

Buku Ajar
Rangkaian Elektronika II

Mifta Nur Farid, M.T.

Januari 2021

Daftar Isi

1	Differential Amplifier	1
2	Operational Amplifier	3
2.1	Tujuan Pembelajaran	3
2.2	Pengantar Op Amp	3
2.3	Op Amp 741	5
2.3.1	Standar Industri	6
2.3.2	Input Diff Amp	6
2.3.3	Final Stage	7

Bab 1

Differential Amplifier

Bab 2

Operational Amplifier

2.1 Tujuan Pembelajaran

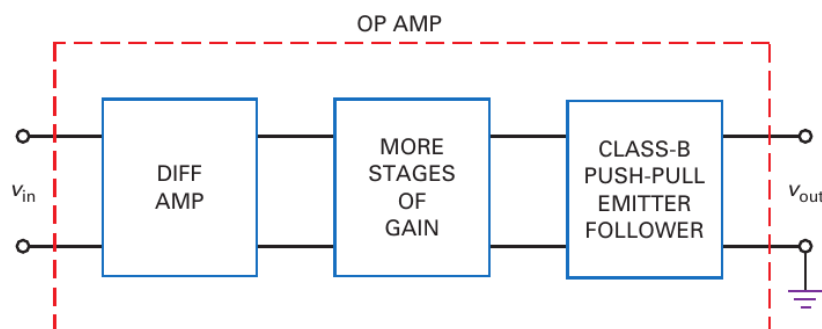
Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu untuk

1. Menjelaskan karakteristik dari op amp ideal dan op amp 741.
2. Menentukan *slew rate* dan menggunakannya untuk mencari *power bandwidth* dari op amp.
3. Menganalisis op amp inverting amplifier.
4. Menganalisis op amp noninverting amplifier.
5. Menjelaskan cara kerja summing amplifier dan voltage follower.
6. Menjelaskan IC linear lainnya dan mendiskusikan bagaimana penggunaannya.

