

# RANGKAIAN ELEKTRONIKA II

Penguat Operasional



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

Teknik Elektro  
Institut Teknologi Kalimantan  
Balikpapan, Indonesia

Maret 3, 2021

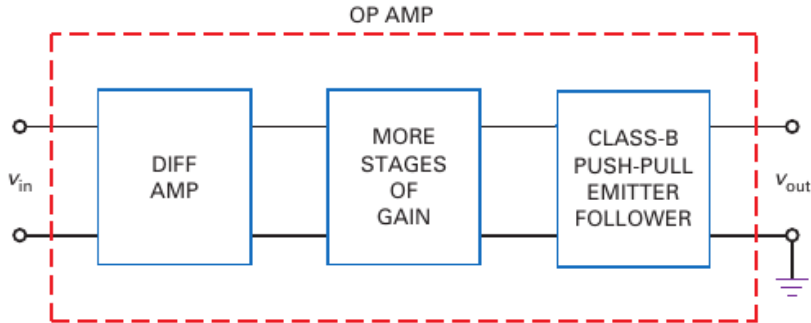
Mahasiswa mampu menganalisis rangkaian penguat operasional (C4, P3, A3)

# Bahan Kajian

---

1. Konsep dasar penguat operasional;
2. Inverting amplifier;
3. Noninverting amplifier;
4. The Summing Amplifier;
5. Voltage Follower.

# Pengantar Op Amp



Gambar. 1: Blok diagram sebuah op amp

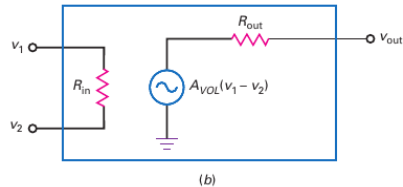
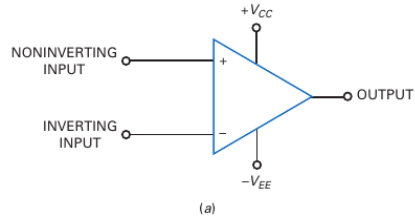
## Pengantar Op Amp

- Gambar 1 adalah diagram blok dari sebuah op amp.
- Input stage-nya adalah diff amp, kemudian diikuti dengan lebih banyak tahapan-tahapan penguat dan sebuah Class-B push-pull emitter follower.
- Karena diff amp adalah tahapan pertamanya maka hal ini yang menentukan karakteristik input dari op amp.
- Sebagian besar op amp adalah single-ended output, seperti pada Gambar 1.
- Dengan supply positif dan negatif, single-ended output dirancang untuk memiliki nilai quiescent/ nilai diam sebesar nol.

## Pengantar Op Amp

- Tidak semua op amp dirancang seperti Gambar 1.
- Beberapa op amp tidak menggunakan Class-B push-pull output, dan ada juga yang memiliki double-ended output.
- Op amp juga tidak sesederhana seperti pada Gambar 1.
- Rancangan internal dari monolithic op amp sangat rumit, menggunakan ribuan transistor sebagai current mirrors, active load, dan inovasi lainnya yang tidak mungkin di dalam rancangan diskret.
- Gambar 1 hanya menunjukkan 2 fitur penting yang umumnya digunakan di op amp, yaitu differential input dan single-ended output.

# Pengantar Op Amp



Gambar. 2: (a) Simbol dari op amp dan (b) rangkaian ekivalen dari op amp

## Pengantar Op Amp

- Gambar 2a adalah simbol skematik dari sebuah op amp.
- Memiliki noninverting dan inverting input dan single-ended output.
- Idealnya, simbol ini menunjukkan amplifier memiliki voltage gain tak hingga, impedansi input tak hingga, dan nol impedansi output.
- Op amp ideal merepresentasikan voltage amplifier yang sempurna dan sering disebut sebagai voltage-controlled voltage source (VCVS).
- VCVS ditunjukkan oleh Gambar 2b, dimana  $R_{in}$  bernilai tak hingga dan  $R_{out}$  bernilai nol.



# Pengantar Op Amp

Summary Table 16-1		Typical Op-Amp Characteristics		
Quantity	Symbol	Ideal	LM741C	LF157A
Open-loop voltage gain	$A_{VOL}$	Infinite	100,000	200,000
Unity-gain frequency	$f_{unity}$	Infinite	1 MHz	20 MHz
Input resistance	$R_{in}$	Infinite	2 M $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$
Output resistance	$R_{out}$	Zero	75 $\Omega$	100 $\Omega$
Input bias current	$I_{in(bias)}$	Zero	80 nA	30 pA
Input offset current	$I_{in(off)}$	Zero	20 nA	3 pA
Input offset voltage	$V_{in(off)}$	Zero	2 mV	1 mV
Common-mode rejection ratio	CMRR	Infinite	90 dB	100 dB

**Gambar. 3:** Perbandingan karakteristik op amp ideal dan op amp standar

## Pengantar Op Amp

- Tabel yang ditunjukkan oleh Gambar 3 adalah ringkasan dari karakteristik op amp ideal.
- Memiliki voltage gain, unity-gain frekuensi, input impedansi, dan CMRR yang bernilai tak hingga.
- Memiliki resistor output, arus bias, offset yang bernilai nol.
- Seperti itulah seharusnya manufaktur membuat op amp, jika mereka mampu.
- Namun kenyataannya mereka hanya mampu membuat yang mendekati nilai idealnya saja.

## Pengantar Op Amp

- LM741C memiliki voltage gain sebesar 100000, unity-gain frekuensi sebesar 1 MHz, dan impedansi input sebesar  $2\text{ M}\Omega$ , dan seterusnya.
- Karena voltage gain yang sangat besar, input offset dapat dengan mudahnya memenuhi op amp.
- Sehingga diperlukan komponen eksternal antara input dan output op amp untuk menstabilkan voltage gain.
- Contohnya, menggunakan negative feedback untuk menyesuaikan voltage gain keseluruhan menjadi ke nilai yang lebih kecil sebagai ganti operasi linier yang stabil.

## Pengantar Op Amp

- Ketika tidak ada jalur feedback yang digunakan, voltage gain bernilai maksimum yang disebut sebagai open-loop voltage gain,  $A_{VOL}$
- Pada Gambar 3,  $A_{VOL}$  dari LM741C bernilai 100000.
- Meskipun bukan bernilai tak hingga, open-loop voltage gain ini sangat tinggi.
- Contohnya, sebuah input sekecil  $10 \mu\text{V}$  akan menghasilkan output sebesar 1 V.
- Karena open-loop voltage gain sangat besar, kita dapat menggunakan heavy negative feedback untuk meningkatkan performa keseluruhan rangkaian.

## Pengantar Op Amp

- 741C memiliki unity-gain frequency sebesar 1 MHz, artinya kita memperoleh voltage gain hingga 1 MHz.
- 741C memiliki input resistance sebesar  $2\text{ M}\Omega$ , output resistance sebesar  $75\text{ }\Omega$ , arus bias input sebesar 80 nA, arus offset input sebesar 20 nA, tegangan offset input sebesar 2 mV, dan CMRR sebesar 90 dB.
- Saat resistor yang lebih tinggi dibutuhkan, seorang designer dapat menggunakan op amp BIFET.
- JFET digunakan di input stage untuk mendapatkan input bias dan arus offset yang lebih kecil.
- Bipolar transistor digunakan pada stage selanjutnya untuk mendapatkan lebih banyak voltage gain.

## Pengantar Op Amp

- LF571A adalah contoh dari op amp BIFET.
- Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3, arus bias inputnya hanya 30 pA dan input resistance adalah  $10^{12} \Omega$ .
- Memiliki voltage gain 200000 dan unity-gain frequency sebesar 20 MHz.
- Dengan menggunakan op amp ini kita bisa mendapatkan voltage gain hingga 20 MHz.

## Pengantar Op Amp 741

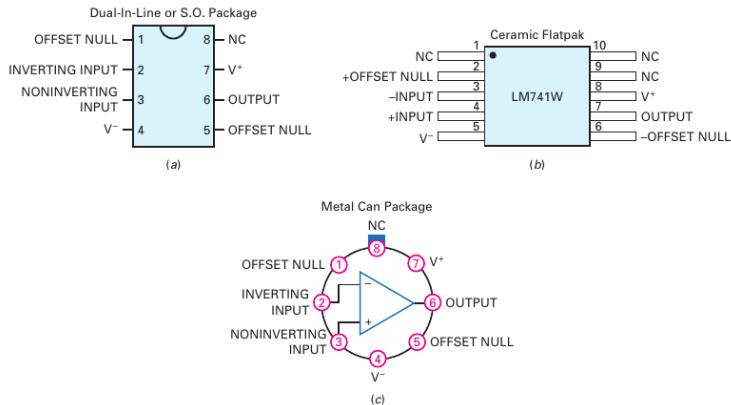
- Monolithic amp  $\mu A709$  dibuat tahun 1965 oleh Fairchild Semiconductor
- Meskipun tergolong sukses, generasi pertama op amp ini memiliki kekurangan maka dibuatlah  $\mu A741$
- Karena harganya yang tidak mahal dan mudah digunakan,  $\mu A741$  sangatlah sukses.
- Banyak manufaktur yang membuat  $\mu A741$ :
  - ON Semiconductor: MC1741
  - Texas Instruments: LM741
  - Analog Devices: AD741.
- Istilah umumnya op amp 741

## Standar Industri

- Tipe 741 memiliki beberapa versi: 741, 741A, 741C, 741E, dan 741N
- Bergantung pada karakteristiknya (voltage gain, temp. range, noise level, dll)
- 741C (C = *Commercial grade*) → sedikit lebih murah dan paling banyak digunakan
- $A_{VOL} = 100000$ ,  $z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $z_{out} = 75 \Omega$
- Gambar 4 menunjukkan 3 package yang terkenal beserta pinoutnya

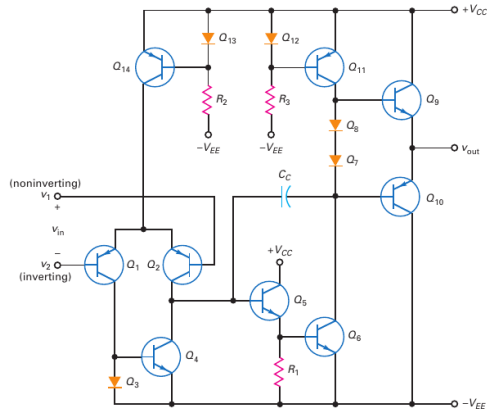


# Standar Industri



Gambar. 4: Op amp 741 pinouts (a) dual-in-line, (b) ceramic flatpak, (c) metal can

## Diagram skematik yang disederhanakan dari 741



Gambar. 5: Rangkaian ekivalen dari op amp 741

## Input Diff Amp

---

- Gambar 5 adalah diagram skematik yang disederhanakan dari 741.
- Rangkaian ini merupakan ekivalen dari 741 dan op amp generasi-generasi selanjutnya.
- Tidak perlu memahami secara detail rangkaian tersebut, cukup pahami ide dasarnya saja.

