

# Seni Mendesain Rangkaian Elektronika Dasar

## Melalui Pendekatan Sistematis dan Praktis

Budi Herdiana



Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Seni Mendesain Rangkaian Elektronika Dasar

Melalui Pendekatan Sistematis  
dan Praktis



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

# Seni Mendesain Rangkaian Elektronika Dasar

## Melalui Pendekatan Sistematis dan Praktis

Budi Herdiana



Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2025 Budi Herdiana

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Teknik Dasar Mendesain Rangkaian Elektronika: Melalui Pendekatan Sistematis dan Praktis  
Budi Herdiana

xxxiii + 411 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-6303-81-3 (*e-book*)

1. Sistem Elektronika  
3. Simulasi Elektronika

2. Teknik Elektronika  
4. Pembiasan Rangkaian Elektronika

621.381

Editor Akuisisi & Pendamping : Wijananto  
*Copy editor* : Anton W  
*Proofreader* : Meita Safitri dan Martinus Helmiawan  
Penata Isi : S. Imam Setyawan dan Meita Safitri  
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan

Edisi pertama : Oktober 2021  
Edisi kedua : Desember 2025

Diterbitkan oleh:



Penerbit BRIN, Anggota Ikapi  
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah  
Gedung B.J. Habibie, Lantai 8  
Jln. M.H. Thamrin No. 8, Kebon Sirih,  
Menteng, Jakarta Pusat,  
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340  
Whatsapp: 0811-8612-369  
*e-mail*: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)  
*website*: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)  
 Penerbit BRIN  
 @penerbit\_brin  
 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Isi

Daftar Gambar.....	xi
Daftar Tabel.....	xxv
Pengantar Penerbit.....	xxvii
Prakata .....	xxix
Testimoni .....	xxxiii
 BAB I    SATUAN-SATUAN KELISTRIKAN DALAM SISTEM ELEKTRONIKA.....	 1
A. Pendahuluan .....	2
B. Sumber Tegangan .....	4
C. Sumber Arus .....	7
D. Sumber Daya .....	8
E. Resistansi.....	13
RANGKUMAN.....	20
LATIHAN SOAL .....	21
DAFTAR PUSTAKA .....	24

BAB II	MENGENAL TEORI DASAR RANGKAIAN ELEKTRONIKA.....	25
	A. Pendahuluan .....	26
	B. Cara Mengukur Rangkaian Elektronika.....	26
	C. Penerapan Hukum Ohm pada Rangkaian.....	31
	D. Model Rangkaian Serial.....	33
	E. Model Rangkaian Paralel .....	35
	F. Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Rangkaian .....	37
	G. Penerapan Teorema Thevenin pada Rangkaian.....	40
	RANGKUMAN.....	43
	LATIHAN SOAL .....	44
	DAFTAR PUSTAKA .....	46
 BAB III	 MENGENAL BAHAN DASAR KOMPONEN ELEKTRONIKA.....	 47
	A. Pendahuluan .....	48
	B. Struktur Elemen Atom .....	49
	C. Penyusun Bahan Dasar Semikonduktor.....	51
	D. Konsep Elektron dan Lubang .....	54
	E. Semikonduktor Intrinsik .....	56
	F. Semikonduktor Ekstrinsik .....	60
	G. Hubungan P-N (P-N <i>Junction</i> ) .....	65
	H. Rekombinasi .....	67
	RANGKUMAN.....	68
	LATIHAN SOAL .....	69
	DAFTAR PUSTAKA .....	70
 BAB IV	 MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGGUNAKAN KOMPONEN DIODA .....	 71
	A. Pendahuluan .....	72
	B. Analisis Garis Beban Dioda .....	74
	C. Model Pendekatan Dioda .....	78
	D. Aplikasi Rangkaian Dioda.....	92

E. Cara Pengujian Kualitas Dioda.....	111
RANGKUMAN.....	113
LATIHAN SOAL .....	113
DAFTAR PUSTAKA .....	116
 BAB V MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGUNAKAN TRANSISTOR BIPOLAR (TRANSISTOR DUA POLARITAS) .....	117
A. Pendahuluan .....	118
B. Model Pengendalian Arus pada Transistor Bipolar .....	119
C. Garis Beban Kerja Transistor Bipolar.....	120
D. Karakteristik Transistor Bipolar .....	125
E. Transistor Bipolar sebagai Sakelar.....	130
F. Model Pembiasan Transistor Bipolar.....	134
G. Rangkaian Penguat Transistor Bipolar .....	146
RANGKUMAN.....	167
LATIHAN SOAL .....	167
DAFTAR PUSTAKA.....	170
 BAB VI MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGUNAKAN TRANSISTOR UNIPOLAR (TRANSISTOR SATU POLARITAS).....	171
A. Pendahuluan .....	172
B. Karakteristik Transistor Efek Medan (FET) .....	174
C. Pembiasan Transistor Efek Medan (FET).....	181
D. Rangkaian Penguat Transistor Efek Medan .....	195
RANGKUMAN.....	204
LATIHAN SOAL .....	204
DAFTAR PUSTAKA.....	208
 BAB VII MENDESAIN RANGKAIAN MENGGUNAKAN KOMPONEN MOSFET .....	209
A. Pendahuluan .....	210
B. Mode Pengosongan ( <i>Depletion</i> ).....	211

C. Karakteristik MOSFET Mode Pengosongan .....	214
D. Pembiasan MOSFET Mode Pengosongan .....	219
E. Pembiasan MOSFET Tipe Peningkatan .....	226
RANGKUMAN .....	233
LATIHAN SOAL .....	233
DAFTAR PUSTAKA .....	237
BAB VIII MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGUNAKAN KOMPONEN PENGUAT OPERASIONAL (OP-AMP) .....	239
A. Pendahuluan .....	240
B. Karakteristik Penguat Operasional.....	244
C. Sistem Umpan Balik Penguat Operasional.....	245
D. Aplikasi Rangkaian Penguat Operasional.....	255
RANGKUMAN.....	284
LATIHAN SOAL .....	284
DAFTAR PUSTAKA .....	287
BAB IX PRINSIP KERJA TANGGAPAN FREKUENSI PENGUAT TRANSISTOR .....	289
A. Pendahuluan .....	290
B. Frekuensi Kritis ( <i>Cut-off</i> ) Penguat Transistor .....	291
C. Frekuensi Kerja Penguat Transistor .....	292
RANGKUMAN.....	303
LATIHAN SOAL .....	304
DAFTAR PUSTAKA .....	307
BAB X MENDESAIN RANGKAIAN PENGUAT DAYA .....	309
A. Pendahuluan .....	310
B. Operasi Kerja Kelas Penguat Daya.....	310
C. Penguat Daya Kelas A.....	313
D. Penguat Daya Kelas B .....	321
E. Penguat Daya Kelas AB .....	324

F. Penguat Daya Kelas C .....	332
G. Penguat Daya Kelas C Tertala ( <i>Tuned Circuit</i> ).....	335
RANGKUMAN.....	339
LATIHAN SOAL .....	340
DAFTAR PUSTAKA .....	343
 BAB XI MENDESAIN RANGKAIAN OSILATOR SEBAGAI PEMBANGKIT SINYAL DAN FREKUENSI .....	345
A. Pendahuluan .....	346
B. Gejala Osilasi .....	347
C. Model Umpan Balik Sistem Osilator .....	350
D. Beberapa Tipe Osilator .....	352
RANGKUMAN.....	384
LATIHAN SOAL .....	385
DAFTAR PUSTAKA .....	388
 Lampiran .....	389
Glosarium.....	399
Daftar Pustaka .....	405
Tentang Penulis .....	407
Indeks.....	409

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Gambar

Gambar 1.1	Perangkat Elektronik sebagai Penyearah Sinyal.....	3
Gambar 1.2	Perangkat Elektronika sebagai Penguatan .....	3
Gambar 1.3	Perangkat Elektronik sebagai Pembangkit Sinyal.....	3
Gambar 1.4	Skema Rangkaian dengan Variabel Resistansi Beban.....	4
Gambar 1.6	Skema Dasar Rangkaian Elektronika .....	5
Gambar 1.5	Kurva Karakteristik Tegangan Beban Ideal dan Tak Ideal .....	5
Gambar 1.7	Kurva Karakteristik Perubahan Arus dalam Rangkaian Elektronika .....	7
Gambar 1.8	Kurva Tanggapan Daya Beban Maksimum Rangkaian.	10
Gambar 1.9	Skema Rangkaian dengan Sumber Tegangan Bolak-Balik.....	11
Gambar 1.10	Skema Rangkaian Hasil Simulasi Contoh 1.4.....	12
Gambar 1.11	Jenis Bahan Dasar Komponen Resistor .....	13
Gambar 1.12	Komposisi Empat Kode Warna Resistor Berbahan Karbon .....	14
Gambar 1.13	Nilai Resistansi dengan 5 Kode Warna.....	16
Gambar 1.14	Simbol Resistor Variabel.....	19
Gambar 1.15	Bentuk Tampilan Fisik Resistor Variabel.....	19

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 1.16	Konfigurasi Potensiometer .....	20
Gambar 1.17	Skala Jarum Penunjuk Tegangan Multimeter Analog untuk Soal No. 5 .....	22
Gambar 1.18	Skala Jarum Penunjuk Resistansi Multimeter Analog untuk Soal No. 6 .....	22
Gambar 1.20	Rangkaian Resistansi Paralel Sederhana .....	23
Gambar 1.19	Rangkaian Resistansi Serial Sederhana .....	23
Gambar 2.1	Rangkaian Elektronika dengan Beban Lampu.....	26
Gambar 2.2	Cara Pengukuran Arus Rangkaian .....	27
Gambar 2.3	Cara Pengukuran Tegangan Rangkaian .....	27
Gambar 2.4	Cara Pengukuran Resistansi Rangkaian.....	28
Gambar 2.5	Model Multimeter Analog.....	29
Gambar 2.6	Indikator Jarum Penunjuk Skala Ukur Multimeter Analog .....	30
Gambar 2.7	Penerapan Hukum Ohm pada Rangkaian Sederhana...	32
Gambar 2.8	Kurva Kelinearitasan Arus terhadap Tegangan Rangkaian.....	33
Gambar 2.9	Model Rangkaian Serial Resistor Sederhana.....	33
Gambar 2.10	Bentuk Rangkaian Paralel Resistor .....	34
Gambar 2.11	Rangkaian Serial Resistor dengan Sumber Tegangan....	35
Gambar 2.12	Skema Rangkaian Paralel Resistor .....	36
Gambar 2.13	Rangkaian Paralel dengan Sumber Tegangan Searah....	36
Gambar 2.14	Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Tanpa Beban.....	37
Gambar 2.15	Penerapan Hukum Pembagian Tegangan dengan Beban.....	38
Gambar 2.16	Skema Rangkaian Hasil Simulasi Contoh Soal 2.6 .....	39
Gambar 2.17	Penerapan Teorema Thevenin pada Rangkaian.....	40
Gambar 2.18	Rangkaian Ekuivalen Thevenin .....	41
Gambar 2.19	Penentuan Nilai Tegangan Thevenin .....	41
Gambar 2.20	Hasil Rangkaian Ekuivalen Thevenin.....	42
Gambar 2.21	Rangkaian Serial-Paralel dengan Sumber Tegangan Searah.....	44

