

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

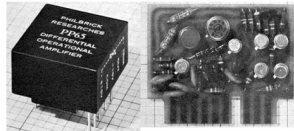
- Istilah Operational amplifier (op-amp) merujuk kepada sebuah amplifier/penguat yang menjalankan suatu operasi matematika.
- Dalam sejarahnya, op-amp pertama digunakan di dalam komputer analog untuk melakukan operasi penjumlahan, perkalian dan lainnya.
- Op-amp dibuat sebagai sirkuit diskrit → sekarang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

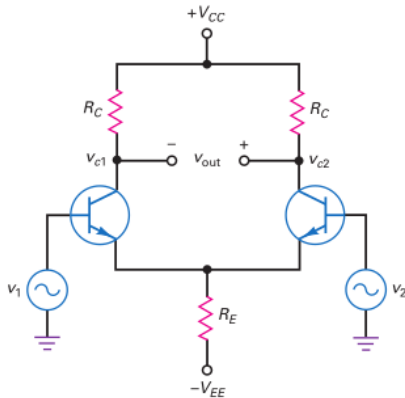
Pengantar

- 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

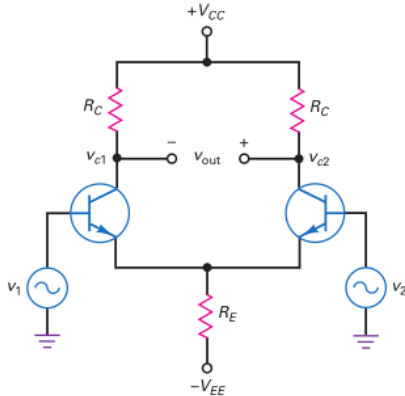
1. Transistor, dioda, dan resistor adalah komponen-komponen praktis yang ada di dalam IC.
2. Kapasitor mungkin dapat digunakan, tapi ukurannya sangat kecil, $< 50 \text{ pF}$.
3. Sehingga tidak bisa menggunakan kapasitor kopling dan kapasitor bypass seperti pada rangkaian diskret.
4. Harus menggunakan 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

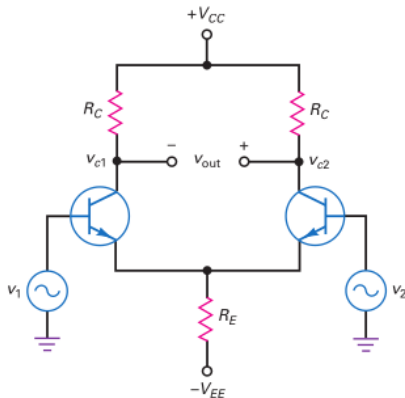


- Tegangan output AC :

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

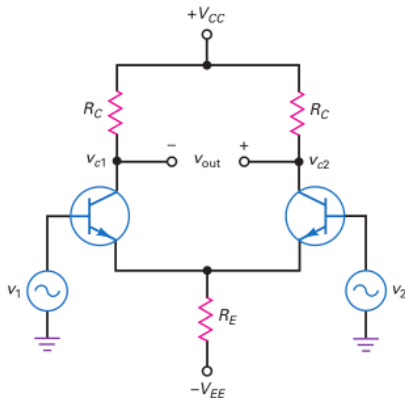
- v_{out} = differential output, karena menggabungkan 2 tegangan collector.
- Transistor yang identik + resistor collector yang sama \rightarrow ideal
- $v_1 = v_2 \rightarrow v_{out} = 0$
- $v_1 > v_2 \rightarrow v_{out}$ memiliki polaritas seperti gambar di samping.
- $v_1 < v_2 \rightarrow v_{out}$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

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° dengan v_2
- Terkadang, noninverting input yang digunakan dan inverting input di-grounding, terkadang juga sebaliknya.

Diferential Input dan Output

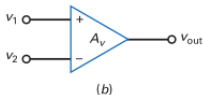
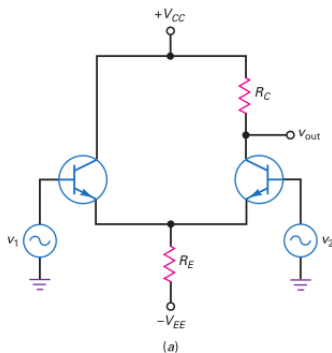


- Jika kedua input-nya ada, input totalnya disebut differential input karena tegangan output sama dengan penguatan tegangan (voltage gain) \times selisih dari kedua tegangan input.

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

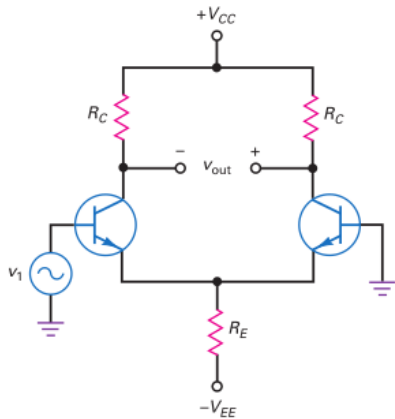
- A_v = penguatan tegangan/ voltage gain

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



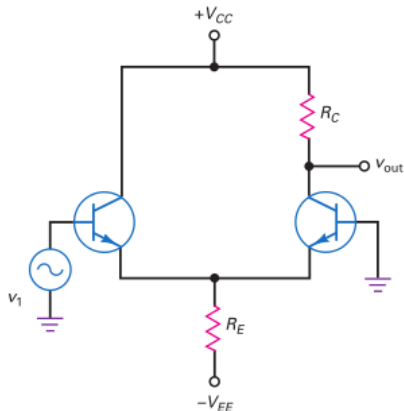
- Konfigurasi ini memiliki

- Noninverting input
- Differential output

- Karena $v_2 = 0$, maka

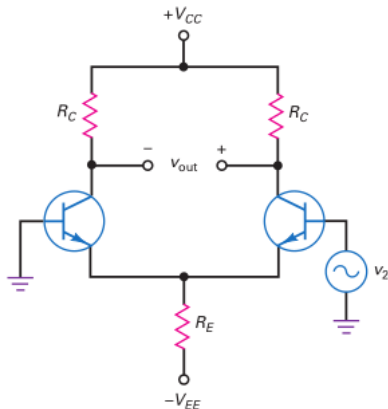
$$v_{out} = A_v(v_1) \quad (3)$$

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

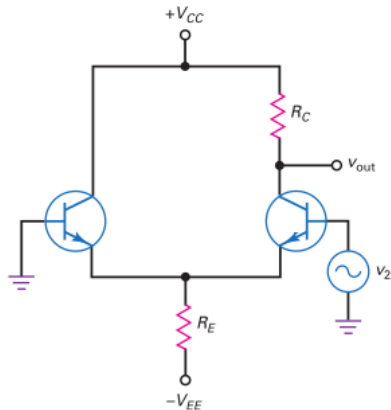


- v_2 adalah active input dan v_1 adalah grounded input, maka

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

- Tanda minus (-) menunjukkan fasa yang berkebalikan

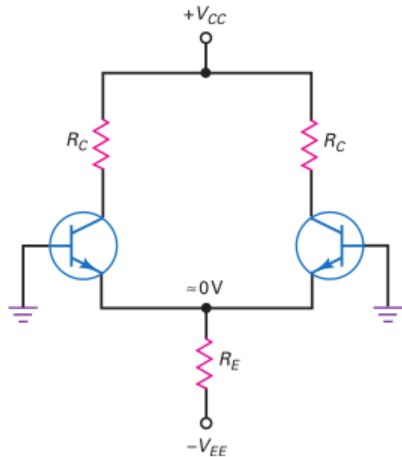
Konfigurasi Inverting-input



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

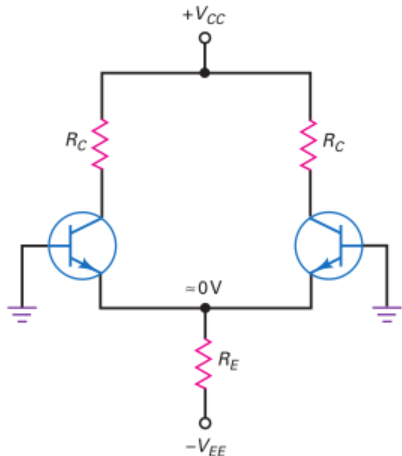
Summary Table 15-1		Diff-Amp Configurations	
Input	Output	V_{in}	V_{out}
Differential	Differential	$v_1 - v_2$	$V_{c2} - V_{c1}$
Differential	Single-ended	$v_1 - v_2$	V_{c2}
Single-ended	Differential	v_1 or v_2	$V_{c2} - V_{c1}$
Single-ended	Single-ended	v_1 or v_2	V_{c2}