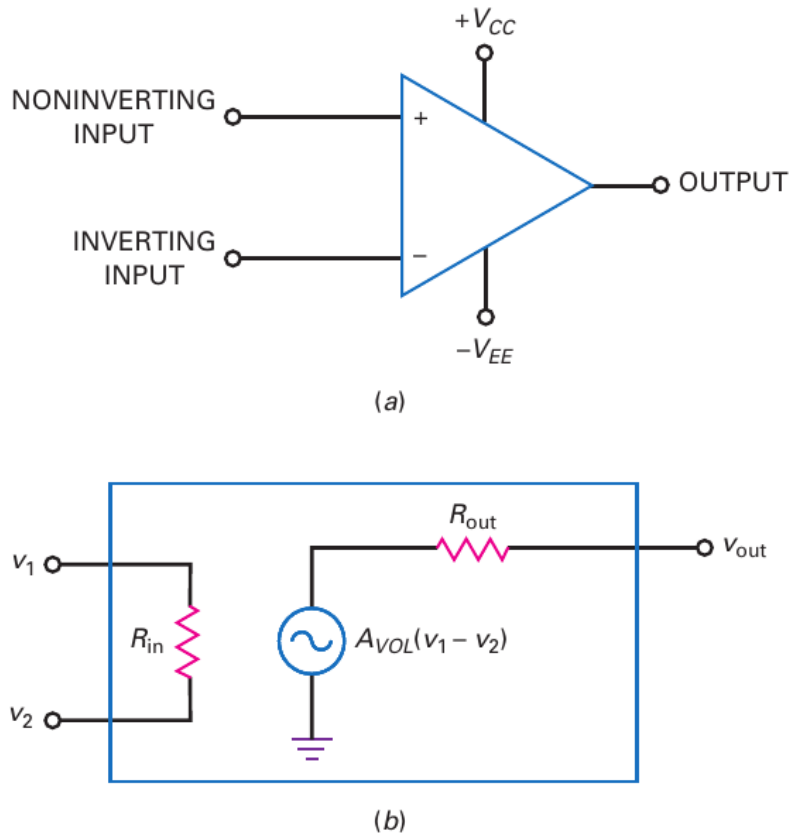
2.2 Pengantar Op Amp

Gambar 2.1 menunjukkan diagram blok dari op amp. *Input stage* dari op amp tersebut adalah diff amp, kemudian dilanjutkan oleh lebih banyak *stage gain*/ penguat, dan sebuah *Class-B push-pull emitter follower*. Karena diff amp berfungsi sebagai *first stage*, maka diff amp yang akan menentukan karakteristik *input* dari op amp. Pada sebagian besar op amp memiliki *output* berupa *single-ended*. Dengan positif dan negatif *supply*, *single-ended output* didisain untuk memiliki nilai diam (*quiescent value*) nol. Artinya, tegangan *input* nol idealnya menghasilkan tegangan *output* nol.

Tidak semua op amp didesain seperti pada Gambar 2.1. Misalkan, beberapa op amp tidak memiliki *Class-B push-pull output*, dan ada juga yang memiliki *double-ended output*. Selain itu, op amp tidak sesederhana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Disain internal dari monolithic



Gambar 2.1: Diagram blok dari op amp



Gambar 2.2: (a) Simbol skematik dari op amp; (b) rangkaian ekivalen dari op amp

op amp sangatlah rumit, menggunakan ribuan transistor sebagai *current mirror*, *active load*, dan inovasi lainnya yang tidak mungkin ada di disain diskrit. Namun kita cukupkan sesuai dengan kebutuhan kita bahwa Gambar 2.1 menekankan pada dua fitur yang penting yaitu *differential input* dan *single-ended output*.

Gambar 2.2 adalah simbol skematik dari op amp. Pada gambar tersebut terdapat *noninverting input*, *inverting input* dan *single-ended output*. Idealnya, simbol ini menjelaskan bahwa *amplifier* memiliki *voltage gain* yang tak berhingga, impedansi *input* tak berhingga, dan impedansi *output* nol. Op amp ideal merepresentasikan *voltage amplifier* / penguat tegangan yang ideal dan ini sering disebut sebagai **voltage-controlled voltage source (VCVS)**. Kita dapat menggambarkan sebuah VCVS seperti pada Gambar 2.2b, yang mana R_{in} adalah tak berhingga dan R_{out} adalah nol.

Gambar 2.3 menunjukkan ringkasan dari ciri khas atau karakteristik op amp. Op amp ideal memiliki *voltage gain* yang tak berhingga, *unity-gain frequency* yang tak berhingga, impedansi *input* yang tak berhingga, dan CMRR yang tak berhingga. Op amp ideal juga memiliki resistansi *output* yang nol, arus bias yang nol, dan arus offset yang nol. Seperti ini seharusnya op amp itu dibuat, jika mereka bisa. Namun apa yang mampu mereka buat hanyalah mendekati nilai ideal tersebut.

Sebagai contoh, LM741C dari Gambar 2.3 adalah op amp standar yang telah tersedia sejak 1960-an. Karakteristiknya adalah minimum dari apa yang kita harapkan dari monolithic op amp. LM741C memiliki *voltage gain* sebesar 100.000, *unity-gain frequency* sebesar 1 MHz, impedansi *input* sebesar 2 M Ω , dan seterusnya. Karena *voltage gain* sangat besar, offset input dapat dengan mudah membuat op amp bersaturasi. Hal ini lah mengapa kita membutuhkan komponen eksternal antara *input* dan *output* op amp untuk menstabilkan *voltage gain*. Contohnya, di banyak aplikasi,

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 Ω	10 ¹² Ω
Output resistance	R_{out}	Zero	75 Ω	100 Ω
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 2.3: Ciri khas op amp

negative feedback digunakan untuk menyesuaikan *overall voltage gain* ke nilai yang jauh lebih rendah sebagai ganti dari *stable linear operation*.