Gambar 2.22	Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Berbeban.....	44
Gambar 2.23	Rangkaian Paralel Resistor dengan Sumber Tegangan Searah.....	45
Gambar 2.24	Rangkaian Serial Resistor .....	45
Gambar 3.1	Penelitian transistor oleh John Bardeen, William Shockley, dan Walter Brattain (dari kiri ke kanan) di Laboratorium Bell Telepon.....	48
Gambar 3.2	Struktur Atom Silikon.....	50
Gambar 3.3	Ikatan Elektron Valensi Bahan Silikon dan Germanium .....	52
Gambar 3.4	Ikatan Kovalen Atom Silikon.....	53
Gambar 3.5	Tipe Polaritas Bahan Semikonduktor.....	55
Gambar 3.6	Energi Gap Bahan Dasar Semikonduktor .....	56
Gambar 3.7	Golongan Campuran Bahan Dasar Semikonduktor .....	61
Gambar 3.8	Bahan Semikonduktor Tipe-N .....	62
Gambar 3.9	Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 3.2 .....	64
Gambar 3.10	Bahan Semikonduktor Tipe-P .....	65
Gambar 3.11	Aliran Arus pada Bahan Semikonduktor <i>P-N Junction</i> .....	66
Gambar 3.12	Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 3.3 .....	67
Gambar 4.1	Simbol dan Bentuk Fisik Dioda.....	72
Gambar 4.2	Kurva Karakteristik Dioda .....	73
Gambar 4.3	Kinerja Dioda Ideal saat Arus Maju dan Mundur .....	74
Gambar 4.4	Kurva Garis Beban Dioda .....	75
Gambar 4.5	Skema Rangkaian Serial Dioda Sederhana.....	75
Gambar 4.6	Rangkaian Serial Satu Dioda .....	76
Gambar 4.7	Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 4.1 .....	77
Gambar 4.8	Model Pendekatan Dioda Ideal .....	78
Gambar 4.10	Perhitungan Rangkaian Serial Dioda Model Ideal.....	79
Gambar 4.9	Rangkaian Serial Dioda Ideal .....	79
Gambar 4.12	Rangkaian Paralel Dioda Model Ideal.....	80
Gambar 4.11	Kurva Karakteristik Rangkaian Dioda Ideal .....	80

Gambar 4.13	Perhitungan Rangkaian Paralel Dioda Model Ideal.....	81
Gambar 4.15	Rangkaian dengan Beban Dioda Ideal.....	82
Gambar 4.14	Hasil Kurva Karakteristik Dioda Ideal Contoh Soal 4.3.....	82
Gambar 4.16	Kurva Karakteristik Dioda Ideal .....	84
Gambar 4.18	Memulai Menjalankan Program Simulasi Multisim .....	85
Gambar 4.17	Hasil Kurva Karakteristik Dioda Tak Ideal Contoh Soal 4.5.....	85
Gambar 4.19	Tampilan Program Multisim.....	86
Gambar 4.20	Lembar Kerja Simulasi Multisim .....	86
Gambar 4.21	Menu Tampilan Komponen pada Multisim.....	87
Gambar 4.22	Proses Menjalankan Rangkaian Hasil Simulasi pada Multisim.....	87
Gambar 4.23	Rangkaian Hasil Simulasi Multisim.....	88
Gambar 4.24	Hasil Simulasi Rangkaian Dioda Contoh Soal 4.6.....	89
Gambar 4.26	Rangkaian Dioda menggunakan Pendekatan Ke-3.....	90
Gambar 4.25	Rangkaian Pengganti Resistansi <i>Bulk</i> dan Kurva Karakteristiknya.....	90
Gambar 4.27	Hasil Simulasi Rangkaian Dioda Contoh Soal 4.7.....	91
Gambar 4.28	Jenis Rangkaian Penyearah Dioda .....	93
Gambar 4.29	Jenis Rangkaian Penyearah Arus Balik.....	94
Gambar 4.30	Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang .....	96
Gambar 4.31	Hasil Simulasi Penyearah Setengah Gelombang.....	98
Gambar 4.32	Rangkaian Penyearah <i>Reverse</i> Dioda.....	99
Gambar 4.33	Hasil Simulasi Multisim Penyearah <i>Reverse</i> Dioda Setengah Gelombang.....	100
Gambar 4.34	Rangkaian Penyearah Dioda Setengah Gelombang....	101
Gambar 4.35	Hasil Simulasi Matlab Penyearah Dioda Setengah Gelombang .....	103
Gambar 4.36	Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh.....	104
Gambar 4.37	Hasil Simulasi Multisim Penyearah Dioda Gelombang Penuh.....	106

Gambar 4.38	Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh Metoda Jembatan .....	107
Gambar 4.39	Lintasan Arus Rangkaian Penyearah Penuh Metode Jembatan .....	108
Gambar 4.40	Rangkaian Penyearah Dioda Metoda Jembatan Dioda.....	109
Gambar 4.41	Hasil Simulasi Multisim Penyearah Metode Jembatan Dioda.....	110
Gambar 4.42	Cara Pengujian Komponen Dioda.....	112
Gambar 4.43	Cara Pengujian Arus Maju Dioda.....	112
Gambar 4.45	Rangkaian Penyearah Metode Jembatan Dioda .....	114
Gambar 4.44	Rangkaian Serial Dioda Sederhana.....	114
Gambar 4.46	Penyearah Dioda Setengah Gelombang dengan Filter RC .....	115
Gambar 4.47	Penyearah Dioda Gelombang Penuh dengan Filter RC .....	115
Gambar 4.48	Penyearah Dioda Metode Jembatan dengan Filter RC .....	115
Gambar 5.1	Tipe Transistor Bipolar .....	118
Gambar 5.2	Aliran Arus dalam Transistor Bipolar.....	119
Gambar 5.3	Daerah Kerja Transistor Bipolar .....	120
Gambar 5.4	Rangkaian Bias Transistor Bipolar .....	121
Gambar 5.5	Rangkaian Hasil Simulasi Contoh Soal 5.1 .....	122
Gambar 5.6	Kurva Garis Beban Hasil Perhitungan .....	123
Gambar 5.7	Beberapa Kemungkinan Perubahan Garis Beban Transistor BJT ( <i>Bipolar Junction Transistor</i> ) .....	124
Gambar 5.8	Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 5.2 .....	127
Gambar 5.9	Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 5.3 .....	129
Gambar 5.10	Rangkaian Transistor sebagai Sakelar.....	131
Gambar 5.11	Model Rangkaian Titik Kerja Transistor Bias Emite	132
Gambar 5.12	Rangkaian Hasil Simulasi Multisim Rangkaian Transistor Bipolar.....	133
Gambar 5.13	Hasil Perhitungan Garis Beban Transistor Bipolar ....	134

Gambar 5.14	Rangkaian Pembiasan Transistor BJT .....	136
Gambar 5.15	Rangkaian Penguat Transistor <i>Common Emitter</i> (CE).....	137
Gambar 5.16	Alur Sinyal DC pada Rangkaian Transistor BJT.....	137
Gambar 5.17	Hasil Simulasi Multisim Pembiasan Model Sinyal DC .....	138
Gambar 5.18	Dasar Rangkaian Penguat Transistor BJT .....	143
Gambar 5.19	Rangkaian Pengganti AC Penguat Dasar transistor BJT .....	143
Gambar 5.20	Pengaruh Sinyal AC terhadap Impedansi Input Rangkaian.....	144
Gambar 5.21	Rangkaian Penguat Transistor BJT Sederhana .....	145
Gambar 5.22	Model Dasar Rangkaian Penguat <i>Common Emitter</i> Tanpa Beban .....	147
Gambar 5.23	Rangkaian Penguat Emitter Bersama dengan Tanpa Beban.....	148
Gambar 5.24	Model Dasar Rangkaian <i>Common Base</i> .....	151
Gambar 5.25	Rangkaian Pengganti AC Common Base .....	152
Gambar 5.26	Rangkaian Dasar Penguat <i>Common Base</i> .....	154
Gambar 5.27	Rangkaian Penguat <i>Common Base</i> dengan Resistansi Sumber.....	155
Gambar 5.28	Rangkaian Dasar Penguat Transistor <i>Common</i> <i>Collector</i> (CC).....	157
Gambar 5.29	Rangkaian Ekuivalen Penguat Transistor <i>Common</i> <i>Collector</i> .....	158
Gambar 5.30	Modifikasi Rangkaian Penguat Transistor <i>Common</i> <i>Collector</i> .....	160
Gambar 5.31	Rangkaian Penguat Emitter Bersama ( <i>Common Emitter</i> ) .....	163
Gambar 5.32	Contoh Tampilan Alat Ukur Multimeter Analog .....	166
Gambar 5.33	Rangkaian Pembiasan Transistor Bipolar .....	168
Gambar 5.35	Rangkaian Penguat Transistor Bipolar <i>Common</i> <i>Emitter</i> .....	169
Gambar 5.34	Rangkaian Bias Transistor Pembagi Tegangan .....	169
Gambar 5.36	Rangkaian Penguat Transistor Emitter Bersama.....	170

