

# 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

---

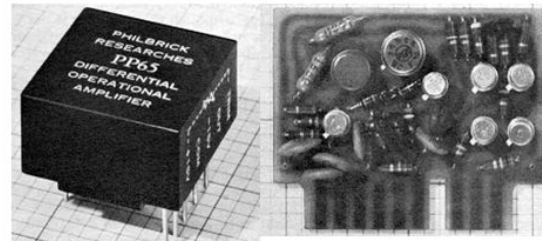
- Istilah Operational amplifier (op-amp) merujuk kepada sebuah amplifier/penguat yang menjalankan suatu operasi matematika.
- Dalam sejarahnya, op-amp pertama digunakan di dalam komputer analog untuk melakukan operasi penjumlahan, perkalian dan lainnya.
- Op-amp dibuat sebagai sirkuit diskrit → sekarang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

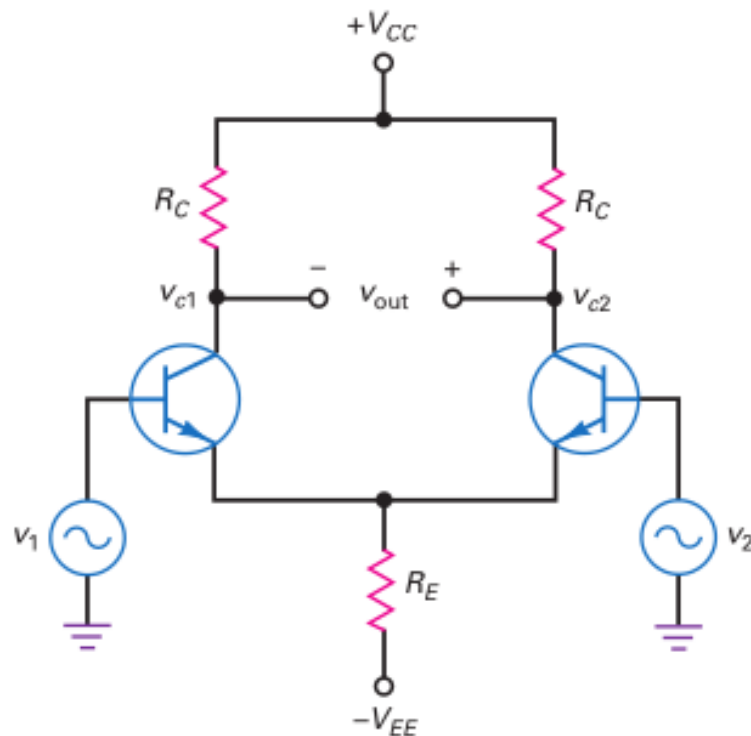
---

- 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

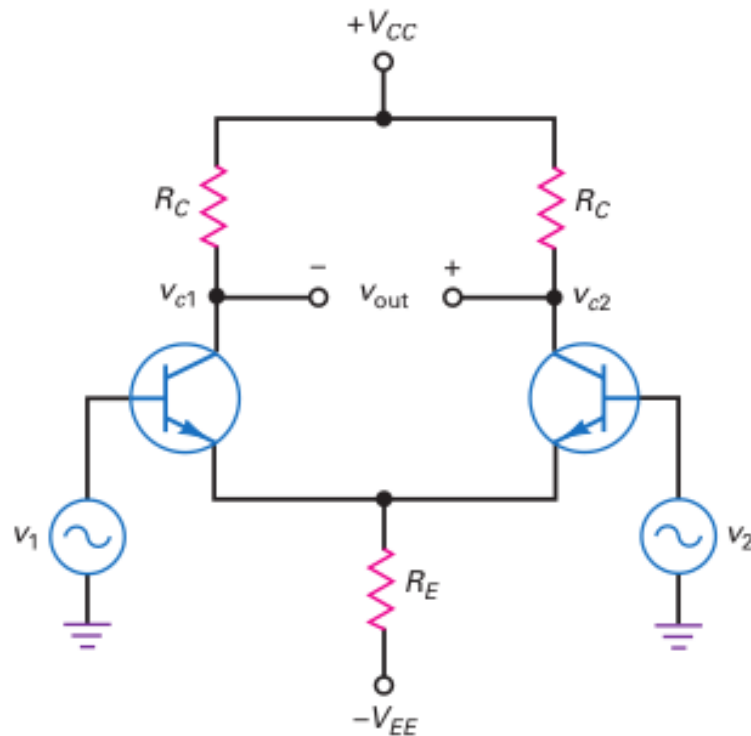
## Differential Input dan Output



- 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



## Differential Input dan Output

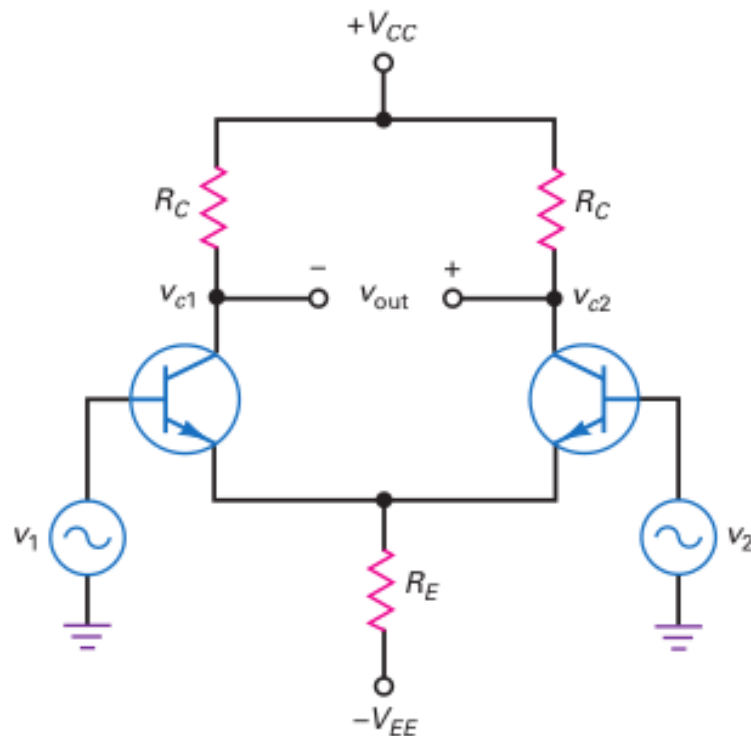


- Tegangan output AC :

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

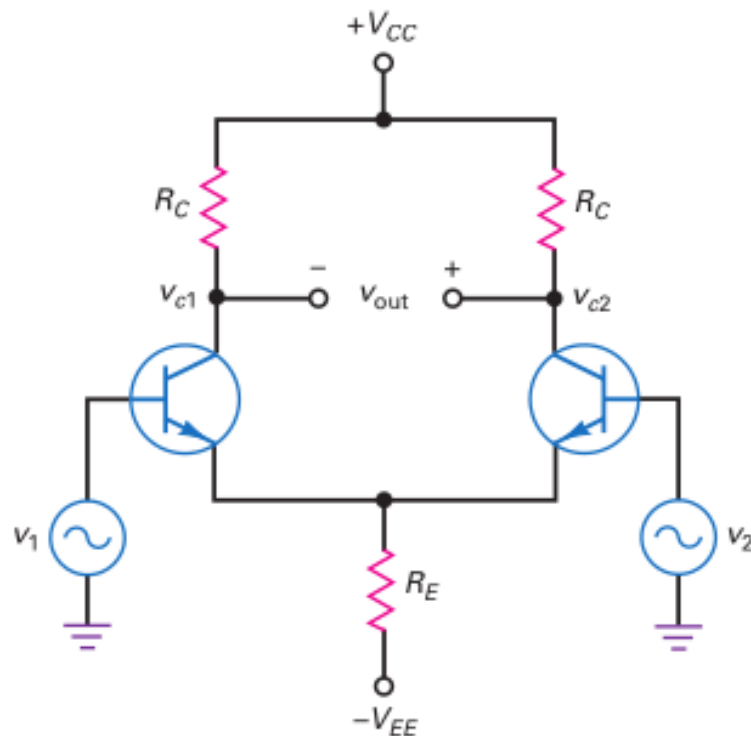
- $V_{out}$  = differential output, karena menggabungkan 2 tegangan collector.
- Transistor yang identik + resistor collector yang sama  $\rightarrow$  ideal
- $v_1 = v_2 \rightarrow v_{out} = 0$
- $v_1 > v_2 \rightarrow v_{out}$  memiliki polaritas seperti gambar di samping.
- $v_1 < v_2 \rightarrow v_{out}$  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  $180^\circ$  dengan  $v_2$
- Terkadang, noninverting input yang digunakan dan inverting input di-grounding, terkadang juga sebaliknya.

## Differential Input dan Output

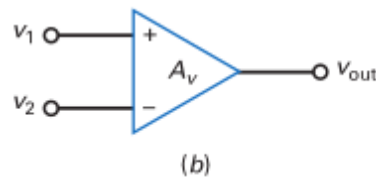
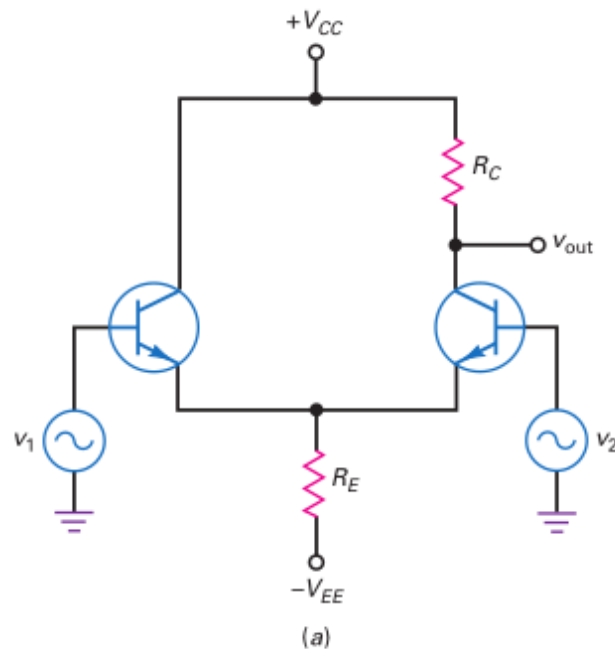


- Jika kedua input-nya ada, input totalnya disebut differential input karena tegangan output sama dengan penguatan tegangan (voltage gain)  $\times$  selisih dari kedua tegangan input.

