

Dr. Ir. Ni Wayan Sri Ariyani, S.T., M.M., IPM., ASEAN.Eng.
Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, S.T., M.T., IPU., ASEAN.Eng.



Teori dan Penyelesaian Kasus

OPERASIONAL AMPLIFIER DENGAN **MATLAB** DAN **SIMULINK**



Dilengkapi
CD-ROM

**Teori dan Penyelesaian Kasus
OPERASIONAL AMPLIFIER DENGAN
MATLAB DAN SIMULINK**

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggunaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Teori dan Penyelesaian Kasus OPERASIONAL AMPLIFIER DENGAN MATLAB DAN SIMULINK

Dr. Ir. Ni Wayan Sri Ariyani, S.T., M.M., IPM., ASEAN.Eng.
Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, S.T., M.T., IPU., ASEAN.Eng.



**TEORI DAN PENYELESAIAN KASUS
OPERASIONAL AMPLIFIER DENGAN MATLAB DAN SIMULINK**

**Ni Wayan Sri Ariyani
I Ketut Wiryajati**

Desain Cover :
Ali Hasan Zein

Sumber :
www.shutterstock.com

Tata Letak :
Amira Dzatin Nabila

Proofreader :
Tiara Azhari

Ukuran :
xxii, 201 hlm, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :
978-623-02-4629-6

Cetakan Pertama :
Mei 2022

Hak Cipta 2022, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2022 by Deepublish Publisher
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: www.deepublish.co.id

www.penerbitdeepublish.com

E-mail: cs@deepublish.co.id

KATA PENGANTAR PENERBIT

Membaca adalah sarana ekspresi diri dalam berkomunitas serta untuk terus maju menuju pencerdasan dan pencerahan. Ini menjadi sebuah motivasi dan dorongan bagi kami di Penerbit Deepublish untuk ikut berikhtiar dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta memanfaatkan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia. Berdasarkan pandangan, sikap dasar, tujuan itu, maka buku yang berjudul Teori dan Penyelesaian Kasus Operasional Amplifier dengan MATLAB dan Simulink ini diterbitkan.

Buku yang berjudul berjudul Teori dan Penyelesaian Kasus Operasional Amplifier dengan MATLAB dan Simulink, berisi/membahas MATLAB merupakan kependekan dari MATrix LABoratory dikarenakan setiap data pada MATLAB menggunakan dasar matriks. MATLAB adalah bahasa pemrograman tinggi, tertutup, dan *case sensitive* dalam lingkungan komputasi numerik yang dikembangkan oleh MathWorks. Salah satu kelebihan yang paling populer adalah kemampuan membuat grafik dengan visualisasi terbaik. MATLAB mempunyai banyak *tools* yang dapat membantu berbagai disiplin ilmu. Ini merupakan salah satu penyebab industri menggunakan MATLAB. Selain itu, MATLAB mempunyai banyak pustaka yang sangat membantu untuk menyelesaikan permasalahan matematika seperti membuat simulasi fungsi, pemodelan matematika dan perancangan GUI dan lainnya.

Kami sadar masih terdapat berbagai kekurangan dalam buku ini. Namun, kami mencoba untuk terus mengembangkan diri, dan mencoba memperkecil kesalahan-kesalahan.

Kami mengucapkan terima kasih kepada penulis yang telah memberikan perhatian, kepercayaan, dan kontribusi demi kesempurnaan buku ini. Dan kepada pihak-pihak lainnya yang terus menjadi inspirasi dan memberikan semangat dalam menerbitkan buku yang berkualitas dan bermanfaat.

Dengan dukungan dari pembaca, kami dapat terus memberikan kontribusi bagi upaya mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta memanfaatkan ilmu pengetahuan dan teknologi. Semoga buku ini dapat memperkaya khazanah dan memberi manfaat bagi para pembaca.

Hormat Kami,

Penerbit Deepublish

KATA PENGANTAR

Buku ini menjadi jawaban atas kebutuhan pada mahasiswa diploma, sarjana maupun pascasarjana yang menekuni bidang-bidang yang berkaitan dengan bidang teknik elektronika. Buku ini dapat dipergunakan sebagai buku pegangan dan buku yang menemani latihan bagi para siswa-siswa untuk berlatih soal-soal dengan menggunakan *software* MATLAB dan Simulink.

Buku menyajikan teori *operational amplifier* beserta simulasi yang akan membantu pembaca dalam memudahkan memahami penjelasan lebih detail. Secara praktis akan dipandu dengan soal latihan sehingga dapat secara mudah, sistematis dan terstruktur memahami materi ini. Pada buku ini disajikan tentang Teori Dasar Penggunaan Simulink dan MATLAB, Penggunaan Simulink dan MATLAB, Dasar Pengukuran Listrik, *Operational Amplifier Inverting* dan *Amplifier Noninverting*, dan Filter dan Jenisnya. Semua materi dilengkapi dengan contoh aplikasi dan soal-soal latihan dengan penyelesaian dan divalidasi dengan simulasi MATLAB dan simulasi yang lebih menarik dalam buku ini dipandu secara bertahap dengan mengikuti langkah demi langkah dan menjalankan secara mandiri.

Penulis menyadari bahwa buku ini walaupun sederhana dan dangkal akan dapat memberikan sumbangsih pengetahuan yang berguna bagi anak bangsa dalam mengembangkan keilmuan khususnya di bidang teknik elektro. Semoga buku ini bermanfaat dan berguna bagi seluruh pembaca. Salam sejahtera dan sehat selalu.

Badung
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB 1 PENGENALAN MATLAB DAN SIMULINK.....	1
1.1. Umum.....	1
1.2. Pengenalan Fitur MATLAB.....	2
1.3. Karakteristik MATLAB.....	3
1.4. Lingkungan Kerja MATLAB.....	4
1.4.1. Jendela Perintah.....	4
1.4.2. Jendela Editing pada MATLAB.....	8
1.4.3. Jendela Gambar pada MATLAB.....	9
1.5. Jendela pada Simulink.....	10
1.5.1. Jendela Umum Simulink.....	10
1.5.2. Karakter khusus MATLAB.....	11
1.5.3. Angka dan Operasi Aritmatika.....	14
1.5.4. Variabel pada MATLAB.....	16
1.5.5. Fungsi Pemrograman pada MATLAB.....	17
1.5.5.1. Fungsi Matematika Dasar.....	17
1.5.5.2. Fungsi Trigonometri.....	17
1.5.5.3. Fungsi Analisis Data.....	18
1.6. Vektor dan Matriks pada MATLAB.....	19
1.6.1. Vektor.....	19
1.6.2. Matriks.....	19
1.6.3. Operasi dan Fungsi pada Matriks.....	21

1.7.	Grafik MATLAB.....	22
1.7.1.	Grafik 2 Dimensi.....	22
1.8.	Dasar-Dasar Simulink pada MATLAB.....	27
1.8.1.	Pustaka Simulink.....	30
1.8.2.	Simulasi Sederhana dengan Simulink.....	32
1.8.3.	Pustaka Simulink untuk Op-Amp.....	34
1.9.	Langkah-Langkah Simulasi.....	41
	Ringkasan.....	48
	Latihan-Latihan.....	49
BAB 2	PENGUKURAN BESARAN LISTRIK.....	50
2.1.	Satuan Sistem Internasional.....	50
2.2.	Arus Listrik.....	52
2.3.	Tahanan.....	53
2.4.	Induktansi.....	55
2.5.	Kapasitor.....	56
2.6.	Hukum Ohm.....	57
2.7.	Sumber Tegangan dan Sumber Arus.....	58
2.8.	Daya Listrik.....	61
2.9.	Energi Listrik.....	62
2.10.	Simpul, Lintasan, <i>Loop</i> , dan Cabang.....	62
2.11.	Hukum Arus Kirchhoff.....	64
2.12.	Hukum Tegangan Kirchhoff.....	67
2.13.	Alat Ukur Besaran Listrik.....	70
2.13.1.	Voltmeter.....	70
2.13.2.	Amperemeter.....	71
2.13.3.	Ohmmeter.....	72
2.13.4.	Wattmeter.....	73
2.13.5.	Frekuensimeter.....	74
2.13.6.	Luxmeter.....	75
2.13.7.	Cos-phemeter.....	76
2.13.8.	Osciloskop.....	77

	Ringkasan	78
	Latihan-Latihan.....	79
BAB 3	PENGUAT OPERATIONAL AMPLIFIER.....	80
	3.1. Dasar <i>Operational Amplifier</i>	80
	3.2. Karakteristik Op-Amp.....	81
	3.3. Op-Amp Inverting	81
	3.3.1. Kasus 3.1 Simulasi Op-Amp <i>Inverting</i>	85
	3.4. Op-Amp Non-inverting.....	87
	3.4.1. Kasus 3.2 Simulasi Op-Amp <i>Non-inverting</i>	89
	3.5. Op-Amp Penjumlah.....	91
	3.5.1. Kasus 3.3 Simulasi Op-Amp Penjumlah.....	93
	3.5.2. Kasus 3.4 Simulasi Op-Amp Penjumlah Dua Terminal.....	97
	3.5.3. Kasus 3.5 Simulasi Op-Amp Penjumlah Thevenin.....	101
	3.6. Op-Amp Pengurang	105
	3.6.1. Metode Penyelesaian Rangkaian Op-Amp Pengurang.....	106
	3.6.2. Rangkaian Pengurang dengan Satu Penguat.....	110
	3.6.3. Rangkaian Pengurang dengan Dua Penguat.....	110
	3.6.4. Kasus 3.7 Simulasi Op-Amp Pengurang Tiga Tingkat	118
	3.7. Op-Amp Defereniator	119
	3.7.1. Kasus 3.8 Simulasi Op-Amp Diferensial.....	120
	3.7.2. Kasus 3.9 Op-Amp Diferensial <i>Case 2</i>	123
	3.7.3. Kasus 3.10 Op-Amp Diferensial <i>Case 3</i>	125

3.7.4.	Kasus 3.11 Op-Amp Diferensial <i>Case 4</i>	126
3.7.5.	Kasus 3.12 Simulasi Op Diferensial Variasi input.....	127
3.8.	Op-Amp pada Integrator.....	128
3.8.1.	Kasus 3.13 Simulasi Op-Amp sebagai Integrator <i>Case 1</i>	130
3.8.2.	Kasus 3.14 Simulasi Op-Amp integrator <i>Case 2</i>	131
	Latihan Soal.....	133
	Rangkuman.....	135
	Latihan-Latihan	136
BAB 4	OPERATIONAL AMPLIFIER SEBAGAI FILTER	138
4.1.	Pendahuluan.....	138
4.2.	Pasif Filter Lolos Rendah (FLR)	139
4.2.1.	Dasar Filter Lolos Rendah (FLR)	139
4.2.2.	Kasus 4.1 Simulasi Filter Pasif FLR (FPFLR).....	144
4.3.	Filter Aktif Lolos Rendah (FA FLR)	144
4.3.1.	Kasus 4.2 Simulasi Filter Lolos Rendah dengan Op-Amp.....	149
4.3.2.	Kasus 4.3 Simulasi Filer Lolos Rendah dengan Op-Amp Orde Dua	151
4.4.	Filter Lolos Rendah Orde dua	151
4.5.	Filter Lolos Rendah (FLR) <i>Inverting</i>	154
4.6.	Aplikasi Filter Lolos Rendah.....	157
4.7.	Filter Lolos Tinggi (FLT).....	157
4.7.1.	Dasar Filter Lolos Tinggi	157
4.7.2.	Filter Aktif Lolos Tinggi dengan Penguatan.....	164
4.7.3.	Filter Aktif Lolos Tinggi <i>Inverting</i>	168

4.7.4.	Filter Aktif Lolos Tinggi (FLR) orde Tinggi.....	169
4.7.5.	Filter Aktif Lolos Tinggi Bertingkat.....	170
4.7.6.	Penerapan Filter Lolos Tinggi.....	171
4.7.7.	Simulasi Filter Aktif Lolos Tinggi.....	172
4.8.	Filter Lolos Rentang/ <i>Band Pass Filter</i>	175
4.8.1.	Dasar Filter Lolos Rentang (FLRt).....	175
4.8.2.	Klasifikasi Filter Aktif Lolos Rentang.....	178
4.8.2.1.	Filter Lolos Rentang Lebar (Wide).....	178
4.8.2.2.	Filter Lolos Rentang Sempit (<i>Narrow</i>).....	180
4.8.3.	Kasus 4.4 Filter Lolos Antara.....	181
4.9.	Filter Tolak Rentang/ <i>Band Stop Filter</i> or Notch Filter.....	182
4.9.1.	Dasar Filter Tolak Rentang.....	182
4.9.2.	Filter Aktif Tolak Rentang.....	185
	Latihan Soal.....	186
	Ringkasan.....	188
	Latihan-Latihan.....	189
	DAFTAR PUSTAKA.....	191
	INDEKS.....	193
	RIWAYAT HIDUP PENULIS.....	200

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Operator Matematika MATLAB.....	15
Tabel 1.2	Fungsi Matematika Dasar	17
Tabel 1.3	Fungsi Trigonometri	17
Tabel 1.4	Fungsi Analisis Data.....	18
Tabel 1.5	Operasi dan Fungsi pada Matriks yang Sering Digunakan.....	21
Tabel 1.6	Tabel Spesifikasi Warna dan Jenis Gambar pada MATLAB.....	26
Tabel 2.1	Satuan Sistem Internasional Dasar	51
Tabel 2.2	Awalan Satuan.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Tampilan Jendela Kerja dari MATLAB	5
Gambar 1.2	Tampilan Editor dari Windows dari MATLAB	9
Gambar 1.3	Tampilan figure Windows dari MATLAB.....	10
Gambar 1.4	Tampilan Simulink Windows dari MATLAB.....	11
Gambar 1.5	Hasil Plot dari Sinus dengan Batas $-\pi(-3.14)$ Sampai dengan $\pi(3.14)$	22
Gambar 1.6	Hasil Plot Loglog dengan Batas -1 Sampai 2.....	23
Gambar 1.7	Hasil Plot <i>Semilogy</i>	24
Gambar 1.8	Hasil Plot Grafik Sinus dengan Judul	26
Gambar 1.9	Hasil Plot MATLAB Menampilkan 1 (Satu) Grafik Sinus(t) dalam 1 (Satu) Bidang	27
Gambar 1.10	Jendela Kerja MATLAB	28
Gambar 1.11	Pustaka Simulink	29
Gambar 1.12	Jendela Kerja Simulink yang Siap Diisi	30
Gambar 1.13	Pustaka Simulink	30
Gambar 1.14	Pustaka Simulink pada <i>sources</i>	31
Gambar 1.15	Jendela Kerja dan Pustaka Simulink pada <i>Sources</i>	31
Gambar 1.16	Penggunaan Scope dan integrator	32
Gambar 1.17	<i>Setting</i> Parameter Pada Sinewave	33
Gambar 1.18	Mulai Simulasi Pada Simulink	33
Gambar 1.19	Hasil Simulasi Sinus dan Integrator	34
Gambar 1.20	(a). Scope (b) Resistor (c) Capacitor (d) Inductor pada Simulink.....	35
Gambar 1.21	(a). Dioda (b) Tegangan DC (c) Tegangan AC (d) Ground (e) Sumber arus DC (f) Sumber arus AC pada Simulink.....	36

Gambar 1.22	(a) Sensor Arus (b) Sensor Tegangan (c) Sumber Arus Terkontrol (d) Sumber Tegangan Terkontrol pada Simulink.....	38
Gambar 1.23	(a) Op-Amp (b) Comparator (c) Finite Gain-Op-Amp (d) Band Limited Op-Amp pada Simulink.....	39
Gambar 1.24	Rangkaian Penguat Operasional <i>Inverting</i>	41
Gambar 2.1	a. Arah Arus Listrik (i) dan Arah <i>Electron</i> (e) Berlawanan Arah.....	53
Gambar 2.1	b Potongan dari Sebuah Kawat Bermuatan Listrik	53
Gambar 2.2	a. Bentuk Fisik Sebuah Tahanan	54
Gambar 2.2	b. Simbol Tahanan	54
Gambar 2.3	a. Bentuk Fisik dari Induktor	55
Gambar 2.3	b. Simbol induktor	56
Gambar 2.4	a. Bentuk fisik dari beberapa tipe kapasitor.....	57
Gambar 2.4	b. Simbol kapasitansi.....	57
Gambar 2.5.	Rangkaian Listrik dengan Beban Resistor.....	58
Gambar 2.6	Simbol Sumber Tegangan DC, (b) Simbol Baterai, (c) Simbol Sumber Tegangan AC	59
Gambar 2.7	Simbol untuk Sumber Arus.....	60
Gambar 2.8	(a) Sumber Tegangan Tidak Bebas (b) Sumber Arus Tidak Bebas.....	60
Gambar 2.9	Rangkaian Listrik untuk Kasus 2.2.....	61
Gambar 2.10	Rangkaian Listrik untuk Kasus 2.3.....	62
Gambar 2.11	(a) Rangkaian dengan Tiga Buah Simpul dan Lima Buah Cabang, (b) Penggambaran Pemekaran Simpul-Simpul.....	63
Gambar 2.12	Contoh Simpul untuk Mengilustrasikan Penerapan Hukum Arus Kirchhoff	65
Gambar 2.13	Gambar Penerapan Hukum Arus Kirchhoff.....	66
Gambar 2.14	Gambar Penerapan Hukum Arus Kirchhoff.....	66

Gambar 2.15	Beda Potensial antara Titik A dan B Tidak Tergantung pada Lintasan yang Dipilih.....	67
Gambar 2.16	Rangkaian Penerapan Hukum Tegangan Kirchhoff.....	68
Gambar 2.17	Rangkaian Listrik untuk Polaritas Tegangan.....	69
Gambar 2.18	Voltmeter (a) Analog AC, (b) Analog DC (c) Volt-Ampere Digital.....	71
Gambar 2.19	(a) Voltmeter (b) Amperemeter (c) Ohmmeter.....	71
Gambar 2.20	Amperemeter (a) Analog AC, (b) Analog DC.....	72
Gambar 2.21	Ohmmeter (a) Micro Ohmmeter Ducter Tester, (b) Merger DLR010D Low Resistance (c) Ohmmeter Analog.....	73
Gambar 2.22	Wattmeter (a) Wattmeter (KW), (b) Wattmeter dengan Skala (c) SWR Meter.....	74
Gambar 2.23	Frekuensimeter (a) Frekuensi Getar, (b) Frekuensimeter Jarum (c) Tampilan Frekuensi pada Radio SSB.....	75
Gambar 2.24	Luxmeter (a) Luxmeter Digital, (b) Lux Meter Analog.....	76
Gambar 2.25	Cos-Phimeter (a) Cos-Phi Digital yang Dilengkapi dengan Volt, Amperemeter Wattmeter Lengkap, (b) Cos-Phi Analog.....	76
Gambar 2.26	Osciloskop (a) Osciloskop Analog, (b) Osciloskop Digital.....	77
Gambar 3.1	Bentuk Sebuah Op-Amp (a) Op-Amp Tipe Linier <i>Type 741</i> , (b) Kemasan Bulat, (c) Tipe Op-Amp Jenis SMD, d(d) Symbol Sebuah Op-Amp.....	80
Gambar 3.2	Op-Amp yang Ideal.....	83
Gambar 3.3	Rangkaian Op-Amp Pembalik Ideal.....	84
Gambar 3.4	Simulink Kasus 3.1 Op-Amp <i>inverting</i>	86
Gambar 3.5	Bentuk Keluaran dari Simulink Kasus 3.1 Op-Amp <i>inverting</i>	87

Gambar 3.6	Penguat <i>Amplifier Non-Inverting</i> Ideal	88
Gambar 3.7	Simulink Kasus 3.1 Op-Amp <i>Non-inverting</i>	90
Gambar 3.8	Bentuk Keluaran dari Simulink Kasus 3.1 Op-Amp <i>Non-inverting</i>	91
Gambar 3.9	Rangkaian Op-Amp dengan penguatan 1 (<i>Unity</i>)	91
Gambar 3.10	Rangkaian Op-Amp Penjumlahan	92
Gambar 3.11	Rangkaian Op-Amp Penjumlahan dengan Simulink	93
Gambar 3.12	Hasil Penjumlahan dengan Simulink	94
Gambar 3.13	Rangkaian Op-Amp Penjumlahan yang Lebih Umum	95
Gambar 3.14	Penguat Pembalik Menggunakan Jaringan Dua Terminal	97
Gambar 3.15	Penguat Pembalik Menggunakan Jaringan Dua Terminal	97
Gambar 3.16	Rangkaian Simulasi Op-Amp Membalik dengan Dua Terminal	98
Gambar 3.17	Bentuk Sinyal Masukan pada Kasus 3.4	99
Gambar 3.18	Bentuk Sinyal Keluaran pada Kasus 3.4	100
Gambar 3.19	Bentuk Arus Sinyal Masukan pada Kasus 3.4	100
Gambar 3.20	Rangkaian Ekuivalen Thevenin Kasus 3.4	102
Gambar 3.21	Rangkaian Simulink Op-Amp Ekuivalen Thevenin Kasus 3.5	103
Gambar 3.22	Bentuk sinyal masukan Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5	104
Gambar 3.23	Bentuk sinyal keluaran Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5	105
Gambar 3.24	Bentuk sinyal arus Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5	105
Gambar 3.25	Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang	106
Gambar 3.26	Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang Dihubungsingkat pada V2	107

Gambar 3.27	Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang Dihubungsingkat pada V1.....	108
Gambar 3.28	Rangkaian Pengurang dengan Sebuah Op-Amp.....	110
Gambar 3.29	Rangkaian Pengurang dengan Dua Buah Op- Amp	111
Gambar 3.30	Pengelompokan Dua Buah Op-Amp.....	111
Gambar 3.31	Op-Amp Bagian 1 sebagai Op-Amp <i>non- inverting</i>	112
Gambar 3.32	Op-Amp Bagian 2 Memiliki Dua Sumber Tegangan	113
Gambar 3.33	Op-Amp Bagian 2 Bila $V_x = 0$, dan v_z Aktif.	113
Gambar 3.34	Op-Amp Bagian 2 bila $V_z = 0$, dan V_x aktif.....	114
Gambar 3.35	Simulasi Op-Amp Dua Tingkat dengan Simulink	115
Gambar 3.36	Hasil Simulasi Op-Amp Dua Tingkat dengan Simulink.....	116
Gambar 3.37	Rangkaian Pengurangan dengan 3 Op-Amp.....	116
Gambar 3.38	Proses Mencari Persamaan dari Rangkaian Pengurang 3 Op-Amp.....	117
Gambar 3.39	Rangkaian Penguat 3 Op-Amp dengan Buffer	117
Gambar 3.40	Simulasi Op-Amp Pengurangan dengan Tiga Tingkat	118
Gambar 3.41	Hasil Simulasi Op-Amp Pengurangan dengan Tiga Tingkat.....	118
Gambar 3.42	Rangkaian Differensiator Op-Amp	120
Gambar 3.43	Simulasi dari Rangkaian Differensiator Op- Amp input DC.....	120
Gambar 3.44	Hasil simulasi Rangkaian Differensiator Op- Amp Input DC.....	121
Gambar 3.45	Simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp Input AC	121
Gambar 3.46	Hasil simulasi Rangkaian Differensiator Op- Amp input AC.....	122

Gambar 3.47	Rangkaian Differensiator Op-Amp	123
Gambar 3.48	Simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp	124
Gambar 3.49	Hasil Simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp	124
Gambar 3.50	Rangkaian Praktis (Aplikasi) Differensial Op-Amp	125
Gambar 3.51	Simulasi Rangkaian Praktis (Aplikasi) Differensial Op-Amp	126
Gambar 3.52	Hasil Rangkaian Praktis (Aplikasi) Differensial Op-Amp	126
Gambar 3.53	<i>Output</i> dari Rangkaian Differensiator Op-Amp dengan Input Sinyal DC	127
Gambar 3.54	Rangkaian Dasar Integrator Pembalik	129
Gambar 3.55	Rangkaian Dasar Integrator Pembalik	130
Gambar 3.56	Hasil Rangkaian Dasar Integrator Pembalik	131
Gambar 3.57	Rangkaian Integrator <i>Non-Inverting</i>	132
Gambar 3.58	Simulasi Rangkaian Integrator <i>Non-Inverting</i>	132
Gambar 3.59	Hasil Simulasi Rangkaian Integrator <i>Non-Inverting</i>	133
Gambar 3.60	Rangkaian Integrator Op-Amp Sederhana	134
Gambar 3.61	Rangkaian Integrator Op-Amp untuk Aplikasi (Praktis)	135
Gambar 3.62	Rangkaian Op-Amp Penjumlah	137
Gambar 4.1	Respons Filter Lolos Rendah	140
Gambar 4.2	Filter Lolos Rendah (FLR) atau RC Integrator	141
Gambar 4.3	Pembagian Tegangan pada Filter Lolos Rendah	142
Gambar 4.4	Filter Aktif Filter Lolos Rendah	145
Gambar 4.5	Tanggapan Frekuensi Filter Lolos Rendah	147
Gambar 4.6	Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat	148
Gambar 4.7	Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat pada Kasus 4.2	150

Gambar 4.8	Filter Lolos Rendah dengan Penguat pada Kasus 4.2.....	150
Gambar 4.9	Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah dengan Penguat pada kasus 4.2	151
Gambar 4.10	Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat Orde Dua.....	151
Gambar 4.11	Filter Lolos Rendah dengan Penguat Orde Dua	152
Gambar 4.12	Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah Kasus 4.3.....	152
Gambar 4.13	Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah Kasus 4.3.....	153
Gambar 4.14	Diagram Nyquist Filter Lolos Rendah Kasus 4.3.....	153
Gambar 4.15	Filter Lolos Rendah Kasus <i>Inverting</i>	154
Gambar 4.16	Respons Frekuensi Filter Lolos Rendah Orde Dua.....	156
Gambar 4.17	Spektrum Umum Keluaran dari FLR.....	156
Gambar 4.18	Filter Aktif Lolos Rendah Orde tiga	157
Gambar 4.19	Karakteristik Umum Filter Lolos Tinggi.....	158
Gambar 4.20	Rangkaian Dasar Filter Lolos Tinggi.....	159
Gambar 4.21	Rangkaian Dasar Filter Lolos Tinggi.....	160
Gambar 4.22	Rangkaian Filter Lolos Tinggi Orde Dua.....	162
Gambar 4.23	Respons Frekuensi Filter Lolos Tinggi	163
Gambar 4.24	Rangkaian Filter Lolos Tinggi RL.....	163
Gambar 4.25	Rangkaian dasar Filter Aktif Lolos Tinggi dan Aliran Arus	165
Gambar 4.26	Filter Aktif dengan Penguatan 1 ($R_i = R_f$) dan Frekuensi <i>Cut Off</i> $f_c = 12\pi RC$	166
Gambar 4.27	Respons Frekuensi Filter Aktif Lolos Tinggi dengan <i>Operational Amplifier</i>	168
Gambar 4.28	Filter Aktif Lolos Tinggi Op-Amp <i>Inverting</i>	169
Gambar 4.29	Filter Aktif Lolos Tinggi Orde Dua	169
Gambar 4.30	Konfigurasi Filter Lolos Tinggi Tingkat Tinggi.....	171
Gambar 4.31	Rangkaian Filter Aktif <i>High Pass</i> Filter dengan Simulink.....	172

Gambar 4.32	Sinyal Keluaran Filter Aktif <i>High Pass</i> Filter	173
Gambar 4.33	Diagram Bode Filter Aktif <i>High Pass</i> Filter.....	173
Gambar 4.34	Diagram Nyquist Filter Aktif <i>High Pass</i> Filter	174
Gambar 4.35	Diagram Nyquist Filter Aktif <i>High Pass</i> Filter	174
Gambar 4.36	Grafik Filter Lolos Rentang	176
Gambar 4.37	Filter Lolos Antara RC.....	177
Gambar 4.38	Respons Frekuensi Filter Lolos Rentang 4.8.2 Filter Aktif Lolos Rentang (FLR).....	177
Gambar 4.39	Metode Pembuatan Filter Lolos Rentang	178
Gambar 4.40	Filter Lolos Rentang Terdiri dari FLT dan FLR	179
Gambar 4.41	Filter Lolos Rentang Dua Umpan Balik	180
Gambar 4.42	Dasar Filter Tolak Rentang.....	182
Gambar 4.43	Karakteristik Filter Tolak Rentang	183
Gambar 4.44	Rangkaian Filter Tolak Rentang dengan RC	183
Gambar 4.45	Rangkaian Filter Tolak Rentang dengan RLC.....	184
Gambar 4.46	Filter Tolak Rentang dengan sebuah Op-Amp.....	185
Gambar 4.47	Filter Aktif Tolak Rentang	186
Gambar 4.48	Filter <i>Low-Pass</i> untuk Landaian Sebesar - 60dB/dekade.....	189
Gambar 4.49	Filter <i>High-Pass</i> dengan Landaian Sebesar 20 dB/decade.....	189
Gambar 4.50	Filter <i>High-Pass</i> dengan Landaian Sebesar 40 dB/decade.....	190

BAB
1**PENGENALAN MATLAB DAN
SIMULINK**

1.1. Umum

MATLAB merupakan kependekan dari MATrix LABoratory dikarenakan setiap data pada MATLAB menggunakan dasar matriks. MATLAB adalah bahasa pemrograman tinggi, tertutup, dan *case sensitive* dalam lingkungan komputasi numerik yang dikembangkan oleh MathWorks. Salah satu kelebihanannya yang paling populer adalah kemampuan membuat grafik dengan visualisasi terbaik. MATLAB mempunyai banyak *tools* yang dapat membantu berbagai disiplin ilmu. Ini merupakan salah satu penyebab industri menggunakan MATLAB. Selain itu MATLAB mempunyai banyak pustaka yang sangat membantu untuk menyelesaikan permasalahan matematika seperti membuat simulasi fungsi, pemodelan matematika dan perancangan GUI dan lainnya.

MATLAB menerapkan bahasa pemrograman MATLAB dan menyediakan berbagai macam *tools* (dinamakan *toolbox*) dan *library* dari fungsi-fungsi yang sering diperlukan untuk menyelesaikan masalah teknikal dan sains dengan lebih mudah dan lebih efisien. Pada Bab 1 ini memperkenalkan beberapa fungsi yang akan digunakan dalam bab-bab selanjutnya dalam buku ini mempergunakan pemrograman MATLAB versi 2018a dan menjelaskan bagaimana menggunakan MATLAB untuk menyelesaikan masalah teknikal secara umum.

MATLAB juga digunakan oleh pelajar, teknisi, peneliti di universitas, institusi penelitian, maupun Industri sebagai alat yang membantu melakukan komputasi matematis untuk berbagai keperluan. MATLAB biasanya digunakan untuk penelitian, pengembangan sistem, dan desain sistem. MATLAB merupakan bahasa pemrograman tertutup. Sehingga, kompilasi program MATLAB harus menggunakan *software* MATLAB yang dikembangkan oleh MathWorks. Selain itu, MATLAB juga mendukung pemrograman interpretatif untuk melakukan sejumlah instruksi secara langsung melalui CLI (*command line interface*).

Simulink adalah suatu paket perangkat lunak yang terintegrasi dengan MATLAB untuk melakukan simulasi sistem dinamik dengan metode grafis. Simulink dikembangkan oleh MathWorks (perusahaan pembuat MATLAB) dengan tujuan untuk membuat bahasa pemrograman grafis yang dapat menampilkan aliran data untuk keperluan modeling, simulasi dan analisis terhadap suatu sistem dinamis [1], [2].

Simulink dapat mempermudah pengguna dalam memodelkan suatu sistem, termasuk di bidang *analog, embedded, maupun* sistem elektronika. Di bidang elektronika termasuk di dalamnya adalah penguat, penguat adalah salah satu alat yang paling banyak digunakan. Selama ini, penguat pada umumnya diprogram menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi seperti perangkat lunak paket Electronic WorkBench, Crocodile, PCSPICE, PCSIM, atau yang lainnya.

1.2. Pengenalan Fitur MATLAB

MATLAB adalah perangkat lunak yang terdiri dari kombinasi dari bahasa pemrograman *procedural, integrated development environment* (IDE) yang di dalamnya terdapat editor dan *debugger* serta kumpulan fungsi-fungsi yang banyak serta dapat melakukan berbagai macam perhitungan teknik dalam bentuk matriks.

1.3. Karakteristik MATLAB

- Bahasa pemrogramannya didasarkan pada matriks (baris dan kolom).
- Lambat (dibandingkan dengan Fortran atau C) karena bahasanya langsung eksekusi tanpa melalui proses kompilasi.
- *Automatic memory management*, artinya kita tidak harus mendeklarasikan *arrays* terlebih dahulu.
- Pemrogramannya tersusun secara sistematis.
- Waktu pengembangannya lebih cepat dibandingkan dengan Fortran atau C.
- Dapat diubah ke bahasa C lewat MATLAB Compiler.
- Tersedia banyak *toolbox* untuk aplikasi-aplikasi khusus.

Beberapa kelebihan MATLAB jika dibandingkan dengan program lain adalah:

1. Mudah dalam memanipulasi struktur matriks dan perhitungan berbagai operasi matriks yang meliputi penjumlahan, pengurangan, perkalian, *invers* dan fungsi matriks lainnya.
2. Menyediakan fasilitas untuk memplot struktur gambar (kekuatan fasilitas grafik tiga dimensi yang sangat memadai).
3. *Script* program yang dapat diubah sesuai dengan keinginan *user*.
4. Jumlah *routine-routine powerful* yang berlimpah yang terus berkembang.
5. Kemampuan *interface* (misal dengan bahasa C, *word*, dan *mathematica*).
6. Dilengkapi dengan toolbox, simulink, stateflow dan sebagainya, serta mulai melimpahnya *source code* di internet yang dibuat dalam MATLAB (contoh toolbox

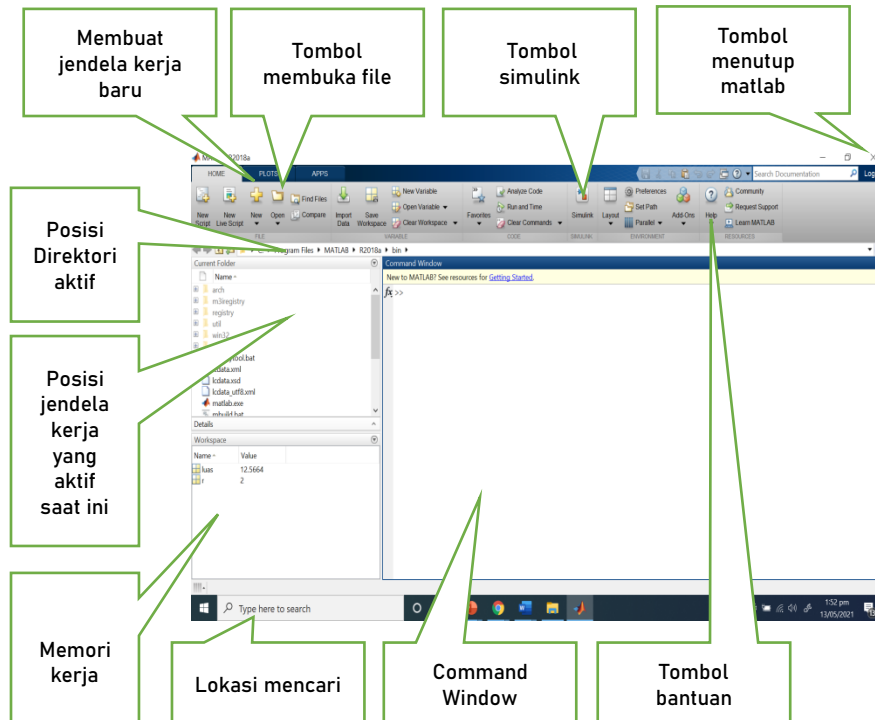
misalnya: *signal processing*, *control system*, *neural networks*, dan sebagainya).

1.4. Lingkungan Kerja MATLAB

1.4.1. Jendela Perintah

Windows atau jendela ini muncul pertama kali ketika kita menjalankan program MATLAB. Command windows digunakan untuk menjalankan perintah-perintah MATLAB, memanggil *tool* MATLAB seperti editor, fasilitas help, model simulink, dan lain-lain. Ciri dari windows ini adalah adanya *prompt* (tanda lebih besar) yang menyatakan MATLAB siap menerima perintah.

Secara formal suatu *script* merupakan suatu file eksternal yang berisi tulisan perintah MATLAB. Tetapi *script* tersebut bukan merupakan suatu fungsi. Ketika anda menjalankan suatu *script*, perintah di dalamnya dieksekusi seperti ketika dimasukkan langsung pada MATLAB melalui *keyboard*.



Gambar 1.1 Tampilan Jendela Kerja dari MATLAB

Contoh dari kalkulasi interaktif, misalnya kita ingin menghitung luas lingkaran dengan radius 2,0 m maka kita dapat melakukannya dalam MATLAB Command Window dengan mengetikkan:

```
>> r=2;
>> luas=pi*r^2
luas = 12.5664
```

MATLAB segera mengeksekusi perintah yang kita masukkan yaitu mengisi variable r dengan nilai 2.0 dan menghitung sesuai persamaan yang kita tuliskan, begitu tombol *Enter* ditekan

MATLAB akan menghitung dan menyimpan jawaban tersebut dalam variabel bernama luas. (dalam hal ini *array* berukuran 1x1). Variabel Luas tersebut dapat digunakan untuk perhitungan selanjutnya sebelum kita memerintahkan kepada MATLAB pada nilai baru untuk dinamakan dengan nama variabel yang sama.

Berikut ni adalah beberapa perintah dasar MATLAB beserta fungsinya:

1. `>> help`

Menunjukkan semua help topic di MATLAB

2. `>>what general`

Menunjukkan instruksi-instruksi yang tersedia di direktori general, salah satunya adalah instruksi *clear*.

3. `>>help general`

Menunjukkan instruksi-instruksi yang tersedia di direktori general, dan fungsinya secara umum.

4. `>>help clear`

Menunjukkan penjelasan detail untuk instruksi *clear*. (Fungsinya untuk apa, *syntax*-nya untuk apa, fungsi lain yang terkait apa)

5. `>> help ops`

Menunjukkan penulisan operator2 di dalam MATLAB.

6. `>> x=5;`

`>>y=6`

Instruksi pertama diakhiri dengan `;` artinya nilai *x* akan disimpan di memori. Instruksi kedua tidak diakhiri dengan `;` artinya nilai *y* akan disimpan di memori sekaligus ditampilkan ke layar.

7. `>>clc;`

`>>x`

`>>y`

`clc` digunakan untuk membersihkan layar, tetapi nilai variable yang tersimpan di memori tidak akan hilang sehingga dapat ditampilkan kembali ke layar dengan memanggil nama variabelnya.

8. `>>clear;`

`>>x`

`>>y`

`clear` digunakan untuk menghapus variable dari memori sehingga kita tidak dapat menampilkan nilai variable ke layar. (muncul pesan??? Undefined function or variable 'x'.)

9. `>> x=4;`

`>> y=5;`

`>> z=x+y;`

`>> z`

Merupakan contoh barisan instruksi untuk melakukan penjumlahan

Beberapa format bilangan pada command window:

1. format default
2. format short: fixed point with 5 digits.
3. format long: fixed point format with 15 digits.
4. format short e: floating point format with 5 digits.
5. format long e: floating point format with 15 digits.
6. format short g: best of fixed or floating point format with 5 digits.
7. format long g: best of fixed or floating point format with 15 digits.
8. format hex: hexadecimal format.

9. format +: the symbols +, - and blank are printed for positive, negative and zero elements. Imaginary parts are ignored.
10. format bank: fixed format for dollars and cents.
11. format rat: rational format.

1.4.2. Jendela Editing pada MATLAB

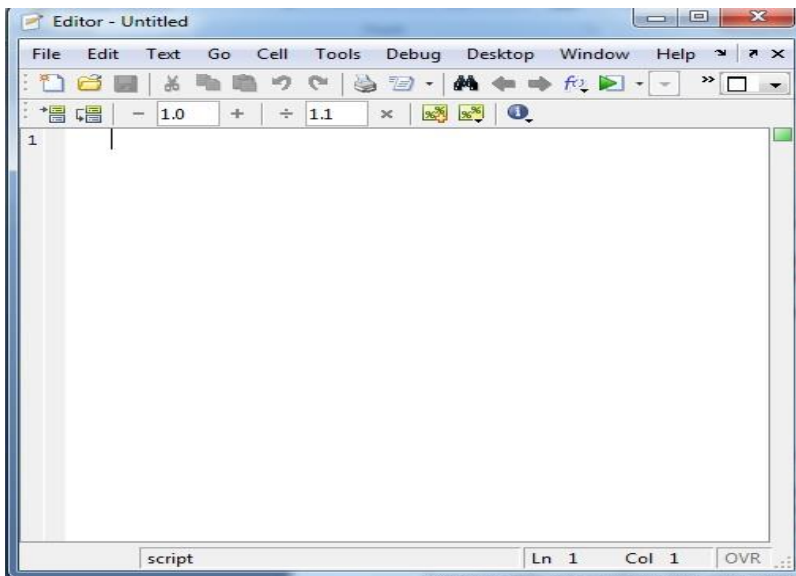
Untuk memulai sebuah perintah dari MATLAB anda harus masuk dalam menu seperti pada gambar di bawah ini dengan cara memilih *file* pilih dan pilih Edit pilih *Script* dan klik kiri selanjutnya tampil seperti pada gambar di bawah dan siap untuk menuliskan *script-script* yang diinginkan.

Windows atau jendela ini merupakan *tool* yang disediakan oleh MATLAB yang berfungsi sebagai editor *script* MATLAB (*listing* perintah-perintah yang harus dilakukan oleh MATLAB). Ada dua cara untuk membuka editor ini, yaitu:

1. Klik: File, lalu New dan kemudian M-File
2. Ketik pada command windows: "Edit" atau Ctrl N

Secara formal suatu *script* merupakan suatu file eksternal yang berisi tulisan perintah MATLAB. Tetapi *script* tersebut bukan merupakan suatu fungsi. Ketika anda menjalankan suatu *script*, perintah di dalamnya dieksekusi seperti ketika dimasukkan langsung pada MATLAB melalui *keyboard*.

M-file selain dipakai sebagai penamaan *file* juga bisa dipakai untuk menamakan fungsi, sehingga fungsi-fungsi yang kita buat di jendela editor bisa disimpan dengan *ekstensi* .m sama dengan *file* yang kita panggil di jendela editor.



Gambar 1.2 Tampilan Editor dari Windows dari MATLAB

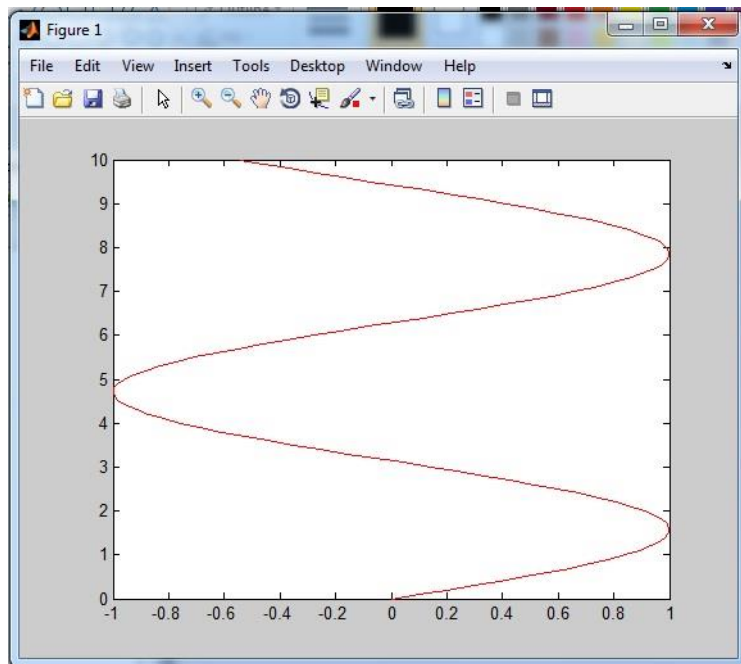
Saat kita menggunakan fungsi MATLAB seperti *inv*, *abs*, *cos*, *sin* dan *sqrt*, MATLAB menerima variabel berdasarkan variabel yang kita berikan. Fungsi M-file mirip dengan *script file* di mana keduanya merupakan *file* teks dengan ekstensi *.m*. sebagaimana *script* M-file, fungsi m-file tidak dimasukkan dalam jendela command window tetapi *file* tersendiri yang dibuat dengan editor teks.

1.4.3. Jendela Gambar pada MATLAB

Jendela ini merupakan hasil visualisasi dari *script* MATLAB. MATLAB memberikan kemudahan bagi *programmer* untuk mengedit windows ini sekaligus memberikan program khusus untuk itu, sehingga selain berfungsi sebagai visualisasi *output* yang berupa grafik juga sekaligus menjadi media input yang interaktif.

1.5. Jendela pada Simulink

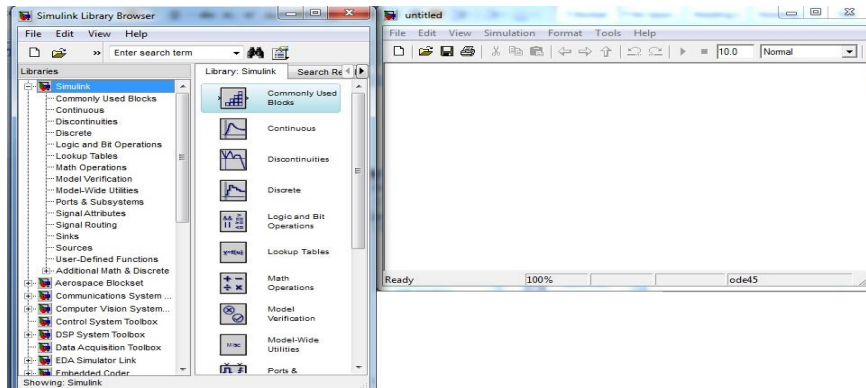
Windows atau disebut jendela ini umumnya digunakan untuk menyimulasikan simulink berdasarkan blok diagram yang telah diketahui. Untuk mengoperasikannya ketik “simulink” pada command windows.




Gambar 1.3 Tampilan figure Windows dari MATLAB

1.5.1. Jendela Umum Simulink

Windows ini umumnya digunakan untuk menyimulasikan simulink berdasarkan blok diagram yang telah diketahui. Untuk mengoperasikannya ketik “simulink” pada command windows.



Gambar 1.4 Tampilan Simulink Windows dari MATLAB

Atau dengan klik pada  tunggu beberapa saat dan klik File selanjutnya klik New maka muncul tampilan seperti pada gambar 1.4, dan simulink siap untuk menerima perintah kerja selanjutnya lebih detail akan di bahas pada bab berikutnya dengan contoh kasus.

1.5.2. Karakter khusus MATLAB

Tanda % merupakan penanda komentar. Keterangan setelah tanda tersebut akan diabaikan dalam proses perhitungan.

Contoh:

```
>>y = 2:2:8 % y = [2468];
>>y = 2.00 4.00 6.00 8.00
```

Tanda ; merupakan perintah pembatas yang tidak ditampilkan di jendela kerja, tanda ini juga berarti sebagai pemisah kolom dan baris dalam matriks.

Contoh:

```
>>A = [1 3 5; 5 3 1];
```

Tanda : merupakan pembatas jangkauan atau sering juga disebut dengan *increment*, contohnya:

```
>>B = [0:2:8]
```

```
>>B = 0.00 2.00 4.00 6.00 8.00
```

Tanda ` merupakan *transpose* matriks yang merupakan suatu vector kolom

```
>>X = [3 2 4 5;7 6 5 8]
```

```
>>X= 3.00 2.00 4.00 5.00
```

```
7.00 6.00 5.00 8.00
```

```
>>X=X`
```

```
>>X= 3.00 7.00
```

```
2.00 6.00
```

```
4.00 5.00
```

```
5.00 8.00
```

Tanda ... digunakan untuk menuliskan baris perintah yang panjang contohnya:

```
>>P=sin(1)-sin(2)+sin(3)-
```

```
sin(4)+sin(5)+cos(6)+...cos(7)cos(8)+cos(9)-
```

```
cos(10) + cos(11) + cos(12)
```

```
>>P = 1.0273
```

Contoh dan fungsi kode yang dapat diketik pada command windows:

```
>> help % Menunjukkan semua help topic di
MATLAB.
```

```
>> what general % Menunjukkan instruksi-instruksi yang
tersedia di direktori
```

general, salah satunya adalah instruksi

clear

```
>> help general % Menunjukkan instruksi-instruksi yang
tersedia di
```

direktori general, dan fungsinya secara umum.

```
>> help clear % Menunjukkan penjelasan detail untuk
instruksi clear.
```

(Fungsinya untuk apa, *syntax*-nya untuk

apa, fungsi

lain yang terkait apa)

```
>> help ops % Menunjukkan penulisan operator2 di
dalam MATLAB
```

```
>> clc % Digunakan untuk membersihkan layar,
tetapi nilai
```

Variable yang tersimpan di memori tidak akan hilang
sehingga dapat ditampilkan kembali ke layar dengan

memanggil nama variabelnya

```
>> clear % digunakan untuk membersihkan layar
```

sekaligus menghapus variable dari memori sehingga kita tidak dapat menampilkan nilai variable ke layar. (muncul pesan??? *Undefined function or variable 'x'.*)

```
>> clc %
>> x=4;
>> y=5;
>> z=x+y;
>> z % Merupakan contoh barisan instruksi
```

untuk melakukan penjumlahan antara variable x dan variable y yang hasilnya disimpan dalam variable z.

1.5.3. Angka dan Operasi Aritmatika

Ada tiga jenis angka di MATLAB yaitu:

1. Bilangan bulat, yaitu bilangan yang tidak mengandung desimal.

Contohnya:

```
>> xi = 10
```

2. Bilangan real, yaitu bilangan yang mengandung desimal
Contohnya:

```
>> xr = 12.6054
>> realmax % batas atas bilangan real di MATLAB
ans = 1.7977e+308
>> realmin % batas minimum bilangan real di MATLAB
ans = 2.2251e-308
```

3. Bilangan kompleks

```
>> i
ans = 0 + 1.0000i
>> x = 1 + sqrt(3)*i
x = 1.0000 + 1.7321i
>> A= [1 j;-j*5 2]
A= 1.0000 0 + 1.0000i
0-5.0000i 2.0000
```

Beberapa penggunaan operator aritmatika antara dua operand (A dan B) ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 1.1 Operator Matematika MATLAB

Operasi	Simbol
Penambahan	+
Pengurangan	-
Perkalian	*
Pembagian	/atau \
perpangkatan	^

1.5.4. Variabel pada MATLAB

MATLAB memiliki tiga variabel sebagai nonnumbers yaitu:

1. -Inf (Negative Infinity)
2. Inf (Infinity)
3. Nan (Not an number)

MATLAB hanya memiliki dua jenis tipe data yaitu Numeric dan String. Dalam MATLAB setiap variabel akan disimpan dalam bentuk matriks. *User* dapat langsung menuliskan variabel baru tanpa harus mendeklarasikannya terlebih dahulu pada command window.