Analisis DC dari Diff Amp



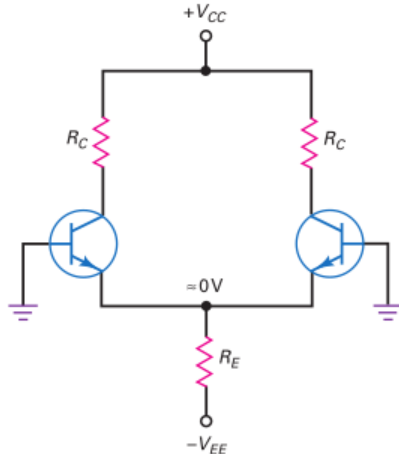
- Rangkaian ekuivalen DC dari diff amp.
- Pada pembahasan berikutnya, kita akan mengasumsikan transistornya identik dan resistor collectornya sama.
- Kita asumsikan juga kedua base di-grounded

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



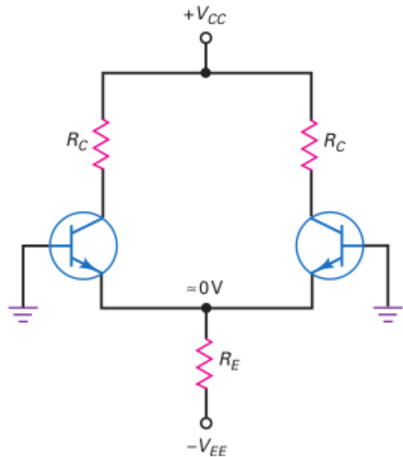
- Sehingga semua V_{EE} ada di seberang R_E dan arus tail bernilai

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

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

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

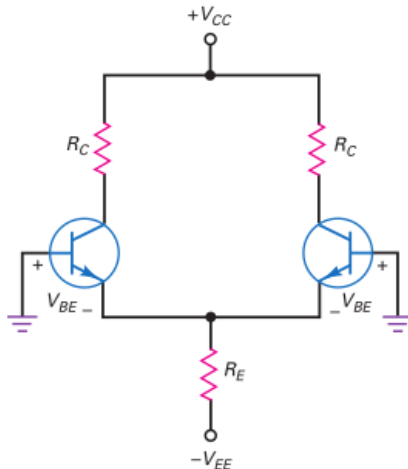
Analisis Ideal



- Tegangan DC pada kedua collector sebesar

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

Metode perkiraan kedua

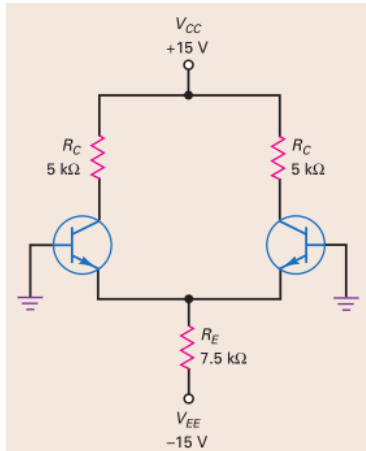


- Kita bisa meningkatkan analisis DC dengan cara menyertakan V_{BE} drop di setiap dioda emitter

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

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

Contoh Soal 1



■ Pertanyaan:

- Berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

■ Jawaban:

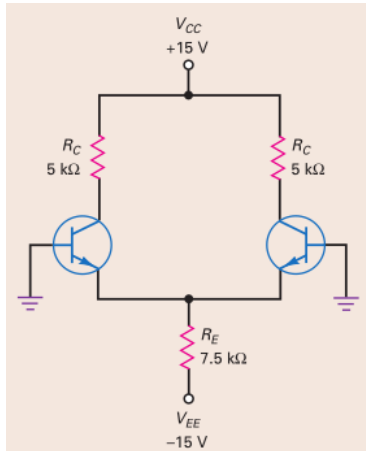
- Berdasarkan persamaan 5, arus tail adalah:

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

- 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

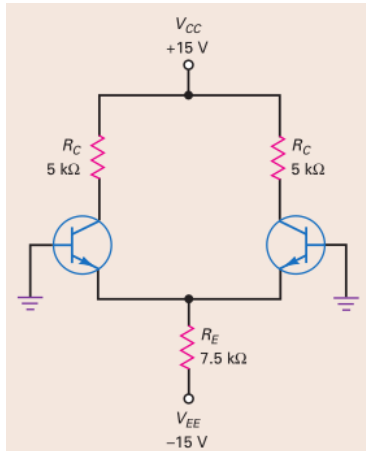


■ Jawaban:

- Setiap tegangan collectornya adalah:

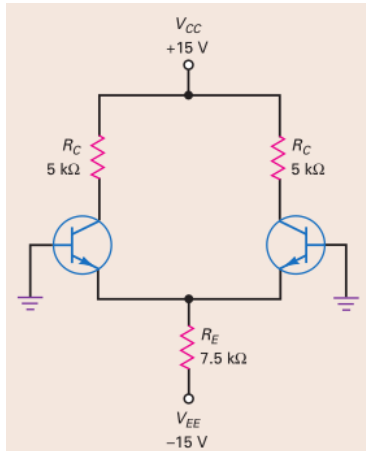
$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\
 &= 15 \text{ V} - (1 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) \\
 &= 10 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Latihan Soal 1



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

Contoh Soal 2



■ Pertanyaan:

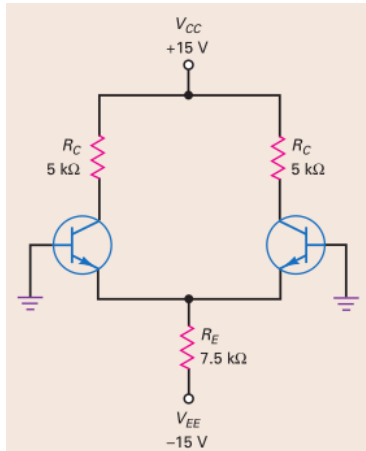
- Dengan menggunakan metode kedua, berapa arus dan tegangan ideal dari gambar di samping?

■ 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:

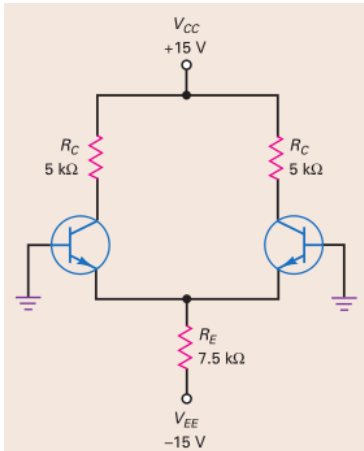
- Setiap arus emitternya adalah setengah dari arus tailnya:

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

- 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



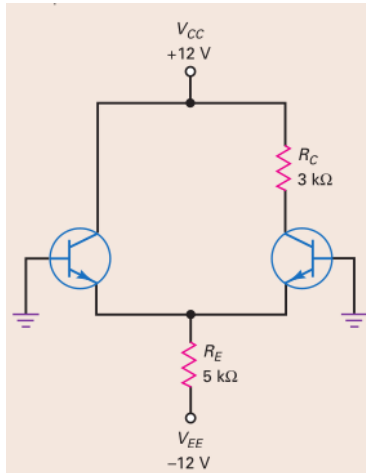
■ Pertanyaan:

- 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:

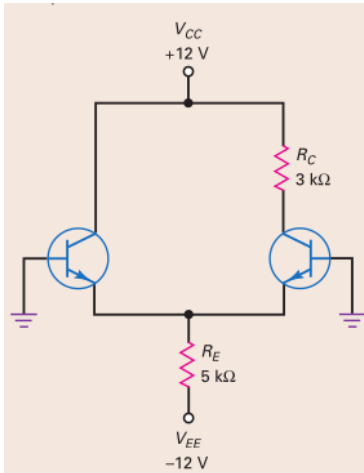
- Idealnya, arus tail:

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

- 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



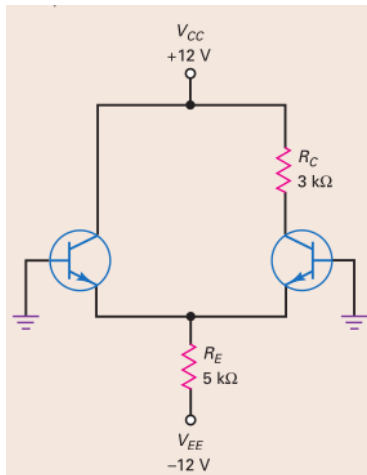
■ Jawaban:

- 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



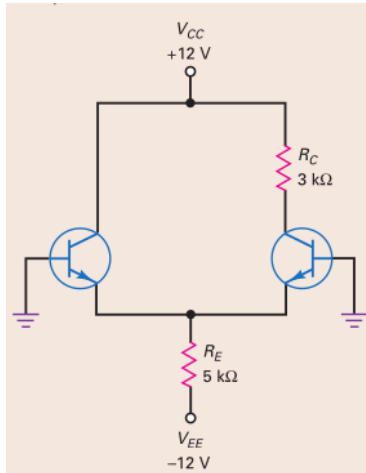
■ Jawaban:

- Jika kita gunakan metode yang kedua, kita dapatkan:

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

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

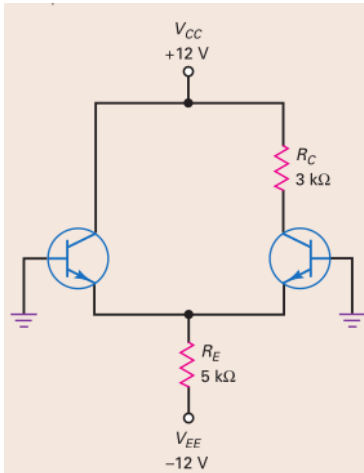
Contoh Soal 3



■ 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



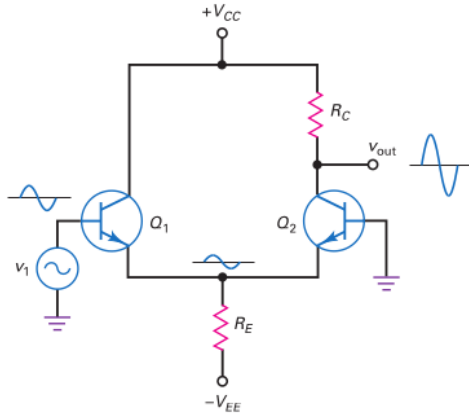
■ Pertanyaan:

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

Analisis AC dari Diff Amp

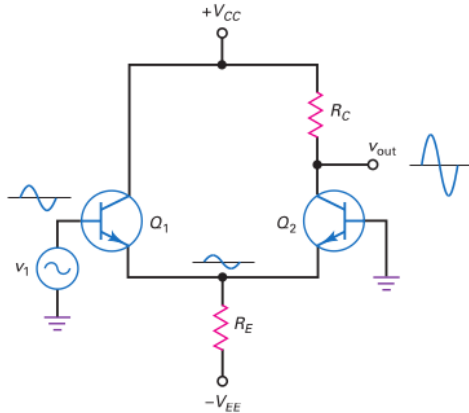
- Pada bagian ini, kita akan menurunkan persamaan untuk penguatan tegangan (voltage gain) dari diff amp.
- Kita mulai dengan konfigurasi yang paling sederhana, noninverting input dan single-ended output.
- Setelah menurunkan penguatan tegangan, kita akan kembangkan hasilnya ke konfigurasi yang lain.

Teori Operasi



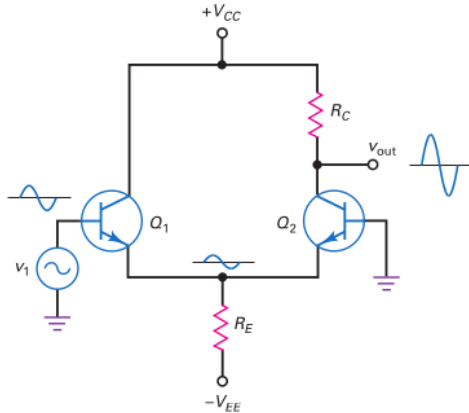
- Gambar di samping adalah noninverting input dan single-ended output.
- Dengan R_E yang besar, arus tail hampir konstan saat ada sinyal AC yang kecil.
- Jika arus emitter di Q_1 meningkat maka arus emitter di Q_2 menurun, dan sebaliknya.

Teori Operasi



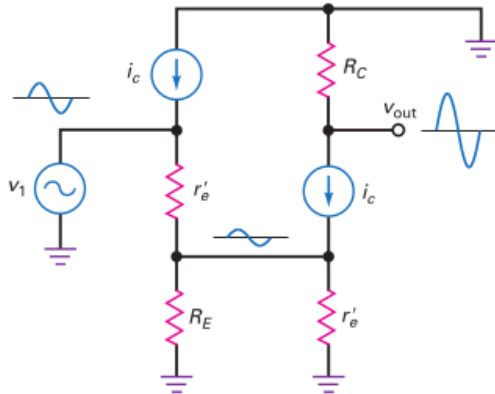
- Transistor Q_1 bertindak seperti emitter follower yang menghasilkan tegangan AC di seberang resistor emitter.
- Tegangan AC ini bernilai setengah dari tegangan input v_1
- Pada setengah siklus positif dari tegangan input, arus emitter Q_1 meningkat, arus emitter Q_2 menurun, dan tegangan collector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

Teori Operasi



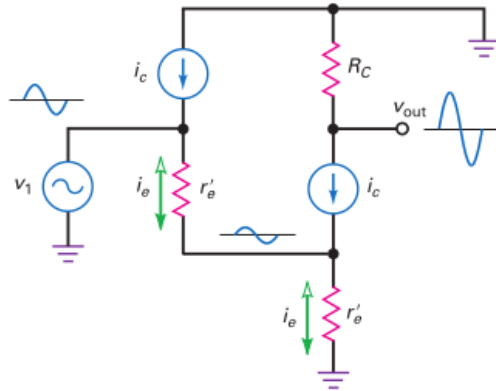
- Sama halnya pada setengah siklus negatif dari tegangan input, arus emitter Q_1 menurun, arus emitter Q_2 meningkat, dan tegangan collector Q_2 menurun.
- Hal ini yang menyebabkan gelombang sinus yang dikuatkan memiliki fasa yang sama dengan noninverting input.

Single-ended output gain



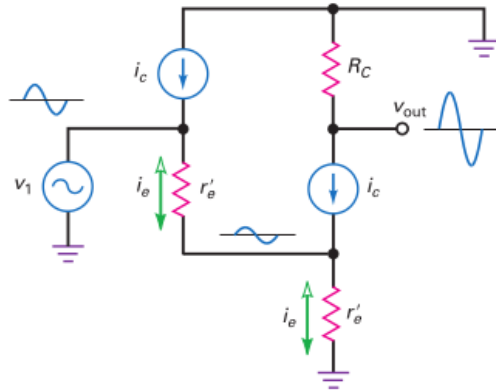
- Gambar di samping adalah rangkaian ekivalennya
- Setiap transistor memiliki r'_e
- R_E paralel dengan r'_e pada transistor kanan karena base dari Q_2 di-grounding.
- Karena R_E jauh lebih besar dari r'_e maka R_E bisa diabaikan.
- Sehingga kita dapat rangkaian yang lebih sederhana sebagai berikut:

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:

$$v_{out} = i_c R_C$$

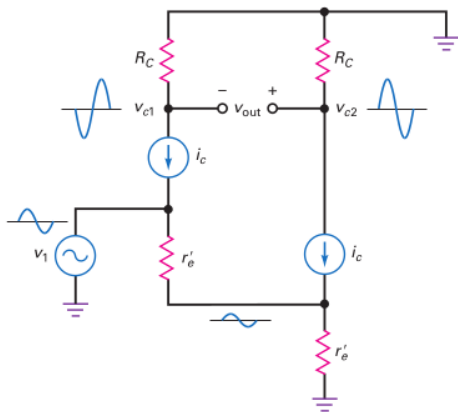
- Tegangan input AC:

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

- 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

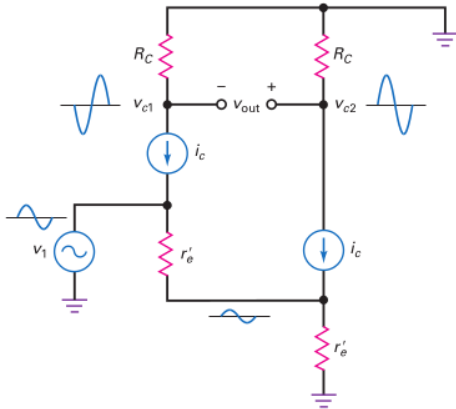


- Gambar di samping adalah rangkaian ekuivalen dari noninverting input & differential output.
- Analisis mirip dengan sebelumnya, kecuali tegangan outputnya adalah dua kalinya karena terdapat 2 resistor collector.