Gambar 6.1	Bentuk Proses Pengendalian Kinerja Antara Transistor BJT dan FET .....	172
Gambar 6.2	Tipe Transistor Efek Medan .....	173
Gambar 6.3	Simbol Transistor Efek Medan .....	174
Gambar 6.4	Alur Pengendalian Muatan pada FET Tipe N-Kanal .....	174
Gambar 6.5	Kurva Karakteristik FET.....	176
Gambar 6.6	Kurva Transfer Transistor Efek Medan.....	178
Gambar 6.7	Pembiasan Kanal-N JFET Sumber Tegangan Searah ( $-V_{GG}$ ).....	182
Gambar 6.8	Kurva Karakteristik Persamaan Shockley.....	183
Gambar 6.9	Rangkaian Prategangan FET.....	184
Gambar 6.10	Rangkaian Prategangan FET Model Sinyal DC.....	185
Gambar 6.11	Kurva Karakteristik FET Hasil Perhitungan .....	186
Gambar 6.12	Konfigurasi Pembiasan JFET ( <i>self-biasing JFET configuration</i> ) .....	187
Gambar 6.13	Garis Kerja <i>self-biasing</i> FET.....	188
Gambar 6.14	Rangkaian Prategangan FET Model Sinyal AC.....	189
Gambar 6.15	Rangkaian Pembiasan FET.....	191
Gambar 6.16	Pembiasan pada Rangkaian FET.....	193
Gambar 6.17	Analisis Model DC pada Rangkaian FET .....	194
Gambar 6.18	Rangkaian Pengganti FET <i>Common Source</i> .....	196
Gambar 6.19	Garis Beban Rangkaian Penguat <i>Common Source</i> FET .....	197
Gambar 6.20	Rangkaian Penguat FET <i>Common Drain</i> .....	200
Gambar 6.21	Rangkaian Penguat FET <i>Common Gate</i> .....	202
Gambar 6.22	<i>Set Up</i> Pengukuran Arus pada Rangkaian FET .....	205
Gambar 6.23	Rangkaian Pembiasan Model Sinyal DC pada FET ...	205
Gambar 6.24	Rangkaian Penguat FET.....	206
Gambar 6.25	Rangkaian Penguat FET Tanpa Beban.....	206
Gambar 6.26	Pembiasan Sinyal DC pada Rangkaian FET .....	207
Gambar 7.1	MOSFET Mode Pengosongan.....	211
Gambar 7.2	Struktur Fisik D-MOSFET N-Kanal.....	212

Gambar 7.3	Model Pembiasan Tegangan D-MOSFET .....	213
Gambar 7.4	Konstruksi dan Simbol Jenis Kanal D-MOSFET .....	213
Gambar 7.5	Kurva Karakteristik Mode D-MOSFET .....	214
Gambar 7.6	Kurva Karakteristik Transkonduktansi Mode D-MOSFET .....	217
Gambar 7.7	Kurva Transfer Mode D-MOSFET N-kanal (hasil perhitungan) .....	218
Gambar 7.8	Model Pembiasan pada Mode D-MOSFET.....	220
Gambar 7.9	Pembiasan pada Rangkaian Pembagi Tegangan Mode D-MOSFET N-Kanal.....	222
Gambar 7.10	Contoh Rangkaian Pembiasan Mode D-MOSFET N-Kanal.....	224
Gambar 7.11	Kurva Transfer dan Garis Beban Kerja Mode D-MOSFET N-Kanal.....	226
Gambar 7.12	Susunan Konstruksi Bahan Mode E-MOSFET Kanal-N.....	227
Gambar 7.13	Daerah Operasi Kerja Mode E-MOSFET Kanal-N ....	228
Gambar 7.14	Skema Rangkaian Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N.....	229
Gambar 7.15	Kurva Karakteristik Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N.....	230
Gambar 7.16	Contoh Rangkaian Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N.....	231
Gambar 7.17	Rangkaian Hasil Simulasi (Contoh Soal 7.5).....	232
Gambar 7.18	Rangkaian Pembiasan <i>Common Source</i> .....	234
Gambar 7.19	Dasar Rangkaian Penguat MOSFET <i>Common Source</i> .....	234
Gambar 7.20	Rangkaian Penguat MOSFET Mode Peningkatan .....	235
Gambar 7.21	Dasar Rangkaian Penguat MOSFET Mode Peningkatan.....	236
Gambar 7.22	Pembiasan MOSFET Mode Peningkatan.....	236
Gambar 8.1	Blok Diagram Tipikal Penguat Operasional .....	240
Gambar 8.2	Konfigurasi Dasar Penguat Operasional .....	241

Gambar 8.3	Nilai CMMR Penguat Operasional.....	243
Gambar 8.4	Rangkaian Ekuivalen Penguat Operasional.....	245
Gambar 8.5	Konfigurasi Umpan Balik Penguat Operasional.....	246
Gambar 8.6	Konfigurasi Rangkaian Penguat Operasional Umpan Balik Seri .....	247
Gambar 8.7	Konfigurasi Rangkaian Penguat Umpan Balik Paralel	252
Gambar 8.8	Rangkaian Penguat Operasional Pengikut Tegangan ( <i>Voltage Follower</i> ).....	256
Gambar 8.9	Hasil Simulasi Multisim Contoh Soal 8.4.....	258
Gambar 8.10	Rangkaian Penguat Penjumlah 2 Masukan .....	258
Gambar 8.11	Rangkaian Penguat Penjumlah dengan $n$ Masukan....	260
Gambar 8.12	Rangkaian Penguat Penjumlah (Kasus Soal) .....	260
Gambar 8.13	Hasil Simulasi Multisim Penguat Penjumlah.....	261
Gambar 8.14	Rangkaian Penguat Penjumlah <i>Multiple Input</i> .....	262
Gambar 8.15	Hasil Simulasi Penguat Penjumlah Multi Input .....	263
Gambar 8.16	Rangkaian Penguat Penjumlah Tak Membalik Fase...	264
Gambar 8.17	Hasil Simulasi Multisim Contoh Soal 8.7.....	265
Gambar 8.18	Rangkaian Penguat Penjumlah Rata-Rata .....	266
Gambar 8.19	Rangkaian Penguat Pengurang.....	267
Gambar 8.20	Rangkaian Penguat <i>Integrator</i> .....	268
Gambar 8.21	Rangkaian Penguat Integrator Contoh Soal 8.8 .....	269
Gambar 8.22	Rangkaian Hasil Simulasi Multisim (Contoh Soal 8.8).....	270
Gambar 8.23	Rangkaian Integrator dengan Tahanan Umpan Balik.....	272
Gambar 8.24	Integrator dengan Umpan Balik (Kasus Soal) .....	272
Gambar 8.25	Integrator dengan Umpan Balik Kapasitor.....	273
Gambar 8.26	Rangkaian Penguat Operasional Diferensiator .....	274
Gambar 8.27	Rangkaian Diferensiator (Contoh Soal 8.12).....	275
Gambar 8.28	Bentuk Sinyal <i>Output</i> Diferensiator (Contoh Soal 8.12) .....	276
Gambar 8.29	Rangkaian Diferensiator dengan Input Sinyal Segitiga.....	276

Gambar 8.30	Bentuk Gelombang Keluaran Rangkaian Diferensiator.....	278
Gambar 8.31	Rangkaian Komparator <i>Zero-Crossing Detector</i> .....	279
Gambar 8.32	Angkaian Dasar <i>Non-Zero Level Detector</i> .....	280
Gambar 8.33	Rangkaian <i>Non-Zero Level Detector</i> dengan Pembagi Tegangan .....	280
Gambar 8.34	Bentuk Sinyal Keluaran <i>Non-Zero Detector</i> .....	281
Gambar 8.35	Rangkaian Penguat Komparator (Kasus Soal) .....	281
Gambar 8.36	Bentuk Gelombang Keluaran Komparator .....	282
Gambar 8.37	Hasil Simulasi Rangkaian dan Bentuk Sinyal Output (Contoh Soal 8.14).....	283
Gambar 8.38	Rangkaian Penguat Penjumlah Tiga Masukan .....	285
Gambar 8.39	Rangkaian Penguat Penjumlah Dua Masukan.....	285
Gambar 8.40	Rangkaian Penguat Diferensial Satu Masukan .....	286
Gambar 8.41	Rangkaian Integrator .....	286
Gambar 9.1	Kurva Tanggapan Frekuensi Penguat Transistor .....	290
Gambar 9.2	Rangkaian Penguat Transistor BJT pada Frekuensi Rendah.....	293
Gambar 9.3	Hasil Simulasi Multisim (Contoh 9.1) .....	297
Gambar 9.4	Dampak Kapasitansi Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat FET.....	298
Gambar 9.5	Rangkaian Penguat FET (Contoh 9.2) .....	300
Gambar 9.6	Kurva Karakteristik Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat FET.....	302
Gambar 9.7	Hasil Simulasi Multisim (Contoh 9.3) .....	303
Gambar 9.8	Respons Frekuensi Rangkaian Penguat Transistor Bipolar.....	304
Gambar 9.9	Respons Frekuensi Rangkaian Penguat MOSFET.....	305
Gambar 9.10	Respons Frekuensi Rangkaian Penguat Transistor CE306 .....	306
Gambar 9.11	Respons Frekuensi Rangkaian Penguat MOSFET.....	307
Gambar 10.1	Arus Kolektor Penguat Daya Kelas A .....	310
Gambar 10.2	Siklus Arus Kolektor Penguat Daya Kelas B.....	311
Gambar 10.3	Siklus Arus Kolektor Penguat Daya Kelas C.....	311

Gambar 10.4	Jenis Kopling pada Penguat Daya.....	312
Gambar 10.5	Model Rangkaian Penguat Daya Tertala .....	313
Gambar 10.6	Kurva Titik Operasi Kerja Penguat Daya Kelas A.....	314
Gambar 10.7	Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas A (Model Kopling).....	315
Gambar 10.8	Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas A Terkopling Transformer.....	316
Gambar 10.9	Bentuk Gelombang <i>Output</i> Penguat Daya Kelas A Terkopling Transformer .....	319
Gambar 10.10	Rangkaian Penguat Daya Kelas A dengan Beban Speaker .....	320
Gambar 10.11	Operasi Kerja Penguat Kelas B <i>Push Full</i> .....	322
Gambar 10.12	Operasi Kerja Penguat Kelas B.....	323
Gambar 10.13	Rangkaian Penguat Daya Kelas AB .....	325
Gambar 10.14	Pembiasan Dioda pada Penguat Daya Kelas AB.....	326
Gambar 10.15	Garis Beban Kerja Penguat Daya Kelas AB .....	327
Gambar 10.16	Rangkaian Penguat Daya Kelas AB Terkopling Transformator .....	328
Gambar 10.17	Rangkaian Penguat Daya Kelas B (Contoh 10.2).....	329
Gambar 10.18	Rangkaian Penguat Daya Kelas B (Contoh 10.3).....	330
Gambar 10.19	Rangkaian Penguat Daya Kelas B (Contoh 10.4).....	331
Gambar 10.20	Operasi Kerja Penguat Daya Kelas C .....	332
Gambar 10.21	Bentuk Gelombang <i>Output</i> Ideal Penguat Daya Kelas C.....	333
Gambar 10.22	Model Penguat Daya Kelas C Tertala .....	336
Gambar 10.23	Kurva Tanggapan Penguatan terhadap Frekuensi Input.....	337
Gambar 10.24	Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas C .....	337
Gambar 10.25	Hasil Simulasi Multisim Rangkaian (Contoh 10.7) ....	338
Gambar 10.26	Skema Rangkaian Penguat Daya Kelas A.....	340
Gambar 10.27	Rangkaian Dasar Penguat Daya dengan Beban Speaker.....	341
Gambar 10.28	Skema Rangkaian Penguat Sederhana Kelas A.....	341