Contoh pembuatan variabel pada MATLAB:

```
>> VarA=1000
VarA =
    1000
>> VarB=[1 3 2 5 6 7]
VarB =
     1     3     2     5     6     7
>> VarC='Wiryajati'
VarC =
Wiryajati
```

Penamaan variabel pada MATLAB bersifat *case sensitive*, karena itu perlu diperhatikan penggunaan huruf besar dan kecil pada penamaan variabel. Apabila terdapat variabel lama dengan nama yang sama maka MATLAB secara otomatis akan me-*replace* variabel lama tersebut dengan variabel baru yang dibuat *user*.

1.5.5. Fungsi Pemrograman pada MATLAB

1.5.5.1. Fungsi Matematika Dasar

Tabel 1.2 Fungsi Matematika Dasar

Fungsi	Keterangan
abs	Menghitung nilai absolut
exp	Memperoleh nilai dari e pangkat bilangan tertentu (e = 2.718282)
log	Menghitung logaritma natural (ln) suatu bilangan
sqrt	Menghitung akar pangkat 2 dari suatu bilangan
ceil	Membulatkan bilangan ke bilangan bulat terdekat menuju plus tak berhingga.
fix	Membulatkan bilangan ke bilangan bulat terdekat menuju nol.
floor	Membulatkan bilangan ke bilangan bulat terdekat menuju minus tak berhingga.
gcd	Menghitung nilai faktor pembagi terbesar
isprime	Menghasilkan true jika merupakan bilangan prima.
log10	Menghitung logaritma suatu bilangan untuk dasar 10.
mod	Menghitung nilai modulus.
primes	Menghasilkan daftar bilangan.
rem	Menghitung nilai <i>remainder</i> .
round	Membulatkan bilangan ke bilangan bulat terdekat.

1.5.5.2. Fungsi Trigonometri

Fungsi trigonometri banyak digunakan terkait dengan sudut. Nilai perhitungan yang dalam fungsi trigonometri sudut dalam *radian*.

Tabel 1.3 Fungsi Trigonometri

Fungsi	Keterangan
sin	Menghitung sinus suatu bilangan, di mana bilangan dalam radian.
cos	Menghitung cosinus suatu bilangan, di mana bilangan dalam radian.
tan	Menghitung tangen suatu bilangan, di mana bilangan dalam

Fungsi	Keterangan
	radian.
acos	Menghitung arccosinus (invers cos) suatu bilangan yang menghasilkan sudut dalam radian, di mana bilangan harus antara -1 dan 1.
asin	Menghitung arcsinus suatu bilangan yang menghasilkan sudut dalam radian, di mana bilangan harus antara -1 dan 1.
atan	Menghitung arctangen suatu bilangan yang menghasilkan sudut dalam radian.
cosh	Menghitung cosinus hiperbolik dari suatu sudut dalam radian.
sinh	Menghitung sinus hiperbolik dari suatu sudut dalam radian.
tanh	Menghitung tangen hiperbolik dari suatu sudut dalam radian.
cosd	Menghitung cosinus suatu bilangan, di mana bilangan dalam derajat.
sind	Menghitung sinus suatu bilangan, di mana bilangan dalam derajat.
tan	Menghitung tangen suatu bilangan, di mana bilangan dalam derajat.
sec	Menghitung suatu sec bilangan, di mana bilangan dalam radian.
csc	Menghitung suatu cosec bilangan, di mana bilangan dalam radian.
cot	Menghitung cotan suatu bilangan, di mana bilangan dalam radian.

1.5.5.3. Fungsi Analisis Data

MATLAB menyediakan sejumlah fungsi penting untuk digunakan dalam menganalisis data, antara lain ditunjukkan pada Tabel 1.4

Tabel 1.4 Fungsi Analisis Data

Fungsi	Keterangan
max	Menghasilkan nilai terbesar dari suatu vektor atau matriks
min	Menghasilkan nilai terbesar dari suatu vektor atau matriks
mean	Menghasilkan nilai rerata
dll

1.6. Vektor dan Matriks pada MATLAB

1.6.1. Vektor

Vektor, adalah besaran yang mempunyai besaran atau nilai serta arah,

Vektor baris:

```
>> v = [-2 sin(45) 4 6]
v =
-2.0000 0.8509 4.0000 6.0000
>> length(v) % menghitung panjang vektor
ans =
3
```

Vektor kolom:

```
>> x = [6; 5 ; 9]
>>x =
6
5
9
```

1.6.2. Matriks

Dapat diasumsikan bahwa di dalam MATLAB setiap data akan disimpan dalam bentuk matriks. Dalam membuat suatu data matriks pada MATLAB, setiap isi data harus dimulai dari kurung siku '[' dan diakhiri dengan kurung siku tutup ']'. Untuk membuat variabel dengan data yang terdiri beberapa baris, gunakan tanda 'titik koma' (;) untuk memisahkan data tiap barisnya.

MATLAB menyediakan beberapa fungsi yang dapat kita gunakan untuk menghasilkan bentuk-bentuk matriks yang diinginkan. Fungsi-fungsi tersebut antara lain:

- zeros : untuk membuat matriks yang semua datanya bernilai 0
- ones : matriks yang semua datanya bernilai 1
- rand : matriks dengan data random dengan menggunakan distribusi uniform
- randn : matriks dengan data random dengan menggunakan distribusi normal
- eye : untuk menghasilkan matriks identitas

Cara Menginputkan Matriks.

Contoh:

Matriks A=

Ada 4 cara untuk menginputkan matriks yakni:

Cara 1:

```
>>a=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
```

Cara 2:

```
>>a=[1 2 3] enter  
>>4 5 6 enter  
>>7 8 9];enter
```

Cara 3:

```
>>a1=[1 2 3];  
>>a2=[4 5 6];  
>>a3=[7 8 9];
```

```
>>a=[a1;a2;a3;];
>>a
```

Cara 4:

```
>>a=input('Masukkan matriks= ');
>>Masukkan matriks=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
>>disp(a)
```

1.6.3. Operasi dan Fungsi pada Matriks

MATLAB menyediakan operasi dan fungsi yang dapat digunakan operasi perhitungan maupun operasi logika, beberapa operasi dan logika dapat disajikan pada tabel berikut:

Tabel 1.5 Operasi dan Fungsi pada Matriks yang Sering Digunakan

Perintah	Keterangan	Contoh
det	Menghasilkan determinan matriks	Det(A)
size	Menghasilkan ukuran matriks	Size(A)
+	Menjumlahkan matriks	$C = A + B$
*	Mengalikan matriks	$C = A * B$
.*	Mengalikan elemen dengan elemen, dengan ketentuan memiliki ukuran yang sama	$C = A .* B$
^	Memangkatkan matriks dengan suatu skalar	$C = A ^ k$
.^	Memangkatkan elemen per elemen matriks dengan skalar	$C = A .^ k$
'	<i>Transpose</i> matriks	A'
./	Membagi elemen per elemen dengan ketentuan memiliki ukuran yang sama	$C = A ./ B$
\	Menghasilkan solusi $AX = B$	$C = A \setminus B$
/	Menghasilkan solusi $XA = B$	$C = A / B$
inv	Menghasilkan <i>invers</i> matriks dengan ketentuan matriks merupakan matriks bujur sangkar	$C = \text{Inv}(A)$

1.7. Grafik MATLAB

1.7.1. Grafik 2 Dimensi

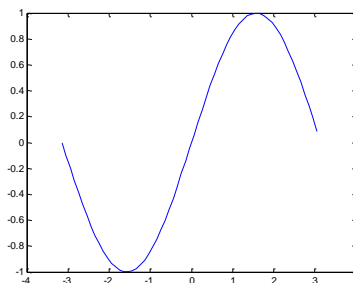
MATLAB menyediakan fasilitas dalam pembuatan suatu grafik dengan sangat sempurna dan mudah untuk digunakan, ini merupakan salah keistimewaan MATLAB, sehingga sangat cocok digunakan untuk komputasi teknik. Ada beberapa cara untuk menampilkan grafik hasil dari suatu persamaan. Perintah atau instruksi tersebut adalah sebagai berikut:

plot : Menggambar linier
loglog : Menggambar dengan skala loglog
semilogx : Menggambar dengan skala semi log
semilogy : Menggambar dengan skala semilog

Contoh 1.1 *script* untuk menampilkan grafik sinus(t) dalam bidang x dengan batas $-\pi$ sampai π dengan increment 0.1.

```
x = -pi:.1:pi;  
y = sin(x);  
plot(x,y)
```

Hasilnya sebagai berikut;

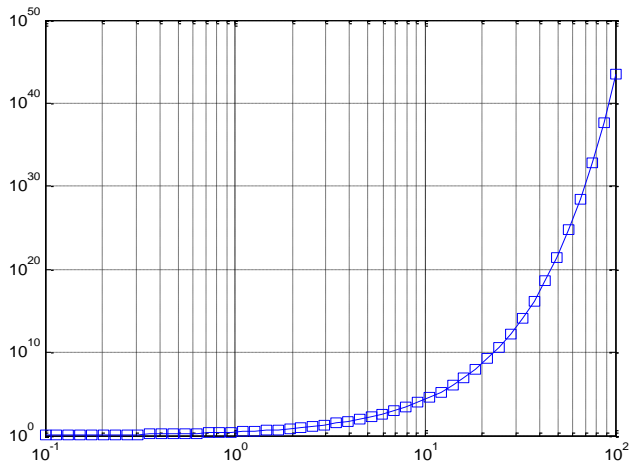


Gambar 1.5 Hasil Plot dari Sinus dengan Batas $-\pi(-3.14)$ Sampai dengan $\pi(3.14)$

Contoh 1.2 *script* untuk menampilkan grafik loglog dalam bidang x.

```
x = logspace(-1,2);  
loglog(x,exp(x),'-s')  
grid on
```

Hasilnya sebagai berikut;

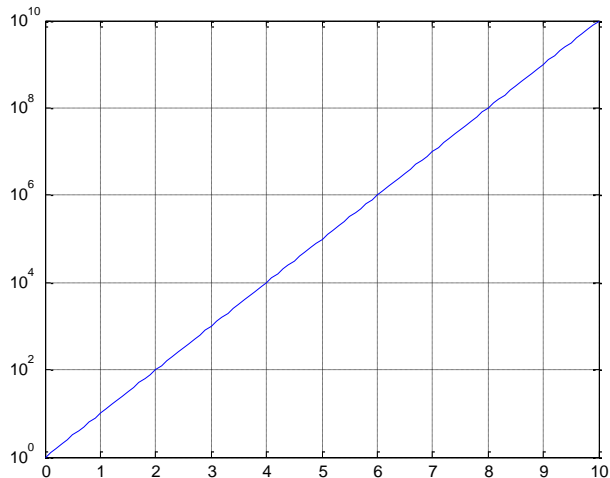


Gambar 1.6 Hasil Plot Loglog dengan Batas -1 Sampai 2

Contoh 1.3 *script* untuk menampilkan grafik *semilogy* dalam bidang y.

```
x = 0:.1:10;  
semilogy(x,10.^x)  
grid on;
```

Hasilnya sebagai berikut;



Gambar 1.7 Hasil Plot *Semilogy*

Untuk judul, label, garis sumbu dan teks perintah yang digunakan adalah sebagai berikut:

```
title : judul grafik  
xlabel : label sumbu x  
ylabel : label sumbu y  
text : teks keterangan  
gtext : tempat teks diletakkan  
grid : grid line  
axis : batas sumbu y dan x
```

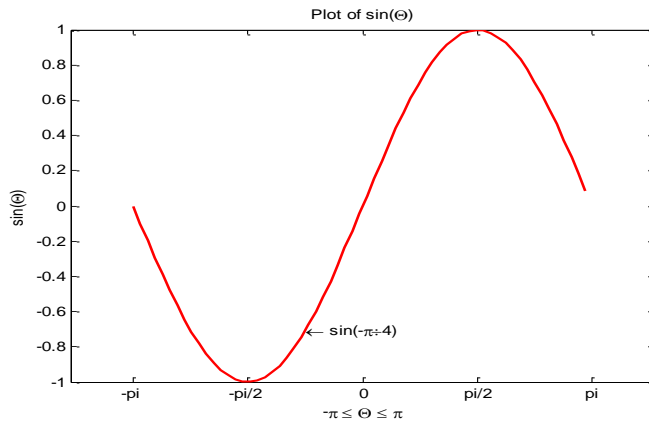
Perintah yang digunakan untuk membuat grafik linier, plot (x,y) ini untuk menggambar bidang vector x dan vector y. Jika x atau y adalah sebuah matriks maka mereka akan saling menggambarkan sesuai dengan baris dan kolomnya masing-masing. Tetapi bila x adalah sebuah besaran *scalar* sedangkan y

adalah besaran vector maka akan terjadi titik yang tidak terhubung pada plot. Berbagai macam jenis garis, *symbol plot* dan warna dapat dibuat dengan perintah `plot(x,y,s)` di mana `s` adalah karakter *string* yang dibuat dari salah satu atau lebih dari *statemen* di bawah ini.

Contoh 1.3 *script* untuk menampilkan judul grafik.

```
%\contoh program untuk menampilkan grafik
sinus dengan judul
x = -pi:.1:pi;
y = sin(x);
p = plot(x,y)
set(gca,'XTick',-pi:pi/2:pi)
set(gca,'XTickLabel',{'-pi','-
pi/2','0','pi/2','pi'})
xlabel('-\pi \leq \Theta \leq \pi')
ylabel('sin(\Theta)')
title('Plot of sin(\Theta)')
% \Theta tampak seperti symbol
% Notasi pada titik (-pi/4, sin(-pi/4))
text(-pi/4,sin(-pi/4),'\leftarrow sin(-
\pi\div4)',...
'HorizontalAlignment','left')
% Merubah warna garis menjadi warna merah
% mengatur tebal garis dengan dua titik
set(p,'Color','red','LineWidth',2)
```

Hasilnya sebagai berikut;



Gambar 1.8 Hasil Plot Grafik Sinus dengan Judul

Tabel 1.6 Tabel Spesifikasi Warna dan Jenis Gambar pada MATLAB.

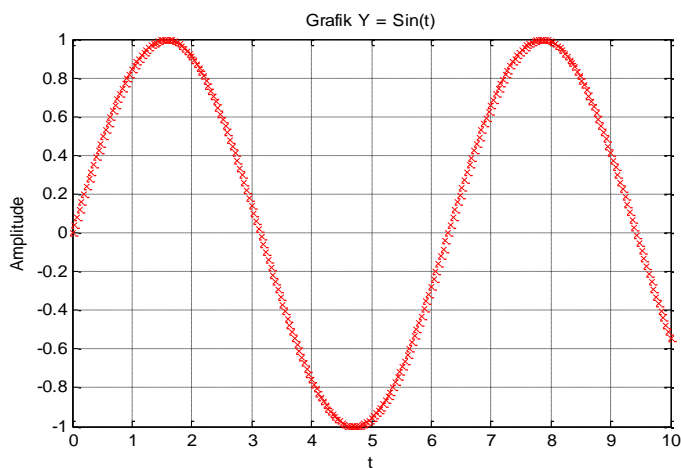
SPESIFIKASI WARNA		JENIS GARIS	
WARNA	ISTILAH	JENIS	SIMBOL
Hitam	k	Solid	-
Biru	b	Dashed	--
Cyan	c	Dotted	:
Hijau	g	Dash-dot	-.
Magenta	m	Point	.
Merah	r	Circle	o
Putih	w	X-mark	x
Kuning	y	Plus	+
		Star	*

Contoh 1.4: *Script* untuk menampilkan grafik sinus(t) dalam bidang

```
>>n = 25
>>t = 0: 1/n: 10
```

```
>>y = sin(t);  
>>plot (t,y,'rx')  
>>title ('Grafik Y = Sin(t)  
>>grid  
>>xlabel('t'), ylabel('Amplitude')
```

Hasilnya sebagai berikut;



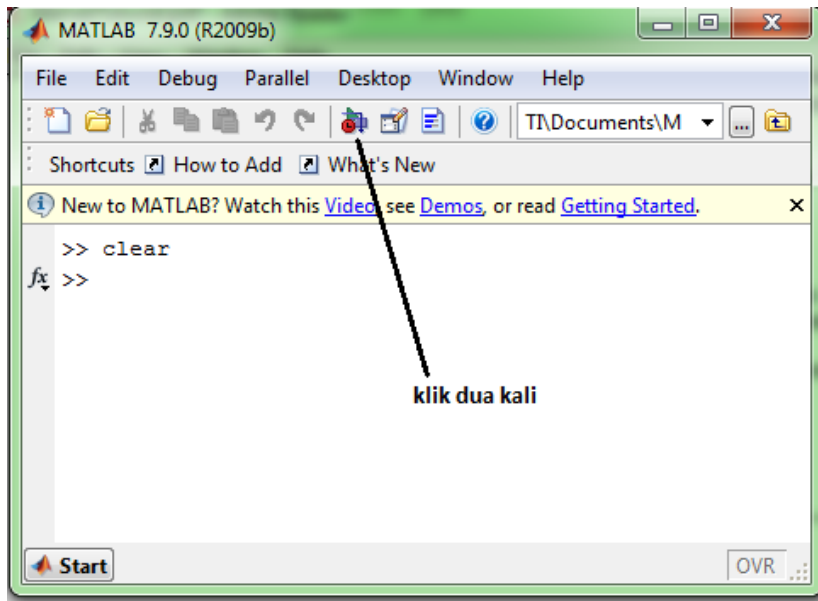
Gambar 1.9 Hasil Plot MATLAB Menampilkan 1 (Satu) Grafik Sinus(t) dalam 1 (Satu) Bidang

1.8. Dasar-Dasar Simulink pada MATLAB

Simulink adalah paket perangkat lunak berbasis waktu yang termasuk dalam MATLAB dan tugas utamanya adalah untuk memecahkan numerik Persamaan Diferensial Biasa (PDB). Kebutuhan untuk menyelesaikan persamaan numeriknya berasal dari fakta bahwa tidak ada solusi analitis untuk semua persamaan

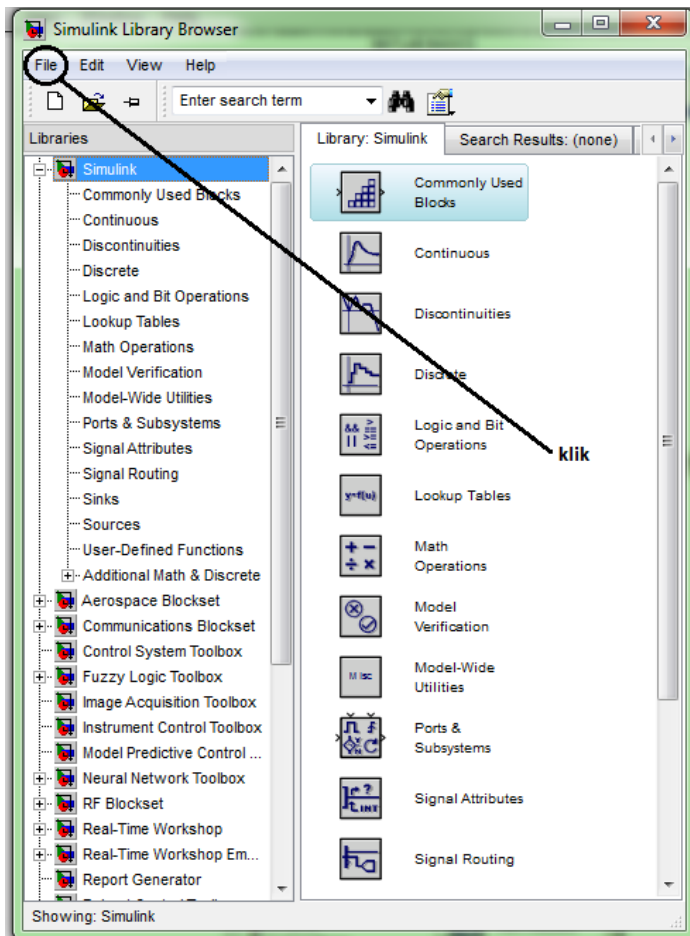
diferensial, terutama bagi persamaan yang nonlinier. Seluruh ide adalah untuk memecahkan persamaan diferensial biasa menjadi segmen waktu kecil dan menghitung solusi numerik untuk hanya segmen kecil. Panjang setiap segmen disebut “Ukuran langkah”. Karena metode numerik dan tidak analitis maka akan ada kesalahan dalam solusi. Kesalahan tersebut tergantung pada metode dan ukuran langkah (biasanya dilambangkan dengan h).

Langkah-langkah penggunaan simulink sebagai berikut: untuk memulai simulink klik simbol simulink pada jendela perintah seperti pada gambar berikut;



Gambar 1.10 Jendela Kerja MATLAB

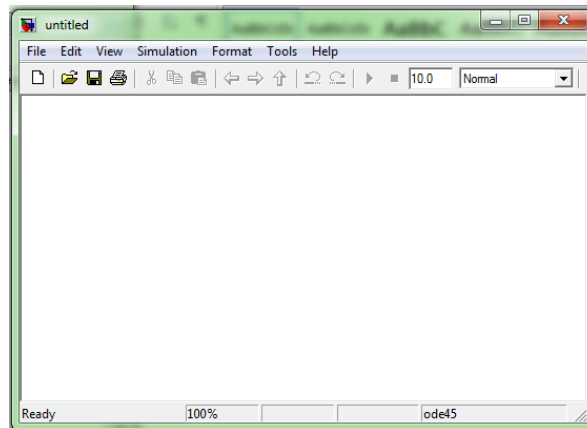
Beberapa saat akan muncul jendela kerja simulink sebagai berikut:



Gambar 1.11 Pustaka Simulink

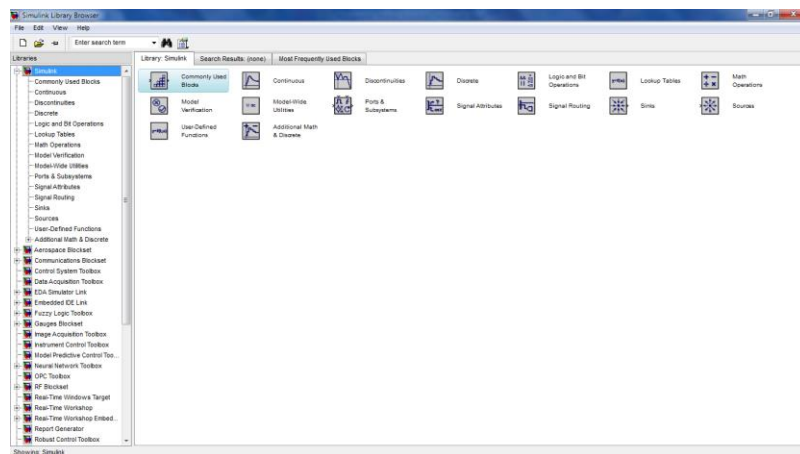
Ini adalah Pustaka Simulink. Seperti dapat dilihat ada beberapa sub-pustaka. Agar dapat menemukan blok yang sesuai anda mencari di pustaka tersebut. Untuk membuka jendela kerja simulink baru klik File kemudian arahkan ke new kemudian new

model (Ctrl+N) selanjutnya akan terlihat jendela kerja baru seperti pada gambar berikut:



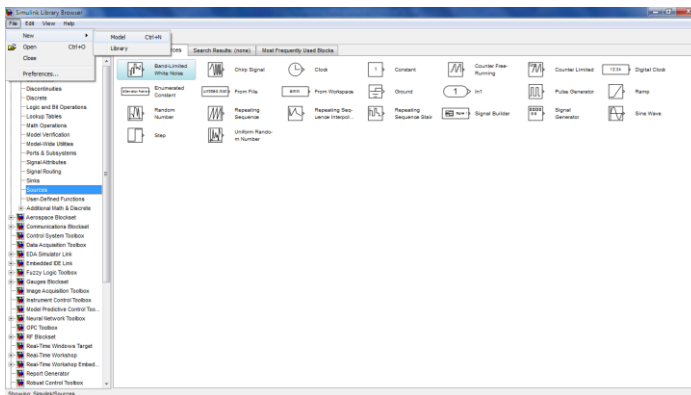
Gambar 1.12 Jendela Kerja Simulink yang Siap Diisi

1.8.1. Pustaka Simulink

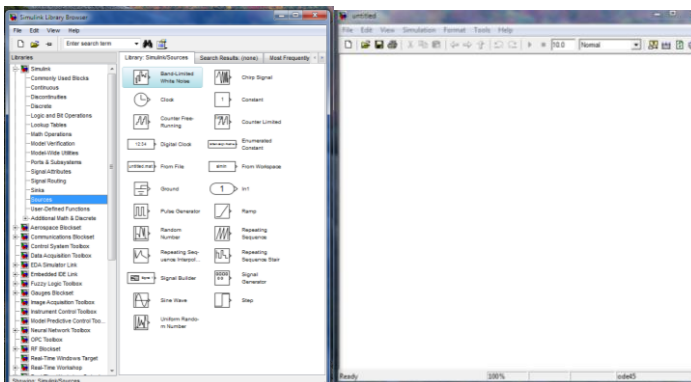


Gambar 1.13 Pustaka Simulink

Tampilan utama dari Simulink terdiri dari kumpulan blok-blok yang berada dalam *library*. Blok-blok ini dikelompokkan berdasarkan kegunaannya. Contohnya adalah yang sering digunakan dalam sistem dinamik adalah dari *library*. *Continuous*, *Sink* dan *Sources*. Untuk memulai pembuatan model dalam Simulink maka kita harus membuat sebuah *file* baru dari menu File/New/Model seperti di bawah ini:



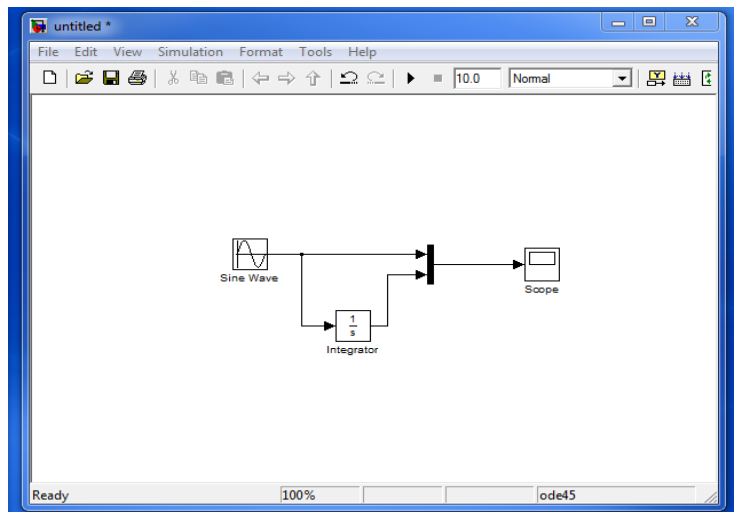
Gambar 1.14 Pustaka Simulink pada *sources*



Gambar 1.15 Jendela Kerja dan Pustaka Simulink pada *Sources*

1.8.2. Simulasi Sederhana dengan Simulink

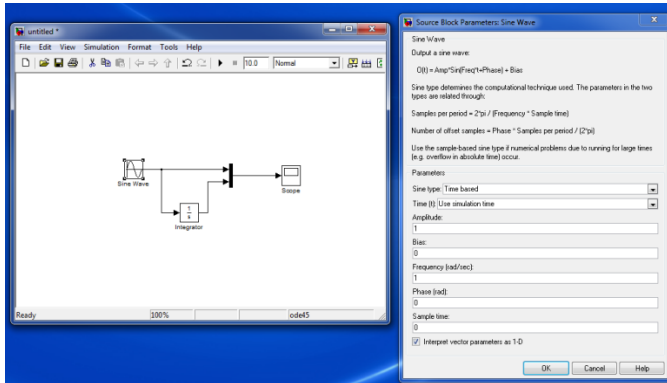
Dalam sub bab ini akan diberikan contoh simulasi sederhana dengan menggunakan Simulink. Misalkan akan disimulasikan bentuk sinyal sinus dengan frekuensi tertentu dan juga integral dari fungsi sinus tersebut. Maka kita harus men-*drag* dan *drop* beberapa blok yaitu sin wave (dari Library Source), integrase (dari library Continuous), blok Mux (multiplexer, blok untuk menggabungkan 2 sinyal, dari library Signal Routing) dan blok Scope (dari library Sink). Model Simulink dari fungsi sinus dan integralnya disajikan di Gambar di bawah ini.




Gambar 1.16 Penggunaan Scope dan integrator

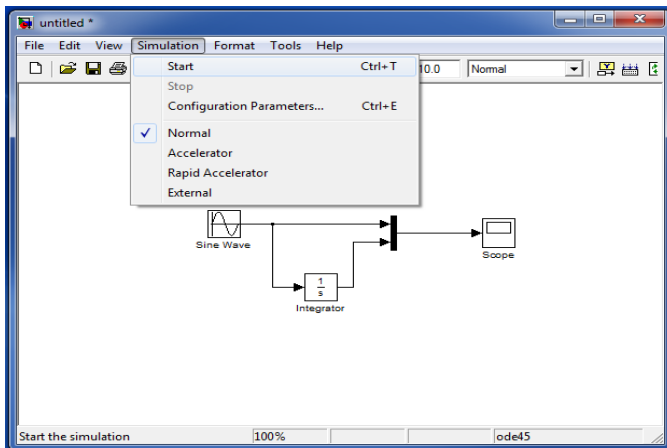
Sinyal dari satu blok ke blok lainnya dapat dibuat dengan menarik garis dari tanda > di ujung kanan blok hingga ke tanda > di ujung kiri blok yang dituju. Sebelum memulai simulasi maka kita dapat mengatur parameter-parameter fungsi sinus yang ingin disimulasikan seperti *amplitude*, frekuensi, sudut fase, bias dan

lain-lain dengan mengklik ganda *icon* Sine Wave dan juga lamanya simulasi seperti di gambar berikut:



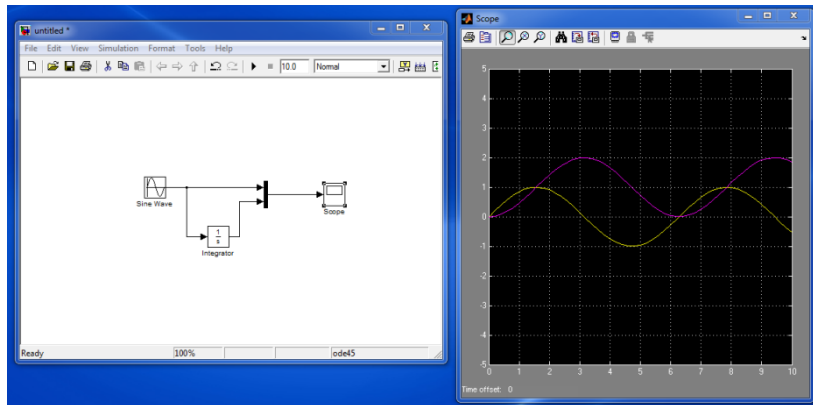
Gambar 1.17 *Setting* Parameter Pada Sinewave

Simulasi dapat dimula dengan mengklik tombol  di menu bar *icon* atau dari menu Simulation>Start seperti berikut:



Gambar 1.18 Mulai Simulasi Pada Simulink

Jika kita mengklik *icon scope* maka akan ditampilkan grafik hasil simulasi fungsi sinus dan integralnya sebagai berikut:



Gambar 1.19 Hasil Simulasi Sinus dan Integrator

1.8.3. Pustaka Simulink untuk Op-Amp.

Pada sub bab ini diuraikan beberapa fitur yang dimiliki oleh Simulink khususnya untuk keperluan simulasi rangkaian penguat amplifier. Beberapa blok rangkaian serta penjelasan singkat sebagai berikut:

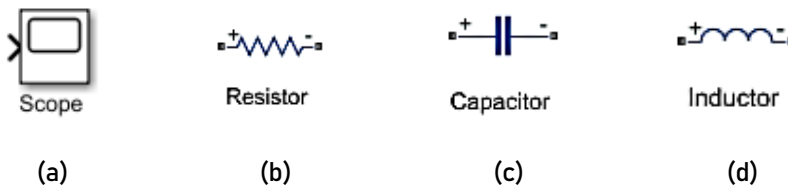
a. Scope

Untuk mendapatkan pustaka *scope* dapat di sorot pada ikon Library: Simulink/Commonly Used Blocks/Simulink/Sinks/Scope.

Scope ini memiliki ikon seperti pada gambar 1.20. Fitur dari oscilloskop pada MATLAB adalah sebagai berikut:

Triggers—Setel pemicu untuk menyinkronkan sinyal yang berulang dan jeda tampilan saat peristiwa terjadi. **Cursor Measurements**—Ukur nilai sinyal menggunakan kursor vertikal dan horizontal **Signal Statistics**—Menampilkan nilai maksimum, minimum, perbedaan puncak ke puncak, rata-rata, median, dan RMS dari sinyal yang dipilih. **Peak Finder**—Temukan nilai maksimal,

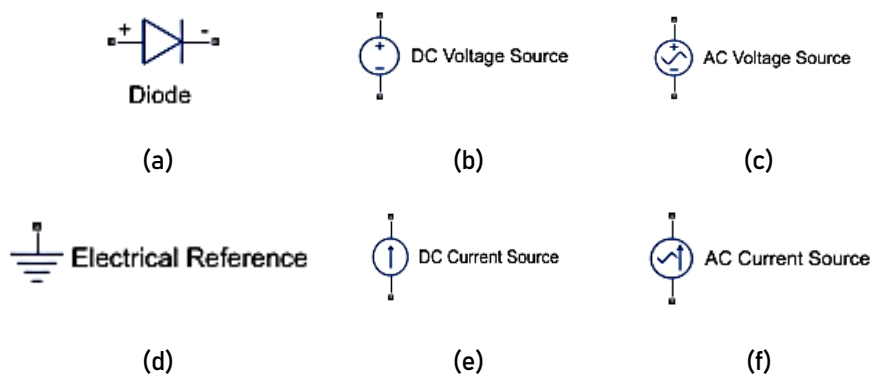
yang menunjukkan nilai sumbu x di mana nilai tersebut muncul Bilevel Measurements—Ukur transisi, *overshoot*, *undershoot*, dan siklus. Blok *scope* ini memiliki peranan yang sangat penting. Karena untuk menunjukkan hasil dari sebuah rangkaian dalam bentuk keluaran, masukan maupun semua hasil dari rangkaian yang kita rancang.



Gambar 1.20 (a). Scope (b) Resistor (c) Capacitor (d) Inductor pada Simulink

- b. Resistor, disebut juga sebuah tahanan. Satuan internasional dari sebuah resistor adalah ohm, kiloohm, megaohm. Tahanan berfungsi untuk memberikan tahanan atau menahan tegangan maupun arus. Untuk mendapatkan sebuah elemen resistor pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Elemen/Resistor. Simbol tahanan/resistor pada simulink seperti pada gambar 1.20 (b).
- c. Capacitor sering disebut kondensator. Satuan internasional dari sebuah kapasitor adalah farad, mikro, farad, nanofarad, dst. Kapasitor berfungsi untuk menyimpan muatan listrik. Untuk mendapatkan sebuah elemen kapasitor pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Elemen/Capacitor. Simbol Capacitor/kondensator pada simulink seperti pada gambar 1.20 (c).

- d. Induktor, sering disebut belitan Satuan internasional dari sebuah induktor adalah henry, mikro henry, nanohenry, dst. induktor berfungsi untuk menyimpan muatan listrik. Untuk mendapatkan sebuah elemen induktor pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Elemen/inductor. Simbol Inductor/belitan pada simulink seperti pada gambar 1.20 (d).
- e. Diode, berfungsi untuk penyearah arus atau tegangan listrik bolak balik menjadi arus atau tegangan searah. Untuk mendapatkan sebuah elemen diode pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Elemen/Diode Simbol diode pada simulink seperti pada gambar 1.21 (a).

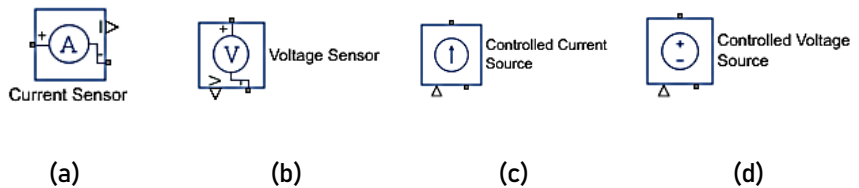


Gambar 1.21 (a) Dioda (b) Tegangan DC (c) Tegangan AC (d) Ground (e) Sumber arus DC (f) Sumber arus AC pada Simulink

- f. Electrical ground, berfungsi untuk memberikan pertanahan pada sumber tegangan, arus atau sensor, arus tegangan maupun alat ukur. Untuk mendapatkan sebuah elemen ground pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Elemen/ electrical

- ground. Simbol diode pada simulink seperti pada gambar 1.21 (d).
- g. Sumber Tegangan DC berfungsi untuk memberikan sumber tegangan searah pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Untuk mendapatkan sebuah sumber DC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Souces/DC Voltage Sources. Simbol DC Voltage Sources pada simulink seperti pada gambar 1.211 (b).
 - h. Sumber Tegangan AC, berfungsi untuk memberikan sumber tegangan bolak balik pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Untuk mendapatkan sebuah sumber AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Sources/AC Voltage Sources. Simbol AC Voltage Sources pada simulink seperti pada gambar 1.21 (c).
 - i. Sumber Arus DC berfungsi untuk memberikan sumber arus searah pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Untuk mendapatkan sebuah sumber arus DC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Souces/DC Current Sources. Simbol DC Current Sources pada simulink seperti pada gambar 1.21 (e).
 - j. Sumber Arus AC, berfungsi untuk memberikan sumber arus bolak balik pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Untuk mendapatkan sebuah sumber arus AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/electrical Souces/AC Current Sources. Simbol AC Current Sources pada simulink seperti pada gambar 1.21 (f).
 - k. Sensor Arus, berfungsi sebagai terminal sumber arus atau tegangan searah atau bolak balik pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif yang berfungsi sebagai

media penghubung kepada alat ukur lainnya sebelum di konversi. Untuk mendapatkan sebuah sumber arus AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensor/Current Sensor. Simbol AC Current Sources pada simulink seperti pada gambar 1.22 (a).

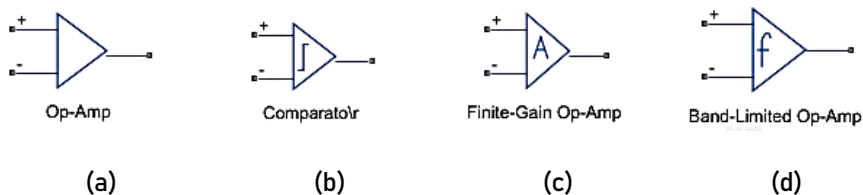


Gambar 1.22 (a) Sensor Arus (b) Sensor Tegangan (c) Sumber Arus Terkontrol (d) Sumber Tegangan Terkontrol pada Simulink.

- l. Sensor tegangan, berfungsi sebagai terminal sumber tegangan searah atau bolak balik atau searah pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif yang berfungsi sebagai media penghubung kepada alat ukur lainnya sebelum di konversi. Untuk mendapatkan sebuah sumber tegangan AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensor/Current Sensor. Simbol AC Current Sources pada simulink seperti pada gambar 1.22 (b).
- m. Control arus, berfungsi sebagai terminal kendali sumber arus atau tegangan searah atau bolak balik pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif yang berfungsi sebagai media penghubung kepada alat ukur lainnya sebelum di konversi. Untuk mendapatkan sebuah control arus AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensor/

Controlled Current Source. Simbol Controlled Current Source. pada simulink seperti pada gambar 1.22 (c).

- n. Control tegangan, berfungsi sebagai terminal kendali sumber tegangan searah atau bolak balik pada elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif yang berfungsi sebagai media penghubung kepada alat ukur lainnya sebelum di konversi. Untuk mendapatkan sebuah control arus AC pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensor/Controlled Voltage Source. Simbol Controlled Voltage Source. pada simulink seperti pada gambar 1.22 (d).
- o. Op-Amp linier, berfungsi sebagai penguat operasional linier, dapat disuplai oleh sumber tegangan searah yang pada rangkaian simulink tidak ditunjukkan. *Operational Amplifier* memiliki tiga terminal dua sebagai masukan dan satu keluaran. Op-Amp dapat dihubungkan dengan elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Op-Amp berfungsi sebagai penguat. Untuk mendapatkan sebuah *Operational Amplifier* pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensor/Op-Amp. Simbol Op-Amp. pada simulink seperti pada gambar 1.23 (a).



Gambar 1.23 (a) Op-Amp (b) Comparator (c) Finite Gain-Op-Amp (d) Band Limited Op-Amp pada Simulink.

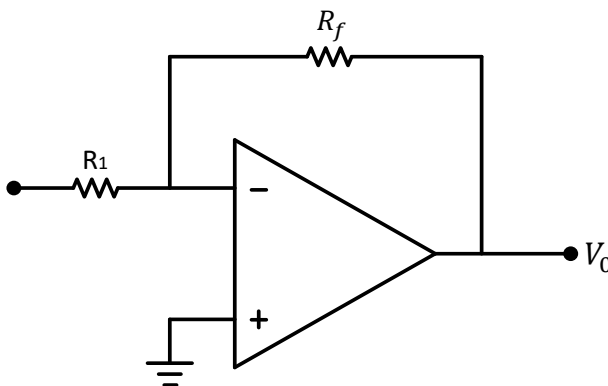
- p. Comparator, berfungsi sebagai penguat operasional linier bila dirangkakan akan berfungsi sebagai pembanding, dapat disuplai oleh sumber tegangan searah yang pada rangkaian simulink tidak ditunjukkan. Comparator memiliki tiga terminal dua sebagai masukan dan satu keluaran. Op-Amp dapat dihubungkan dengan elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Op-Amp berfungsi sebagai rangkaian pembanding. Untuk mendapatkan sebuah Operational Amplifier Comparator pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Electronics/Interaed Cirsuits/Comparator. Simbol Comparator pada simulink seperti pada gambar 1.23 (b).
- q. Finite gain Op-Amp berfungsi sebagai penguat operasional linier bila dirangkakan akan berfungsi sebagai penguat berhingga, dapat disuplai oleh sumber tegangan searah yang pada rangkaian simulink tidak ditunjukkan. Comparator memliiki tiga terminal dua sebagai masukan dan satu keluaran. Opamp dapat dihubungkan dengan elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Op-Amp berfungsi sebagai rangkaian pembanding. Untuk mendapatkan sebuah Operational Amplifier Finite gain Op-Amp pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Electronics/Interaed Cirsuits/Finite-Gain_Op-Amp. Simbol Finite gain Op-Amp pada simulink seperti pada gambar 1.23 (c).
- r. Band limited Op-Amp, berfungsi sebagai penguat operasional linier bila dirangkakan akan berfungsi sebagai pembatas Band, dapat disuplai oleh sumber tegangan searah yang pada rangkaian simulink tidak ditunjukkan. Band limited Op-Amp memiliki tiga terminal dua sebagai masukan dan satu keluaran. Op-Amp dapat dihubungkan dengan elemen pasif ataupun elemen rangkaian aktif. Op-

Amp berfungsi sebagai rangkaian pembanding. Untuk mendapatkan sebuah Operational Amplifier Band limited Op-Amp pada Simulink dapat ditemukan pada; Simscape/Electronics/Interaced Circuits/Band limited Op-Amp. Simbol Band limited Op-Amp pada simulink seperti pada gambar 1.23 (d).

1.9. Langkah-Langkah Simulasi

Dalam menggunakan buku ini diharapkan dapat mengikuti tahapan-tahapan sehingga simulasi menggunakan simulink dapat berjalan sesuai dengan perencanaan. Pada sub bab ni akan diuraikan secara rinci bagaimana langkah-demi Langkah menyimulasikan rangkaian elektronik dengan menggunakan MATLAB-Simulink. Untuk lebih jelas diberikan contoh sebagai berikut:

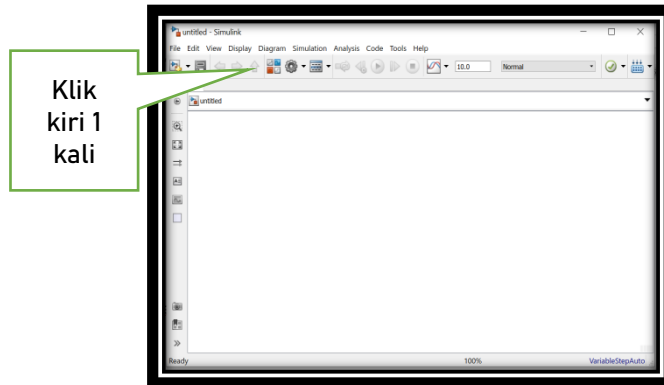
Kasus 1. Bila kita memiliki rangkaian seperti pada gambar 1.24 tentukan bentuk keluaran dan besar penguatan dari Op-Amp tersebut, bila $R_1=10$ Kohm, $R_f=100$ Kohm, diberikan sinyal masukan sinusoidal sebesar V_{maks} 0,5 volt dengan $f=50$ Hz.



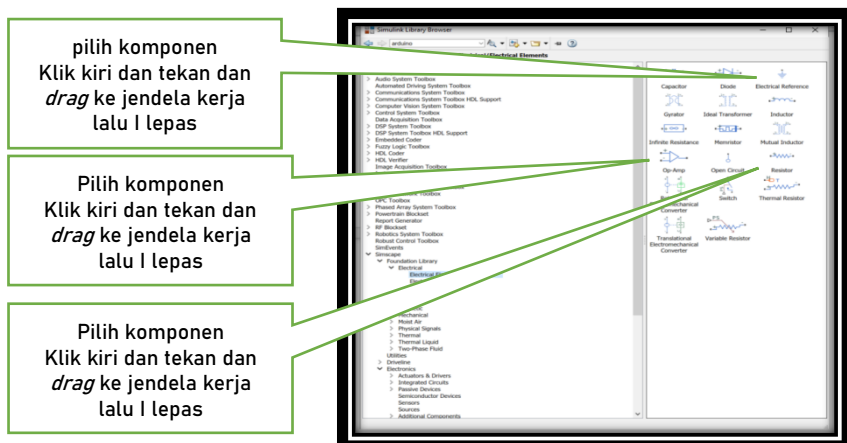
Gambar 1.24 Rangkaian Penguat Operasional *Inverting*

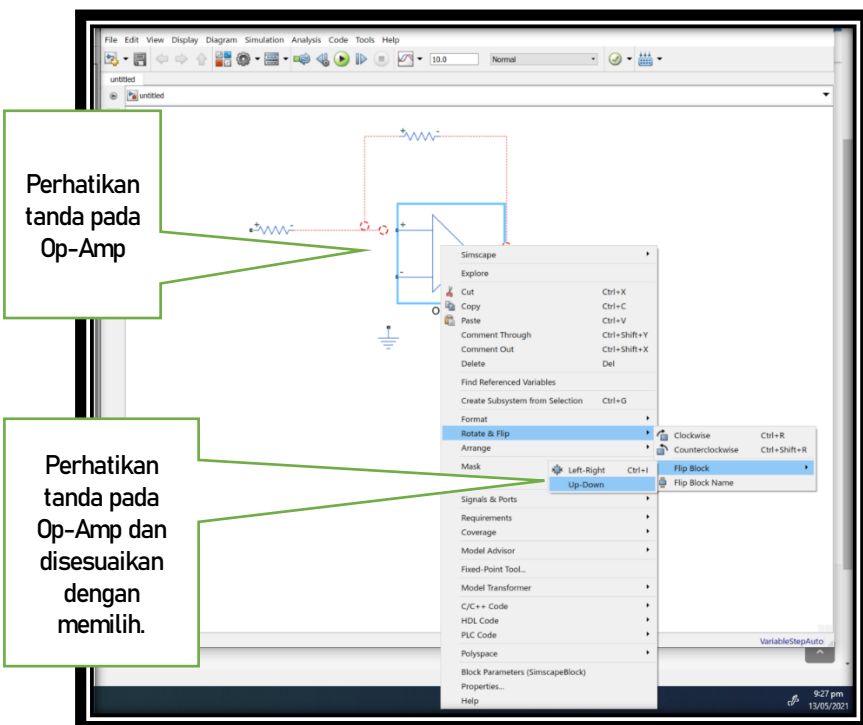
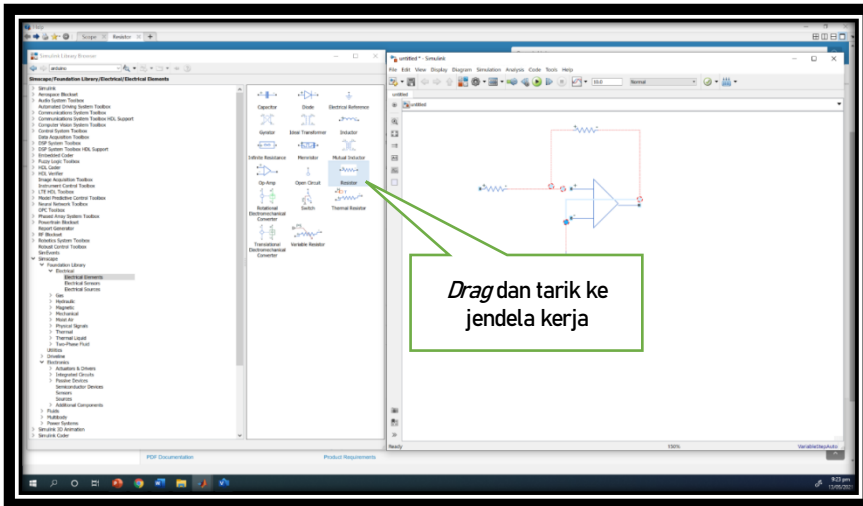
Penyelesaian

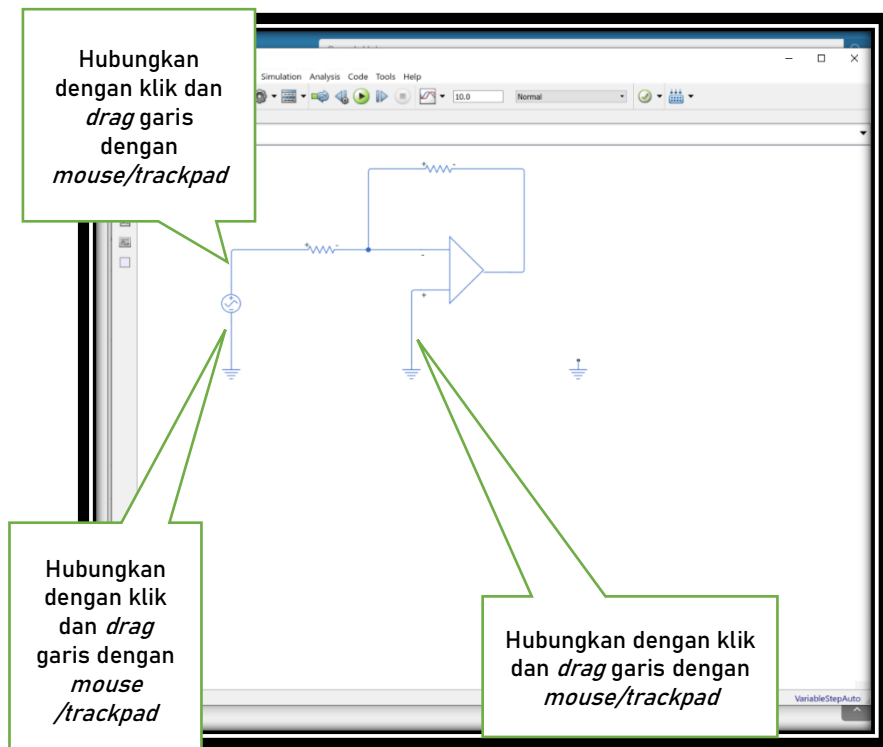
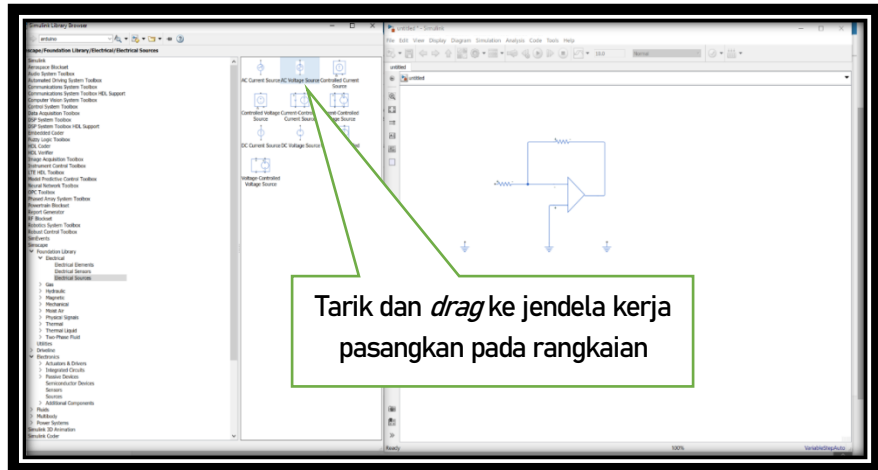
Langkahnya sebagai berikut. Pastikan jendela kerja Simulink sudah siap seperti pada gambar di bawah lalu pilih Simulink library untuk mendapatkan elemen-elemen yang di inginkan sesuai gambar 1.24.

