akan menurunkan persamaan untuk penguatan tegangan (voltage gain) dari diff amp.
- Kita mulai dengan konfigurasi yang paling sederhana, noninverting input dan single-ended output.
- Setelah menurunkan penguatan tegangan, kita akan kembangkan hasilnya ke konfigurasi yang lain.

# Teori Operasi



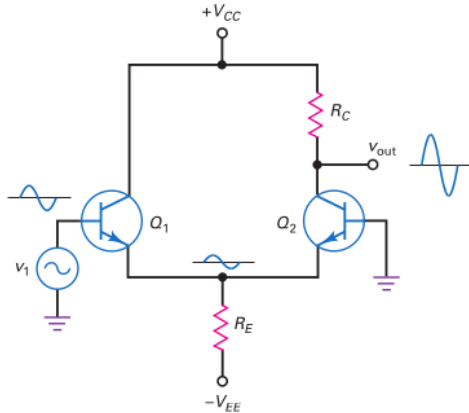
- Gambar di samping adalah noninverting input dan single-ended output.
- Dengan  $R_E$  yang besar, arus tail hampir konstan saat ada sinyal AC yang kecil.
- Jika arus emitter di  $Q_1$  meningkat maka arus emitter di  $Q_2$  menurun, dan sebaliknya.

# Teori Operasi



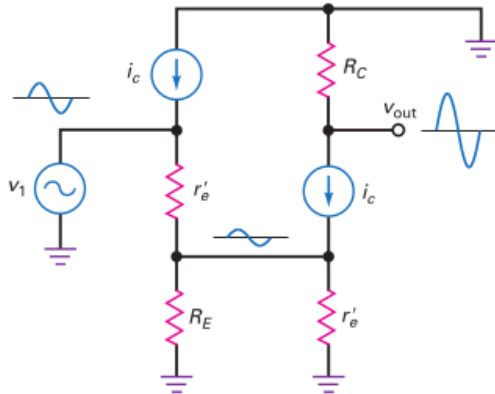
- Transistor  $Q_1$  bertindak seperti emitter follower yang menghasilkan tegangan AC di seberang resistor emitter.
- Tegangan AC ini bernilai setengah dari tegangan input  $v_1$
- Pada setengah siklus positif dari tegangan input, arus emitter  $Q_1$  meningkat, arus emitter  $Q_2$  menurun, dan tegangan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

# Teori Operasi



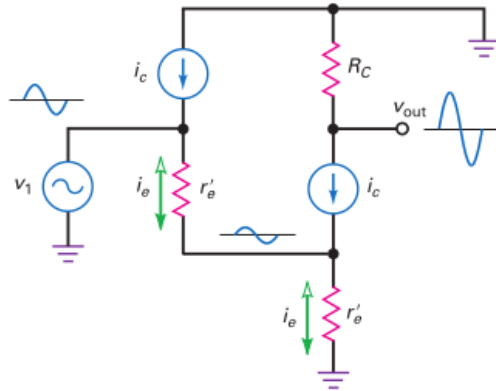
- Sama halnya pada setengah siklus negatif dari tegangan input, arus emitter  $Q_1$  menurun, arus emitter  $Q_2$  meningkat, dan tegangan collector  $Q_2$  menurun.
- Hal ini yang menyebabkan gelombang sinus yang dikuatkan memiliki fasa yang sama dengan noninverting input.

## Single-ended output gain



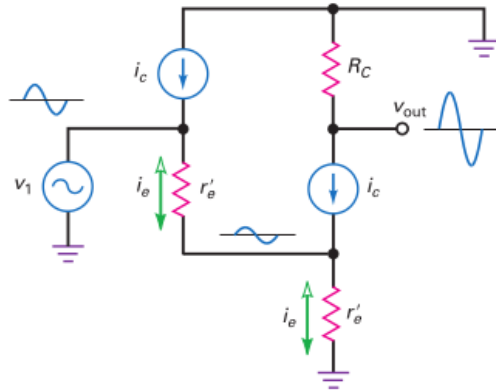
- Gambar di samping adalah rangkaian ekivalennya
- Setiap transistor memiliki  $r'_e$
- $R_E$  paralel dengan  $r'_e$  pada transistor kanan karena base dari  $Q_2$  di-grounding.
- Karena  $R_E$  jauh lebih besar dari  $r'_e$  maka  $R_E$  bisa diabaikan.
- Sehingga kita dapat rangkaian yang lebih sederhana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

## Single-ended output gain



- Tegangan output AC:

$$v_{out} = i_c R_C$$

- Tegangan input AC:

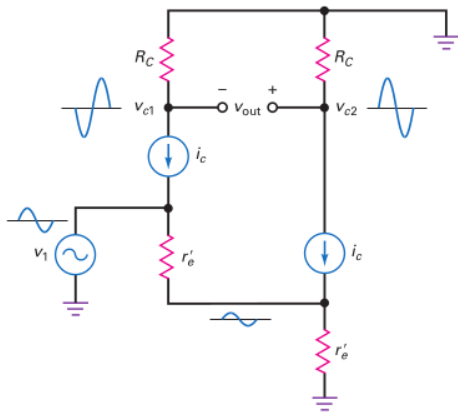
$$v_{in} = i_e r'_e + i_e r'_e = 2i_e r'_e$$

- Penguatan tegangan (voltage gain), yaitu  $v_{out}$  dibagi  $v_{in}$ , sehingga

$$\text{single-ended output: } A_v = \frac{R_C}{2r'_e} \quad (9)$$



## Differential output gain

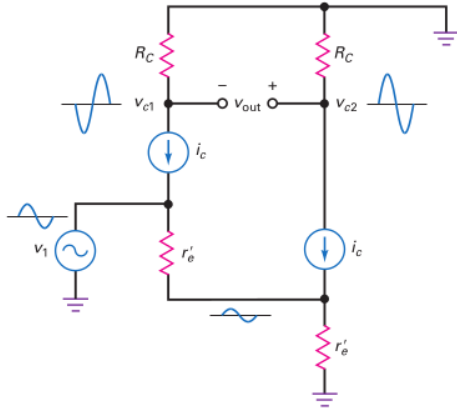


- Gambar di samping adalah rangkaian ekuivalen dari noninverting input & differential output.
- Analisis mirip dengan sebelumnya, kecuali tegangan outputnya adalah dua kalinya karena terdapat 2 resistor collector.

$$v_{out} = v_{c2} - v_{c1} = i_c R_C - (-i_c R_C) \\ = 2i_c R_C$$

- Tanda negatif  $\rightarrow$  sinyal  $v_{c1}$  memiliki beda fasa sebesar  $\pi$

## Differential output gain



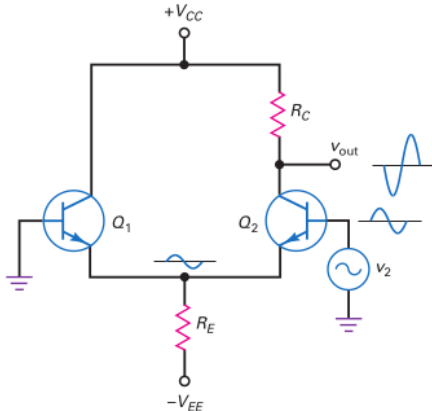
- Tegangan input AC nya masih sama

$$v_{in} = 2i_e r'_e$$

- Voltage gain :

$$\text{Differential output : } A_v = \frac{R_C}{r'_e} \quad (10)$$

## Konfigurasi inverting-input



- Gambar di samping adalah inverting input dan single-ended output
- Analisis AC hampir sama dengan analisis noninverting
- Inverting input  $v_2$  menghasilkan tegangan output yang diperkuat dan terbalik
- $r'_e$  masih bagian dari pembagi tegangan  $\rightarrow$  tegangan di seberang  $R_E$  setengah dari tegangan inverting input
- Jika menggunakan differential output, voltage gainnya adalah bernilai dua kalinya