Ketika tidak ada *feedback* (atau *loop*) yang digunakan, *voltage gain* bernilai maksimum dan disebut dengan *open-loop voltage gain*, yang dinotasikan dengan A_{VOL} . Pada Gambar 2.3, terlihat bahwa A_{VOL} dari LM741C adalah 100.000. Meskipun bukan tak berhingga, *open-loop voltage gain* ini sangat besar. Contohnya, sebuah *input* sebesar 10 μ V menghasilkan *output* 1 V. Karena *open-loop voltage gain* sangat besar, kita dapat menggunakan *heavy negative feedback* untuk meningkatkan performa keseluruhan dari rangkaian.

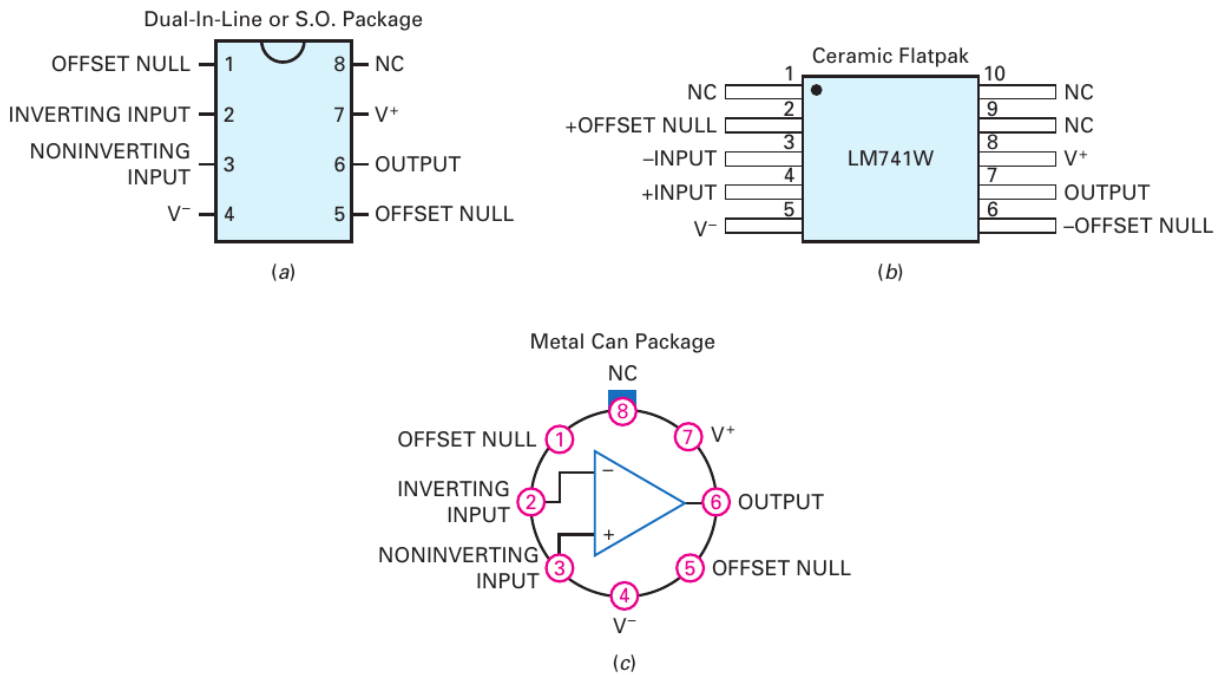
741C memiliki *unity-gain frequency* sebesar 1 MHz. Artinya kita bisa menggunakan *voltage gain* hingga 1 MHz. 741C memiliki resistansi *input* sebesar 2 M Ω , resistansi *output* sebesar 75 Ω , arus *bias input* sebesar 80 nA, arus *offset input* sebesar 20 nA, tegangan *offset output* sebesar 2 mV, dan CMRR sebesar 90 dB.

Ketika dibutuhkan resistansi input yang lebih besar, seorang *engineer* dapat menggunakan **BIFET op amp**. Op amp jenis ini menggabungkan JFET dan transistor bipolar pada *chip* yang sama. JFET digunakan di *input stage* untuk mendapatkan arus *bias input* dan arus *offset input* yang lebih kecil. Transistor bipolar digunakan di *stage* setelahnya untuk mendapatkan lebih banyak *voltage gain*.