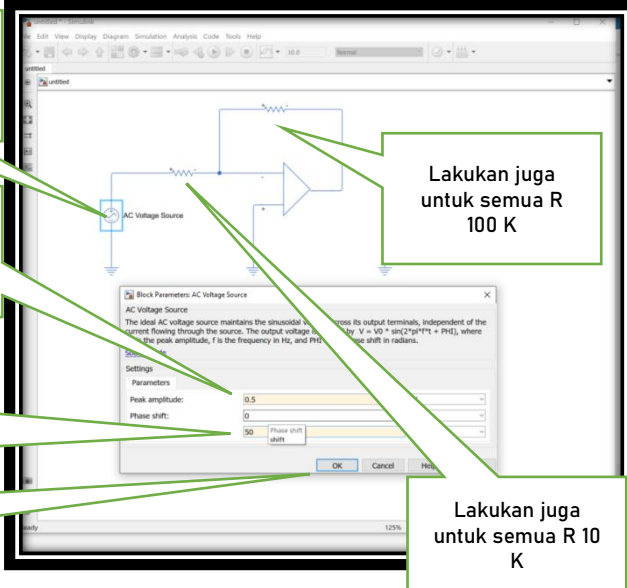


Akan tampil di layar Simulink Library Browser seperti pada gambar di bawah. yang akan berguna untuk memilih komponen yang diperlukan.









Setting besar tegangan dengan klik 2 kali

Isikan nilai 0.5 volt

Isikan Frekuensi 50 Hz

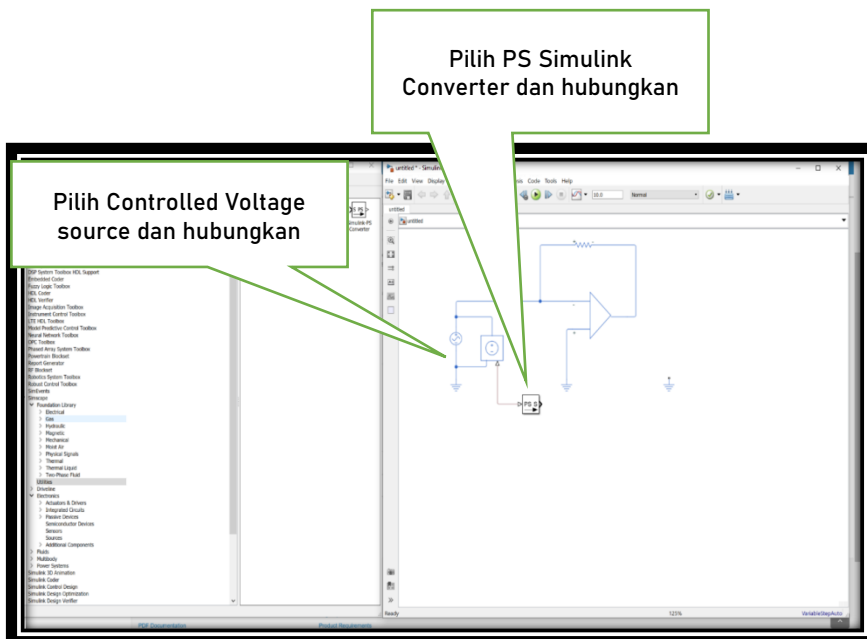
Tekan *apply* kemudian OK

Lakukan juga untuk semua R 100 K

Lakukan juga untuk semua R 10 K

The ideal AC voltage source maintains the sinusoidal voltage across its output terminals, independent of the current flowing through the source. The output voltage is given by $V = V_0 \sin(2\pi f t + \phi)$, where V_0 is the peak amplitude, f is the frequency in Hz, and ϕ is the phase shift in radians.

Parameter	Value
Peak amplitude	0.5
Phase shift	0
Phase shift unit	50



Pilih PS Simulink Converter dan hubungkan

Pilih Controlled Voltage source dan hubungkan

The screenshot shows the Simulink library browser on the left with 'PS Converter' selected under 'Power System Toolbox'. The main workspace shows a circuit diagram with a PS Converter block connected to an AC voltage source and an operational amplifier circuit.

The screenshot shows the MATLAB-SIMULINK environment. On the left, the Simulink Library Browser is open, displaying various component categories. A green arrow points from the 'Scope' block in the 'Sources' category to the main workspace. Another green arrow points from the 'Scope' block in the workspace to a callout box.

Pilih

Drag dan pasang scope

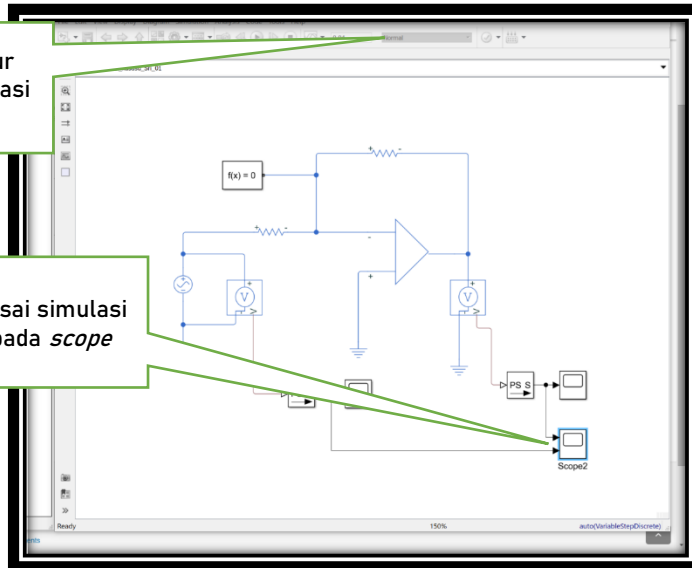
The screenshot shows the same MATLAB-SIMULINK environment as the previous one. The circuit diagram is now complete, including an operational amplifier, resistors, a voltage source, and a scope. A green arrow points from the 'Scope' block in the workspace to a callout box.

Pilih dan pasang

Isikan juga untuk sisi keluaran

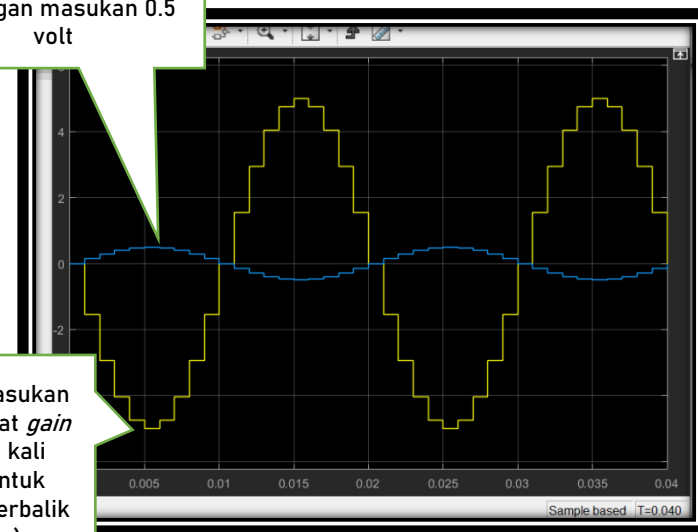
Silakan atur waktu simulasi 0.04 s

Setelah selesai simulasi klik 2 kali pada *scope*



Tegangan masukan 0.5 volt

Tegangan masukan 5 volt terdapat *gain* sebesar 10 kali dengan bentuk gelombang terbalik (*inverting*)



Ringkasan

MATLAB adalah sebuah *tools* matematika berbasis matriks (*array*). Penggunaan MATLAB sangat luas. Simulink adalah sebuah *software* yang terintegrasi dalam MATLAB yang memiliki fitur yang sangat baik sehingga dapat membantu para mahasiswa, *engineering*, peneliti, dan pengguna lainnya untuk mendapatkan kecepatan dalam menganalisis sebuah rangkaian elektronika, Karena memiliki fitur-fitur yang sangat lengkap simulink dapat digunakan untuk merancang menganalisis serta menyimulasikan bidang ilmu keteknikan dengan sangat baik.

Koding atau *script* yang dimiliki oleh MATLAB sangat compatible dengan Bahasa pemrograman tingkat tinggi. Dengan demikian komunikasi antara MATLAB dengan simulink sangat baik.

Khusus untuk menyimulasikan *Operational Amplifier* dapat dilakukan dengan melatih sebanyak mungkin dengan Latihan-latihan sehingga dapat meningkatkan kemampuan dalam menggunakan simulink maupun MATLAB.

Latihan-Latihan

1. Fitur apa yang dimiliki oleh sebuah perangkat pada Simulink berikut:
 - a. Scope
 - b. Define fungsi
 - c. Op-Amp
2. Jelaskan fungsi dari sebuah tahanan pada Simulink!
3. Bagaimana cara memasang sensor tegangan pada Simulink?
4. Bagaimana cara memasang sensor arus pada Simulink?
5. Buatlah sebuah rangkaian dengan menggunakan Op-Amp dengan menggunakan pengukuran sensor tegangan!

BAB
2**PENGUKURAN BESARAN**
LISTRIK**2.1. Satuan Sistem Internasional**

Sistem Satuan Internasional (bahasa Prancis: *Système International d'Unités* atau SI) adalah bentuk modern dari sistem metrik dan saat ini menjadi sistem pengukuran yang paling umum digunakan. Sistem ini terdiri dari sebuah sistem satuan pengukuran yang koheren yang terpusat pada 7 satuan pokok, yaitu detik, meter, kilogram, ampere, kelvin, mol, dan kandela, beserta satu set berisi 20 awalan untuk nama dan simbol satuan yang dapat digunakan saat menentukan kelipatan dan pecahan satuan. Sistem ini juga menentukan nama dari 22 satuan turunan, seperti lumen dan watt, untuk besaran umum lainnya. Sistem satuan yang digunakan adalah Sistem Internasional yang sering disingkat SI. Satuan turunan dapat didefinisikan dari satu atau beberapa satuan pokok dan/atau satuan turunan lainnya. Satuan-satuan tersebut diadopsi agar dapat memfasilitasi pengukuran besaran yang beragam. Sistem SI dari awal dimaksudkan untuk menjadi sistem yang dapat berkembang. Satuan dan awalan diciptakan, lalu definisi unit dimodifikasi melalui perjanjian internasional seiring dengan teknologi pengukuran yang semakin maju dan ketepatan pengukuran yang berkembang. Keandalan Sistem SI tidak hanya tergantung pada pengukuran baku yang presisi untuk satuan pokok yang didefinisikan dalam berbagai konstanta fisika alam tertentu, tetapi juga pada definisi yang presisi dari konstanta tersebut.

Kumpulan konstanta yang mendasarinya harus dimodifikasi ketika konstanta-konstanta yang lebih stabil ditemukan, atau mungkin telah diukur secara lebih tepat. Sebagai contoh, pada tahun 1983, meter ditetapkan ulang sebagai jarak tempuh cahaya dalam ruang hampa dalam waktu sepersekian detik, sehingga membuat nilai kecepatan cahaya yang berkenaan dengan satuan yang didefinisikan tersebut menjadi tepat.

Tabel 2.1 Satuan Sistem Internasional Dasar

Besaran	Satuan	Simbol	Besaran	Satuan	Simbol
Panjang	Meter	m	Potensial listrik	Volt	V
Massa	Kilogram	kg	Hambatan/tahanan	Ohm	Ω
Waktu	Detik	dt	Induktansi	Henry	H
Gaya	Newton	N	kapasitansi	Farad	F
Energy, usaha	Joule	J	Frekuensi	Hertz	Hz
Suhu	Kelvin	K	Daya	Watt	W
Kuat cahaya	Kandela	cd	Fluks	Weber	Wb
Muatan listrik	Coulomb	C	Arus listrik	Ampere	A

Awalan ditambahkan ke nama satuan untuk menghasilkan perkalian dan pembagian dari satuan awal. Semua perkalian adalah perpangkatan 10, dan dibagi ratusan atau di bawah perseratus adalah perpangkatan 1000. Contohnya, *kilo-* menandakan perkalian seribu dan *milli-* menandakan perkalian perseribu, maka 1000 milimeter = 1 meter dan 1000 meter = 1 kilometer. Sistem Internasional itu ditunjukkan pada tabel 2.1. Awalan ini tidak pernah digabung, maka sepersepuluh meter disebut *mikrometer*, bukan milimilimeter. Perkalian kilogram dinamai dengan gram sebagai satuan pokok, maka sepersepuluh kilogram adalah *miligram*, bukan mikrogram. Sistem Internasional menggunakan sistem desimal untuk menyatakan satuan-satuan

yang lebih besar atau lebih kecil dari satuan-satuan dasar, dan menggunakan awalan untuk menyatakan berbagai besaran pangkat 10. Daftar awalan beserta simbolnya dapat dilihat pada tabel 2.2.

2.2. Arus Listrik

Sebuah arus listrik atau listrik dinamis dapat didefinisikan sebagai laju aliran muatan listrik melewati suatu titik atau bagian. Arus listrik dikatakan ada ketika ada aliran berisi muatan listrik melalui suatu bagian. Muatan listrik dibawa oleh partikel bermuatan, sehingga arus listrik adalah aliran partikel muatan. Partikel yang bergerak disebut pembawa muatan, dan dalam konduktor yang berbeda mungkin jenis partikel yang berbeda.

Tabel 2.2 Awalan Satuan

Faktor	Awalan	Symbol	Faktor	Awalan	Symbol
10^{18}	exa	E	10^{-1}	desi	d
10^{15}	peta	P	10^{-2}	senti	c
10^{12}	tera	T	10^{-3}	mili	m
10^9	giga	G	10^{-6}	mikro	μ
10^6	mega	M	10^{-9}	nano	n
10^3	kilo	k	10^{-12}	piko	p
10^2	hekto	h	10^{-15}	femto	f
10	deka	da	10^{-18}	atto	a

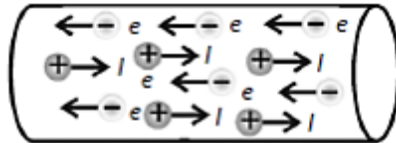
Pada rangkaian listrik disebutkan sebagai pembawa muatan atau elektron yang bergerak melalui kawat. Arus listrik didefinisikan juga sebagai laju aliran muatan listrik yang melalui sebuah luas penampang melintang A. Gambar 2.1 memperlihatkan segmen kawat pembawa arus di mana pembawa-pembawa muatan bergerak dengan kecepatan rata-rata kecil.

Jika Δq adalah muatan yang mengalir melalui luas penampang lintang A dalam waktu Δt , maka arus listrik yang

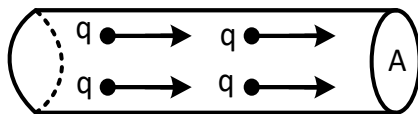
mengalir dapat didefinisikan sebagai:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.1)$$

Satuan SI untuk arus listrik adalah ampere (A).



Gambar 2.1 a. Arah Arus Listrik (i) dan Arah *Electron* (e) Berlawanan Arah



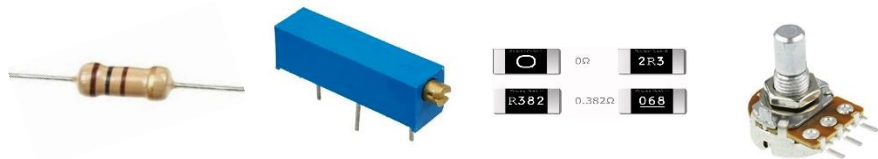
Gambar 2.1 b Potongan dari Sebuah Kawat Bermuatan Listrik

Sesuai definisi di atas maka arah arus dianggap searah dengan aliran muatan positif. Elektron-elektron bebas yang muatannya negatif adalah partikel-partikel yang sebenarnya bergerak dan mengakibatkan adanya arus pada kawat penghantar. Gerakan dari elektron-elektron yang bermuatan negatif dalam satu arah ekuivalen dengan aliran muatan positif yang arah gerakanya berlawanan. Dengan kata lain elektron-elektron akan bergerak dalam arah yang berlawanan dengan arah arus.

2.3. Tahanan

Resistor atau Tahanan merupakan salah satu komponen yang paling sering ditemukan dalam rangkaian elektronika. Hampir setiap peralatan elektronika menggunakannya. Pada dasarnya

Resistor adalah komponen elektronika pasif yang memiliki nilai resistansi atau hambatan tertentu yang berfungsi untuk membatasi dan mengatur arus listrik dalam suatu rangkaian elektronika. Resistor atau dalam bahasa Indonesia sering disebut dengan hambatan atau Tahanan dan biasanya disingkat dengan Huruf "R" dengan symbol seperti pada gambar 2.2 b. Satuan Hambatan atau Resistansi Resistor adalah OHM (Ω). Sebutan "OHM" ini diambil dari nama penemunya yaitu *George Simon Ohm* yang juga merupakan seorang fisikawan asal Jerman. Bahan yang mempunyai banyak elektron bebas disebut konduktor, sedangkan bahan yang mempunyai sedikit *electron* bebas disebut isolator. Konduktor memberikan tahanan/perlawanan yang rendah terhadap aliran arus listrik, dan isolator memberikan tahanan yang tinggi terhadap aliran arus. Dapat didefinisikan tahanan listrik adalah sebagai perlawanan yang diberikan oleh bahan terhadap aliran arus listrik. dalam bentuk fisik dari beberapa jenis hambatan adalah seperti pada gambar 2.2 a. dari kiri Resistor type karbon, Resistor geser type multitoned, SMD (*surface mould device*) resistor, dan yang paling kanan adalah resistor geser atau potensiometer.



Gambar 2.2 a. Bentuk Fisik Sebuah Tahanan



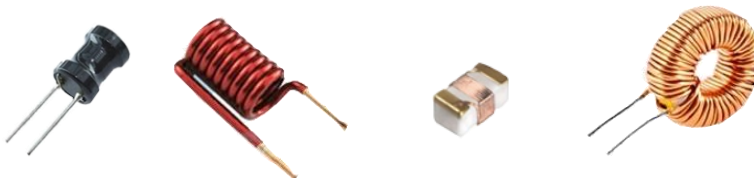
Gambar 2.2 b. Simbol Tahanan

2.4. Induktansi

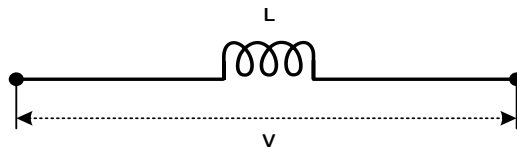
Induktansi adalah sifat dari rangkaian elektronika yang menyebabkan timbulnya potensial listrik secara proporsional terhadap arus yang mengalir pada rangkaian tersebut, sifat ini disebut sebagai induktansi sendiri, sedangkan apabila potensial listrik dalam suatu rangkaian ditimbulkan oleh perubahan arus dari rangkaian lain disebut sebagai induktansi bersama.

Definisi kuantitatif dari induktansi sendiri (simbol: L) adalah: $v = L \frac{di}{dt}$ dengan v adalah GGL yang ditimbulkan dalam volt dan i adalah arus listrik dalam ampere. Bentuk paling sederhana dari rumus tersebut terjadi ketika arus konstan sehingga tidak ada GGL yang dihasilkan atau ketika arus berubah secara konstan (linier) sehingga GGL yang dihasilkan konstan (tidak berubah-ubah). Istilah 'induktansi' sendiri pertama kali digunakan oleh *Oliver Heavside* pada Februari 1886. Sedang penggunaan simbol L ditujukan sebagai penghormatan kepada *Heinrich Lenz*, seorang fisikawan ternama. Satuan Internasional induktansi adalah *weber per ampere* atau dikenal pula sebagai henry (H), untuk menghormati Joseph Henry seorang peneliti yang berkontribusi besar terhadap ilmu tentang magnetisme. Besarnya $1H = 1 \text{ Wb/A}$.

$$v = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$



Gambar 2.3 a. Bentuk Fisik dari Induktor



Gambar 2.3 b. Simbol induktor

Supaya suatu rangkaian elektronika mempunyai nilai induktansi, sebuah komponen bernama *induktor* digunakan di dalam rangkaian tersebut, induktor umumnya berupa kumparan kabel/tembaga untuk memusatkan medan magnet dan memanfaatkan GGL yang dihasilkannya. Konstanta kesebandingan yang menghubungkan kedua besaran ini (tegangan dan perubahan arus) adalah dikenal sebagai induktansi, yang disimbolkan dengan L , dan bentuk gambarnya seperti gambar 1.3. Dengan demikian

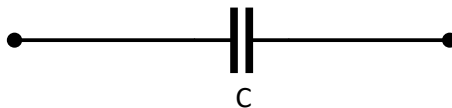
2.5. Kapasitor

Kapasitor atau sering disebut sebagai kondensator adalah suatu alat yang dapat menyimpan energi di dalam medan listrik, dengan cara mengumpulkan ketidakseimbangan internal dari muatan listrik. Kapasitor memiliki satuan dalam *system* SI adalah Farad (F) dari nama *Michael Faraday*. Kondensator juga dikenal sebagai “kapasitor”, tetapi kata “kondensator” masih dipakai hingga saat ini. Pertama disebut oleh *Alessandro Volta* seorang ilmuwan Italia pada tahun 1782 (dari bahasa Itali *condensatore*), berkenaan dengan kemampuan alat untuk menyimpan suatu muatan listrik yang tinggi dibanding komponen lainnya. Suatu kapasitansi terdiri dari dua buah lempengan penghantar (konduktor) yang permukaannya atau pelatnya dapat menampung muatan listrik, yang dipisahkan oleh sebuah lapisan bahan penyekat (isolator) yang memiliki harga tahanan sangat tinggi. Apabila diasumsikan bahwa tahanan ini dengan harga begitu besar sehingga mendekati tak hingga, maka

muatan-muatan listrik yang berlawanan namun sama besarnya di permukaan kedua pelat tidak akan pernah saling bertemu, karena tidak adanya jalur listrik yang menghubungkan muatan pada pelat yang lain. Konstruksi fisik perangkat suatu kapasitansi dapat diperlihatkan secara skematis oleh simbol rangkaian seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4 a. Bentuk fisik dari beberapa tipe kapasitor



Gambar 2.4 b. Simbol kapasitansi

2.6. Hukum Ohm

Hukum Ohm adalah suatu pernyataan bahwa besar arus listrik yang mengalir melalui sebuah penghantar selalu berbanding lurus dengan tegangan yang diterapkan kepadanya. Sebuah benda penghantar dikatakan mematuhi hukum Ohm apabila nilai resistansinya tidak bergantung terhadap besar dan polaritas beda potensial yang dikenakan kepadanya.

Secara matematis hukum Ohm diekspresikan dengan persamaan:

$$V = I \cdot R \dots\dots\dots (2.3)$$

Di mana:

I = adalah arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar dalam satuan Ampere.

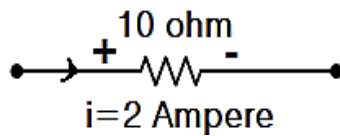
V = adalah tegangan listrik yang terdapat pada kedua ujung penghantar dalam satuan volt.

R = adalah nilai hambatan listrik (resistansi) yang terdapat pada suatu penghantar dalam satuan ohm

Satuan SI untuk tegangan adalah Volt (V).

Kasus 2.1

Tentukan besarnya tegangan pada sebuah penghantar yang dialiri arus 2A dengan besar nilai tahanan 10 Ω.



Gambar 2.5. Rangkaian Listrik dengan Beban Resistor

Penyelesaian

Jika arus yang mengalir pada penghantar 2A dengan harga tahanan 10 Ω, maka tegangan pada penghantar adalah:

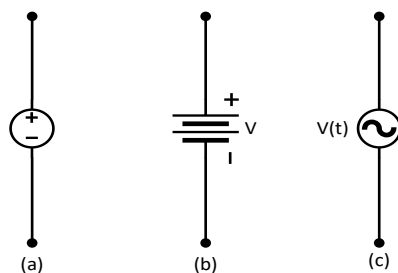
$$V = I \cdot R = 2 \cdot 10 = 20 \text{ V}$$

2.7. Sumber Tegangan dan Sumber Arus

Elemen aktif yang paling penting adalah sumber tegangan dan arus yang dapat menghantarkan daya pada rangkaian listrik yang tersambung. Dua sumber ini dapat dikategorikan menjadi 2

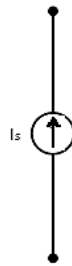
kelompok yaitu: sumber bebas (*independent source*) dan sumber tak bebas (*dependent source*).

Simbol rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 2.5. Subskrip s mengidentifikasi sebuah sumber tegangan (s merupakan singkatan dari *source* atau sumber). Gambar 2.5(a) dan (b) adalah sumber-sumber tegangan dengan tegangan terminal konstan yang sering diistilahkan sebagai sumber tegangan arus searah atau sumber tegangan *DC* (*direct current*) bebas. Penjelasan yang sama, sumber arus bebas adalah elemen aktif yang menghasilkan arus dengan nilai tertentu yang tidak terpengaruh oleh tegangan yang mengalir dalam rangkaian. Sumber arus bebas menghantarkan arus ke rangkaian tanpa memperhatikan nilai tegangan dalam rangkaian. Simbolnya diwakili dalam Gambar 2.6 di mana anak panah menunjukkan arah arus i mengalir. Pada gambar 2.6(b) ditampilkan garis lurus susun baterai di mana garis lurus yang lebih panjang ditempatkan pada terminal positif (tanda plus), sedangkan garis lurus yang lebih pendek ditempatkan pada terminal *negative* (tanda minus). Sedangkan pada gambar 2.6(c) adalah simbol dari sumber tegangan arus bolak-balik atau sumber tegangan *ac* (*alternating current*).



Gambar 2.6 Simbol Sumber Tegangan DC, (b) Simbol Baterai, (c) Simbol Sumber Tegangan AC

Arus yang melalui elemen sepenuhnya bebas atau tidak tergantung pada tegangannya. Simbol sumber arus I_s ini ditunjukkan seperti gambar 2.7.

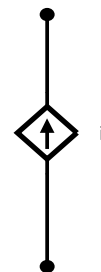


Gambar 2.7 Simbol untuk Sumber Arus

Sumber tegangan tak bebas (*dependent source/controlled source*) ideal adalah elemen aktif yang nilainya bergantung/dikontrol oleh tegangan atau arus lain. Simbolnya diwakili bentuk *diamond*/berlian pada Gambar 2.7 di mana gambar 2.7a adalah sumber tegangan tak bebas dan Gambar 2.7 b adalah sumber arus tak bebas.



(a)



(b)

Gambar 2.8 (a) Sumber Tegangan Tidak Bebas (b) Sumber Arus Tidak Bebas

2.8. Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Satuan SI daya listrik adalah watt (W) yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik). Arus listrik yang mengalir dalam rangkaian dengan hambatan listrik menimbulkan kerja. Peranti mengonversi kerja ini ke dalam berbagai bentuk yang dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti panas (seperti pada pemanas listrik), cahaya (seperti pada bola lampu), energi kinetik (motor listrik), dan suara (*loudspeaker*). Energi yang dikeluarkan atau kerja yang dilakukan setiap detik oleh tegangan 1 V pada hambatan 1 Ohm akan mengalir arus 1A dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

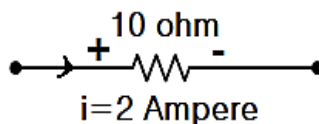
$$P = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.4)$$

atau

$$P = I \cdot V \dots\dots\dots (2.5)$$

Kasus 2.2

Hitung berapa besar daya yang di serap oleh kasus 2.1



Gambar 2.9 Rangkaian Listrik untuk Kasus 2.2

Penyelesaian

Jika arus yang mengalir pada penghantar 2A dengan harga tahanan 10 Ω , maka daya listrik pada penghantar adalah:

$$P = I \cdot V = 2 \cdot 20 = 40 \text{ W}$$

atau

$$P = I^2 \cdot R = 2^2 \cdot 10 = 40 \text{ W}$$

2.9. Energi Listrik

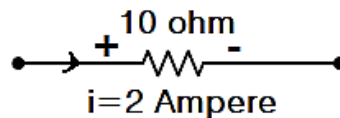
Energi listrik adalah energi utama yang dibutuhkan bagi peralatan listrik/energi yang tersimpan dalam arus listrik dengan satuan ampere (A) dan tegangan listrik dengan satuan volt (V) dengan satuan internasional konsumsi daya listrik adalah Watt (W). Secara matematika energi listrik dapat didefinisikan sebagai laju penggunaan daya listrik dikalikan dengan selama waktu tersebut dengan satuan Joule (J) atau Wattjam/Watthour (Wh).

Persamaannya adalah:

$$E = P \cdot t \quad (2.6)$$

Kasus 2.3

Hitung energi listrik dari contoh 2.2 dalam waktu 8 jam?



Gambar 2.10 Rangkaian Listrik untuk Kasus 2.3

Penyelesaian

Daya listrik dari contoh 2.2 adalah 40 W sehingga energi listrik dalam waktu 8 jam adalah:

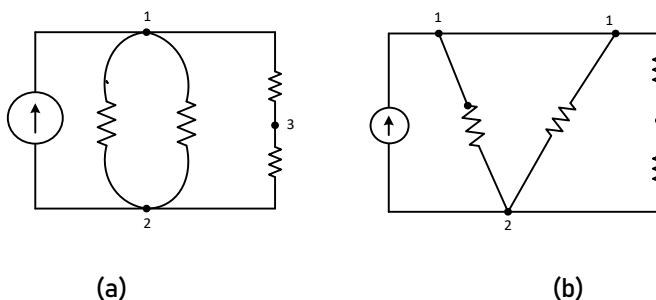
$$E = P \cdot t = 40 \cdot 8 = 320 \text{ Wh} = 0.32 \text{ kWh}$$

2.10. Simpul, Lintasan, *Loop*, dan Cabang

Simpul (*node*), perlu diketahui kata "*node*" jika diterjemahkan dalam bahasa Indonesia mempunyai arti simpul dan titik. Simpul berarti sesuatu yang menyambung cabang-cabang.

Pada analisis metode ini kita dapat mencari besarnya arus listrik dengan bantuan tegangan yang ada pada setiap simpul. Pada saat mencari nilai arus dengan analisis simpul, nilai tegangan simpul bisa berubah-ubah tergantung pada cara kita meletakkan simpul acuan (*ground*). Namun pada dasarnya arus yang masuk dan keluar dari simpul tegangan tetap sama. Secara spesifik simpul dapat diuraikan sebagai sebuah adalah sebuah titik di mana dua atau lebih elemen yang saling memiliki hubungan bersama. Sebagai contoh, gambar 2.11 (a) memperlihatkan sebuah rangkaian yang mengandung tiga buah simpul. Simpul 1 pada gambar 2.11 (a) diperlihatkan sebagai dua buah persimpangan terpisah yang dihubungkan oleh sebuah konduktor/penghantar dengan tahanan sama dengan nol, sebagaimana terlihat pada 2.11b). yang dilakukan di sini sesungguhnya adalah menyebarkan titik bersama menjadi garis bersama yang tahananannya nol.

Lintasan adalah kumpulan simpul dan cabang yang dilalui tidak lebih dari satu kali atau pergerakan dari suatu simpul melalui sebuah elemen yang menuju ke simpul lain dan seterusnya tanpa melalui elemen yang lebih dari satu kali. *Loop* disebut juga sebagai lintasan tertutup. adalah didefinisikan pergerakan dari lintasan awal menuju ke menuju balik atau kembali ke lintasan awal.



Gambar 2.11 (a) Rangkaian dengan Tiga Buah Simpul dan Lima Buah Cabang, (b) Penggambaran Pemekaran Simpul-Simpul

Cabang didefinisikan sebagai sebuah lintasan tunggal di dalam sebuah rangkaian yang terbentuk dari sebuah elemen dan simpul pada masing-masing ujung elemen.

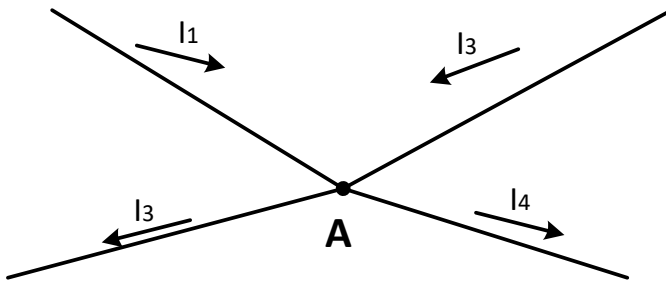
Sebagai contoh, pada gambar 2.7(a), jika bergerak dari simpul 2 menuju ke simpul 1 dengan melewati sumber arus, kemudian turun menuju simpul 2 dan melewati elemen tahanan sebelah kiri dan bergerak ke atas melewati tahanan tengah kembali menuju ke simpul 1, cara ini tidak membentuk lintasan, karena sebuah simpul (sebenarnya dua simpul) dijumpai sebanyak lebih dari satu kali. Istilah lain yang penggunaannya sangat sering dijumpai adalah *cabang*. Rangkaian ini diperlihatkan pada gambar 2.7(a) dan 2.7(b) yang memiliki lima buah cabang.

2.11. Hukum Arus Kirchhoff

Hukum Kirchhoff pertama kali diperkenalkan oleh seorang ahli fisika Jerman yang bernama *Gustav Robert Kirchhoff* (1824-1887) pada tahun 1845. Hukum Kirchhoff merupakan salah satu hukum dalam ilmu Elektronika yang berfungsi untuk menganalisis arus dan tegangan dalam rangkaian. Hukum Kirchhoff terdiri dari 2 bagian yaitu Hukum *Kirchhoff 1* dan Hukum *Kirchhoff 2*. Pada sesi ini akan diuraikan Hukum Kirchhoff 1 di mana Hukum *Kirchhoff 1* merupakan Hukum *Kirchhoff* yang berkaitan dengan arah arus dalam menghadapi titik percabangan. Hukum *Kirchhoff 1* ini sering disebut juga dengan Hukum Arus Kirchhoff (HAK) atau *Kirchhoff's Current Law* (KCL) menyatakan bahwa: *Jumlah aljabar dari arus-arus yang memasuki setiap simpul pada rangkaian adalah nol*. Perhatikan simpul pada gambar 2.8. Jumlah aljabar dari empat buah arus yang memasuki simpul harus sama dengan nol. Jadi:

$$-I_1 + I_2 + I_3 + (-I_4) = 0 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dari persamaan (2.7) jelas terlihat bahwa arus memasuki simpul titik (A) diberi tanda positif. Arus meninggalkan simpul (titik A) diberi tanda negatif.



Gambar 2.12 Contoh Simpul untuk Mengilustrasikan Penerapan Hukum Arus Kirchhoff

Pada persamaan (2.8) dapat menyamakan penjumlahan arus-arus yang memiliki tanda yang diarahkan untuk memasuki ke suatu simpul dengan menjumlah arus yang memiliki tanda panah yang meninggalkan simpul, sebagai berikut:

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dari persamaan (2.8) dapat dinyatakan bahwa jumlah arus yang memasuki suatu simpul adalah sama dengan jumlah arus yang keluar dari simpul.

Bentuk umum persamaan hukum arus Kirchhoff adalah:

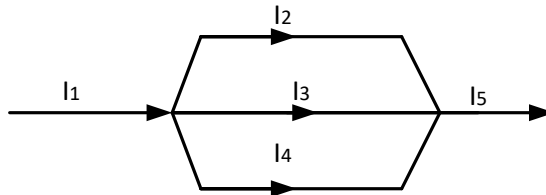
$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = 0 \dots\dots\dots (2.9)$$

Yang merupakan bentuk ringkasan dari:

$$\sum_{n=1}^N I_n = 0 \dots\dots\dots (2.10)$$

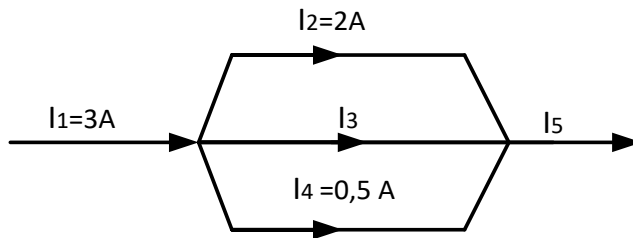
Kasus 2.4

Bila diketahui besar arus pada $I_2=2\text{ A}$, $I_1=3\text{A}$, $I_4=0,5\text{ A}$, Tentukan besarnya arus listrik yang mengalir melalui I_3 dan I_5



Gambar 2.13 Gambar Penerapan Hukum Arus Kirchhoff

Penyelesaian



Gambar 2.14 Gambar Penerapan Hukum Arus Kirchhoff

Sesuai Hukum Arus Kirchhoff, pada persamaan (2.10) yaitu $I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = 0$, maka dapat di jelaskan bahwa jumlah arus yang masuk percabangan adalah sama dengan jumlah arus yang keluar dari percabangan, arau dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^5 I_{\text{masuk}} = \sum_{n=1}^5 I_{\text{keluar}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Sehingga jumlah arus yang masuk adalah $I_1 = 3A$, maka arus yang keluar adalah $I_5 = 3A$ juga. Sehingga sama dengan

$$I_2 + I_3 + I_4 = I_5$$

$$2A + I_3 + 0.5A = 3A, I_3 = 3A - 2.5A$$

$$I_3 = 0.5A$$

Jadi Arus yang mengalir pada $I_3 = 0,5$ Ampere

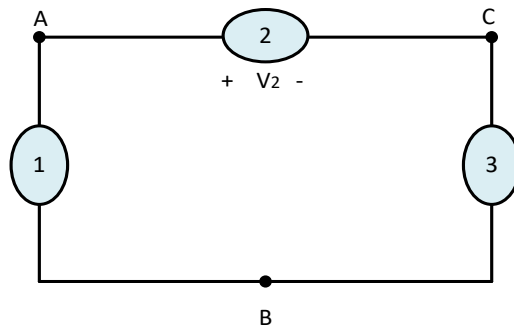
2.12. Hukum Tegangan Kirchhoff

Hukum Tegangan Kirchhoff atau disingkat HTK menyatakan bahwa: "*Jumlah aljabar dari tegangan dalam suatu lintasan tertutup pada suatu rangkaian adalah nol*". Perhatikan gambar 2.11. Dari gambar ini, dengan memilih lintasan dari simpul A ke simpul B melewati simpul C dan ke simpul A kembali. Lintasan ini didasarkan polaritas pada tegangan, didapat:

$$V_1 - V_2 + V_3 = 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

Atau

$$V_1 = V_2 - V_3 \dots\dots\dots (2.13)$$



Gambar 2.15 Beda Potensial antara Titik A dan B Tidak Tergantung pada Lintasan yang Dipilih

Bentuk umum persamaan hukum tegangan Kirchhoff adalah:

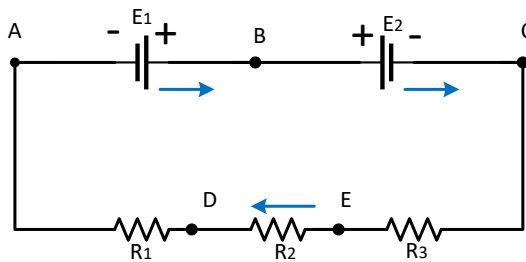
$$\sum_{n=1}^N V_n = 0 \dots\dots\dots (2.14)$$

Yang merupakan bentuk ringkasan dari:

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N = 0 \dots\dots\dots (2.15)$$

Kasus 2.5

Sebuah rangkaian di susun oleh sumber tegangan seperti pada Gambar 2.12 tentukan besar tegangan jepit pada titik BC. Bila diketahui, $E_1=12$ Volt, dan $E_2=0.5 E_1$ $R_1=1,5$ Ohm, $R_2=c$ Ohm, dan $R_3=1$ Ohm dengan tahanan dalam dari sumber adalah masing-masing 1 ohm.



Gambar 2.16 Rangkaian Penerapan Hukum Tegangan Kirchhoff

Penyelesaian

Rangkaian seperti pada soal bisa diselesaikan dengan Hukum Kirchhoff II karena di dalamnya memiliki dua sumber tegangan. Oleh karena itu, langkahnya harus menentukan model *loopnya* terlebih dahulu. Sehingga bisa menentukan arah *loopnya* searah atau berlawanan dengan arah putaran jarum jam.

Pada pembahasan ini selalu menggunakan arah *loop* yang searah putaran jarum jam sehingga sesuai persamaan 2.13 dan 2.14 didapat sebagai berikut:

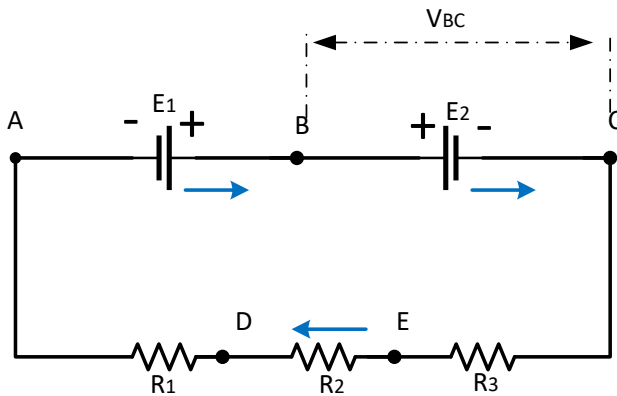
$$\sum_{n=1}^N I \cdot R = \sum_{n=1}^N V_n$$

$$I(r + r + R_1 + R_2 + R_3) = -E_1 + E_2$$

$$I(2 + 1,5 + 0,5 + 0,5) = -12 + E_2$$

$$I(4,5) = -12 + 6$$

$$I(4,5) = -6$$



Gambar 2.17 Rangkaian Listrik untuk Polaritas Tegangan

$$I(4,5) = -6$$

$$I = -1,33 \text{ Ampere}$$

Dengan diperolehnya besarnya arus pada E2 maka tegangannya adalah

$$V_{BC} = E_2 + r_2$$

$$V_{BC} = 6 + 1.33 \cdot 1 \rightarrow V_{BC} = 7.33 \text{ Volt.}$$

2.13. Alat Ukur Besaran Listrik

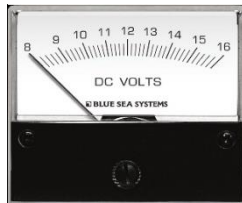
Untuk mengetahui besaran listrik dapat kita kelompokkan menjadi dua *type* yaitu pengukuran listrik statis dan pengukuran besaran listrik dinamis. Besaran listrik statis adalah besaran listrik yang didasarkan atas aliran muatan yang diam atau perpindahan arusnya terbatas. Sedangkan untuk listrik dinamis adalah besaran listrik yang didasarkan atas muatan yang bergerak atau dinamis, Berdasarkan cara pengukurannya dapat di bedakan dengan beberapa yaitu dengan menggunakan jarum dan menggunakan penampil digital. Berikut beberapa alat ukur yang lazim digunakan.

2.13.1. Voltmeter

Voltmeter merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengukur besaran tegangan listrik dalam suatu rangkaian listrik. Besaran listrik dapat berupa listrik tegangan searah DC (*direct current*) atau listrik bolak balik AC (*Alternating current*), jenis alat ukur ini memiliki dua jenis yaitu yang jenis analog dan jenis digital, masing-masing memiliki keunggulan dan kelebihan masing-masing. Alat ukur analog menggunakan jarum sebagai penunjuk dan menampilkan dengan skala dalam bentuk angka yang dibandingkan dengan jarum ukur, sedangkan untuk alat ukur digital penunjukan nilai pengukuran ditunjukkan dengan angka digital, yang memiliki presisi atau ketelitian masing-masing sesuai dengan jenis alat ukur tersebut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.18 Voltmeter (a) Analog AC, (b) Analog DC (c) Volt-Ampere Digital

Cara menggunakan alat ukur voltmeter adalah dengan cara menghubungkan secara berjarak atau paralel dengan benda yang akan diukur. Simbol dari alat ukur ini dilambangkan dengan huruf V yang berada di dalam sebuah lingkaran. Dan pada umumnya dilengkapi dengan jenis DC atau AC. Seperti berikut Gambar 2.19 (a)



(a)



(b)



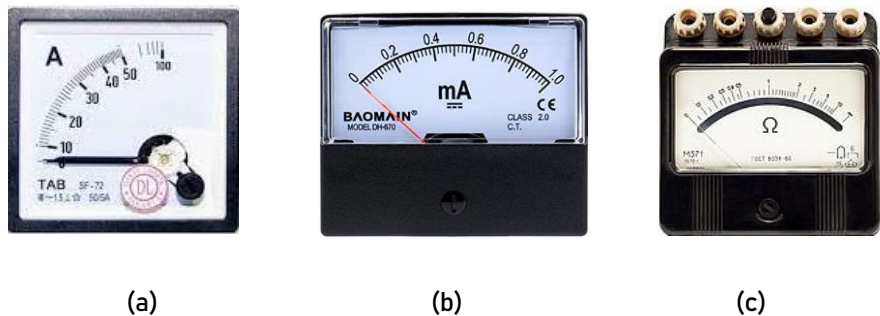
(c)

Gambar 2.19 (a) Voltmeter (b) Amperemeter (c) Ohmmeter

2.13.2. Amperemeter

Amperemeter merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengukur besaran arus listrik dalam suatu rangkaian listrik. Besaran listrik dapat berupa listrik arus searah DC (*Direct Current*) atau listrik bolak balik AC (*Alternating Current*), jenis alat ukur ini memiliki dua jenis yaitu yang jenis analog dan jenis digital, Alat ukur analog menggunakan jarum sebagai penunjuk dan penampilan dengan skala dalam bentuk angka yang dibandingkan

dengan jarum ukur, sedangkan untuk alat ukur digital penunjukan nilai pengukuran ditunjukkan dengan angka digital, yang memiliki presisi atau ketelitian masing-masing sesuai dengan jenis alat ukur tersebut. Pemakaian dari alat ukur ini dihubungkan secara seri dengan beban yang diukur. Dan simbolnya seperti pada gambar 2.19(b).

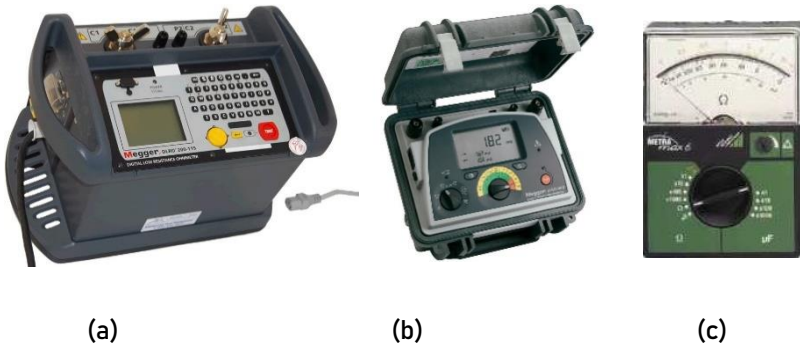


Gambar 2.20 Amperemeter (a) Analog AC, (b) Analog DC

2.13.3. Ohmmeter

Alat ukur ini dipergunakan untuk mengukur besarnya nilai impedansi dari sebuah penghantar dengan satuan ohm (Ω), Besaran ini bila dalam sebuah tahanan dapat dinyatakan dengan warna gelang-gelang dari sebuah resistor atau tahanan. Besaran ini menentukan besar kecilnya nilai arus atau tegangan yang ada pada tahanan tersebut. Bentuk simbol peralatan ini adalah seperti pada gambar 2.19 (c). dan gambar seperti pada gambar 2.20 (c), cara menggunakan peralatan ini adalah dipasangkan secara paralel sama dengan penggunaan voltmeter.

Berikut beberapa pengembangan dari alat ukur ohmmeter yang sudah ada seperti pada berikut:

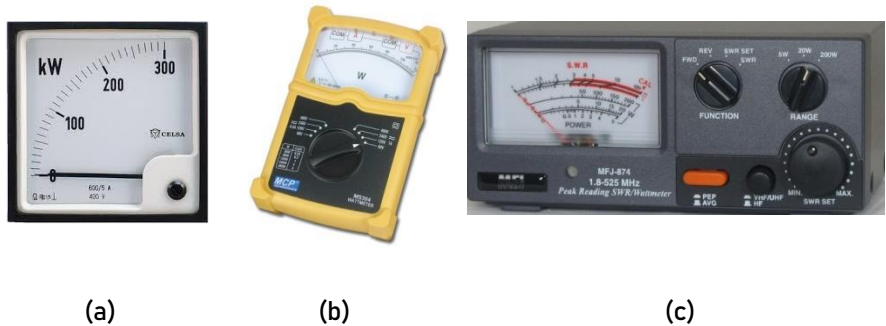


Gambar 2.21 Ohmmeter (a) Micro Ohmmeter Ducter Tester, (b) Merger DLR010D Low Resistance (c) Ohmmeter Analog.