## Input Diff Amp

- Input stage yang digunakan adalah diff amp ( $Q_1$  dan  $Q_2$ ).
- $Q_{14}$  adalah sumber arus yang menggantikan tail resistor.
- $R_2$ ,  $Q_{13}$ ,  $Q_{14}$  adalah current mirror yang menghasilkan tail current untuk  $Q_1$  dan  $Q_2$ .
- Daripada menggunakan resistor biasa sebagai resistor kolektor, 741 ini menggunakan active-load resistor.
- Active-load  $Q_4$  bertindak sebagai seperti sumber arus dengan impedansi yang sangat tinggi.
- Akibatnya, voltage gain dari diff amp menjadi jauh lebih besar daripada menggunakan passive-load resistor.

## Input Diff Amp

- Sinyal yang dikuatkan dari diff amp akan mendrive base dari  $Q_5$ , sebuah emitter follower.
- Stage ini akan menaikkan level impedansi untuk menghindari loading down dari diff amp.
- Sinyal yang keluar dari  $Q_5$  menuju ke  $Q_6$ .
- Dioda  $Q_7$  dan  $Q_8$  adalah bagian dari bias untuk final stage.
- $Q_{11}$  adalah active-load resistor untuk  $Q_6$ , sehingga  $Q_6$  dan  $Q_{11}$  seperti CE driver stage dengan voltage gain yang sangat besar.
- Simbol dioda digunakan ketika transistor memiliki base yang terhubung singkat dengan collector, seperti  $Q_3$ .

## Final Stage

- Sinyal yang dikuatkan yang keluar dari CE driver stage ( $Q_6$ ) menuju ke final stage, yang merupakan Class-B push-pull emitter follower ( $Q_9$  dan  $Q_{10}$ ).
- Karena supply tegangan yang terbagi menjadi 2 (Positif  $V_{CC}$  dan negatif  $V_{EE}$ ), quiescent output idealnya adalah 0 V ketika tegangan inputnya nol.
- Deviasi berapapun dari 0 V disebut tegangan error output (output error voltage).
- Jika  $v_1 > v_2$ , tegangan input  $v_{in}$  akan menghasilkan tegangan output  $v_{out}$  positif. Sebaliknya, jika  $v_2 > v_1$ , tegangan input  $v_{in}$  akan menghasilkan tegangan output  $v_{out}$  negatif.
- Idealnya,  $v_{out}$  bisa sama positifnya dengan  $+V_{CC}$  dan sama negatifnya dengan  $-V_{EE}$  sebelum clipping terjadi.
- Output swing normalnya dalam 1 hingga 2 V dari tiap tegangan supply karena tegangan drop di dalam 741.

## Active Loading

- Pada Gambar 5, terdapat 2 active-loading (menggunakan transistor daripada resistor sebagai load atau bebannya).
- Pertama, ada active-load  $Q_4$  di input diff.
- Kedua, ada active-load  $Q_{11}$  do CE driver stage.
- Karena sumber arus memiliki impedansi output yang besar, active-load menghasilkan voltage gain yang lebih besar daripada jika menggunakan resistor.
- Active-load ini umumnya menghasilkan voltage gain sebesar 100000 untuk 741C.
- Active-load sangat populer di dalam IC karena lebih mudah dan lebih murah untuk membuat transistor di dalam chip daripada membuat resistor.

## Frequency Compensation

- Pada Gambar 5,  $C_c$  adalah compensating capacitor.
- Karena efek Miller, kapasitor kecil ini (umumnya 30 pF) dikalikan dengan voltage gain dari  $Q_5$  dan  $Q_6$  untuk mendapatkan kapasitansi ekuivalen yang lebih besar yaitu

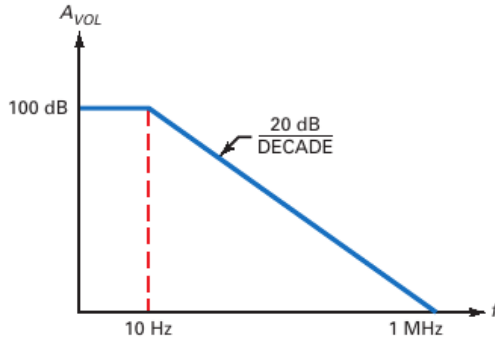
$$C_{in(M)} = (A_v + 1)C_c$$

di mana  $A_v$  adalah voltage gain dari stage  $Q_5$  dan  $Q_6$ .

- Resistansi yang berhadapan dengan kapasitansi Miller adalah impedansi output dari diff amp sehingga kita memiliki rangkaian lag.
- Rangkaian lag menghasilkan cut off frequency 10 Hz di 741C.
- Open-loop gain dari op amp adalah di bawah 3 dB di cut off frequency ini.
- Kemudian,  $A_{VOL}$  menurun sekitar 20 dB/decade hingga mencapai unity-gain frequency.



# Frequency Compensation



Gambar. 6: Bode plot  $A_{VOL}$  741C ideal

## Frequency Compensation

- Gambar 6 menunjukkan Bode plot ideal dari open-loop voltage gain terhadap frequency.
- 741C memiliki open-loop voltage gain sebesar 100000, ekivalen dengan 100 dB.
- Karena open-loop cut off frequency adalah 10 Hz, voltage gain akan berhenti di 10 Hz dan turun sebesar 20 dB/decade hingga 0 dB di 1 MHz.

## Bias & Offset

---

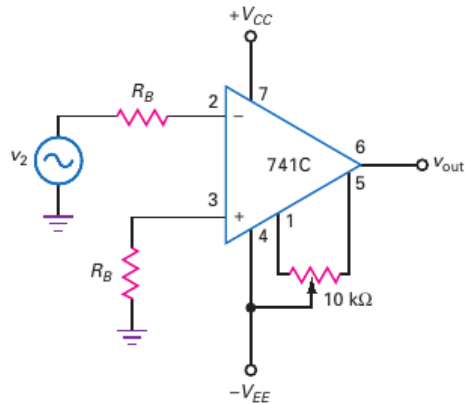
- Telah dijelaskan sebelumnya bahwa diff amp memiliki input bias dan offset yang menghasilkan error output ketika tidak ada input sinyal.
- Dalam beberapa aplikasi, output error adalah cukup kecil untuk diabaikan.
- Tapi ketika output error tidak bisa diabaikan, designer dapat mereduksinya dengan menggunakan base resistor yang bernilai sama.
- Cara ini dapat menghilangkan permasalahan dari arus bias tapi tidak untuk arus offset dan tegangan offset.

## Bias & Offset

---

- Sehingga cara terbaik untuk menghilangkan error output adalah dengan menggunakan nulling circuit yang diberikan di datasheet.
- Nulling circuit dapat menghilangkan output error dan meminimalkan thermal drift, perubahan yang pelan di tegangan output yang disebabkan oleh perubahan temperatur pada parameter op amp.
- Terkadang datasheet tidak menyertakan nulling circuit, sehingga kita berikan tegangan input yang kecil untuk me-null-kan output.

# Bias & Offset



Gambar. 7: Penggunaan compensation dan nulling 741C

## Bias & Offset

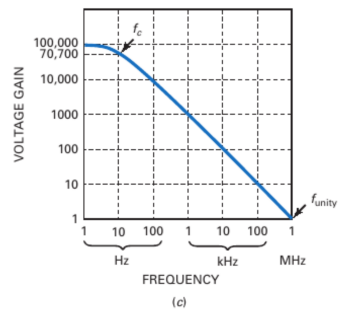
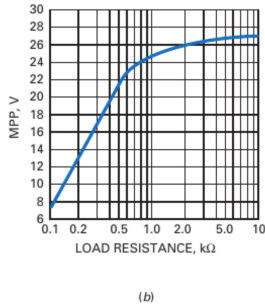
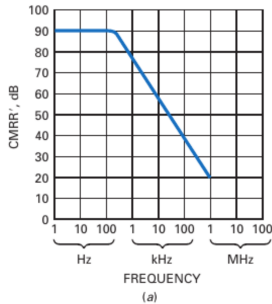
- Gambar 7 menunjukkan metode nulling yang disarankan oleh datasheet 741C.
- Sumber AC men-drive inverting input yang memiliki resistansi Thevenin  $R_B$ .
- Untuk menetralkan efek dari arus bias input (80 nA) yang mengalir melalui resistor ini, resistor diskret yang bernilai sama ditambahkan ke noninverting input seperti di gambar tersebut.

## Bias & Offset

---

- Untuk menghilangkan efek dari arus offset input 20 nA dan tegangan offset input 2 mV, datasheet 741C merekomendasikan untuk menggunakan 10 k $\Omega$  potentiometer antara pin 1 dan pin 5.
- Dengan meng-adjust potentiometer ini dengan tanpa sinyal input, kita dapat membuat tegangan output menjadi nol.

# CMRR, MPP, dan $A_{VOL}$



**Gambar. 8:** Grafik (a) Common-Mode Rejection Ratio (CMRR), (b) Maximum Peak-to-Peak Output (MPP), dan (c) Open-Loop Voltage Gain  $A_{VOL}$  dari 741C



## Common-Mode Rejection Ratio

- Untuk 741C, CMRRnya adalah 90 dB di frekuensi rendah.
- Jika diberikan 2 sinyal yang sama, sinyal yang diinginkan dan yang tidak, sinyal yang diinginkan akan bernilai 90 dB lebih besar di output daripada common-mode signal-nya.
- Atau sinyal yang diinginkan 30000 kali lebih besar daripada common-mode signal.
- Pada frekuensi tinggi, efek reaktif menurunkan CMRR seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8a.

## Maximum Peak-to-Peak Output

- Nilai MPP dari amplifier adalah output peak-to-peak maksimum yang amplifier dapat hasilkan tanpa clipping.
- Karena quiescent output dari op amp idealnya bernilai nol, tegangan output ac dapat berayun secara positif atau negatif.
- Untuk resistansi beban yang lebih besar daripada  $R_{out}$ , tegangan output dapat berayun hampir ke tegangan supply.
- Contoh, jika  $V_{CC} = +15\text{ V}$  dan  $V_{EE} = -15\text{ V}$ , nilai MPP dengan resistansi beban sebesar  $10\text{ k}\Omega$  idealnya adalah  $30\text{ V}$ .

## Maximum Peak-to-Peak Output

- Dengan op amp yang tidak ideal, output tidak dapat berayun ke tegangan supply karena ada tegangan drop yang kecil di final stage op amp.
- Ketika resistansi beban tidak besar dibandingkan dengan  $R_{out}$ , beberapa tegangan yang dikuatkan akan drop di  $R_{out}$ , artinya tegangan output final lebih kecil.
- Gambar 8b menunjukkan MPP vs resistansi beban untuk 741C dengan tegangan supply +15 V dan -15 V
- Perhatikan bahwa MPP sekitar 27 V untuk  $R_L$  10 k $\Omega$ .
- Artinya, output saturasi secara positif +13.5 V dan secara negatif -13.5 V.
- Ketika resistansi beban menurun, MPP juga menurun.
- Contohnya, jika resistansi beban 275  $\Omega$ , MPP menurun hingga 16 V, yang artinya output saturasi secara positif +8 V dan secara negatif -8 V.