## Konfigurasi differential-input

- Pada konfigurasi differential-input → kedua inputnya aktif secara bersamaan
- Analisis AC dengan menggunakan teorema superposisi
- Tegangan output untuk noninverting input adalah

$$v_{out} = A_v(v_1)$$

dan tegangan output untuk inverting input adalah

$$v_{out} = -A_v(v_2)$$

- Gabungkan keduanya,

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

## Impedansi input

- Pada CE stage, impedansi input dari base adalah

$$z_{in} = \beta r'_e$$

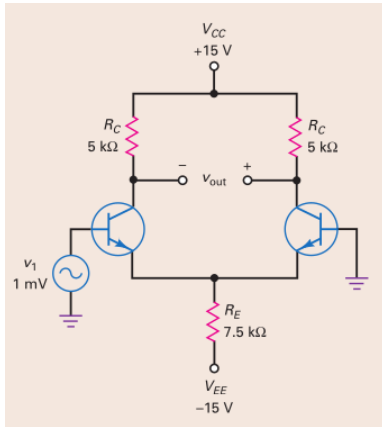
- Pada diff amp, impedansi input dari salah satu base adalah dua kalinya

$$z_{in} = 2\beta r'_e \quad (11)$$

- Karena terdapat 2 resistor emitter AC  $r'_e$  di dalam rangkaian ekivalennya

Summary Table 15-2		Diff-Amp Voltage Gains	
Input	Output	$A_v$	$V_{out}$
Differential	Differential	$R_C/r_e'$	$A_v(V_1 - V_2)$
Differential	Single-ended	$R_C/2r_e'$	$A_v(V_1 - V_2)$
Single-ended	Differential	$R_C/r_e'$	$A_vV_1$ or $-A_vV_2$
Single-ended	Single-ended	$R_C/2r_e'$	$A_vV_1$ or $-A_vV_2$

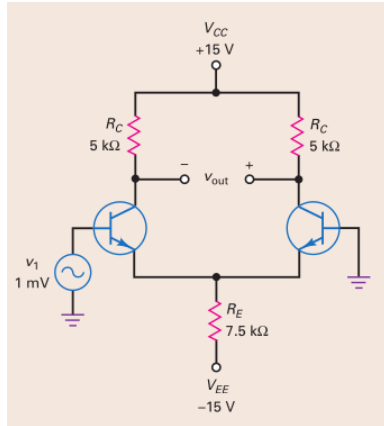
## Contoh Soal 4



### ■ Pertanyaan:

- Berdasarkan gambar di samping, berapa tegangan output AC? Jika  $\beta = 300$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?

## Contoh Soal 4



### ■ Jawaban:

- Idealnya, 15 V di seberang resistor emitter, menghasilkan arus tail sebesar 2 mA, yang artinya arus emitter DC pada masing masing transistor sebesar

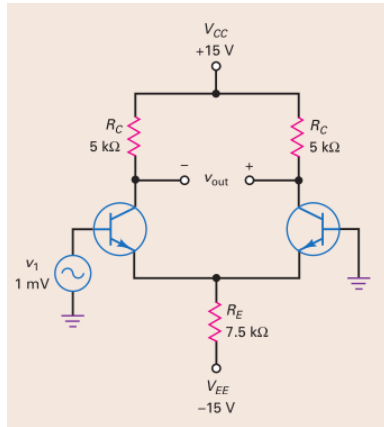
$$I_E = 1 \text{ mA}$$

- Lalu kita hitung resistansi emitternya

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \Omega$$



## Contoh Soal 4



### ■ Jawaban:

- Voltage gain:

$$A_v = \frac{R_C}{r'_e} = \frac{5 \text{ k}\Omega}{25 \text{ }\Omega} = 200$$

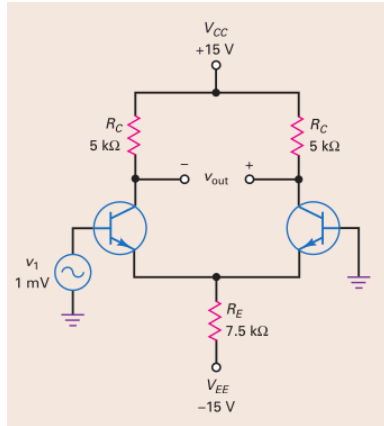
- Tegangan keluaran AC

$$v_{out} = A_v v_1 = 200(1 \text{ mV}) = 200 \text{ mV}$$

- Impedansi input

$$z_{in(base)} = 2\beta r'_e = 2(300)(25\Omega) = 15 \text{ k}\Omega$$

## Latihan Soal 4



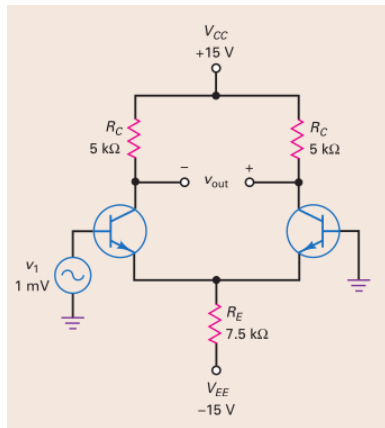
### ■ Pertanyaan:

- Berdasarkan gambar di samping, jika  $R_E = 5 \text{ k}\Omega$ , berapa tegangan output AC? Jika  $\beta = 300$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?

### ■ Jawaban:

- Silakan dikerjakan

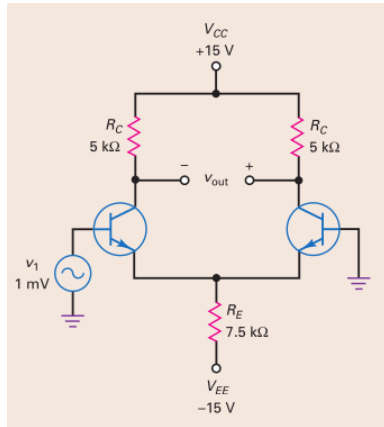
## Contoh Soal 5



### ■ Pertanyaan:

- Berdasarkan gambar di samping, jika menggunakan metode ke 2, berapa tegangan output AC? Jika  $\beta = 300$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?

## Contoh Soal 5



### ■ Jawaban:

- Tentukan arus tail

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

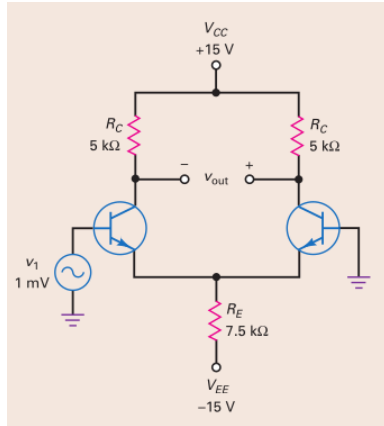
- Arus emitter DC

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

- Resistansi emitter AC

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{0.955 \text{ mA}} = 26.2 \Omega$$

## Contoh Soal 5



### ■ Jawaban:

- Voltage gain

$$A_v = \frac{R_C}{r'_e} = \frac{5 \text{ k}\Omega}{26.2 \text{ }\Omega} = 191$$

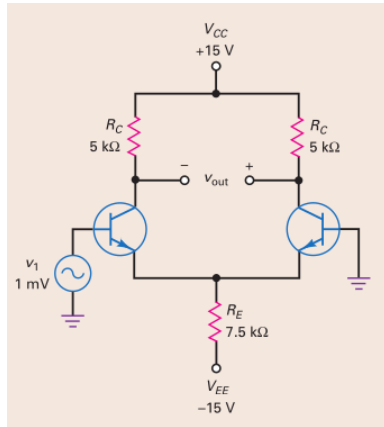
- Tegangan keluaran AC

$$v_{out} = A_v v_1 = 191(1 \text{ mV}) = 191 \text{ mV}$$

- Impedansi input

$$z_{in(base)} = 2\beta r'_e = 2(300)(26.2\Omega) = 15.7 \text{ k}\Omega$$

## Contoh Soal 6



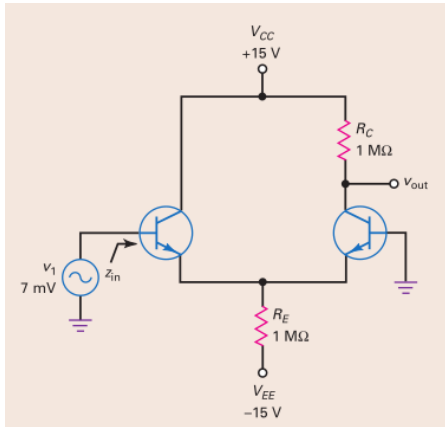
### ■ Pertanyaan:

- Jika pada gambar di samping  $v_2 = 1 \text{ mV}$  dan  $v_1 = 0$  maka berapa tegangan output AC? Jika  $\beta = 300$ , maka berapa impedansi inputnya?

### ■ Jawaban:

- Hasilnya sama dengan Contoh Soal 4, hanya saja memiliki magnitudo yang berkebalikan karena menggunakan inverting input.