2.13.4. Wattmeter

Wattmeter adalah instrumen pengukur daya listrik yang pembacaannya dalam satuan watt (W) Kilowatt (KW), Megawatt (MW) alat ini merupakan kombinasi alat ukur voltmeter dan amperemeter. Wattmeter pada dasarnya merupakan penggabungan dari dua alat ukur yaitu Amperemeter dan Voltmeter yang berfungsi untuk mengukur secara langsung daya yang terpakai pada suatu rangkaian listrik. Pada Wattmeter terdiri dari kumparan arus (kumparan tetap) dan kumparan tegangan (kumparan putar), sehingga pemasangannya juga sama yaitu kumparan arus dipasang seri dengan beban dan kumparan tegangan dipasang paralel dengan sumber tegangan. Wattmeter merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur daya listrik secara langsung. Wattmeter dapat digunakan untuk pengukuran pada arus searah maupun arus bolak balik. Untuk arus searah, maka daya yang dipakai dalam beban tahanan R dinyatakan sebagai $P=V I = I^2 R = V^2/R$ Dengan V adalah tegangan beban dan I

adalah arus beban Pada arus bolak balik, daya yang dipakai pada beban pada saat tegangan beban v dan arus beban i dinyatakan sebagai $p = v i$ dengan v dan i adalah tegangan dan arus sebagai fungsi waktu yang memenuhi persamaan sinusoida. Terdapat beberapa jenis Wattmeter yaitu analog dan digital. Berikut di sajikan beberapa alat ukur Wattmeter analog.



Gambar 2.22 Wattmeter (a) Wattmeter (KW), (b) Wattmeter dengan Skala (c) SWR Meter.

2.13.5. Frekuensimeter

Frekuensi dari sebuah besaran listrik adalah jumlah getaran yang terjadi dalam setiap detik, satuan dalam Sistem internasional adalah Herz. Sedangkan Frekuensimeter adalah perangkat yang berfungsi untuk mengetahui frekuensi suatu sinyal. Cara pemasangan sebuah frekuensimeter analog adalah dengan menghubungkan secara paralel pada bagian yang akan diukur, sedangkan untuk frekuensimeter digital penggunaannya sangatlah mudah yaitu hanya dengan mendekatkan *prob*-nya ke bagian tertentu sehingga pada layar akan tertampil besaran frekuensi yang kita amati. Berikut diberikan beberapa gambar frekuensimeter analog dengan mode getar gambar 2.21 (a) dan (b)

frekuensimeter analog dengan jam penunjuk, (c) radio SSB dengan dilengkapi dengan frekuensimeter digital.



Gambar 2.23 Frekuensimeter (a) Frekuensi Getar, (b) Frekuensimeter Jarum (c) Tampilan Frekuensi pada Radio SSB

2.13.6. Luxmeter

Luxmeter merupakan sebuah alat yang mampu mengetahui serta mengukur besaran dari intensitas cahaya yang berada di suatu tempat. Pengukuran intensitas cahaya sangat ditentukan oleh jarak pengukuran dari alat ukur dengan sumber cahaya yang diukur rata penerangan yang berbeda-beda akan menyebabkan nilai pengukuran yang berbeda-beda. Perlu diperhatikan jarak yang berkesesuaian. Untuk menggunakan peralatan ini hanya dengan mendekatkan dengan jarak yang ditentukan secara konstan maka pengukuran sudah dapat di baca pada alat penampil dari peralatan luxmeter.



(a)

(b)

Gambar 2.24 Luxmeter (a) Luxmeter Digital, (b) Lux Meter Analog

2.13.7. Cos-phimeter

Cos-phimeter atau di sebut juga dengan Power Faktor meter, adalah sebuah besaran alat ukur yang bertugas untuk mengetahui besar $\cos\phi$ dari sebuah besaran listrik. $\cos\phi$ sendiri adalah sebuah besaran yang menyatakan perbedaan sudut antara arus dengan tegangan, Alat ukur ini didesain dengan jenis digital atau dengan jenis analog. satuan dari alat ukur ini ditentukan oleh besar kapasitansi dan induktansi dari sebuah beban yang diukur, sehingga dapat dikatakan *lading* atau *leading* atau berbeban induktif kalau bernilai positif sedangkan berbeban kapasitif kalau bernilai *negative*. Berikut ditampilkan gambar alat ukur cos-phimeter gambar 2.25



(a)

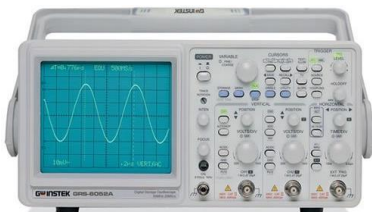
(b)

Gambar 2.25 Cos-Phimeter (a) Cos-Phi Digital yang Dilengkapi dengan Volt, Amperemeter Wattmeter Lengkap, (b) Cos-Phi Analog

2.13.8. Osciloskop

Osciloskop adalah peranti pengukuran yang dapat menampilkan secara visual bentuk dan dapat menganalisis sebuah rangkaian elektronik. Osciloskop penting bagi para teknisi, insinyur, peneliti atau para penghobi bidang elektronika dan keilmuan karena dengan osciloskop dapat mengetahui besaran-besaran listrik dari gejala-gejala fisis yang dihasilkan oleh sebuah elemen pasif maupun aktif. Para teknisi mekanik juga memerlukan alat ini untuk mengukur getaran/vibrasi pada sebuah mesin. Jadi dengan osciloskop dapat menampilkan sinyal-sinyal listrik yang berkaitan dengan waktu. Dan banyak sekali teknologi yang berhubungan dengan sinyal-sinyal tersebut. Secara umum osciloskop memiliki kegunaan sebagai berikut:

1. Mengukur besar tegangan listrik terhadap waktu.
2. Mengukur frekuensi sinyal yang terisolasi.
3. Mengetahui jalannya suatu sinyal pada sebuah rangkaian listrik.
4. Mengetahui arus AC dengan arus DC.
5. Mengetahui besarnya derau pada sebuah rangkaian listrik terhadap waktu



(a)



(b)

Gambar 2.26 Osciloskop (a) Osciloskop Analog, (b) Osciloskop Digital

Pada Dasawarsa ini terdapat dua tipe osiloskop, yakni tipe analog (ART-*analog real time oscilloscope*) dan tipe digital (DSO-*digital storage oscilloscope*), masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. Dua jenis tersebut adalah sebagai berikut:

1. Osciloskop Analog

Osciloskop tipe *Analog Real Time* (ART) menggambar bentuk-bentuk gelombang listrik dengan melalui gerakan pancaran elektron (*electron beam*) dalam sebuah tabung sinar katoda (CRT-*cathode ray tube*) dari kiri ke kanan.

2. Osciloskop Digital

Pada osciloskop digital konsepnya adalah sama hanya penampilannya di buat menjadi digital melalui proses sampling, dan *system* digitalisasi baik tombol dan layar digunakan secara digital seperti TFT atau layar sentuh. Berikut ditampilkan bentuk visual dari sebuah osciloskop seperti pada Gambar 2.25 Osciloskop (a) Osciloskop analog, (b) Osciloskop digital.

Ringkasan

Pengukuran besaran listrik sangat menentukan besar kecilnya aliran muatan dalam sebuah elemen rangkaian oleh karena itu di pandang perlu untuk mengukur dan disesuaikan dengan alat ukur yang akan digunakan. Selain mengetahui besaran listrik pada bab ini menguraikan secara umum komponen-komponen listrik yang akan digunakan pada bab-bab selanjutnya, seperti tahanan, kapasitor, induktor hukum-hukum sederhana dari hukum arus Kirchhoff, tangan simpul sebagai media untuk mengingat Kembali yang akan digunakan dalam bab-bab berikutnya. Selain elemen tersebut juga diperkenalkan secara umum alat ukur yaitu seperti ampere meter, Voltmeter, Ohmmeter frekuensimeter, cos-phimeter, beserta penggunaannya.

Latihan-Latihan

1. Jelaskan apa fungsi komponen berikut dalam sebuah rangkaian listrik
 - a. Resistor
 - b. Capacitor
 - c. Induktor
2. Jelaskan fungsi dan cara kerja dari alat ukur berikut:
 - a. Voltmeter
 - b. Amperemeter
 - c. Ohmmeter
 - d. Wattmeter
3. Pengukuran tahanan isolasi dengan voltmeter, jika tahanan dalam voltmeter 50.000, tegangan sumber $E = 220$ volt dan besarnya tegangan $I_{rv} = e = 5$ volt. Tentukan besarnya tahanan isolasi?
4. Hasil pengukuran daya menunjukkan jarum penunjuk 40, batas ukur tegangan 240 volt dan arusnya 2 ampere. Batas skala alat ukur 150. Berapa besar daya hasil pengukuran?
5. Jelaskan tentang hukum Kirchoff tegangan dan arus.

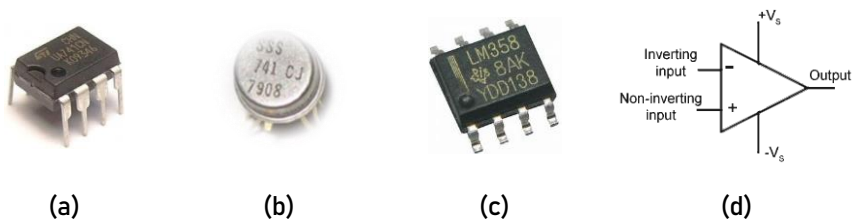
BAB 3

PENGUAT *OPERATIONAL* *AMPLIFIER*

3.1. Dasar *Operational Amplifier*

Operational Amplifier atau lebih dikenal dengan istilah Op-Amp adalah salah satu dari bentuk IC linear yang berfungsi sebagai penguat sinyal listrik. Dalam bahasa Indonesia, Op-Amp atau *Operational Amplifier* sering disebut juga dengan Penguat Operasional. Sebuah Op-Amp terdiri dari beberapa Transistor, Dioda, Resistor dan Kapasitor dan terintegrasi dalam satu rangkaian sehingga memungkinkannya untuk menghasilkan Gain (penguatan) yang tinggi pada rentang frekuensi yang luas.

Bentuk kemasan dari sebuah Op-Amp adalah beberapa jenis tergantung dari pabrik yang memproduksinya ada berbentuk kotak persegi panjang atau bulat, dan saat ini sudah dibuat dalam bentuk SMD berikut gambar Op-Amp. Gambar 3.1 menunjukkan bentuk fisik dari sebuah Op-Amp dan simbol dari Op-Amp.



Gambar 3.1 Bentuk Sebuah Op-Amp (a) Op-Amp Tipe Linier *Type 741*, (b) Kemasan Bulat, (c) Tipe Op-Amp Jenis SMD, d(d) Symbol Sebuah Op-Amp.

Op-Amp terdiri dari tiga buah terminal utama yaitu terminal *inverting*, terminal *non-inverting* dan terminal keluaran, karena Op-Amp adalah komponen aktif maka Op-Amp tersebut dicatu oleh tegangan yang diterapkan pada kaki atau in +Vcc dan -V perhatikan pada gambar 3.1 (d) namun dalam semua gambar dalam bab ini sumber tegangan tidak akan digambarkan lagi.

Pada bab ini akan dibahas tentang teori yang mendasar dan juga sebagian untuk terapan suatu rangkaian. Pembahasan dilengkapi dengan latihan soal dan disimulasikan dengan model Simulink dari MATLAB pada kasus-kasus dan soal-soal tersebut yang harus dikerjakan untuk mencapai target tujuan dari mata kuliah ini.

3.2. Karakteristik Op-Amp

Karakteristik faktor penguat atau *gain* pada Op-Amp pada umumnya ditentukan oleh Resistor eksternal yang terhubung di antara *output* dan input pembalik (*Inverting Input*). Konfigurasi dengan umpan balik negatif (*Negative Feedback*) ini biasanya disebut dengan *Closed-Loop configuration* atau Konfigurasi *loop* tertutup. Umpan balik negatif ini akan menyebabkan penguatan atau *gain* menjadi berkurang dan menghasilkan penguatan yang dapat diukur serta dapat dikendalikan. Tujuan pengurangan Gain dari Op-Amp ini adalah untuk menghindari terjadinya derau yang berlebihan dan juga untuk menghindari respons yang tidak diinginkan. Sedangkan pada Konfigurasi *loop* terbuka atau *Open-Loop Configuration*, besar penguatannya adalah tak terhingga (∞) sehingga besarnya tegangan *output* hampir atau mendekati tegangan Vcc.

3.3. Op-Amp Inverting

Untuk mengetahui rangkaian dasar penguat operasional atau Op-Amp Inverting seperti pada gambar 3.2, yang terdiri dari

sebuah Op-Amp dengan tahanan masukan (input) dan dengan tahanan umpan balik (R_f) dan dengan *output*. Pada sisi masukan diberikan sinyal positif maka akan terjadi keluaran berupa sinyal kebalikannya. Jadi ada tanda minus pada rumus penguatannya. Penguatan *inverting amplifier* adalah bisa lebih kecil nilai besaran dari 1, misalnya -0.2, -0.5, -0.7, dst, dan selalu negatif.

Lebih jelas perhatikan langkah-langkah dari rangkaian berikut. Dalam menganalisis sebuah rangkaian Op-Amp ada beberapa hal yang perlu di perhatikan yaitu: Op-Amp dianggap ideal perhatikan syarat-syarat ideal dari sebuah Op-Amp.

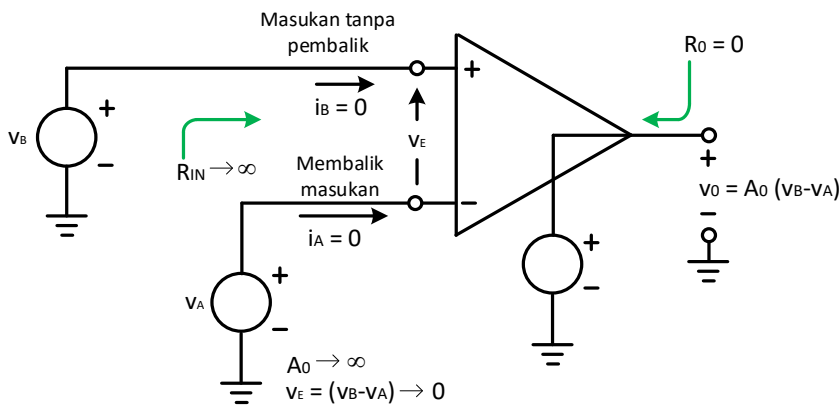
Op-Amp ideal adalah penguat *de-coupled* (perhatikan gambar 3.1) dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Penguatan A_0 dari input ke *output* (disebut sebagai gain *loop* terbuka) yang memiliki nilai tidak terbatas. Dengan kata lain, karena sinyal keluaran tak terbatas sinyal input ke Op-Amp (v_E) harus mendekati nol.
2. Resistansi masukan R_{IN} penguat sangat besar, sedangkan resistansi keluaran R_0 adalah nol.
3. Penguatan bukanlah fungsi frekuensi; yakni, tidak ada kutub atau nol dalam ekspresi penguatan input ke *output*. Bandwidth sangat besar.
4. Penguat tidak menarik arus pada *input*. Sebaliknya, *output* penguat dapat melewati sumber arus besar tak terhingga ke beban.
5. Penolakan mode umum dan penolakan catu daya sangat besar. Pernyataan ini menyiratkan bahwa penguat tidak memiliki perubahan keluaran karena perubahan catu daya dan bahwa Op-Amp hanya memperkuat sinyal diferensial yang muncul di antara dua masukan, dan tidak memiliki penguatan ke sinyal yang umum untuk kedua masukan. Definisi yang lebih praktis dari mode umum untuk Op-Amp akan diberikan dengan beberapa kasus.

Meskipun persyaratan di atas untuk Op-Amp yang ideal tampaknya tidak mungkin tercapai, pada buku ini akan diuraikan kasus-kasus Op-Amp ideal yang sangat mendekati banyak spesifikasi yang disyaratkan.

Simbol untuk Op-Amp ideal ditunjukkan pada gambar 3.1 di mana sinyal masukan diterapkan sebagai v_A dan v_B dan sinyal keluaran adalah tegangan.

$$v_0 = A_0(v_B - v_A)^* \dots\dots\dots (3.1)$$



Gambar 3.2 Op-Amp yang Ideal

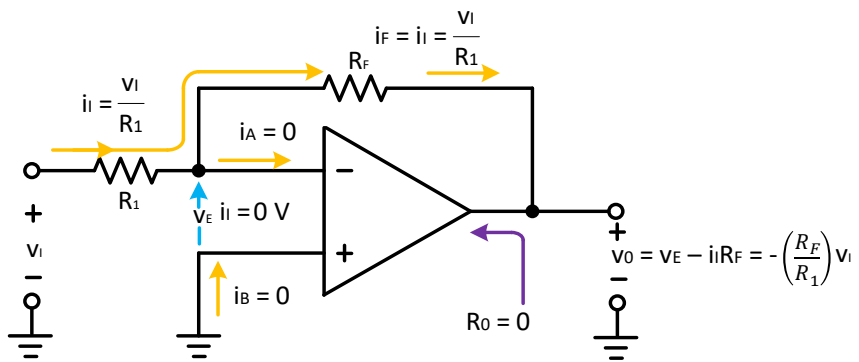
Karena A_0 tidak terbatas, persamaan (1.1) di atas akan menyatakan bahwa tegangan keluaran juga tidak terbatas. Namun, dua fundamental penting membatasi keluaran: (a) Rangkaian Op-Amp linear harus selalu digunakan dengan umpan balik *negative*, dan (b) karena *gain* A_0 sangat besar, maka sinyal kesalahan input ($v_E = v_B - v_A$) harus mendekati nol.

Sinyal pada *input non-inverting* selalu berusaha untuk mencapai nilai yang sama seperti sinyal pada *input* (karena umpan balik). Jadi, jika sinyal v_A dari gambar 3.1 berada di ground (0 volt)

maka v_B akan mencapai potensial ground; jika, v_A adalah + 5 V kemudian v_B maka pada dasarnya akan menjadi at +5 V demikian sinyal yang masuk sama bentuknya dengan penguatan yang berbeda sinyal yang di keluarkan.

Rangkaian penguat pembalik (*inverting*) standar ditunjukkan pada gambar 3.1 sinyal input v_I diberikan ke R_1 , dan umpan balik negatif disediakan oleh resistor R_F . Kita asumsikan bahwa: Op-Amp yang ideal, sinyal error v_E harus nol. Juga, karena arus masukan yang ditarik oleh Op-Amp adalah nol ($i_A = 0$), arus masukan i_1 semuanya harus mengalir melalui resistor umpan balik R_F menuju keluaran penguat. Karena terminal input *non-inverting* berada di *ground*, maka input terminal *inverting* v_A juga di *ground*, jadi:

$$i_1 = \frac{v_I - v_E}{R_1} = \frac{v_I - 0}{R_1} = \frac{v_I}{R_1}$$



Gambar 3.3 Rangkaian Op-Amp Pembalik Ideal

Dan karena $i_1 = i_F$, maka dapat di tulis persamaan tegangan di sekitar *loop* dari *output* melalui R_F ke input ke ground.

$$v_0 = -i_1 R_F + v_E = -i_1 R_F$$

Atau

$$v_0 = - \left[\frac{R_F}{R_1} \right] v_I$$

Jadi, *gain loop* tertutup adalah

$$\left(\frac{v_0}{v_I} \right) = - \left(\frac{R_F}{R_1} \right)$$

Untuk rangkaian gambar 3.3 resistansi keluaran *loop* tertutup dapat diperoleh dengan melakukan *grounding* resistor masukan R_1 (korsleting v_I ke ground), menerapkan sumber tegangan ke keluaran, dan menghitung arus yang disediakan oleh sumber tegangan. Karena resistansi keluaran *loop* terbuka R_0 adalah nol, resistansi keluaran *loop* tertutup jelas harus nol. Satu-satunya pengecualian adalah jika umpan balik seperti memaksa arus yang berlawanan kembali ke sumber tegangan keluaran. Namun, ini tidak mungkin untuk rangkaian umpan balik negatif (perhatikan gambar 3.3.)

3.3.1. Kasus 3.1 Simulasi Op-Amp *Inverting*

Jika kita memiliki sebuah rangkaian seperti pada Gambar 3.3 Dapatkan impedansi masukan *loop* tertutup yang ditentukan oleh $r_{in} = v_I/i_I$.

Penyelesaian

Karena ada *virtual short (virtual ground)* pada input, resistansi input r_{in} yang dilihat oleh sumber sinyal v_I adalah:

$$r_{in} = \frac{v_I}{i_I} = \frac{v_I}{\left(\frac{v_I - v_E}{R_1} \right)}$$

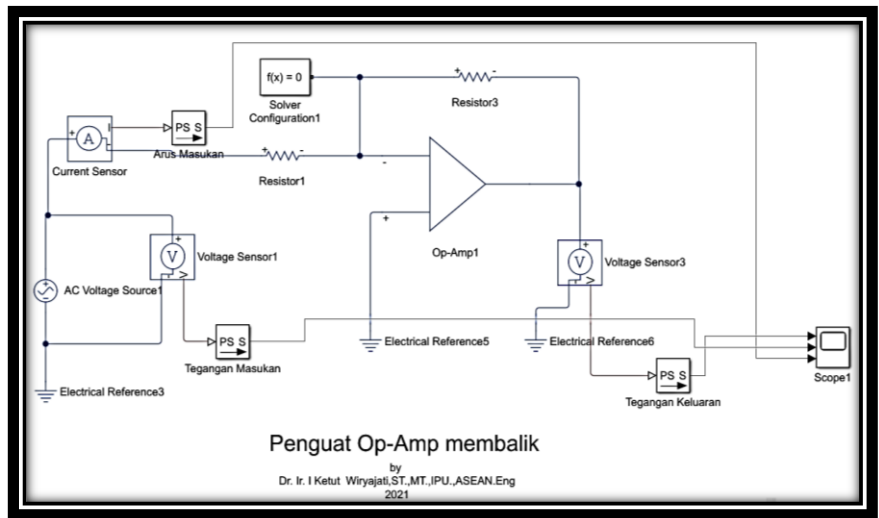
atau

$$r_{in} = \frac{R_1}{1-0} = R_1$$

Singkatnya, karakteristik penguat pembalik (dengan asumsi Op-Amp ideal) adalah:

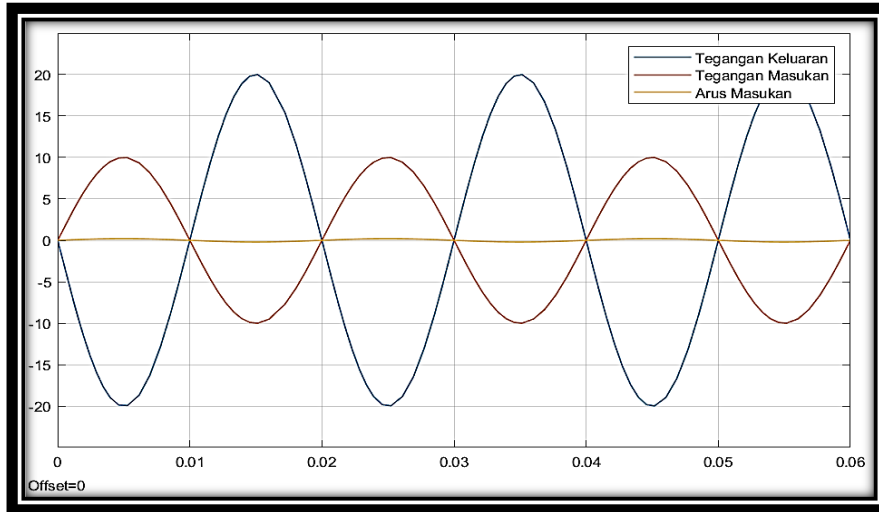
$$\left| \begin{array}{l} Gain = \frac{v_0}{v_I} = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right) \\ Resistansi\ input = R_1 \\ Resistansi\ output = 0 \end{array} \right| \dots\dots\dots (3.2)$$

SIMULINK Kasus 3.1



Gambar 3.4 Simulink Kasus 3.1 Op-Amp *inverting*

Hasil Simulasi

Gambar 3.5 Bentuk Keluaran dari Simulink Kasus 3.1 Op-Amp *inverting*

Perhatikan gambar keluaran antara sinyal masukan dan keluaran berbalik sebesar 180 derajat. Artinya tanda *negative* dalam persamaan menyebabkan sinyal terbalik. sedangkan besar dari sinyal keluaran dipengaruhi oleh besarnya nilai dari tahanan *feedback*.

3.4. Op-Amp Non-inverting

Rangkaian penguat tidak membalik (*non-inverting*) dasar ditunjukkan pada gambar 3.6. Sinyal input diterapkan ke input nonpembalikan dan sinyal umpan balik dihubungkan melalui R_F dan R_1 kembali ke input pembalik.

Karena Op-Amp yang ideal memiliki arus masukan nol dan resistansi masukan tak terhingga R_{IN} , maka dapat ditentukan sebagai berikut.

$$r_{in} = \frac{v_I}{i_I} = \frac{v_I}{0} = \infty$$

Karena sinyal kesalahan harus mendekati nol

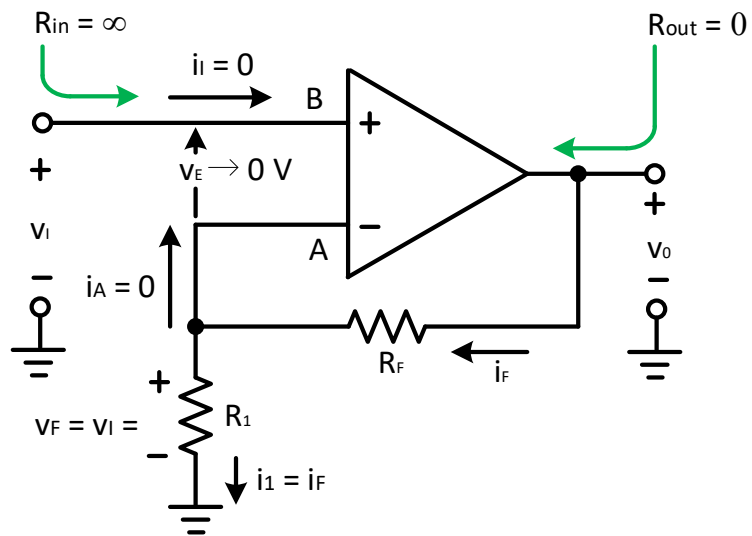
$$v_I = v_E + v_F = 0 + v_F = v_F$$

Karena tidak ada arus yang mengalir ke *input* pembalik, maka

$$i_1 = i_F = \frac{v_F}{R_1}$$

dan oleh karena itu tegangan keluaran v_0 , adalah:

$$v_0 = i_F(R_F + R_1) = \left(\frac{R_F + R_1}{R_1}\right)v_F$$



Gambar 3.6 Penguat *Amplifier Non-Inverting* Ideal

Penguatannya adalah:

$$\frac{v_0}{v_F} = \frac{R_F + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

Sama seperti penguat pembalik, resistansi keluaran harus nol. Jadi, penguat *non-inverting* yang ideal dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\left| \begin{array}{l} \text{Penguat} = \frac{v_0}{v_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \\ \text{Resistansi input} = \infty \\ \text{Resistansi output} = 0 \end{array} \right| \dots\dots\dots (3.3)$$

3.4.1. Kasus 3.2 Simulasi Op-Amp *Non-inverting*

Tunjukan bahwa penguat *non-inverting* menjadi penguat satuan penyangga (*buffer*) jika $R_F = 0$. Rangkaian ditunjukkan pada gambar 3.6.

Penyelesaian

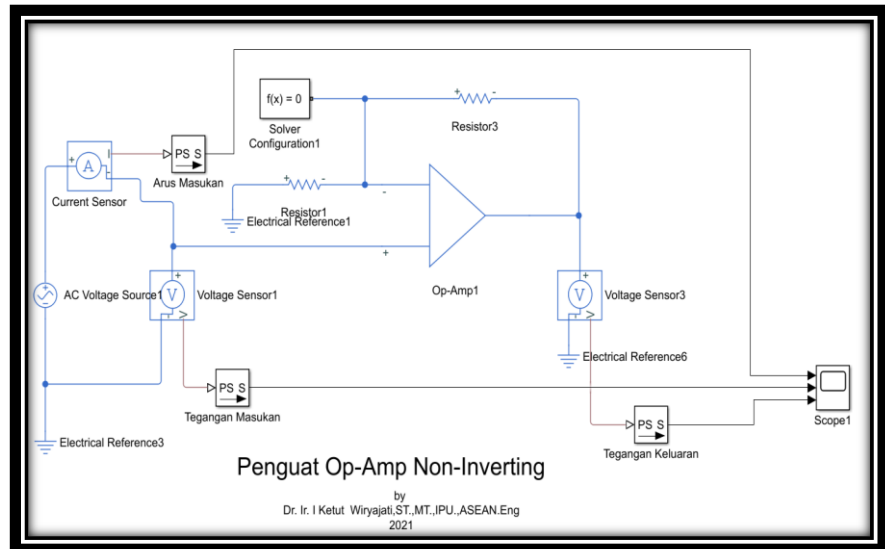
Dari persamaan (3.3), jika $R_F \rightarrow 0$ Penguatan menjadi

$$\frac{v_0}{v_1} = 1 + \frac{0}{R_1} = 1$$

Konsep penguat buffer memang sesuai karena sinyal v_I dimuat oleh impedansi input Op-Amp yang sangat besar dan kemudian di transfer ke impedansi *output* oleh $v_0 = v_I$.

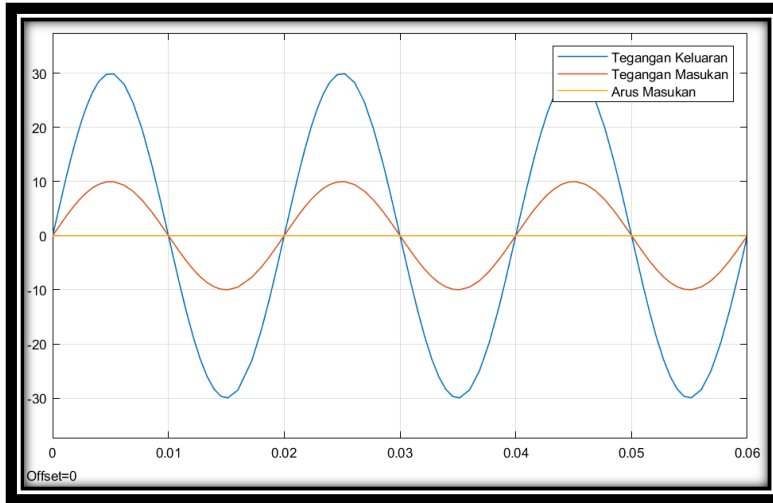
Perhatikan gambar keluaran antara sinyal masukan dan keluaran se-fasa atau sebesar 0 derajat. Artinya tidak ada perubahan tanda atau tidak ada perubahan dalam persamaan hal ini dapat menyebabkan sinyal tetap atau tidak terbalik. Sedangkan besar dari sinyal keluaran dipengaruhi oleh besarnya nilai dari tahanan *feedback*. Bila ingin mendapatkan keluaran yang lebih besar, dengan mengatur nilai dari R_f , akan tetapi agar keluaran tetap sama dengan sinyal masukan maka faktor pengalinya diupayakan menjadikan satu yaitu besar R_i dan R_f dibuat sama yaitu $R_i = R_f$ atau seperti pada rangkaian gambar 3.9 berikut. Rangkaian ini dapat juga disebut sebagai rangkaian penyangga (*Buffer*).

SIMULINK Kasus 3.2

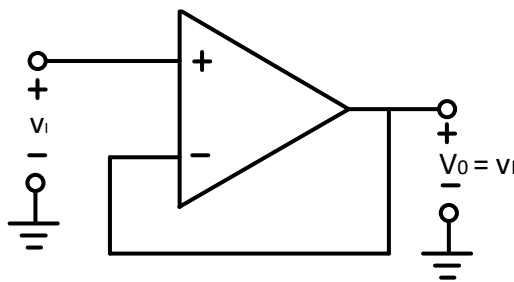
Gambar 3.7 Simulink Kasus 3.1 Op-Amp *Non-inverting*

Perhatikan gambar keluaran antara sinyal masukan dan keluaran se-fasa atau sebesar 0 derajat. Artinya tidak ada perubahan tanda atau tidak ada perubahan dalam persamaan hal ini dapat menyebabkan sinyal tetap atau tidak terbalik. Sedangkan besar dari sinyal keluaran dipengaruhi oleh besarnya nilai dari tahanan *feedback*. Bila ingin mendapatkan keluaran yang lebih besar, dengan mengatur nilai dari R_f , akan tetapi agar keluaran tetap sama dengan sinyal masukan maka faktor pengalinya diupayakan menjadikan satu yaitu besar R_i dan R_f dibuat sama yaitu $R_i = R_f$ atau seperti pada rangkaian gambar 3.7 berikut. Rangkaian ini dapat juga disebut sebagai rangkaian penyangga (*Buffer*).

Hasil Simulasi



Gambar 3.8 Bentuk Keluaran dari Simulink Kasus 3.1 Op-Amp *Non-inverting*



Gambar 3.9 Rangkaian Op-Amp dengan penguatan 1 (*Unity*)

3.5. Op-Amp Penjumlah

Rangkaian penjumlah atau rangkaian *adder* adalah rangkaian penjumlah yang dasar rangkaiannya adalah rangkaian *inverting amplifier* dan hasil *output*-nya adalah dikalikan dengan

penguatan seperti pada rangkaian *inverting*. Pada dasarnya nilai *output*-nya adalah jumlah dari penguatan masing-masing dari *inverting*, seperti:

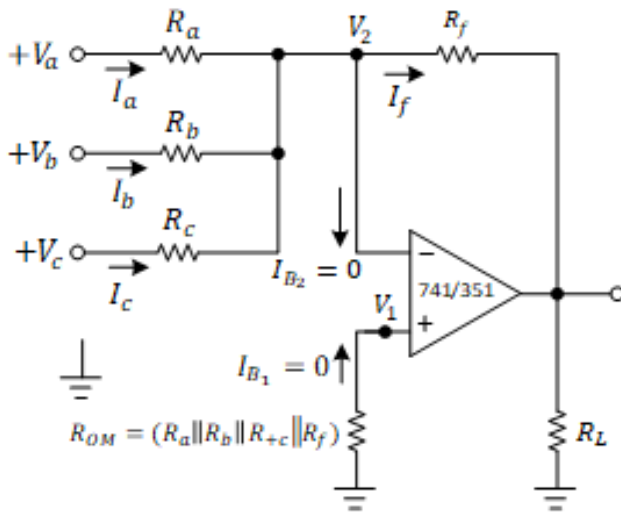
$$V_{Oa} = -\frac{R_f}{R_a} V_a \quad V_{Ob} = -\frac{R_f}{R_b} V_b \quad V_{Oc} = -\frac{R_f}{R_c} V_c$$

$$V_{Ot} = -R_f \left(\frac{1}{R_a} V_a + \frac{1}{R_b} V_b + \frac{1}{R_c} V_c \right)$$

Bila $R_f = R_a = R_b = R_c$, maka persamaan mejadi

$$V_o = -(V_a + V_b + V_c) \dots\dots\dots(3.4)$$

Tahanan Rom gunanya adalah untuk meletak titik nol supaya tepat, terkadang tanpa Rom sudah cukup stabil. Maka rangkaian ada yang tanpa Rom juga baik hasilnya. Rangkaian penjumlah dengan menggunakan *non-inverting* sangat suah dilakukan karena tegangan yang diparalel akan menjadi tegangan terkecil yang ada., sehingga susah terjadi proses penjumlahan.



Gambar3.10 Rangkaian Op-Amp Penjumlah

3.5.1. Kasus 3.3 Simulasi Op-Amp Penjumlah

Bila kita memiliki rangkaian seperti pada gambar 3.10 memiliki besar Tahanan $R_f = R_a = R_b = R_c = 100\text{ K}$, tegangan masukan berupa sinyal sinusoidal, tentukan besar tegangan keluaran bila tegangan masukan dengan nilai 0.1 volt.

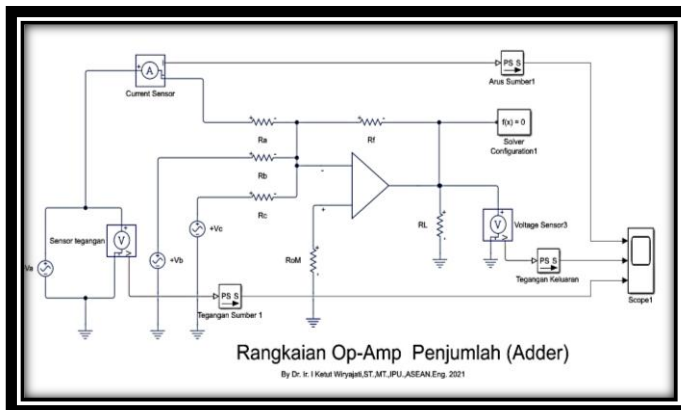
Penyelesaian

$$V_{Oa} = -\frac{R_f}{R_a} V_a = -\frac{100}{100} 0.1, V_{Ob} = -\frac{R_f}{R_b} V_b = -\frac{100}{100} 0.1, V_{Oc} = -\frac{R_f}{R_c} V_c = -\frac{100}{100} 0.1$$

$$V_{ot} = -R_f \left(\frac{1}{R_a} V_a + \frac{1}{R_b} V_b + \frac{1}{R_c} V_c \right) = -100 \left(\frac{1}{100} 0.1 + \frac{1}{100} 0.1 + \frac{1}{100} 0.1 \right) = 0.3\text{ Volt}$$

Dengan menggunakan persamaan 3.4 maka didapatkan hasil sebagai jumlah tegangan input adalah 0.3 Volt, yaitu penjumlahan dari $0,1V+0,1V+0,1\text{ Volt} = 0.3\text{ Volt}$

SIMULASI Kasus 3.3

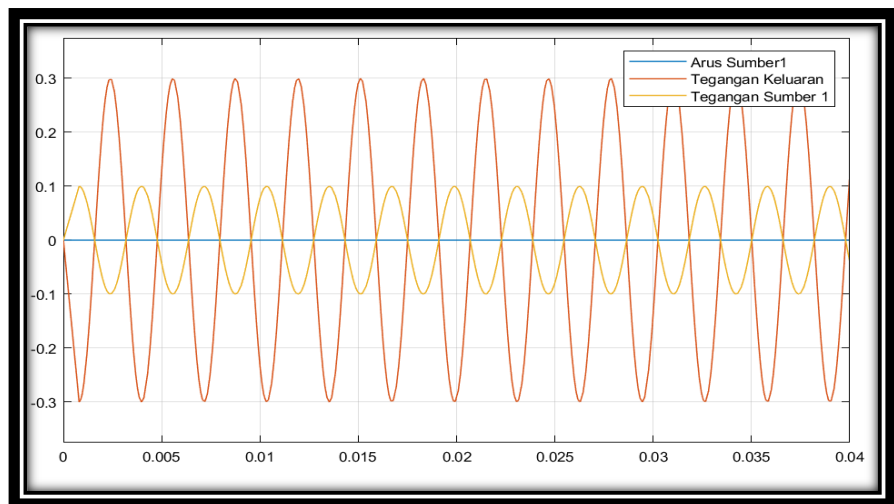


Gambar 3.11 Rangkaian Op-Amp Penjumlah dengan Simulink

Hasil Simulasi

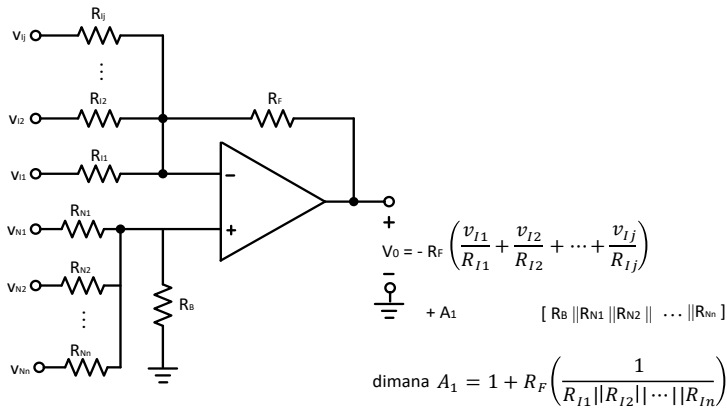
Pada gambar 3.12 perhatikan bentuk gelombangnya adalah berbalik antara sinyal masukan dengan hasil keluaran dari Op-Amp, hal ini karena menggunakan rangkaian Op-Amp *inverting* atau membalik. Perhatikan tanda (-) minus pada persamaan 3.4. artinya setiap bentuk keluaran akan di geser sebesar 180 derajat dan menjumlahkan seluruh masukan sesuai jumlah yang ada. Perhatikan gambar hasil simulasi gambar 3.10 sinyal masukan memiliki amplitude sebesar 0.1 volt dengan frekuensi $2\pi \cdot 50$ hz, sedangkan keluarannya adalah memiliki amplitude tiga kali lipat dari sinyal masukan. Sedangkan frekuensinya tetap sama dengan sinyal masukan, dan perhatikan beda fasa antara sinyal masukan dan sinyal keluaran mengalami pergeseran fasa sebesar 180 derajat atau dilakukan pembalikan oleh Op-Amp.

Hasil Simulasi



Gambar 3.12 Hasil Penjumlahan dengan Simulink

Rangkaian Penjumlah lebih banyak dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3.13 Rangkaian Op-Amp Penjumlahan yang Lebih Umum

Perhatikan aliran arus Arus mengalir menuju Op-Amp pada gambar 3.13 dapat di tulis sebagai berikut:

$$i_F = i_1 + i_2 + \dots + i_j$$

atau

$$i_F = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_j}{R_j}$$

Karena

$$v_0 = -R_F \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \dots + \frac{v_j}{R_j} \right) \dots \dots \dots (3.14)$$

Rangkaian penguat penjumlah pembalik dapat dikombinasikan dengan sinyal-sinyal yang dijumlahkan pada masukan non-pembalik untuk menghasilkan rangkaian penjumlahan yang lebih umum, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13. Di sini, dapat diperlihatkan bahwa persamaan umum

untuk v_0 .

$$v_0 = -R_F \left(\frac{v_{I1}}{R_{I1}} + \frac{v_{I2}}{R_{I2}} + \dots + \frac{v_{Ij}}{R_{Ij}} \right) + A_1 \sum_{i=1}^n \frac{v_{Ni}}{R_{Ni}} (R_B || R_{N1} || R_{N2} || \dots || R_{Nn}) \dots \dots \dots (3.15)$$

dengan

$$A_1 = 1 + R_F \left(\frac{1}{R_{I1} || R_{I2} || \dots || R_{In}} \right) \dots \dots \dots (3.16)$$

Berikut di berikan sebuah rangkaian yang menggunakan lebih dari sebuah impedansi pada rangkaian masukan seperti pada gambar 3.14. Penguat pembalik tidak harus dibentuk dengan menggunakan jaringan satu terminal bahkan dapat memiliki lebih dari dua terminal. Misalnya, rangkaian yang ditunjukkan pada gambar 3.14. memiliki hubungan penguatan umum.

$$\frac{V_0}{V_I} = - \frac{Z_{FSC}}{Z_{1sc}} \dots \dots \dots (3.17)$$

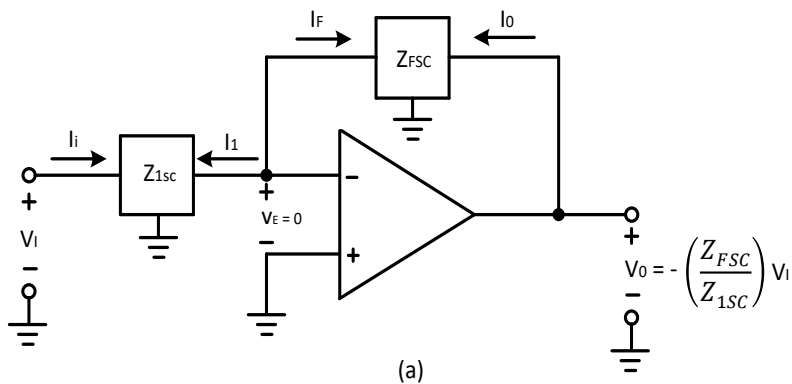
Di mana dalam hal ini impedansi transfer hubung-pendek dapat ditentukan dengan

$$Z_{1sc} = \frac{V_I}{-I_1} \Big|_{v_E=0} \dots \dots \dots (3.18)$$

dan

$$Z_{FSC} = \frac{V_0}{-I_F} \Big|_{v_E=0} \dots \dots \dots (3.19)$$

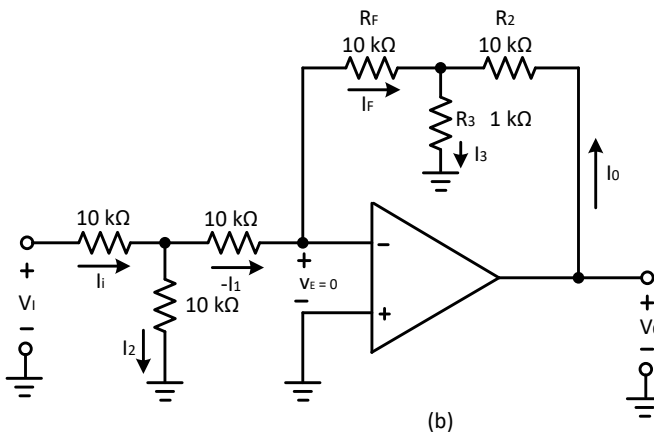
Jadi, dari definisi persamaan (3.18) dan (3.19), jelas bahwa rasio persamaan (3.17) berlaku, karena pada gambar 3.14 kita memiliki $I_1 = -I_F$, karena kondisi Op-Amp ideal.



Gambar 3.14 Penguat Pembalik Menggunakan Jaringan Dua Terminal

3.5.2. Kasus 3.4 Simulasi Op-Amp Penjumlah Dua Terminal

Bila kita memiliki rangkaian seperti pada gambar 3.15, dapatkan penguatan dan resistansi masukan V_i , dalam rangkaian tersebut.

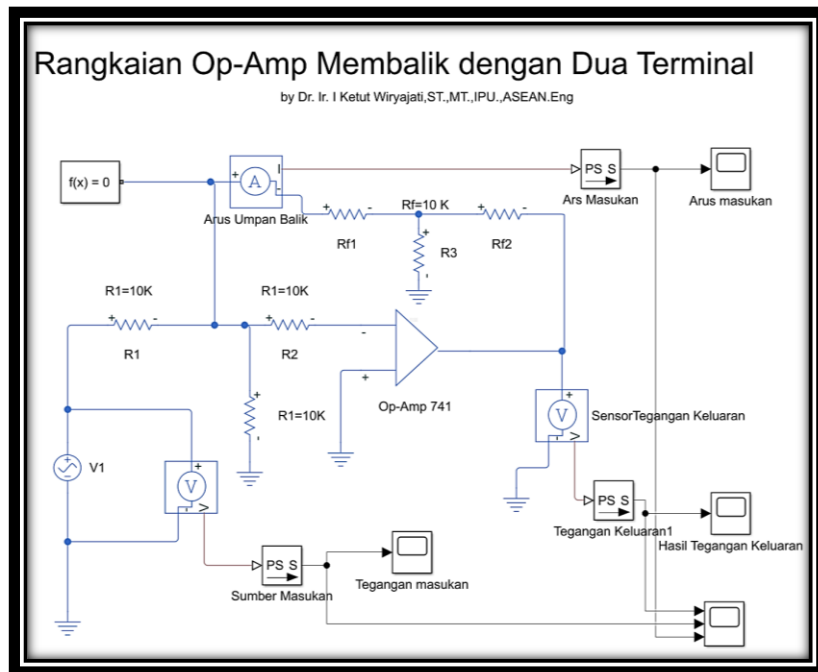


Gambar 3.15 Penguat Pembalik Menggunakan Jaringan Dua Terminal

Penyelesaian

Menggunakan nilai rangkaian yang ditunjukkan pada gambar 3.15 dan menggunakan persamaan (3.18),

SIMULASI Kasus 3.4.