## Short-Circuit Current

- Di beberapa aplikasi, op amp mungkin men-drive resistansi beban sekitar nol.
- Pada kasus seperti ini, kita perlu mengetahui nilai dari short-circuit output current.
- Datasheet dari 741C menyatakan short-circuit output current sebesar 25 mA.
- Ini adalah arus output maksimum yang op amp hasilkan.
- Jika kita menggunakan resistor beban yang lebih kecil (kurang dari  $75\ \Omega$ ), jangan harap untuk mendapatkan tegangan output yang besar karena tegangannya tidak akan lebih besar daripada 25 mA dikali dengan resistansi beban tadi.

## Frequency Response

- Gambar 8c menunjukkan respon frekuensi dari sinyal yang kecil dari 741C.
- Pada frekuensi tengah, voltage gain sebesar 100000. 741C memiliki cutoff frequency  $f_c$  di 10 Hz.
- Seperti yang ditampilkan, voltage gain sebesar 70700 (menurun 3 dB) di 10 Hz.
- Di atas cutoff frequency, voltage gain akan menurun sebesar 20 dB/decade.

## Frequency Response

- Unity-gain frequency adalah frekuensi dimana voltage gain bernilai 1.
- Pada Gambar 8c,  $f_{unity}$  adalah 1 MHz.
- Datasheet biasanya menspesifikkan nilai dari  $f_{unity}$  karena ini merepresentasikan batas atas pada gain yang dapat digunakan di op amp.
- Contoh, datasheet 741C menyatakan  $f_{unity}$  sebesar 1 MHz. Artinya 741C dapat menguatkan sinyal hingga 1 MHz.
- Di atas 1 MHz, voltage gain kurang dari 1 dan 741C tidak berguna.
- Jika menginginkan  $f_{unity}$  yang lebih tinggi, gunakan LM318 yang memiliki  $f_{unity}$  15 Hz.

## Slew Rate

---

- Compensating capacitor di dalam 741C memberikan fungsi yang sangat penting.
- Yaitu mencegah osilasi yang dapat menginterferensi sinyal yang diinginkan.
- Namun ada kekurangan, compensating capacitor perlu di-charge dan di-discharge.
- Hal ini membuat batasan pada seberapa cepat output op amp dapat berubah.

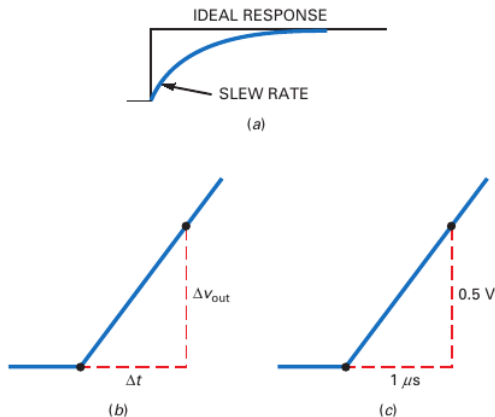
## Slew Rate

---

- Tegangan input ke op amp adalah tegangan step positif, transisi tegangan yang mendadak dari satu level dc ke level dc yang lebih tinggi.
- Jika op amp nya sempurna, maka kita memperoleh respons ideal seperti pada Gambar 9a.
- Namun, output yang terjadi adalah sinyal eksponensial positif.
- Hal ini terjadi karena compensating capacitor harus di-charge terlebih dahulu sebelum tegangan output dapat berubah ke level yang lebih tinggi.



# Slew Rate



Gambar. 9: (a) Respon ideal dan aktual terhadap tegangan step input, (b) ilustrasi definisi slew rate, (c)  $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$

## Slew Rate

- Initial slope dari bentuk sinyal eksponensial disebut slew rate,  $S_R$ .
- Persamaan slew rate,  $S_R$ .

$$S_R = \frac{\Delta v_{out}}{\Delta t} \quad (1)$$

- Gambar 9b mengilustrasikan makna dari slew rate.
- Initial slope = perubahan vertikal dibagi dengan perubahan horizontal di antara 2 titik di bagian awal gelombang eksponensial.
- Exponential wave meningkat 0.5 V selama 1 mikrodetik pertama, maka

$$\begin{aligned} S_R &= \frac{\Delta v_{out}}{\Delta t} = \frac{0.5 \text{ V}}{1 \mu s} \\ &= 0.5 \text{ V}/\mu s \end{aligned}$$

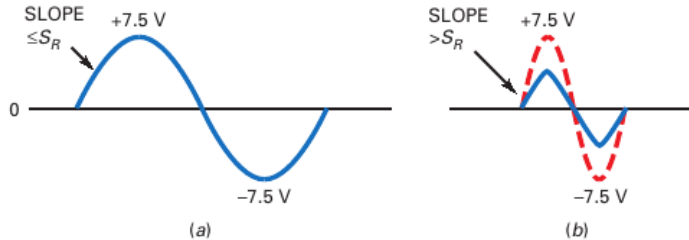
## Slew Rate

- Slew rate merepresentasikan respon tercepat yang dimiliki oleh op amp.
- Contoh, slew rate dari 741C adalah  $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ .
- Artinya adalah output dari 741C dapat berubah tidak lebih cepat dari  $0.5 \text{ V}$  dalam 1 mikrodetik.
- Dengan kata lain, jika 741C di-drive oleh tegangan input step, maka kita tidak mendapatkan tegangan output step tapi kita mendapatkan gelombang output eksponensial.

## Slew Rate

- Slew rate dapat dibatasi dengan sinyal sinusoidal.
- Gambar 10a, op amp dapat menghasilkan gelombang sinus output hanya jika initial slope dari gelombang sinus kurang dari slew rate.
- Contoh, jika gelombang sinus output memiliki initial slope  $0.1 \text{ V}/\mu\text{s}$ , 741C dapat menghasilkan gelombang sinus tanpa masalah sama sekali karena slew rate 741C adalah  $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ .
- Di lain sisi, jika gelombang sinus memiliki initial slope  $0.1 \text{ V}/\mu\text{s}$ , output lebih kecil dari pada initial slope gelombang sinus maka output akan terlihat triangular daripada sinusoidal seperti yang ditambihkan pada Gambar 10b.

# Slew Rate



**Gambar. 10:** (a) Initial slope dari gelombang sinus, (b) distorsi terjadi jika initial slope melebihi slew rate

## Slew Rate

---

- Datasheet op amp selalu menentukan slew rate karena nilai ini membatasi respon sinyal yang besar dari op amp.
- Jika gelombang sinus output sangat kecil atau frekuensinya sangat kecil maka slew rate bukan masalah.
- Namun jika sinyal output besar dan frekuensinya sangat besar maka slew rate akan mendistorsi sinyal output

## Slew Rate

- Kita akan turunkan persamaan berikut ini:

$$S_S = 2\pi f V_p$$

- $S_S$ : initial slope dari gelombang sinus,  $f$ : frekuensi,  $V_p$ : nilai peak.
- Untuk menghindari slew-rate distortion dari gelombang sinus,  $S_S$  harus lebih kecil atau sama dengan  $S_R$ , maka

$$\begin{aligned} S_S &\leq S_R \\ 2\pi f V_p &\leq S_R \\ f &\leq \frac{S_R}{2\pi V_p} \end{aligned}$$

## Slew Rate

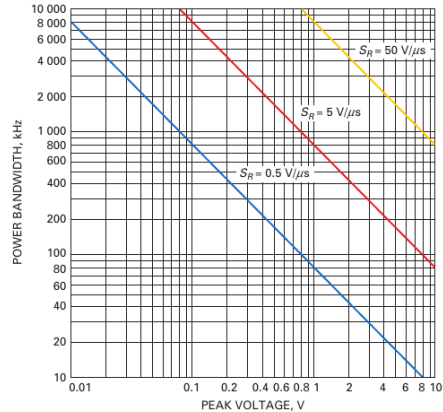
- Sehingga

$$f_{max} = \frac{S_R}{2\pi V_p} \quad (2)$$

- $f_{max}$  adalah frekuensi tertinggi yang dapat dikuatkan tanpa slew-rate distortion.
- $f_{max}$  disebut juga power bandwidth.
- Gambar 11 menunjukkan grafik dari tiga slew rate.  $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{S}$  untuk 741C dan



# Slew Rate

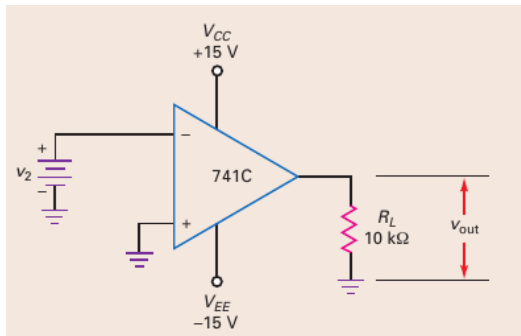


Gambar. 11: Grafik power bandwidth vs. peak voltage

## Slew Rate

- Misalkan kita menggunakan 741C.
- Agar kita bisa mendapatkan tegangan peaaak output sebesar 8 V tanpa distorsi, frekuensi tidak boleh lebih besar daripada 10 kHz.
- Untuk meningkatkan  $f_{max}$ , kecilkan tegangan output.
- Misalkan, tegangan peak output 1 V maka  $f_{max}$  meningkat menjadi 80 kHz.

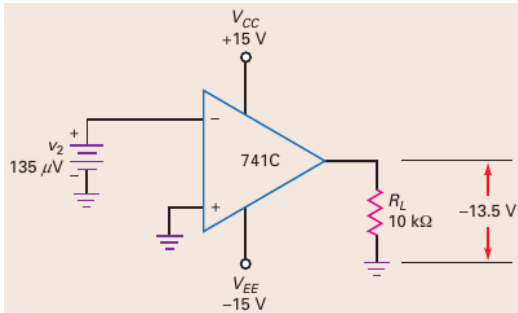
## Contoh Soal 2.1



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan inverting input yang dibutuhkan untuk men-drive op amp 741C hingga saturasi negatif?

## Contoh Soal 2.1

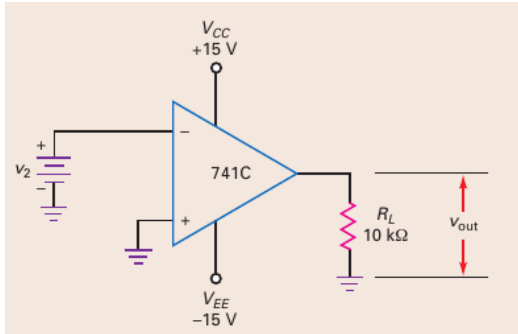


### ■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (b),  
MPP = 27 V untuk  $R_L = k\Omega$
- Sehingga tegangan output negatif saturasinya = - 13.5 V
- Karena  $A_{VOL} = 100000$ , maka tegangan input yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned}
 v_2 &= \frac{v_{out}}{A_{VOL}} \\
 &= \frac{13.5 \text{ V}}{100000} = 135 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

## Latihan Soal 2.1



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan inverting input yang dibutuhkan untuk men-drive op amp 741C hingga saturasi negatif jika  $A_{VOL} = 200000$  ?