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

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

Differential output gain



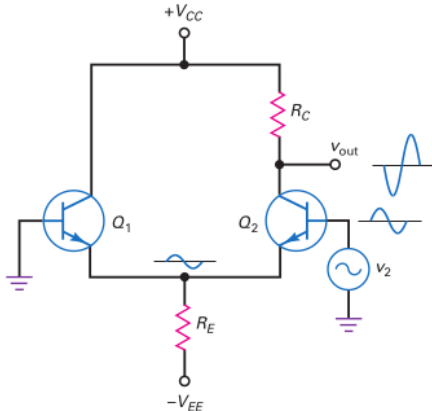
- Tegangan input AC nya masih sama

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

- 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

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

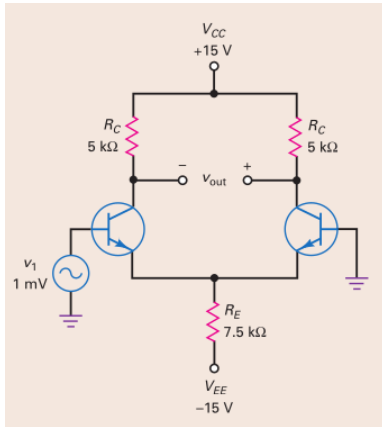
- Pada diff amp, impedansi input dari salah satu base adalah dua kalinya

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

- 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 $-A_vV_2$

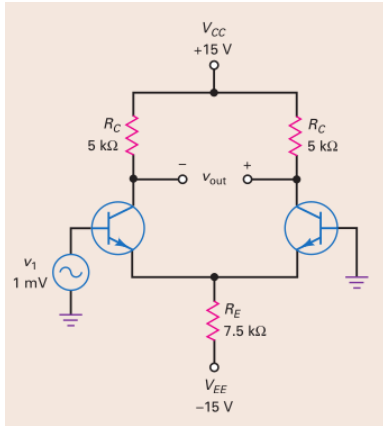
Contoh Soal 4



■ Pertanyaan:

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

Contoh Soal 4



■ Jawaban:

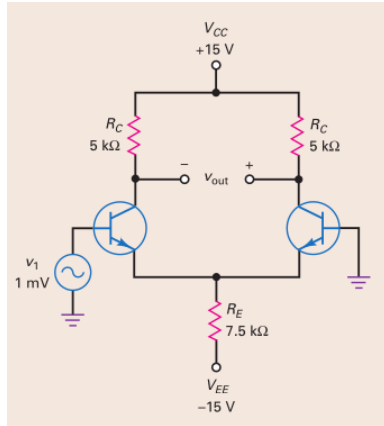
- Idealnya, 15 V di seberang resistor emitter, menghasilkan arus tail sebesar 2 mA, yang artinya arus emitter DC pada masing masing transistor sebesar

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

- 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:

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

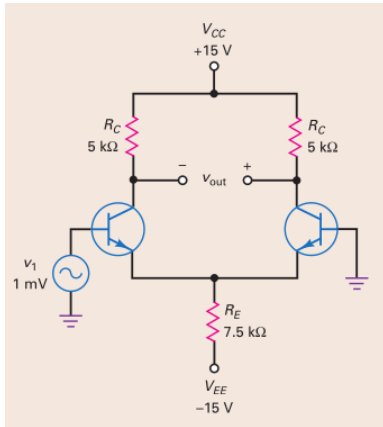
- Tegangan keluaran AC

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

- Impedansi input

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

Latihan Soal 4



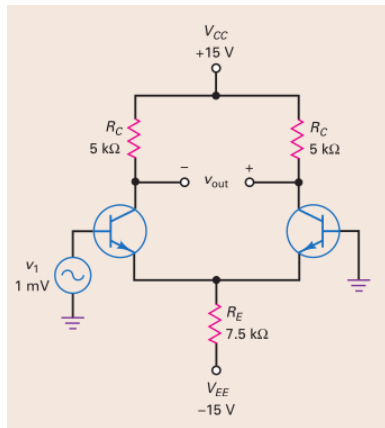
■ Pertanyaan:

- 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

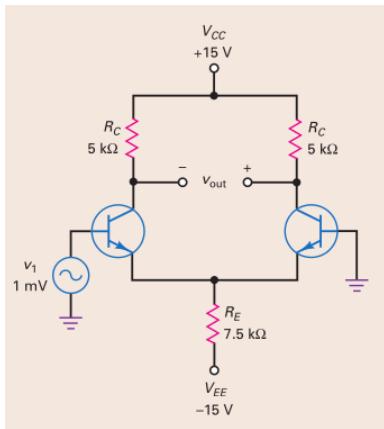
Contoh Soal 5



■ 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

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

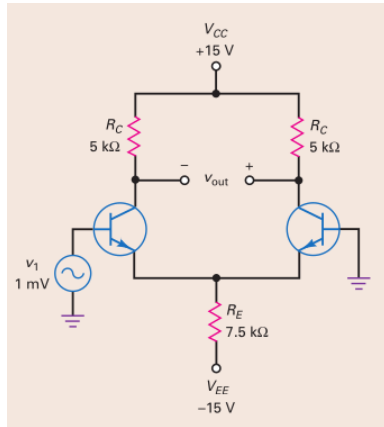
- Arus emitter DC

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

- Resistansi emitter AC

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

Contoh Soal 5



■ Jawaban:

- Voltage gain

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

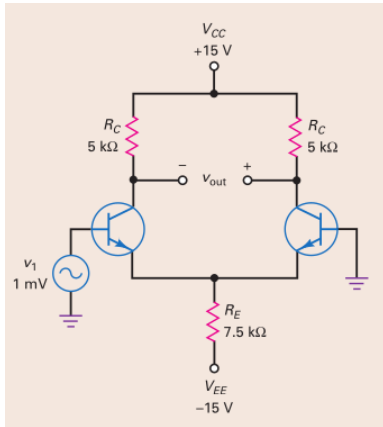
- Tegangan keluaran AC

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

- Impedansi input

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

Contoh Soal 6



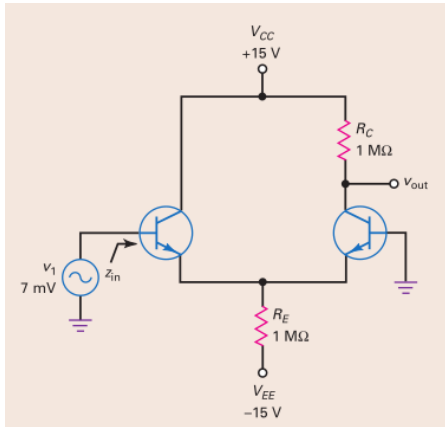
■ Pertanyaan:

- 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.