Gambar 10.29	Skema Rangkaian Sederhana Penguat Daya Kelas B..	342
Gambar 10.30	Skema Rangkaian Penguat Daya Kelas B .....	342
Gambar 10.31	Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas C Tak Tertala.	343
Gambar 11.2	Konsep Dasar Osilator Keluaran Multi Gelombang..	347
Gambar 11.1	Blok Dasar Sistem Umpan Balik Osilator .....	347
Gambar 11.3	Gejala Pembangkitan Osilasi pada Sistem Osilator ....	349
Gambar 11.4	Gejala Osilasi yang Tak Teredam .....	349
Gambar 11.5	Model Fase Umpan Balik Osilator.....	350
Gambar 11.6	Gejala Perubahan Penguatan Umpan Balik pada Proses Osilasi .....	351
Gambar 11.7	Jenis Rangkaian Dasar Osilator RC.....	353
Gambar 11.8	Skema Rangkaian Osilator RC Jembatan Wien.....	354
Gambar 11.9	Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal <i>Output</i> (Contoh 11.1).....	355
Gambar 11.10	Modifikasi Rangkaian Osilator RC Jembatan Wien. ..	356
Gambar 11.11	Rangkaian Osilator Transistor Jembatan Wien ( <i>Model Cascade</i> ).....	358
Gambar 11.12	Skema Rangkaian Osilator Penggeser Fase .....	359
Gambar 11.13	Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal <i>Output</i> (Contoh 11.3) .....	362
Gambar 11.14	Skema Rangkaian Osilator LC Tertala .....	364
Gambar 11.15	Skema Dasar Rangkaian Osilator Colpitts .....	364
Gambar 11.16	Modifikasi Rangkaian Osilator Colpitts.....	365
Gambar 11.17	Rangkaian Modifikasi Osilator Colpitts .....	366
Gambar 11.18	Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal <i>Output</i> (Contoh 11.4).....	367
Gambar 11.19	Skema Dasar Rangkaian Osilator Hartley.....	368
Gambar 11.20	Rangkaian Osilator Hartley.....	369
Gambar 11.21	Hasil Simulasi rangkaian dan Sinyal <i>Output</i> (Contoh 11.5).....	370
Gambar 11.22	Struktur Kristal sebagai Bahan Dasar Rangkaian Osilator .....	372
Gambar 11.23	Rangkaian Ekuivalen Kristal untuk Sistem Osilator...	373

Gambar 11.24	Tanggapan Frekuensi Kristal.....	374
Gambar 11.25	Rangkaian Osilator Kristal Colpitts.....	375
Gambar 11.26	Blok Diagram Dasar IC555.....	377
Gambar 11.28	Rangkaian Multivibrator Monostabil.....	378
Gambar 11.29	Blok Diagram Operasi Astabil IC555.....	379
Gambar 11.30	Tegangan Pemicu Masukan dan Keluaran Sinyal Pulsa .....	380
Gambar 11.31	Rangkaian Multivibrator Astabil IC555 .....	382
Gambar 11.32	Hasil Simulasi Multisim (Contoh 11.6).....	383
Gambar 11.33	Rangkaian Osilator Relaksasi.....	385
Gambar 11.34	Rangkaian Dasar Osilator Model Jembatan Wien .....	386
Gambar 11.35	Rangkaian Osilator Model Penggeser Fase.....	386
Gambar 11.36	Rangkaian Osilator Jenis LC .....	387
Gambar 11.37	Rangkaian Osilator LC Tak Tertala .....	387
Gambar 11.38	Rangkaian Multivibrator Astabil .....	388

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Tabel

Tabel 1.1 Nilai Resistor dengan 4 Kode Warna .....14

Tabel 1.2 Nilai Resistor dengan 5 Kode Warna .....17

Tabel 3.1 Beberapa Nilai Resistivitas Jenis Bahan .....52

Tabel 3.2 Karakteristik Bahan Dasar Semikonduktor .....57

Tabel 4.1 Nilai Tegangan Ambang  $V_k$  (*knee*) Komponen Dioda .....83

Tabel 5.1 Daerah Operasi Kerja Transistor Bipolar (BJT) ..... 125

Tabel 9.1 Nilai Satuan *Decibel* Penguatan Tegangan ..... 292

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Sistem elektronika adalah sebuah fundamental dari teknologi-teknologi modern. Sistem elektronika terdiri atas rangkaian elektronika yang dibangun dari beberapa komponen yang saling berhubungan, bekerja sama, dan digerakkan oleh energi guna menghasilkan suatu sistem yang memiliki fungsi tertentu. Hampir setiap aspek kehidupan modern sehari-hari bergantung pada elektronika, mulai dari proses komputerisasi, komunikasi, otomatisasi, hingga penggunaan spesifik seperti dalam bidang energi, medis, keuangan, dan hiburan. Saat ini, sistem elektronika merupakan bagian tak terpisahkan dari kemajuan iptek dunia. Oleh karena itu, mempelajari dasar-dasar elektronika tentu menjadi sebuah wawasan yang sangat berfaedah di kehidupan modern ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Secara komprehensif, buku ini membahas dasar-dasar elektronika, penjelasan mendasar fungsi-fungsi setiap komponen elektronika, dan penyusunan rangkaian elektronika. Buku ini dilengkapi dengan petunjuk untuk mendesain tiap rangkaian yang dibahas, analisis karakteristik rangkaian, dan contoh soal pada tiap bahasan. Pada contoh soal diberikan tahapan langkah-langkah penyelesaiannya dan hasil simulasinya menggunakan beberapa peranti lunak dan pemrograman sehingga kedua hasil tersebut dapat dibandingkan. Selain itu, pada akhir tiap bab diberikan soal-soal untuk menguji pemahaman pembaca. Oleh karena itu, buku ini direkomendasikan bagi kalangan pelajar menengah atas tingkat akhir, mahasiswa, serta kalangan masyarakat yang tertarik atau memiliki hobi dalam mempelajari sistem elektronika.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

# Prakata

Pengetahuan tentang bidang ilmu elektronika telah banyak ditulis oleh sebagian besar penulis sebelumnya yang menghasilkan karya baik dalam bentuk buku maupun jurnal-jurnal ilmiah. Hal yang mendasari penulis dalam menulis buku ini yaitu untuk memberikan dasar penguatan pengetahuan tentang sistem elektronika dengan gaya bahasa penulisan yang dibuat lebih sederhana, praktis, dan mudah dipahami sehingga tidak memerlukan waktu lama untuk memahami isi materi yang dibahas.

Hal yang menjadi pembeda dari buku ini adalah dalam setiap pembahasan materi beserta permasalahan di dalamnya selalu disertakan juga penyelesaiannya secara sistematis dan praktis disertai dengan pembuktian kebenaran hasilnya melalui metode perbandingan. Bentuk penyelesaian dan metode perbandingan tersebut adalah melalui perhitungan praktis menggunakan formulasi matematika sederhana yang divalidasi kebenarannya melalui proses pengujian simulasi. Bentuk pengujian simulasinya diperkuat dengan menggunakan *software* aplikasi Matlab berlisensi dan Multisim yang secara mudah bisa diakses secara *open source*. Selain itu, dalam buku ini juga lebih banyak variasi contoh kasus beserta cara penyelesaiannya yang cukup sistematis dan praktis yang dilengkapi dengan tampilan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

hasil visualisasinya melalui bantuan *software* aplikasi simulasi. Hal ini bertujuan untuk memudahkan bagi para pembaca dalam memahami materi pembahasan sehingga secara mudah untuk diimplementasikan.

Buku ini pada dasarnya diperuntukkan bagi kalangan pembaca pelajar menengah atas tingkat akhir, mahasiswa, serta kalangan masyarakat yang tertarik atau memiliki hobi dalam mempelajari sistem elektronika. Meski demikian, pembahasan tentang sistem elektronika cukup luas sehingga penulis menyadari bahwa tidak semua pengetahuan di bidang elektronika ini dapat tersampaikan, tergambarkan, dan terjelaskan dalam buku ini secara utuh. Namun, buku ini menghadirkan penguatan fondasi dasar terkait dengan teknik mendesain rangkaian elektronika dengan cara dan langkah yang lebih mudah dipahami. Karena itu, buku ini menarik untuk dibaca, dipelajari, dan menjadi pelengkap ilmu pengetahuan khususnya di bidang keahlian sistem elektronika.

Bandung, November 2024

Penulis

مَيَّحْرُلَانِ مَحْرُلَانِ لَامَ سُب

Sembah sujud serta rasa syukur kepada Allah Swt., Tuhan Yang Maha Esa atas segala nikmat dan kasih sayang yang telah memberikan kekuatan dan kesabaran serta membekali dengan ilmu pengetahuan.

Atas karunia serta kemudahan yang Engkau berikan, akhirnya buku panduan belajar sistem elektronika dalam perspektif pendekatan simulasi *software* aplikasi dapat terselesaikan.

Sangat teristimewa saya persembahkan sebuah tulisan yang sederhana ini kepada kedua orang tua serta anak dan istri tercinta yang tak pernah berhenti mendoakan dan memberikan semangat di setiap hela napas.

Tak lupa kepada sahabat, teman dosen sejawat di Program Studi Teknik Elektro Universitas Komputer Indonesia (UNIKOM) yang selalu memberikan semangat, serta kepada Rektor UNIKOM yang selalu mendukung dalam segala hal. Terima kasih atas dukungannya dan bantuannya selama dalam proses penyelesaian buku ini.