## Contoh Soal 2.2

■ Pertanyaan:

- Berapa common-mode rejection ratio (CMRR) dari 741C ketika frekuensi input-nya adalah 100 kHz?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (a),  $\text{CMRR}_{\text{dB}} \approx 40 \text{ dB}$  di 100 kHz.

$$\text{CMRR} = 10^{(\text{CMRR}_{\text{dB}}/20)} = 10^{(40 \text{ dB}/20)} = 100$$

## Latihan Soal 2.2

---

■ Pertanyaan:

- Berapa common-mode rejection ratio (CMRR) dari 741C ketika frekuensi input-nya adalah 10 kHz?

## Contoh Soal 2.3

■ Pertanyaan:

- Berapa open-loop voltage gain dari 741C jika frekuensi input-nya adalah 1 kHz ? 10 kHz ? 100 kHz ?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (c), voltage gain-nya adalah 1000 untuk 1 kHz, 100 untuk 10 kHz, dan 10 untuk 100 kHz.



## Contoh Soal 2.4

### ■ Pertanyaan:

- Tegangan input ke op amp adalah tegangan fungsi step. Output-nya adalah sebuah waveform eksponensial yang berubah ke 0.25 V dalam 0.1  $\mu s$ . Berapa slew rate dari op amp tersebut?

### ■ Jawaban:

- Berdasarkan Persamaan 1

$$S_R = \frac{\Delta v_{out}}{\Delta t} = \frac{0.25 \text{ V}}{0.1 \mu s} = 2.5 \text{ V}/\mu s$$

## Latihan Soal 2.4

---

■ Pertanyaan:

- Tegangan input ke op amp adalah tegangan fungsi step. Output-nya adalah sebuah waveform eksponensial yang berubah ke 0.8 V dalam  $0.2 \mu\text{s}$ . Berapa slew rate dari op amp tersebut?

## Contoh Soal 2.5

■ Pertanyaan:

- Op amp LF411A dengan slew rate  $15 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Berapa power bandwidth dari tegangan peak output  $10 \text{ V}$  ?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Persamaan 2

$$f_{max} = \frac{S_R}{2\pi V_p} = \frac{15 \text{ V}/\mu\text{s}}{2\pi(10 \text{ V})} = 239 \text{ kHz}$$

## Latihan Soal 2.5

---

■ Pertanyaan:

- Op amp LF411A dengan slew rate  $15 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Berapa power bandwidth dari tegangan peak output 200 mV ?

## Contoh Soal 2.6

### ■ Pertanyaan:

- Berapa power bandwidth dari:
  - $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 8 \text{ V}$
  - $S_R = 5 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 8 \text{ V}$
  - $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 8 \text{ V}$

### ■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 11
  - $f_{max} = 10 \text{ kHz}$
  - $f_{max} = 100 \text{ kHz}$
  - $f_{max} = 1 \text{ MHz}$

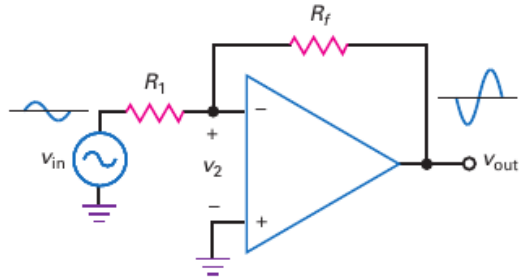
## Latihan Soal 2.6

- Pertanyaan:
  - Berapa power bandwidth dari:
    - $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 1 \text{ V}$
    - $S_R = 5 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 1 \text{ V}$
    - $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$  dan  $V_p = 1 \text{ V}$

## Pengantar Inverting Amplifier

- Inverting amplifier: rangkaian op amp paling dasar.
- Menggunakan negative feedback untuk menstabilkan keseluruhan voltage gain.
- Keseluruhan voltage gain perlu distabilkan karena  $A_{VOL}$  sangat besar dan tidak stabil untuk digunakan tanpa feedback.
- Contohnya, 741C memiliki  $A_{VOL}$  minimum sebesar 20.000 dan  $A_{VOL}$  maksimum lebih dari 200.000.
- Voltage gain yang tidak dapat diprediksi dari magnitude dan variasi ini tidak berguna tanpa feedback.

# Inverting Negative Feedback



Gambar. 12: Inverting amplifier



## Inverting Negative Feedback

- Gambar 12 menunjukkan sebuah inverting amplifier.
- Tegangan power-supply tidak ditampilkan agar gambar lebih sederhana.
- Tegangan input  $v_{in}$  men-drive inverting input melalui resistor  $R_1$ .
- Menghasilkan tegangan inverting output  $v_2$ .
- Tegangan input dikuatkan oleh open-loop voltage gain untuk menghasilkan tegangan inverted output.
- Tegangan output diumpanbalik ke input melalui resistor feedback  $R_f$ .
- Menghasilkan negative feedback karena output memiliki beda fasa sebesar  $180^\circ$  dengan input.
- Dengan kata lain, setiap perubahan di  $v_2$  yang dihasilkan oleh tegangan input berkebalikan dengan sinyal output.

## Inverting Negative Feedback

- Bagaimana negative feedback dapat menstabilkan overall voltage gain?
- Jika open-loop voltage gain  $A_{VOL}$  meningkat dengan alasan apa pun, tegangan output akan meningkat dan memberikan tegangan feedback yang lebih banyak ke inverting input.
- Tegangan feedback yang berkebalikan ini akan mereduksi tegangan  $v_2$ .
- Karena itu, meskipun  $A_{VOL}$  meningkat,  $v_2$  menurun, dan output akhir meningkat jauh lebih sedikit daripada tanpa negative feedback.

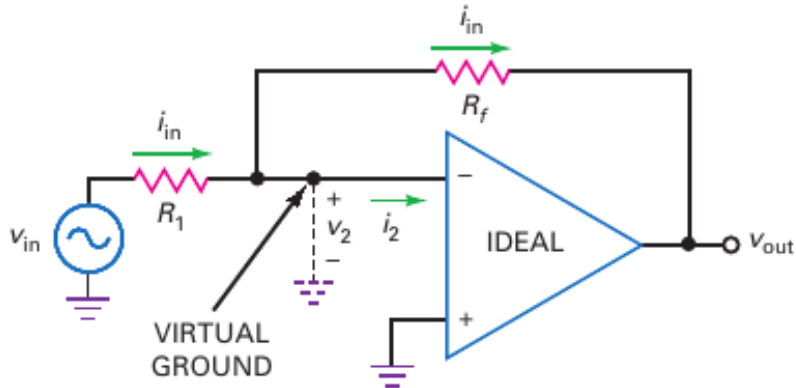
## Virtual Ground

- Jika kita menghubungkan kabel antara suatu titik di dalam rangkaian ke ground, tegangan pada titik tersebut menjadi nol.
- Kabel tersebut memberikan jalur untuk arus mengalir ke ground.
- Mechanical ground (kabel yang menghubungkan titik ke ground) adalah ground untuk tegangan dan arus.
- Lain halnya dengan Virtual Ground, salah satu jenis ground yang digunakan untuk menganalisis inverting amplifier dengan lebih mudah.

## Virtual Ground

- Konsep dari virtual ground berdasarkan op amp ideal.
- Op amp ideal memiliki open-loop voltage gain yang tak berhingga dan resistansi input tak berhingga.
- Karenanya, kita dapat menyimpulkan sebagai berikut (Gambar 13):
  - Karena  $I_{in}$  adalah tak berhingga maka  $i_2$  adalah nol.
  - Karena  $A_{VOL}$  adalah tak berhingga, maka  $v_2$  adalah nol.

# Virtual Ground



Gambar. 13: Konsep virtual ground

## Virtual Ground

- Karena  $i_2 = 0$ , arus yang melalui  $R_f$  pasti sama dengan arus input yang melalui  $R_1$ .
- Karena  $v_2 = 0$ , virtual ground yang ditunjukkan pada Gambar 13 menunjukkan bahwa inverting input bertindak seperti ground untuk tegangan dan open untuk arus.

## Voltage Gain

- Gambar 14 menunjukkan virtual ground pada inverting input.
- Sisi kanan dari  $R_1$  adalah ground tegangan, maka dapat kita tulis:

$$v_{in} = i_{in}R_1$$

- Begitu juga sisi kiri dari  $R_f$  adalah ground tegangan, sehingga magnitude dari tegangan output adalah:

$$v_{out} = -i_{in}R_f$$

- Untuk mendapatkan voltage gain, maka  $v_{out}$  dibagi dengan  $v_{in}$ :

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} \quad (3)$$

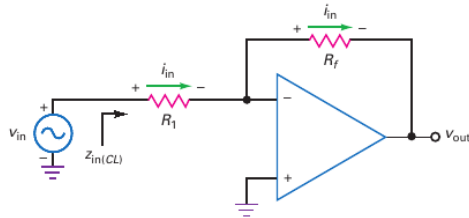
dimana  $A_{v(CL)}$  adalah closed-loop voltage gain.

## Voltage Gain

- Disebut closed-loop voltage gain karena merupakan tegangan ketika terdapat jalur feedback antara output dan input.
- Karena negative feedback, closed-loop voltage gain,  $A_{v(CL)}$ , selalu lebih kecil daripada open-loop voltage gain,  $A_{VOL}$ .
- Misalkan, jika  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  dan  $R_f = 50 \text{ k}\Omega$ , maka closed-loop voltage gain sebesar 50.
- Tanda negatif pada Persamaan 3 menunjukkan voltage gain memiliki beda fasa sebesar  $180^\circ$ .



# Voltage Gain



Gambar. 14: Inverting amplifier memiliki arus yang sama yang melewati kedua resistor

## Input Impedance

- Dalam beberapa hal, terkadang seorang engineer menginginkan impedansi input tertentu.
- Ini salah satu kelebihan dari inverting amplifier, mudah untuk mengatur impedansi input yang diinginkan.
- Karena sisi kanan dari  $R_1$  adalah virtual ground, sehingga closed-loop input impedansinya adalah:

$$z_{in(CL)} = R_1 \quad (4)$$

- Ini adalah impedansi input yang ada di sisi kiri dari  $R_1$  seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 14.
- Misalkan, jika impedansi input sebesar  $2 \text{ k}\Omega$  dan closed-loop voltage gain sebesar 50 yang dibutuhkan, maka engineer akan menggunakan  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$  dan  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ .

## Bandwidth

- Open-loop bandwidth atau frekuensi cut-off dari op amp sangat kecil.
- Disebabkan oleh internal compensating capacitor.
- Untuk 741C:

$$f_{2(OL)} = 10 \text{ Hz}$$

- Pada frekuensi ini, open-loop voltage gain akan berhenti dan turun dengan respon orde-1.

## Bandwidth

- Ketika negative feedback digunakan, overall bandwidth akan meningkat.
- Karena, jika frekuensi input lebih besar daripada  $f_2(OL)$ ,  $A_{VOL}$  menurun sebesar 20 dB/decade.
- Ketika  $v_{out}$  mencoba untuk turun, tegangan yang berkebalikan akan diumpan-balik ke inverting input.
- Sehingga,  $v_2$  meningkat dan mengkompensasi penurunan  $A_{VOL}$ .
- Karena hal ini lah maka  $A_{v(CL)}$  berhenti pada frekuensi yang lebih besar daripada  $f_2(OL)$ .
- Semakin besar negative feedback ( $A_{v(CL)}$  lebih kecil) maka closed-loop bandwidth  $f_2(CL)$  semakin besar.