LF157A adalah salah satu contoh dari BIFET op amp. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3, arus *bias input* hanya sebesar 30 pA, dan resistansi *input* sebesar 10¹² Ω . LF157A memiliki *voltage gain* sebesar 200.000 dan *unity-gain frequency* sebesar 20 MHz. Dengan menggunakan op amp ini, kita bisa mendapatkan *voltage gain* hingga 20 MHz.

2.3 Op Amp 741

Pada tahun 1965, Fairchild Semiconductor memperkenalkan μ A709, monolithic op amp pertama yang banyak digunakan. Meskipun sukses, op amp generasi pertama memiliki banyak kekurangan. Hal ini yang melatarbelakangi terciptanya op amp μ A741. Karena tidak mahal dan mudah digunakan, op amp μ 741 telah sukses besar. Desain 741 yang lain telah muncul dari berbagai manufaktur. Sebagai contoh, ON Semiconductor menghasilkan MC1741, Texas Instruments menghasilkan LM741, dan Analog Devices menghasilkan AD741. Semua monolithic op amp ini ekuivalen



Gambar 2.4: 741 package stylke

dengan $\mu A741$ karena mereka memiliki spesifikasi yang sama di *datasheet* mereka. Agar lebih mudah, banyak orang menghilangkan awalan dan lebih suka dengan istilah 741 saja.

2.3.1 Standar Industri

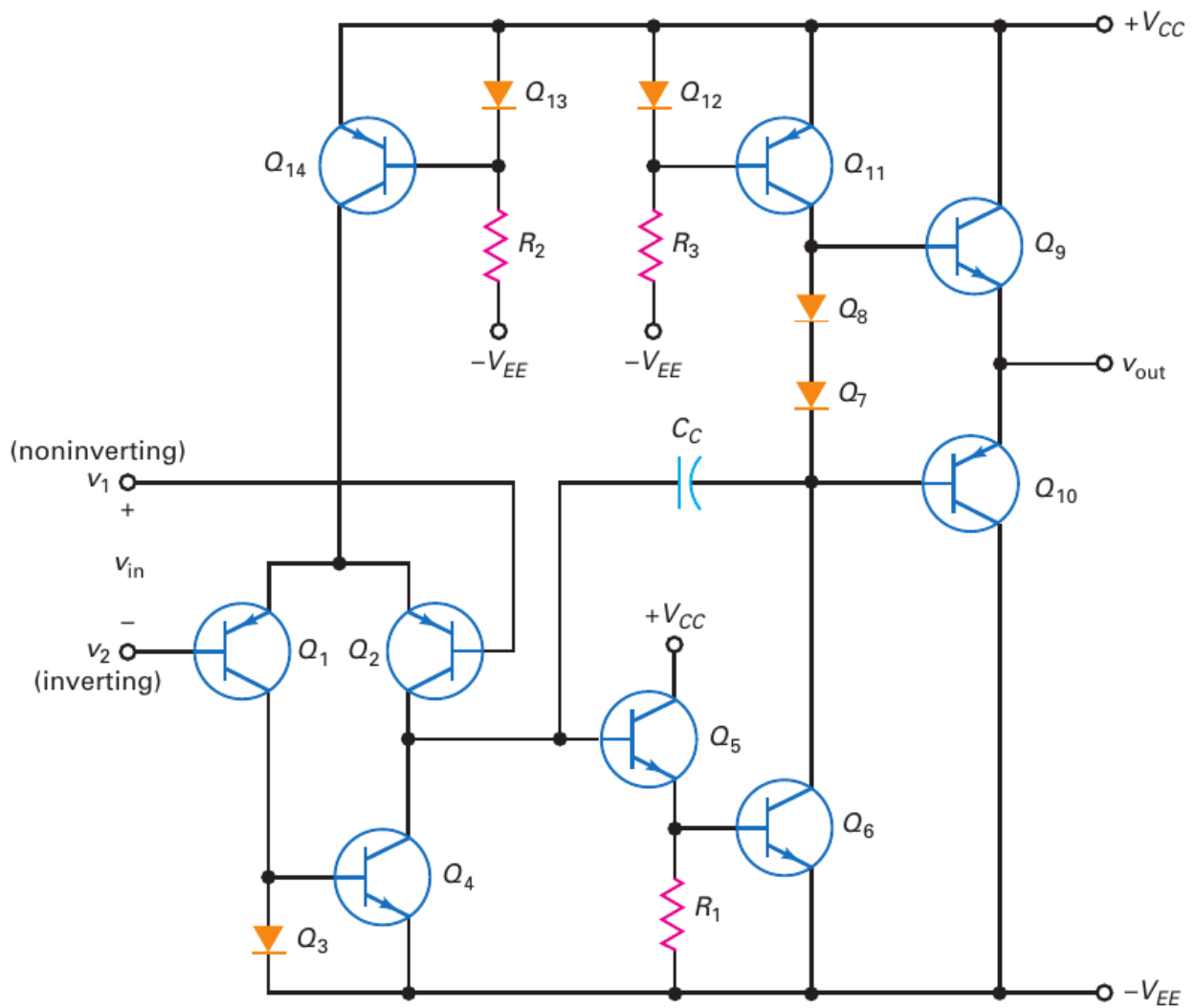
741 telah menjadi standar industri. Sebagai aturan, pertama kali kalian harus mencobanya di desain kalian. Jika kalian tidak dapat memenuhi spesifikasi desain dengan menggunakan 741, maka kalian gunakan op amp yang lebih baik. Karena ini standar, kita akan menggunakan 741 sebagai *basic device* dalam diskusi kita ini. Ketika kalian telah paham dengan 741, kalian bisa mempelajari op amp lainnya.