*Thank you, everyone.*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Testimoni

Pada dasarnya buku yang ditulis oleh salah satu dosen Universitas Komputer Indonesia ini cukup mudah dipelajari dan relatif dapat dipahami oleh sebagian besar mahasiswa, terutama mahasiswa yang mengambil latar belakang teknik seperti teknik elektro dan teknik komputer. Secara umum, buku ini lebih banyak menitikberatkan pada penguatan dasar tentang ilmu elektronika yang saya rasa cukup baik dan cocok untuk mahasiswa serta kalangan masyarakat yang awam terkait teknologi di bidang elektronika ini. Isi pembahasan materinya cukup sederhana, mudah dipahami, serta dilengkapi dengan contoh-contoh kasus yang aplikatif sehingga dirasa sangat menarik untuk dipelajari. Tentunya sebagai pimpinan dan sekaligus sebagai praktisi pendidikan, saya sangat mendukung dan mengapresiasi hadirnya buku ajar ini untuk menambah dan melengkapi literasi ilmu pengetahuan serta meningkatkan wawasan bagi kita khususnya untuk dunia pendidikan secara umum.

Prof. Dr. Ir. H. Eddy Soeryanto Soegoto, M.T.  
Rektor Universitas Komputer Indonesia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB I

## SATUAN-SATUAN KELISTRIKAN DALAM SISTEM ELEKTRONIKA

### **Materi pembelajaran:**

Materi yang dibahas dalam bab ini berhubungan dengan materi tentang pengenalan teori rangkaian, pengenalan beberapa komponen elektronika yang sering digunakan dalam sistem elektronika, dan membahas materi tentang pengenalan cara pemakaian dan pengujian menggunakan alat ukur yang disertai dengan cara perhitungannya secara praktis serta aplikatif.

### **Tujuan pembelajaran:**

Tujuan yang akan dicapai dalam pembahasan materi pada bab ini, antara lain,

- 1) mampu meningkatkan pemahaman tentang teori rangkaian khususnya untuk rangkaian-rangkaian yang digunakan untuk mendukung perancangan sistem elektronika;
- 2) mampu memahami kinerja komponen-komponen elektronika yang sering digunakan dalam sistem elektronika beserta cara menghitung satuan-satuan kelistrikannya; dan

- 3) mampu menganalisa sistem elektronika secara mudah dan sistematis.

## A. Pendahuluan

Elektronika berasal dari kata *electron* yang artinya elektro dan *mechanics* yang berarti mekanika. Sistem elektronika merujuk pada suatu sistem yang menggunakan komponen elektronika untuk memproses, mengontrol, dan mentransfer sinyal atau informasi. Komponen elektronika utama dalam sistem ini melibatkan penggunaan perangkat semikonduktor, seperti transistor, dioda, resistor, kapasitor, dan komponen elektronika lainnya. Dalam sistem elektronika, terdapat beberapa satuan kelistrikan yang umumnya digunakan untuk mengukur berbagai parameter listrik. Beberapa satuan yang sering digunakan, antara lain, volt (V), ampere (A), ohm ( $\Omega$ ), watt (W), farad (F), henry (H), hertz (Hz), dan coulomb (C). Pemahaman dan penggunaan satuan-satuan kelistrikan ini sangat penting dibutuhkan dalam proses perancangan, pengukuran dan menganalisa kinerja sistem elektronika.

Sementara itu, di sisi lain, pengertian rangkaian elektronika adalah susunan skema rangkaian yang dibangun oleh beberapa komponen yang satu sama lainnya saling berhubungan, bekerja secara bersamaan, dan digerakkan oleh energi guna menghasilkan rangkaian yang memiliki fungsi tertentu. Sistem elektronika secara umum berdasarkan fungsi dan penerapannya dikelompokkan ke dalam lima kategori, yaitu sistem penyerahan (*rectification*), penguatan (*amplification*), pembangkitan (*generation*), pengendalian (*controlling*) dan pengonversian (*conversion*). Bentuk kinerja rangkaian elektronika untuk sistem penyearahan menunjukkan proses perubahan arus listrik bolak-balik menjadi arus searah yang secara ilustrasi modelnya ditunjukkan seperti pada Gambar 1.1.



Sumber: Mehta & Mehta (2020)

**Gambar 1.1** Perangkat Elektronik sebagai Penyearah Sinyal

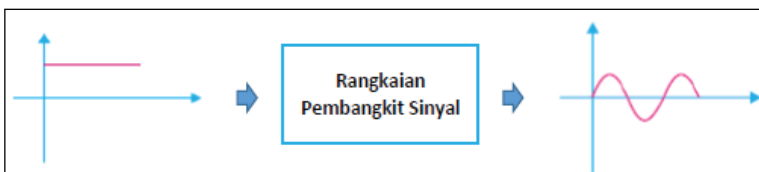
Fungsi kerja perangkat elektronika lainnya adalah sebagai sistem penguatan yang menggambarkan proses peningkatan level tegangan sinyal keluaran ke level lebih tinggi dari level tegangan sinyal masukannya. Perangkatnya dinamakan sebagai penguat (*amplifier*), sedangkan bentuk modelnya diperlihatkan seperti pada Gambar 1.2.



Sumber: Mehta & Mehta (2020)

**Gambar 1.2** Perangkat Elektronika sebagai Penguatan

Fungsi lainnya yaitu sebagai sistem pembangkitan, yaitu rangkaian elektronika mampu menghasilkan variasi bentuk gelombang dengan nilai frekuensi tertentu. Jika proses pembangkitan ini terjadi pada sebuah perangkat elektronika, perangkat tersebut dinamakan osilator. Osilator ini dapat menghasilkan rentang frekuensi dari yang terendah sampai yang tertinggi sesuai dengan kebutuhan. Bentuk model sistemnya secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Gambar 1.3.

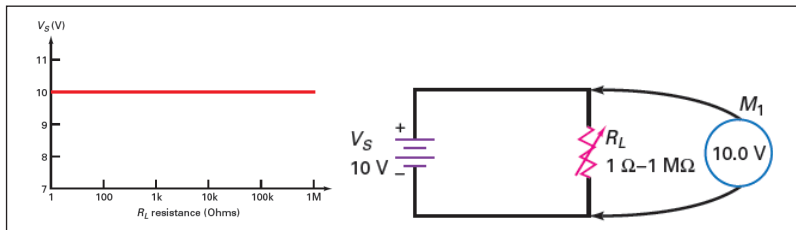


Sumber: Mehta & Mehta (2020)

**Gambar 1.3** Perangkat Elektronik sebagai Pembangkit Sinyal

## B. Sumber Tegangan

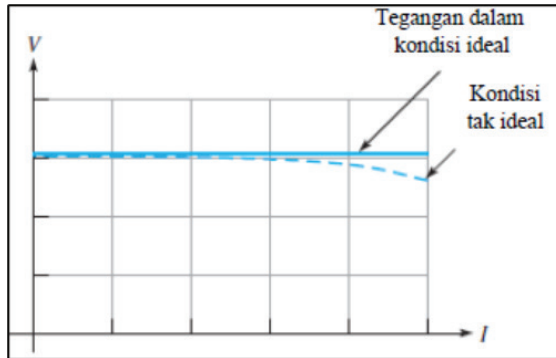
Pada dasarnya sumber tegangan ideal dalam sebuah sistem elektronika seharusnya mampu menghasilkan tegangan yang stabil meskipun nilai arusnya akan mengalami perubahan akibat dari adanya perubahan pada bagian beban rangkaian, baik yang berasal dari sumber tegangan searah maupun sumber tegangan bolak-balik. Sebagai contoh, sebuah sumber tegangan searah yang diberikan pada sebuah rangkaian elektronika seperti terlihat pada Gambar 1.4 menjelaskan bahwa perubahan tegangan beban ( $M_1$ ) yang diperoleh besarnya akan sangat dipengaruhi oleh resistansi beban rangkaian  $R_L$  sehingga dimungkinkan karakteristik rangkaian akan memenuhi salah satu fungsi rangkaian elektronika yang dijelaskan sebelumnya.



Sumber: Flyod & Buchla (2014)

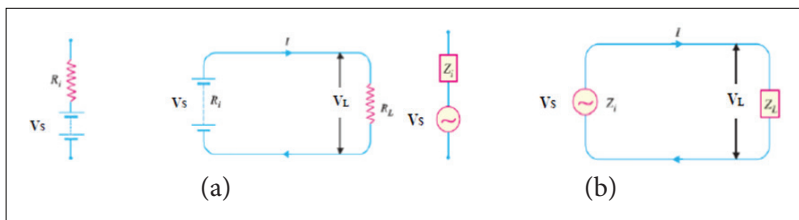
**Gambar 1.4** Skema Rangkaian dengan Variabel Resistansi Beban

Pada Gambar 1.4, jika kita asumsikan sumber tegangan searah sebesar 10 volt diberikan pada beberapa variasi nilai beban rangkaian  $R_L$  mulai dari  $1\ \Omega$  sampai  $1\ M\Omega$  yang berpengaruh pada perubahan arus rangkaian, seharusnya tegangan beban  $M_1$  akan menghasilkan tegangan 10 volt persis sama seperti tegangan masukannya. Akan tetapi, kenyataannya, tegangan beban  $M_1$  ini akan selalu mengalami perubahan sesuai perubahan beban dan arus di dalam rangkaian tersebut. Sebaliknya, tegangan rangkaian akan mengalami penurunan seiring bertambahnya arus dan begitu pun sebaliknya. Proses penjelasan ini tergambarkan pada kurva karakteristik tegangan beban ideal dengan tegangan beban tak ideal yang diperlihatkan pada Gambar 1.5.



**Gambar 1.5** Kurva Karakteristik Tegangan Beban Ideal dan Tak Ideal

Kurva pada Gambar 1.5 menunjukkan bahwa pada saat terjadi perubahan arus pada sebuah rangkaian, seharusnya dalam kondisi ideal tegangan beban rangkaian tidak akan mengalami perubahan dan jika dalam kondisi tidak ideal, tegangan beban akan mengalami penurunan seiring bertambahnya arus rangkaian. Fenomena ini menunjukkan ciri kinerja sebuah rangkaian elektronika pada umumnya. Sebenarnya sebuah rangkaian elektronika dapat mudah dianalisis secara mudah dengan cara memodelkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada Gambar 1.6 yang disesuaikan dengan masing-masing sumber tegangan sebuah rangkaian elektroniknya.