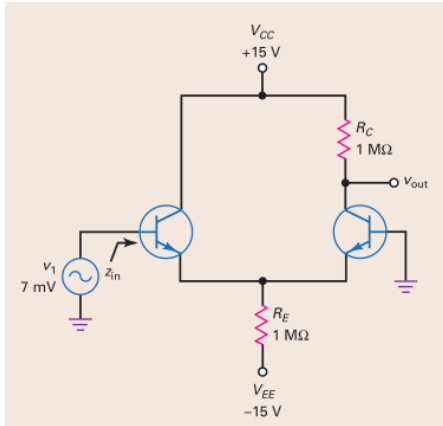
Contoh Soal 7



■ Pertanyaan:

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

Contoh Soal 7



■ Jawaban:

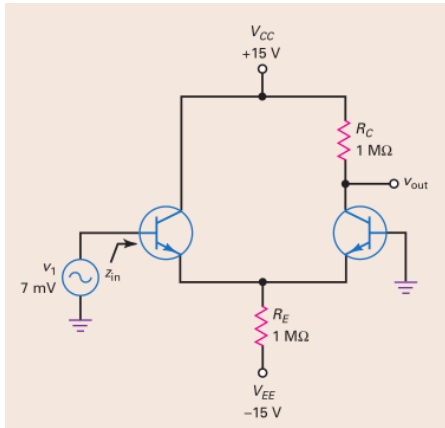
- Idealnya sebesar 15 V pada emitter resistor, sehingga arus tailnya:

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

- 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

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

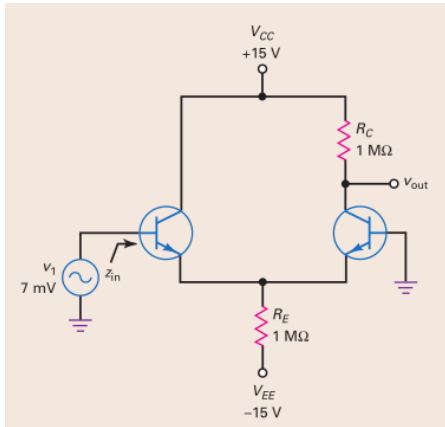
- Tegangan keluaran AC

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

- 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



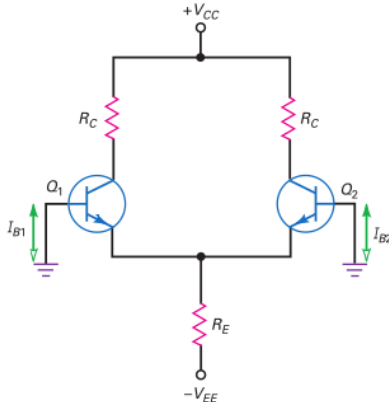
■ Pertanyaan:

- 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 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 keduanya identik.
- Terdapat 3 karakteristik pada datasheet setiap op amp yang biasanya digunakan oleh para engineer yang membutuhkan akurasi yg tinggi.
- Karakteristik tersebut antara lain:
 1. Arus bias input
 2. Arus offset input
 3. Tegangan offset input

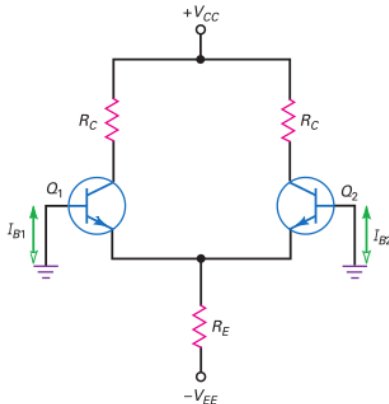
Arus bias input



- Pada op amp yang terintegrasi, β_{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 nA. Jika menggunakan JFET, biasanya arus bias inputnya sebesar pA.

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

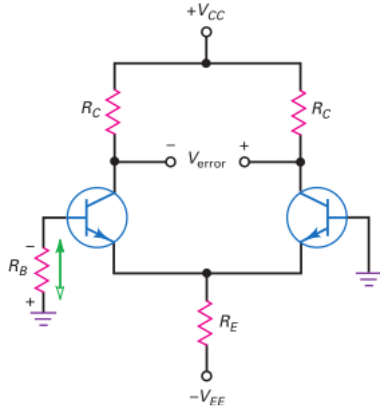
- Kita bisa turunkan persamaan arus bias dan arus offset input menjadi:

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

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

- 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

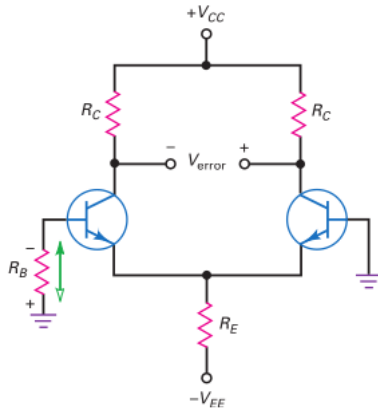


- Beberapa diff amp beroperasi dengan sebuah resistor base di satu sisi saja.
- Karena arah arus base, arus base melalui R_B menghasilkan tegangan input dc noninverting sebesar

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

- Resistor base menghasilkan tegangan input yang tidak diinginkan
- **Catatan:** Huruf kapital menunjukkan tegangan error dc (V_1) dan kita gunakan nilai absolut

Pengaruh dari Arus Base



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

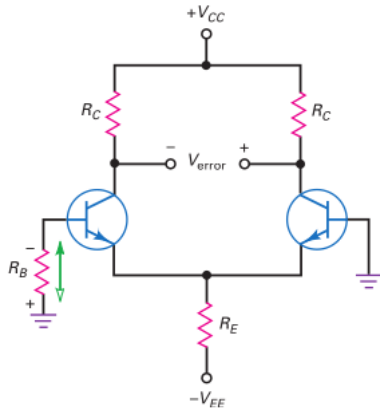
$$I_{B1} = I_{in(bias)} + \frac{I_{in(off)}}{2}$$

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

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

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

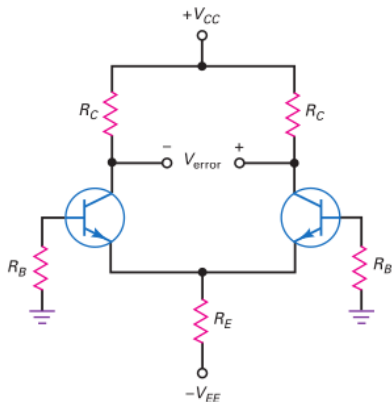
Pengaruh dari Arus Base



- 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

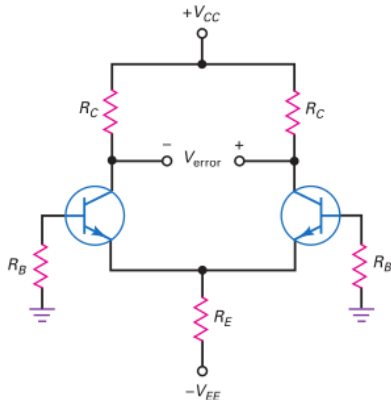


- Cara mengurangi error tegangan output dengan menggunakan resistor base yang sama pada sisi lainnya, seperti gambar di samping.
- Sehingga kita memiliki differential dc input

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

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

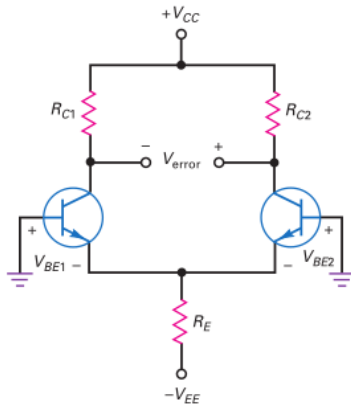
Pengaruh dari Arus Offset Input



- 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

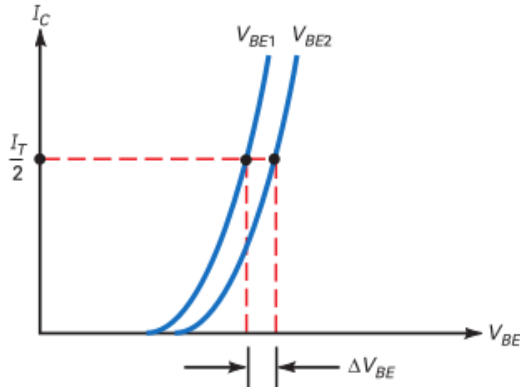
$$\begin{aligned} V_{in} &= (I_{in(off)})(R_B) \\ &= (20 \text{ nA})(1 \text{ k}\Omega) = 20 \text{ }\mu\text{V} \end{aligned}$$

Tegangan Offset Input



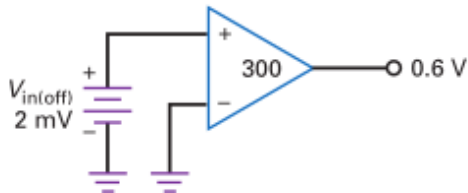
- Ketika diff amp terintegrasi sebagai first stage dari op amp, kedua sisinya hampir identik
- Kedua resistor collector bisa saja berbeda
- Akibatnya muncul error tegangan di output-nya