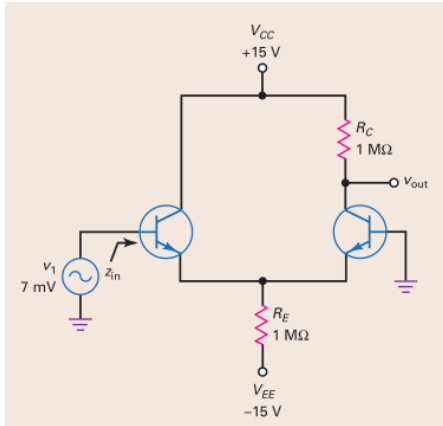
## Contoh Soal 7



### ■ Pertanyaan:

- Berdasarkan gambar di samping, jika  $\beta = 300$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?

## Contoh Soal 7



### ■ Jawaban:

- Idealnya sebesar 15 V pada emitter resistor, sehingga arus tailnya:

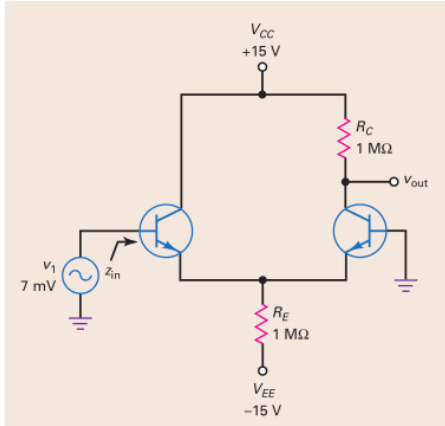
$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} = \frac{15 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega} = 15 \mu\text{A}$$

- Karena arus emitter di setiap transistornya adalah separuh dari arus tail, maka resistansi dari emitternya adalah:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{7.5 \mu\text{A}} = 3.33 \text{ k}\Omega$$



## Contoh Soal 7



### ■ Jawaban:

- Voltage gain

$$A_v = \frac{R_C}{2r'_e} = \frac{1 \text{ M}\Omega}{2(3.33 \text{ k}\Omega)} = 150$$

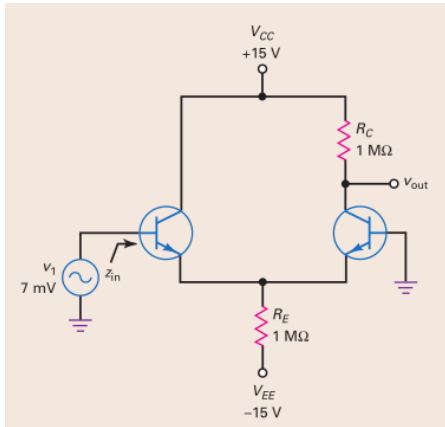
- Tegangan keluaran AC

$$v_{out} = A_v v_1 = 150(7 \text{ mV}) = 1.05 \text{ V}$$

- Impedansi input

$$\begin{aligned} Z_{in(base)} &= 2\beta r'_e = 2(300)(3.33 \text{ k}\Omega) \\ &= 2 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

## Latihan Soal 7



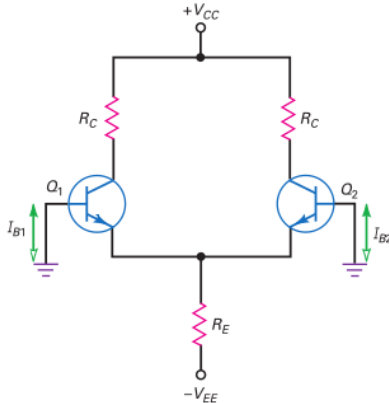
### ■ Pertanyaan:

- Berdasarkan gambar di samping, jika  $\beta = 300$  dan  $R_E = 500 \text{ k}\Omega$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?

## Karakteristik Input dari Sebuah Op Amp

- Asumsi bahwa diff amp adalah simetris (transistor yang digunakan identik) adalah metode pendekatan yang bagus untuk beberapa aplikasi.
- Namun pada aplikasi yang lebih presisi, kita tidak bisa lagi mengasumsikan bahwa kedua identik.
- Terdapat 3 karakteristik pada datasheet pada setiap op amp yang biasanya digunakan oleh para engineer yang membutuhkan jawaban yang lebih akurat.
- Karakteristik tersebut antara lain
  1. Arus bias input
  2. Arus offset input
  3. Tegangan offset input

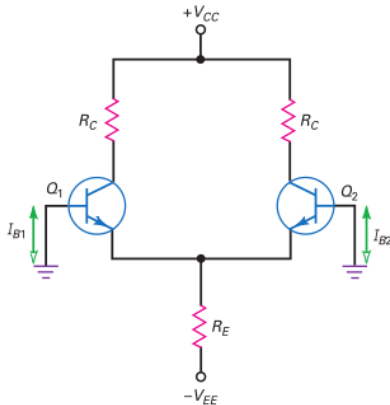
## Arus bias input



- Pada op amp yang terintegrasi,  $\beta_{dc}$  dari masing-masing transistor pada stage yang pertama sedikit berbeda
- Sehingga arus base juga sedikit berbeda, seperti yang ditampilkan pada gambar di samping.
- Arus bias input didefinisikan sebagai rata-rata dari arus base DC:

$$I_{in(bias)} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \quad (12)$$

## Arus bias input



- Misalkan, jika  $I_{B1} = 90 \text{ nA}$  dan  $I_{B2} = 70 \text{ nA}$ , maka arus bias input-nya adalah:

$$I_{in(bias)} = \frac{90 \text{ nA} + 70 \text{ nA}}{2} = 80 \text{ nA}$$

- Jika menggunakan BJT, biasanya arus bias input sebesar nanoampere. Jika menggunakan JFET, biasanya arus bias inputnya sebesar picoampere.

## Arus offset input

- Arus offset input didefinisikan sebagai perbedaan arus base DC

$$I_{in(off)} = I_{B1} - I_{B2} \quad (13)$$

- Perbedaan di dalam arus base mengindikasikan seberapa mirip transistornya.
- Jika transistornya identik, arus offset inputnya akan bernilai nol.
- Tapi, kedua transistor hampir selalu berbeda dan kedua arus basenya tidak sama.
- Misalkan, jika  $I_{B1} = 90 \text{ nA}$  dan  $I_{B2} = 70 \text{ nA}$ , maka arus offset input-nya adalah:

$$I_{in(off)} = 90 \text{ nA} - 70 \text{ nA} = 20 \text{ nA}$$

- Artinya, transistor  $Q_1$  memiliki lebih 20 nA arus base dari pada transistor  $Q_2$ . Hal ini akan menyebabkan masalah nantinya ketika menggunakan resistansi base yang besar.

## Arus base dan offset

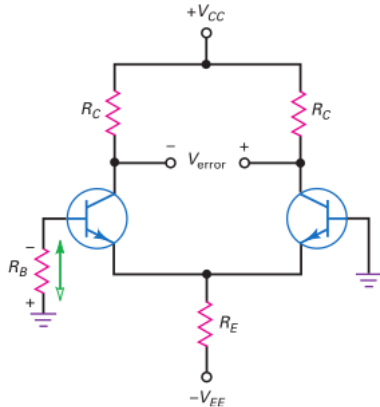
- Kita bisa turunkan persamaan arus bias dan arus offset input menjadi:

$$I_{B1} = I_{in(bias)} + \frac{I_{in(off)}}{2} \quad (13.a)$$

$$I_{B2} = I_{in(bias)} - \frac{I_{in(off)}}{2} \quad (13.b)$$

- Datasheet hanya menunjukkan  $I_{in(bias)}$  dan  $I_{in(off)}$ , bukan  $I_{B1}$  dan  $I_{B2}$ . Sehingga dengan persamaan 13.a & 13.b, kita dapat menghitung arus base-nya.
- Persamaan 13.a & 13.b mengasumsikan bahwa  $I_{B1} > I_{B2}$ . Jika  $I_{B1} < I_{B2}$ , maka ubah urutan persamaannya.