741 memiliki berbagai nomor versi yang berbeda, 741, 741A, 741C, 741E, dan 741N. Perbedaannya adalah di bagian *voltage gain*, *temperature range*, *noise level*, dan karakteristik-karakteristik lainnya. 741C (C artinya *commercial grade*) adalah yang lebih murah dan paling banyak digunakan. 741C memiliki *open-loop voltage gain* sebesar 100.000, impedansi *input* sebesar 20 M Ω , dan impedansi *output* sebesar 75 Ω . Gambar 2.4 menunjukkan 3 *package style* yang populer dan *pinout*-nya.

2.3.2 Input Diff Amp

Gambar 2.5 adalah skematik diagram dari 741 yang disederhanakan. Rangkaian ini ekuivalen dengan 741 dan banyak op amp generasi selanjutnya. Kalian tidak perlu memahami setiap detilnya tentang desain rangkaian ini, tapi kalian harus memiliki ide dasar dari bagaimana rangkaian ini bekerja.

Input stage yang digunakan adalah diff amp (Q_1 dan Q_2). Pada 741, Q_{14} adalah sumber arus yang menggantikan *tail resistor*. R_2 , Q_{13} , dan Q_{14} adalah arus mirror (*current mirror*) yang menghasilkan arus *tail* untuk Q_1 dan Q_2 . Alih-alih menggunakan resistor biasa sebagai resistor *collector* diff amp, 741 menggunakan *active-load* resistor. *Active-load* Q_4 ini bertindak seperti sumber arus dengan impedansi yang sangat tinggi. Karenanya, *voltage gain* dari diff amp jauh



Gambar 2.5: Skematik diagram 741 yang disederhanakan

lebih besar daripada dengan menggunakan *passive-load* resistor.

Sinyal yang dikuatkan dari diff amp akan men-drive base Q_5 , sebuah *emitter follower*. Pada *stage* ini, level impedansi dinaikkan untuk menghindari pembebanan diff amp. Sinyal yang keluar dari Q_5 menuju 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. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, simbol dioda terkadang digunakan ketika *base* transistor adalah dihubungkan singkat ke *collector*. Contohnya, Q_3 sebenarnya adalah transistor dengan *base-collectornya* terhubung singkat dan bekerja seperti dioda.

2.3.3 Final Stage

Sinyal yang dikuatkan keluar dari *CE driver stage* (Q_6) menuju ke *final stage*, yang berupa *Class-B push-pull emitter follower* (Q_9 dan Q_{10}).