## Bandwidth

- Gambar ?? menunjukkan bagaimana closed-loop bandwidth meningkat dengan adanya negative feedback.
- Semakin besar negative feedback ( $A_{v(CL)}$  lebih kecil), semakin besar closed-loop bandwidth  $f_2(CL)$ .

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)} + 1}$$

- Umumnya,  $A_v(CL)$  lebih besar daripada 10, sehingga persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}} \quad (5)$$

$$f_{unity} = A_{v(CL)} f_{2(CL)} \quad (6)$$

## Bias dan Offset

- Negative feedback mengurangi error output yang disebabkan oleh arus bias input, arus offset input, dan tegangan offset input.
- Seperti yang telah didiskusikan pada bab sebelumnya, ketika tegangan error input dan persamaan tegangan error output total adalah:

$$V_{error} = A_{VOL}(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err})$$

- Ketika negative feedback digunakan, persamaan di atas menjadi:

$$V_{error} \cong \pm A_{v(CL)}(\pm V_{1err} \pm V_{2err} \pm V_{3err}) \quad (7)$$

dimana  $V_{error}$  adalah tegangan error output total.

- Datasheet tidak menunjukkan tanda  $\pm$  karena hal ini dapat menunjukkan bahwa error bisa terjadi di kedua arah.

## Bias dan Offset

- Error input sama seperti sebelumnya, yaitu:

$$V_{1err} = (R_{B1} - R_{(B2)})I_{in(bias)} \quad (8)$$

$$V_{2err} = (R_{B1} + R_{(B2)})\frac{I_{in(off)}}{2} \quad (9)$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} \quad (10)$$

## Bias dan Offset

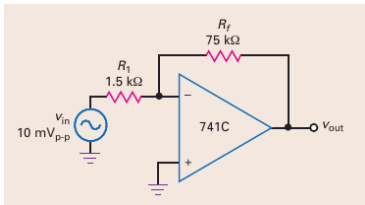
- Saat  $A_{v(CL)}$  kecil, error output total yang diberikan dari Persamaan 7 mungkin cukup kecil untuk diabaikan.
- Jika tidak, resistor compensation dan offset nulling menjadi perlu.
- Di dalam inverting amplifier,  $R_{B2}$  adalah resistor Thevenin.
- Resistor Thevenin:

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_f \quad (11)$$

- Jika perlu untuk mengkompensasi arus bias input, resistor  $R_{B1}$  yang bernilai sama dapat dihubungkan ke noninverting input.
- Resistor ini tidak berdampak pada teknik virtual ground karena tidak ada arus sinyal AC yang akan mengalir melaluinya.



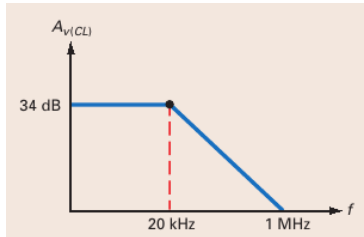
## Contoh Soal 2.7



### ■ Pertanyaan:

- ☐ Berapa closed-loop voltage gain dan closed-loop bandwidth nya?
- ☐ Berapa tegangan output di 1 kHz? dan di 1 MHz?

## Contoh Soal 2.7



### ■ Jawaban:

- Closed-loop voltage gain:

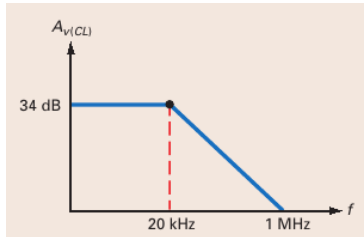
$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$

- Closed-loop bandwidth:

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}} = \frac{1 \text{ MHz}}{50} = 20 \text{ kHz}$$

- Gambar di samping adalah ideal bode-plot dari closed-loop voltage gain,  $A_{v(CL)}$ .
- $A_{v(CL)} = 20 \times \log(50) = 34 \text{ dB}$

## Contoh Soal 2.7



### ■ Jawaban:

- Tegangan output di 1 kHz:

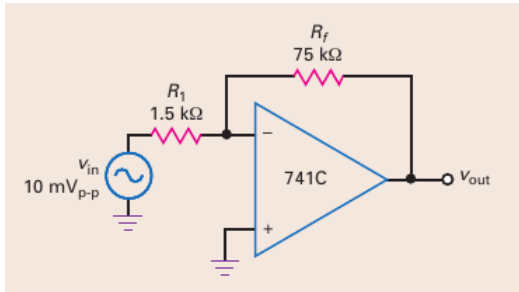
$$\begin{aligned} v_{out} &= (A_{v(CL)})(v_{in}) = (-50)(10 \text{ mVp-p}) \\ &= -500 \text{ mVp-p} \end{aligned}$$

- Tegangan output di 1 MHz. Karena 1 MHz adalah unity-gain frekuensinya, maka

$$v_{out} = -10 \text{ mVp-p}$$

- Tanda negatif menunjukkan phase-shift  $180^\circ$  antara input dan output

## Latihan Soal 2.7

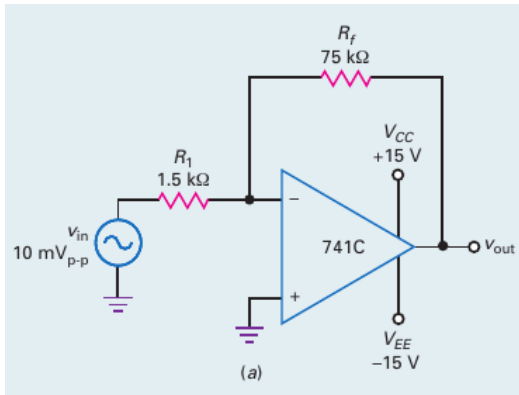


### ■ Pertanyaan:

- ☐ Berapa tegangan output di 100 kHz ?
- ☐ *Hint:* Gunakan Persamaan

$$A_v = \frac{A_{v(mid)}}{\sqrt{1 + (f/f_2)^2}}$$

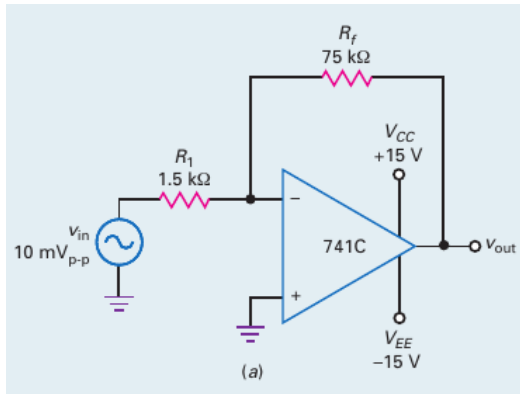
## Contoh Soal 2.8



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output ketika  $v_{in} = 0$ ?

## Contoh Soal 2.8



### ■ Jawaban:

- Berdasarkan Tabel di Gambar 3, didapatkan:

$$I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$$

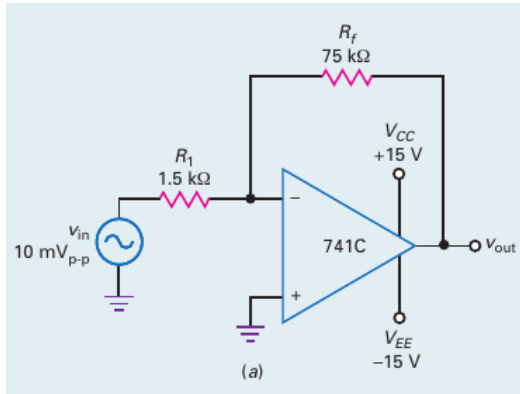
$$I_{in(off)} = 20 \text{ nA}$$

$$V_{in(off)} = 2 \text{ mV}$$

- Berdasarkan Persamaan 11:

$$\begin{aligned} R_{B2} &= R_1 \parallel R_f = 1.5 \text{ k}\Omega \parallel 75 \text{ k}\Omega \\ &= 1.47 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

## Contoh Soal 2.8



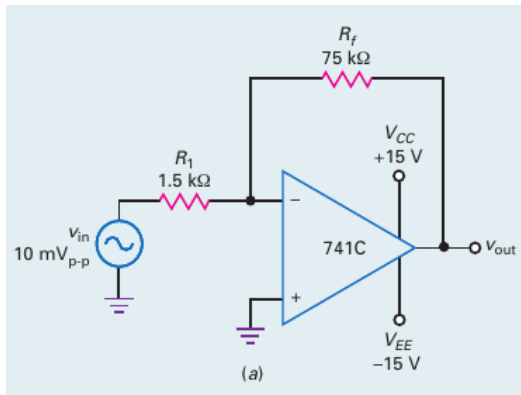
### ■ Jawaban:

- Karena menggunakan analisis virtual ground, maka  $R_{B1}$  tidak berpengaruh apa-apa.
- Sehingga ketiga tegangan error input:

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (-1.47 \text{ k}\Omega)(80 \text{ nA}) \\ &= -0.118 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \\ &= (1.47 \text{ k}\Omega)(10 \text{ nA}) \\ &= 0.0147 \text{ mV} \end{aligned}$$

## Contoh Soal 2.8



### ■ Jawaban:

- Sehingga ketiga tegangan error input (lanjutan):

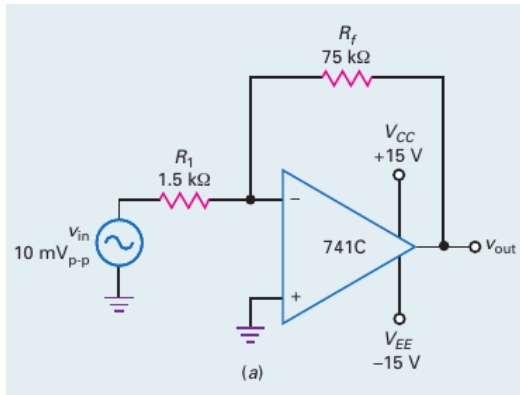
$$V_{3err} = V_{in(off)} = 2 \text{ mV}$$

- Closed-loop voltage gain:

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$



## Contoh Soal 2.8

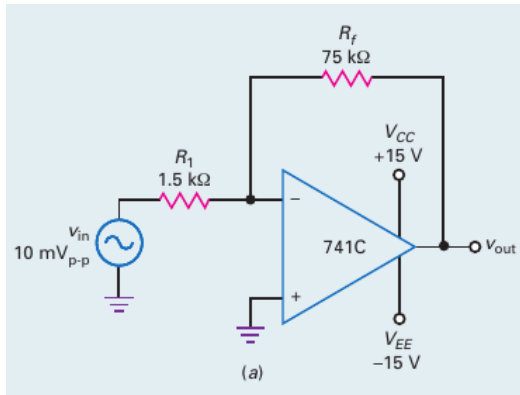


■ Jawaban:

□ Error tegangan output:

$$\begin{aligned}
 V_{error} &= \pm 50(V_{1err} + V_{2err} + V_{2err}) \\
 &= \pm 50(0.118\text{mV} + 0.0147\text{mV} + 2\text{mV}) \\
 &= \pm 107 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

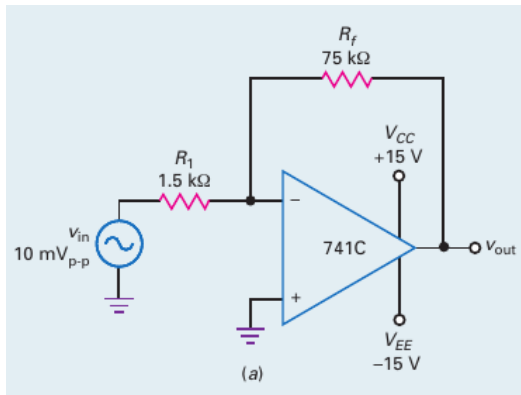
## Latihan Soal 2.8



### ■ Pertanyaan:

- Jika op amp yang digunakan adalah LF157A, berapa tegangan output ketika  $v_{in} = 0$ ?