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

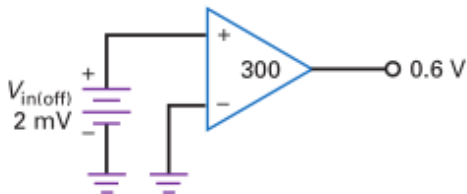


- Tegangan offset input = tegangan input yang menghasilkan error tegangan output yang sama di diff amp yang ideal

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

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

Tegangan Offset Input

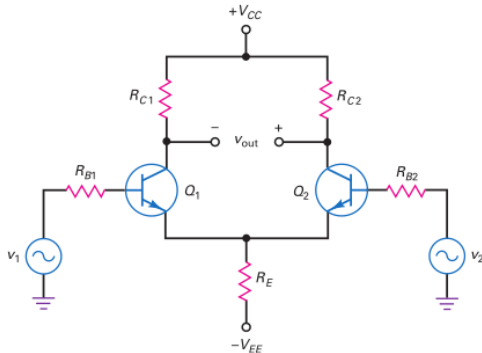


- Sebagai contoh, jika diff amp memiliki error tegangan sebesar 0.6 V dan penguatan tegangan sebesar 300, tegangan offset input adalah

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

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

Efek Gabungan



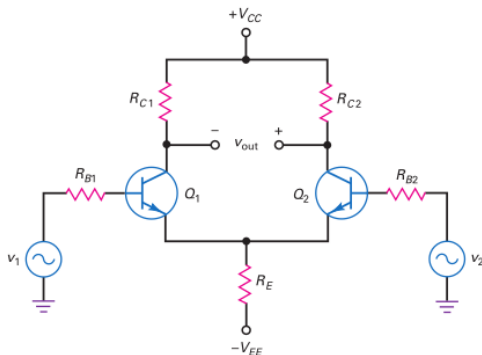
- Tegangan output adalah superposisi dari semua efek input
- Terdapat input ac ideal:

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

- 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:

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

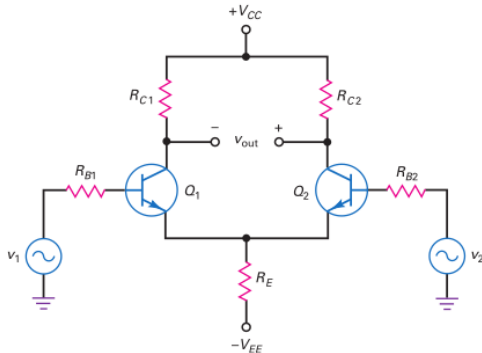
$$V_{2err} = (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \quad (17)$$

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

- 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:

$$V_{1err} = 0$$

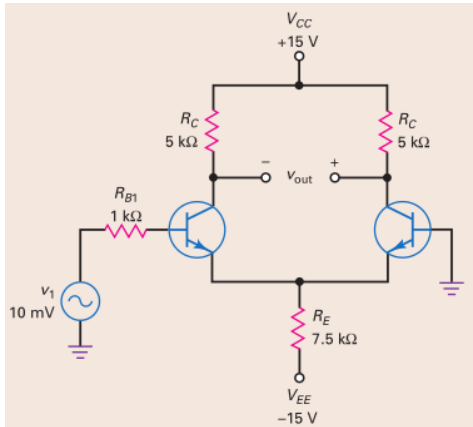
$$V_{2err} = R_B I_{in(off)}$$

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

- 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

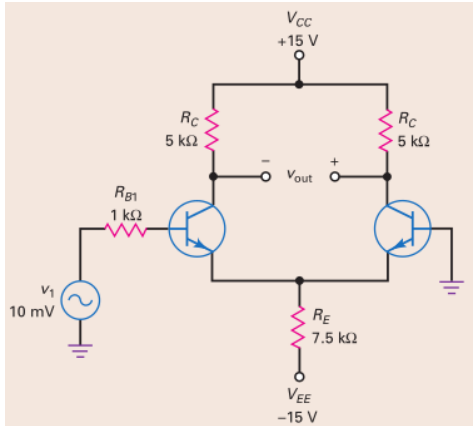
Contoh Soal 8



■ 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:

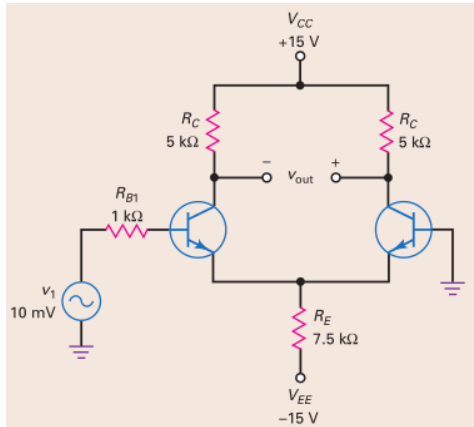
- Masing-masing error tegangan:

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

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

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

Contoh Soal 8



■ Jawaban:

- Error tegangan output:

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

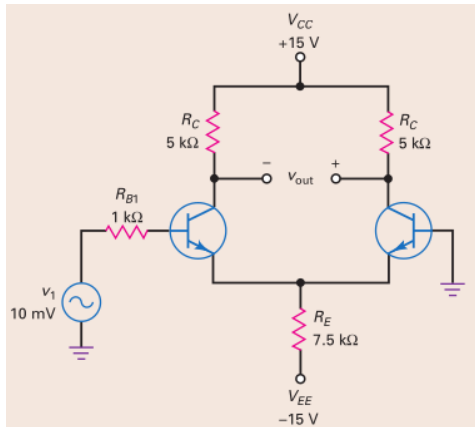
- Jika menggunakan resistor base yang identik di bagian inverting input:

$$V_{1err} = 0$$

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

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

Contoh Soal 8

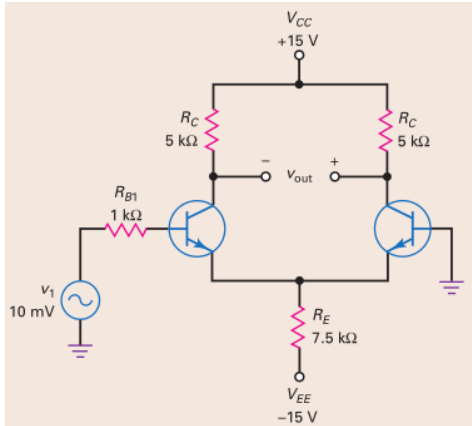


■ Jawaban:

□ Error tegangan output:

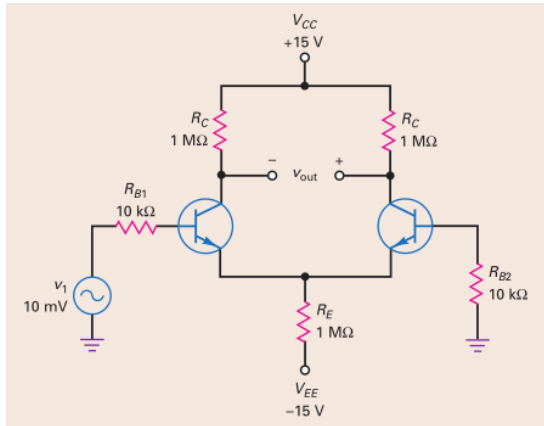
$$\begin{aligned}
 V_{error} &= A_v(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err}) \\
 &= 200(0.5 \text{ mV} + 1 \text{ mV}) \\
 &= 300 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

Latihan Soal 8



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

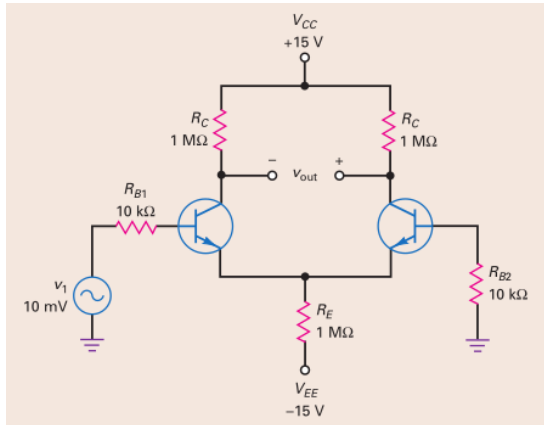
Contoh Soal 9



■ 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:

$$V_{1err} = 0$$

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

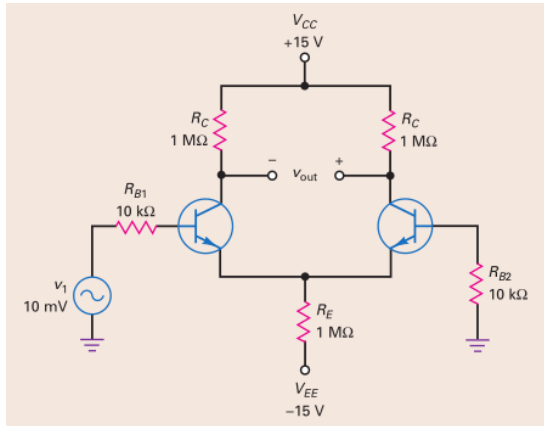
$$V_{3err} = V_{in(off)} = 5 \text{ mV}$$