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

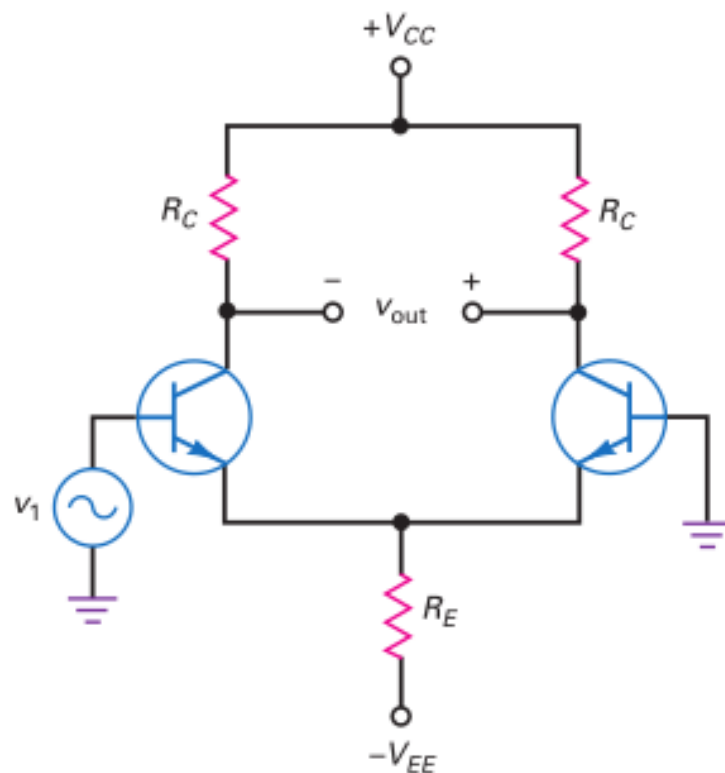
- $A_v$  = penguatan tegangan/ voltage gain

# 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



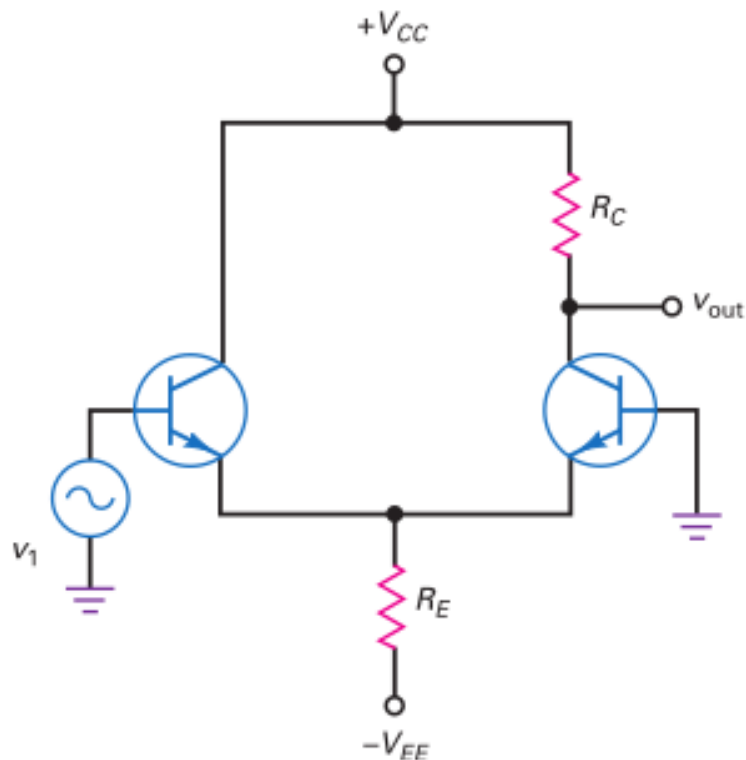
- Konfigurasi ini memiliki

- Noninverting input
- Differential output

- Karena  $v_2 = 0$ , maka

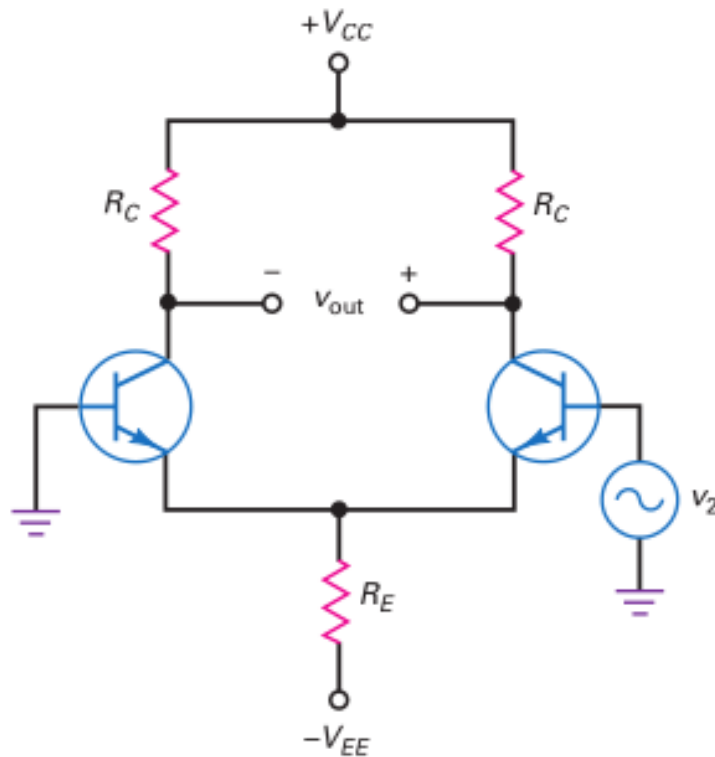
$$v_{out} = A_v(v_1) \quad (3)$$

## 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

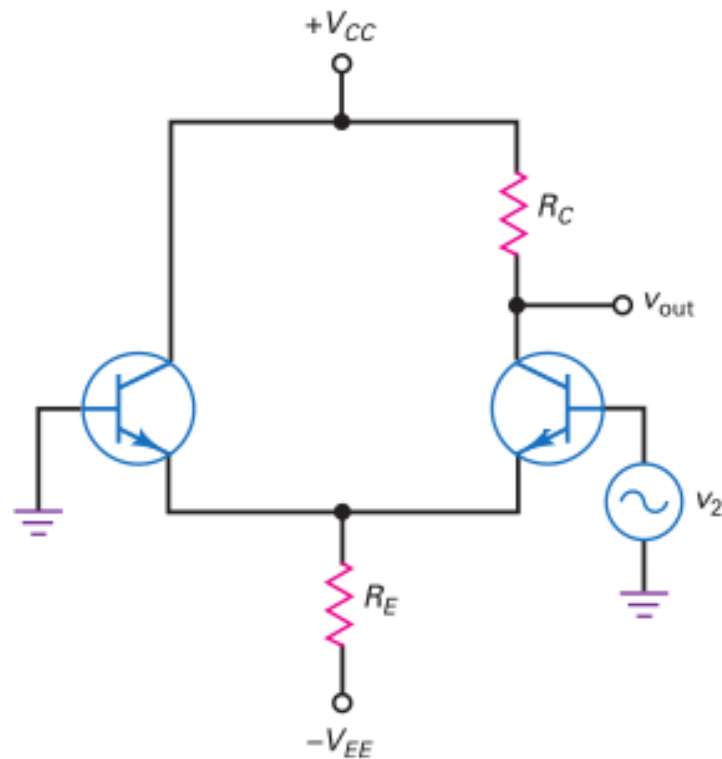


- $v_2$  adalah active input dan  $v_1$  adalah grounded input, maka

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

- Tanda minus (-) menunjukkan fasa yang berkebalikan

## Konfigurasi Inverting-input

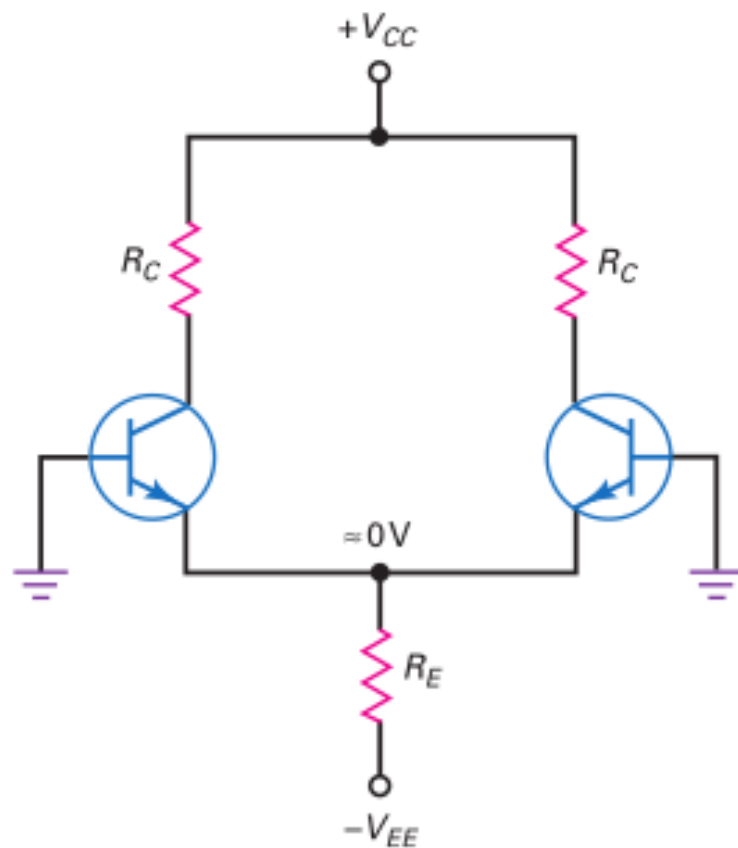


- Tegangan output juga sama dengan sebelumnya, yaitu  $v_{out} = -A_v(v_2)$



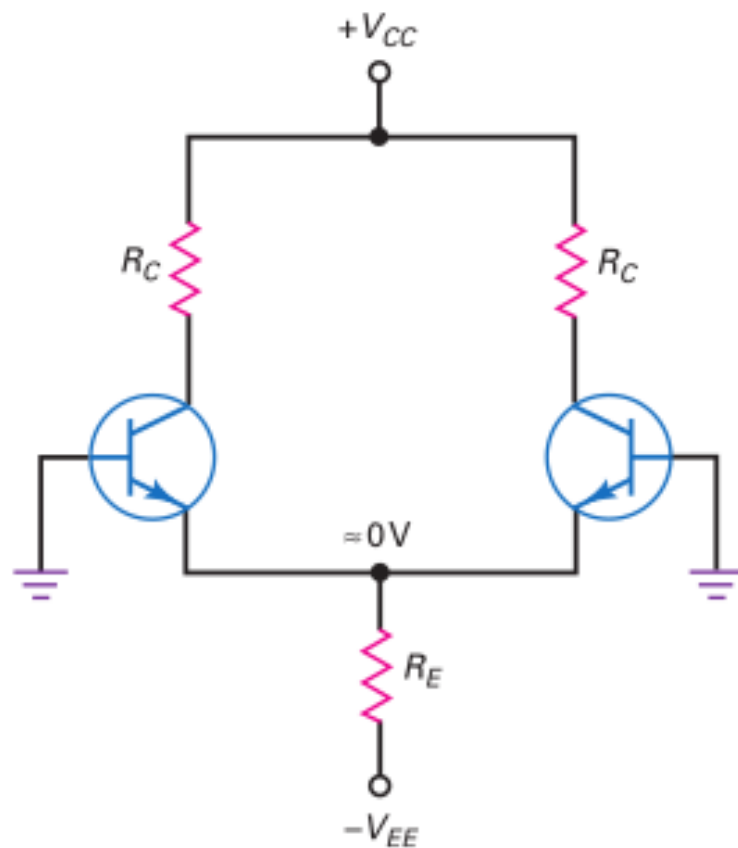
Summary Table 15-1		Diff-Amp Configurations	
Input	Output	$V_{in}$	$V_{out}$
Differential	Differential	$v_1 - v_2$	$v_{c2} - v_{c1}$
Differential	Single-ended	$v_1 - v_2$	$v_{c2}$
Single-ended	Differential	$v_1$ or $v_2$	$v_{c2} - v_{c1}$
Single-ended	Single-ended	$v_1$ or $v_2$	$v_{c2}$

## Analisis DC dari Diff Amp



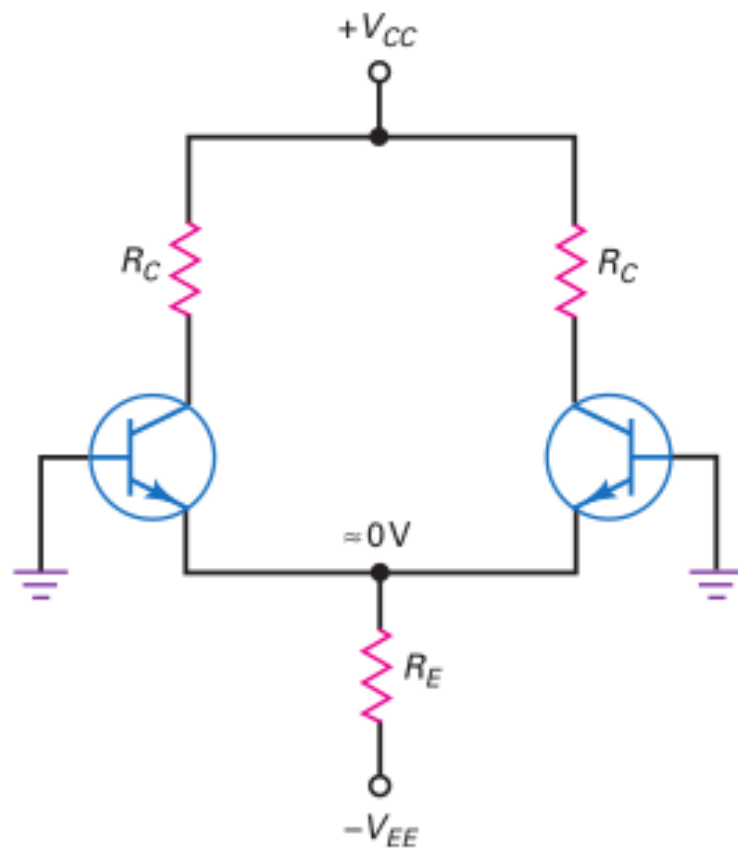
- Rangkaian ekivalen DC dari diff amp.
- Pada pembahasan berikutnya, kita akan mengasumsikan transistornya identik dan resistor collectornya sama.
- Kita asumsikan juga kedua base di-grounded