Gambar 3.16 Rangkaian Simulasi Op-Amp Membalik dengan Dua Terminal

karena V_E adalah nol, maka $I_I = V_I/15\text{ k}\Omega$, oleh karena itu

$$-I_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_I}{15\text{ k}\Omega} \right) = \frac{V_I}{30\text{ k}\Omega}$$

Jadi

$$Z_{1SC} = \frac{V_I}{-I_1} \Big|_{V_E=0} = 30\text{ k}\Omega$$

Juga, dengan persamaan (3.19), karena $V_E = 0$, dengan pembagian saat ini

$$-I_F = I_0 \left(\frac{10^3}{10^3 + 10^4} \right) = I_0 \left(\frac{1}{11} \right)$$

Atau

$$-I_F = \frac{1}{11} \left(\frac{V_0}{10^4 + 10^3 || 10^4} \right) = V_0 \left(\frac{1}{120 \text{ k}\Omega} \right)$$

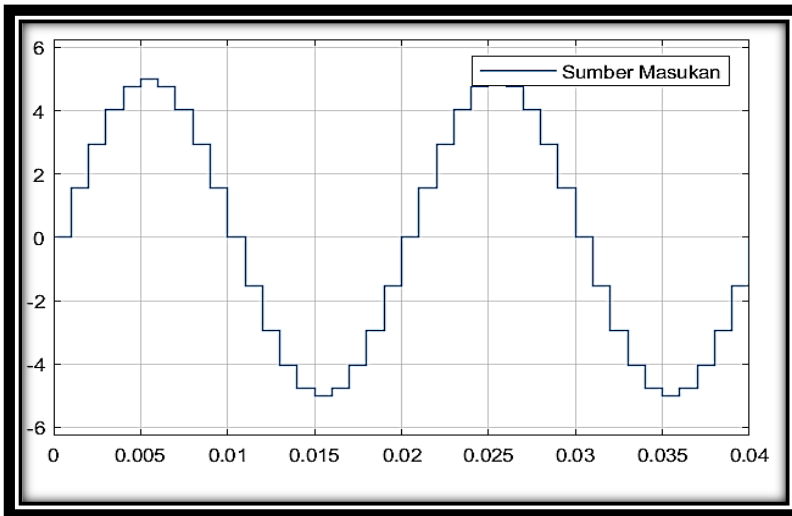
Jadi $Z_{FSC} = 120 \text{ k}\Omega$ dan dari persamaan (3.17) yang kita miliki

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{120 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega} = -4$$

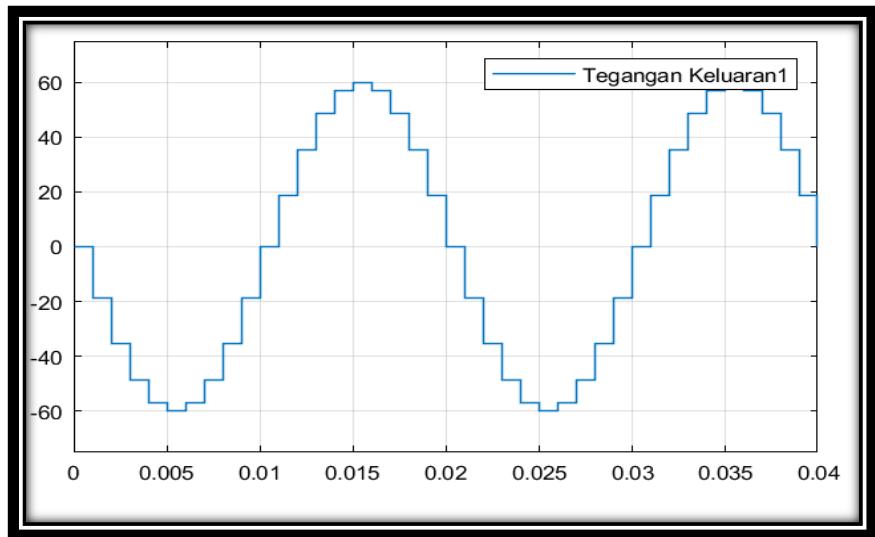
Resistansi masukan yang dilihat dari V_i adalah:

$$\begin{aligned} r_{in} &= 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega || 10 \text{ k}\Omega \\ &= 15 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

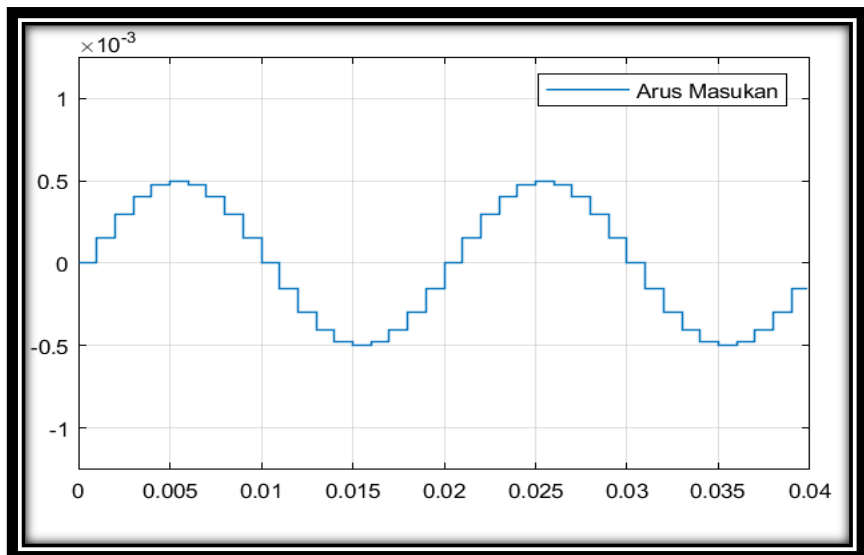
Hasil Simulasi



Gambar 3.17 Bentuk Sinyal Masukan pada Kasus 3.4



Gambar 3.18 Bentuk Sinyal Keluaran pada Kasus 3.4



Gambar 3.19 Bentuk Arus Sinyal Masukan pada Kasus 3.4

Dari gambar 3.18 terlihat bahwa sinyal masukan sebesar 5 volt, dengan bentuk sinuoidal bertingkat, frekuensi 50 herz memiliki sudut fase 0 derajat, Tahanan masukan di bagi dalam 2 sisi seperti pada gambar 3.15, dengan menggunakan persamaan pembagi tegangan maka didapat besar tegangan keluaran adalah 60 volt, dengan beda fase 180 derajat. Sedangkan besar arus yang menuju tahanan umpan balik adalah sebesar 0,5 mA. perhatikan Gambar 3.19.

3.5.3. Kasus 3.5 Simulasi Op-Amp Penjumlah Thevenin

Selesaikan kasus 3.4 dengan menggunakan jaringan input Thevenin, dan tunjukkan bahwa:

$$\frac{V_0}{V_T} = - \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \left(\frac{R_F}{R_T} \right) + \frac{R_2}{R_T} \right] \dots\dots\dots (3.20)$$

dengan R_T adalah impedansi Thevenin dari Z_{1SC} dilihat dari sisi input Op-Amp. Dan V_T adalah tegangan input Thevenin (rangkaian terbuka).

Penyelesaian

Kita dapat mengubah rangkaian input menjadi jaringan ekuivalen Thevenin, dengan hasil bahwa rangkaian sekarang menjadi seperti gambar 3.20, di mana R_T adalah resistansi ekuivalen Thevenin dan V_T adalah tegangan ekuivalen Thevenin. Dari gambar tersebut dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$I_T = \frac{V_T}{R_T} = V_I \left(\frac{1}{30 \text{ k}\Omega} \right)$$

dan

$$V_s = -I_T R_F = -V_T \left(\frac{R_F}{R_T} \right) = -\frac{V_I}{3}$$

Jadi

$$I_3 = \frac{V_s}{R_3} = -\frac{V_1}{3 \text{ k}\Omega}$$

Dan oleh karena itu

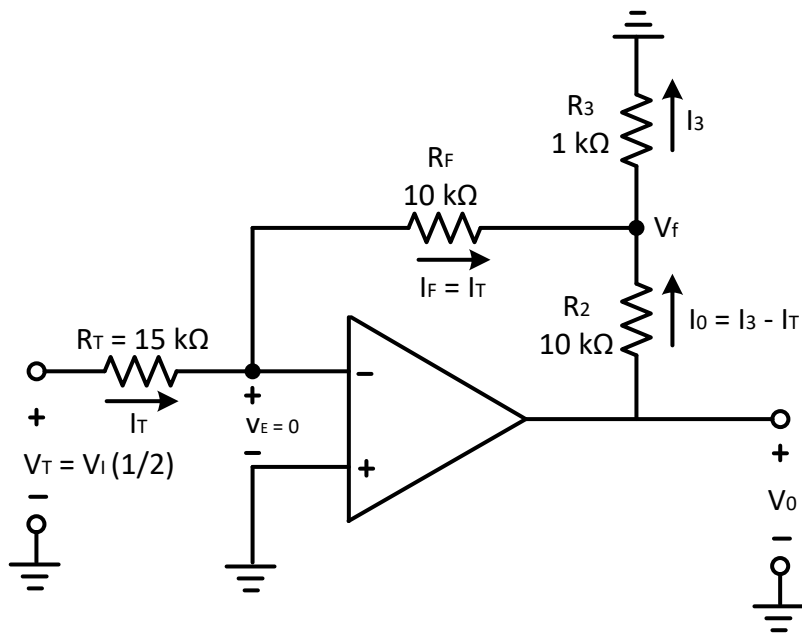
$$V_0 = I_0 R_2 + V_s = (I_3 - I_T) R_2 + V_s$$

atau

$$\frac{V_0}{V_1} = -\left[\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\left(\frac{R_F}{R_T}\right) + \frac{R_2}{R_T}\right] \text{ terbukti.}$$

Mengganti nilai yang kita dapatkan (seperti sebelumnya)

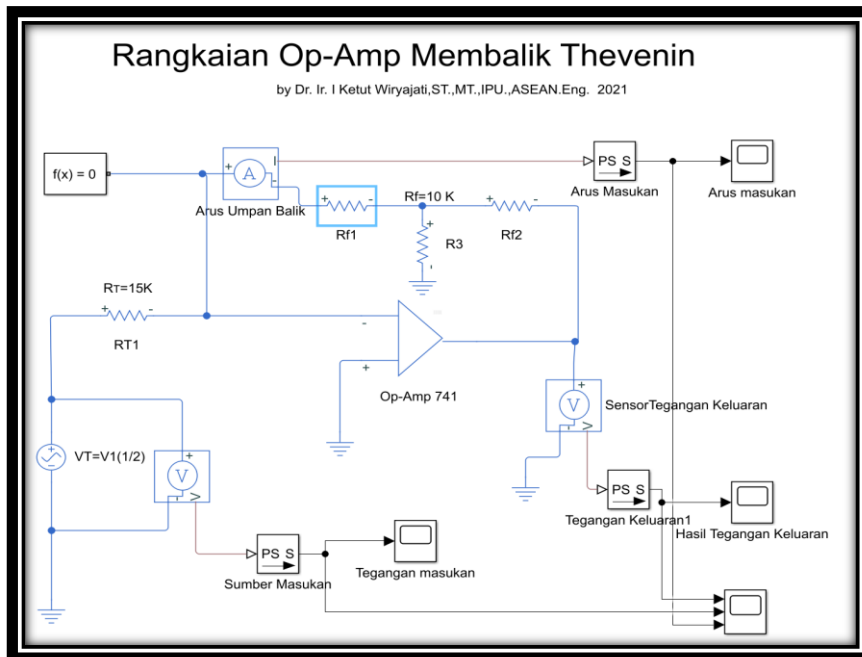
$$\frac{V_0}{V_1} = -4$$



Gambar 3.20 Rangkaian Ekuivalen Thevenin Kasus 3.4

Dari gambar 3.21 Tahanan Thevenin didapat nilai 15K dan tegangan Thevenin adalah 2,5 Volt, rangkaian ini mendapatkan hasil keluaran seperti ditunjukkan pada gambar 3.23 sebagai tegangan keluaran dan arus keluaran 0.025 Ampere. Perhatikan beda phasa antara sinyal masukan dan sinyal keluaran. Sinyal arus merupakan memiliki bentuk yang sama dengan bentuk sinyal masukan atau antara sinyal masukan dan arus memiliki phasa yang sama.

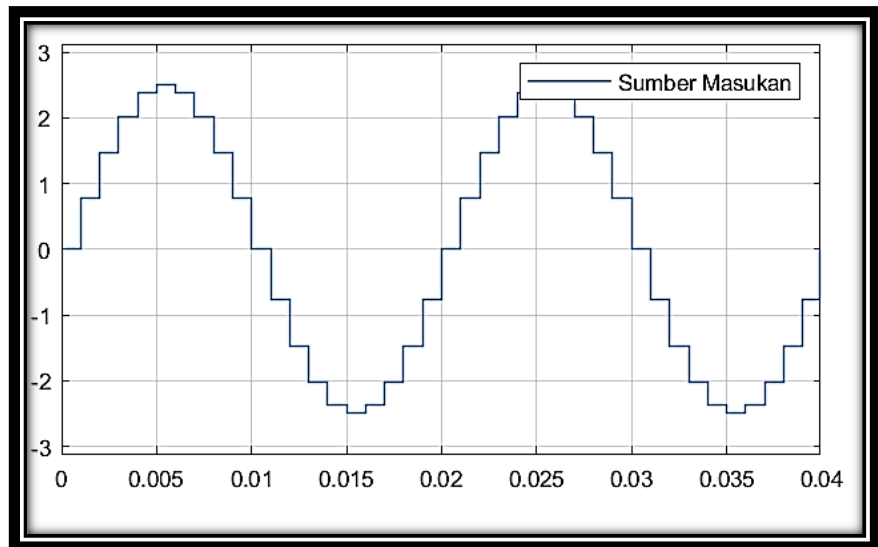
SIMULASI Kasus 3.5



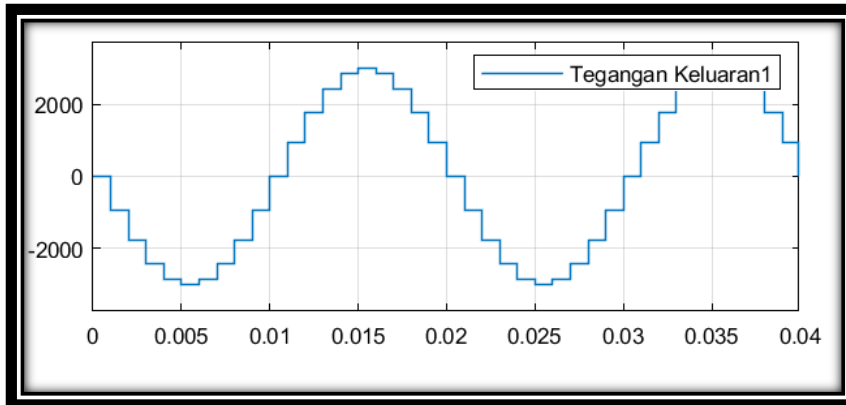
Gambar 3.21 Rangkaian Simulink Op-Amp Ekuivalen Thevenin Kasus 3.5

Dari gambar 3.21 Tahanan Thevenin didapat nilai 15K dan tegangan Thevenin adalah 2,5 Volt, rangkaian ini mendapatkan hasil keluaran seperti ditunjukkan pada gambar 3.21 sebagai tegangan keluaran dan arus keluaran 0.025 Ampere. Perhatikan beda fasa antara sinyal masukan dan sinyal keluaran. Sinyal arus merupakan memiliki bentuk yang sama dengan bentuk sinyal masukan atau antara sinyal masukan dan arus memiliki fasa yang sama.

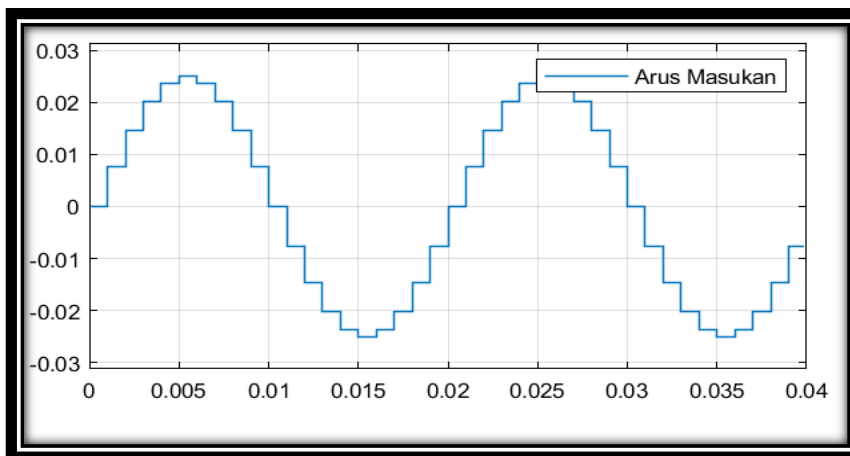
Hasil Simulasi



Gambar 3.22 Bentuk sinyal masukan Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5



Gambar 3.23 Bentuk sinyal keluaran Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5



Gambar 3.24 Bentuk sinyal arus Op-Amp ekuivalen Thevenin Kasus 3.5

3.6. Op-Amp Pengurang

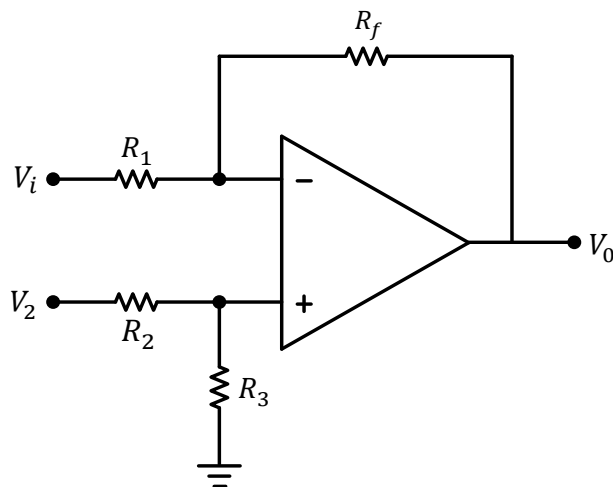
Rangkaian pengurang adalah rangkaian elektronik yang menghasilkan keluaran, yang sama dengan selisih antara sinyal masukan yang diterapkan. Bagian ini membahas tentang rangkaian

pengurang berbasis Op-Amp. Rangkaian pengurang berbasis Op-Amp menghasilkan keluaran yang sama dengan perbedaan tegangan masukan yang diterapkan pada terminal pembalik dan non-pembalik. Ini juga disebut sebagai penguat perbedaan, bila *output*-nya diperkuat.

3.6.1. Metode Penyelesaian Rangkaian Op-Amp Pengurang

Diagram rangkaian pengurang berbasis Op-Amp ditunjukkan pada gambar 3.25 berikut:

Sekarang, mari kita dapatkan ekspresi tegangan keluaran V_0 dari rangkaian di atas menggunakan teorema superposisi menggunakan langkah-langkah berikut:



Gambar 3.25 Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang

Langkah 1

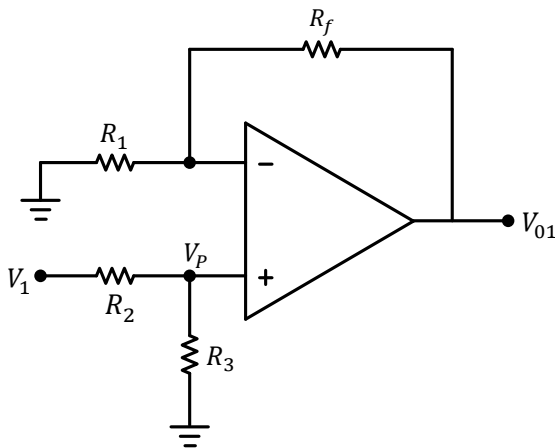
Pertama, mari kita hitung tegangan keluaran V_0 dengan hanya mempertimbangkan V_i .

Untuk ini, hilangkan V_2 dengan membuatnya menjadi nol atau dengan cara dihubung singkatkan. Lebih jelas lihat rangkaian menjadi diagram sirkuit yang dimodifikasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.26 berikut:

Selanjutnya dengan menggunakan prinsip pembagian tegangan, dapat dihitung tegangan pada terminal input *non-inverting* Op-Amp.

$$V_P = V_1 \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \dots\dots\dots (3.21)$$

Sekarang, rangkaian di atas terlihat seperti penguat *non-inverting* yang memiliki tegangan input V_p .



Gambar 3.26 Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang Dihubungsingkat pada V_2

Oleh karena itu, tegangan keluaran V_{01} dari rangkaian di atas akan menjadi

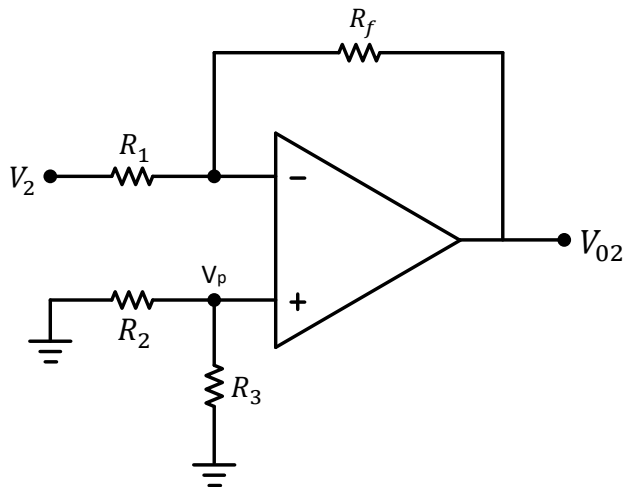
$$V_{01} = V_P \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \dots\dots\dots (3.22)$$

Gantikan, nilai V_p dalam persamaan di atas, kita mendapatkan tegangan keluaran V_{01} dengan hanya mempertimbangkan V_1 , sebagai:

$$V_{01} = V_1 \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \dots\dots\dots (3.23)$$

Langkah 2

Pada langkah ini, menentukan tegangan keluaran, V_{02} dengan hanya mempertimbangkan V_2 . Lakukan hal yang sama dengan langkah di atas, hilangkan V_1 dengan dengan cara menghubungkan singkatan tegangan V_1 . Diagram rangkaian yang dimodifikasi ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.27 Rangkaian Dasar Op-Amp sebagai Pengurang Dihubungsingkat pada V_1

Selanjutnya kita dapat mengamati bahwa tegangan pada terminal input *non-inverting* Op-Amp adalah nol volt. Artinya, rangkaian di atas hanyalah sebuah Op-Amp pembalik biasa.

Oleh karena itu, tegangan keluaran V_{02} dari rangkaian di atas adalah:

$$V_{02} = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right)V_2 \dots\dots\dots(3.24)$$

Langkah 3

Pada langkah ini, kita akan mendapatkan tegangan keluaran V_0 dari rangkaian pengurang dengan menambahkan tegangan keluaran yang diperoleh pada Langkah 1 dan Langkah 2. Secara matematis dapat ditulis dari persamaan (3.22) dan persamaan (3.24) sebagai:

$$V_0 = V_{01} + V_{02} \dots\dots\dots(3.25)$$

Dengan cara menyubstitusikan nilai V_{01} dan V_{02} dalam persamaan (3.25) di atas, kita mendapatkan:

$$V_0 = V_1 \left(\frac{R_3}{R_2+R_3}\right) \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) + \left(-\frac{R_f}{R_1}\right)V_2$$

$$V_0 = V_1 \left(\frac{R_3}{R_2+R_3}\right) \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) - \left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_2$$

Jika $R_f = R_1 = R_2 = R_3 = R$, maka tegangan keluaran V_0 akan menjadi:

$$V_0 = V_1 \left(\frac{R}{R+R}\right) \left(1 + \frac{R}{R}\right) - \left(\frac{R}{R}\right)V_2$$

$$V_0 = V_1 \left(\frac{R}{2R}\right) (2) - (1)V_2$$

$$V_0 = V_1 - V_2 \dots\dots\dots(3.26)$$

Pada bagian ini akan diuraikan tiga jenis rangkaian pengurangan yaitu:

- a. Rangkaian dengan 1 Op-Amp
- b. Rangkaian dengan 2 Op-Amp
- c. Rangkaian dengan 3 Op-Amp

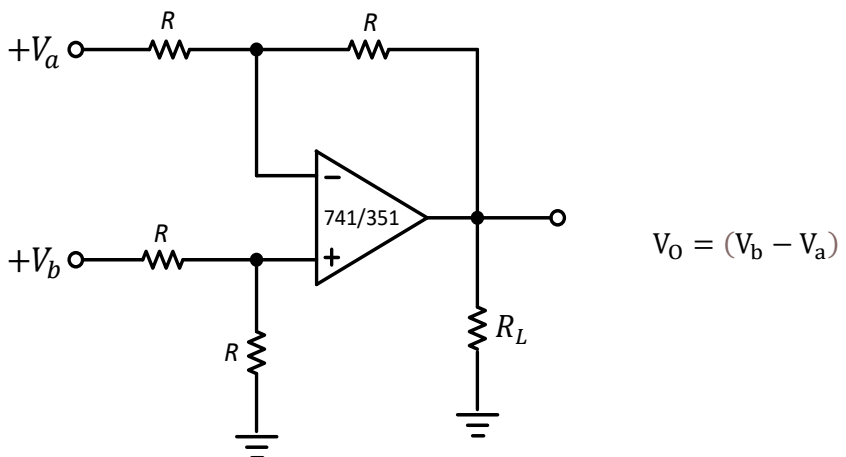
3.6.2. Rangkaian Pengurang dengan Satu Penguat

Rangkaian pengurang dengan 1 Op-Amp ini memanfaatkan kaki *inverting* dan kaki *non-inverting*. Supaya benar-benar terjadi pengurangan maka nilai tahanan dibuat seragam seperti gambar 3.26. semua tahanan bernilai sama dengan R, Sehingga persamaan dapat juga di dapatkan dengan cara singkat sebagai berikut:

$$V_O = \left(\frac{R}{R} + 1\right) \left(\frac{R}{R+R}\right) V_b - \frac{R}{R} V_a \dots\dots\dots(3.27)$$

sehingga

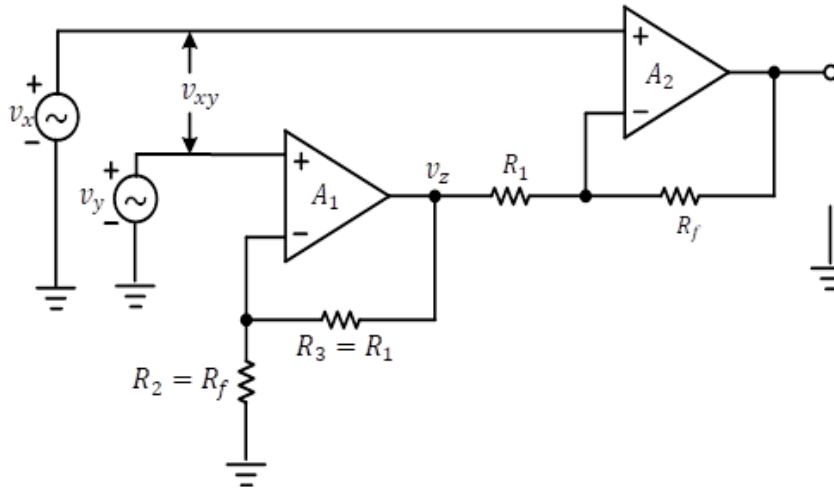
$$V_O = (V_b - V_a) \dots\dots\dots(3.28)$$



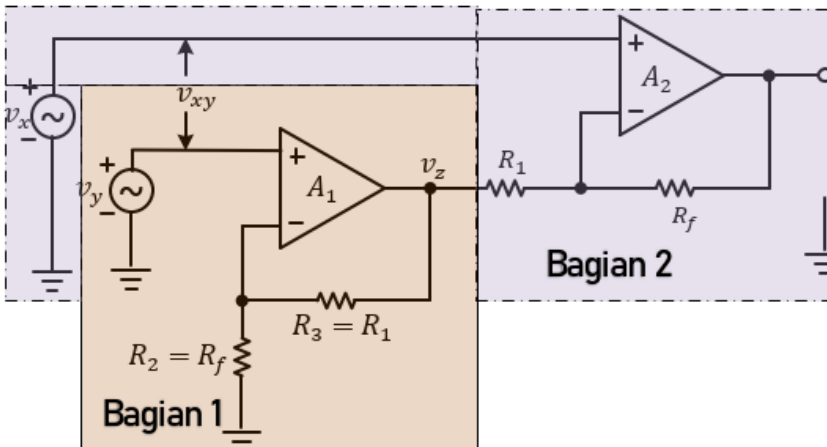
Gambar 3.28 Rangkaian Pengurang dengan Sebuah Op-Amp

3.6.3. Rangkaian Pengurang dengan Dua Penguat

Rangkaian pengurang dengan 2 Op-Amp tidak jauh berbeda dengan satu Op-Amp, yaitu pertama salah satu input dikuatkan kemudian dimasukan ke rangkaian pengurang, seperti gambar 3.29



Gambar 3.29 Rangkaian Pengurang dengan Dua Buah Op-Amp

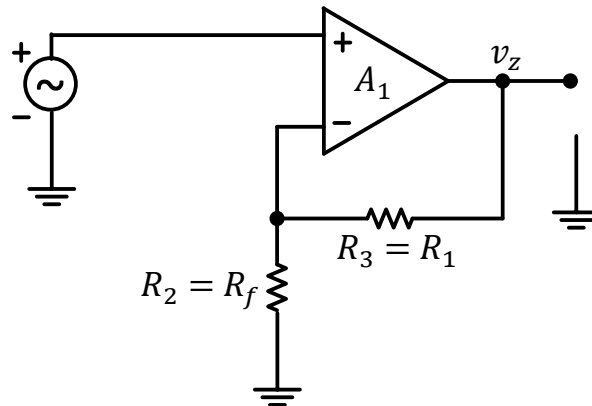


Gambar 3.30 Pengelompokan Dua Buah Op-Amp

Secara bertahap dapat dilakukan sebagai berikut:

Langkah pertama.

Membuat rangkaian menjadi dua kelompok besar yaitu bagian 1 dan bagian 2 seperti pada gambar 3.30. selanjutnya menggambar ulang rangkaian bagian 1 seperti pada gambar 3.31.



Gambar 3.31 Op-Amp Bagian 1 sebagai Op-Amp *non-inverting*.

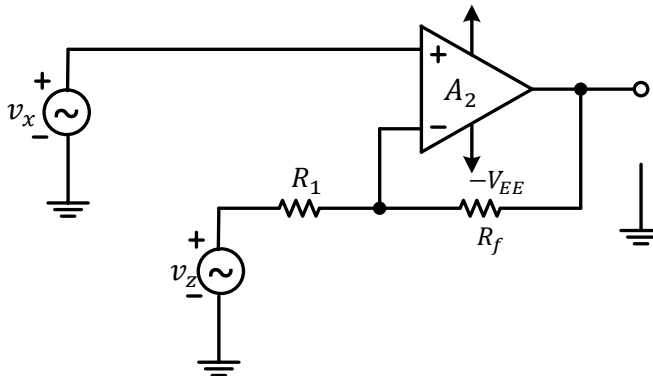
Perhatikan rangkaian tersebut adalah rangkaian Op-Amp *non-inverting* maka persamaan yang terjadi pada titik V_z adalah:

$$V_z = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) V_y \dots\dots\dots(3.29)$$

Langkah kedua

Membuat rangkaian pada bagian 2 seperti pada gambar 3.32, guna memudahkan menganalisis. Karena rangkaian ini memiliki dua sumber yang berbeda maka dapat dilakukan analisis dengan menggunakan teorema superposisi sebagai berikut.

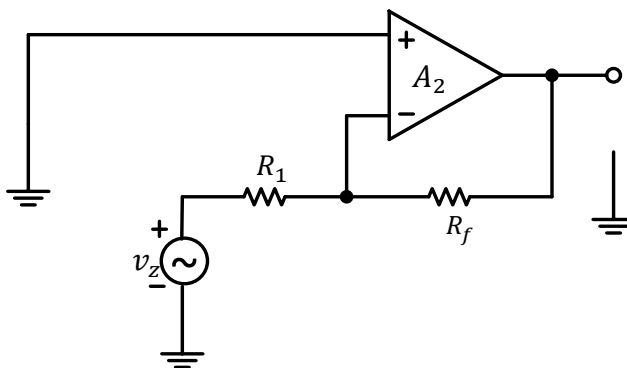
Caranya adalah dengan menghidupkan secara bergantian sumber-sumber tersebut. Perhatikan cara berikut.



Gambar 3.32 Op-Amp Bagian 2 Memiliki Dua Sumber Tegangan

Bila sumber $V_x = 0$ atau di hubungsingkatkan maka sumber tegangan yang aktif adalah V_z bila di gambarkan menjadi seperti pada gambar 3.33, Dari rangkai ini dapat di lihat bahwa rangkaian tersebut adalah rangkaian Op-Amp *inverting* maka persamaan keluaran dari rangkaian ini adalah:

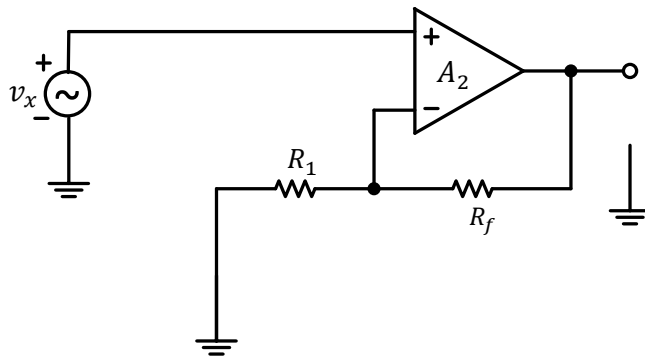
$$V_{O1} = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) V_z \dots\dots\dots(3.30)$$

Gambar 3.33 Op-Amp Bagian 2 Bila $V_x = 0$, dan v_z Aktif.

Sehingga dari persamaan 3.29 dan persamaan 3.30 didapat

$$V_{O1} = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_y \dots\dots\dots (3.31)$$

Bila sumber $V_z = 0$ atau di hubungsingkatkan maka sumber tegangan yang aktif adalah V_x bila di gambarkan menjadi seperti pada gambar 3.34, Dari rangkai ini dapat di lihat bahwa rangkaian tersebut adalah rangkaian Op-Amp *non-inverting* maka persamaan keluaran dari rangkaian ini adalah:



Gambar 3.34 Op-Amp Bagian 2 bila $V_z = 0$, dan V_x aktif.

$$V_{O2} = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_x \dots\dots\dots (3.32)$$

Selesaikan pekerjaan superposisi dengan menjumlahkan semua keadaan yaitu:

$$V_O = V_{O1} + V_{O2}$$

$$V_O = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_y + V_{O2} = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_x \dots\dots\dots (3.33)$$

Langkah ke tiga

Lakukan Manipulasi persamaan untuk mendapatkan persamaan akhir dari rangkaian secara keseluruhan sebagai berikut:

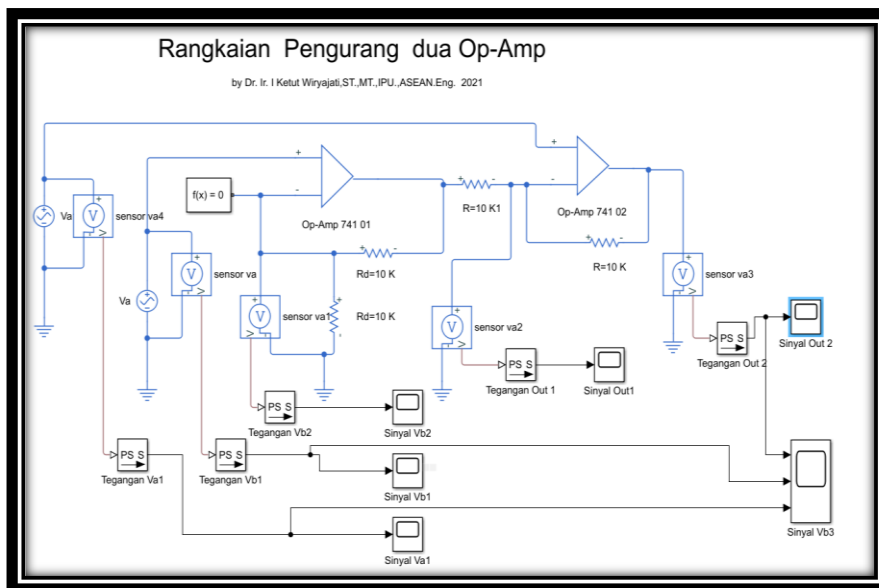
sehingga V_o menjadi

$$V_o = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right) V_z + \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_x \dots\dots\dots(3.34)$$

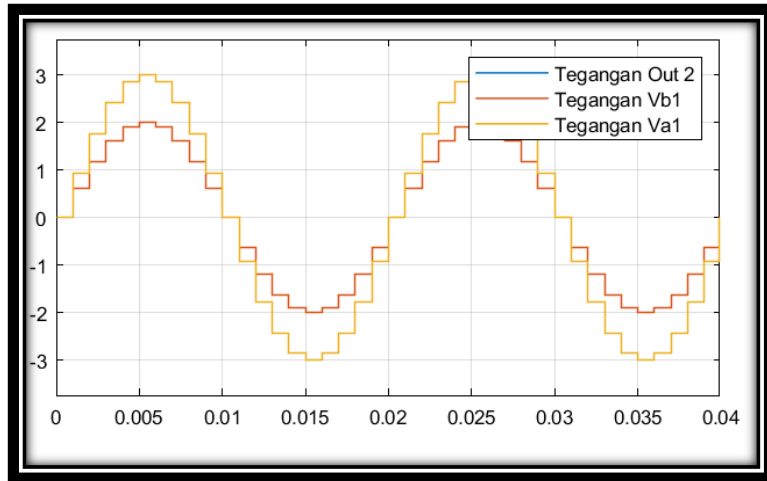
Kasus 3.6.

Bila pada gambar 3.29 nilai R adalah sama yaitu 10 K dapatkan nilai penjumlahan dari Op-Amp tersebut bila $V_x=3$ volt dan $V_z=2$ volt?

Penyelesaian dengan Simulasi

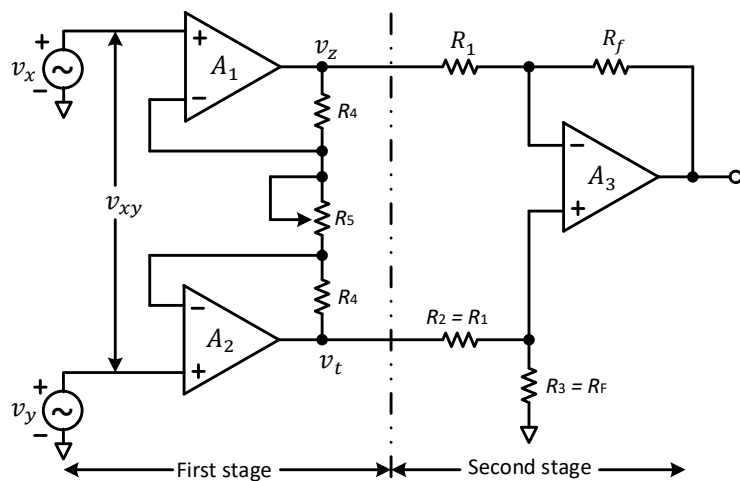


Gambar 3.35 Simulasi Op-Amp Dua Tingkat dengan Simulink

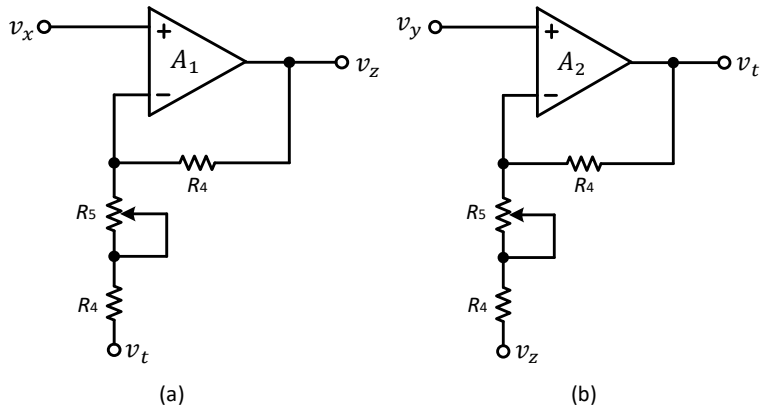


Gambar 3.36 Hasil Simulasi Op-Amp Dua Tingkat dengan Simulink

Rangkaian dengan tiga Op-Amp

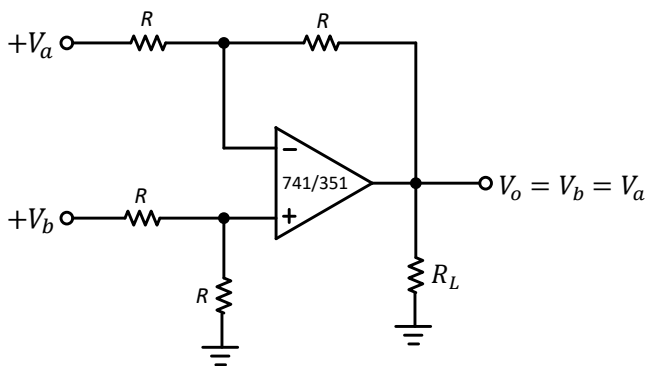


Gambar 3.37 Rangkaian Pengurangan dengan 3 Op-Amp



Gambar 3.38 Proses Mencari Persamaan dari Rangkaian Pengurang 3 Op-Amp

Rangkaian penguat dengan 3 Op-Amp seperti pada gambar di bawah ini sangat persis seperti rangkaian penguat dengan 1 Op-Amp. Hal ini karena sebelum masuk dilewatkan buffer saja. Perhitungannya pun sama dengan rangkaian pengurang 1 Op

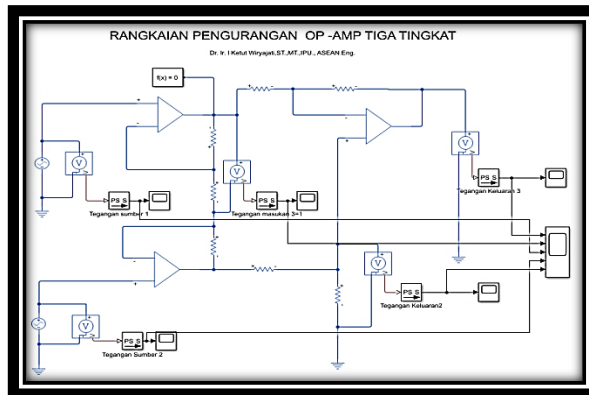


Gambar 3.39 Rangkaian Penguat 3 Op-Amp dengan Buffer

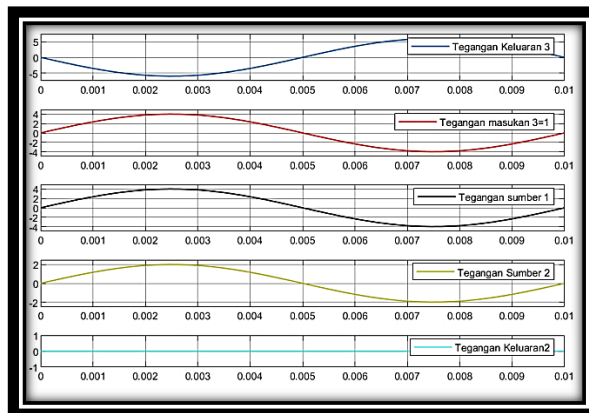
3.6.4. Kasus 3.7 Simulasi Op-Amp Pengurang Tiga Tingkat

Bila pada Gambar 3.35 nilai R adalah sama yaitu 10 K dapatkan nilai penjumlahan dari Op-Amp tersebut bila $V_1=4$, dan $V_2=2$ volt.?

Penyelesaian



Gambar 3.40 Simulasi Op-Amp Pengurangan dengan Tiga Tingkat



Gambar 3.41 Hasil Simulasi Op-Amp Pengurangan dengan Tiga Tingkat

Perhatikan pada gambar 3.41 tegangan input adalah +4 Volt dan +2 Volt, dengan phase 0 derajat, setelah dijumlahkan dengan menggunakan Op-Amp. Tiga tingkat didapatkan hasil adalah 6 volt. Dengan beda phasa 180 derajat artinya sinyal masukan dijumlahkan dengan dengan hasilnya di balikan sebesar 180 derajat.

3.7. Op-Amp Deferensiator

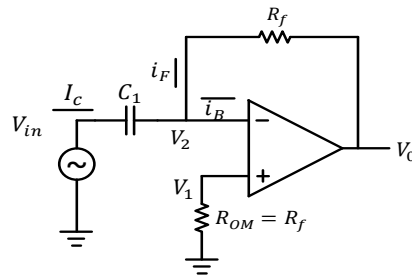
Penguat differensiator merupakan konfigurasi dari Op-Amp yang berfungsi untuk menguatkan hasil sekaligus mendifferensiasi dari sinyal masukan yang diberikan. Misalnya jika sinyal yang diberikan pada masukan berbentuk gelombang sinus maka akan menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang cosinus. Dengan rangkaian Op-Amp sebagai penguat diferensial tersebut, differensiator dapat digunakan untuk mengubah bentuk sinyal. Beberapa bentuk sinyal yang dapat diubah oleh differensiator yaitu gelombang persegi menjadi gelombang spike, gelombang sinus menjadi cosinus, dan gelombang segitiga menjadi gelombang persegi. Rangkaian dari differensiator pada dasarnya berupa penguat *inverting* yang tahanan masukannya diganti dengan komponen kapasitor. Gambar 3.40 menunjukkan rangkaian differensiator.

Untuk mendapatkan rumus differensiator, urutannya adalah sebagai berikut: $i_C = i_B + i_F$ dan selama nilai $i_B = 0$ maka $i_C = i_F$ selisih dari *inverting input* dan *non-inverting input* v_1 dan v_2) adalah nol dan penguatan tegangan sangat besar, maka didapat persamaan pengisian kapasitor sebagai berikut:

$$C_1 \frac{d}{dt} (v_{in} - v_2) = \frac{v_2 - v_o}{R_F}$$

$$C_1 \frac{dV_{in}}{dt} = - \frac{v_o}{R_F}$$

$$\text{Atau } v_o = -R_F C_1 \frac{dV_{in}}{dt}$$



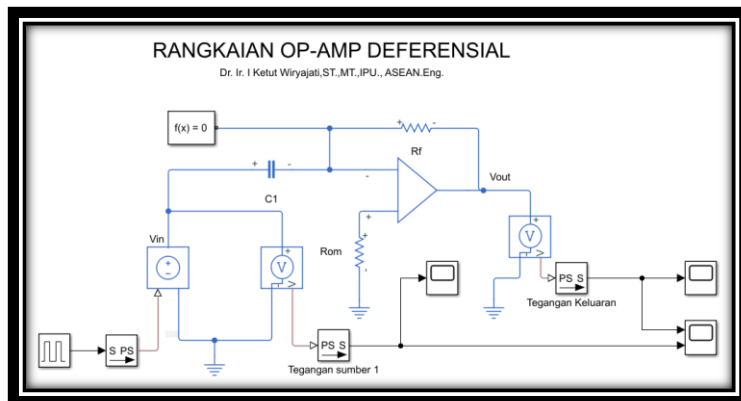
Gambar 3.42 Rangkaian Differensiator Op-Amp

3.7.1. Kasus 3.8 Simulasi Op-Amp Diferensial

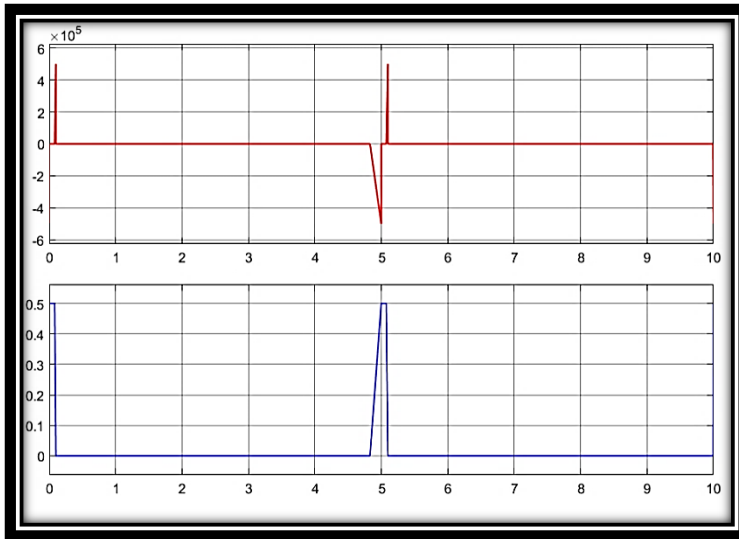
Bila diketahui sebuah rangkaian diferensial seperti pada gambar 3.42 dengan nilai $C_1=1\text{mF}$ dan $R=1\text{ ohm}$, Sedangkan sumber tegangan adalah $\pm 15\text{ Volt}$, dengan sinyal awal adalah 0 volt , Tentukan tegangan keluaran dari rangkaian tersebut jika:

- $V_{in}= 0.5\text{ Volt}$ (sinyal DC) pada saat 10 detik.
- $V_{in} = 20\text{ Volt}$ Sinyal AC pada saat 1 detik

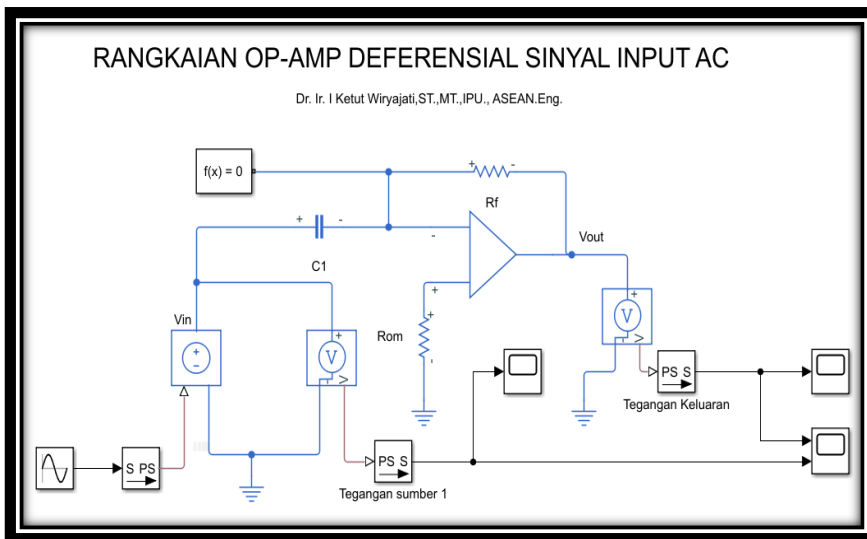
Penyelesaian



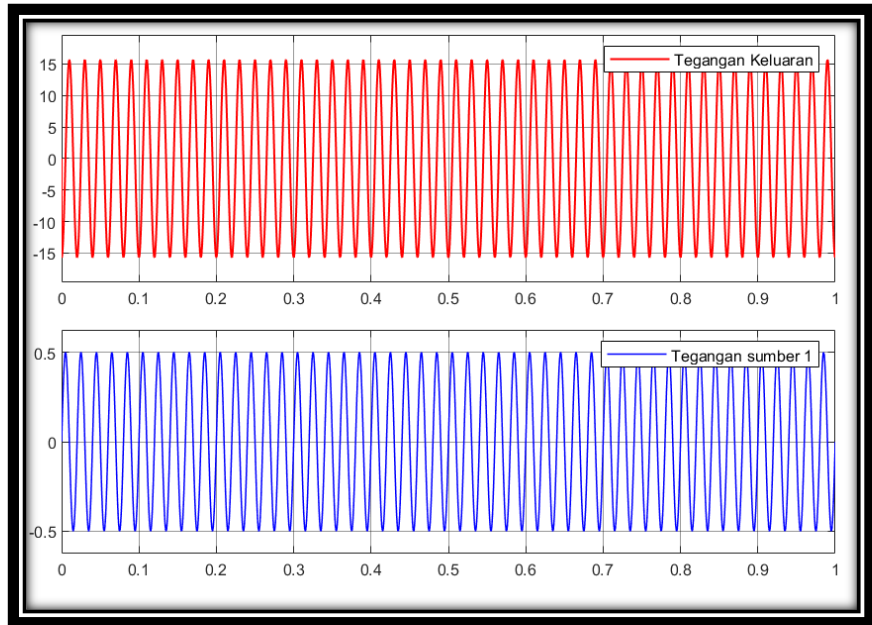
Gambar 3.43 Simulasi dari Rangkaian Differensiator Op-Amp input DC



Gambar 3.44 Hasil simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp Input DC



Gambar 3.45 Simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp Input AC



Gambar 3.46 Hasil simulasi Rangkaian Differensiator Op-Amp input AC

Berikut diberikan contoh penguat amplifiier diferensial dua masukan seperti pada Gambar 3.47. Dengan menghubungkan setiap masukan pada gilirannya ke *ground* atau di nol kan dengan cara menerapkan metode superposisi penyelesaian gambar 3.47 dapat diselesaikan, ingat Langkah-langkah superposisi di atas dan mendapatkan tegangan keluaran dengan cara sebagai berikut:

$$i_1 = \frac{v_1 - v_a}{R_1}, i_1 = \frac{v_2 - v_a}{R_2}, i_f = \frac{v_{1a} - v_o}{R_3}$$

titik penjumlahan $v_1 = v_a$

dan jika $v_b = \frac{R_4}{R_1 + R_2}$, jika $v_b = 0$, maka

$$v_{oa} = -v_1 \frac{R_3}{R_1} \dots \dots \dots (3.39)$$

jika $v_2 = 0$, maka

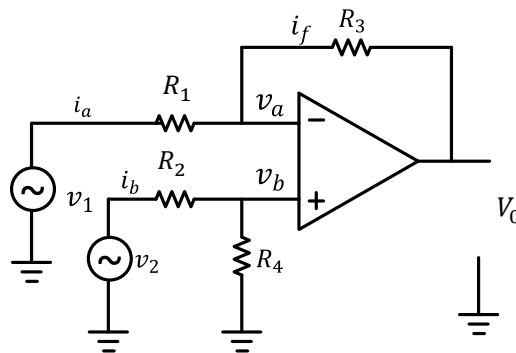
$$V_{ob} = -V_2 \left(\frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) \left(\frac{R_3 + R_3}{R_2} \right) \dots \dots \dots (3.40)$$

$$V_o = V_{oa} + V_{ob}$$

$$V_o = -V_1 \frac{R_3}{R_1} + V_2 \left(\frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) \left(\frac{R_3 + R_3}{R_2} \right) \dots \dots \dots (3.41)$$

Jika nilai $R_1 = R_2$ dan $R_3 = R_4$ maka persamaan (3.41) menjadi:

$$v_o = \frac{R_3}{R_1} (v_2 - v_1) \dots \dots \dots (3.42)$$



Gambar 3.47 Rangkaian Differensiator Op-Amp

Jika semua resistor memiliki nilai yang sama $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ maka persamaan (3.42) menjadi rangkaian penguatan *unity* atau disebut dengan Penguat Diferensial Berpenguat Satu.