- 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

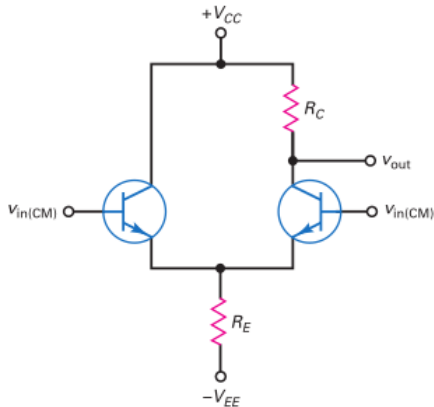


■ Pertanyaan:

- 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?

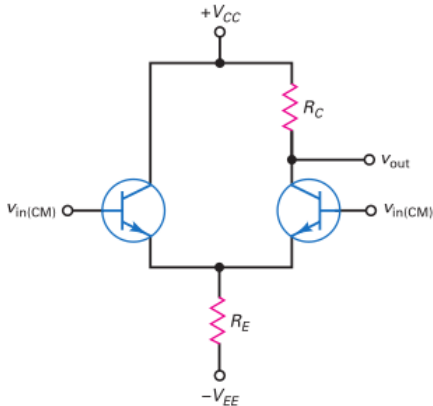
■ Jawaban: *Silakan dikerjakan*

Common-Mode Signal



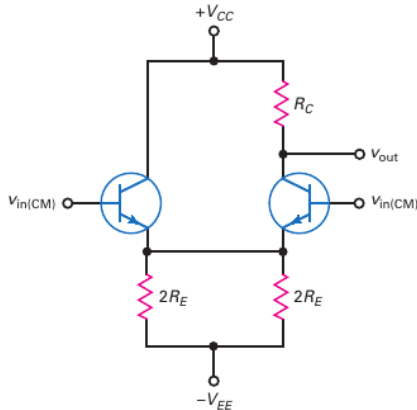
- Rangkaian differential input dan single-ended output
- Tegangan input yang sama ($v_{in(CM)}$) di setiap base → **common-mode signal**
- Jika diff amp benar-benar simetris → tidak ada tegangan output ac dengan common-mode signal karena $v_1 = v_2$
- Jika diff amp tidak simetris → ada tegangan output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

Common-Mode Signal



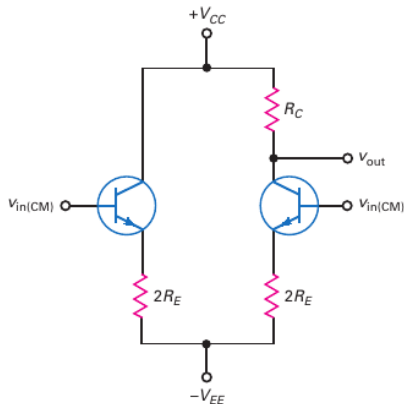
- Sebagian besar noise static atau interference = common-mode signal
- Bagaimana common-mode signal bisa muncul? → Wiring pada base mirip antena kecil.
- Lingkungannya dif amp banyak gelombang elektromagnetik → tiap base akan mengambil sinyal tegangan yang tidak diinginkan
- Alasan utama menggunakan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



- 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) :

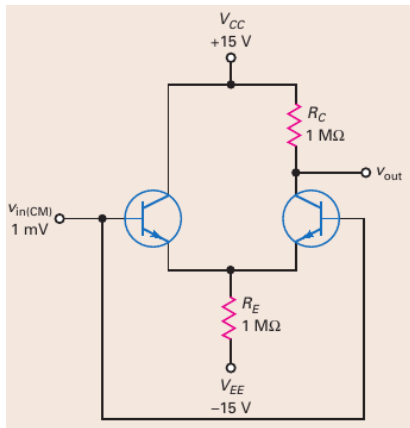
$$\text{CMRR} = \frac{A_v}{A_{v(CM)}} \quad (21)$$

- 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



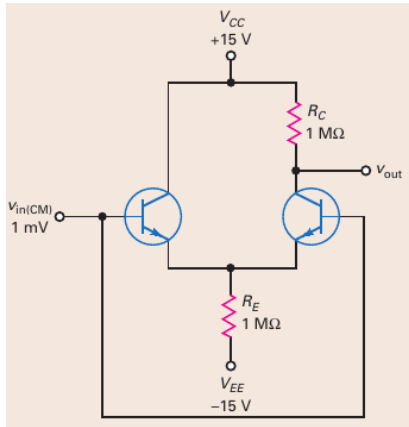
■ Pertanyaan:

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

■ Jawaban:

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

Latihan Soal 10



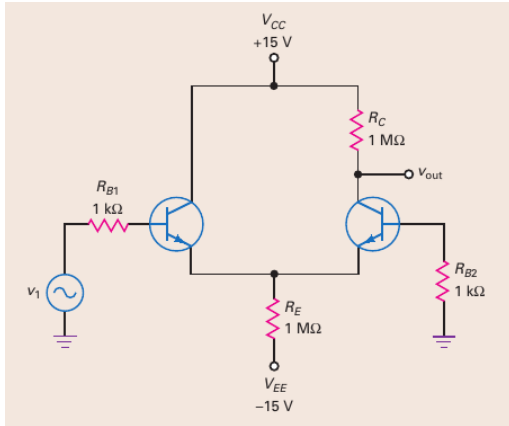
■ Pertanyaan:

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

■ Jawaban:

- ☐ Silakan dikerjakan

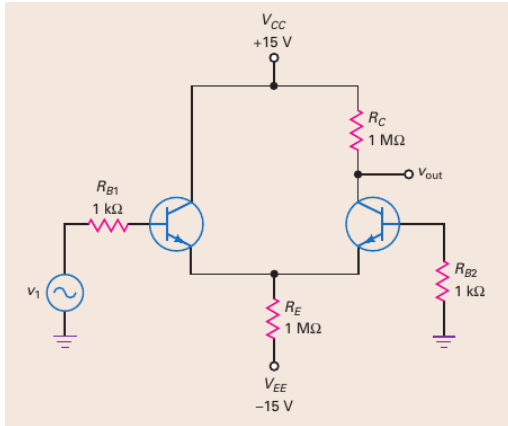
Contoh Soal 11



■ Pertanyaan:

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

Contoh Soal 11



■ Jawaban:

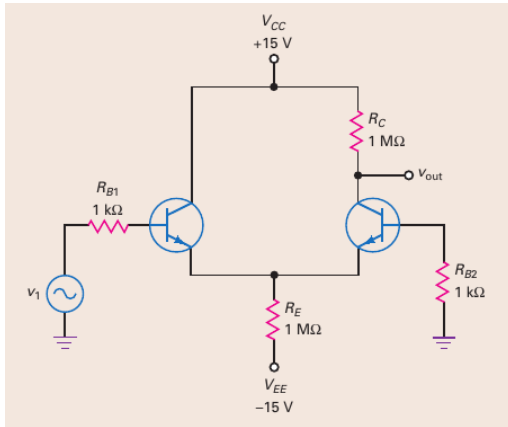
- Input memiliki 2 komponen: sinyal yang diinginkan dan common-mode signal dengan amplitudo yang sama
- Sinyal yang diinginkan akan dikuatkan:

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

- Common-mode signal akan dilemahkan:

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

Contoh Soal 11



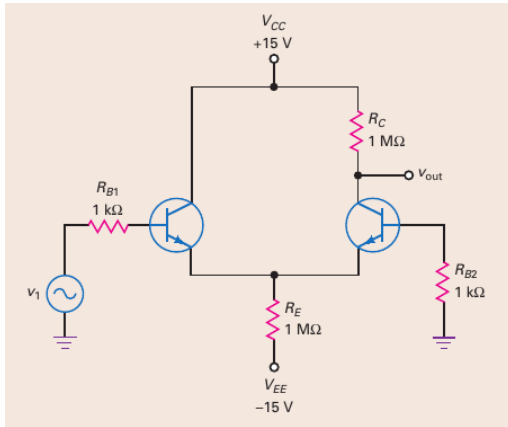
■ Jawaban:

- 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 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:

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

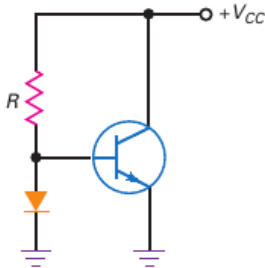
□ output yang diinginkan $>$ common-mode output

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?