## Contoh Soal 2.9



### ■ Pertanyaan:

- Diketahui:

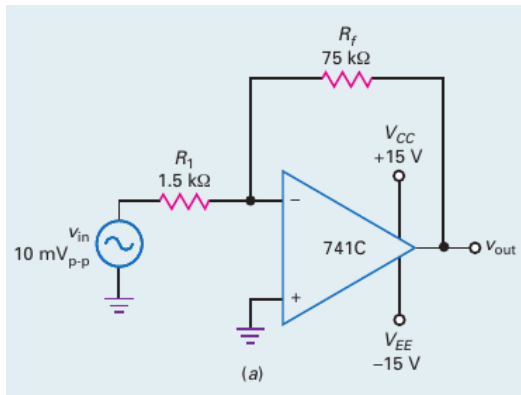
$$I_{in(bias)} = 500 \text{ nA},$$

$$I_{in(off)} = 200 \text{ nA}, \text{ dan}$$

$$V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

- Berapa tegangan output jika  $v_{in} = 0$  ?

## Contoh Soal 2.9



### ■ Jawaban:

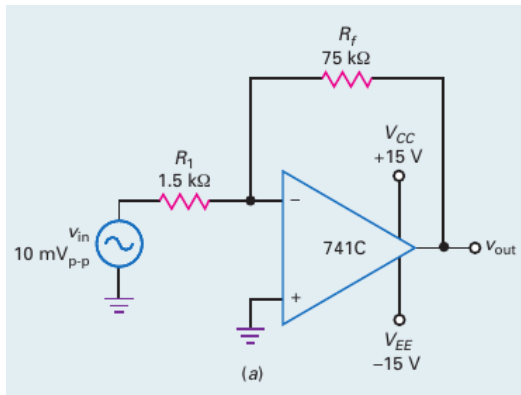
- Tegangan error input:

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (-1.47 \text{ k}\Omega)(500 \text{ nA}) \\ &= -0.735 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \\ &= (1.47 \text{ k}\Omega)(100 \text{ nA}) \\ &= 0.147 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

## Contoh Soal 2.9



### ■ Jawaban:

- Closed-loop voltage gain:

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$

- Tegangan error output:

$$\begin{aligned} V_{error} &= \pm 50(V_{1err} + V_{2err} + V_{2err}) \\ &= \pm 50(0.735 \text{ mV} + 0.147 \text{ mV} + 6 \text{ mV}) \\ &= \pm 344 \text{ mV} \end{aligned}$$

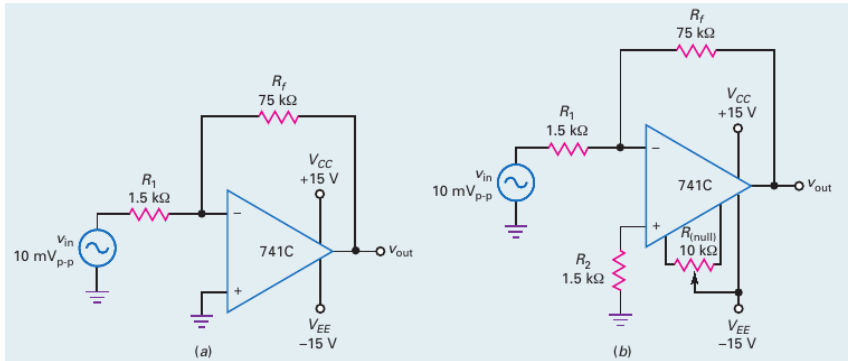
## Contoh Soal 2.9

- Pada Contoh Soal 2.7, tegangan output yang diinginkan adalah 500 mVp-p.
- Bisakah kita mengabaikan tegangan error output yang besar?
- Terganti dalam pengaplikasiannya.
- Untuk amplifier sinyal suara, kita hanya butuh di rentang frekuensi suara yaitu 20 Hz hingga 20 kHz.
- Maka kita secara kapasitif memasangkan output ke resistor beban atau tahap berikutnya.
- Hal ini akan mem-blok tegangan error output DC tapi tetap mentransmisikan sinyal AC. Sehingga Error output menjadi tidak relevan lagi.

## Contoh Soal 2.9

- Jika kita ingin menguatkan sinyal dengan frekuensi dari 0 Hz hingga 20 kHz, maka kita membutuhkan op amp yang lebih baik (bias dan offset yang lebih kecil), atau memodifikasi rangkaianannya seperti pada Gambar 15b.
- Pada Gambar 15b, kita menambahkan compensating resistor terhadap noninverting input untuk menghilangkan efek dari arus bias input.
- Digunakan juga potentiometer 10 k $\Omega$  untuk meniadakan efek dari arus offset input dan tegangan offset input.

## Contoh Soal 2.9



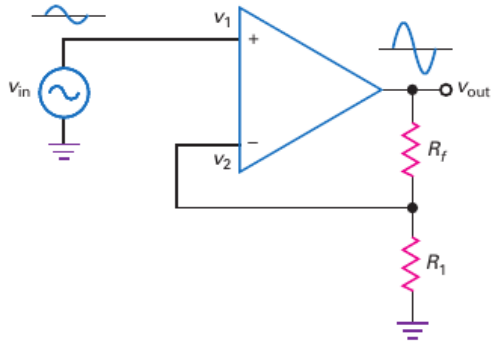
**Gambar. 15:** (a) Rangkaian op amp 741C dan (b) Rangkaian op amp 741C dengan penambahan compensating resistor dan potensiometer



# Pengantar Non-inverting Amplifier

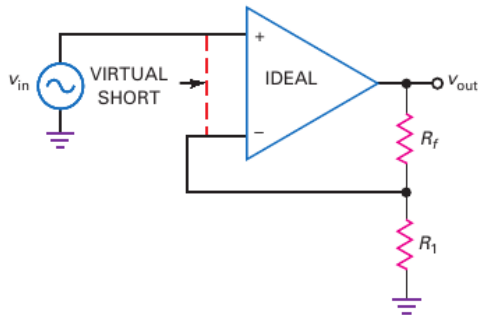
---

- Salah satu rangkaian op amp dasar
- Menggunakan negative feedback untuk menstabilkan overall voltage gain
- Negative feedback juga meningkatkan impedansi input dan menurunkan impedansi output



Gambar. 16: Non-inverting amplifier

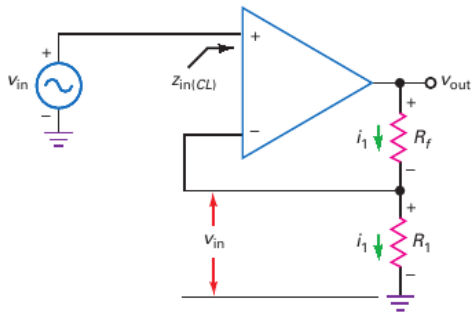
# Virtual Short



- Virtual short digunakan untuk menganalisis noninverting amplifier
- Virtual short berdasarkan 2 sifat dari op amp ideal
  1.  $R_{in} = \infty \rightarrow i_1 = i_2 = 0$
  2.  $A_{VOL} = \infty \rightarrow v_1 - v_2 = 0$

Gambar. 17: Virtual short

## Voltage Gain



**Gambar. 18:** Tegangan input ada di  $R_1$  dan arus yang sama mengalir di  $R_1$

- Tegangan input:  $v_{in} = i_1 R_1$
- Tegangan output:  $v_{out} = i_1 (R_f + R_1)$
- Penguatan tegangan closed-loop:

$$A_{v(CL)} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{i_1 (R_f + R_1)}{i_1 R_1} = \frac{R_f + R_1}{R_1}$$

maka

$$A_{v(CL)} = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (12)$$

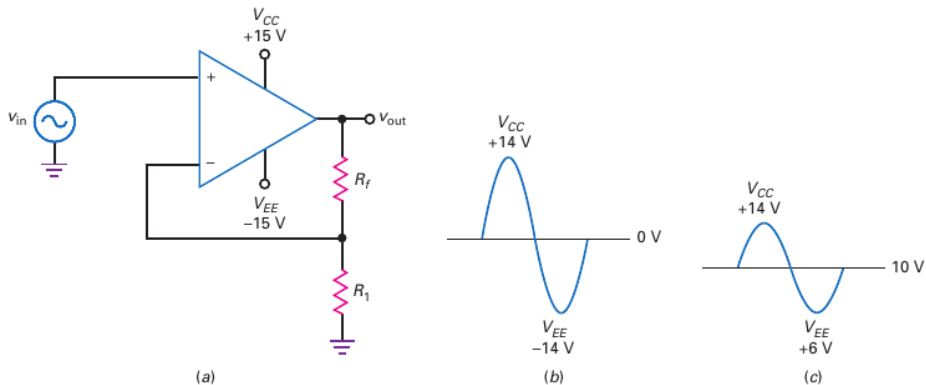
## Impedansi Input, Bandwidth, Bias & Offset

- Karena impedansi input open-loop sudah sangat besar ( $2\text{ M}\Omega$  untuk 741C), maka impedansi input closed-loop lebih besar lagi.
- Efek negative feedback terhadap bandwidth sama seperti di inverting amplifier

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}}$$

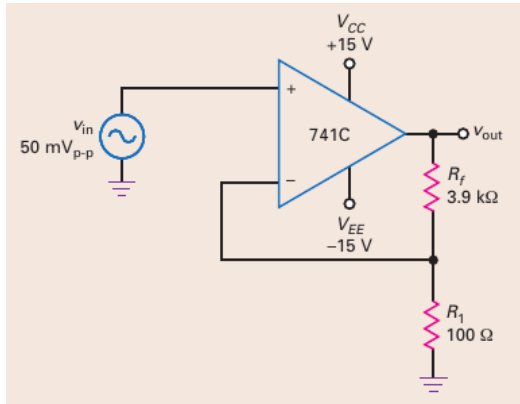
- Efek bias dan offset juga sama seperti di inverting amplifier

## Error Tegangan Output Mereduksi MPP



Gambar. 19: Error tegangan output dapat mereduksi MPP

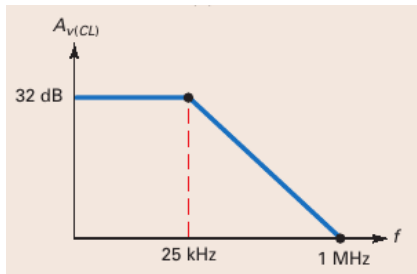
## Contoh Soal 2.10



### ■ Pertanyaan:

- Berapa penguatan tegangan closed-loop dan bandwidth?
- Berapa tegangan output di 250 kHz?