## 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



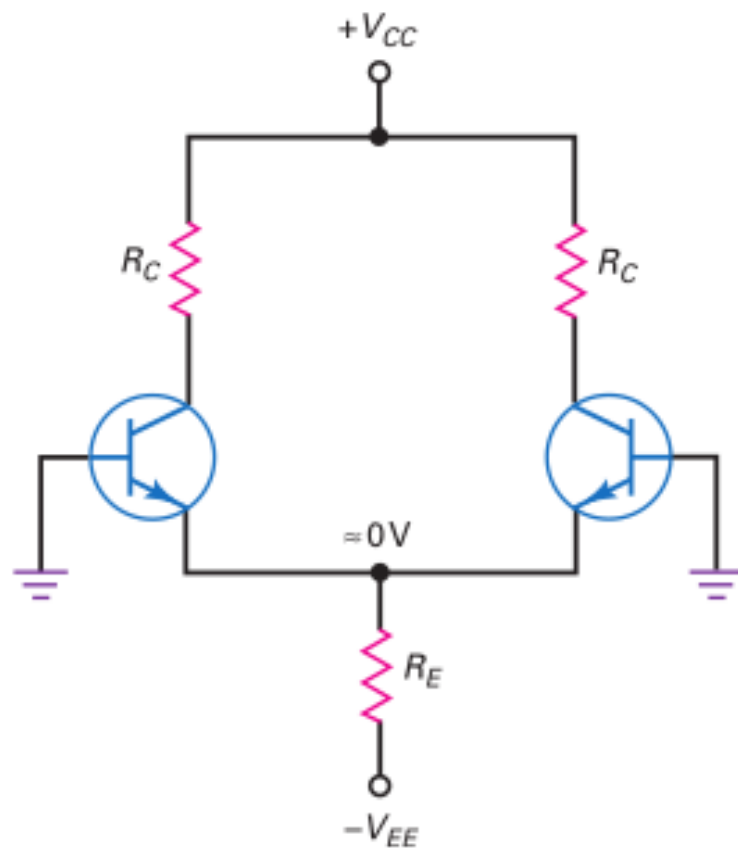
- Sehingga semua  $V_{EE}$  ada di seberang  $R_E$  dan arus tail bernilai

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

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

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

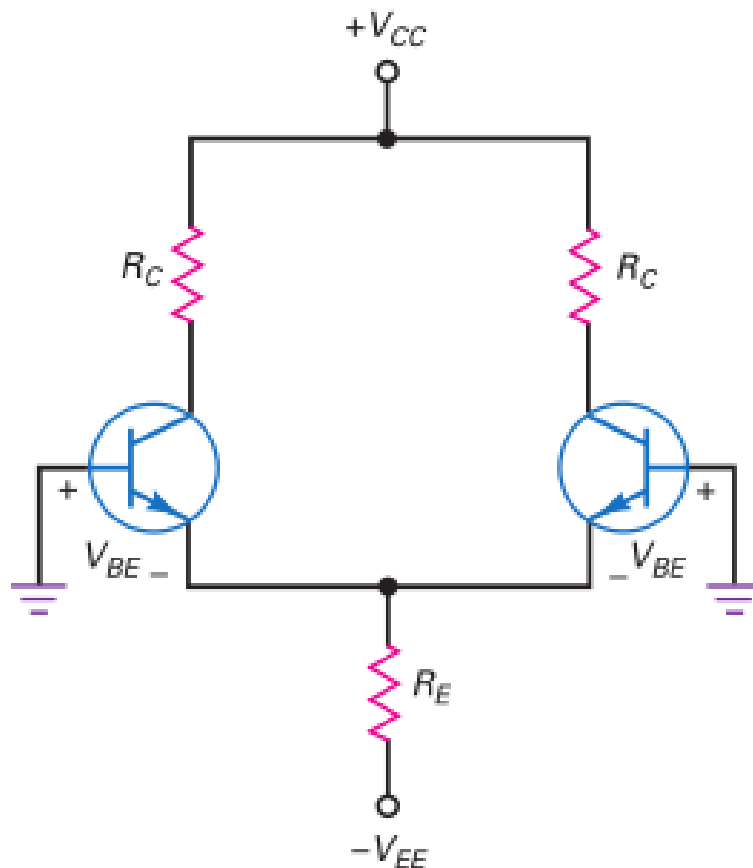
## Analisis Ideal



- Tegangan DC pada kedua collector sebesar

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

## Metode perkiraan kedua

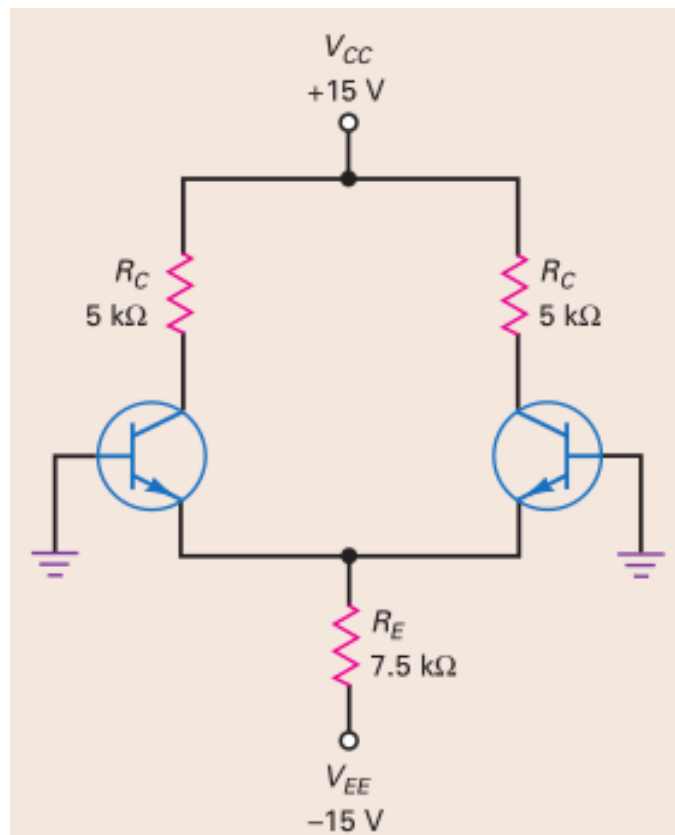


- Kita bisa meningkatkan analisis DC dengan cara menyertakan  $V_{BE}$  drop di setiap dioda emitter

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

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

## Contoh Soal 1



### ■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

### ■ Jawaban:

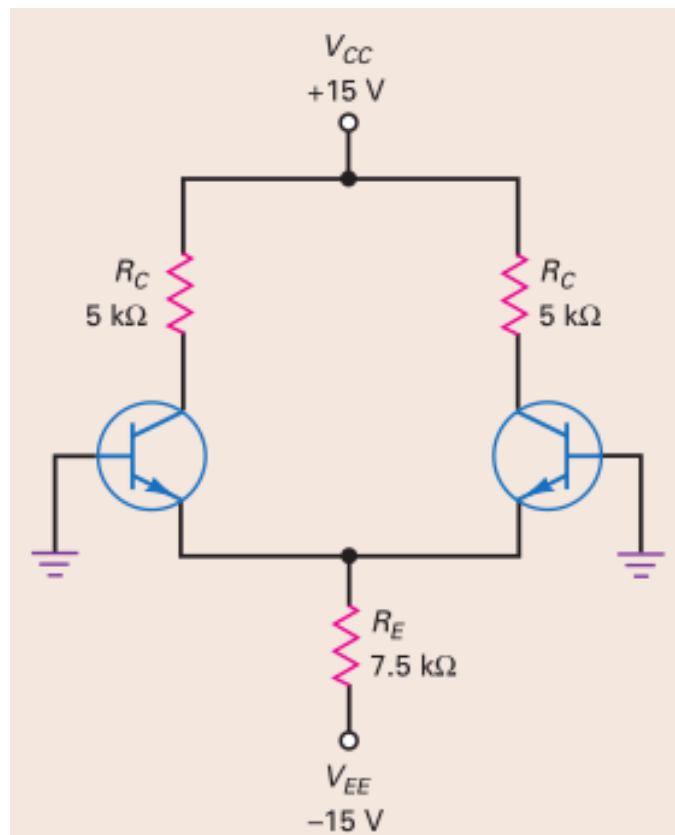
- Berdasarkan persamaan 5, arus tail adalah:

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

- 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



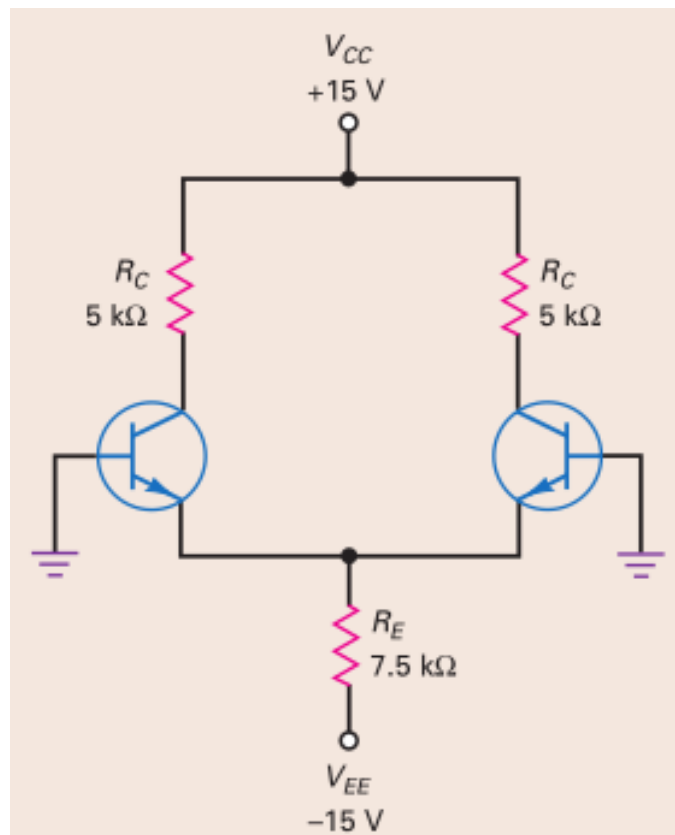
### ■ Jawaban:

- Setiap tegangan collectornya adalah:

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

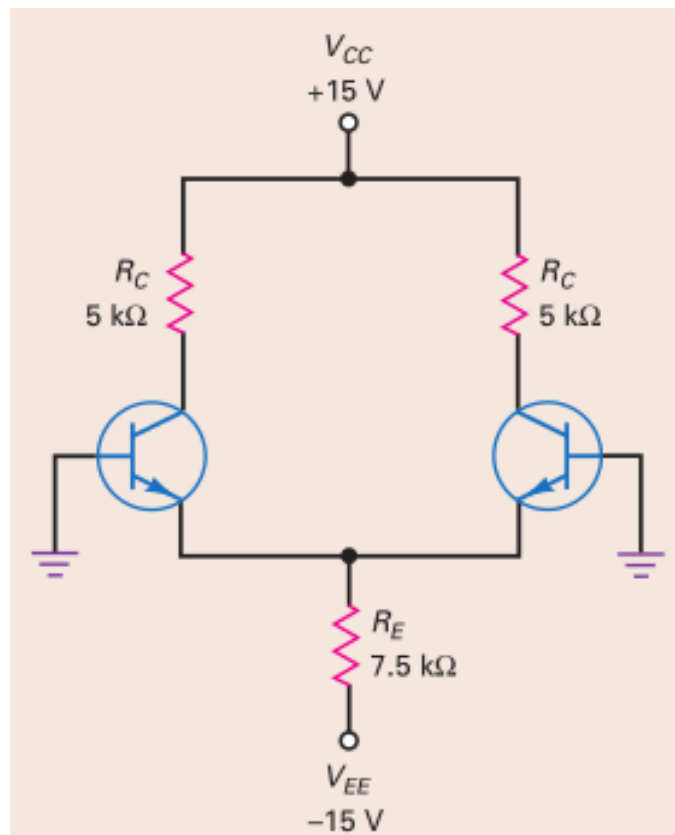


## Latihan Soal 1



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

## Contoh Soal 2



### ■ Pertanyaan:

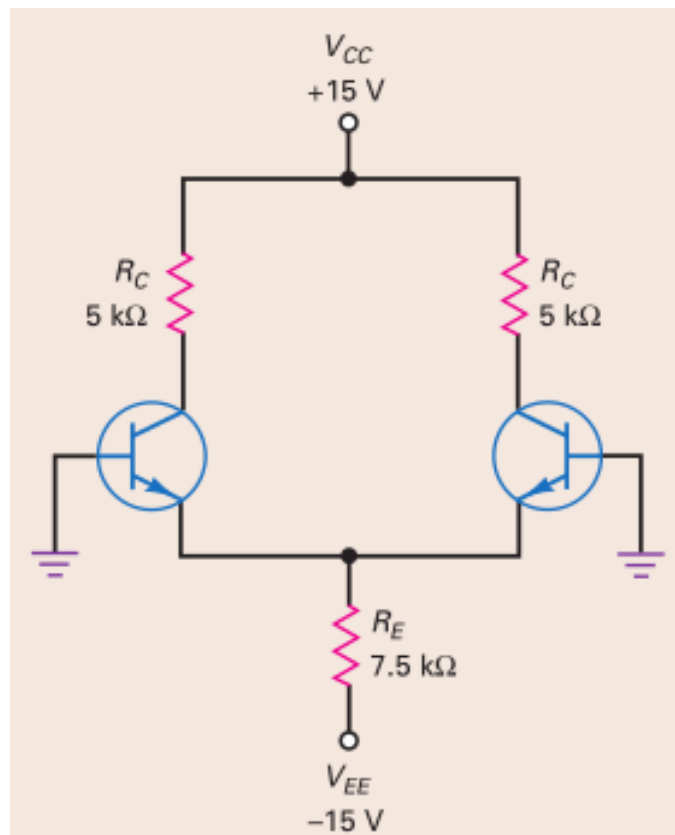
- Dengan menggunakan metode kedua, berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

### ■ 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:

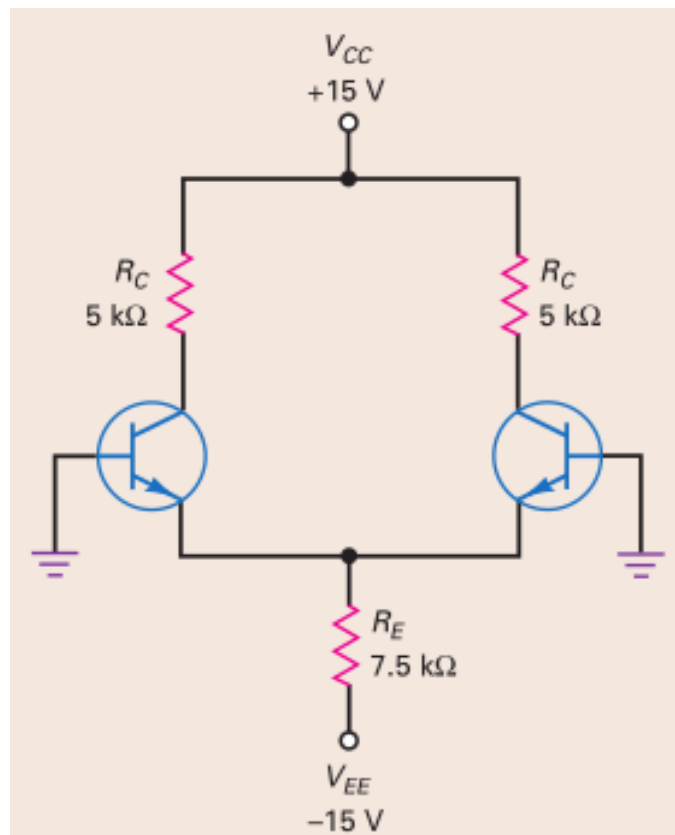
- Setiap arus emitternya adalah setengah dari arus tailnya:

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

- Tegangan collectornya sebesar:

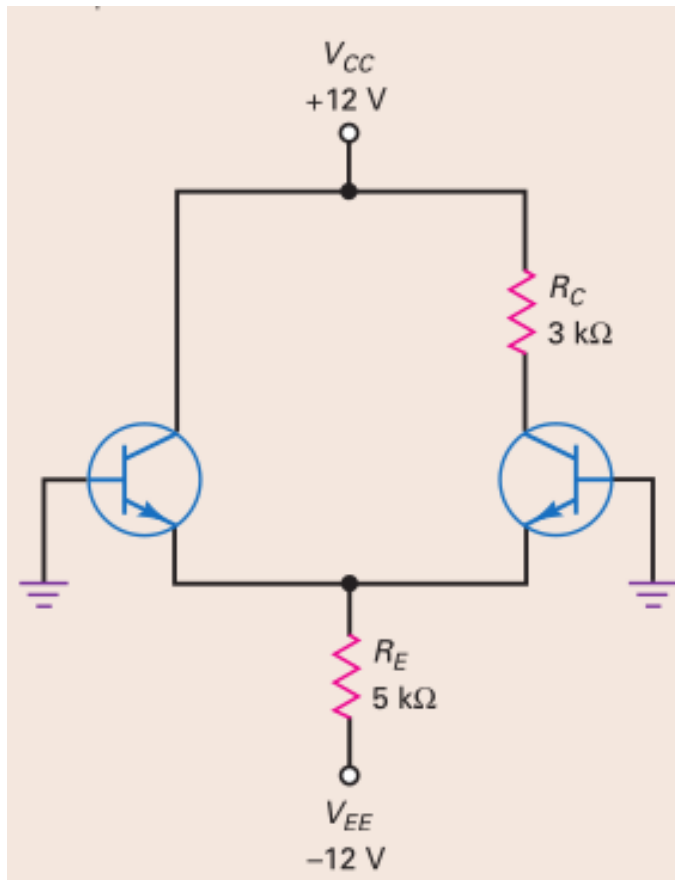
$$\begin{aligned} V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 15 \text{ V} - (0.955 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) \\ &= 10.2 \text{ V} \end{aligned}$$

## 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:

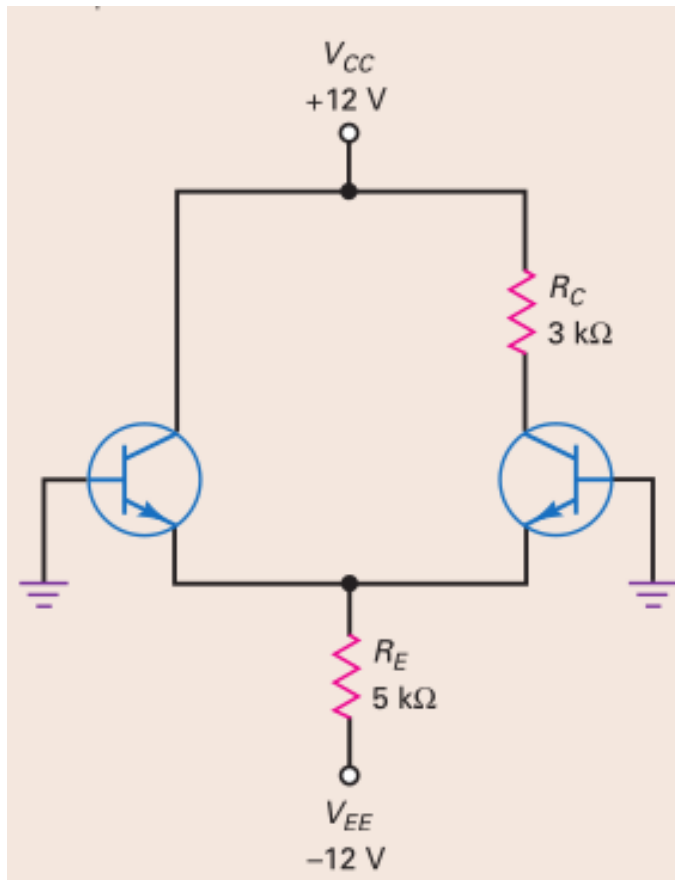
- Idealnya, arus tail:

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

- 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



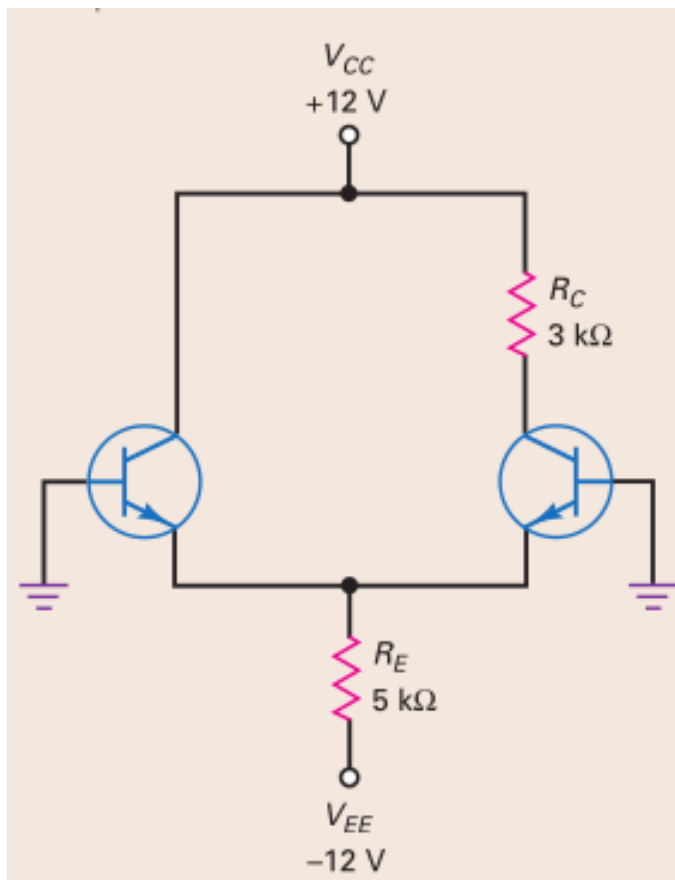
### ■ Jawaban:

- 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



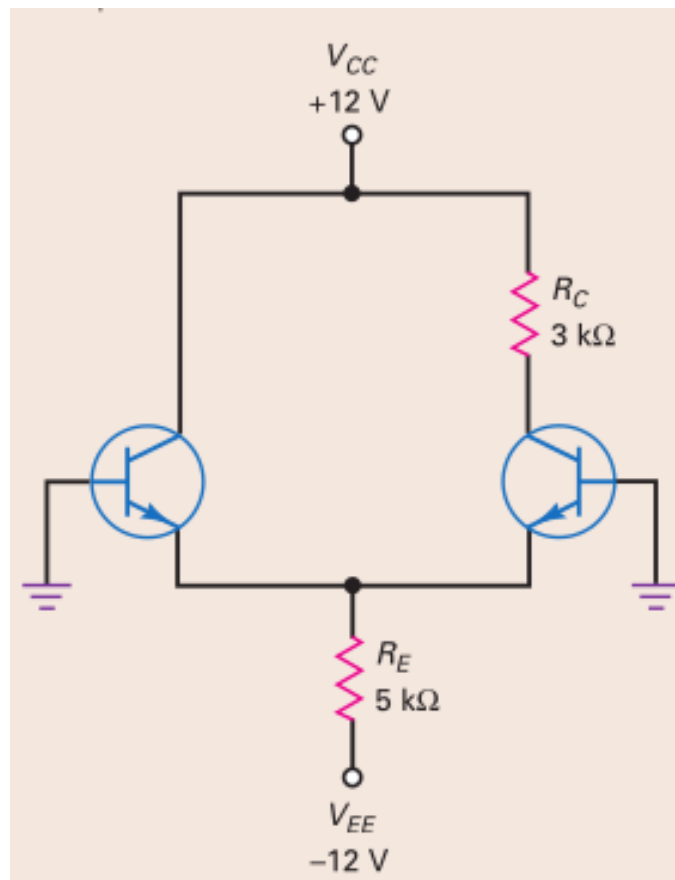
### ■ Jawaban:

- 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

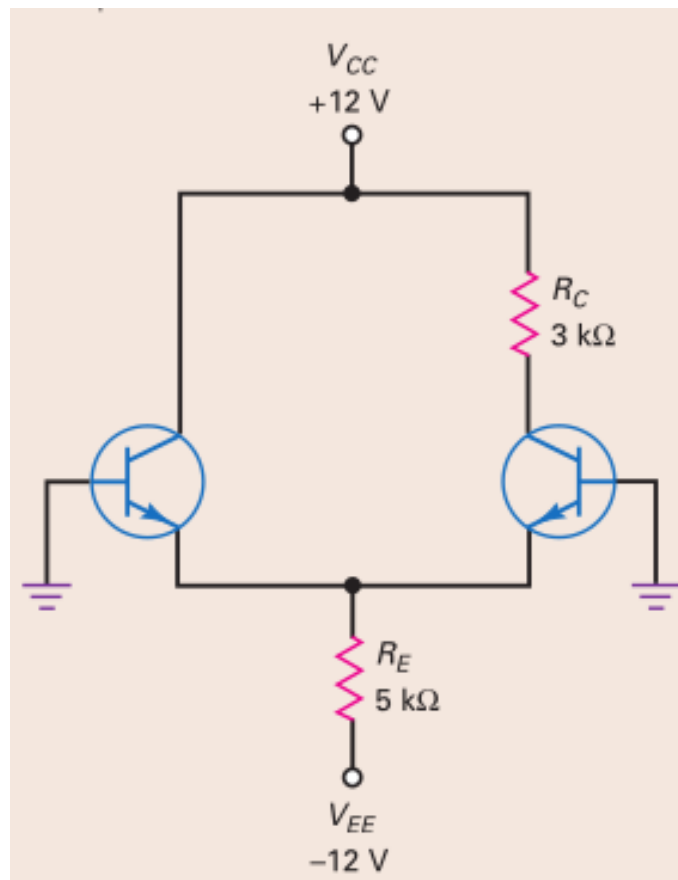


■ Jawaban:

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



## Latihan Soal 3



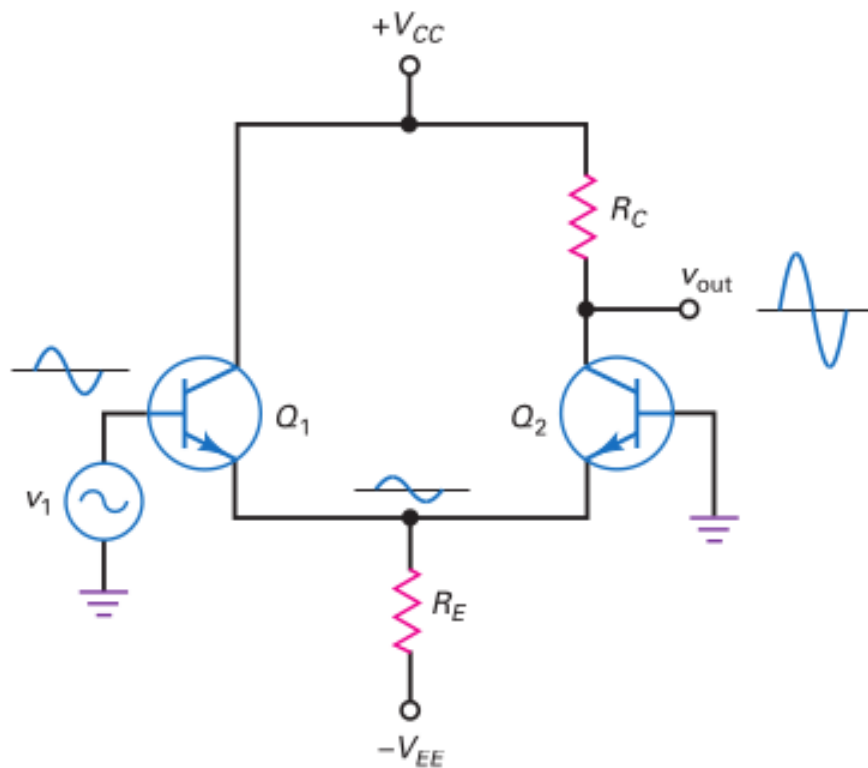
### ■ Pertanyaan:

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

## Analisis AC dari Diff Amp

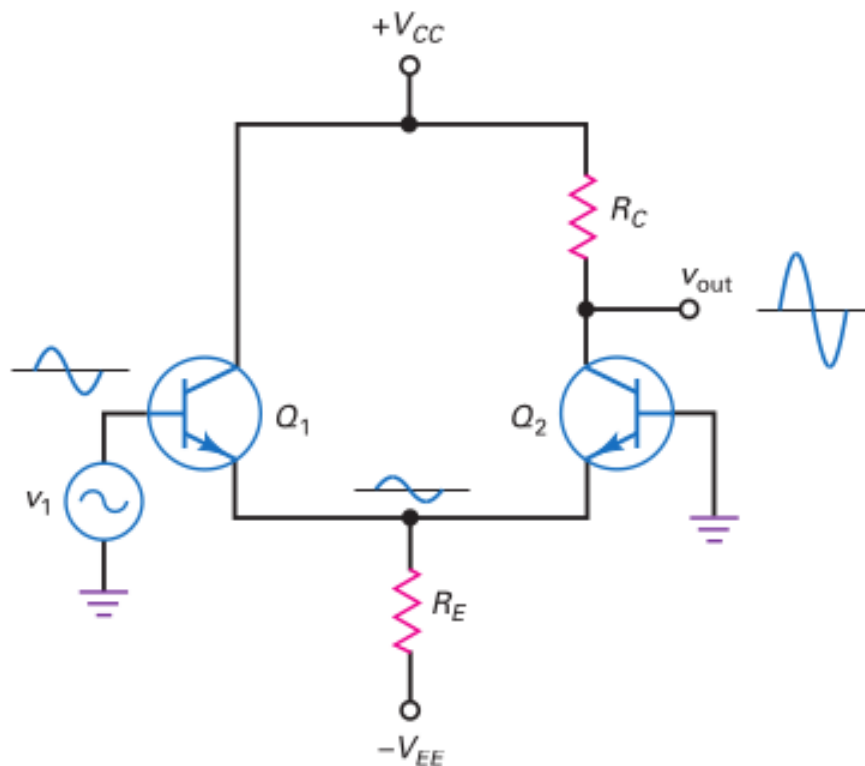
- Pada bagian ini, kita akan menurunkan persamaan untuk penguatan tegangan (voltage gain) dari diff amp.
- Kita mulai dengan konfigurasi yang paling sederhana, noninverting input dan single-ended output.
- Setelah menurunkan penguatan tegangan, kita akan kembangkan hasilnya ke konfigurasi yang lain.

## Teori Operasi



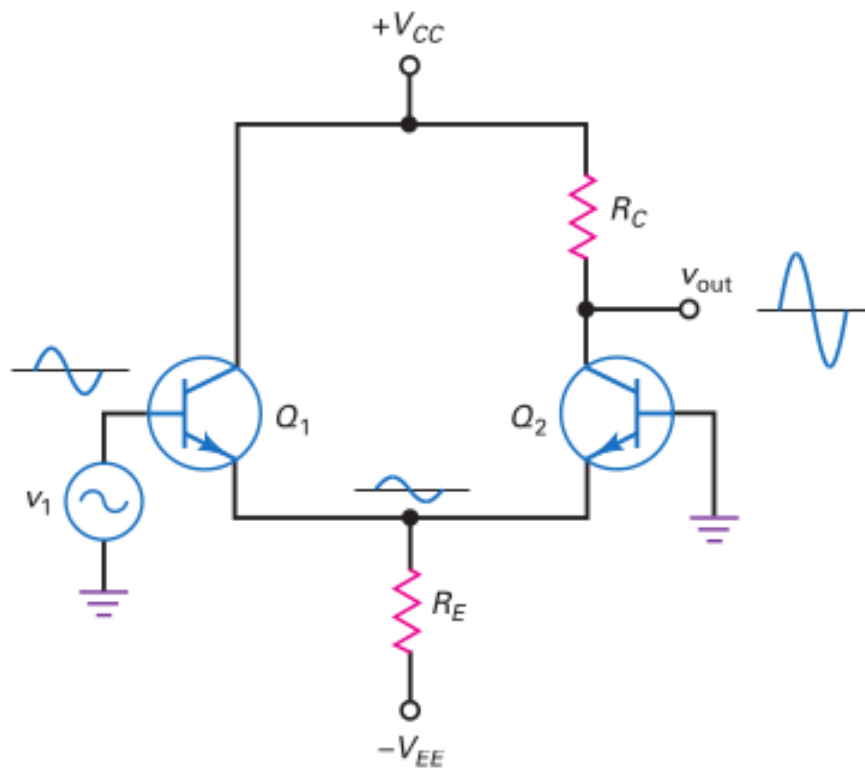
- Gambar di samping adalah noninverting input dan single-ended output.
- Dengan  $R_E$  yang besar, arus tail hampir konstan saat ada sinyal AC yang kecil.
- Jika arus emitter di  $Q_1$  meningkat maka arus emitter di  $Q_2$  menurun, dan sebaliknya.