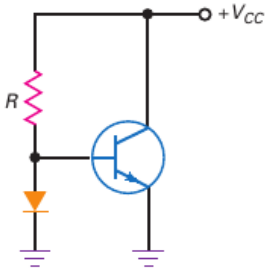
The Current Mirror



- 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 Sumber dari Arus Tail

- Pada single-ended output, voltage gain diff amp adalah

$$A_v = \frac{R_C}{2r'_e}$$

dan common-mode voltage gain adalah

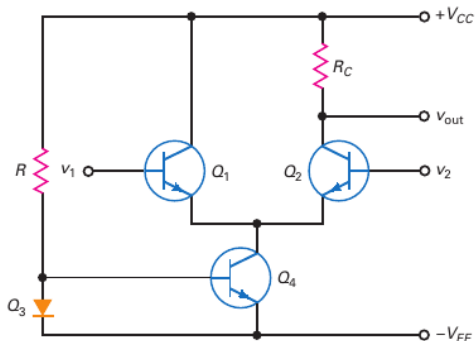
$$A_{v(CM)} = \frac{R_C}{2R_E}$$

- Rasio dari kedua gain adalah

$$CMRR = \frac{R_E}{r'_e}$$

- Semakin besar R_E maka semakin besar $CMRR$

Current Mirror Sumber dari Arus Tail

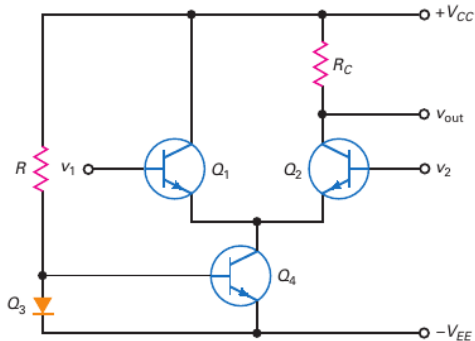


- Cara untuk memperbesar R_E ekuivalen adalah dengan menggunakan current mirror untuk menghasilkan tail current
- Arus yang melalui compensating diode

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

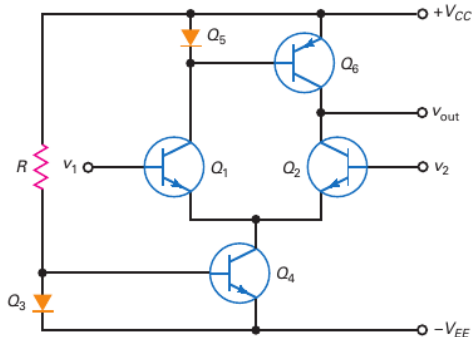
- Current mirror \rightarrow tail current memiliki nilai yang sama

Current Mirror Sumber dari Arus Tail



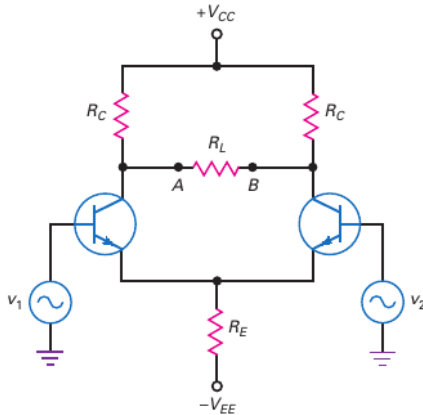
- Q_4 bertindak seperti sumber arus \rightarrow memiliki impedansi yang sangat besar
- Akibatnya, R_E ekuivalen memiliki ratusan $M\Omega \rightarrow CMRR$ akan naik drastis
- Q_3 sebagai dioda, karena base & collector transistor Q_3 terhubung \rightarrow biasanya ada di dalam IC

Active Load



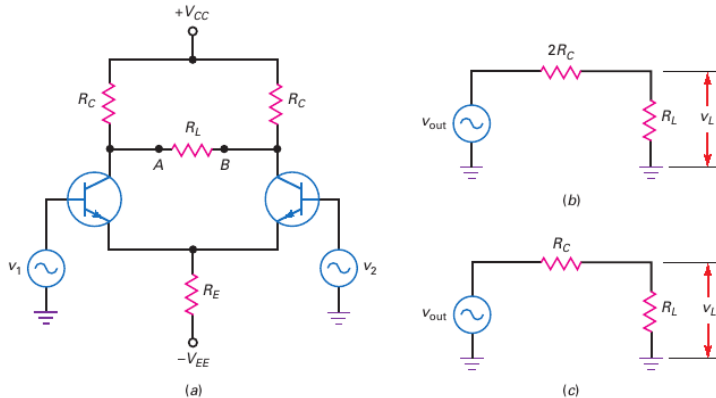
- $A_v = R_C / 2r'_e$
- R_C naik $\rightarrow A_v$ naik
- Gunakan current mirror sebagai active load resistor
- Karena Q_6 sumber arus *pnp*, Q_2 melihat ekivalen R_C bernilai ratusan $M\Omega$
- Hasilnya: Voltage gain jauh lebih besar dengan menggunakan active load daripada resistor biasa.
- Active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

Diff Amp Terbeban



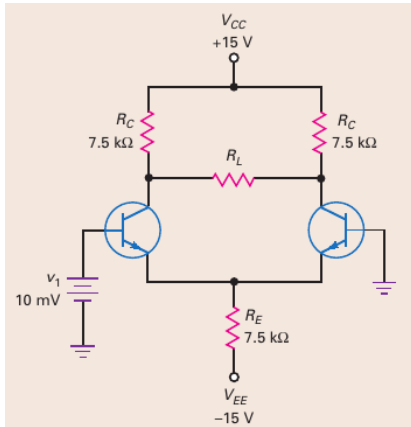
- Materi sebelumnya, diff amp tidak menggunakan resistor beban
- Penambahan resistor beban → analisis menjadi lebih rumit, terlebih lagi jika menggunakan differential output
- Resistor beban di antara collector
- Analisis:
 - Metode loop → sulit
 - Metode teorema Thevenin → lebih mudah

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:

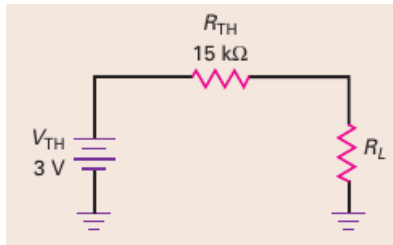
$$I_T = \frac{V_{EE}}{R_E} = \frac{15 \text{ V}}{7.5 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

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

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

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

Contoh Soal 13



■ Jawaban:

- Tegangan Thevenin atau Tegangan output tanpa beban:

$$v_{out} = A_v(v_1) = 300(10 \text{ mV}) = 3 \text{ V}$$

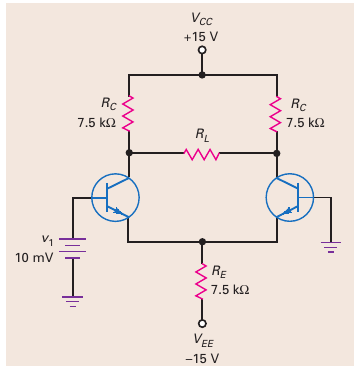
- Resistor Thevenin:

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

- Tegangan beban:

$$\begin{aligned} v_L &= \frac{R_L}{R_{TH} + R_L}(v_{TH}) \\ &= \frac{15 \text{ k}\Omega}{15 \text{ k}\Omega + 15 \text{ k}\Omega}(3 \text{ V}) = 0.5(3 \text{ V}) \\ &= 1.5 \text{ V} \end{aligned}$$

Latihan Soal 13



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

TERIMA KASIH