## Contoh Soal 2.10



### ■ Jawaban:

- Penguatan tegangan closed-loop:

$$A_{v(CL)} = \frac{R_f}{R_1} + 1 = \frac{3.9 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} + 1 = 40$$

- Bandwidth:

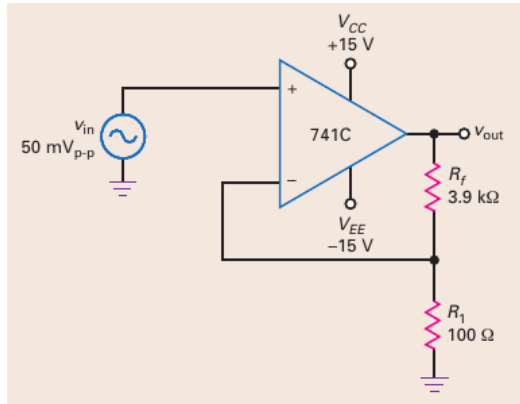
$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}} = \frac{1 \text{ MHz}}{40} = 25 \text{ kHz}$$

- Tegangan output di 250 kHz

$$\begin{aligned} v_{out} &= A_{c(CL)} v_{in} = 4(50 \text{ mVp-p}) \\ &= 200 \text{ mVp-p} \end{aligned}$$



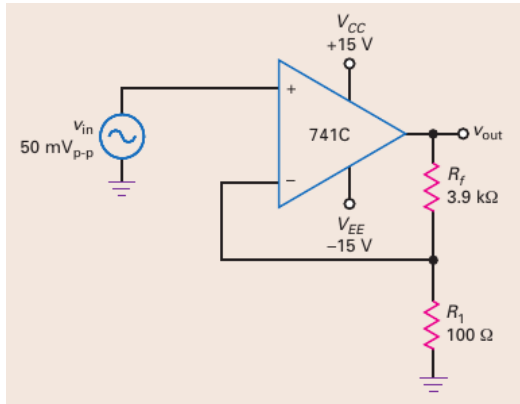
## Latihan Soal 2.10



### ■ Pertanyaan:

- Jika  $R_f = 4.9 \text{ k}\Omega$ , tentukan  $A_{v(CL)}$  dan  $v_{out}$  di 200 kHz.

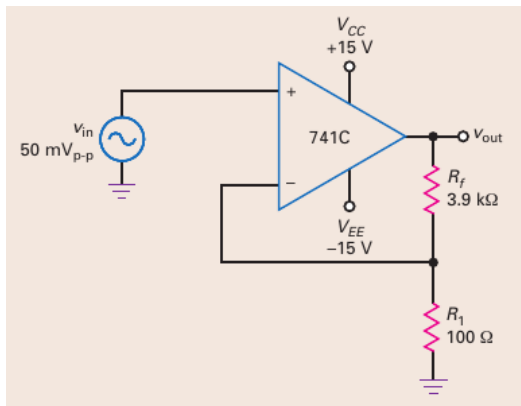
## Contoh Soal 2.11



### ■ Pertanyaan:

- Jika  $I_{in(bias)} = 500$  nA,  $I_{in(off)} = 200$  nA, dan  $V_{in(off)} = 6$  mV, berapa error tegangan output?

## Contoh Soal 2.11



### ■ Jawaban:

- Resistor Thevenin:

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_f = 3.9 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ }\Omega$$

$$R_{B2} \approx 100 \text{ }\Omega$$

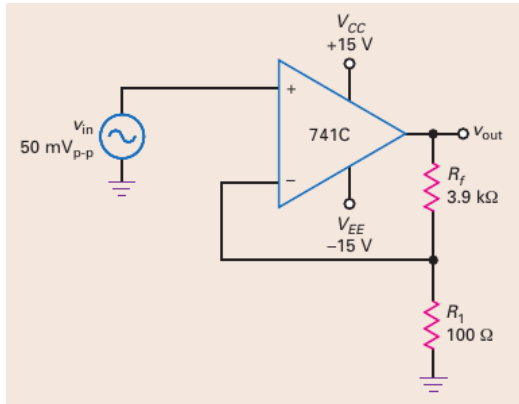
- Error tegangan input

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (-100 \text{ }\Omega)(500 \text{ nA}) = -0.05 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (100 \text{ }\Omega)(100 \text{ nA}) = 0.01 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

## Contoh Soal 2.11



### ■ Jawaban:

- Error tegangan output

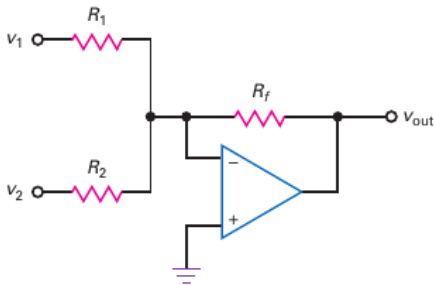
$$\begin{aligned}
 V_{error} &= \pm A_{v(CL)} (\pm V_{1err} \pm V_{2err} \pm V_{3err}) \\
 &= \pm 40 (0.05 \text{ mV} + 0.01 \text{ mV} + 6 \text{ mV}) \\
 &= \pm 242 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

## Pengantar Aplikasi Op-Amp

---

- Aplikasi dari op amp sangat luas sekali dan beraneka ragam
- Tidak mungkin menjelaskannya secara komprehensif
- Sementara kita fokus pada 2 rangkaian dulu.

# The Summing Amplifier



Gambar. 20: Rangkaian umming amplifier

- Menggabungkan 2 atau lebih sinyal analog menjadi satu output

- Memperkuat setiap sinyal input
- Penguatan setiap channel atau input

$$A_{v1(CL)} = \frac{-R_f}{R_1}; \quad A_{v2(CL)} = \frac{-R_f}{R_2}$$

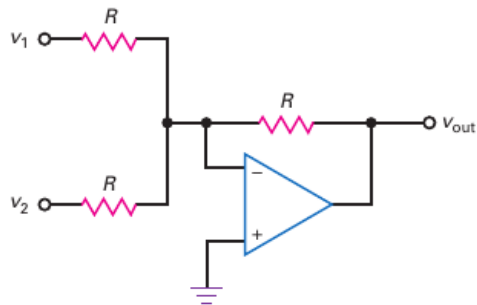
- Tegangan output

$$v_{out} = A_{v1(CL)}v_1 + A_{v2(CL)}v_2 \quad (13)$$

- Resistor Thevenin:

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_f \parallel \cdots \parallel R_n \quad (14)$$

# The Summing Amplifier

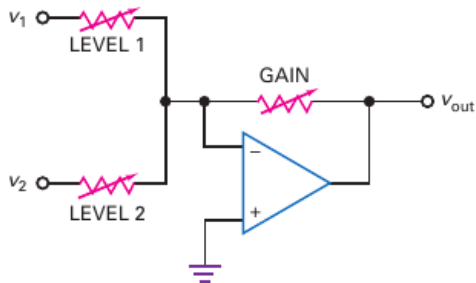


## ■ Tegangan output

$$v_{out} = -(v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

Gambar. 21: Rangkaian summing amplifier dengan resistor yang sama

# The Summing Amplifier

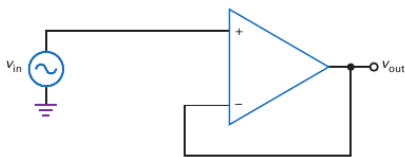


Gambar. 22: Rangkaian mixer

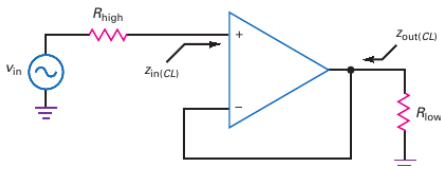
- Menggabungkan sinyal audio
- Menurunkan LEVEL 1 → sinyal  $v_1$  semakin nyaring di output
- Menurunkan LEVEL 2 → sinyal  $v_2$  semakin nyaring di output
- Meningkatkan GAIN → kedua sinyal semakin nyaring



# Voltage Follower



(a)



(b)

- Penguatan tegangan closed-loop:

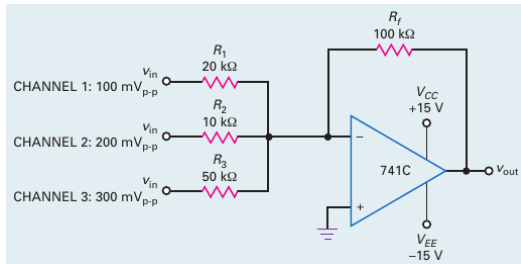
$$A_{v(CL)} = 1 \quad (15)$$

- Bandwidth closed-loop:

$$f_{2(CL)} = f_{unity} \quad (16)$$

Gambar. 23: Rangkaian voltage follower

## Contoh Soal 2.12



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output ac?

### ■ Jawaban:

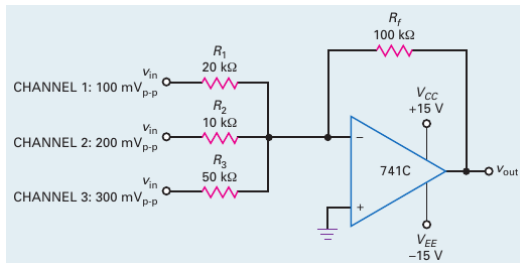
- Penguatan tegangan tiap channel:

$$A_{v1(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} = -5$$

$$A_{v2(CL)} = \frac{-R_f}{R_2} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -10$$

$$A_{v3(CL)} = \frac{-R_f}{R_3} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} = -2$$

## Contoh Soal 2.12



### ■ Jawaban:

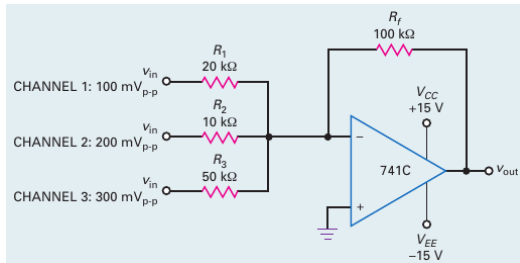
- Tegangan output:

$$v_{out} = A_{v1(CL)} v_1 + A_{v2(CL)} v_2 + A_{v3(CL)} v_3$$

- Jika diperlukan untuk mengkompensasi bias input dengan menambahkan  $R_B$  yang sama ke noninverting input

$$\begin{aligned} R_{B2} &= R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_f \\ &= 20 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ k}\Omega \\ &= 5.56 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

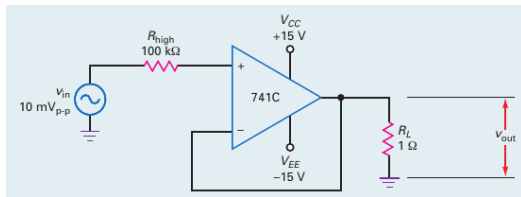
## Latihan Soal 2.12



### ■ Pertanyaan:

- Jika tegangan input peak-to-peak diganti dengan tegangan positif dc, berapakah tegangan output dc-nya?