Keterangan: (a) Sumber DC dan (b) Sumber AC

Sumber: Flyod & Buchla (2014)

**Gambar 1.6** Skema Dasar Rangkaian Elektronika

Sesuai rangkaian pada Gambar 1.6 (a) dengan sumber tegangan searah, tegangan beban  $R_L$  dapat ditentukan besarnya menggunakan persamaan (1.1):

$$V_L = V_s - IR_i = IR_L; \quad (1.1)$$

dengan nilai arus rangkaian  $I$  diperoleh dari hubungan persamaan (1.2):

$$I = \frac{V_s}{R_L + R_i} I = \frac{V_s}{R_L + R_i}. \quad (1.2)$$

Sementara itu, untuk rangkaian sesuai Gambar 1.6 (b) dengan sumber tegangan bolak-balik, tegangan bebannya dapat ditentukan melalui persamaan (1.3) berikut:

$$V_L = V_s - IZ_i = IZ_L; \quad (1.3)$$

dengan arus rangkaian  $I$  dinyatakan sebesar

$$I = \frac{V_s}{Z_L + Z_i}; \quad (1.4)$$

dengan  $Z_L$  dan  $Z_i$  masing-masing menyatakan impedansi beban dan impedansi masukannya.

### Contoh 1.1

Sebuah sumber tegangan searah sebesar 24 volt diberikan kepada rangkaian yang memiliki resistansi internal  $0,01 \Omega$  guna menyalurkan arus pada beban lampu. Jika total beban tersebut menghasilkan daya sebesar 100 watt, tentukan tegangan jatuh pada sumber resistansi internalnya dan tegangan pada sisi beban.

### Penyelesaian

Pertama, kita menentukan tegangan jatuhnya (*drop voltage*) rangkaian dengan terlebih dahulu menghitung arus rangkaian dari persamaan berikut:

$$I = \frac{P}{V_s} = \frac{100 \text{ Watt}}{24 \text{ V}} = 4,17 \text{ A}$$

sehingga dihasilkan tegangan jatuh rangkaian sebesar

$$V_{R_i} = IR_i = 4,17 \text{ V} \times 0,01 \Omega = 0,0417 \text{ V}$$

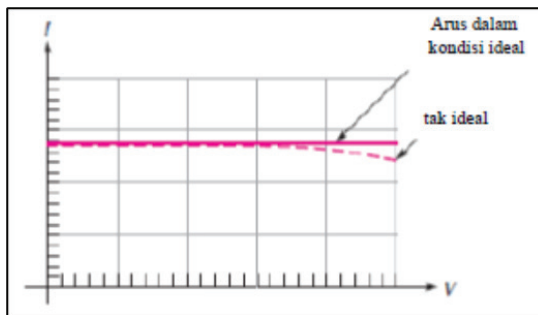
Kedua, selanjutnya tegangan beban rangkaian diperoleh sebesar

$$V_L = 24 \text{ V} - 0,0417 \text{ V} = 23,96 \text{ V}$$

Kesimpulan dari hasil perhitungan pada Contoh 1.1 ini menjelaskan bahwa makin kecil resistansi internal rangkaian akan mengakibatkan makin kecil tegangan jatuh rangkaian sehingga berpengaruh terhadap makin stabil tegangan bebannya.

### C. Sumber Arus

Sumber arus rangkaian akan dikatakan memenuhi standar ideal apabila perubahan tegangan rangkaian sejalan dengan perubahan bebannya. Dalam hal ini, perubahan tersebut seharusnya tidak akan mengubah nilai arus rangkaian tersebut meskipun arus ini akan mengalami penurunan mengikuti bertambahnya nilai tegangan rangkaian. Kurva kinerja kondisi arus dalam sebuah rangkaian seperti pada Gambar 1.7 dapat membantu kita menggambarkan karakteristik arus rangkaian sebenarnya.



**Gambar 1.7** Kurva Karakteristik Perubahan Arus dalam Rangkaian Elektronika

### Contoh 1.2

Sebuah sumber tegangan searah 500 V memiliki resistansi internal sebesar 1000  $\Omega$ . Tentukan arus beban jika nilai bebannya masing-masing sebesar 10  $\Omega$ , 50  $\Omega$ , dan 100  $\Omega$ .

### Penyelesaian

- 1) Untuk beban  $R_{L1}=10\ \Omega$ , arus bebannya sebesar

$$I = \frac{500\text{ V}}{10\ \Omega + 1000\ \Omega} = 0,495\text{ A.}$$

- 2) Untuk beban  $R_{L2}=50\ \Omega$ , arus bebannya sebesar

$$I = \frac{500\text{ V}}{50\ \Omega + 1000\ \Omega} = 0,476\text{ A.}$$

- 3) Untuk beban  $R_{L3}=100\ \Omega$ , arus bebannya sebesar

$$I = \frac{500\text{ V}}{100\ \Omega + 1000\ \Omega} = 0,454\text{ A.}$$

Catatan: Agar nilai arus rangkaian tetap terjaga konstan, diperlukan sebuah nilai resistansi internal berada pada level lebih besar dari nilai bebannya ( $R_i \gg R_L$ ).

### D. Sumber Daya

Dalam sebuah rangkaian lingkaran tertutup, baik tersusun seri maupun paralel, daya akan dapat dihasilkan apabila beban rangkaian terhubung dengan sumber tegangannya. Pada saat itu, sumber daya akan tersalurkan ke beban dan besarnya tergantung nilai bebannya. Daya transfer maksimum akan diperoleh jika resistansi beban  $R_L$  bernilai sama dengan resistansi internal sumber  $R_i$  yang disebut sebagai “teori transfer daya maksimum” (*maximum power transfer theory*). Fenomena transfer daya ini berlaku baik untuk sumber daya searah

maupun daya bolak-balik. Secara matematis kita dapat membuktikan bahwa daya maksimum ini dapat ditentukan saat resistansi beban sama dengan resistansi sumber, yaitu dengan kembali melihat persamaan 1.2 (kita asumsikan dengan menggunakan sumber tegangan searah). Jika kita hubungkan dengan rencana perolehan daya rangkaian secara umum, daya yang tersalurkan ke beban rangkaian dapat ditentukan menggunakan persamaan (1.5):

$$P_L = I^2 R_L = \left( \frac{V_s}{R_L + R_i} \right)^2 R_L. \quad (1.5)$$

Daya maksimum dapat diperoleh dengan cara menurunkan persamaan (1.5) tersebut, yaitu daya beban kita turunkan terhadap bebannya.

$$\frac{dP}{dR_L} = \left( \frac{(R_L + R_i)^2 - 2R_L(R_L + R_i)}{(R_L + R_i)^4} \right) V_s^2 = 0,$$

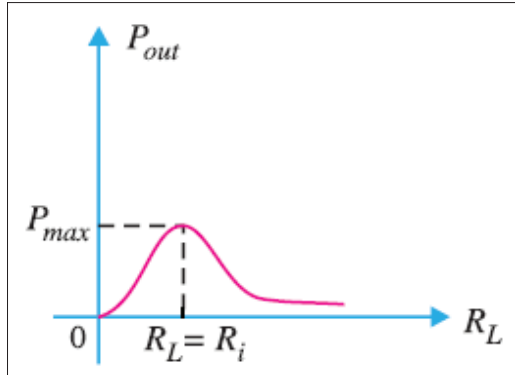
$$(R_L + R_i)^2 - 2R_L(R_L + R_i) = 0,$$

$$-R_L^2 + R_i^2 = 0,$$

$$[-R_L^2 + R_i^2 = 0]^{1/2},$$

$$R_L = R_i.$$

Hasil penurunan persamaan tersebut adalah bahwa daya maksimum tercapai saat beban rangkaian sama dengan resistansi internal masukannya sehingga kurva tanggapannya dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 1.8.



Sumber: Flyod & Buchla (2014)

**Gambar 1.8** Kurva Tanggapan Daya Beban Maksimum Rangkaian

### Contoh 1.3

Sebuah sumber tegangan searah 200 V memiliki resistansi internal sebesar 100  $\Omega$ . Tentukan daya yang mengalir ke beban rangkaian jika nilai bebannya masing-masing sebesar (a) 100  $\Omega$ , (b) 75  $\Omega$ , dan (c) 300  $\Omega$ .

### Penyelesaian

- a) Saat nilai beban  $R_L = 100 \Omega$ , arus rangkaian ditentukan dahulu dengan

$$I = \frac{200 \text{ V}}{100 \Omega + 100 \Omega} = 1 \text{ A.}$$

Selanjutnya, daya yang mengalir ke beban adalah sebesar

$$P_L = I^2 R_L = (1)^2 \times 100 = 100 \text{ W}$$

sehingga daya total rangkaian dari sumber masukan yang diperoleh adalah

$$P_{total} = I^2 (R_L + R_i) = (1)^2 \times (100 + 100) = 200 \text{ W.}$$

- b) Saat nilai beban  $R_L = 75 \Omega$ , dengan cara yang sama diperoleh

$$I = \frac{200 \text{ V}}{75 \Omega + 100 \Omega} = 1,14 \text{ A},$$

$$P_L = (1,14)^2 \times 75 = 97,47 \text{ W, dan}$$

$$P_{total} = (1,14)^2 \times (75 + 100) = 227,43 \text{ W}.$$

- c) Saat nilai beban  $R_L = 300 \Omega$ , dengan cara yang sama diperoleh

$$I = \frac{200 \text{ V}}{300 \Omega + 100 \Omega} = 0,5 \text{ A},$$

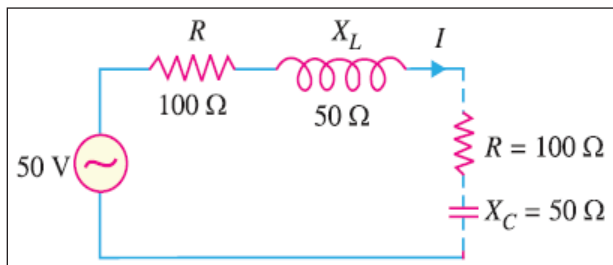
$$P_L = I^2 R_L = (0,5)^2 \times 300 = 75 \text{ W, dan}$$

$$P_{total} = (0,5)^2 \times (300 + 100) = 100 \text{ W}.$$

Sementara itu, untuk menghitung daya beban  $P_L$  rangkaian dengan daya masukan bolak-balik dapat ditentukan dengan mengacu pada model rangkaian yang ditunjukkan pada Contoh 1.4.