## Pengaruh dari Arus Base



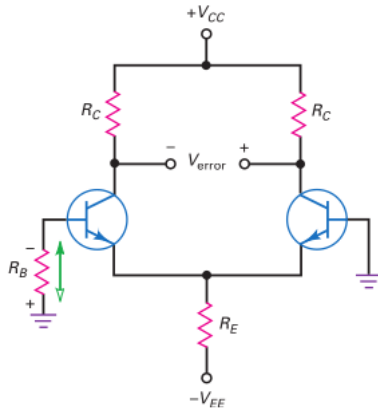
- Beberapa diff amp beroperasi dengan sebuah resistor base di satu sisi saja.
- Karena arah arus base, arus base melalui  $R_B$  menghasilkan tegangan input dc noninverting sebesar

$$V_1 = -I_{B1}R_B$$

- Resistor base menghasilkan tegangan input yang tidak diinginkan
- **Catatan:** Huruf kapital menunjukkan tegangan error dc ( $V_1$ )



## Pengaruh dari Arus Base



- Sebagai contoh, jika di datasheet  $I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$  dan  $I_{in(off)} = 20 \text{ nA}$ , maka

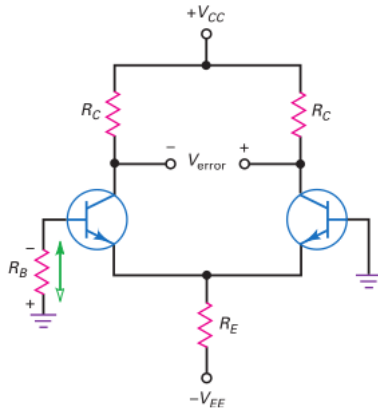
$$I_{B1} = I_{in(bias)} + \frac{I_{in(off)}}{2}$$

$$= 80 \text{ nA} + \frac{20 \text{ nA}}{2} = 90 \text{ nA}$$

$$I_{B2} = I_{in(bias)} - \frac{I_{in(off)}}{2}$$

$$= 80 \text{ nA} - \frac{20 \text{ nA}}{2} = 70 \text{ nA}$$

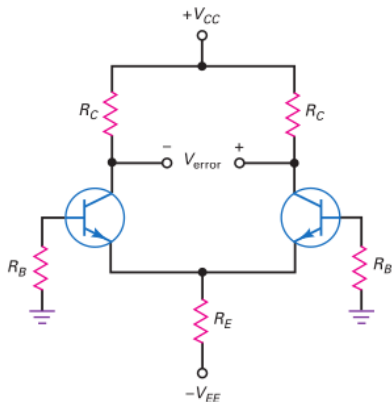
## Pengaruh dari Arus Base



- Jika  $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ , input noninverting memiliki error tegangan sebesar

$$\begin{aligned} V_1 &= -I_{B1}R_B \\ &= (90 \text{ nA})(1 \text{ k}\Omega) \\ &= 90 \mu\text{V} \end{aligned}$$

## Pengaruh dari Arus Offset Input

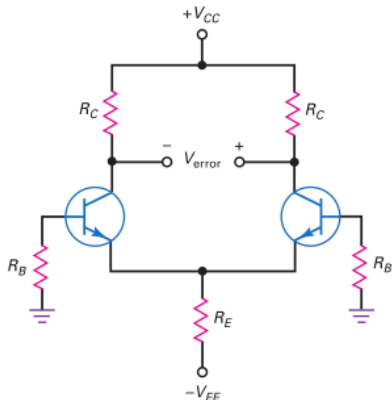


- Cara mengurangi error tegangan output dengan menggunakan resistor base yang sama pada sisi lainnya, seperti gambar di samping.
- Sehingga kita memiliki differential dc input

$$\begin{aligned} V_{in} &= I_{B1}R_B - I_{B2}R_B \\ &= (I_{B1} - I_{B2})R_B \end{aligned}$$

$$V_{in} = I_{in(off)}R_B \quad (14)$$

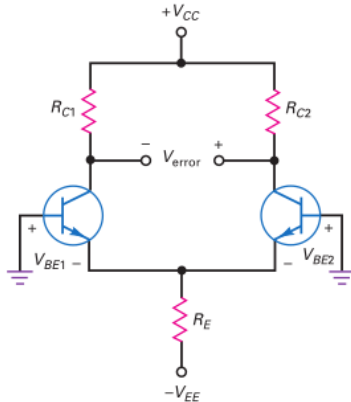
## Pengaruh dari Arus Offset Input



- Karena biasanya  $I_{in(off)} < (0.25)(I_{in(bias)})$ , error tegangan input jauh lebih kecil ketika resistor base yang sama digunakan.
- Sebagai contoh, jika  $I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$  dan  $I_{in(off)} = 20 \text{ nA}$ , lalu resistor base sebesar  $1 \text{ k}\Omega$  menghasilkan error tegangan input sebesar

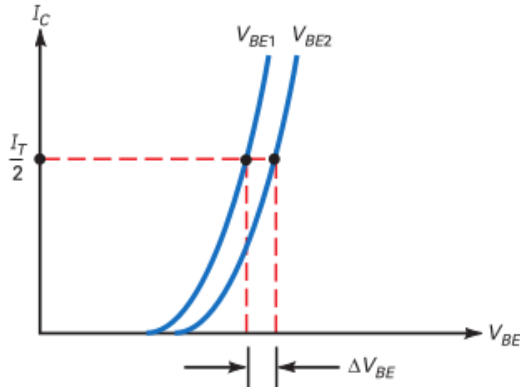
$$\begin{aligned} V_{in} &= (I_{in(off)})(R_B) \\ &= (20 \text{ nA})(1 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ }\mu\text{V} \end{aligned}$$

# Tegangan Offset Input



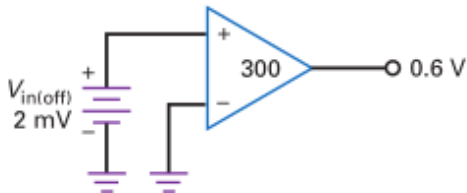
- Ketika diff amp terintegrasi sebagai first stage dari op amp, kedua sisinya hampir identik
- Kedua resistor collector bisa saja berbeda
- Akibatnya muncul error tegangan di output-nya

## Tegangan Offset Input



- Sumber error lainnya adalah perbedaan kurva  $V_{BE}$  dari transistornya
- Sebagai contoh, anggaplah kedua kurva base-emitter memiliki arus yang sama seperti gambar di samping
- Karena kurva tersebut berbeda, maka terdapat perbedaan antara kedua  $V_{BE}$
- Perbedaan ini menyebabkan penambahan error tegangan

## Tegangan Offset Input

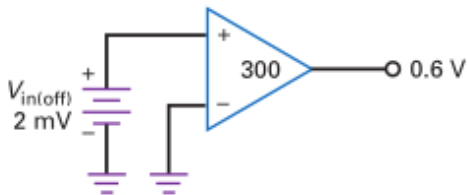


- Tegangan offset input = tegangan input yang menghasilkan error tegangan output yang sama di diff amp yang ideal

$$V_{in(off)} = \frac{V_{error}}{A_v} \quad (15)$$

- $V_{error}$  tidak menyertakan efek bias input dan arus offset karena kedua base di-ground ketika  $V_{error}$  diukur.

## Tegangan Offset Input



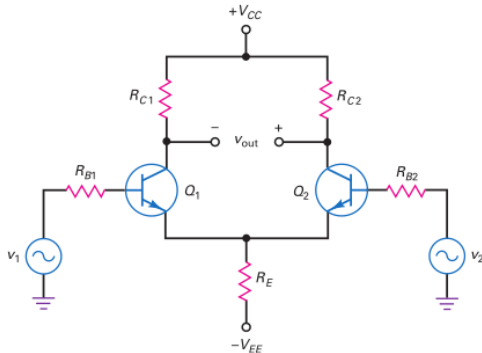
- Sebagai contoh, jika diff amp memiliki error tegangan sebesar 0.6 V dan penguatan tegangan sebesar 300, tegangan offset input adalah

$$V_{in(off)} = \frac{V_{error}}{A_v} = \frac{0.6 \text{ V}}{300} = 2 \text{ mV}$$

- Gambar di samping mengilustrasikan tegangan offset input sebesar 2 mV menghasilkan error tegangan sebesar 0.6 V



# Efek Gabungan



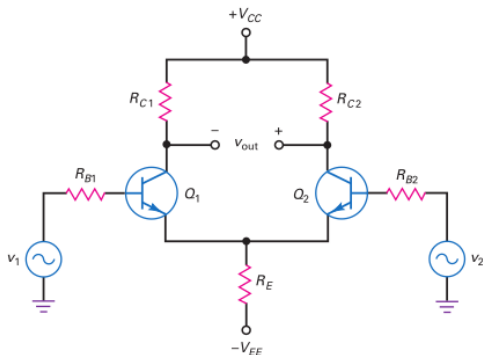
- Tegangan output adalah superposisi dari semua efek input
- Terdapat input ac ideal:

$$v_{in} = v_1 - v_2$$

- Dari 2 sumber input, dikuatkan, menghasilkan output ac yang diinginkan:

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

## Efek Gabungan



- terdapat 3 error input dc:

$$V_{1err} = (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \quad (16)$$

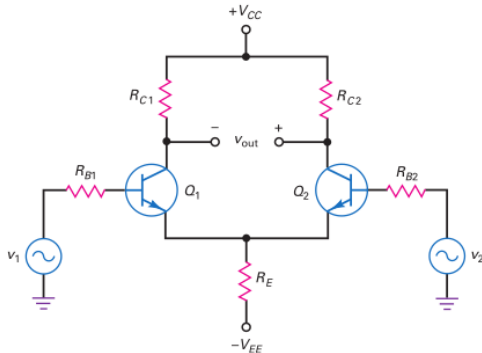
$$V_{2err} = (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \quad (17)$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} \quad (18)$$

- Ketiga error dc dikuatkan kemudian menghasilkan error tegangan output:

$$V_{error} = A_v(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err}) \quad (19)$$

# Efek Gabungan



- Dalam aplikasinya,  $V_{error}$  dapat diabaikan. Misalnya kita akan membuat ac amplifier,  $V_{error}$  tidak lah penting. Kecuali kita akan membuat dc amplifier yang presisi, maka  $V_{error}$  perlu diperhatikan.