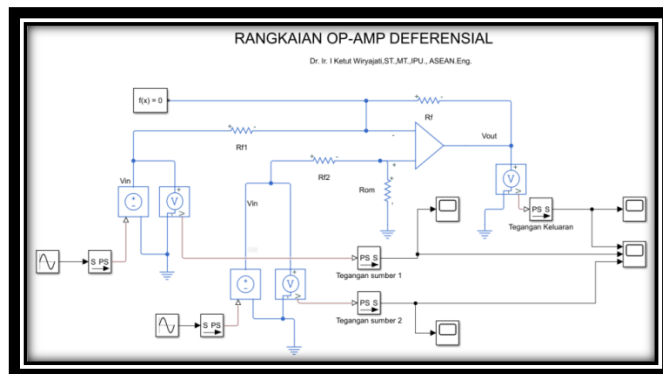
Jika tegangan masukan v_1 lebih tinggi dari input v_2 maka jumlah tegangan *output* akan menjadi negative, dan jika tegangan masukan v_2 lebih tinggi dari input v_1 maka *output* menjadi positif.

3.7.2. Kasus 3.9 Op-Amp Diferensial Case 2

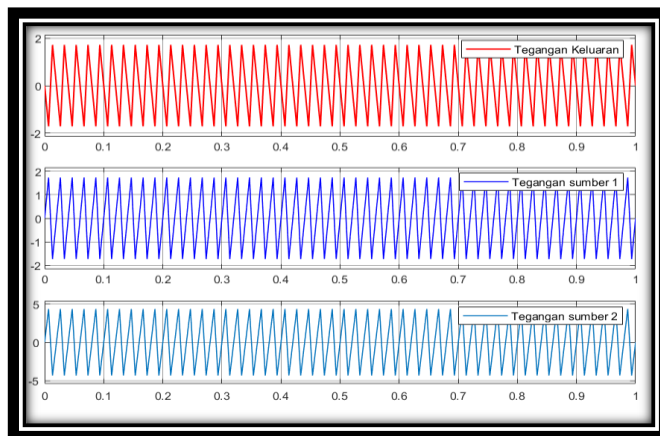
Bila diketahui sebuah rangkaian diferensial seperti pada gambar 3.47 dengan nilai dan $R=10$

Kohm, Sedangkan sumber tegangan adalah ± 15 Volt, Tentukan tegangan keluaran dari rangkaian tersebut jika tegangan masukan adalah sinusoidal. Pada tegangan masukan 2.5 volt ac dan tegangan input 1 adalah 2 Volt.

Penyelesaian



Gambar 3.48 Simulasi Rangkaian Diferensiator Op-Amp



Gambar 3.49 Hasil Simulasi Rangkaian Diferensiator Op-Amp

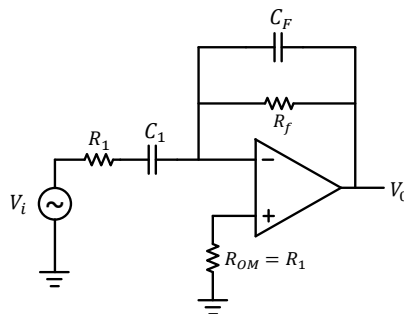
Pada rangkaian aplikasi rangkaian differensiator Op-Amp ini ada sedikit perubahan yaitu penambahan tahanan dan kapasitor yang fungsinya untuk memfilter sinyal masukan. Seperti tampak pada gambar 3.41 adalah rangkaian differensiator yang dimaksud. Dengan demikian maka ada batasan input dari frekuensi yang masuk, batasan tersebut adalah $f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_1}$ sedangkan nilai frekuensi yang diakibatkan oleh R_F dan C_1 adalah sebagai berikut:

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_F C_F} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Bila sinyal input melebihi frekuensi f_a maka hasil *output* akan sama dengan hasil input, alias fungsi rangkaian tersebut tidak lagi differensiator tapi tetapi sebagai pelewat biasa. Sedangkan untuk gambar 3.43 biasanya digunakan untuk rangkaian aplikasi yang diintegrasikan dengan rangkaian lain. Syarat perhitungan nilai-nilai R_1, C_1, R_F, C_F adalah sesuai dengan syarat sebagai berikut:

$$f_a < f_b$$

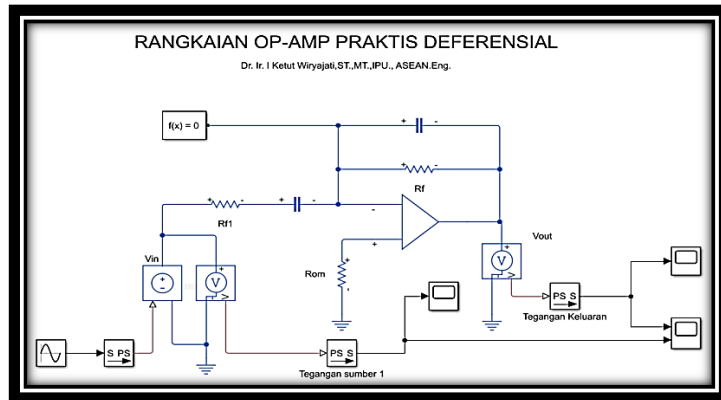
Sehingga frekuensi input dilewatkan terlebih dahulu ke R_1, C_1, R_F , kemudian lewat ke R_1, C_1, C_F bila frekuensinya melebihi f_a .



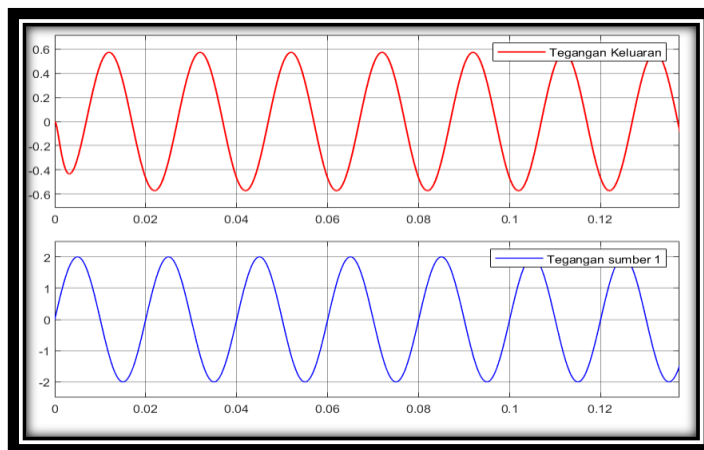
Gambar 3.50 Rangkaian Praktis (Aplikasi) Differensial Op-Amp
3.7.3. Kasus 3.10 Op-Amp Differensial *Case 3*

Diferensiator Op-Amp dari rangkaian seperti gambar 3,47 dengan nilai $C_1 = 1mF$ dan $R_F = 1K\Omega$. Tentukan tegangan *output*

Penyelesaian



Gambar 3.51 Simulasi Rangkaian Praktis (Aplikasi) Diferensial Op-Amp



Gambar 3.52 Hasil Rangkaian Praktis (Aplikasi) Diferensial Op-Amp.
3.7.4. Kasus 3.11 Op-Amp Diferensial Case 4

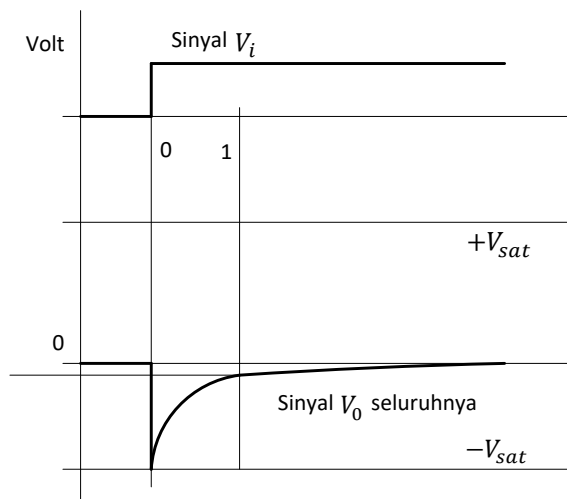
Differensiator Op-Amp dari rangkaian seperti gambar 3,45 dengan nilai $C_1 = 1mF$ dan $R_F = 1K\Omega$. Sumber tegangan ± 15 Volt > awal sinyal adalah 0 Volt. Tentukan tegangan *output* (a) $V_{in} = 1$ Volt (sinyal DC) saat 10 detik. (b) $V_{in} = 20$ Volt (sinyal DC) saat 1 detik

Penyelesaian

$$v_O = -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -10^3 \cdot 10^{-6} \frac{(1V-0V)}{10} = -10^{-3} 0,1 = -10^{-4}V$$

$$v_O = -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -10^3 \cdot 10^{-6} \frac{(20V-0V)}{1} = -10^{-3} \cdot 20 = -20^{-2}V$$

Gambar sinyal *output*-nya



Gambar 3.53 *Output* dari Rangkaian Differensiator Op-Amp dengan Input Sinyal DC

Untuk menentukan nilai CF dan RF pada differensiator Op-Amp ini ditentukan dari f_a dan f_b dengan hubungan sebagai berikut: $f_b = 20 f_a$

3.7.5. Kasus 3.12 Simulasi Op Diferensial Variasi input

Rancang differensiator Op-Amp dengan input bervariasi antara 10 Hz sampai 1 KHz dengan $V_{in} = 1 \sin \omega t$. Volt (*peak to peak*)

- Tentukan nilai-nilai R_1, C_1, R_F dan C_F
- Tentukan bentuk sinyal V_O

Penyelesaian:

- Karena *input* berkisar 10 sampai 1 KHz, maka di ambil frekuensi tertingginya. Jadi $f_a = 1 \text{ KHz}$ dan rumusnya:

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_1} \text{ dan ditentukan}$$

$$C_1 = 0.1 \text{ mF, sehingga: } R_F \frac{1}{(2\pi)(10^3)(10^{-7})} = 1.59 \text{ K}\Omega$$

Bila $f_b = 20 f_a$, maka $f_b = 20 \text{ KHz}$

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \text{ maka nilai } R_1 \frac{1}{(2\pi)(10^4)(10^{-7})} = 79.5 \Omega = 82 \Omega$$

(d disesuaikan nilai tahanan yang ada).

Selama nilai $R_1, C_1 = R_F, C_F$, maka nilai C_F adalah:

$$C_F = \frac{(82)(10^{-7})1}{1.5 \text{ K}} 0.0055 \text{ mF} = 0.0055 \quad (\text{nilai disesuaikan})$$

dengan nilai kapasitor yang ada)

Nilai $R_{OM} = R_1 \parallel R_F = 78 \Omega$ (digunakan 82Ω)

- Bentuk sinyal V_O adalah

$$\begin{aligned} v_o &= -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -(1.5 \text{ K}\Omega)(0.1 \text{ mF}) \frac{d}{dt} [\sin(2\pi) \cdot (10^3)t] \\ &= -(1.5 \text{ K}\Omega)(0.1 \text{ mF}) \frac{d}{dt} [\sin(2\pi) \cdot (10^3) \cdot \cos[(2\pi) \cdot (10^3)t]] \\ &= -0.94 \cdot \cos[(2\pi) \cdot (10^3)t] \end{aligned}$$

3.8. Op-Amp pada Integrator

Gambar 3.51 menunjukkan rangkaian integrator pembalik karena sinyal kesalahan mendekati 0 V, input pembalik Op-Amp berada pada potensial *ground*, jadi

$$i_I(t) = \frac{v_I(t)}{R_1}$$

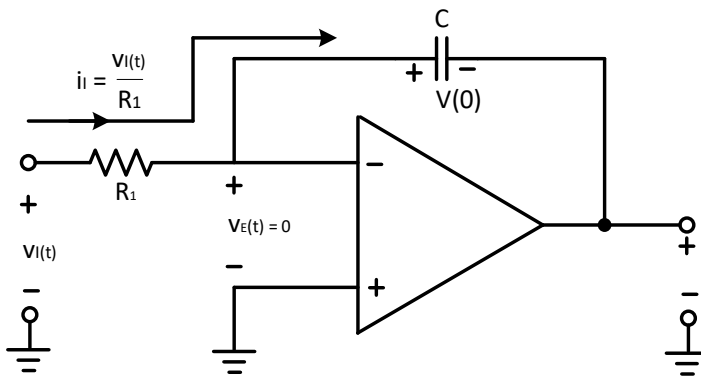
Dan sinyal keluarannya adalah, menjumlahkan tegangan di C dan $v_E(t)$

$$v_o(t) = -V(0) - \frac{1}{C} \int_0^1 i_I(t) dt$$

Di mana $V(0)$ adalah tegangan yang ada pada kapasitor pada waktu $t = 0$. Persamaan pengganti untuk $i_I(t)$ adalah

$$v_o(t) = -V(0) - \frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_I(t) dt \dots\dots\dots(3.43)$$

Dari persamaan (13.43) tegangan keluaran sama dengan integral negatif dari tegangan masukan, dibagi dengan konstanta penguatan ($R_1 C$), dikurangi tegangan awal pada kapasitor pada saat $t = 0$. Dalam domain s persamaan untuk fungsi transfer V_o/V_i menjadi untuk $V(t = 0) = 0$ V



Gambar 3.54 Rangkaian Dasar Integrator Pembalik

$$\frac{V_o(s)}{V_I(s)} = -\frac{1}{R_1 C s} \dots\dots\dots(3.44)$$

Dan terkait dengan domain frekuensi

$$\frac{V_0(j\omega)}{V_I(i\omega)} = -\frac{100}{s} \dots\dots\dots (3.45)$$

3.8.1. Kasus 3.13 Simulasi Op-Amp sebagai Integrator *Case 1*

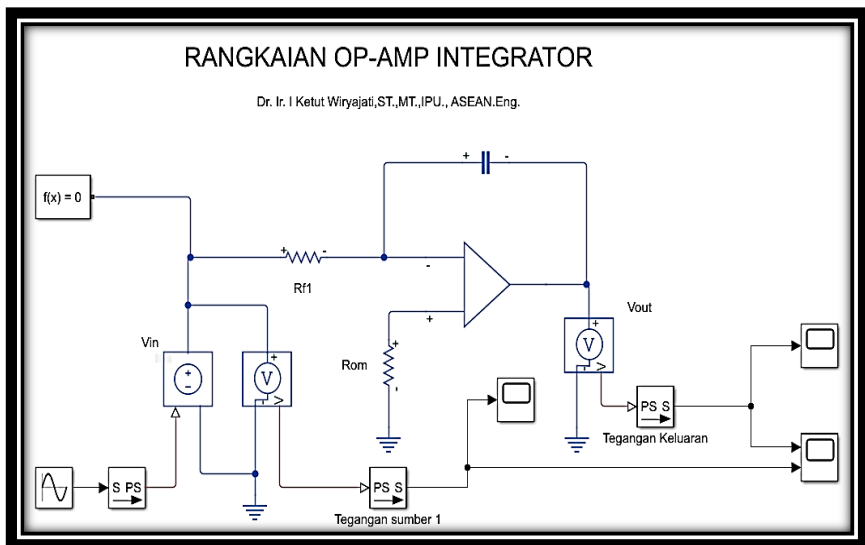
Dengan menggunakan rangkaian pada gambar 3.51, rancang sebuah integrator pembalik yang memenuhi persamaan berikut.

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{100}{s}$$

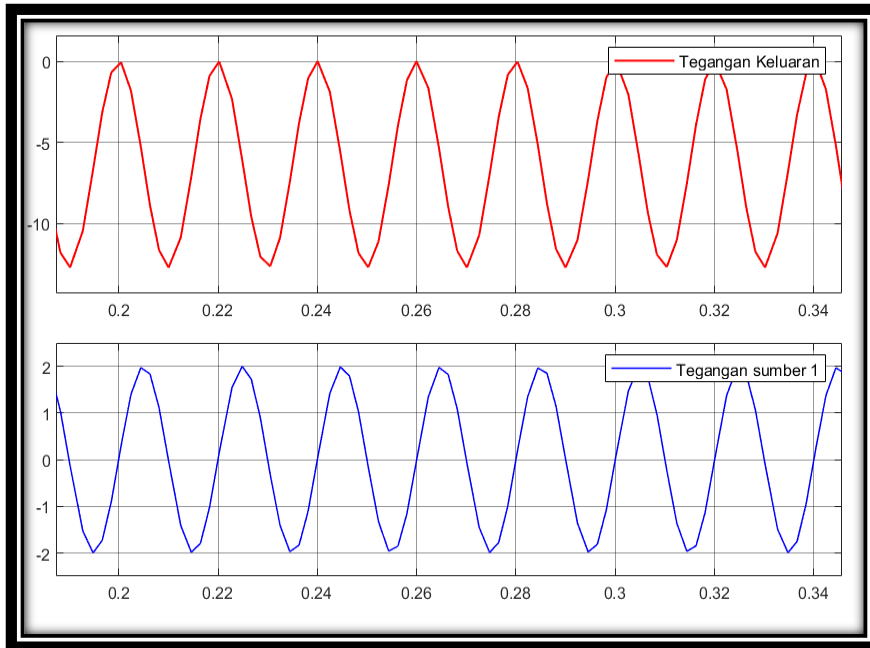
Sinyal masukan V_I adalah untuk melihat resistansi masukan 100 k Ω .

Penyelesaian

Konstanta penguatan $1/R_1C$ harus 100. Karena resistansi input harus 100 k Ω , maka C harus 0.1 μ F.



Gambar 3.55 Rangkaian Dasar Integrator Pembalik



Gambar 3.56 Hasil Rangkaian Dasar Integrator Pembalik

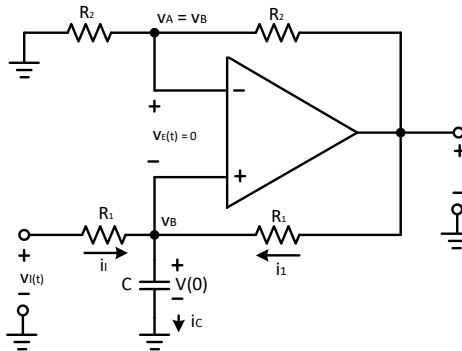
3.8.2. Kasus 3.14 Simulasi Op-Amp integrator *Case 2*

Rangkaian integrasi tidak membalik ditunjukkan pada gambar 3.54 Untuk saat ini, asumsikan tegangan awal pada C adalah 0 [$V(t) = 0$] = 0 V]. Karena sinyal $v_E(t)$ adalah 0 $v_A = v_B$ jadi:

$$v_B = v_A = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_2} \right) v_0 = \frac{v_0}{2}$$

Oleh karena itu menjumlahkan arus pada simpul v_B adalah

$$i_I + i_1 - i_C = 0$$



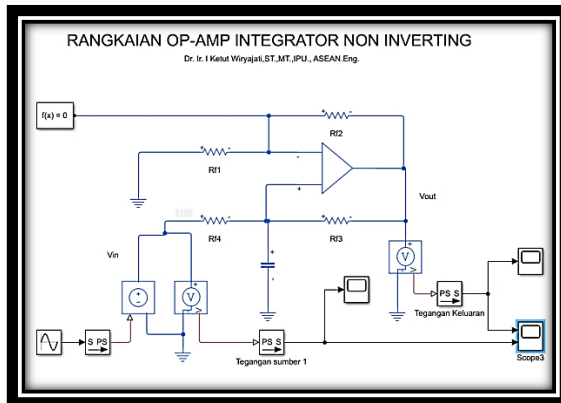
Gambar 3.57 Rangkaian Integrator *Non-Inverting*

Atau pada domain s

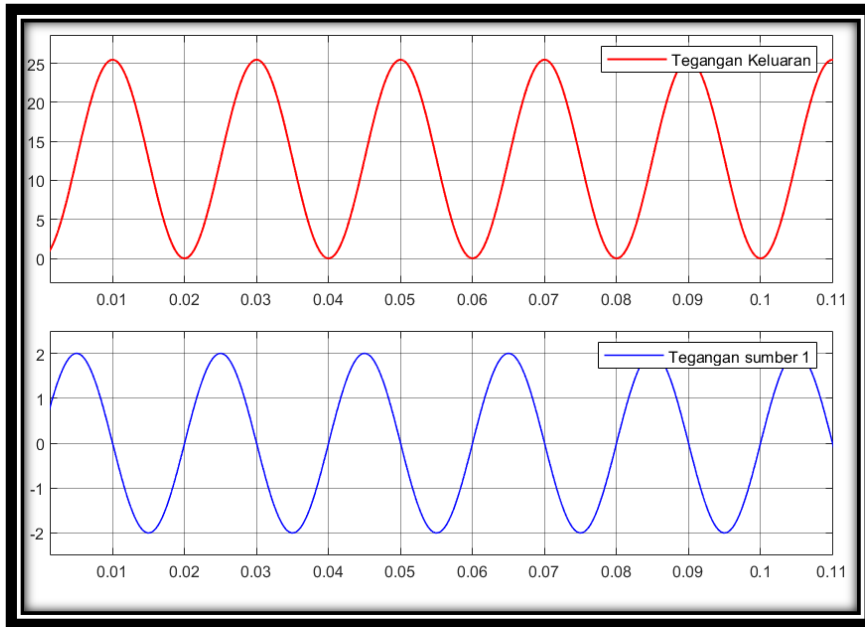
$$\frac{V_I - V_B}{R_1} + \frac{V_0 - V_B}{R_1} - V_B(sC) = 0 \dots\dots\dots (3.46)$$

Setelah mengganti persamaan untuk v_B di atas, kita mendapatkan fungsi transfer

$$\frac{V_0}{V_I} = \frac{2}{sR_1C} \dots\dots\dots (3.47)$$



Gambar 3.58 Simulasi Rangkaian Integrator *Non-Inverting*

Gambar 3.59 Hasil Simulasi Rangkaian Integrator *Non-Inverting*

Latihan Soal

Dapatkan persamaan (3.46) dari (3.47) dengan substitusi yang sesuai. Gunakan tegangan awal $V(0)$ pada kapasitor (petunjuk: gunakan superposisi) dan tunjukkan bahwa dalam domain waktu

$$v_0(t) = 2 \left[V(0) + \frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_I(t) dt \right] \dots\dots\dots (3.48)$$

Rangkaian integrator Op-Amp ini juga berasal dari rangkaian *inverting* dengan tahanan umpan baliknya diganti dengan kapasitor. Proses perhitungannya sebagai berikut:

$i_1 = i_B + i_F$ diabaikan karena sangat kecil nilainya sehingga: $i_1 = i_F$.

Arus pada kapasitor adalah $i_C = C \frac{dv_C}{dt}$, yang sama dengan i_F , sehingga $\frac{v_{in}-v_2}{R_1} = C_F \left(\frac{d}{dt} \right) (v_2 - v_o)$, karena $v_1 = v_2 = 0$, karena penguatan A terlalu besar,

Sehingga $\frac{v_{in}}{R_1} = C_F \left(\frac{d}{dt} \right) (-v_o) - \int_0^t \frac{v_{in}}{R_1} dt = \int_0^t C_F \frac{d}{dt} (-v_o) dt = C_F(-v_o) + v_o|_{t=0}$

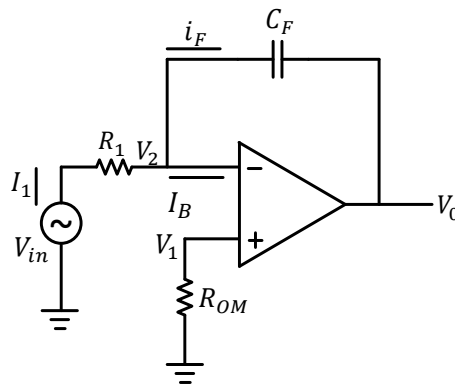
Sehingga persamaan menjadi:

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int_0^t v_{in} dt + C$$

Batas frekuensi yang dilalui oleh kapasitor dalam rangkaian integrator adalah

$$f_o = \frac{1}{2\pi R_1 C_F}$$

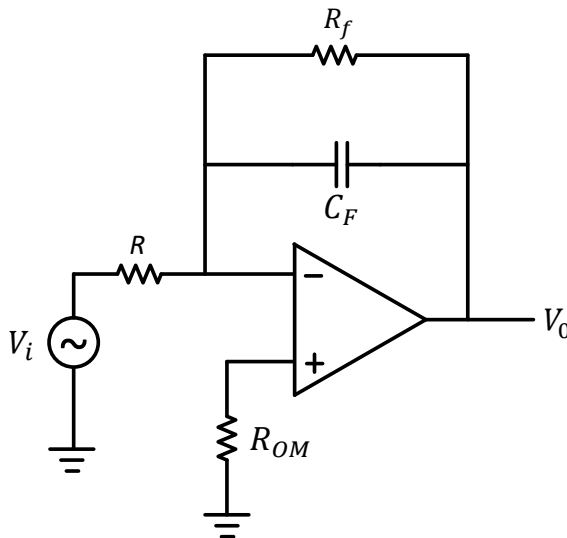
Biasanya rangkaian untuk aplikasi ada penambahan tahanan yang diparalel dengan kapasitor dengan dinamai R_F . Seperti pada gambar 2.29 rangkaian integrator yang belum di tambah tahanan yang diparalel dengan kapasitor. Nilai R_{OM} adalah antara nol sampai dengan R_1 .



Gambar 3.60 Rangkaian Integrator Op-Amp Sederhana

Perhitungan nilai untuk R_F berkaitan dengan komponen lainnya yaitu $f_a < f_b$ di mana rumus f_a adalah:

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_F}, f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_F}, \text{ misal } +V_d = f_b/10$$



Gambar 3.61 Rangkaian Integrator Op-Amp untuk Aplikasi (Praktis)

Rangkuman

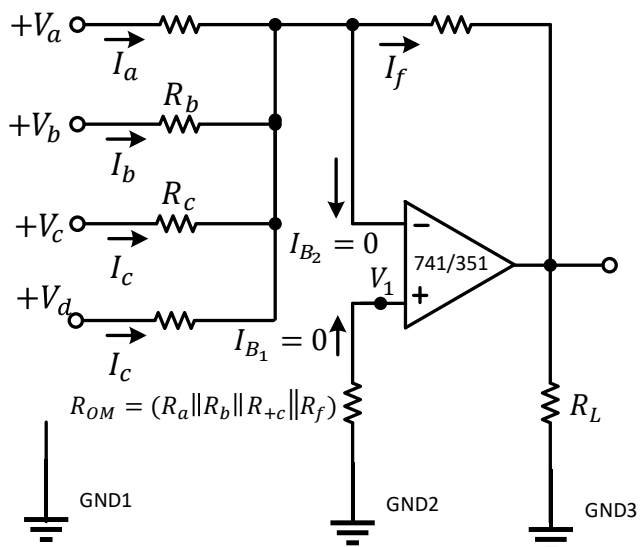
Operational Amplifier adalah penguat yang memiliki kemampuan yang sangat baik, harga *relative* murah, bentuk kompak, konsumsi energi rendah. Penguat ini sering disebut sebagai penguat multiguna karena kemampuan tersebut. Penggunaan penguat ini dapat digunakan sebagai penguat, audio, menguat instrumentasi, penguat sinyal-sinyal kecil, dan mikro hanya dengan mengatur *gain* yang sangat lebar. Dalam menganalisis *Operational Amplifier* diasumsikan bahwa Op-Amp dalam kondisi ideal, artinya impedansi input sangat tinggi yang

menyebabkan tidak ada arus yang menuju Op-Amp tersebut. Dan beda potensial pada pin masukan antara positif dan negatif tidak ada atau selisih tegangan input sama dengan nol.

Penggunaan Op-Amp dapat berupa rangkaian *inverting*, *non-inverting*, penjumlahan, pengurangan, pembagi tegangan, sebagai rangkaian penyangga, penguat *unity* dan lain sebagainya, serta memiliki kemampuan yang dapat digunakan sebagai rangkaian kaskade atau rangkaian operasional bertingkat dua tiga dan sesuai dengan kebutuhan.

Latihan-Latihan

1. Jika kita memiliki sebuah rangkaian seperti pada gambar 3.1 Dapatkan impedansi masukan *loop* tertutup $v_I = 10$ volt $r_{in} = 10$ Kohm.
2. Bila kita memiliki rangkaian penguat *non-inverting* agar menjadi penguat *unity* atau menjadi penguat satuan jika $RF = 0$. Buatlah rangkaian tersebut.
3. Bila diketahui sebuah rangkaian seperti pada rangkaian 3.57 dapatkan persamaan penjumlahan dari rangkaian tersebut?
4. Bila diketahui sebuah rangkaian diferensial seperti pada gambar 3.38 dengan nilai $C1 = 1\text{mF}$ dan $R = 1$ Kohm, Sedangkan sumber tegangan adalah ± 15 Volt, dengan sinyal awal adalah 0 volt, Tentukan tegangan keluaran dari rangkaian tersebut jika $V_i = 10$ volt selama 1 detik.



Gambar 3.62 Rangkaian Op-Amp Penjumlah

BAB
4**OPERATIONAL AMPLIFIER**
SEBAGAI FILTER**4.1. Pendahuluan**

Filter berfungsi memisahkan antara frekuensi satu dari dua atau lebih frekuensi yang masuk, di mana hanya satu frekuensi yang akan dibuang dan yang lainnya dilewatkan hal ini sangat tergantung dari konfigurasi filter yang digunakan. Filter adalah suatu rangkaian yang dapat digunakan untuk membuang sinyal tegangan yang tidak dikehendaki pada frekuensi tertentu. Ada juga yang mendefinisikan Filter adalah suatu *device* yang memilih sinyal listrik berdasarkan pada frekuensi yang di pilih dari sinyal tersebut. Filter akan melewatkan gelombang/sinyal listrik pada batasan frekuensi tertentu sehingga apabila terdapat sinyal/gelombang listrik dengan frekuensi yang lain (tidak sesuai dengan spesifikasi filter) tidak akan dilewatkan.

Pada buku ini menggunakan istilah *Operational Amplifier*, pada judul atau gambar bila tidak disebutkan penguatannya maka rangkaian *Operational Amplifier* tersebut adalah *Operational Amplifier non-inverting* atau rangkaian *Operational Amplifier* yang tidak membalik.

Filter terbagi ke dalam 2 kelompok besar, yaitu filter aktif dan filter pasif. Pada filter pasif umumnya hanya menggunakan R,C atau L, sehingga kualitas filter kurang baik, atau bahkan masih mengandung *noise*, hal ini disebabkan karena tidak ada komponen penguat Op-Amp, sehingga penguatan untuk filter (A) jenis ini

adalah lebih besar atau sama dengan satu $A \leq 1$. Komponen penyusun dari sebuah filter adalah induktor, kapasitor, dan resistor yang disusun sedemikian hingga menjadi sebuah filter. Filter dapat dipergunakan pada frekuensi tinggi. Sedangkan pada filter aktif menggunakan komponen R,C dan komponen aktif seperti transistor maupun Op-Amp, Karena menggunakan komponen aktif, maka hasil filter lebih baik dikarenakan pada filter ini terdapat suatu komponen yang digunakan sebagai penguat sinyal dan tegangan. Pada bagian buku ini berfokus pada filter aktif secara keseluruhan namun dasar konsep filter dibahas secara umum, lebih banyak membahas penggunaan *Operational Amplifier* sebagai filter aktif. Penguatan untuk filter aktif biasanya lebih besar sama dengan satu. Keuntungannya dari filter aktif adalah ukurannya yang lebih kecil, ringan, lebih murah, dan lebih fleksibel dalam perancangannya. Sedangkan kekurangan dari filter aktif adalah membutuhkan catu daya eksternal, lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan, dan frekuensi kerja yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik komponen aktifnya.

Pada dasarnya filter dapat dikelompokkan berdasarkan *response* (tanggapan) frekuensinya menjadi 4 jenis:

1. Filter Lolos Rendah/*Low Pass Filter*.
2. Filter Lolos Tinggi/*High Pass Filter*.
3. Filter Lolos Rentang/*Band Pass Filter*.
4. Filter Tolak Rentang/*Band stop Filter or Notch Filter*.

4.2. Pasif Filter Lolos Rendah (FLR)

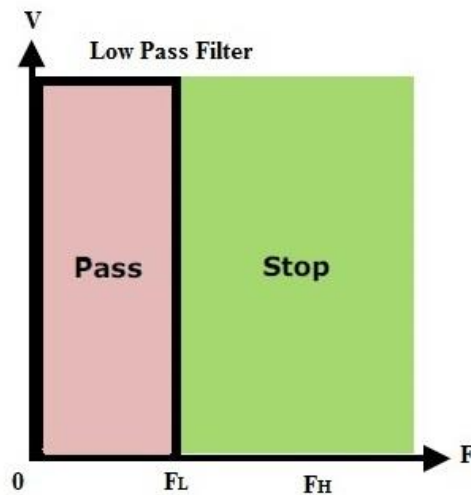
4.2.1. Dasar Filter Lolos Rendah (FLR)

Definisi dari Filter Lolos Rendah (FLR) atau RC Integrator adalah suatu *device* elektronika berupa komponen pasif seperti Resistor, Induktor, maupun Kapasitor yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk melewatkan frekuensi rendah dan menahan frekuensi tinggi.

Dalam kasus ideal filter lolos rendah, kurva respons frekuensi turun pada frekuensi *cut-off*. Praktis sinyal tidak akan turun secara tiba-tiba tetapi turun secara bertahap dari daerah transisi ke daerah stop band. Frekuensi *cut-off* berarti titik di mana respons turun -3 dB atau 70,7% dari *pass band*. Daerah transisi berarti daerah di mana *fall-off* terjadi.

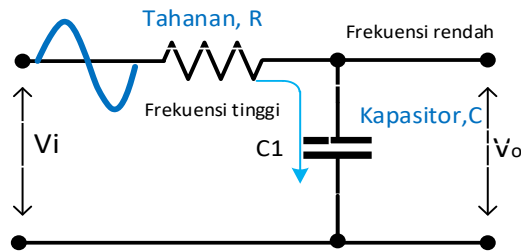
Daerah *stop band* berarti daerah di mana redaman terjadi sebagian besar pada sinyal input. Jadi filter ini disebut juga filter *high-cut* atau *filter treble cut*.

Respons yang ideal ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 4.1 Respons Filter Lolos Rendah

Filter Lolos Rendah (FLR) atau RC Integrator sederhana dapat dirancang hanya dengan menggunakan komponen kapasitor dan resistor yang dipasang secara seri seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.2 Filter Lolos Rendah (FLR) atau RC Integrator

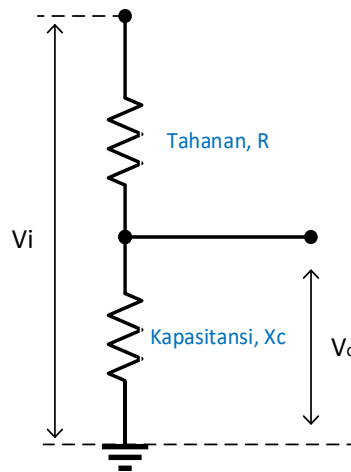
Pada Gambar 4.2 rangkaian terdiri dari sebuah resistor di mana kapasitor terdapat reaktansi kapasitif yang dilambangkan dengan simbol X_C dengan nilai reaktansi kapasitif pada suatu rangkaian AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{j\omega C} \dots\dots\dots (4.1)$$

Satuan X_C adalah Ohm (Ω).

Reaktansi kapasitif pada kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi. Perlawanan aliran arus dalam suatu rangkaian AC dinamakan impedansi disimbolkan dengan symbol Z . Impedansi ini digunakan sebagai pengganti rangkaian seri antara kapasitor dan resistor yang dihubungkan secara seri. Dan dirumuskan,

$$Z = \sqrt{X_C^2 + R^2} \dots\dots\dots (4.2)$$



Gambar 4.3 Pembagian Tegangan pada Filter Lolos Rendah

Jika pada gambar 4.3 diberikan rangkaian ekuivalen maka untuk menghitung tegangan keluaran dari rangkaian tersebut dapat digunakan analisis rangkaian listrik yaitu pembagian tegangan. Perhatikan gambar 4.2. dan dapat dianalogikan dengan Gambar 4.3 berikut.

Dari gambar 4.3 dapat dinyatakan sebagai berikut;

$$V_o = \frac{X_c}{R+X_c} V_i \dots\dots\dots(4.3)$$

$R + X_c$ dapat digantikan dengan $Z = \sqrt{X_c^2 + R^2}$ sehingga menjadi

$$V_o = \frac{X_c}{\sqrt{X_c^2 + R^2}} V_i \dots\dots\dots(4.4)$$

Sehingga untuk penguatan Filter Lolos Rendah perbandingan antara keluaran dan masukan menjadi:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \dots\dots\dots(4.5)$$

Lihat persamaan (4.1)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \dots \dots \dots (4.6)$$

Dengan, $\omega C = \frac{1}{R_c}$, $\omega = 2\pi f$ sehingga,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \dots \dots \dots (4.7)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}} \dots \dots \dots (4.8)$$

Jika nilai $X_C = R$, maka pada keadaan ini terdapat frekuensi *cut-off* yaitu frekuensi yang digunakan untuk membatasi antara frekuensi yang akan dilewatkan oleh FLR

Jika $f < f_c$ frekuensi f akan dilewatkan dan jika $f > f_c$ maka frekuensi tersebut akan diblok.

Nilai frekuensi *cut-off* dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Sedangkan pergeseran fasa dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\varphi = -\tan^{-1} 2\pi f RC \dots \dots \dots (4.9)$$

Jadi dengan demikian magntudanya adalah:

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2}} \dots \dots \dots (4.10)$$

$$A = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2}} \dots \dots \dots (4.11)$$

dengan

f = frekuensi masukan

f_c = frekuensi *cuff off* atau frekuensi pojok

Magnitudo (dB)nya adalah $20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right)$

Jika $\omega = \omega_c$, maka persamaan 4.10 didapatkan magnitudenya adalah:

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7070 = 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{ dB} \dots \dots \dots (4.12)$$

4.2.2. Kasus 4.1 Simulasi Filter Pasif FLR (FPFLR)

Jika kita memiliki sebuah rangkaian Filter Lolos Rendah yang terdiri dari $R=4K7 \Omega$ yang di pasang seperti pada Gambar 4.2 dengan kapasitor $47nF$, sumber masukan adalah sinyal sinusoidal dengan amplitudo 10 volt. Hitung tegangan Keluaran (V_o) pada frekuensi 100 herz

Penyelesaian

Perhatikan Gambar 4.2 dan persamaan (4.1), (4.2) dan persamaan (4.4) dan diketahui $R=4K7 \Omega$, $C = 47nF$.

Pada frekuensi 100 hz.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{j\omega c} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 100 \text{ Hz} \times 47nF} = 33879 \Omega = 33,879K\Omega$$

$$Z = \sqrt{33879^2 + 4700^2} = 34114,31 \Omega$$

$$V_o = \frac{X_c}{\sqrt{X_c^2 + R^2}} V_i = \frac{33879 \Omega}{34114,31 \Omega} 10V = 9,9 \text{ Volt.}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 4,700 \times 0.000047} = 720,85 \text{ Hz.}$$

$$A = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{100}{720,85} \right)^2}} = 0,9437$$

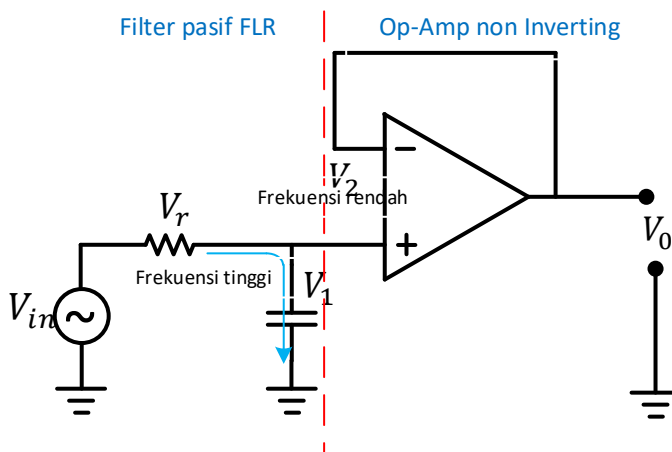
Sehingga $V_o = A.V_i = 0,9437 \times 10 = 9,437 \text{ Volt.}$

4.3. Filter Aktif Lolos Rendah (FA FLR)

Atenuasi sinyal yaitu amplitudo sinyal keluaran lebih kecil dari amplitudo sinyal masukan dalam rangkaian pasif. Untuk

mengatasi kelemahan filter pasif ini, maka diperkenalkan sebuah filter aktif. Filter Pasif Lolos Rendah yang terhubung ke Op-Amp pembalik atau non-pembalik memberi kita Filter Aktif Lolos Rendah yang sederhana. Komponen amplifier pada rangkaian filter ini akan meningkatkan amplitudo sinyal keluaran. Dengan tindakan penguat ini, sinyal keluaran akan menjadi lebih lebar atau lebih sempit. Respons frekuensi maksimum filter tergantung pada amplifier yang digunakan dalam desain rangkaian.

Filter aktif orde pertama dibentuk oleh Op-Amp tunggal dengan rangkaian RC. Filter Pasif RC sederhana yang terhubung ke terminal non-pembalik dari penguat operasional ditunjukkan pada Gambar 4.4. Impedansi keluaran dari Op-Amp yang terhubung dalam rangkaian selalu rendah. Rangkaian ini akan memberikan stabilitas tinggi untuk menyaring. Kelemahan utama dari konfigurasi ini adalah penguatan tegangan adalah satu. Bahkan untuk rangkaian ini juga daya keluarannya tinggi karena impedansi masukannya rendah.



Gambar 4.4 Filter Aktif Filter Lolos Rendah

Pada Gambar 4.4 merupakan gambar yang terdiri dari dua buah rangkaian yaitu sisi pertama adalah rangkaian filter lolos rendah (FLR) dan sisi kanan adalah penguat *Op-Amp non-inverting* dengan penguatan *unity*/memiliki umpan balik bernilai satu. Rangkaian ini apabila di berikan sinyal masukan dengan frekuensi campuran maka sinyal dengan frekuensi tinggi akan di alirkan melalui kapasitor dan di bumikan. Untuk frekuensi rendah akan di teruskan ke penguat Ap-Amplifier dan diproses oleh Op-Amp. Untuk dapat menganalisis rangkaian di atas dapat dilakukan dengan dua tahapan yaitu tahap pertama pada rangkaian FLR seperti dilihat penguraian persamaan pada kasus 1. Sedangkan pada sisi kanan yaitu pada Op-Amp seperti pada bab 3 sudah di uraikan. Dan kita akan mengulangi secara global sebagai berikut:

Seperti kita ketahui sebelumnya bahwa penguatan DC pada rangkaian Op-Amp *non-inverting* adalah:

$$\text{DC Gain} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \dots \dots \dots (4.13)$$

Sedangkan untuk penguatan tegangan persamaan (4.11),

$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Dengan penguatan Op-Amp adalah *unity* atau satu.

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, < f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 1$

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, = f_c$ maka

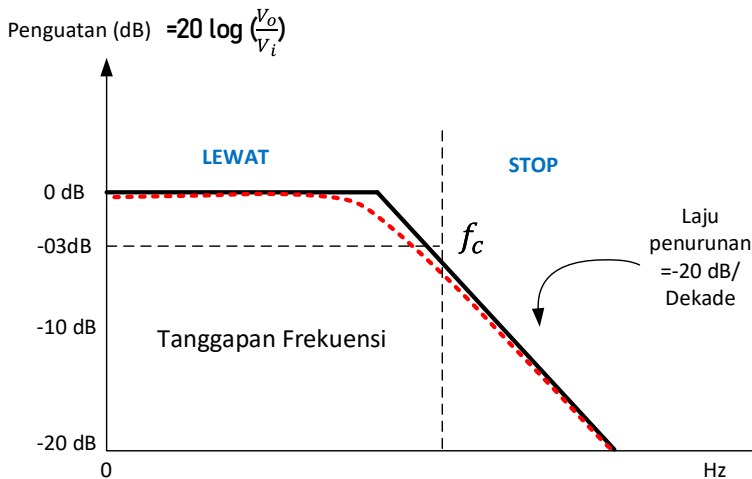
$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7070$$

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, > f_c$ maka

$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} < 1.$$

Jika $f=10 f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}} = \frac{1}{10} = 10^{-1} = 20 \log 10^{-1} = -20 \text{ dB}$

Jika $f=100f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{100}\right)^2}} = \frac{1}{10} = 10^{-2} = 20 \log 10^{-2} = -40 \text{ dB}$



Gambar 4.5 Tanggapan Frekuensi Filter Lolos Rendah

Laju penurunan dapat di hitung dengan mengurangi selisih penguatan sebagai berikut:

$$\frac{-40 - (-20) \text{ dB}}{\text{Dekade}} = -20 \text{ dB/dekade}$$

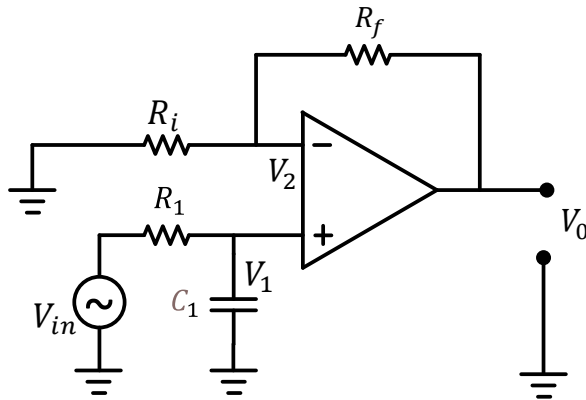
Sehingga bila di gambarkan maka dapat digambarkan seperti pada gambar 4.4.

Rangkaian pada Gambar 4.4. dapat dimodifikasi dengan model yang memiliki penguatan sebagai berikut:

Dengan melihat persamaan (4.13) DC Gain = $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$,

Sedangkan untuk penguatan tegangan persamaan (4.14),

$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (4.14)$$



Gambar 4.6 Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat

Dengan penguatan Op-Amp sesuai persamaan (4.13)

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, < f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = A_F$

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, = f_c$ maka
 $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7070 A_F$

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, > f_c$ maka
 $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| < A_F.$

Jika $f=10 f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}} = \frac{1}{10} = 10^{-1} = 20 \log$
 $10^{-1} = -20 \text{ dB}$

Jika $f=100 f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{100}\right)^2}} = \frac{1}{10} = 10^{-2} = 20 \log$
 $10^{-2} = -40 \text{ dB}$

Laju penurunan dapat di hitung dengan mengurangi penguatan sebagai berikut:

$$\frac{-40 - (-20) \text{dB}}{\text{Dekade}} = -20 \text{ dB/dekade}$$

Memiliki bentuk yang sama walau dengan penguatan.

4.3.1. Kasus 4.2 Simulasi Filter Lolos Rendah dengan Op-Amp

Rencanakan sebuah rangkaian Filter Lolos Rendah dengan penguatan 10 kali dengan frekuensi rendah atau frekuensi kritis 150 hz. Rangkaian impedansi input 10 KOhm.

Penyelesaian

Perhatikan Gambar 4.6 dengan menggunakan persamaan penguatan pada persamaan 4.13 didapat sebagai berikut:

$$\text{DC Gain} = A = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right), = 10 = \left(1 + \frac{R2}{10 K}\right), = \frac{10 K}{10 K} + \frac{R2}{10 K} = 10.$$

Jika A= 10, dan R1= 1 Kohm, maka, R2 = 9 K Ohm.

Frekuensi kritis, sesuai persamaan.

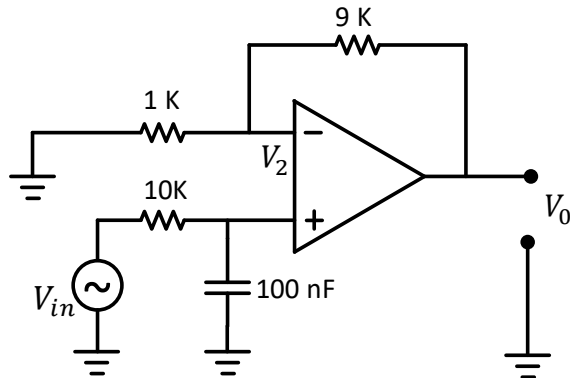
$$f_c = \frac{1}{R_3 C_1},$$

Di mana, diketahui, $f_c = 150 \text{ hz}$, $R_i = 10 \text{ Kohm}$.