#### Contoh 1.4

Sebuah rangkaian sederhana memiliki sumber tegangan bolak-balik sebesar 50 V seperti yang ditunjukkan Gambar 1.9. Tentukan daya maksimum yang disalurkan ke beban rangkaiannya.



**Gambar 1.9** Skema Rangkaian dengan Sumber Tegangan Bolak-Balik

## Penyelesaian

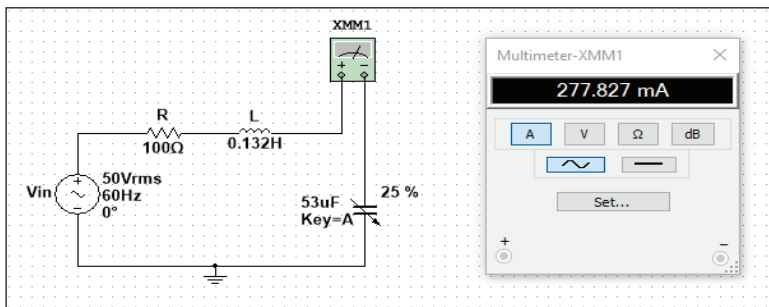
Resistansi internal sumber,  $Z_i = (R + jX_L) = (100 + j50)\Omega$   
resistansi beban rangkaian,  $Z_L = (R - jX_C) = (100 - j50)\Omega$ ;  
impedansi total rangkaian,

$$Z_{total} = Z_i + Z_L = (100 + j50)\Omega + (100 - j50)\Omega = 200 \Omega.$$

Arus beban rangkaian diperoleh sebesar  $I = \frac{50 \text{ V}}{200 \Omega} = 0,25 \text{ A}$

sehingga daya maksimum yang tersalurkan ke beban  $Z_L$  dinyatakan sebesar  $P_L = (0,25)^2 \times 100 = 6,25 \text{ W}$

Secara simulasi, rangkaian pada Gambar 1.9 dapat diukur arus rangkaiannya dan hasilnya dapat digambarkan pada Gambar 1.10.



**Gambar 1.10** Skema Rangkaian Hasil Simulasi Contoh 1.4

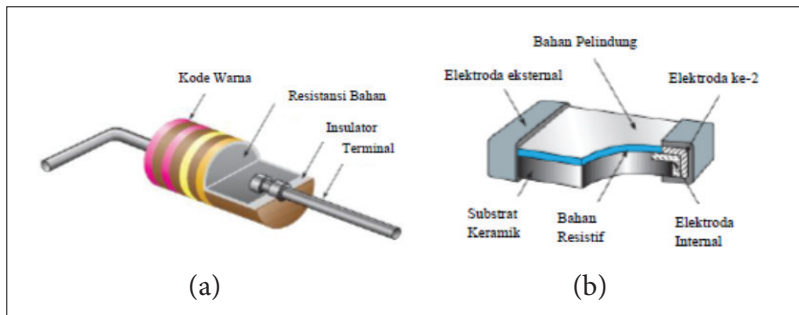
Pada rangkaian simulasi ini, nilai induktansi  $L$  sebesar  $0,132 \text{ H}$  diperoleh dari hasil penurunan persamaan reaktansi induktansi  $X_L$  yang bernilai  $50 \Omega$ , sedangkan untuk nilai kapasitansi  $C$  sebesar  $53 \mu\text{F}$  diperoleh dari hasil penurunan persamaan reaktansi kapasitif  $X_C$  yang bernilai  $50 \Omega$ . Akan tetapi, komponen kapasitansi dibuat variabel untuk memudahkan dalam perhitungan dan penentuan kapasitas daya yang akan diberikan kepada beban rangkaian. Ada selisih antara hasil perhitungan dan simulasi, tetapi tidak terlalu jauh perbedaannya sehingga dianggap masih ada dalam batas toleransi.

## E. Resistansi

Arus listrik yang mengalir dalam sebuah rangkaian akan menyebabkan sebagian energi dalam rangkaian tersebut menjadi hilang karena adanya material yang mampu penghambat arus rangkaian maka sifat yang dimiliki material tersebut dinamakan *resistansi*. Komponen yang memiliki sifat resistansi tersebut dinamakan *resistor* atau disebut juga *hambatan* dengan satuannya adalah ohm ( $\Omega$ ). Prinsipnya, sifat resistansi sebuah komponen bekerja untuk membatasi dan mengendalikan arus, membagi tegangan, serta—untuk kasus tertentu—mampu membangkitkan panas. Secara umum pengelompokan komponen resistor terbagi dua jenis, yaitu resistor yang ditetapkan nilainya (*fixed resistor*) dan resistor yang dapat diatur (*variable resistor*).

### 1. Resistor yang Ditetapkan

Tipe komponen resistor seperti ini sebenarnya bisa berubah nilainya, tetapi tingkat untuk berubahnya relatif sangat kecil. Teknik dan cara untuk menentukan nilai resistansi sebuah resistor biasanya dikenali dari kode warnanya yang pada bagian badan komponen tersebut sudah tertera angka-angka besarnya. Hal ini bisa dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.11 yang menunjukkan bentuk fabrikasi resistornya dibuat dari bahan dan teknologi yang berbeda.

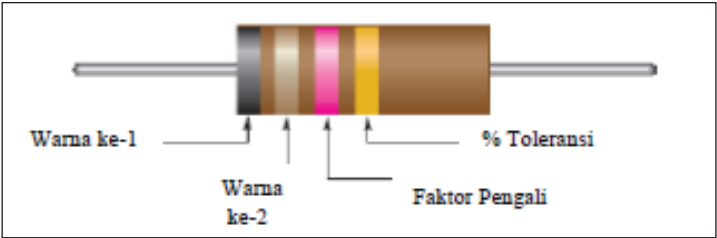


Keterangan: (a) Resistor Karbon dan (b) Resistor Chip Metal Film

Sumber: Flyod & Buchla (2014)

**Gambar 1.11** Jenis Bahan Dasar Komponen Resistor

Resistor berbahan dasar karbon—Gambar 1.11(a)—merupakan jenis resistor yang sangat banyak digunakan dan cukup mudah diperoleh di pasaran karena memiliki ciri khas, yaitu adanya deretan kode-kode warna tertentu di bagian badannya. Komposisi deretan kode warna terlihat seperti yang ditunjukkan Gambar 1.12 dengan empat deret kode warna yang masing-masing posisi warnanya memiliki nilai tertentu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1.



Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 1.12** Komposisi Empat Kode Warna Resistor Berbahan Karbon

**Tabel 1.1** Nilai Resistor dengan 4 Kode Warna

No. Urut	Kode Warna
0	Hitam
1	Coklat
2	Merah
3	Jingga/Orange
4	Kuning
5	Hijau
6	Biru
7	Ungu
8	Abu-Abu
9	Putih
5 %	Emas
10 %	Perak

Sumber: Flyod & Buchla (2014)

Ketentuan cara membaca dan menghitung kode warna seperti Tabel 1.1 adalah sebagai berikut.

- 1) Kode warna ke-1 menunjukkan nilai resistansi angka pertama. Biasanya posisi kode warnanya berdekatan dengan tepi sisi badan resistor.
- 2) Kode warna ke-2 menunjukkan nilai resistansi angka kedua. Posisi kode warnanya setelah kode warna pertama.
- 3) Kode warna ke-3 menunjukkan jumlah nilai nol atau sebagai pengali.
- 4) Kode warna ke-4 menunjukkan nilai toleransi yang berkaitan dengan skala simpangan batas bawah dan atas dari nilai utama resistor tersebut. Biasanya nilai toleransi untuk resistor kode warna ke-4 ini berharga 5% (emas) dan 10% (perak).

### Contoh 1.5

Sebuah resistor dengan empat kode warna memiliki nilai resistansi sebesar  $(100 \, \Omega \pm 5 \%)$ . Tentukan nilai resistansi sebenarnya.

### Penyelesaian

Nilai resistansi utama =  $100 \, \Omega$ ,

nilai toleransi 5% (kode warna emas).

Nilai resistansi sebenarnya diperoleh sebesar

$$R = 100 \, \Omega \pm 5\% = 100 \, \Omega \pm \left( \frac{5}{100} \times 100 \, \Omega \right) = (100 \pm 5) \, \Omega$$

sehingga secara nyata resistor ini memiliki batas simpangan minimum sebesar  $95 \, \Omega$  dan batas atasnya sebesar  $105 \, \Omega$  dari nilai utamanya  $100 \, \Omega$ .

### Contoh 1.6

Tentukan nilai resistansi dari tiga buah resistor yang memiliki kode-kode warna sebagai berikut.

- a) Cokelat, hitam, merah, emas
- b) Jingga, putih, merah, perak
- c) Kuning, ungu, cokelat, emas

### Penyelesaian

- a) Cokelat = 1; hitam = 0; merah = 2 =  $10^2$ ; emas = 5% sehingga diperoleh nilai resistansinya sebesar

$$R = (10 \times 10^2 \Omega) \pm 5 \% = 1000 \Omega + 5 \% = (1000 \pm 50) \Omega$$

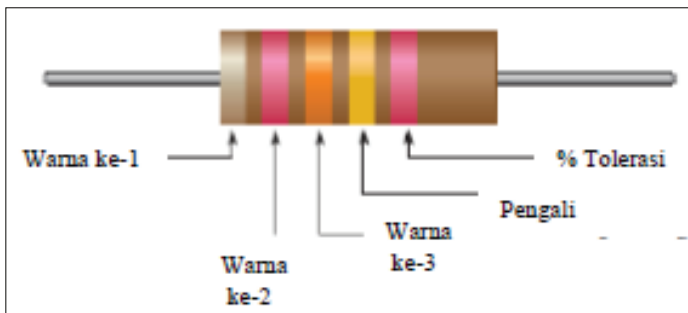
- b) Jingga = 3; putih = 9; merah = 2 =  $10^2$ ; perak = 10% sehingga diperoleh nilai resistansinya sebesar

$$R = (39 \times 10^2 \Omega) \pm 10 \% = 3900 \Omega + 10 \% = (3900 \pm 390) \Omega$$

- c) Kuning = 4; ungu = 7; cokelat = 1 =  $10^1$ ; emas = 5% sehingga diperoleh nilai resistansinya sebesar

$$R = (47 \times 10^1 \Omega) \pm 5 \% = 470 \Omega + 5 \% = (470 \pm 23,5) \Omega$$

Selain itu, ada cara untuk membaca dan menghitung resistansi khusus yang memiliki lima kode warna seperti yang ditunjukkan Gambar 1.13 yang ternyata memiliki sedikit perbedaan dengan cara



**Gambar 1.13** Nilai Resistansi dengan 5 Kode Warna

menghitung dengan empat kode warna. Secara sederhana, untuk menghitungnya kita dapat menggunakan Tabel 1.2 sebagai rujukan untuk mempermudah dalam menentukan nilai resistansi sebenarnya.