## Resistor Base yang Sama

- Ketika error offset dan bias tidak dapat diabaikan, maka hal yang bisa dilakukan adalah gunakan resistor base yang sama:  $R_{B1} = R_{B2} = R_B$
- Karena:

$$V_{1err} = 0$$

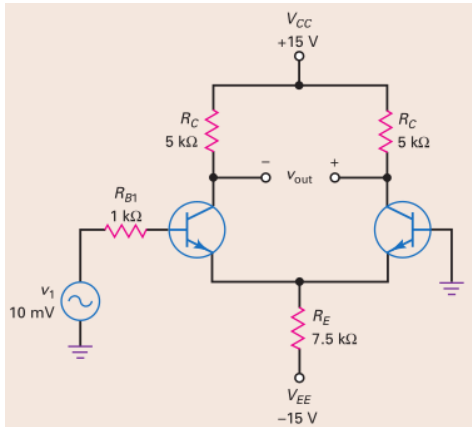
$$V_{2err} = R_B I_{in(off)}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)}$$

- Atau bisa menggunakan rangkaian nulling yang tersedia di datasheet ← akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

Summary Table 15-3		Sources of Output Error Voltage
Description	Cause	Solution
Input bias current	Voltage across a single RB	Use equal RB on other side
Input offset current	Unequal current gains	Data sheet nulling methods
Input offset voltage	Unequal RC and VBE	Data sheet nulling methods

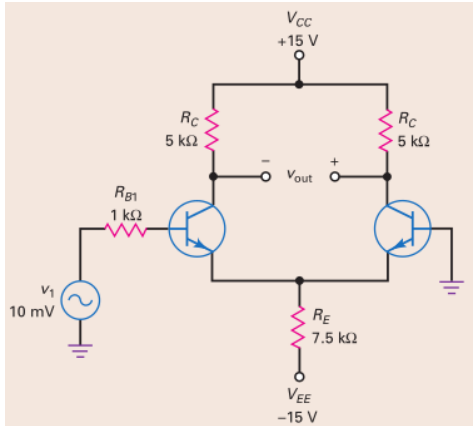
## Contoh Soal 8



### ■ Pertanyaan:

- Diff amp di samping memiliki  $A_v = 200$ ,  
 $I_{in(bias)} = 3 \mu A$ ,  
 $I_{in(off)} = 0.5 \mu A$ ,  
 $V_{in(off)} = 1 mV$ .
- Berapa error tegangan output?
- Jika menggunakan resistor base yang identik, berapa error tegangan output?

## Contoh Soal 8



### ■ Jawaban:

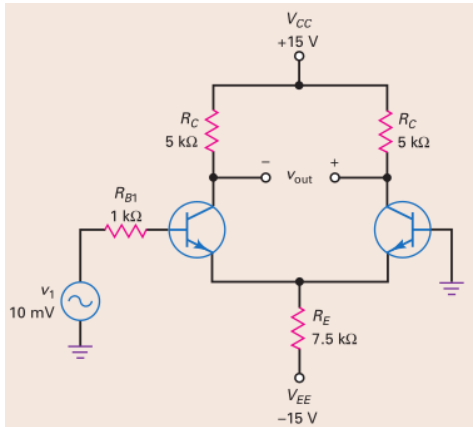
- Masing-masing error tegangan:

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (1 \text{ k}\Omega)(3 \text{ }\mu\text{A}) = 3 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \\ &= (1 \text{ k}\Omega)(0.25 \text{ }\mu\text{A}) = 0.25 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 1 \text{ mV}$$

## Contoh Soal 8



### ■ Jawaban:

- Error tegangan output:

$$\begin{aligned}
 V_{error} &= A_v(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err}) \\
 &= 200(3 \text{ mV} + 0.25 \text{ mV} + 1 \text{ mV}) \\
 &= 850 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

- Jika menggunakan resistor base yang identik di bagian inverting input:

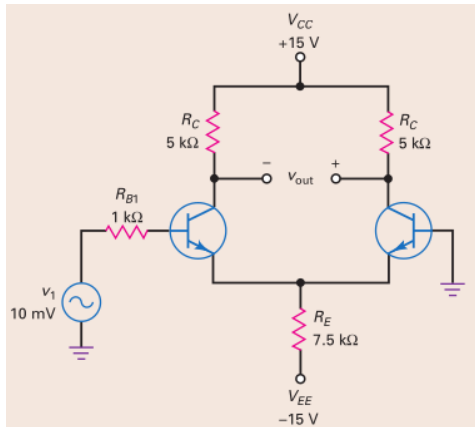
$$V_{1err} = 0$$

$$\begin{aligned}
 V_{2err} &= R_B I_{in(off)} \\
 &= (1 \text{ k}\Omega)(0.5 \text{ }\mu\text{A}) = 0.5 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 1 \text{ mV}$$



## Contoh Soal 8

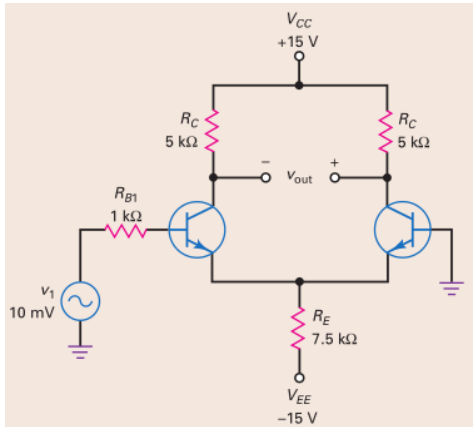


■ Jawaban:

□ Error tegangan output:

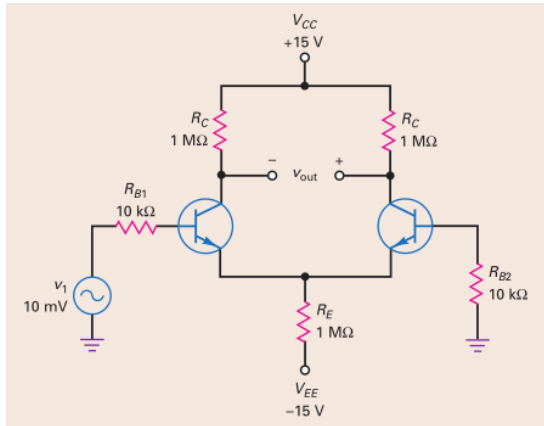
$$\begin{aligned}
 V_{error} &= A_v(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err}) \\
 &= 200(0.5 \text{ mV} + 1 \text{ mV}) \\
 &= 300 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

## Latihan Soal 8



- Pertanyaan:
  - Berapa error tegangan output jika diff amp tersebut di samping memiliki penguatan tegangan sebesar 150?
- Jawaban: *Silakan dikerjakan*

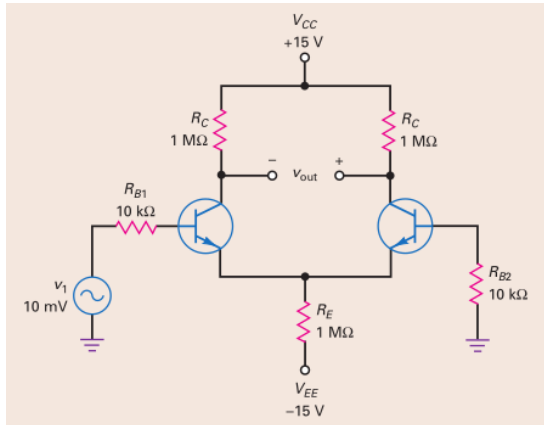
## Contoh Soal 9



### ■ Pertanyaan:

- Diketahui diff amp memiliki  $A_v = 300$ ,  
 $I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$ ,  
 $I_{in(off)} = 20 \text{ nA}$ , dan  
 $V_{in(off)} = 5 \text{ mV}$ .
- Berapa error tegangan output?