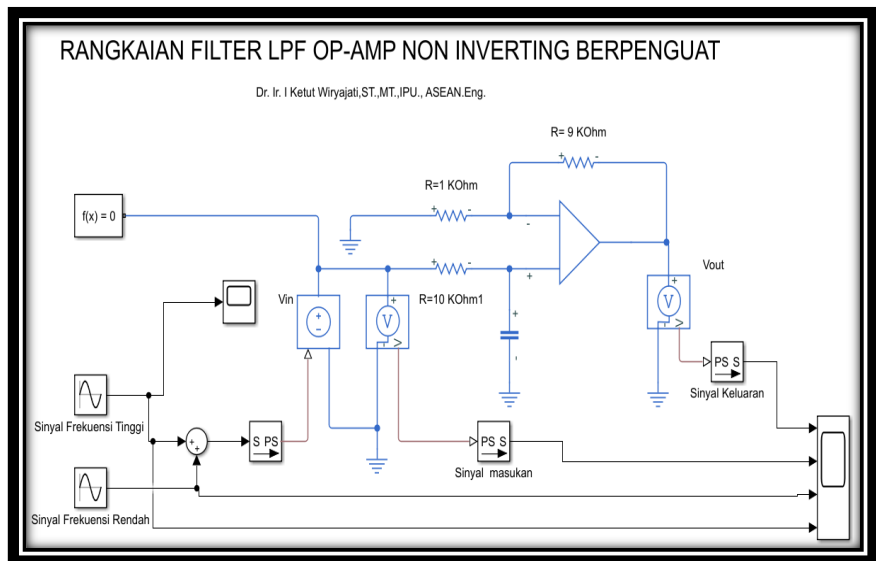
$$150 = \frac{1}{10000 \times C_1}$$

$$C_1 = 100 \text{ nF},$$

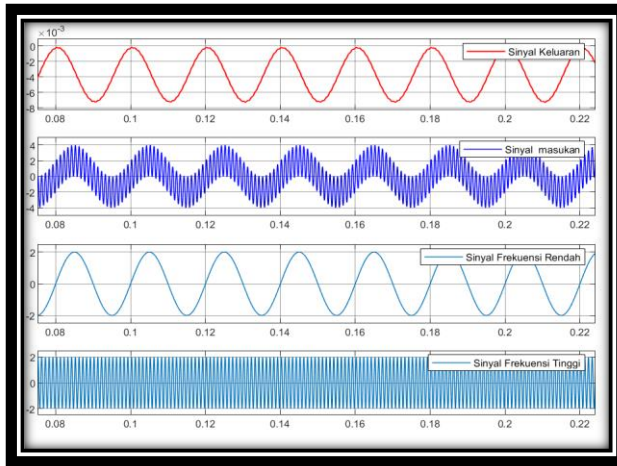
Sehingga rangkaian dapat di bentuk sebagai berikut:



Gambar 4.7 Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat pada Kasus 4.2



Gambar 4.8 Filter Lolos Rendah dengan Penguat pada Kasus 4.2

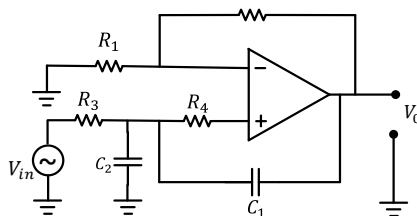


Gambar 4.9 Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah dengan Penguat pada kasus 4.2

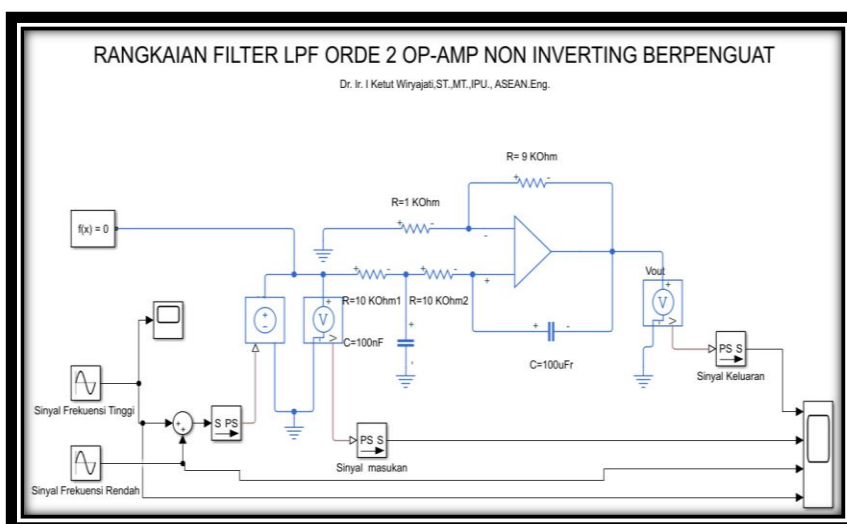
4.3.2. Kasus 4.3 Simulasi Filer Lolos Rendah dengan Op-Amp Orde Dua

Bila diketahui sebuah rangkaian seperti pada gambar 4.10. Tentukan fungsi alih dari rangkaian tersebut dan tentukan bentuk gelombang keluaran, Gambarkan diagram Bode, Niquist dari rangkaian tersebut.

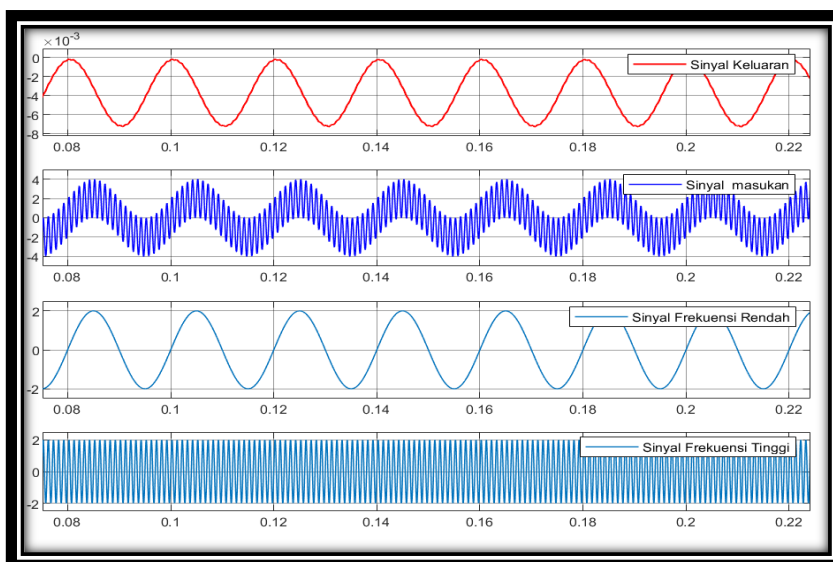
4.4. Filter Lolos Rendah Orde dua



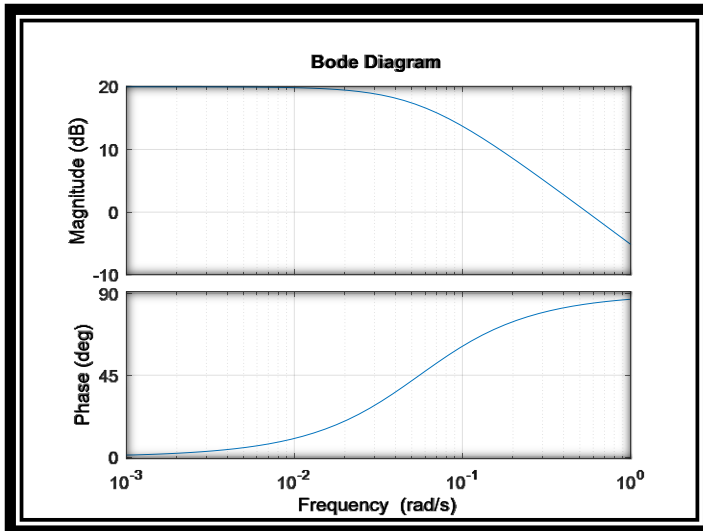
Gambar 4.10 Rangkaian Lolos Rendah dengan Penguat Orde Dua



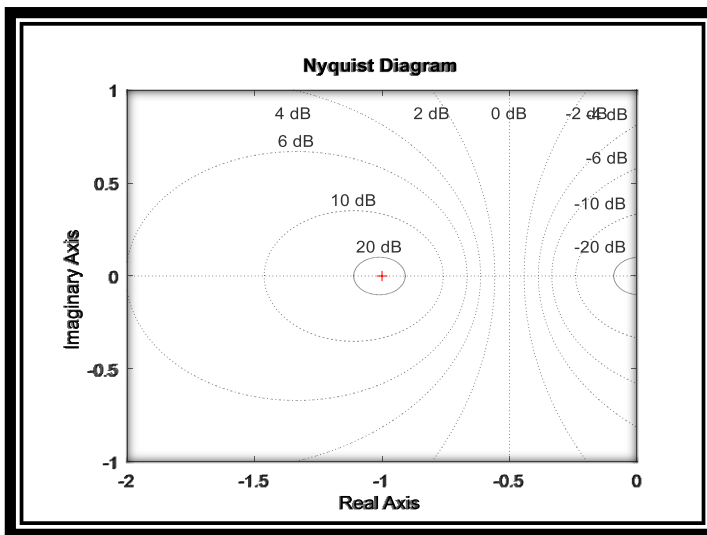
Gambar 4.11 Filter Lolos Rendah dengan Penguat Orde Dua



Gambar 4.12 Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah Kasus 4.3



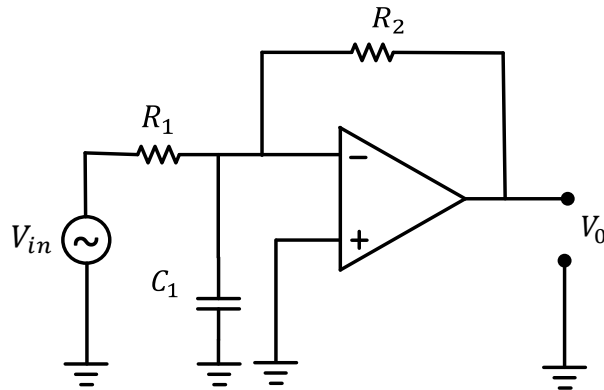
Gambar 4.13 Bentuk Keluaran Filter Lolos Rendah Kasus 4.3



Gambar 4.14 Diagram Nyquist Filter Lolos Rendah Kasus 4.3

4.5. Filter Lolos Rendah (FLR) *Inverting*

Filter ini terdiri dari sebuah *Operational Amplifier* dengan penguat *inverting* dengan komponen pasif berupa resistor dan kapasitor dirangkaikan sedemikian hingga membentuk sebuah filter lolos rendah dan di berikan penguat *Operational Amplifier* perhatikan gambar 4.15. dengan V_{in} sebagai input dan V_o sebagai keluaran (*output*). Bila diberikan masukan dengan sinyal sinusoidal maka keluaran akan menjadi kebalikannya yaitu fasa akan terbalik besar pembalikannya dipengaruhi oleh besarnya nilai resistor umpan balik yang di pasang. Dengan demikian penguatan dipengaruhi juga oleh penguatan tegangan dari *Operational Amplifier* tersebut. Secara umum gambar rangkaian filter lolos rendah dengan penguat operasional diperlihatkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.15 Filter Lolos Rendah Kasus *Inverting*

Seperti kita ketahui sebelumnya pada bab 3 bahwa penguatan DC pada rangkaian Op-Amp *inverting* adalah:

$$\text{DC Gain} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \dots \dots \dots (4.15)$$

Sedangkan untuk penguatan tegangan persamaan (4.11),

$$A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Dengan penguatan Op-Amp adalah *unity* atau satu.

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, \ll f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 1$

Jika pada frekuensi masukan rendah $f, = f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7070$

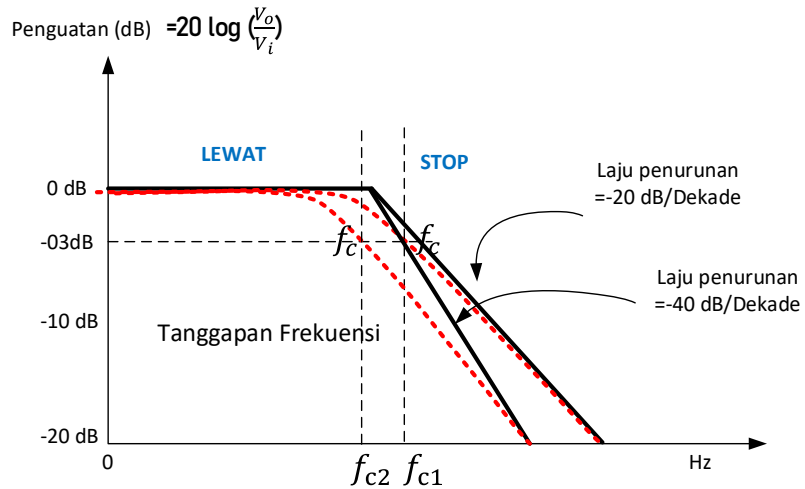
Jika pada frekuensi masukan rendah $f, \gg f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} < 1$.

Jika $f=10 f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{10}\right)^2}} = \frac{1}{10} = 10^{-1} = 20 \log 10^{-1} = -20 \text{ dB}$

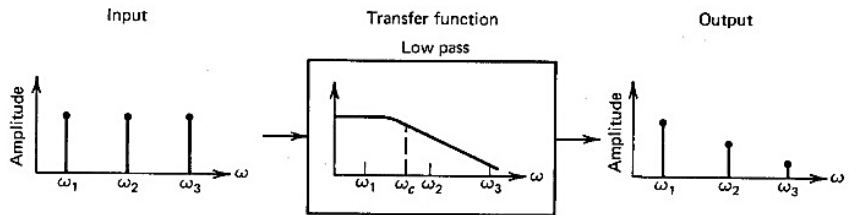
Jika $f=100f_c$ maka $A_v = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{100}\right)^2}} = \frac{1}{100} = 10^{-2} = 20 \log 10^{-2} = -40 \text{ dB}$

Laju penurunan dapat di hitung dengan mengurangkan selisih penguatan sebagai berikut:

$$\frac{-40 - (-20) \text{ dB}}{\text{Dekade}} = -20 \text{ dB/dekade}$$



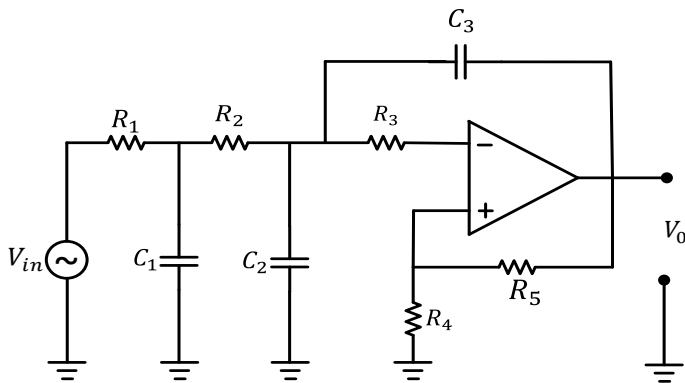
Gambar 4.16 Respons Frekuensi Filter Lolos Rendah Orde Dua



Gambar 4.17 Spektrum Umum Keluaran dari FLR

Gambar 4.17 menunjukkan blok diagram dalam ruang frekuensi, masukan, plan & keluaran berbentuk *spectrum* (ruang frekuensi, dalam ruang frekuensi maka operasi untuk menghasilkan spektrum keluaran sama dengan spektrum masukan dikalikan dengan spektrum plan.

Pada Gambar 4.18 menunjukkan contoh Filter Aktif Lolos Rendah dengan menggunakan sebuah *Operational Amplifier*.



Gambar 4.18 Filter Aktif Lolos Rendah Orde tiga

4.6. Aplikasi Filter Lolos Rendah

Dalam Bidang elektronik filter lolos rendah banyak digunakan dalam banyak aplikasi. Filter dapat digunakan sebagai filter pengurangan desis di speaker audio, dapat pula untuk mengurangi desis pada frekuensi tinggi yang dihasilkan dalam sistem, pada *equalizer* dan *amplifier* audio selain itu dapat dipergunakan untuk input untuk subwoofer. Dalam konversi analog ke digital ini digunakan sebagai filter *anti-aliasing* untuk mengontrol sinyal. Dalam filter digital ini digunakan untuk mengaburkan gambar, menghaluskan set sinyal data. Dalam pemancar radio untuk memblokir emisi harmonik. Dalam akustik filter ini digunakan untuk menyaring sinyal frekuensi tinggi dari transmisi suara yang akan menyebabkan gema pada frekuensi suara yang lebih tinggi.

4.7. Filter Lolos Tinggi (FLT)

4.7.1. Dasar Filter Lolos Tinggi

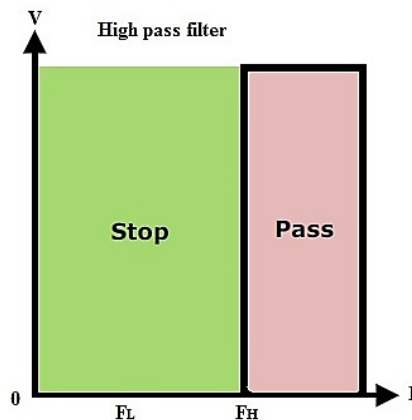
Seperti namanya, Filter Lolos Tinggi (FLT) hanya mengizinkan komponen frekuensi tinggi dari sinyal yang di

lewatkan atau di loloskan, sementara Filter Lolos Tinggi akan membatasi komponen frekuensi rendah. Bagian aktif dari nama tersebut merupakan indikasi bahwa filter tersebut menggunakan komponen aktif seperti Transistor, Op-Amp dan lain sebagainya yang digunakan untuk merancang filter.

Sebuah filter lolos tinggi akan memungkinkan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *cut-off* dan melemahkan frekuensi lebih rendah dari frekuensi *cut off*. Dalam beberapa kasus, filter ini juga disebut sebagai filter '*Low-Cut*' atau filter '*Base-cut*'. Jumlah atenuasi atau rentang *band pass* akan tergantung pada parameter desain filter.

Gain pass band dari filter aktif lebih dari satu *gain*. Pengoperasian filter aktif lolos tinggi sama dengan filter lolos tinggi pasif, tetapi perbedaan utamanya adalah filter aktif lolos tinggi menggunakan penguat operasional, yang memberikan penguatan sinyal keluaran dan mengontrol penguatan.

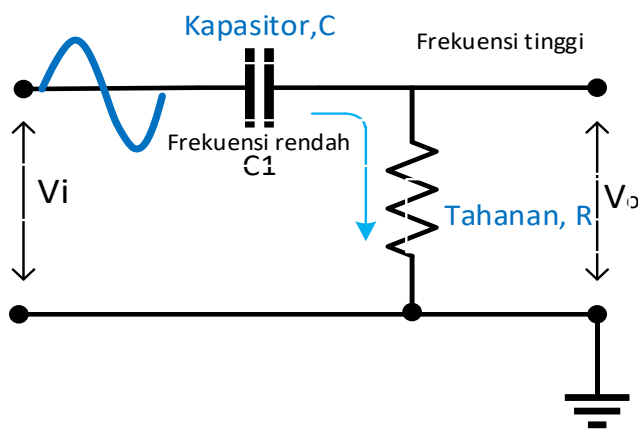
Karakteristik ideal dari filter lolos tinggi ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Karakteristik Umum Filter Lolos Tinggi

Pada Gambar 4.20 rangkaian terdiri dari sebuah kapasitor dan sebuah resistor di mana kapasitor terdapat reaktansi kapasitif yang dilambangkan dengan simbol X_c dengan nilai reaktansi kapasitif pada suatu rangkaian AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

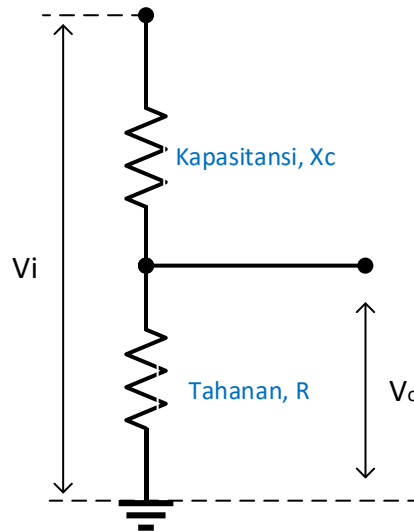
$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{j\omega c} \dots \dots \dots (4.16)$$



Gambar 4.20 Rangkaian Dasar Filter Lolos Tinggi

Reaktansi kapasitif pada kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi. Perlawanan aliran arus dalam suatu rangkaian AC dinamakan impedansi disimbolkan dengan symbol Z . Impedansi ini digunakan sebagai pengganti rangkaian seri antara kapasitor dan resistor yang dihubungkan secara seri. Dan dirumuskan, seperti pada (4.2) dan di tulis kembali pada persamaan (4.17)

$$Z = \sqrt{X_c^2 + R^2} \dots \dots \dots (4.17)$$



Gambar 4.21 Rangkaian Dasar Filter Lolos Tinggi

Gambar 4.21 adalah rangkaian ekuivalen dari filter lolos tinggi maka untuk menghitung tegangan keluaran dari rangkaian tersebut dapat digunakan analisis rangkaian listrik yaitu pembagian tegangan.

$$V_o = \frac{R}{R+X_c} V_i \dots\dots\dots (4.18)$$

$R + X_c$ dapat digantikan dengan $Z = \sqrt{X_c^2 + R^2}$ sehingga menjadi

$$V_o = \frac{R}{\sqrt{X_c^2 + R^2}} V_i \dots\dots\dots (4.19)$$

Sehingga untuk penguatan Filter Lolos Tinggi perbandingan antara keluaran dan masukan menjadi:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \dots\dots\dots (4.20)$$

sehingga

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{R}{Z} \dots\dots\dots(4.21)$$

Jika nilai $X_c = R$, maka pada keadaan ini terdapat frekuensi *cut-off* yaitu frekuensi yang digunakan untuk membatasi antara frekuensi yang akan dilewatkan oleh FLT.

Jika pada frekuensi rendah f : X_c mendekati takberhingga maka tegangan keluaran sama dengan nol.

Jika pada frekuensi tinggi f : X_c mendekati nol maka tegangan keluaran sama dengan Tegangan masukan.

Nilai frekuensi *cut-off* dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \dots\dots\dots(4.22)$$

Sedangkan untuk pergeseran fasa dapat di hitung dengan persamaan berikut:

$$\phi = \text{atan} \frac{1}{2\pi RC} \dots\dots\dots(4.23)$$

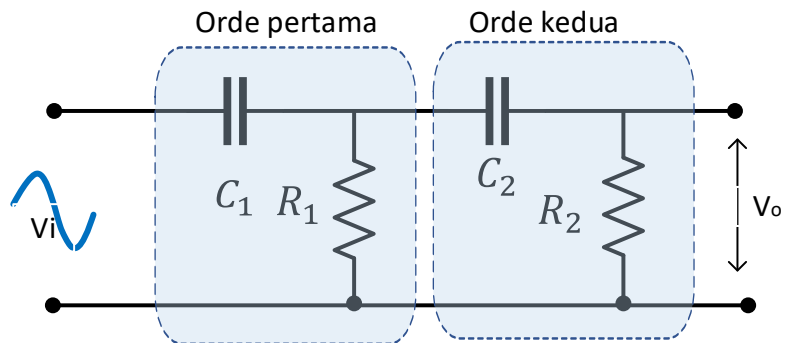
Berikut diilustrasikan Filter Lolos Tinggi dua tingkat pada Gambar 4.22.

Dari Gambar 4.22 filter lolos tinggi dengan komponen RC, Kapasitor (C) yang merupakan komponen reaktif ini akan menawarkan resistansi yang berbeda terhadap sinyal frekuensi yang berbeda yang masuk melaluinya. Kapasitansi dari kapasitor akan tinggi terhadap sinyal frekuensi rendah atau sinyal DC sedangkan resistansi rendah terhadap sinyal frekuensi tinggi. Karena dengan karakteristik kapasitor yang bereaktansi tinggi terhadap sinyal frekuensi rendah atau sinyal DC, Kapasitor tersebut akan menghalangi sinyal frekuensi rendah untuk melewatinya sehingga hanya sinyal frekuensi tinggi saja yang berhasil melewati kapasitor tersebut. Kapasitor jenis ini juga

berfungsi sebagai Kapasitor kopling (*Coupling Capacitor*) karena melewatkan sinyal AC tetapi memblokir sinyal DC.

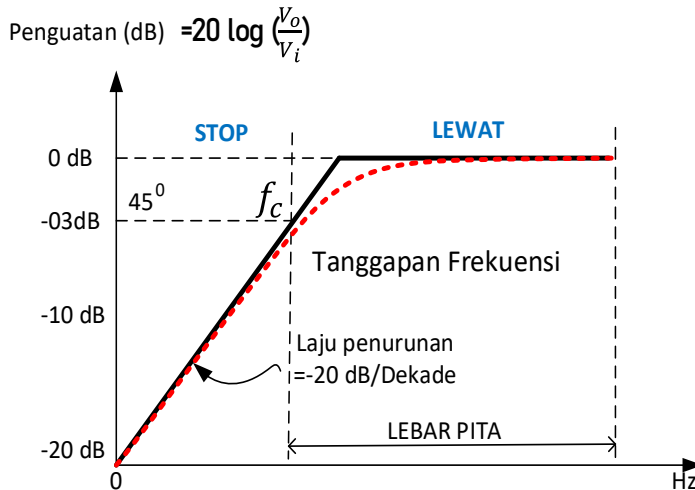
Masukan pada orde pertama menjadi keluaran pada orde pertama melalui deferensiator C_1R_1 , keluaran orde pertama menjadi masukan pada orde kedua melalui C_2 dan keluaran pada R_2 adalah keluaran dari filter orde kedua. V_o ,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}, \text{ Hz} \dots\dots\dots (4.24)$$



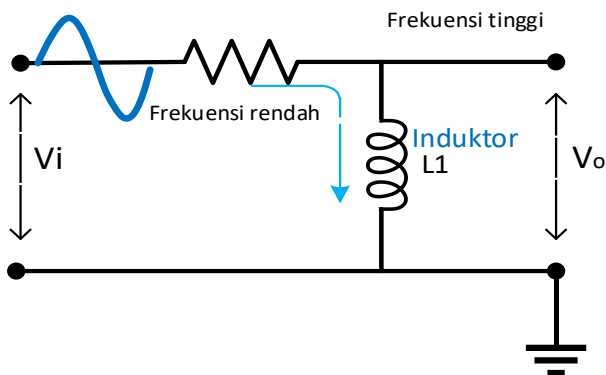
Gambar 4.22 Rangkaian Filter Lolos Tinggi Orde Dua

Respons frekuensi dari filter lolos tinggi seperti pada gambar 4.21 Selain menggunakan komponen pasif RC filter Lolos Tinggi dapat di susun dengan menggunakan komponen pasif R (Resistor) dan L (Induktor), Filter ini tersusun dari RL Filter atau disebut dengan Filter Lolos tinggi yang terdiri dari Resistor dan Induktor yang dapat meneruskan sinyal Frekuensi Tinggi tetapi melemahkan atau memblokir sinyal frekuensi rendah. Untuk membuat sebuah rangkaian *High Pass* RL Filter penempatan komponen, Induktor ditempatkan secara paralel dengan sinyal sumber daya yang memasuki rangkaian.



Gambar 4.23 Respons Frekuensi Filter Lolos Tinggi

Sedangkan Resistor ditempatkan secara seri dengan sinyal-sinyal masukannya seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.24 Rangkaian Filter Lolos Tinggi RL.

Rangkaian di atas adalah rangkaian Filter Lolos Tinggi yang dapat melewati sinyal frekuensi tinggi dan melemahkan sinyal frekuensi rendah. Sama seperti Kapasitor, Induktor juga merupakan komponen yang memiliki reaktansi yang dapat berubah nilainya yang sangat bergantung pada sinyal frekuensi yang melaluinya. Induktor akan melewati sinyal frekuensi rendah dengan reaktansi yang rendah sedangkan frekuensi tinggi yang melalui akan dihambat atau dilemahkan dengan reaktansi yang tinggi. Dengan demikian, sinyal frekuensi rendah akan mudah melewati Induktor sedangkan sinyal frekuensi tinggi akan dilemahkan atau diblokir sebagai keluaran pada rangkaian filter lolos tinggi. Frekuensi kritis pada Filter Lolos Tinggi dengan komponen RL dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \dots\dots\dots (4.25)$$

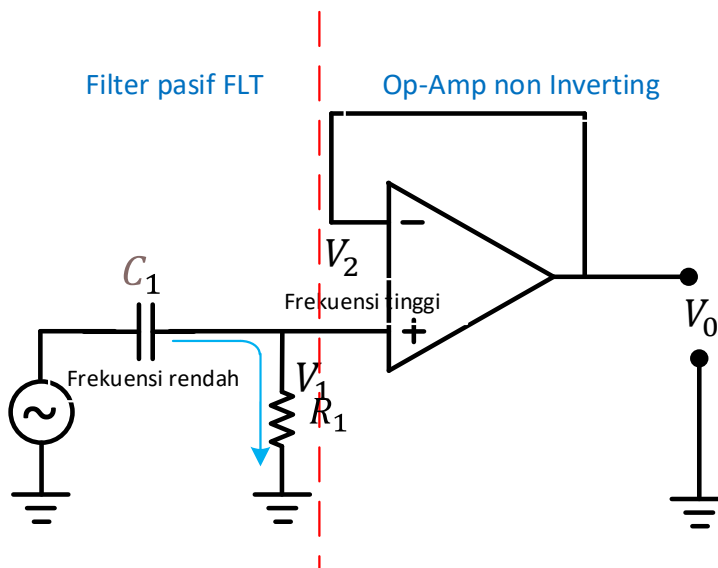
Dengan, f_c = Frekuensi dalam satuan Hz, $\pi = 3.14$, R = Nilai R dalam satuan Ohm (Ω), L = Nilai L dalam satuan Henry (H)
Pergeseran fasa dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\phi = \text{atan} \frac{R}{2\pi L} \dots\dots\dots (4.26)$$

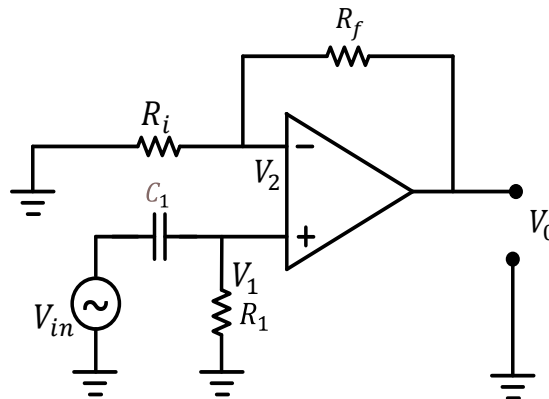
4.7.2. Filter Aktif Lolos Tinggi dengan Penguatan

Filter Aktif Lolos Tinggi dapat di bentuk dengan menggunakan komponen Resistor, *Capasitor* maupun Induktor dan sebuah penguat, secara rinci bentuk Gambar Filter Aktif Lolos Tinggi ditunjukkan pada Gambar 4.22. Cara kerja dari rangkaian Filter Aktif Lolos Tinggi mirip dengan cara kerja Filter Lolos Tinggi Pasif, pada sisi sebelah kiri yang berdekatan dengan sinyal masukan frekuensi rendah (komponen DC) akan di redan oleh Kapasitor. Keluaran dari filter pasif Lolos Tinggi ini akan masuk pada *non-inverting amplifier* sedemikian sehingga frekuensi tinggi dengan frekuensi kritis akan di lewatkan pada penguat *amplifier*

dengan penguatan A_v dalam hal ini menggunakan penguatan dengan umpan balik bernilai satu. Seperti pada Gambar 4.24. Dengan demikian keluaran dari Filter Aktif Lolos Tinggi menjadi V_o . Secara teknis, tidak ada yang namanya Filter Aktif Lolos Tinggi. Tidak seperti pada Passive Filter Lolos Tinggi yang memiliki respons frekuensi "tak terbatas", respons frekuensi *band pass maksimum* dari Filter Aktif Lolos Tinggi dibatasi oleh karakteristik *loop* terbuka atau *bandwidth* dari penguat operasional yang digunakan, membuatnya tampak seolah-olah mereka filter *band pass* dengan *cut-off* frekuensi tinggi ditentukan oleh pemilihan Penguatan dari *Operational Amplifier*.



Gambar 4.25 Rangkaian dasar Filter Aktif Lolos Tinggi dan Aliran Arus



Gambar 4.26 Filter Aktif dengan Penguatan 1 ($R_i = R_f$) dan Frekuensi *Cut*

$$Off f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Operasinya sama dengan filter pasif Lolos Tinggi, tetapi sinyal input diperkuat oleh *amplifier* pada *output* Rangkaian dari Filter Aktif Lolos Tinggi berpenguat diperlihatkan pada Gambar 4.25. Besarnya penguatan tergantung pada penguatan penguat *Operational Amplifier*. Besarnya Penguatan Band Lolos sama dengan $1 + (R_f/R_1)$. Di mana R_f adalah resistor umpan balik dalam (ohm) dan R_i adalah resistor masukan.

Besar penguatan dari rangkaian tersebut dapat ditentukan dengan persamaan berikut;

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_f \left(\frac{f}{f_c}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \dots \dots \dots (4.27)$$

Dengan A_f adalah Penguat dari Filter ($1 + R_f/R_1$), f adalah frekuensi masukan (Hz), f_c adalah frekuensi *cut off* (Hz). Seperti pada Filter Lolos Rendah, Filter Lolos Tinggi dapat di verifikasi dengan persamaan penguatan frekuensi sebagai berikut:

1. Pada $f < f_c$ maka $\frac{V_o}{V_i} < A_f$

2. Pada $f = f_c$ maka $\frac{V_o}{V_i} = \frac{A_F}{\sqrt{2}} = 0,707 A_f$
3. Pada $f > f_c$ maka $\frac{V_o}{V_i} \cong A_f$

Dari pernyataan tersebut dapat dikatakan bahwa Filter Aktif Loos Tinggi penguatannya meningkat dari 0 Hz hingga di bawah frekuensi *cut off*, Sedangkan frekuensi Kritis berada pada laju kemiringan 20 dB/Dekade. Pada penguatan 0.707 A_F dan setelah frekuensi kritis akan di filter dengan penguatan sebesar A_F .

Nilai magnitude Penguatan tegangan (dB) adalah:

$$A_v \text{ (dB)} = 20 \text{ Log } \frac{V_o}{V_i} \dots\dots\dots(4.28)$$

$$\text{Jadi dalam } -3\text{dB} = 20 \text{ Log } (0.707(\frac{V_o}{V_i})) \dots\dots\dots(4.28)$$

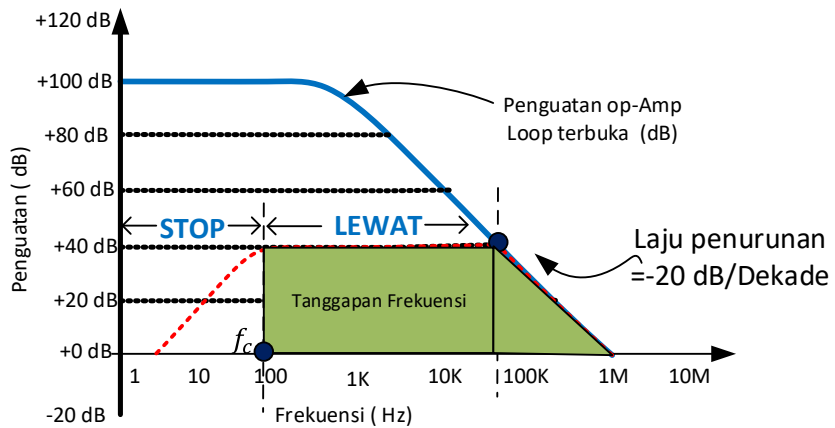
Untuk filter orde pertama, kurva respons frekuensi filter meningkat sebesar 20dB/dekade atau 6dB/oktaf hingga titik frekuensi *cut-off* yang ditentukan yang selalu berada pada -3dB di bawah nilai penguatan maksimum. Seperti rangkaian filter sebelumnya, frekuensi *cut-off* atau *corner* yang lebih rendah (c) dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \text{ Hz} \dots\dots\dots(4.29)$$

Sudut fasa atau pergeseran fasa yang sesuai dari sinyal keluaran sama dengan yang diberikan untuk filter RC pasif dan mengarah pada sinyal masukan. Ini sama dengan +45o pada nilai c frekuensi *cut-off* dan diberikan seperti pada persamaan berikut

$$\emptyset = \text{atan } \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \dots\dots\dots(4.30)$$

Bentuk kurva Respons frekuensi seperti pada gambar 4.26.

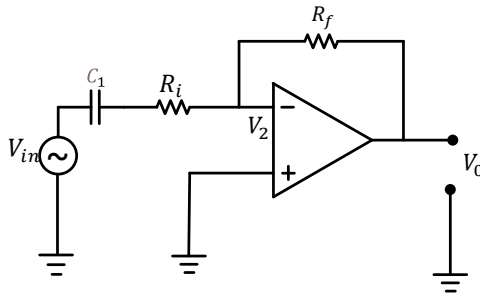


Gambar 4.27 Respons Frekuensi Filter Aktif Lolos Tinggi dengan *Operational Amplifier*.

4.7.3. Filter Aktif Lolos Tinggi *Inverting*

Filter Aktif Lolos Tinggi dengan penguat *inverting* artinya filter pertama akan menjadi sinyal masukan pada penguat dengan menggunakan *Operational Amplifier* yang bersifat *inverting* yaitu membalik. Sinyal masukan pada penguat amplifier di geser phasanya sebesar 180° . Untuk menganalisis rangkaian ini dapat dilakukan dengan analisis Op-Amp pasih dan dilanjutkan dengan *Operational Amplifier*.

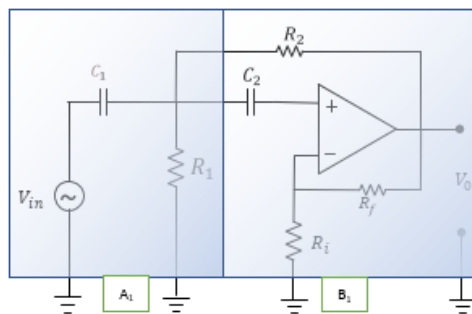
Lebih jelas perhatikan gambar berikut:



Gambar 4.28 Filter Aktif Lolos Tinggi Op-Amp *Inverting*

4.7.4. Filter Aktif Lolos Tinggi (FLR) orde Tinggi

Dalam merancang Filter Aktif orde dua laju kemiringan pada orde satu adalah 20dB/Dekade bila dihubungkan seri maka akan bertambah menjadi dua kali lipat yaitu 40 dB/decade. Model perancangan dapat ditentukan dengan menggunakan kombinasi komponen pasif dan komponen aktif, filter ini akan menjadi bepenguat dua kali lipat bila orde ditingkatkan. Secara rinci dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.29 Filter Aktif Lolos Tinggi Orde Dua

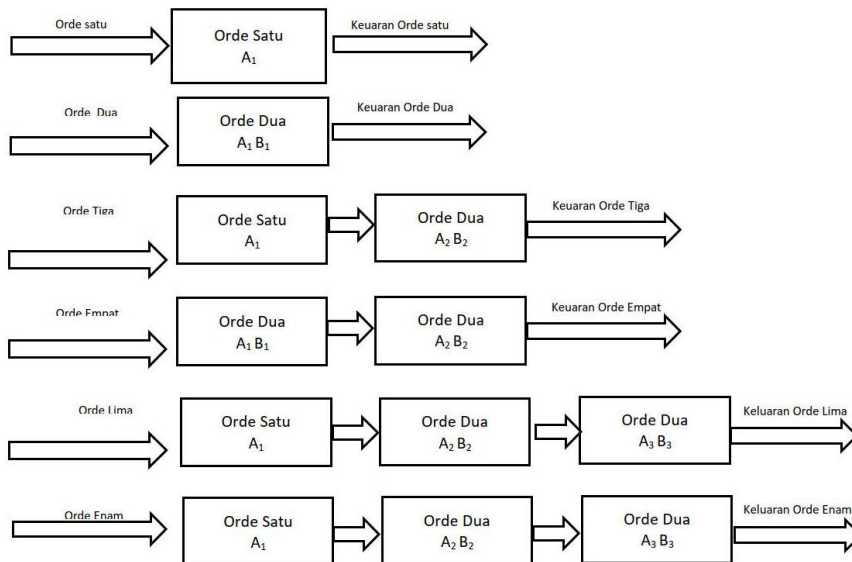
Persamaan:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i} \dots\dots\dots (4.31)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2RC_1C_2}} \dots\dots\dots (4.32)$$

4.7.5. Filter Aktif Lolos Tinggi Bertingkat

Demikian juga halnya dengan filter Lolos Rendah Pada Filter lolos, konfigurasi dapat dilakukan agar mendapatkan penguatan yang memiliki orde tinggi, Langkah yang di tempuh adalah dengan melakukan konfigurasi secara bertahap. Filter Lolos Tinggi Tingkat Dua diperoleh dengan menghubungkan secara seri dua buah Filter orde Satu, dan akan di dapat keluaran filter dengan orde dua. Filter orde tiga didapatkan dengan menjumlahkan atau memasang seri filter orde satu dengan orde dua sehingga keluaran menjadi filter orde tiga, Filter orde empat diperoleh dengan menghubungkan seri dua buah filter orde dua secara seri, sedemikian seterusnya. Ilustrasi secara rinci diperhatikan Gambar 4. 29.



Gambar 4.30 Konfigurasi Filter Lolos Tinggi Tingkat Tinggi

4.7.6. Penerapan Filter Lolos Tinggi

Filter Lolos Tinggi merupakan penyaring frekuensi yang banyak digunakan di berbagai jenis rangkaian, salah satunya adalah rangkaian mikrofon. Mikrofon adalah perangkat yang memerlukan daya DC agar dapat beroperasi dan membutuhkan sinyal AC seperti suara manusia, musik dan sumber lainnya sebagai sinyal masukan-nya. Dengan kata lain, sinyal DC hanya sebagai daya agar dapat mengoperasikan mikrofon namun tidak boleh muncul pada keluaran yang bersinyal AC (Audio). Jadi, hanya untuk meneruskan sinyal audio yang berbentuk sinyal AC dan memblokir sinyal DC.

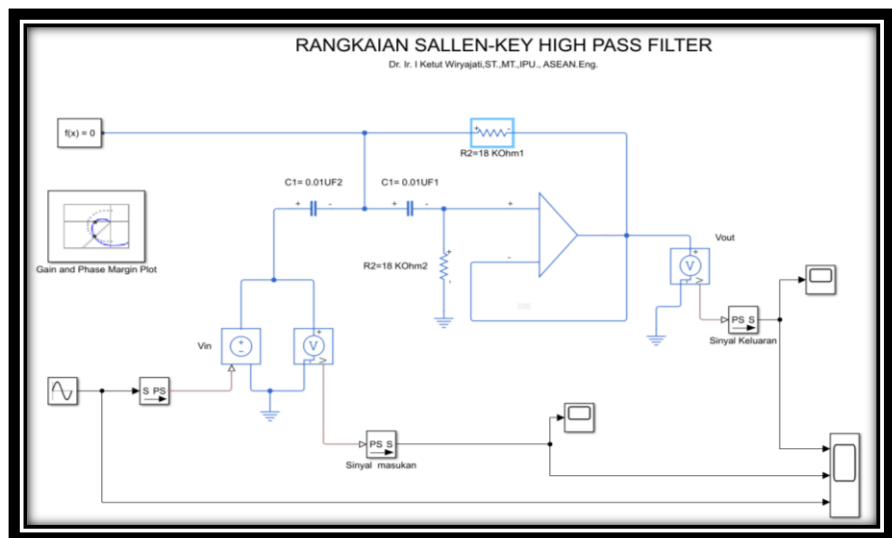
Selain itu filter lolos tinggi digunakan pada perangkat pengeras suara untuk mengurangi kebisingan tingkat rendah. Menghilangkan distorsi gemuruh dalam aplikasi audio sehingga ini

juga disebut *filter treble boost*. Digunakan dalam amplifier audio untuk memperkuat sinyal frekuensi yang lebih tinggi seperti pada sistem equalizer.

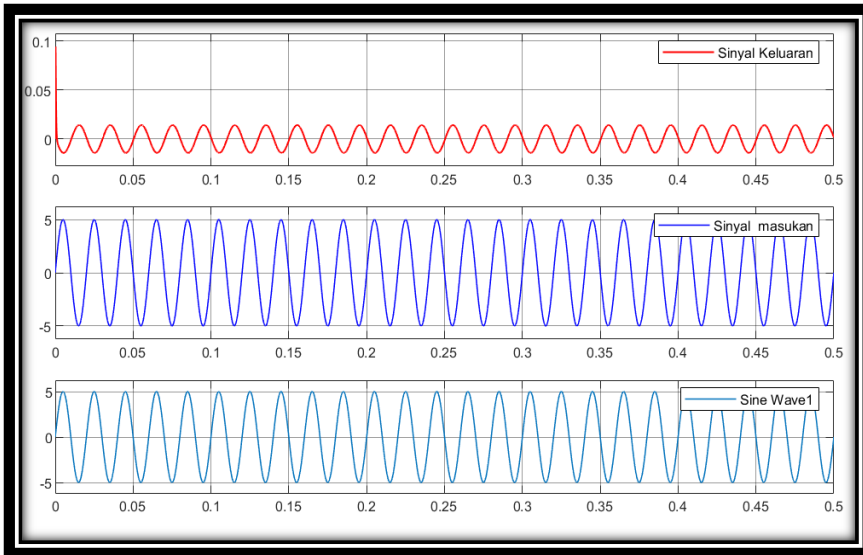
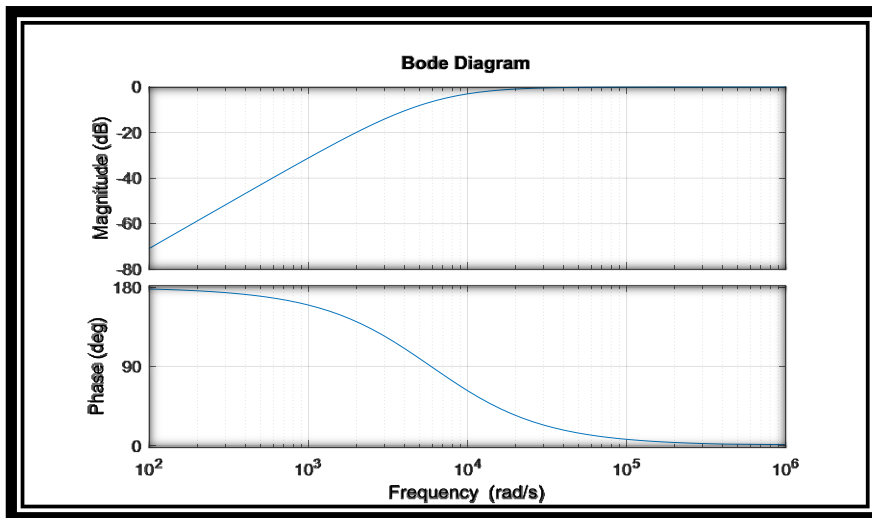
4.7.7. Simulasi Filter Aktif Lolos Tinggi

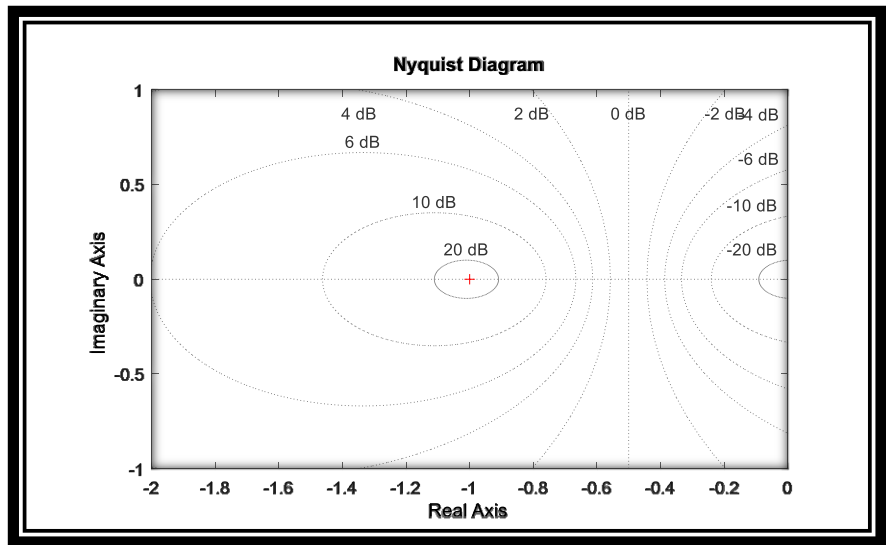
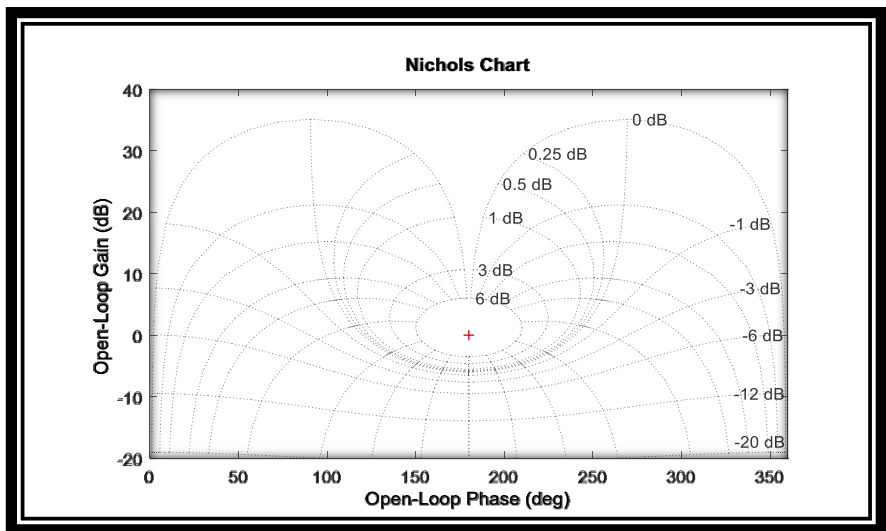
Topologi Filter aktif Lolos Tinggi sering juga di sebut dengan Filter *Sallen Key*.

Topologi filter *Sallen-Key* dengan penguatan yang merupakan kesatuan yang utuh, dan filter ini merupakan *system* filter yang diimplementasikan dengan penguat operasional, Berikut merupakan hasil pengujian dengan menggunakan MATLAB Simulink, dengan parameter yang ideal. Rangkaian ini terdiri Tahanan 18 Kohm, $C1=C$ 0.001 mikro Farad, dari masukan sinusoidal dengan frekuensi tinggi, sinyal keluaran dapat di lihat menggunakan osciloscope yang di ambil dari Simulink.



Gambar 4.31 Rangkaian Filter Aktif *High Pass* Filter dengan Simulink

Gambar 4.32 Sinyal Keluaran Filter Aktif *High Pass Filter*Gambar 4.33 Diagram Bode Filter Aktif *High Pass Filter*

Gambar 4.34 Diagram Nyquist Filter Aktif *High Pass* FilterGambar 4.35 Diagram Nyquist Filter Aktif *High Pass* Filter

4.8. Filter Lolos Rentang/*Band Pass Filter*

4.8.1. Dasar Filter Lolos Rentang (FLRt)

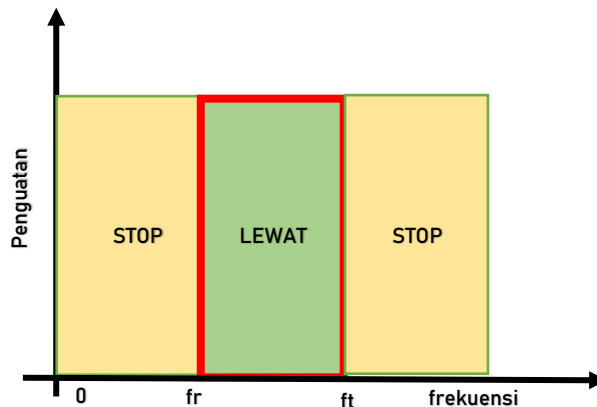
Filter Lolos Rentang adalah rangkaian filter yang mengizinkan lewat sinyal yang memiliki frekuensi pada rentang tertentu dan mengattenuasikan sinyal yang memiliki frekuensi di luar rentang tersebut, atau filter frekuensi yang melewatkan sinyal frekuensi dalam rentang frekuensi tertentu yaitu melewatkan sinyal yang berada di antara frekuensi batas bawah hingga frekuensi batas atasnya. Dengan kata lain, Filter Lolos Rentang atau Tapis Lolos Atas ini akan menolak atau melemahkan sinyal frekuensi yang berada di luar rentang yang ditentukan tersebut. Salah satu aplikasi yang paling mudah dan sederhana dari Filter Lolos Rentang adalah Rangkaian pada penguat audio, pengendali nada (*tone control*) dan penyaring *crossover speaker*. Pada rangkaian-rangkaian tersebut, Filter tersebut hanya akan melewatkan rentang frekuensi tertentu saja misalnya yang tidak dimulai dari 0Hz atau memerlukan sinyal yang berakhir pada suatu titik frekuensi tinggi tertentu.