## Teori Operasi



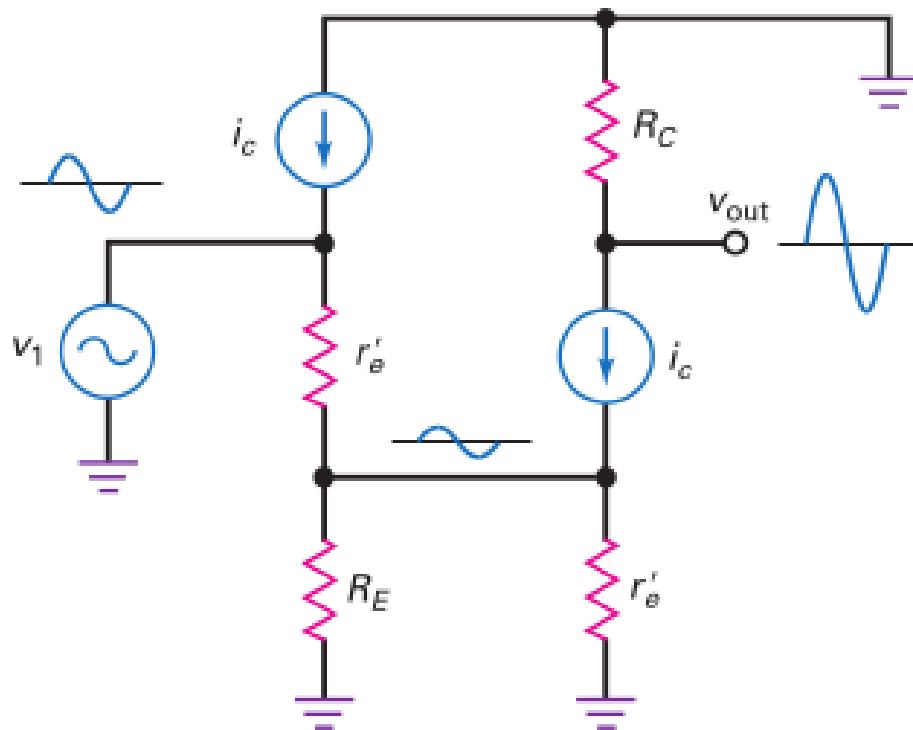
- Transistor  $Q_1$  bertindak seperti emitter follower yang menghasilkan tegangan AC di seberang resistor emitter.
- Tegangan AC ini bernilai setengah dari tegangan input  $v_1$
- Pada setengah siklus positif dari tegangan input, arus emitter  $Q_1$  meningkat, arus emitter  $Q_2$  menurun, dan tegangan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

## Teori Operasi



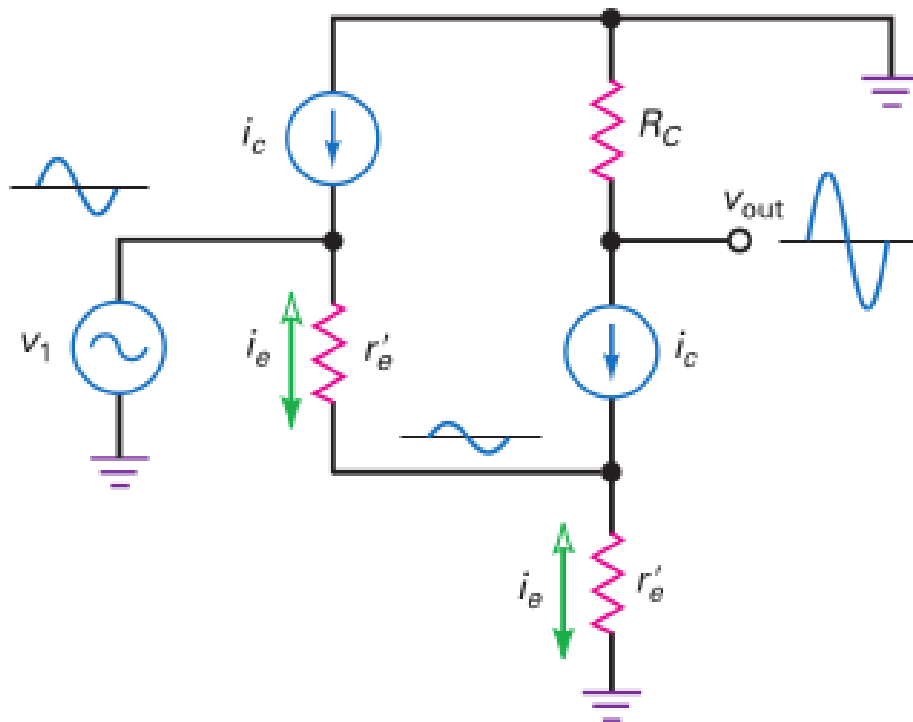
- Sama halnya pada setengah siklus negatif dari tegangan input, arus emitter  $Q_1$  menurun, arus emitter  $Q_2$  meningkat, dan tegangan collector  $Q_2$  menurun.
- Hal ini yang menyebabkan gelombang sinus yang dikuatkan memiliki fasa yang sama dengan noninverting input.

## Single-ended output gain



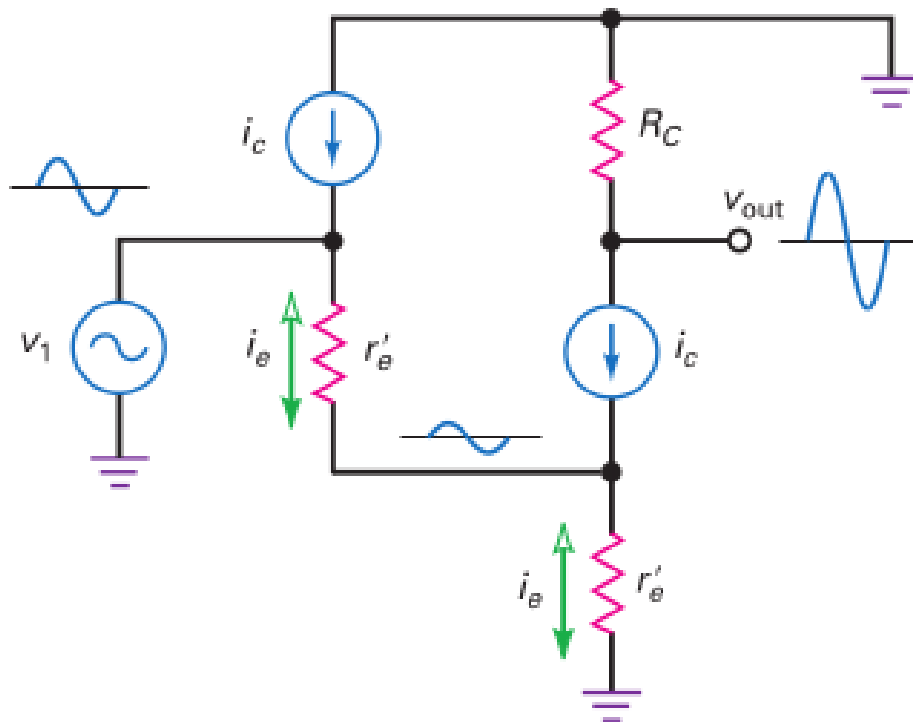
- Gambar di samping adalah rangkaian ekivalennya
- Setiap transistor memiliki  $r'_e$
- $R_E$  paralel dengan  $r'_e$  pada transistor kanan karena base dari  $Q_2$  di-grounding.
- Karena  $R_E$  jauh lebih besar dari  $r'_e$  maka  $R_E$  bisa diabaikan.
- Sehingga kita dapat rangkaian yang lebih sederhana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

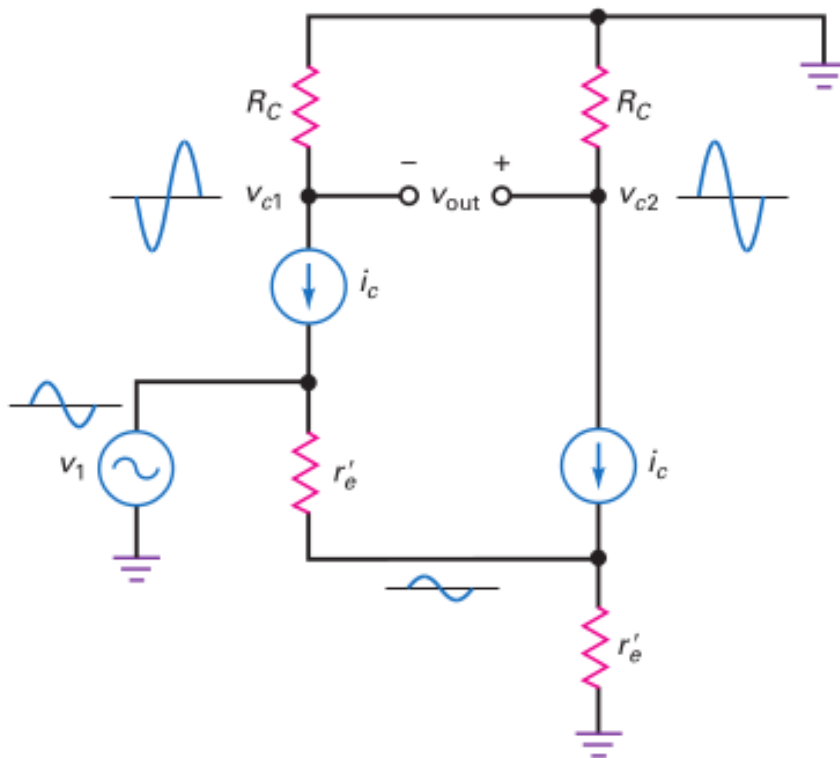
$$v_{in} = i_e r'_e + i_e r'_e = 2i_e r'_e$$

- 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

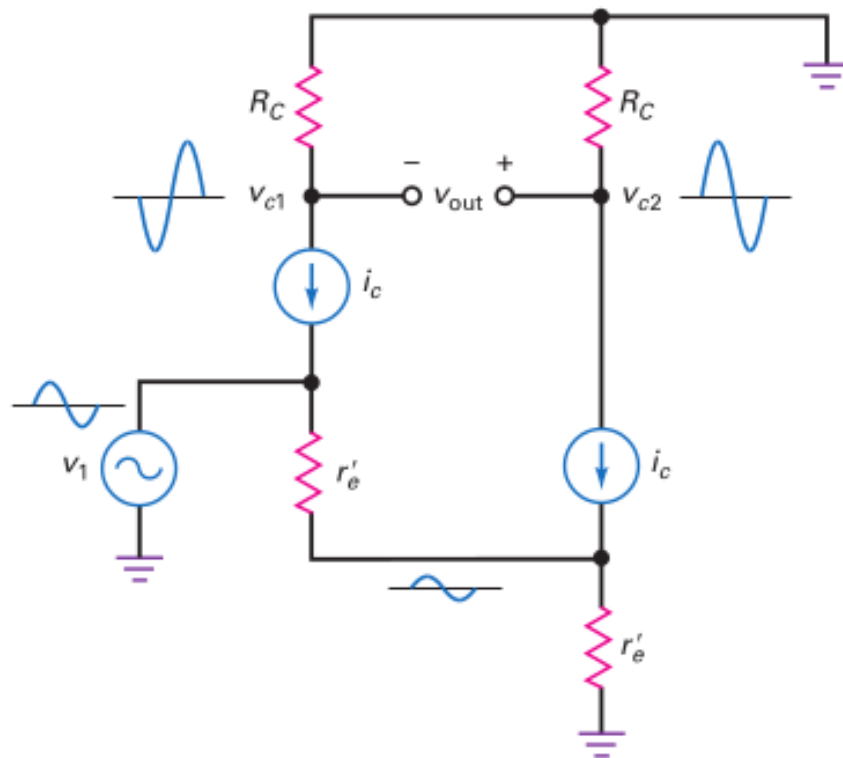


- Gambar di samping adalah rangkaian ekivalen dari noninverting input & differential output.
- Analisis mirip dengan sebelumnya, kecuali tegangan outputnya adalah dua kalinya karena terdapat 2 resistor collector.

$$v_{out} = v_{C2} - v_{C1} = i_C R_C - (-i_C R_C) = 2i_C R_C$$

- Tanda negatif  $\rightarrow$  sinyal  $v_{C1}$  memiliki beda fasa sebesar  $\pi$