## Contoh Soal 9



### ■ Jawaban:

- Rangkaian tersebut menggunakan resistor base yang sama, maka:

$$V_{1err} = 0$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= R_B I_{in(off)} \\ &= (10 \text{ k}\Omega)(20 \text{ nA}) = 0.2 \text{ mV} \end{aligned}$$

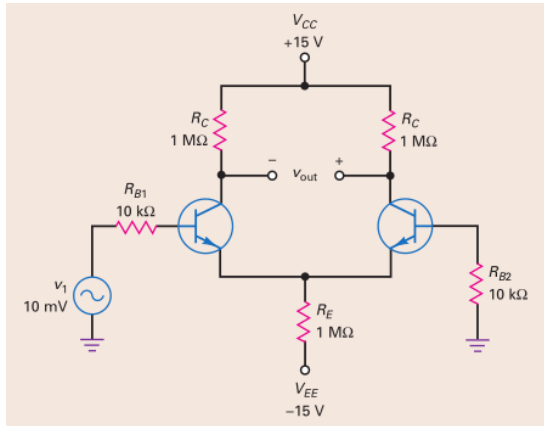
$$V_{3err} = V_{in(off)} = 5 \text{ mV}$$

- Total error tegangan output:

$$\begin{aligned} V_{error} &= A_v (V_{1err} + V_{2err} + V_{3err}) \\ &= 300(0.2 \text{ mV} + 5 \text{ mV}) \end{aligned}$$

$$V_{error} = 1.56 \text{ V}$$

## Latihan Soal 9

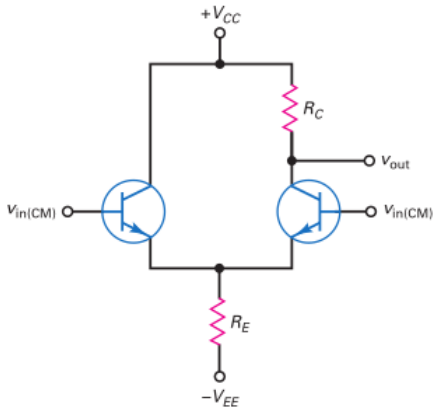


### ■ Pertanyaan:

- Diketahui diff amp memiliki  $A_v = 300$ ,  
 $I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$ ,  
 $I_{in(off)} = 10 \text{ nA}$ , dan  
 $V_{in(off)} = 5 \text{ mV}$ .
- Berapa error tegangan output?

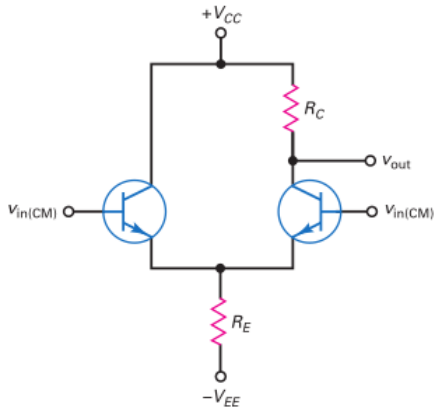
### ■ Jawaban: *Silakan dikerjakan*

# Common-Mode Signal



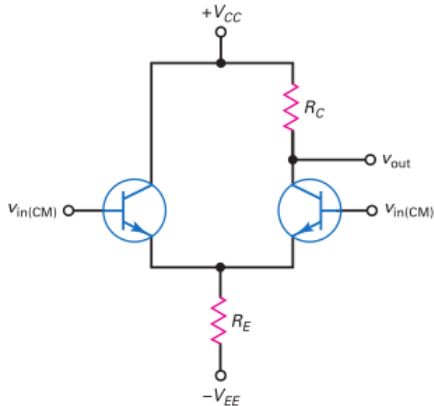
- Rangkaian differential input dan single-ended output
- Tegangan input yang sama ( $v_{in(CM)}$ ) di setiap base → **common-mode signal**
- Jika diff amp benar-benar simetris → tidak ada tegangan output ac dengan common-mode signal karena  $v_1 = v_2$
- Jika diff amp tidak simetris → ada tegangan output ac yang kecil

# Common-Mode Signal



- Rangkaian differential input dan single-ended output
- Tegangan input yang sama ( $v_{in(CM)}$ ) di setiap base → **common-mode signal**
- Jika diff amp benar-benar simetris → tidak ada tegangan output ac dengan common-mode signal karena  $v_1 = v_2$
- Jika diff amp tidak simetris → ada tegangan output ac yang kecil
- Jika  $v_1 = v_2$  maka  $v_{out} = 0$ , lalu untuk apa?

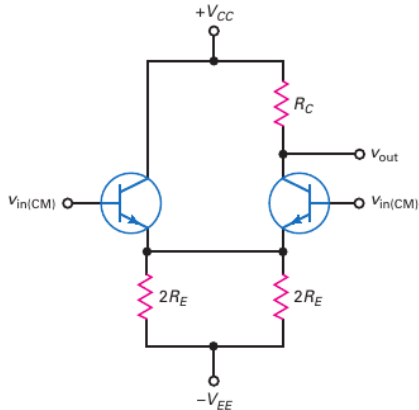
# Common-Mode Signal



- Sebagian besar noise static atau interference = common-mode signal
- Bagaimana common-mode signal bisa muncul? → Wiring pada base mirip antena kecil.
- Lingkungannya dif amp banyak gelombang elektromagnetik → tiap base akan mengambil sinyal tegangan yang tidak diinginkan
- Alasan utama menggunakan diff amp sebagai first stage dari op amp → diff amp tidak menguatkan common-mode signal

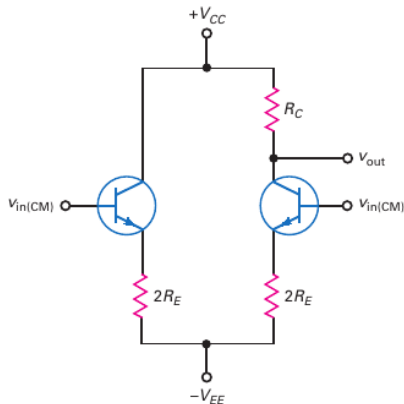


# Common-Mode Signal



- Karena kedua tegangan  $v_{in(CM)}$  sama maka hampir tidak ada arus yang mengalir antara kedua emitter.
- Sehingga rangkaian di samping menjadi sebagai berikut ini (slide selanjutnya)

## Common-Mode Signal



- Dengan common-mode signal, rangkaian bagian kanan ekuivalen dengan heavily swamped CE amplifier
- Karena  $R_E$  jauh lebih besar daripada  $r'_e$ , swamped voltage gain (penguatan tegangan terbenam) adalah

$$A_{v(CM)} = \frac{R_C}{2R_E} \quad (20)$$

- Biasanya  $A_{v(CM)} < 1$

## Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)

- Common-Mode Rejection Ratio (CMRR) :

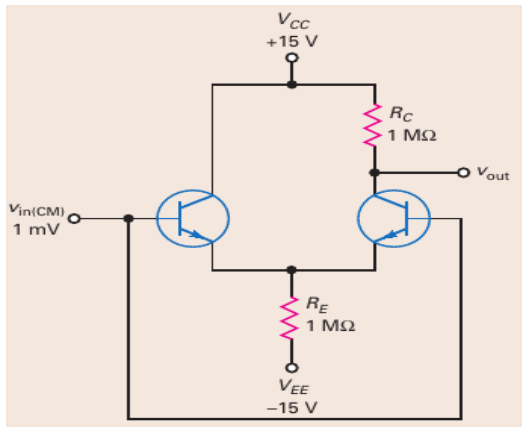
$$\text{CMRR} = \frac{A_v}{A_{v(CM)}} \quad (21)$$

- Misalkan  $A_v = 200$  dan  $A_{v(CM)} = 0.5$  maka  $\text{CMRR} = 400$
- Semakin tinggi nilai CMRR, maka semakin baik.
- CMRR yang tinggi : menaikkan sinyal yang diinginkan dan tidak untuk common-mode signal-nya
- Datasheet biasanya menampilkan CMRR dalam satuan decibels (dB)

$$\text{CMRR}_{dB} = 20 \log \text{CMRR} \quad (22)$$

- Misalkan  $\text{CMRR} = 400$  maka  $\text{CMRR}_{dB} = 52 \text{ dB}$

## Contoh Soal 10



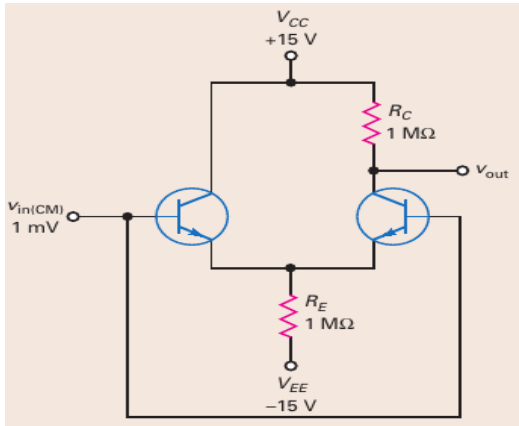
### ■ Pertanyaan:

- Berapa common-mode voltage gain?
- Berapa tegangan output?