Filter Lolos Antara dapat di bentuk dari Filter lolos Rendah dan Filter Lolos Tinggi sedemikian sehingga menjadi Filter Lolos Antara. Cara bekerjanya adalah dengan Filter Lolos Rendah hanya melewatkan sinyal frekuensi rendah dan melemahkan frekuensi tinggi ataupun Filter Lolos Tinggi yang hanya melewatkan sinyal Frekuensi Tinggi dan melemahkan frekuensi rendah, Filter Lolos Rentang ini mampu melewatkan sinyal pada pita atau "sebaran" frekuensi tertentu atau melewatkan sinyal di antara batas frekuensi yang ditentukan. Rentang Frekuensi yang berada di antara Frekuensi batas atas (W_h) dan Frekuensi batas bawah (W_l) ini biasanya dikenal dengan filter Bandwidth.

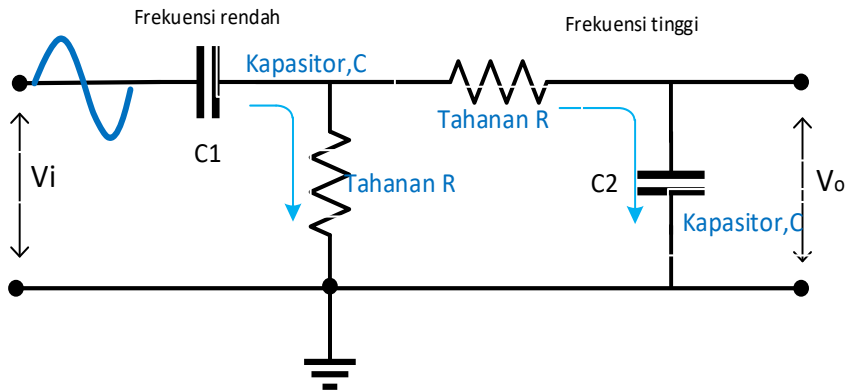
Pada umumnya, Bandwidth didefinisikan sebagai rentang frekuensi yang berada di antara dua titik batas frekuensi yang ditentukan (f_c), yaitu 3dB di bawah pusat maksimum atau puncak

resonansi dan melemahkan frekuensi lain yang berada di luar dua titik batas ini. Frekuensi yang tersebar luas yang biasanya disebut dengan istilah Bandwidth atau BW ini pada dasarnya adalah perbedaan antara Frekuensi *Cut off* yang lebih rendah (f_c lower) dan poin Frekuensi *Cut off* yang lebih tinggi (f_c higher). Dengan kata lain, $BW = f_H - f_L$. Agar Penyaring atau Filter Band Pass ini dapat berfungsi dengan benar, Frekuensi *cut off Low Pass Filter* harus lebih tinggi daripada frekuensi *cut off High Pass Filter*.

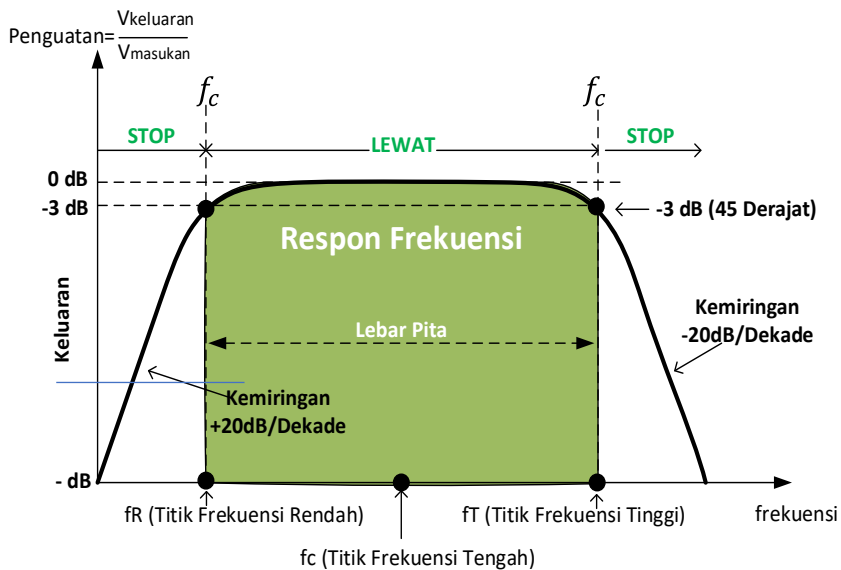
Filter Lolos Antara yang ideal dapat difungsikan sebagai media untuk mengisolasi atau menyaring (filter) frekuensi yang diinginkan yang berada dalam pita frekuensi tertentu, misalnya untuk membatasi derau (*noise cancellation*). Filter Lolos Antara umumnya juga dikenal dengan *Second Oder Filter* atau dua kutub, ini dikarenakan Filter Lolos Antara memiliki dua komponen reaktif yaitu kapasitor dalam desain rangkaianannya. Satu Kapasitor di rangkaian Lolos Rendah dan satunya lagi di rangkaian Lolos Tinggi. Filter Lolos Antara ini pada umumnya terdiri dari dua Filter yaitu Filter Lolos Rendah dan Filter Lolos Tinggi. Gambar 4.36 adalah sebuah rangkaian dasar dari sebuah Filter Lolos Antara.



Gambar 4.36 Grafik Filter Lolos Rentang



Gambar 4.37 Filter Lolos Antara RC



Gambar 4.38 Respons Frekuensi Filter Lolos Rentang 4.8.2 Filter Aktif Lolos Rentang (FLR)

4.8.2. Klasifikasi Filter Aktif Lolos Rentang

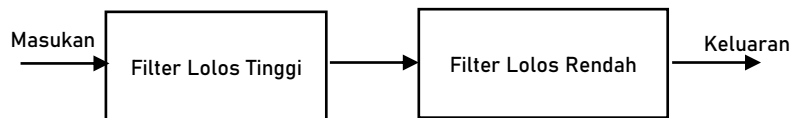
Filter Aktif Lolos Rentang pada umumnya terdiri dari dua buah filter aktif yang di hubungkan secara serial, Filter Aktif Lolos Rentang dibagi menjadi dua bagian yaitu Filter Lebar Lolos Rentang (*Wide Band Pass Filter*), dan Filter Sempit Lolos Rentang (*Narrow Band Pass Filter*) sangat ditentukan oleh faktor kualitas yaitu (Q) seperti berikut:

1. *Wide Band Pass Filter* $Q < 10$
2. *Narrow Band Pass Filter* $Q > 10$

Secara rinci pembahasan Faktor Kualitas dibahas pada bagian tersendiri

4.8.2.1. Filter Lolos Rentang Lebar (Wide)

Metode paling sederhana untuk merancang sebuah Filter Aktif Lolos Rentang adalah dengan cara menggabungkan filter aktif Lolos Rendah dengan Filter Lolos Tinggi seperti pada Gambar Berikut:

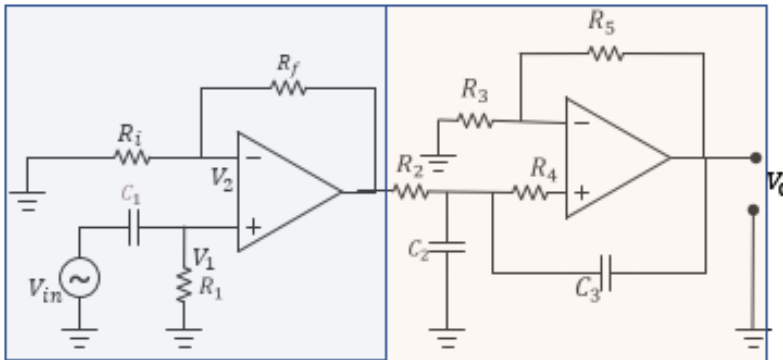


Gambar 4.39 Metode Pembuatan Filter Lolos Rentang

Perhatikan Gambar 4.40 Pada Filter Lolos Tinggi diasumsikan terdapat penguatan A_{F1} sedangkan pada Filter Lolos Rendah A_{F2} , Sehingga $A_{VF} = A_{F1} \cdot A_{F2}$

$$f_{\text{Rendah}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \dots\dots\dots (4.34)$$

$$f_{\text{Tinggi}} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \dots\dots\dots (4.35)$$



Gambar 4.40 Filter Lolos Rentang Terdiri dari FLT dan FLR

Terdapat Frekuensi tengah yang beresonansi adalah pada frekuensi kritis f_c atau frekuensi resonan. Yang besarnya dapat dinyatakan dengan

$$f_c = \sqrt{f_R \cdot f_T} \dots \dots \dots (4.36)$$

Sehingga rentang dari Filter Lolos Rentangan dapat ditentukan dengan mengurangkan frekuensi kritis pada masing-masing filter.

Jadi Lebar Rentang dapat ditentukan dengan mengurangkan (4.34)-(4.35), sehingga didapatkan rentang dari Filter tersebut.

$$f_T - f_R \dots \dots \dots (4.37)$$

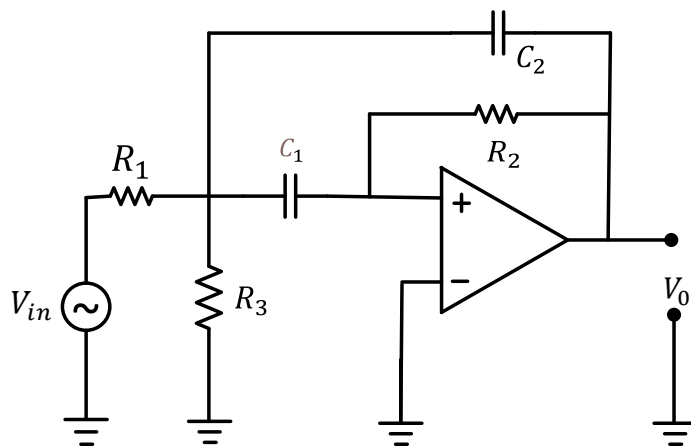
Faktor Kualitas data ditentukan dari persamaan (4.36) dan Persamaan (4.37) didapat persamaan berikut:

$$Q = \frac{f_c}{\text{Lebar Rentang}} = \frac{\sqrt{f_R \cdot f_T}}{f_T - f_R} \dots \dots \dots (4.37)$$

Faktor kualitas ini menentukan tipe dari Filter Lolos Rentang.

4.8.2.2. Filter Lolos Rentang Sempit (*Narrow*)

Jika Faktor Kualitas lebih besar dari nilai 10 maka di sebut dengan Filter Lolos Rentang Sempit. Sebagai ilustrasi perhatikan Gambar 4.22. Bila sebuah rangkaian memiliki dua buah umpan balik yang keduanya menjadi referensi pada keluaran maka rangkaian tersebut memiliki penguatan sama dengan satu. Pada gambar ini faktor kualitas akan meningkat paling tinggi adalah 20.



Gambar 4.41 Filter Lolos Rentang Dua Umpan Balik

Jika $C_1=C_2=C$

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_c C A_{max}} \dots \dots \dots (4.38)$$

$$R_2 = \frac{Q}{\pi f_c C} \dots \dots \dots (4.39)$$

$$R_3 = \frac{Q}{2\pi f_c C (2Q^2 - A_{max})} \dots \dots \dots (4.40)$$

Dengan, A_{max} adalah penguatan pada frekuensi kritis f_c dan $A_{max} = \frac{R_3}{2R_1}$, Sedangkan penguatan pada A_{max} harus kurang dari $2Q^2$ sehingga dapat dikatakan bahwa $A_{max} < 2Q^2$, f_c = frekuensi

engah (Hz), C= Capasitansi (Farad), Q= Faktor Kualitas, A_{max} adalah Penguatan Maksimum.

4.8.3. Kasus 4.4 Filter Lolos Antara

Sebuah Rangkaian Filter Lolos Antara dari komponen RC (resistor dan kapasitor) untuk melewatkan frekuensi di antara 1kHz (1.000Hz) hingga 20kHz (20.000Hz). Kedua Resistor yang digunakan dalam rangkaian adalah masing-masing 10K Ω , Hitunglah kedua nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian tersebut.

Penyelesaian

Perhitungannya dibagi menjadi dua tahapan perhitungan yaitu tahapan bagian pada Filter Lolos Tinggi dan tahapan bagian Filter Lolos Rendah

Bagian Filter Lolos Tinggi

Nilai Kapasitor C1 yang diperlukan untuk memberikan frekuensi *cut off* f_L yaitu 1kHz dengan resistor R1 10K Ω adalah dihitung melalui perhitungan di bawah ini:

$$C1 = 1/2\pi f_L R$$

$$C1 = 1/2 \times 3,14 \times 1.000 \times 10.000$$

$$C1 = 1/2 \times 3,14 \times 1.000 \times 10.000$$

$$C1 = 15,9 \text{ nF}$$

Jadi nilai Kapasitor yang diperlukan untuk menghasilkan Frekuensi *cut off* f_L adalah 15,9nF.

Bagian Filter Lolos Rendah

Nilai Kapasitor C2 yang diperlukan untuk memberikan frekuensi *cut off* f_H yaitu 20kHz dengan resistor R2 10K Ω dapat dihitung dengan perhitungan sebagai berikut:

$$C2 = 1/2\pi f_H R$$

$$C2 = 1/2 \times 3,14 \times 20.000 \times 10.000$$

$$C2 = 1/2 \times 3,14 \times 20.000 \times 10.000$$

$$C2 = 796\text{pF}$$

Jadi nilai Kapasitor yang diperlukan untuk menghasilkan Frekuensi cut f_H adalah 796pF.

4.9. Filter Tolak Rentang/Band Stop Filter or Notch Filter.

4.9.1. Dasar Filter Tolak Rentang

Filter Tolak Rentang sering disebut juga dengan istilah *Band Pass Filter* atau *Band Reject Filter*. Yang berfungsi di mana akan mengattenuasi sekelompok frekuensi atau melakukan penutupan pada frekuensi tertentu.

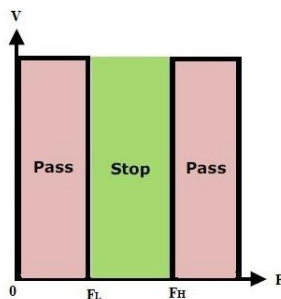
Rangkaian dasar dari Filter Tolak Rentang dibentuk oleh kombinasi filter lolos rendah dan filter lolos tinggi dengan koneksi paralel, bukan koneksi bertingkat. Nama Filter Tolak Rentang sendiri menunjukkan bahwa filter tersebut akan menghentikan pita frekuensi tertentu. Karena Filter Tolak Rentang dapat menghilangkan frekuensi, Filter Tolak Rentang disebut sebagai filter eliminasi pita atau filter penolakan pita atau filter takik.



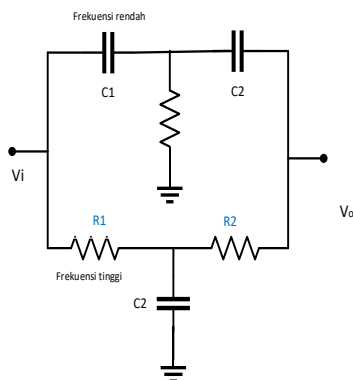
Gambar 4.42 Dasar Filter Tolak Rentang

Karakteristik masing-masing filter seperti filter lolos tinggi dan filter lolos rendah, filter lolos rentang dan Filter Tolak Rentang memiliki dua frekuensi *cut-off*. Filter tolak rantang akan melewati di atas dan di bawah rentang frekuensi tertentu yang frekuensi

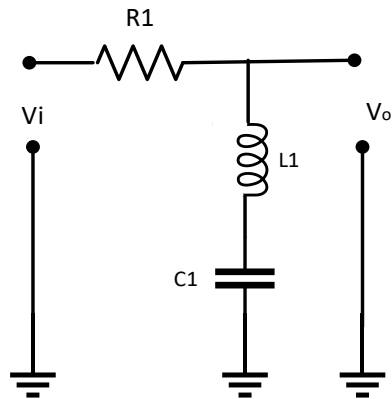
terputusnya yang telah ditentukan sebelumnya tergantung pada pemilihan nilai komponen yang digunakan dalam desain rangkaian. Setiap frekuensi di antara dua frekuensi *cut-off* ini dilemahkan. Ini memiliki dua rentang frekuensi dan satu pita frekuensi yang di tolak. Karakteristik ideal pita tolak rentang adalah seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Pada pita 0- F_L (frekuensi rendah) akan dilewatkan dan pada F_H ke atas frekuensi akan diteruskan, antara F_L dan F_H di tolak atau di hentikan sehingga disebut dengan Filter Tolak Rentang (*Band Stop Filter*).



Gambar 4.43 Karakteristik Filter Tolak Rentang



Gambar 4.44 Rangkaian Filter Tolak Rentang dengan RC



Gambar 4.45 Rangkaian Filter Tolak Rentang dengan RLC

Rangkaian Filter Tolak Rentang dapat di susun dengan menggunakan komponen pasif seperti Resistor Capasitor, maupun induktor. Susunan ini di dasarkan pada Filter lolos tinggi dan filter lolos rendah yang di susun secara paralel dan pada ujung di jadikan satu atau keluaran dari filter di jumlah secara elektrik. Rangkaian Filter Tolak Rentang dapat di bentuk dari komponen Resistor dan Kapasitor, atau dengan kombinasi resistor Induktor dan kapasitor. Rangkaian dengan menggunakan komponen Resistor dan kapasitor secara detail perhatikan Gambar 4.25 Gambar 4.26.

Keluaran sinyal yang melintasi induktor (L) dan kapasitor (C) yang dihubungkan secara seri dan diukur secara paralel pada LC tersebut. Kita tahu bahwa untuk frekuensi yang berbeda dalam input rangkaian berperilaku baik sebagai sirkuit terbuka atau pendek. Pada frekuensi rendah kapasitor bertindak sebagai sirkuit terbuka dan induktor bertindak seperti sirkuit pendek. Pada frekuensi tinggi induktor bertindak seperti sirkuit terbuka dan kapasitor bertindak seperti sirkuit pendek.

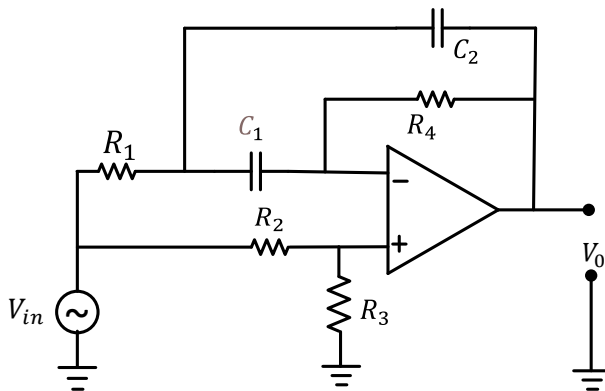
Jadi, dengan demikian kita dapat mengatakan bahwa pada frekuensi rendah dan tinggi rangkaian bertindak seperti rangkaian terbuka karena induktor dan kapasitor dihubungkan secara seri. Dengan ini juga jelas bahwa pada frekuensi tengah rangkaian bertindak seperti hubung singkat. Dengan demikian frekuensi tengah tidak diperbolehkan melewati rangkaian. Rentang frekuensi menengah di mana filter bertindak sebagai rangkaian hubung singkat tergantung pada nilai frekuensi *cut-off* bawah dan atas. Nilai frekuensi *cut-off* bawah dan atas ini tergantung pada nilai komponen. Nilai komponen ini ditentukan oleh fungsi alih (*Transfer Function*) untuk rangkaian sesuai dengan desain. Fungsi Alih adalah rasio antara keluaran dan masukan sebagai berikut:

$$H(\omega) = \frac{j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{(R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}))} \dots \dots \dots (2.41)$$

Dengan $\omega = 2\pi f$ dalam radian.

4.9.2. Filter Aktif Tolak Rentang

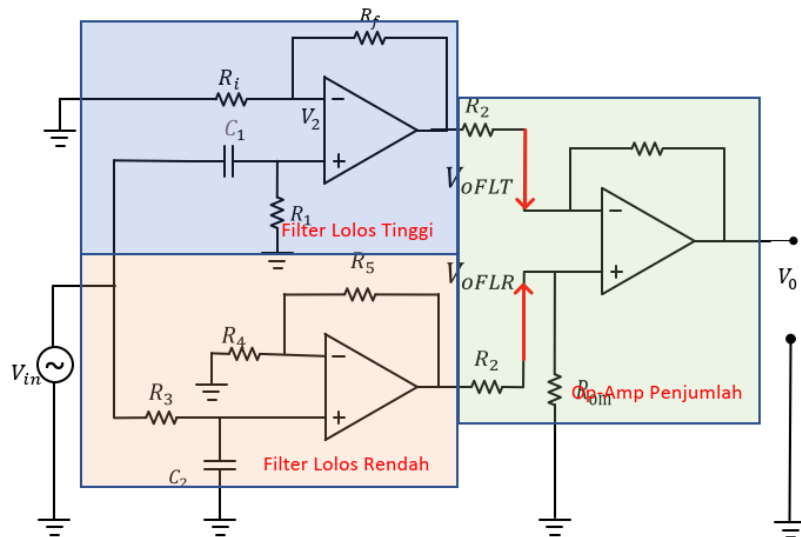
Filter aktif dapat di bentuk dari komponen pasif dan aktif,



Gambar 4.46 Filter Tolak Rentang dengan sebuah Op-Amp.

Fungsi alih dari rangkai 4.27 adalah sebagai (4.42):

$$\frac{V_{in}}{V_o} = \frac{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \frac{1}{Q} \frac{f}{f_c}} \quad (4.42)$$



Gambar 4.47 Filter Aktif Tolak Rentang

Keluaran dari filter ni adalah: $V_o = \frac{-R_3}{R_2} [V_{OLT} + V_{OLT}]$

Latihan Soal

Jelaskan Berapa Model filter yang anda ketahui

Jawaban.

a. Filter Lolos Rendah

Filter Lolos Rendah adalah sebuah rangkaian yang tegangan keluarannya tetap dari DC naik sampai ke suatu frekuensi *cut-off* f_c . Bersama naiknya frekuensi di atas f_c ,

tegangan keluarannya diperlemah (turun). Filter Lolos Rendah adalah jenis filter yang melewatkan frekuensi rendah serta meredam/menahan frekuensi tinggi.

b. Filter Lolos Tinggi

Filter Lolos Tinggi memperlemah tegangan keluaran untuk semua frekuensi di bawah frekuensi *cut off* FC. Di atas FC, besarnya tegangan keluaran tetap. Garis penuh adalah kurva idealnya, sedangkan kurva putus-putus menunjukkan bagaimana filter-filter *High Pass* yang praktis menyimpang dari ideal. Pengertian lain dari Filter Lolos Tinggi yaitu jenis filter yang melewatkan frekuensi tinggi serta meredam/menahan frekuensi rendah.

c. Filter Lolos Rentang

Filter Lolos Rentang hanya melewatkan sebuah pita frekuensi saja seraya memperlemah semua frekuensi di luar pita itu. Pengertian lain dari Band Lolos Rentang adalah filter yang melewatkan suatu *range* frekuensi. Dalam perancangannya diperhitungkan nilai Q (faktor mutu). Dengan

Q = faktor mutu

f_o = frekuensi *cut off*

B = lebar pita frekuensi

d. Filter Tolak Rentang

Filter Tolak Rentang yaitu filter band *elimination* menolak pita frekuensi tertentu seraya melewatkan semua frekuensi di luar pita itu. Bisa juga disebut *Band Reject* merupakan kebalikan dari Lolos Rentang, yaitu merupakan filter yang menolak suatu *range* frekuensi. Sama seperti filter Lolos Rentang, band *reject* juga memperhitungkan faktor mutu.

Ringkasan

Pada dasarnya filter dapat dikelompokkan berdasarkan *response* (tanggapan) frekuensinya menjadi 4 jenis yaitu: Filter Lolos Rendah/*Low pass Filter*, Filter Lolos Tinggi/*High Pass Filter*, Filter Lolos Rentang/*Band Pass Filter* dan Filter Tolak Rentang/*Band stop Filter or Notch Filter*.

Filter Lolos Rendah (FLR) atau RC Integrator adalah suatu *device* elektronika berupa komponen pasif seperti Resistor, Induktor, maupun Kapasitor yang dirangkai sedemikian rupa sehingga mampu melewatkan frekuensi rendah dan menahan frekuensi tinggi.

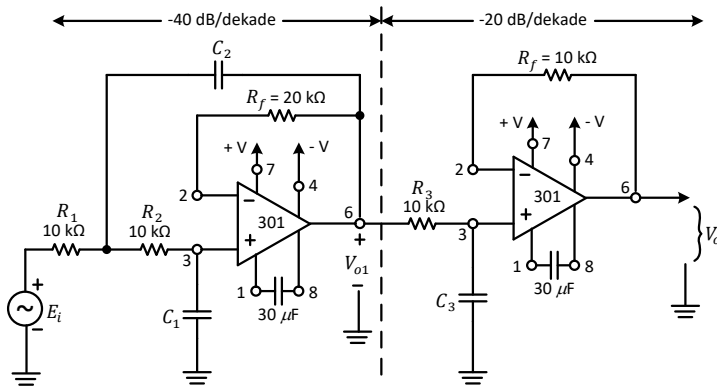
Filter Pasif Lolos Rendah yang terhubung ke Op-Amp pembalik atau non-pembalik menghasilkan Filter Aktif Lolos Rendah. Komponen amplifier pada rangkaian filter ini akan meningkatkan amplitudo sinyal keluaran.

Filter Aktif Lolos Tinggi terdiri dari komponen Resistor, Capasitor maupun Induktor dan sebuah penguat. Cara kerja dari rangkaian Filter Aktif Lolos Tinggi mirip dengan cara kerja Filter Lolos Tinggi Pasif, Keluaran dari filter pasif Lolos Tinggi ini akan masuk pada *non-inverting amplifier* sedemikian sehingga frekuensi tinggi dengan frekuensi kritis akan di lewatkan pada penguat *amplifier* dengan penguatan A_v dalam hal ini menggunakan penguatan dengan umpan balik bernilai satu.

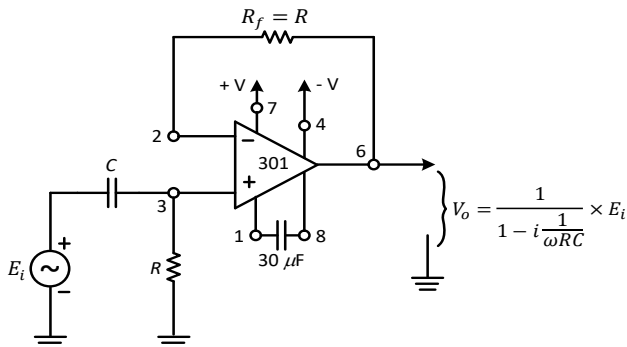
Filter Aktif Lolos Rentang pada umumnya terdiri dari dua buah filter aktif yang di hubungkan secara serial, Filter Aktif Lolos Rentang dibagi menjadi dua bagi yaitu Filter Lebar Lolos Rentang (*Wide Band Pass Filter*), dan Filter Sempit Lolos Rentang (*Narrow Band Pass Filter*) sangat ditentukan oleh yaitu (Q)

Latihan-Latihan

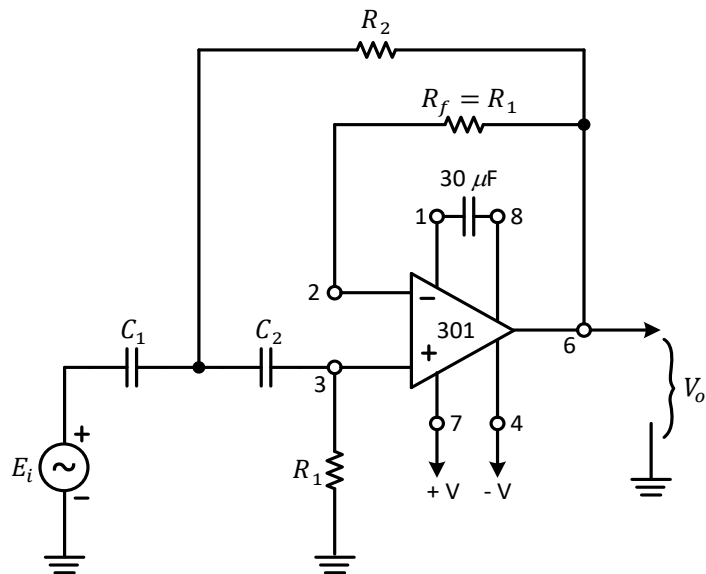
- Untuk filter *low-pass* dari gambar 4. 26. Hitunglah (a) C_3 , (b) C_1 dan (c) C_2 untuk frekuensi *cut off* sebesar 30 rad/detik. $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$.

Gambar 4.48 Filter *Low-Pass* untuk Landaian Sebesar -60dB/dekade

- Hitunglah R dalam gambar 4.27. jika $C = 0.002 \mu\text{F}$ dan $f_c = 10 \text{ kHz}$

Gambar 4.49 Filter *High-Pass* dengan Landaian Sebesar 20 dB/decade

3. Dalam gambar 4.27. jika $R = 22 \text{ k}\Omega$ dan $C = 0.01 \mu\text{F}$. Hitunglah (a) ω_c dan (b) f_c .
4. Dalam gambar 4.28 Jika di ketahui $C_1 = C_2 = 0.01 \mu\text{F}$. Hitunglah (a) R_1 dan (b) R_2 untuk sebuah frekuensi *cut off* sebesar 1 kHz.



Gambar 4.50 Filter *High-Pass* dengan Landaian Sebesar 40 dB/decade

DAFTAR PUSTAKA

- A.K Sawhney, A.K, (1990).Electrical dan Electonic Measurement and Instrumentattion, Dampat Rai & Sons, New Delhi.
- Albert Paul Malvino, M. Barmawi, M.O. Tjia, 1991, *Prinsip-Prinsip Elektronika*, jilid 2, edisi ketiga, Erlangga, Jakarta.
- B. Guthrie, J. Hughes, T. Sayers, and A. Spencer, "A CMOS Gyrator Low-IF Filter for a Dual-Mode Bluetooth/ZigBee Transceiver," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 40, no. 9, pp. 1872-1879, Sep. 2005
- C. Upathamkuekool, A. Jiraseree-amornkun, and J. Mahattanakul, "Ultra Low-power Low-voltage Active-RC Filter Design with On-chip Automatic Tuning," in Proc. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2011, pp. 86-89.
- D. Cooper, William, (1985).Electronic instrumentation and Measurement Technique, Prentice Hall,1978.
- K. W. Martin, "Complex signal processing is not complex," IEEE Trans. Circuits Syst. - I, vol. 51, No. 9, Sept. 2004
- M. J. Gingell, "Single sideband modulation using sequence asymmetric polyphase networks", *Elect. Commun.*, vol. 48, no. 1—, pp. 21-25, 1973.
- Michael Tooley, Irzam Harmein, 2003, *Rangkaian Elektronik Prinsip dan Aplikasi*, edisi kedua, Erlangga, Jakarta.
- Robert F Chouglin “

Robert T. Paynter, 2006, *Introductory Electronic Devices and Circuits Conventional Current Flow*, seventh edition, Prehall Inc. New Jersey, USA.

Sapiie Soedjana, (1976). *Pengukuran dan Alat-Alat Ukur Listrik*, Jakarta, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

Thomas Floyd, David Buchla, 2003, *Fundamentals of Analog Circuits, second edition*, Prehall Inc. New Jersey, USA

<https://www.electronicshub.org/band-stop-filter>

https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_4.html

INDEKS

<p>A</p> <p>Absolut 17</p> <p>Akar 17</p> <p>Amperexvi, 50, 51, 53, 55, 58, 62, 67, 69, 71, 78, 79, 103, 104</p> <p>Analog AC..... xvi, 71, 72</p> <p>Anda..... 4, 8, 29, 186</p> <p>Arctangen..... 18</p> <p><i>Arrays</i>..... 3</p> <p>Arus listrikix, xv, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 61, 62, 63, 66, 71</p> <p>Atto..... 52</p> <p>Audio 135, 157, 171, 175</p> <p>Automatic 3</p> <p>Awalan.....xiii, 50, 51, 52</p> <p>B</p> <p>Bahasa C..... 3</p> <p>Bandwidth 82, 165, 175</p> <p>Baris 3, 11, 12, 19, 24</p> <p>Blok.....10, 29, 31, 32, 34, 35, 156</p> <p>C</p> <p><i>Case sensitive</i> v, 1, 16</p> <p>Clear 6, 7, 13, 14</p> <p>Command windows 4, 8, 10, 13</p>	<p>Contohvii, xv, 3, 5, 7, 11, 12, 13, 14, 16, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 32, 41, 51, 62, 63, 64, 65, 122, 156</p> <p><i>Control system</i>.....4</p> <p>Cosinus..... 17, 18, 119</p> <p><i>Crossover</i>.....175</p> <p><i>Cut offxx</i>, 158, 166, 167, 176, 181, 187, 189, 190</p> <p><i>Cut off high pass filter</i>176</p> <p>D</p> <p>Dayav, ix, 51, 58, 61, 62, 73, 79, 82, 139, 145, 162, 171, 200</p> <p>DC Gain..... 146, 147, 149, 154</p> <p>Deka..... 52</p> <p>Derau 77, 81, 176</p> <p>Desi..... 52</p> <p>Detik50, 51, 61, 74, 120, 127, 136, 189</p> <p>Diagram bode xxi, 151, 173</p> <p>Differensiatorxviii, xix, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128</p> <p>Dimodifikasi..... 50, 107, 108, 147</p> <p>Dioda xiv, 36, 80</p> <p><i>Direct current</i>..... 59, 70, 71</p> <p>Disiplin..... v, 1</p>
--	--

- E
- Editingviii, 8
- Eksekusi..... 3
- Ekspresiv, 82, 106
- Elektron..... 52, 53, 54, 78
- Elektronikavii, 2, 48, 53, 55, 56,
64, 77, 139, 188, 199, 200
- Exa.....52
- F
- Faktor17, 52, 76, 81, 89, 90, 178,
179, 180, 181, 187
- Faktor kualitas..178, 179, 180, 181
- File..... 4, 8, 9, 11, 29, 31
- File eksternal..... 4, 8
- Filtervii, xi, xii, xix, xxi, 138, 139,
140, 141, 142, 144, 145, 146, 147,
149, 150, 151, 152, 153, 154, 156,
157, 158, 159, 160, 161, 162, 163,
164, 165, 166, 167, 168, 169, 170,
171, 172, 173, 174, 175, 176, 177,
178, 179, 180, 181, 182, 183, 184,
185, 186, 187, 188, 189, 190
- Filter aktifxi, xii, xix, xx, xxi, 138,
144, 145, 156, 157, 158, 164, 165,
166, 167, 168, 169, 170, 172, 173,
174, 177, 178, 185, 186, 188
- Filter lolos rendahxi, xix, xx,
139, 140, 141, 142, 144, 145, 146,
147, 149, 150, 151, 152, 153, 154,
156, 157, 166, 175, 176, 181,
182, 184, 187, 188
- Filter lolos tinggixi, xii, xx, 139,
157, 158, 159, 160, 161, 162, 163,
164, 165, 166, 170, 171, 175, 176,
178, 181, 182, 184, 187, 188
- Filter pasifxi, 138, 144, 145, 164,
166, 188
- Filter sempit lolos rentang..178,
188
- Filter tolak rentangxii, xxi, 139,
182, 183, 184, 185, 187, 188
- Fleksibel.....139
- Fluks.....51
- Fortran..... 3
- Frekuensixvi, xix, xx, xxi, 32, 51,
74, 75, 77, 80, 82, 94, 101, 125,
128, 130, 134, 138, 139, 140, 141,
143, 144, 145, 146, 147, 148, 149,
155, 156, 157, 158, 159, 161, 162,
163, 164, 166, 167, 168, 171, 172,
175, 176, 177, 179, 180, 181, 182,
184, 185, 186, 187,188, 189, 190
- Frekuensi kritis149, 164, 167, 179,
180, 188
- G
- Gainxv, 39, 40, 80, 81, 82, 83, 85,
135, 146, 147, 149, 154, 158
- Gambarviii, xiii, xiv, xv, xvi, xvii,
xviii, xix, xx, xxi, 3, 5, 8, 9, 10,

11, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 189, 190	Herz 74, 101, 144
George Simon Ohm 54	I
Giga..... 52	<i>Icon</i> 33, 34
Grafikv, ix, xiv, xxi, 1, 3, 9, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 34, 176	Induktansi..... ix, 51, 55, 56, 76
Groundxiv, 36, 63, 83, 84, 85, 122, 128	Induktorxv, 36, 55, 56, 78, 79, 139, 162, 164, 184, 185, 188
H	Input pembalik..... 81, 87, 88, 128
Hambatan/tahanan..... 51	Integratorxi, xiv, xix, 32, 34, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 139, 140, 141, 188
Heinrich Lenz..... 55	Interaktif 5, 9
Hekto 52	<i>Interface</i> 2, 3
	<i>Inverting amplifier</i> 82, 91, 164, 188
	<i>Inverting input</i> 81, 119
	J
	Jaringan input.....101
	Jendela perintah..... 4, 28
	K
	Kandela 50, 51
	Kapasitansi xv, 51, 56, 57, 76, 161
	Kapasitorix, xv, 35, 56, 57, 78, 80, 119, 125, 128, 129, 133, 134, 139, 140, 141, 144, 146, 154, 159, 161, 164, 176, 181, 182, 184, 185, 188
	Kapasitor kopling 162

Kasusx, xi, xii, xv, xvi, xvii, xix, xx, 11, 41, 58, 61, 62, 66, 68, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 93, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 115, 118, 120, 123, 126, 127, 128, 130, 131, 140, 144, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 158, 181	Loop tertutup81, 85, 136
Kelvin..... 50, 51	Loudspeaker.....61
Kemasanxvi, 80	Lumen50
<i>Kilo</i>51, 52	M
Kilogram..... 50, 51	Magnetisme55
Kirchhoffix, xv, xvi, 64, 65, 66, 67, 68, 78	Matematis..... 2, 58, 109
Kirchoff64, 79	MATLABi, iii, iv, v, vii, viii, ix, xiii, xiv, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 27, 28, 34, 41, 48, 81, 172
Klik.....8, 11, 28, 29	Matriksv, viii, xiii, 1, 2, 3, 11, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 24, 48, 50
Kolom3, 11, 12, 19	Mega 52
Komponen aktif ..81, 139, 158, 169	Menyubstitusikan 109
Komponen reaktif.....161, 176	Meter xvi, 50, 51, 74, 76, 78
Komputasi.....v, 1, 2, 22	Metode superposisi122
Kualitas filter 138	Michael Faraday..... 56
L	Mikro.....35, 36, 52, 135, 172
Laju penurunan147, 149, 155	Mili 52
Linear 80, 83	Mol.....50
Listrikvii, ix, xv, xvi, 35, 36, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 66, 69, 70, 71, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80, 138, 142, 160, 192, 200	Muatan35, 36, 51, 52, 53, 56, 70, 78
Logaritma17	N
	Nano..... 52
	Negative Feedback.....81
	<i>Neural networks</i> 4
	Niquist..... 151
	<i>Noise</i>138, 176

- Non-invertingx, xviii, 81, 83, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 107, 108, 110, 112, 114, 119, 132, 133, 136, 138, 146, 164, 188
- Non-Inverting*..... xvii, xix
- O
- Op-Ampix, x, xi, xv, xvi, xvii, xviii, xix, xx, xxi, 34, 39, 40, 41, 49, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 131, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 145, 146, 148, 149, 151, 154, 155, 158, 168, 169, 185, 188
- Op-Amp *non-inverting*xviii, 112, 114, 146
- Op-Amp *Non-inverting*..... xvii
- Operational amplifier*i, iii, iv, v, vii, x, xi, xx, 39, 40, 41, 48, 80, 135, 138, 139, 154, 156, 165, 166, 168
- Operator..... xiii, 15
- Orde kedua.....162
- Orde pertama.....145, 162, 167
- Orde tinggi.....xii, 170
- P
- Paralel71, 72, 73, 74, 162, 182, 184
- Partikel..... 52, 53
- Pembalik biasa.....108
- Pemrograman ..v, viii, 1, 2, 17, 48
- Penampang..... 52
- Penguatx, xv, xvii, xviii, xix, xx, 2, 34, 39, 40, 41, 80, 81, 82, 84, 86, 87, 88, 89, 95, 96, 97, 106, 107, 110, 117, 119, 122, 123, 135, 136, 138, 145, 146, 148, 150, 151, 152, 154, 158, 164, 166, 168, 172, 175, 188
- Penguat operasionalxv, 39, 40, 41, 80, 81, 145, 154, 158, 165, 172
- Penguat pembalikxvii, 84, 86, 89, 96, 97
- Pengukuranvii, ix, 49, 50, 70, 72, 73, 75, 77, 78, 79
- Penolakan mode umum..... 82
- Perintahviii, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 21, 22, 24, 25, 28
- Peta..... 52
- Phasa89, 90, 94, 101, 103, 104, 119, 143, 154, 161, 164
- Piko..... 52
- Populer..... v, 1
- Potensial listrik..... 51, 55
- Potensiometer..... 54
- Proporsional 55

- R
- Radian*17, 18, 185
- Rangkaian pengurangx, xviii,
105, 106, 109, 110, 111, 116, 117
- Rangkaian penyangga89, 90, 136
- Rasio..... 96, 185
- Replace*.....16
- Resistansi54, 58, 82, 85, 87, 89,
97, 99, 101, 130, 161
- Resistorxiv, 35, 53, 54, 58, 72,
79, 80, 81, 84, 85, 123, 139, 140,
141, 154, 159, 162, 163, 164, 166,
181, 184, 188
- Resistor geser54
- Routine*..... 3
- S
- Sallen-Key172
- Script*3, 4, 8, 9, 22, 23, 25, 26, 48
- Segitiga 119
- Senti.....52
- Signal processing*..... 4
- Simbolxv, 15, 26, 28, 35, 36, 37,
38, 39, 40, 41, 50, 51, 54, 55,
56, 57, 59, 60, 71, 72, 80, 83,
141, 159
- Simulasiv, vii, ix, x, xi, xii, xiv,
xvii, xviii, xix, 1, 2, 32, 33, 34,
41, 85, 87, 89, 91, 93, 94, 97, 98,
99, 101, 103, 104, 115, 116, 118,
120, 121, 122, 124, 126, 128, 130,
131, 132, 133, 144, 149, 151, 172
- Simulink, iii, iv, v, vii, viii, ix, xiv,
xv, xvi, xvii, xviii, xx, 1, 2, 3, 4,
10, 11, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33,
34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41,
42, 48, 49, 81, 86, 87, 90, 91,
93, 94, 103, 115, 116, 172
- Sinyalxvii, xix, xxi, 32, 34, 41, 74,
77, 80, 82, 83, 84, 85, 87, 88,
89, 90, 93, 94, 95, 99, 100, 101,
103, 104, 105, 119, 120, 125, 127,
128, 129, 130, 131, 135, 136, 138,
139, 140, 144, 146, 154, 157, 158,
161, 162, 163, 164, 166, 167, 168,
171, 172, 173, 175, 184, 188
- Sinyal error84
- Sinyal positif.....82
- SMD xvi, 54, 80
- Source code*..... 3
- Struktur 3
- Sumber teganganix, xv, xviii, 36,
37, 38, 39, 40, 58, 59, 60, 68,
73, 81, 85, 113, 114, 120, 124, 127,
136
- T
- Tahanan masukan 82, 101, 119
- Tak berhingga17
- Tak terhingga 81, 82, 87

Tegangan ix, xiv, xv, xvi, xix, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 49, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 76, 77, 79, 81, 83, 84, 85, 88, 92, 93, 101, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 113, 114, 119, 120, 122, 123, 124, 126, 127, 129, 131, 133, 136, 138, 139, 142, 144, 145, 146, 148, 154, 155, 160, 161, 167, 186, 187	V
Teorema superposisi.....106, 112	Variable.....5, 7, 13, 14
Tera..... 52	Virtual..... 85
Terminalx, xvii, 37, 38, 39, 40, 59, 81, 84, 96, 97, 98, 106, 107, 108, 145	
Theveninx, xvii, 101, 102, 103, 104, 105	
<i>Toolbox</i>1, 3	
<i>Tools</i>v, 1, 48	
Transistor.....80, 139, 158	
U	
Umpan balikxxi, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 101, 133, 146, 154, 165, 166, 180, 188	
Umpan balik negative..... 83	

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Dr. Ir. Ni Wayan Sri Ariyani, S.T., MM., IPM., ASEAN.Eng. (sriariyani@unud.ac.id, +6281338799422) lahir di Bangli, 03-05-1967. Ia meraih gelar sarjana dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dalam bidang studi Teknik Elektro-Elektronika. Secara berurutan, ia menempuh Magister Manajemen Ekonomi gelar doktor pada bidang Ilmu Manajemen Ekonomi, gelar profesi Ir. pada PSPPI Pascasarjana Universitas Udayana. Selain itu, ia juga merupakan Insinyur Profesional Madya pada PII, juga telah teregistrasi sebagai *ASEAN Engineer*. Selain sebagai dosen tetap PSTE UNUD (1993) strata sarjana dan magister, Dr. Sri Ariyani juga merupakan *Co-founder* Baliyoni Group dan *e-marketplace* Balimall.id, konsultan Teknologi Informasi pada instansi pemerintah, swasta, dan aktif sebagai narasumber dalam pengembangan IKM dan UMKM berbasis *digital marketing*. Riset penelitian yang diminati yaitu dalam bidang: *Tecnopreneurship*, *Financial Technology*, *Financial Consultant*, dan *Digital Marketing*. Mata kuliah yang diampu adalah *Tecnopreneurship*, Teknologi Transduser, Elektronika Terapan, Sistem Informasi Manajemen, dan Etika Profesi TI.



Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, S.T., M.T., IPU., ASEAN.Eng. (kjatiwirya@unram.ac.id, +6282236260303) lahir di Desa Penyaringan pada April 1966. Pendidikan formal pendidikan SD, SMP dan SMAN semua ditempuh di kota kelahirannya Negara. Kemudian ia menempuh kuliah S-1 (UNUD 1994) Teknik Elektro, S-2 (ITS 2003) Teknik Elektro, S-3 (UNUD 2020) Teknik Elektro, dan

pendidikan profesi Ir. (UNUD 2018). Saat ini ia merupakan Insinyur Profesional Utama pada PII. Ia juga telah teregistrasi sebagai *ASEAN Engineer*. Selain aktif sebagai konsultan pada bidang MEP dan Komputer, Dr. Wiryajati juga aktif sebagai Tenaga Ahli Elektronika Bandara, Tenaga Ahli Mekanikal dan Elektrikal di perusahaan swasta nasional, juga tersertifikasi sebagai terapis hipnosis, dan *mesmerism* CH., CHt., CTM. Ia aktif dalam mengajar sebagai dosen tetap pada Teknik Elektro Universitas Mataram, NTB, Indonesia. Selain aktif berorganisasi, ia juga sebagai aktif menulis buku dan juga sudah menerbitkan jurnal nasional maupun internasional. Ketertarikan risetnya adalah pada bidang Konversi Daya untuk Pengembangan Energi Terbarukan (*Renewable Energy*), *Power Electronics and Drives*, Motor-Motor Listrik. Ia merupakan *member* IET (2014.IEEE, 2018) sampai sekarang.



Dr. Ir. Ni Wayan Sri Ariyani, S.T., M.M., IPM., ASEAN.Eng.

(sriariyani@unud.ac.id)

Lahir di Bangli, 03-05-1967. Ia meraih gelar sarjana dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dalam bidang studi Teknik Elektro-Elektronika. Secara berurutan, ia menempuh Magister Manajemen Ekonomi gelar Doktor pada bidang Ilmu Manajemen Ekonomi, gelar profesi Ir. pada PSPPI Pascasarjana Universitas Udayana. Selain itu, ia juga merupakan Insinyur Profesional Madya pada PII, juga telah teregistrasi sebagai ASEAN Engineer. Selain sebagai dosen tetap PSTE UNUD (1993) strata sarjana dan magister, Dr. Sri Ariyani juga merupakan *Co-founder* Baliyoni Group dan *e-marketplace* Balimall.id, konsultan Teknologi Informasi pada instansi pemerintah, swasta, dan aktif sebagai narasumber dalam pengembangan IKM dan UMKM berbasis digital marketing. Riset penelitian yang diminati yaitu dalam bidang: *Techpreneurship*, *Financial Technology*, *Financial Consultant*, dan *Digital Marketing*. Mata kuliah yang diampu adalah *Techpreneurship*, *Teknologi Transduser*, *Elektronika Terapan*, *Sistem Informasi Manajemen*, dan *Etika Profesi TI*.



Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, S.T., M.T., IPU., ASEAN.Eng.

(kjatiwirya@unram.ac.id)

Lahir di Desa Penyaringan pada April 1966. Pendidikan formal pendidikan SD, SMP dan SMAN semua ditempuh di kota kelahirannya Negara. Kemudian ia menempuh kuliah S-1 (UNUD 1994) Teknik Elektro, S-2 (ITS 2003) Teknik Elektro, S-3 (UNUD 2020) Teknik Elektro, dan pendidikan profesi Ir. (UNUD 2018). Saat ini ia merupakan Insinyur Profesional Utama pada PII. Ia juga telah teregistrasi sebagai ASEAN Engineer. Selain aktif sebagai konsultan pada bidang MEP dan Komputer, Dr. Wiryajati juga aktif sebagai Tenaga Ahli Elektronika Bandara, Tenaga Ahli Mekanikal dan Elektrikal di perusahaan swasta nasional, juga tersertifikasi sebagai terapis hipnosis, dan *mesmerism* CH., CHt., CTM. Ia juga sebagai dosen tetap pada Teknik Elektro Universitas Mataram, NTB, Indonesia. Selain aktif berorganisasi, ia juga aktif sebagai penulis buku dan juga sudah menerbitkan jurnal nasional maupun internasional. Ketertarikan risetnya adalah pada bidang Konversi Daya untuk Pengembangan Energi Terbarukan (*Renewable Energy*), *Power Electronics and Drives*, *Motor-Motor Listrik*. Ia merupakan *member* IET (2014.IEEE, 2018) sampai sekarang.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581
Telp/Fax : (0274) 4533427
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

cs@deepublish.co.id
Penerbit Deepublish
@penerbitbuku_deepublish
www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Pemrograman

ISBN 978-623-02-4629-6



9 786230 246296