## Differential output gain



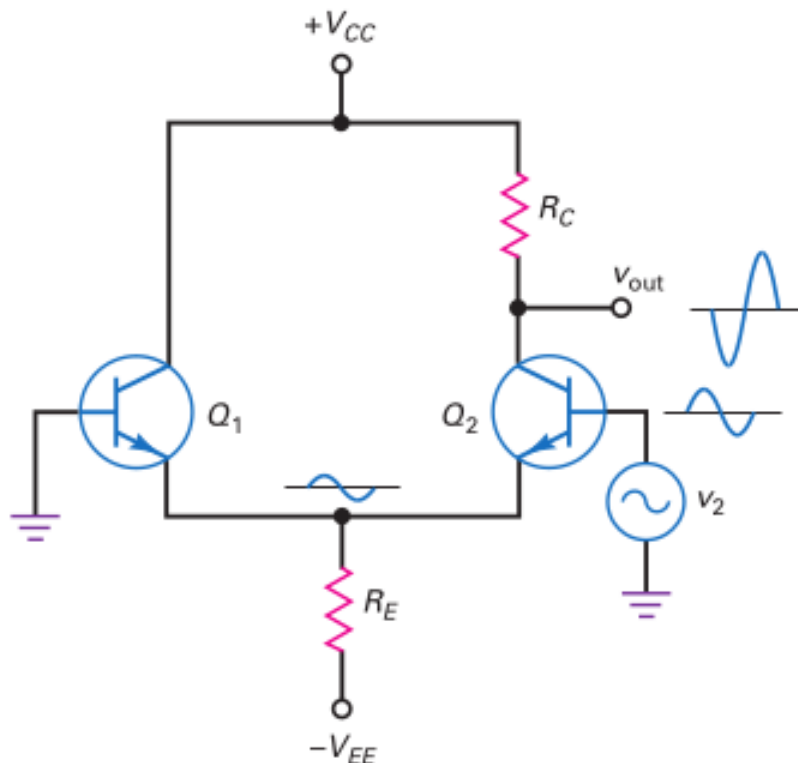
- Tegangan input AC nya masih sama

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

- 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

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

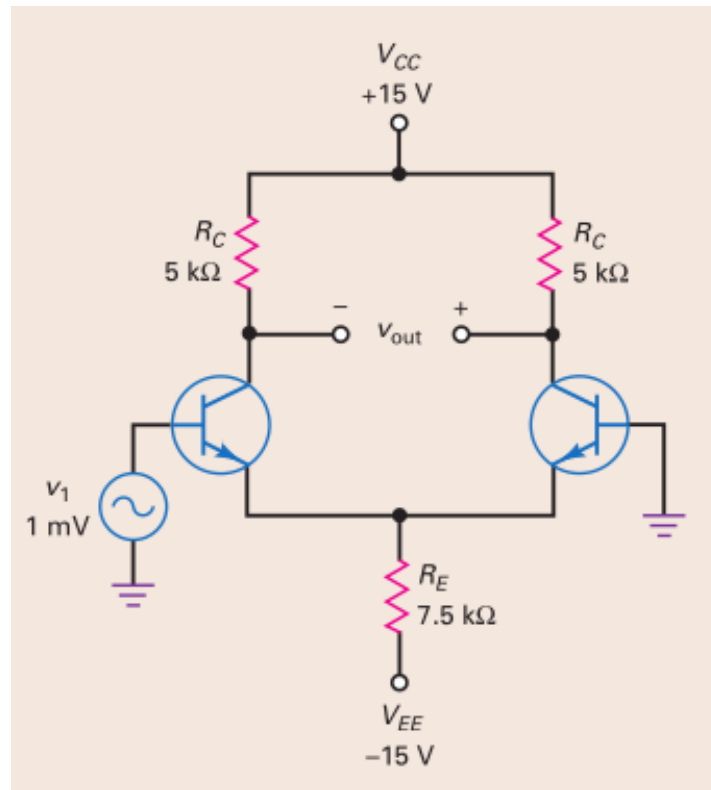
- Pada diff amp, impedansi input dari salah satu base adalah dua kalinya

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

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

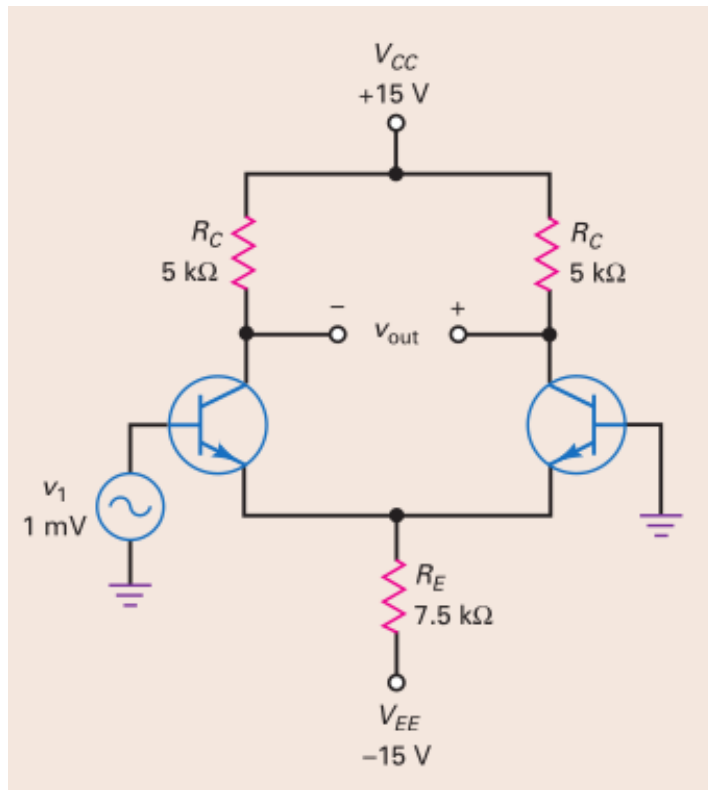
Summary Table 15-2		Diff-Amp Voltage Gains	
Input	Output	$A_v$	$V_{out}$
Differential	Differential	$R_C/r_e'$	$A_v(v_1 - v_2)$
Differential	Single-ended	$R_C/2r_e'$	$A_v(v_1 - v_2)$
Single-ended	Differential	$R_C/r_e'$	$A_v v_1$ or $-A_v v_2$
Single-ended	Single-ended	$R_C/2r_e'$	$A_v v_1$ or $-A_v v_2$

## 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

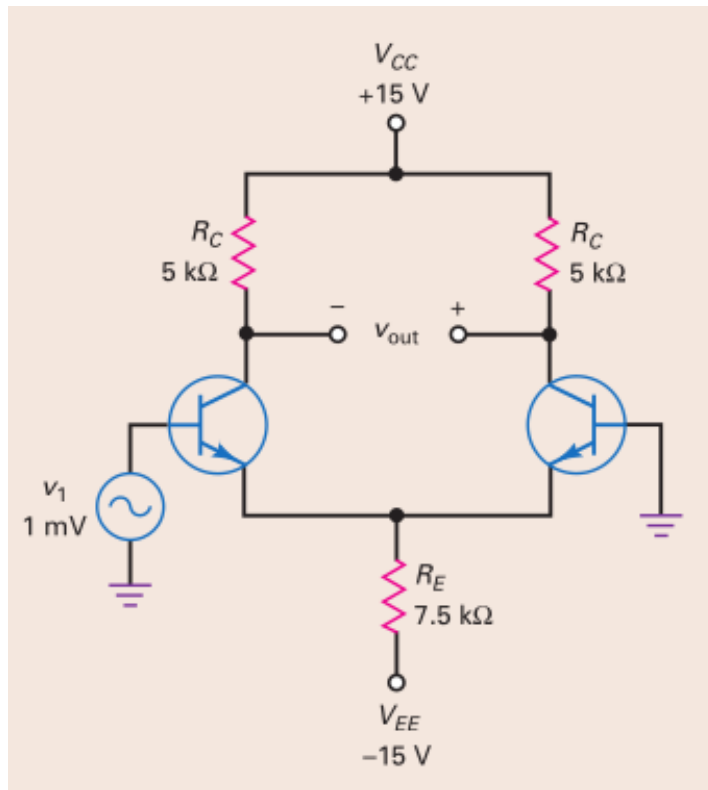
$$I_E = 1 \text{ mA}$$

- 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:

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

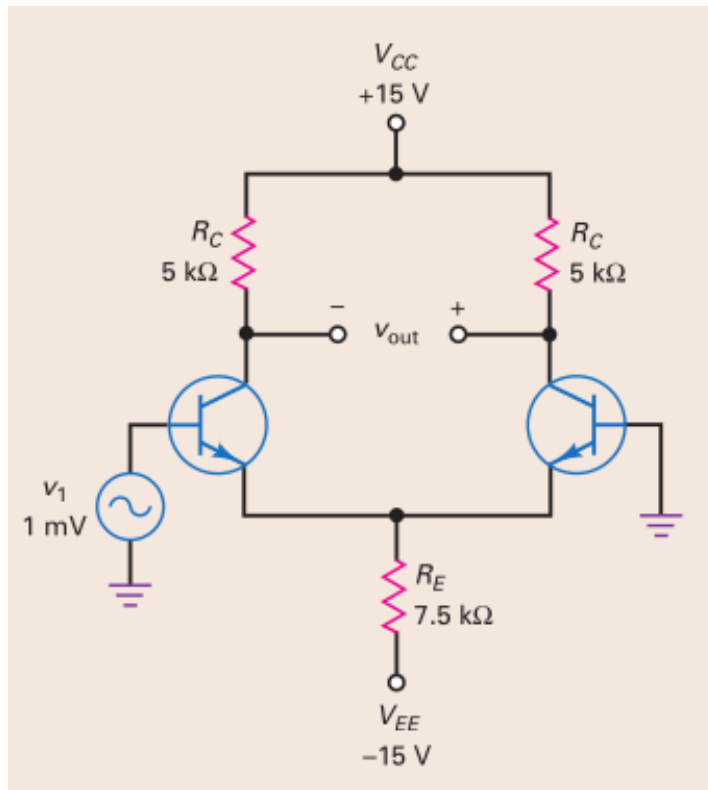
- Tegangan keluaran AC

$$v_{out} = A_v v_1 = 200(1 \text{ mV}) = 100 \text{ mV}$$

- Impedansi input

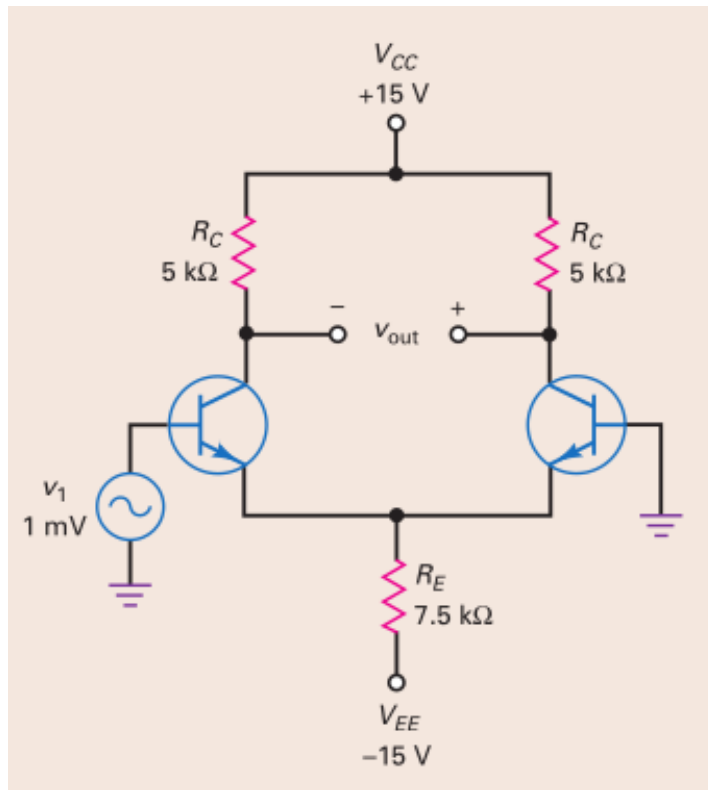
$$Z_{in(base)} = 2\beta r'_e = 2(300)(25\Omega) = 15 \text{ k}\Omega$$

## Latihan Soal 4



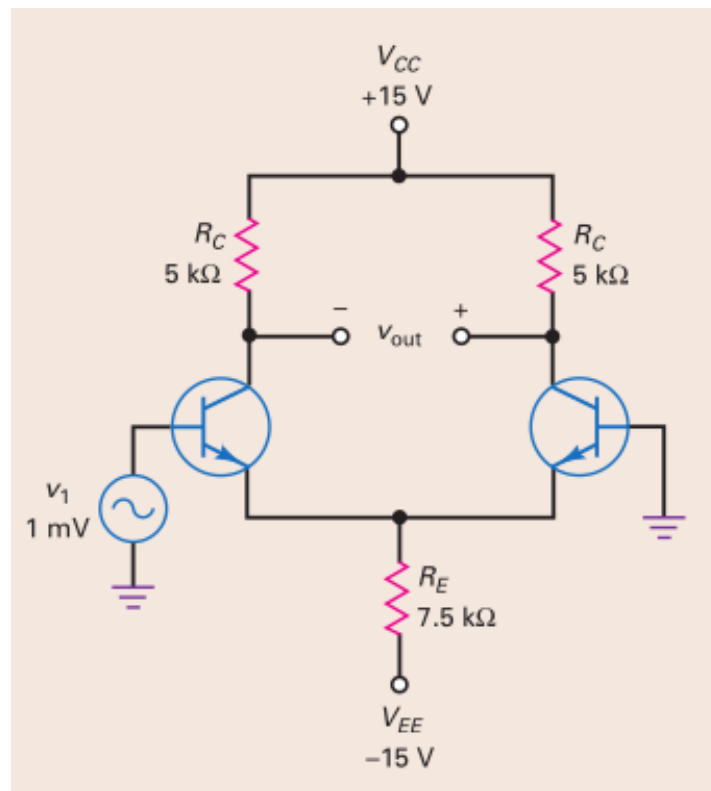
- Pertanyaan:
  - Berdasarkan gambar di samping, jika  $R_E = 5 \text{ k}\Omega$ , berapa tegangan output AC? Jika  $\beta = 300$ , berapa impedansi input dari diff amp tersebut ?
- Jawaban:
  - Silakan dikerjakan