### ■ Jawaban:

- $A_{v(CM)} = \frac{R_C}{2R_E} = \frac{1 \text{ M}\Omega}{1 \text{ M}\Omega} = 0.5$
- $v_{out} = \frac{0.5}{1 \text{ mV}} = 0.5 \text{ mV}$
- Terbukti bahwa diff amp melemahkan common-mode signal daripada menguatkannya

## Latihan Soal 10



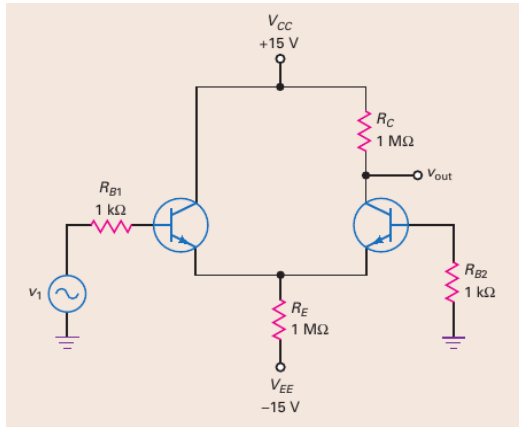
### ■ Pertanyaan:

- ☐ Jika  $R_E = 2 \text{ M}\Omega$
- ☐ Berapa common-mode voltage gain?
- ☐ Berapa tegangan output?

### ■ Jawaban:

- ☐ Silakan dikerjakan

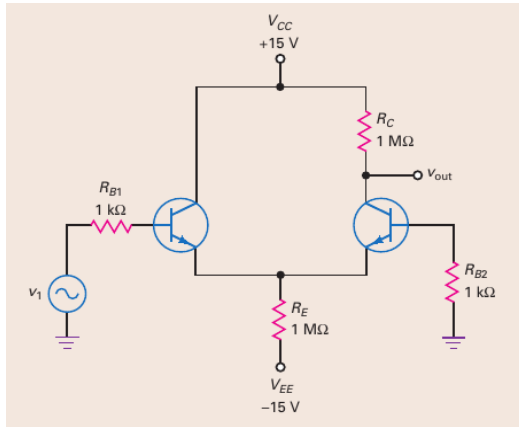
## Contoh Soal 11



### ■ Pertanyaan:

- Diketahui:  $A_v = 150$ ,  $A_{v(CM)} = 0.5$ , dan  $v_1 = 1 \text{ mV}$ .
- Jika base menerima common-mode signal sebesar  $1 \text{ mV}$ , berapa tegangan output?

## Contoh Soal 11



### ■ Jawaban:

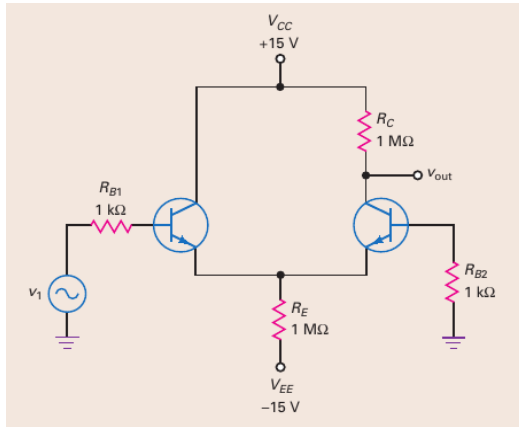
- Input memiliki 2 komponen: sinyal yang diinginkan dan common-mode signal dengan amplitudo yang sama
- Sinyal yang diinginkan akan dikuatkan:

$$v_{out1} = A_v v_1 = (150)(1 \text{ mV}) = 150 \text{ mV}$$

- Common-mode signal akan dilemahkan:

$$v_{out1} = A_{v(CM)} v_1 = (0.5)(1 \text{ mV}) = 0.5 \text{ mV}$$

## Contoh Soal 11



### ■ Jawaban:

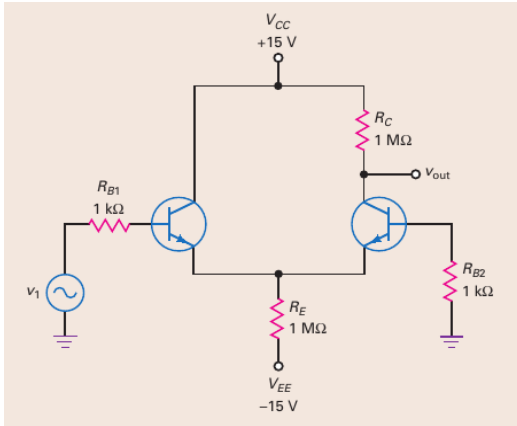
- Output total:

$$v_{out} = v_{out1} + v_{out2} = 150.5 \text{ mV}$$

- Output mengandung kedua komponen tsb, tapi komponen yang diinginkan lebih besar 300 kali lipat daripada komponen yang tidak diinginkan



## Latihan Soal 11



### ■ Pertanyaan:

- Diketahui:  $A_v = 200$ ,  $A_{v(CM)} = 0.5$ , dan  $v_1 = 1 \text{ mV}$ .
- Jika base menerima common-mode signal sebesar  $1 \text{ mV}$ , berapa tegangan output?

### ■ Jawaban:

- Silakan dikerjakan

## Contoh Soal 12

■ Pertanyaan:

- Diketahui sebuah op-amp 741 dengan  $A_v = 200000$  dan  $CMRR_{dB} = 90$  dB
- Berapa common-mode voltage gain?
- Jika kedua input (yang diinginkan dan common-mode signal) bernilai  $1 \mu V$ , berapa tegangan output?

## Contoh Soal 12

■ Jawaban:

□ CMMR :

$$\begin{aligned} CMRR_{dB} = 20 \log CMRR \rightarrow CMRR &= \log^{-1} \frac{CMRR_{dB}}{20} \\ &= \log^{-1} \frac{90 \text{ dB}}{20} = 31600 \end{aligned}$$

□  $A_{V(CM)}$ :

$$A_{V(CM)} = \frac{A_v}{CMRR}$$

□ komponen output yang diinginkan:

$$v_{out1} = 200000(1\mu V) = 0.2 \text{ V}$$

□ common-mode output:

$$v_{out2} = 6.32(1\mu V) = 6.32 \text{ V}$$

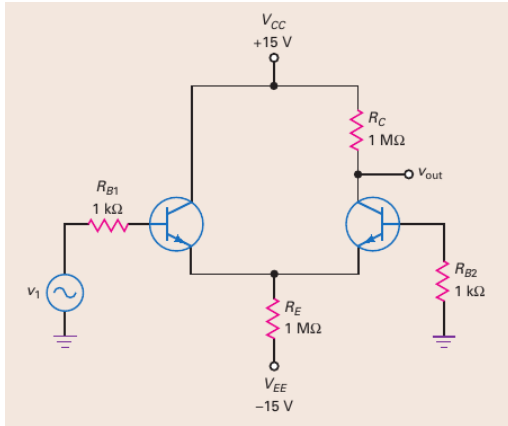
□ output yang diinginkan  $>$  common-mode output

## Latihan Soal 12

■ Pertanyaan:

- Diketahui sebuah op-amp 741 dengan  $A_v = 100000$  dan  $CMRR_{dB} = 90$  dB
- Berapa common-mode voltage gain?
- Jika kedua input (yang diinginkan dan common-mode signal) bernilai  $1 \mu V$ , berapa tegangan output?