## Contoh Soal 2.13



### ■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output dan bandwidth?

### ■ Jawaban:

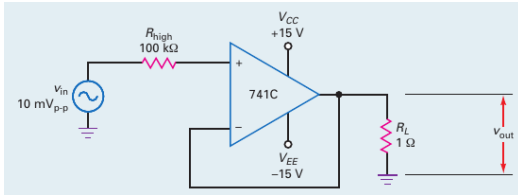
- Penguatan tegangan closed-loopnya adalah unity, sehingga:

$$v_{out} = A_{v(CL)} v_{in} = 1(10 \text{ mV}_{p-p})$$

- Bandwidthnya adalah:

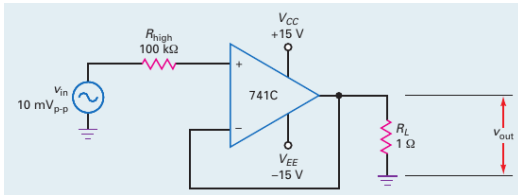
$$f_{2(CL)} = f_{unity} = 1 \text{ MHz}$$

## Latihan Soal 2.13



- Pertanyaan:
  - Berapa tegangan output dan bandwidth jika op amp yang digunakan adalah LF157A?

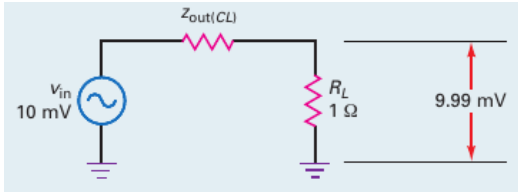
## Contoh Soal 2.14



### ■ Pertanyaan:

- Jika rangkaian voltage follower di sampling dibuat dengan Multisim, tegangan output di  $1 \Omega$  adalah  $9.99 \text{ mV}$ . Tentukan berapa impedansi output closed-loop?

## Contoh Soal 2.14



### ■ Jawaban:

- Tegangan output:

$$v_{out} = 9.99 \text{ mV}$$

- Arus di beban adalah:

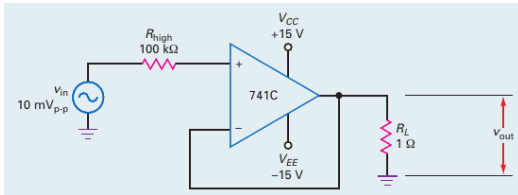
$$i_{out} = \frac{9.99 \text{ mV}}{1 \Omega} = 9.99 \text{ mA}$$

- Impedansi output closed-loop

$$z_{out(CL)} = \frac{0.01 \text{ mV}}{9.99 \text{ mA}} = 0.001 \Omega$$



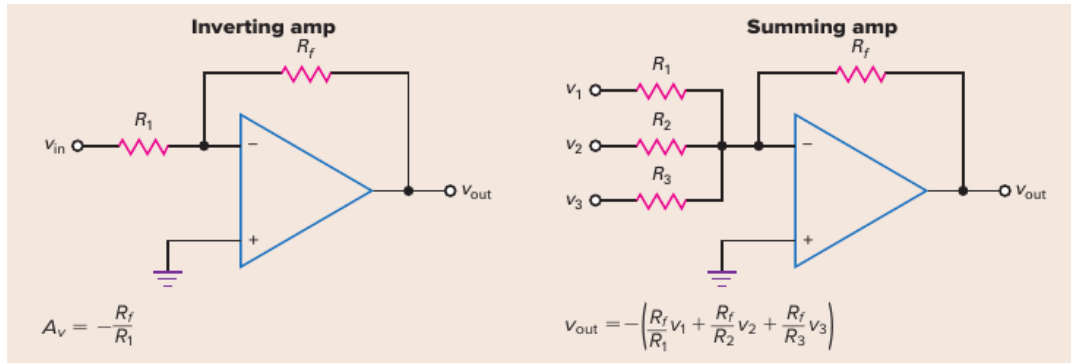
## Latihan Soal 2.14



### ■ Pertanyaan:

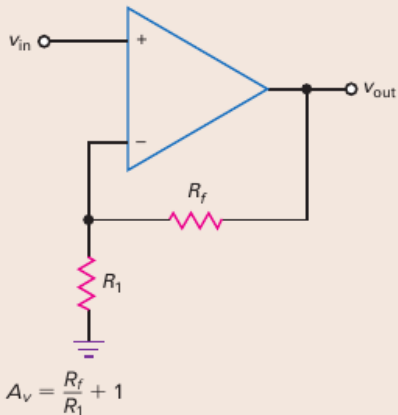
- Jika rangkaian voltage follower di sampling dibuat dengan Multisim, tegangan output di  $1\ \Omega$  adalah  $9.95\ \text{mV}$ . Tentukan berapa impedansi output closed-loop?

# Ringkasan

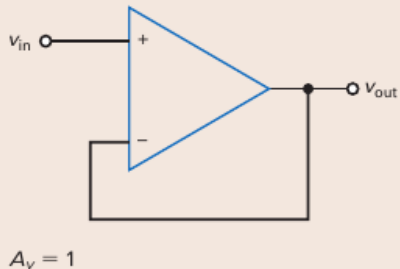


# Ringkasan

**Noninverting amp**



**Voltage follower**



# Linear IC

---

- Op amp :  $\frac{1}{3}$  bagian dari IC
- Linear IC : op amp, audio amplifier, video amplifier, voltage regulator

# Tabel Parameter Op Amp saat 25°

Number	$V_{in}$ max, mV	$I_{in(bias)}$ max, nA	$I_{in(off)}$ max, nA	$I_{out}$ max, mA	$f_{unity}$ typ, MHz	$S_R$ typ, V/ $\mu$ s	$A_{vol}$ typ, dB	CMRR min, dB	PSRR min, dB	Drift typ, $\mu$ V/ $^{\circ}$ C	Description of Op Amps
LF353	10	0.2	0.1	10	4	13	88	70	-76	10	Dual BIFET
LF356	5	0.2	0.05	20	5	12	94	85	-85	5	BIFET, wideband
LF411A	0.5	200	100	20	4	15	88	80	-80	10	Low offset BIFET
LM301A	7.5	250	50	10	1+	0.5+	108	70	-70	30	External compensation
LM318	10	500	200	10	15	70	86	70	-65	—	High speed, high slew rate
LM324	4	10	2	5	0.1	0.05	94	80	-90	10	Low-power quad
LM348	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Quad 741
LM675	10	2 $\mu$ A*	500	3 A <sup>†</sup>	5.5	8	90	70	-70	25	High-power, 25 W out
LM741C	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Original classic
LM747C	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Dual 741
LM833	5	1 mA*	200	10	15	7	90	80	-80	2	Low noise
LM1458	6	500	200	20	1	0.5	104	70	-77	—	Dual
LM3876	15	1 $\mu$ A*	0.2 $\mu$ A*	6 A <sup>†</sup>	8	11	120	80	-85	(-)	Audio power amp, 56W
LM7171	1	10 $\mu$ A*	4 $\mu$ A*	100	200	4100	80	85	-85	35	Very high-speed amp
OP-07A	0.025	2	1	10	0.6	0.17	110	110	-100	0.6	Precision
OP-42E	0.75	0.2	0.04	25	10	58	114	88	-86	10	High-speed BIFET
TL072	10	0.2	0.05	10	3	13	88	70	-70	10	Low-noise BIFET dual
TL074	10	0.2	0.05	10	3	13	88	70	-70	10	Low-noise BIFET quad
TL082	3	0.2	0.01	10	3	13	94	80	-80	10	Low-noise BIFET dual
TL084	3	0.2	0.01	10	3	13	94	80	-80	10	Low-noise BIFET quad

\*For the LM675, LM833, LM3876 and LM7171, this value is commonly expressed in microamperes.

<sup>†</sup>For the LM675 and LM3876, this value is commonly expressed in amperes.

## Power Supply Rejection Ration (PSRR)

- Persamaan PSRR:

$$PSRR = \frac{\Delta V_{in(off)}}{\Delta V_S} \quad (17)$$

- PSRR dari LF353 = -76 dB  $\rightarrow$   $PSRR = 10^{(-76/20)} = 0.000158 = 158 \mu\text{V/V}$
- Setiap perubahan pada tegangan supply sebesar 1 V akan menyebabkan perubahan tegangan offset input sebesar  $158 \mu\text{V}$

## Drift

- Koefisien temperatur dari tegangan offset input
- Seberapa banyak tegangan offset input akan meningkat karena temperatur
- Drift dari LF353 =  $10 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  tegangan offset input akan meningkat sebesar  $10 \mu\text{V}$  untuk setiap kenaikan  $1^{\circ}\text{C}$
- Jika temperatur internal dari op amp meningkat sebesar  $50^{\circ}\text{C}$  maka tegangan offset input dari LF353 meningkat sebesar  $500 \mu\text{V}$

# Audio Amplifiers

---

- Preamps = audio amplifier dengan daya output  $< 50 \text{ mW}$
- Front-end audio system
- Mengurangi low noise dari optical sensors, magnetic tape heads, microphones, dll
- Contoh:
  - LM833: low-noise dual preamp,  $A_v = 110 \text{ dB}$ , 27-V power bandwidth 120 kHz, input berupa diff amp



# Audio Amplifiers

---

- Medium-level audio amplifiers = output power 50 mW - 500 mW
- Near output end
- Portable electronic devices: cell phones, CD player
- Contoh:
  - LM4818 audio power amplifier: output power 350 mW

# Audio Amplifiers

---

- Output power  $> 500$  mW
- High-fidelity amplifier, intercoms, AM-FM radio
- Contoh:
  - LM380:  $A_v = 34$  dB, bandwidth 100 kHz, output power 2 W
  - LM4756:  $A_v = 30$  dB, output power 7 W/channel

# Video Amplifiers

- Wideband amplifier
- Flat response (constant decibel voltage gain)
- Very broad range of frequencies
- Applications in which the range of input frequencies is very large: analog oscilloscopes, video cameras, copiers and scanners, and HDTV amplifiers
- Contoh:
  - LM7171: very high-speed amplifier, wide unity-gain bandwidth of 200 MHz, slew rate of  $4100 \text{ V}/\mu\text{s}$
  - NE592: voltage gain 52 dB, cutoff frequency 40 MHz, voltage gains and bandwidths dapat diatur dengan menghubungkan external resistors yang berbeda sehingga menjadi 90 MHz
  - MC1553: gain 52 dB, bandwidth 20 MHz, adjusted by changing external components
  - LM733: up to 20-dB gain, bandwidth of 120 MHz (adjusted by changing external components)

## Voltage Regulator

- Rectifier  $\rightarrow$  dc voltage + ripple  $\rightarrow$  voltage regulator
- DC voltage  $\propto$  line voltage
- Perubahan 10% dari line voltage  $\propto$  perubahan 10% DC voltage  $\leftarrow$  ini terlalu besar
- LM340 series  $\rightarrow$  menahan perubahan 0.01%, positive/negative output, adjustable output voltage, and short-circuit protection.

TERIMA KASIH