## 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

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

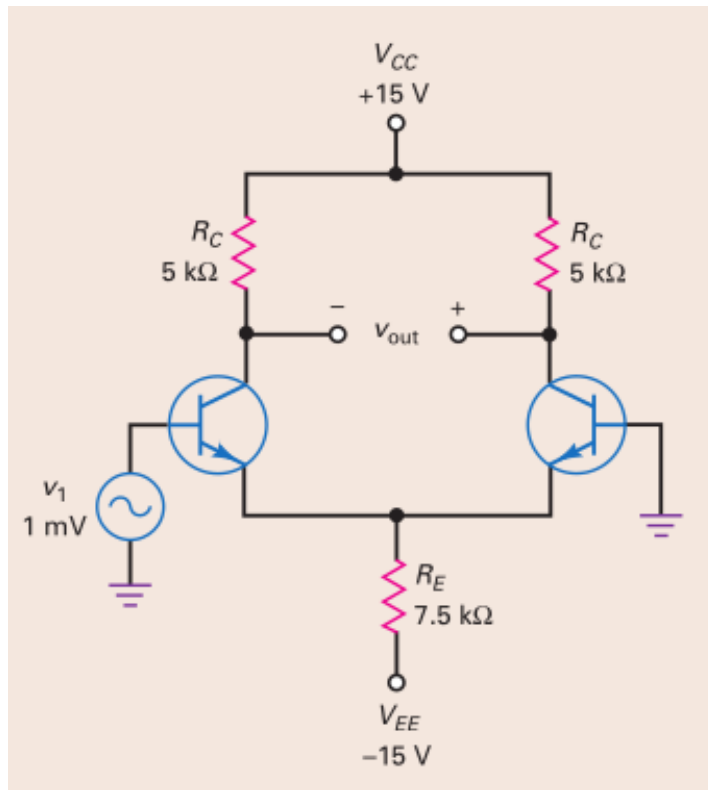
- Arus emitter DC

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

- Resistansi emitter AC

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

## Contoh Soal 5



### ■ Jawaban:

- Voltage gain

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

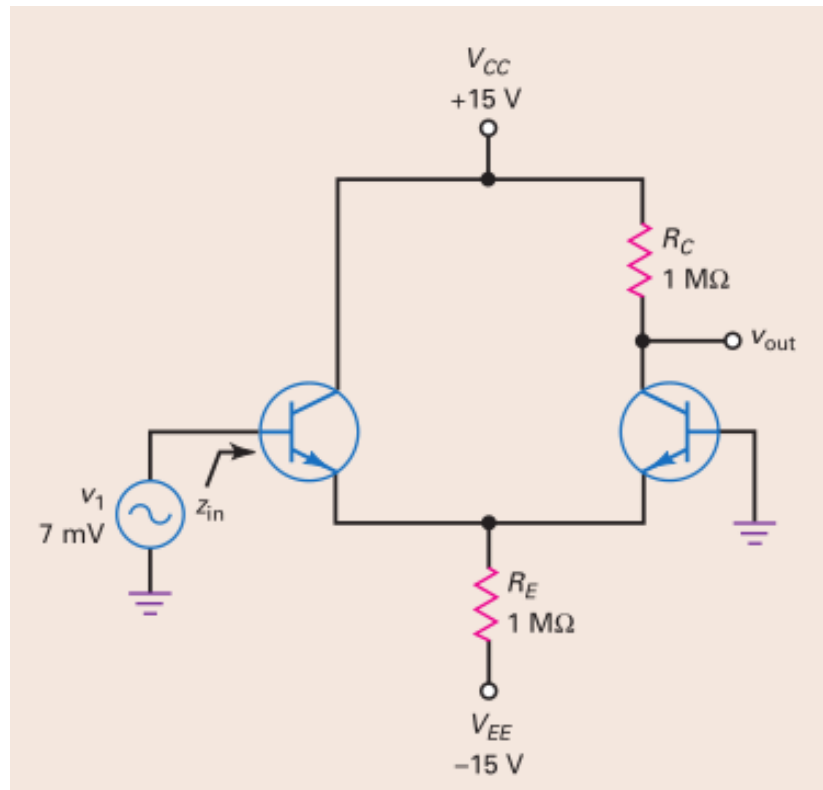
- Tegangan keluaran AC

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

- Impedansi input

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

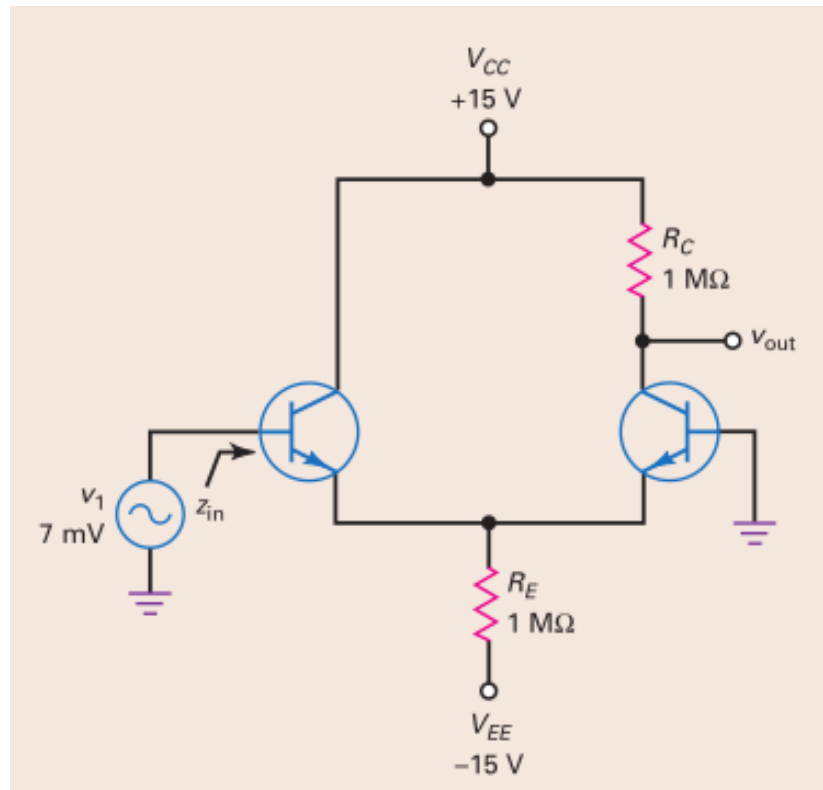
## Contoh Soal 7



### ■ Pertanyaan:

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

## Contoh Soal 7



### ■ Jawaban:

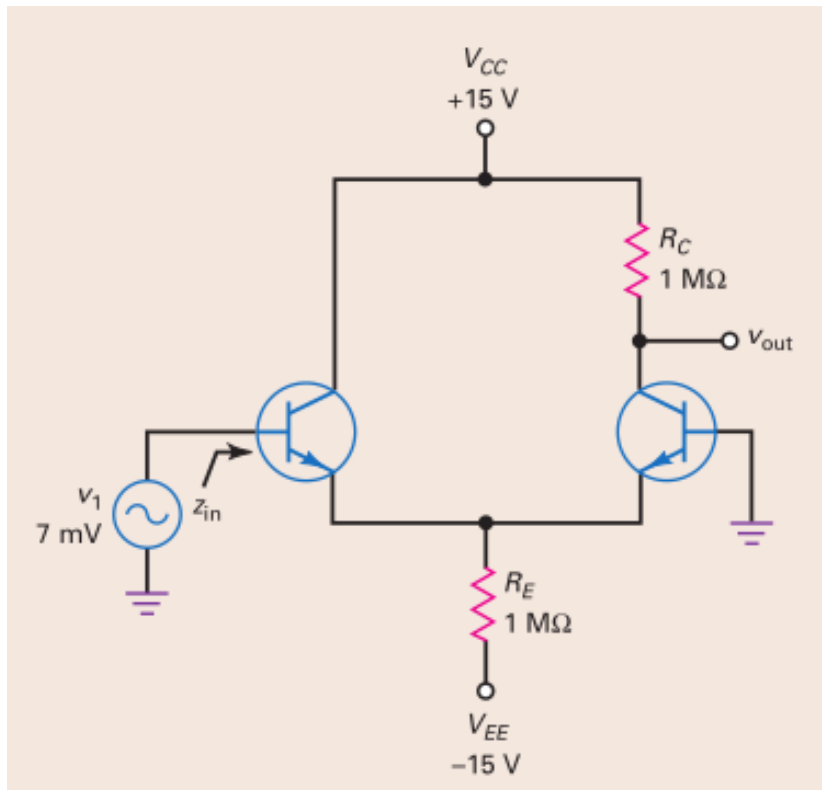
- Idealnya sebesar 15 V pada emitter resistor, sehingga arus tailnya:

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

- 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

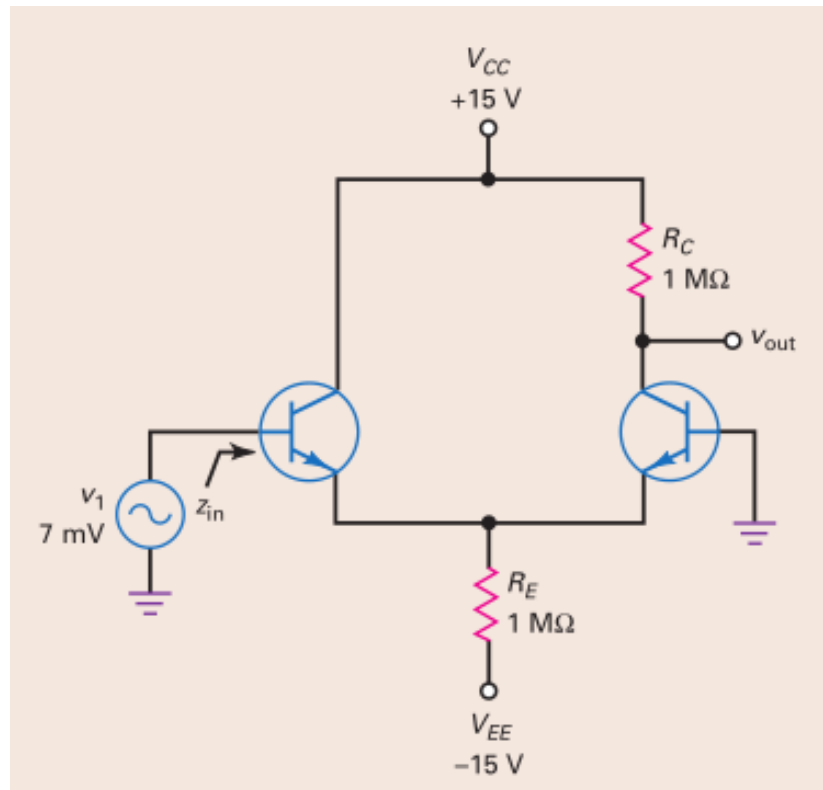
$$v_{out} = A_v v_1 = 150(7 \text{ mV}) = 1.05 \text{ V}$$

- 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 ?