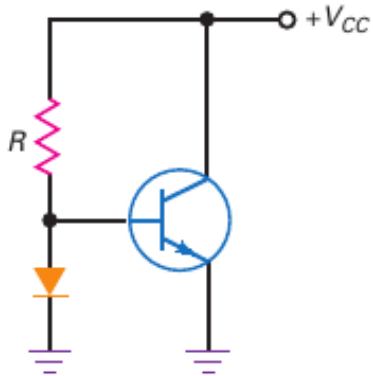
# The Current Mirror



- Ada cara untuk meningkatkan voltage gain dan CMRR dari diff amp dengan menggunakan compensating diode yang paralel terhadap emitter diode transistor
- Arus yang melalui resistor  $R$  :

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \quad (23)$$

# The Current Mirror



- Jika compensating diode dan emitter diode memiliki kurva I-v yang sama maka arus collector = arus resistor

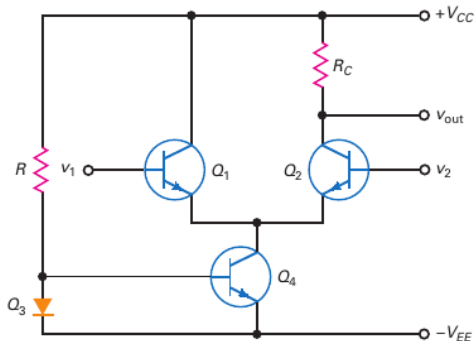
$$I_C = I_R \quad (24)$$

- **Current mirror** → arus collector = "*mirror image*" dari arus resistor

## Current Mirror Sources the Tail Current

- Pada single-ended output, voltage gain diff amp adalah  $\frac{R_C}{2r'_e}$  dan common-mode voltage gain adalah  $\frac{R_C}{2R_E}$
- Rasio dari kedua gain adalah  $CMRR = \frac{R_E}{r'_e}$
- Semakin besar  $R_E$  amak semakin besar  $CMRR$

## Current Mirror Sources the Tail Current



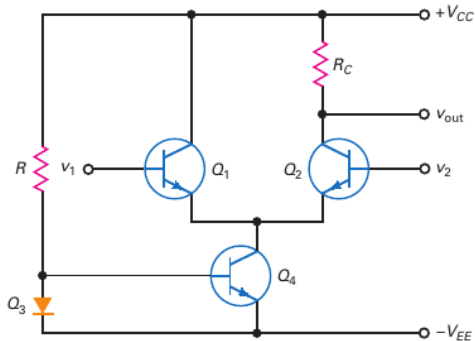
- Cara untuk memperbesar  $R_E$  ekuivalen adalah dengan menggunakan current mirror untuk menghasilkan tail current
- Arus yang melalui compensating diode

$$I_R = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R} \quad (25)$$

- Current mirror  $\rightarrow$  tail current memiliki nilai yang sama

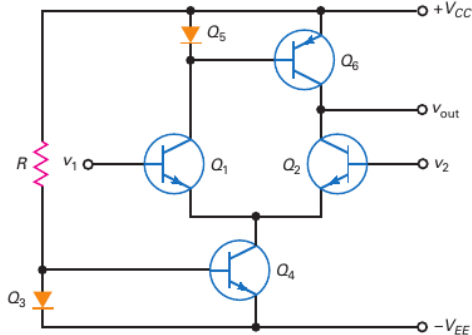


## Current Mirror Sources the Tail Current



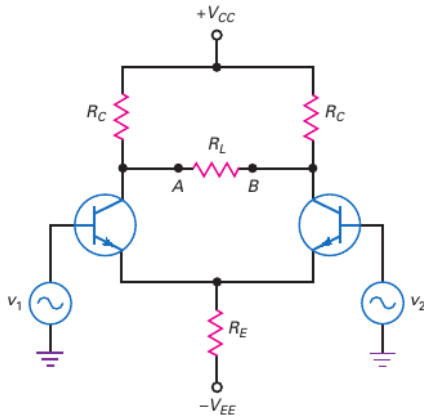
- $Q_4$  bertindak seperti sumber arus ← memiliki impedansi yang sangat besar
- Akibatnya,  $R_E$  ekuivalen memiliki ratusan  $M\Omega \rightarrow CMRR$  akan naik drastis
- $Q_3$  sebagai dioda, karena base & collector transistor  $Q_3$  terhubung  $\rightarrow$  biasanya ada di dalam IC

# Active Load



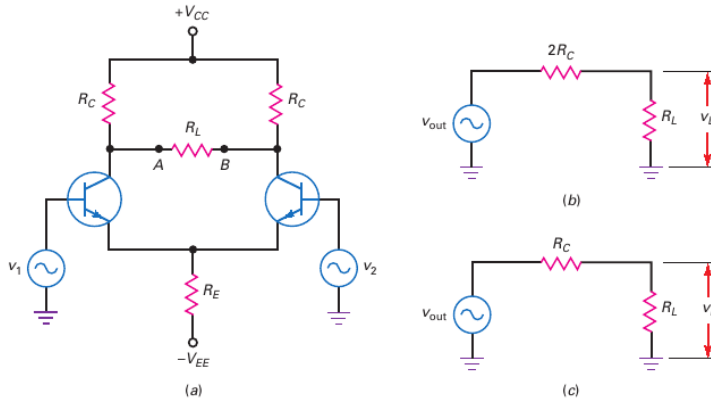
- $A_v = R_C / 2r'_e$
- $R_C$  naik  $\rightarrow A_v$  naik
- Gunakan current mirror sebagai active load resistor
- Karena  $Q_6$  *pnp* sumber arus,  $Q_2$  ekivalen  $R_C$  dengan ratusan  $M\Omega$
- Hasilnya: Voltage gain jauh lebih besar dengan menggunakan active load daripada resistor biasa.
- Active load ini banyak digunakan di op-amp

## Diff Amp Terbeban



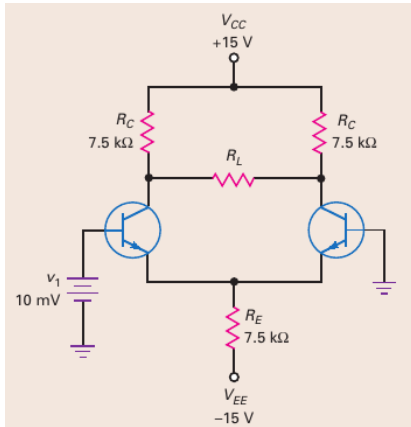
- Materi sebelumnya, diff amp tidak menggunakan resistor beban
- Penambahan resistor beban → analisis menjadi lebih rumit, terlebih lagi jika menggunakan differential output
- Resistor beban di antara collector
- Analisis:
  - Metode loop → sulit
  - Metode teorema Thevenin → lebih mudah

# Diff Amp Terbeban



**Gambar. 2:** (a) Diff amp dengan resistor beban, (b) Rangkaian ekivalen Thevenin untuk differential output, (c) Rangkaian ekivalen Thevenin untuk single-ended output

## Contoh Soal 13



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan beban jika  $R_L = 15 \text{ k}\Omega$  ?

### ■ Jawaban:

- Idealnya:

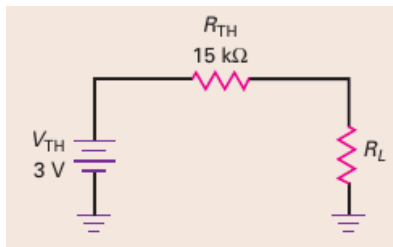
$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} = \frac{15 \text{ V}}{7.5 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

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

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \text{ }\Omega$$

$$A_v = \frac{R_C}{r'_e} = \frac{7.5 \text{ k}\Omega}{25 \text{ }\Omega} = 300$$

## Contoh Soal 13



### ■ Jawaban:

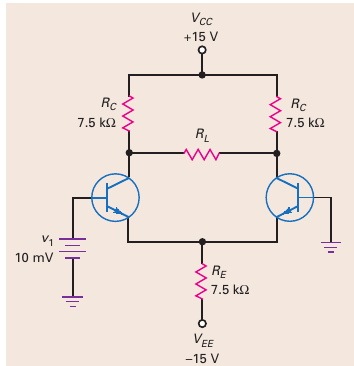
- Resistor Thevenin:

$$R_{TH} = 2R_C = 2(7.5 \text{ k}\Omega) = 15 \text{ k}\Omega$$

- Tegangan beban:

$$v_L = 0.5(3 \text{ V}) = 1.5 \text{ V}$$

## Latihan Soal 13



- Pertanyaan:
  - Tentukan tegangan bebannya jika  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$
- Jawaban:
  - Silakan dikerjakan.

TERIMA KASIH