**Tabel 1.2** Nilai Resistor dengan 5 Kode Warna

Kode Warna	Nilai	Keterangan
Hitam	0	Kode warna ke-1 sampai dengan ke-3 menunjukkan nilai resistansi.
Cokelat	1	
Merah	2	
Jingga	3	
Kuning	4	
Hijau	5	
Biru	6	
Ungu	7	
Abu-Abu	8	
Putih	9	
Emas	0.1	Faktor pengali ini berada pada kode warna ke-4.
Perak	0.01	
Merah	2 %	Nilai toleransi berada pada kode warna ke-5.
Cokelat	1 %	
Hijau	0,5 %	
Biru	0,25 %	
Ungu	0,1 %	

Sumber: Flyod & Buchla (2014)

Merujuk pada Tabel 1.2, langkah-langkah untuk menghitung nilai sebuah resistor khusus dengan lima kode warna adalah sebagai berikut.

- 1) Kode warna ke-1 menunjukkan nilai resistansi angka pertama. Biasanya posisi kode warnanya berdekatan dengan tepi sisi badan resistor.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- 2) Kode warna ke-2 menunjukkan nilai resistansi angka kedua.
- 3) Kode warna ke-3 menunjukkan nilai resistansi angka ketiga.
- 4) Kode warna ke-4 menunjukkan faktor pengali, yaitu 0,1 untuk kode warna emas dan 0,01 untuk kode warna perak. Inilah yang membedakan dengan resistor 4 kode warna yang menyatakan nilai toleransi resistor.
- 5) Kode warna ke-5 menyatakan nilai toleransi yang berkaitan dengan skala batas bawah dan atas dari nilai aktual resistor.

### Contoh 1.7

Tentukan nilai resistansi dari dua buah resistor yang memiliki kode-kode warna sebagai berikut.

- a) Merah, ungu, hitam, emas, merah
- b) Coklat, hitam, hitam, hitam, coklat

### Penyelesaian

- a) Merah = 2; ungu = 7; hitam = 0; emas =  $\times 0,1$ ; merah = 2% sehingga diperoleh nilai resistansinya sebesar

$$R = (270 \times 0,1) \Omega \pm 2 \% = (27 \pm 0,54) \Omega.$$

- b) Cokelat = 1; hitam = 0; hitam = 0; hitam = 0 (tidak perlu dijadikan faktor pengali karena bukan kode warna referensi sesuai Tabel 1.2); coklat = 1% sehingga diperoleh nilai resistansinya sebesar

$$R = 100 \Omega \pm 2 \% = (100 \pm 1) \Omega.$$

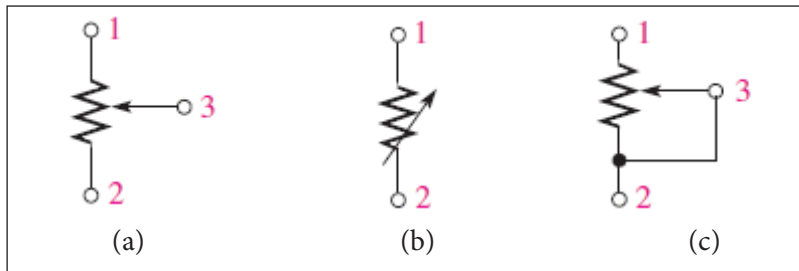
Hasil pada contoh soal ini memperlihatkan bahwa resistansi yang diperoleh dari perhitungan dengan lima kode warna lebih akurat dan memiliki kedekatan dengan nilai resistansi utamanya dibandingkan dengan menggunakan perhitungan dengan empat kode warna.

## 2. Resistor Variabel

Kategori resistor ini nilainya dapat diatur besarnya sehingga mempermudah ketika kita menginginkan sebuah nilai resistansi yang sulit

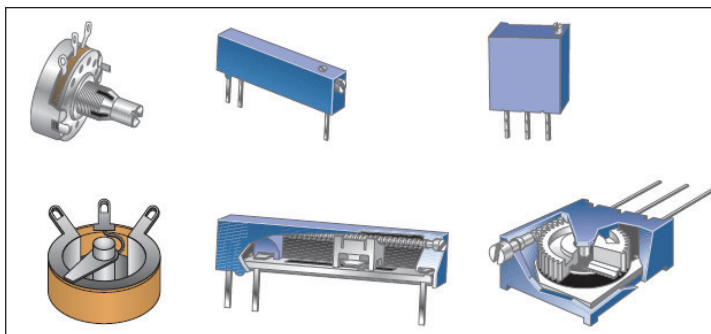
diperoleh di pasaran. Kadang-kadang saat merancang sebuah sistem elektronika, kita sering mendapatkan suatu harga resistor khusus dan sulit dicari sehingga penggunaan komponen resistansi variabel ini dapat membantu memperoleh nilai resistansi tersebut. Ada dua fungsi utama resistor variabel ini, yaitu sebagai pembagi tegangan dan pengendali arus rangkaian. Untuk fungsinya sebagai pembagi tegangan, resistor variabel ini lebih dikenal sebagai *potensiometer*, sedangkan sebagai pengatur arus, resistor variabel sering disebut *reostat*. Simbol dari kedua jenis resistor ini ditunjukkan seperti pada Gambar 1.14 dengan disertai susunan konfigurasi yang memiliki perbedaan satu sama lain.

Secara fisik bentuk resistor variabel ini bisa dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.15 sesuai model dan bentuknya.



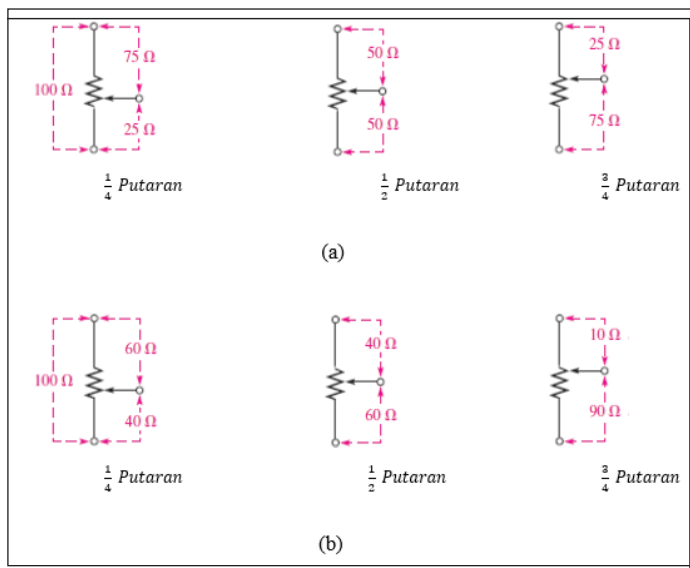
Keterangan: (a) Potensiometer, (b) Reostat; (c) Potensiometer sebagai Reostat

**Gambar 1.14** Simbol Resistor Variabel



**Gambar 1.15** Bentuk Tampilan Fisik Resistor Variabel

Resistor jenis ini memiliki kemampuan dalam mengatur besaran arus melalui pengendalian skala putarannya sehingga cukup fleksibel untuk segala kondisi rangkaian yang belum tentu bisa dilakukan oleh jenis resistor yang ditetapkan. Model susunan kinerja skala putaran resistor ini ada yang bersifat linier dan nonlinier sesuai Gambar 1.16.



Keterangan: (a) Linier dan (b) Nonlinier

**Gambar 1.16** Konfigurasi Potensiometer

## RANGKUMAN

- 1) Berdasarkan fungsi dan penerapannya, umumnya sistem elektronika lebih banyak diimplementasikan dalam sistem penyearahan (*rectification*), sistem penguatan sinyal (*amplification*), sistem pembangkitan (*generation*), sistem pengendalian (*controlling*), dan sistem konversi.
- 2) Sumber tegangan yang diberikan pada sistem elektronika pada dasarnya dijaga agar lebih stabil meskipun arus yang melalui

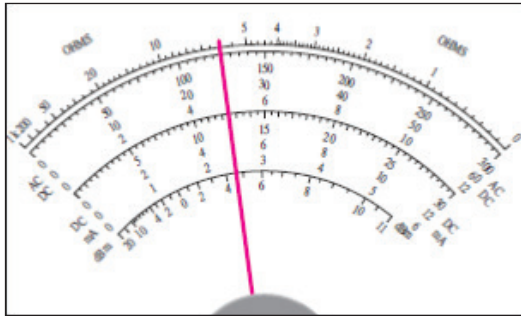
sistem sendiri akan mengalami perubahan mengikuti perubahan bebannya. Kestabilan sumber tegangan akan berpengaruh terhadap *output* sistem yang dihasilkannya.

- 3) Sebuah sumber arus rangkaian idealnya seharusnya berharga tetap dan terus stabil meskipun pada saat itu nilai tegangannya selalu mengalami perubahan mengikuti beban rangkaian.
- 4) Daya *output* dalam sebuah rangkaian lingkaran tertutup akan diperoleh apabila sumber bebannya terhubung dengan sumber tegangannya. Daya *output* maksimum akan tercapai juga apabila resistansi beban  $R_L$  memiliki nilai yang sama dengan resistansi internal  $R_i$  yang dikenal sebagai teori transfer daya maksimum.
- 5) Dalam sebuah sistem elektronika, nilai resistansi lebih banyak digunakan untuk mengendalikan arus, membagi tegangan rangkaian, dan sebagai pembangkit sumber panas.

## LATIHAN SOAL

- 1) Tentukan resistansi minimum dan maksimum dari komponen-komponen resistor dengan koda warna berikut.
  - a) Biru, abu-abu, merah, perak
  - b) Jingga, jingga, hitam, perak
  - c) Kuning, abu-abu, jingga, emas
- 2) Jika kita menginginkan nilai resistor 270  $\Omega$  dengan toleransi 5%, kode warna apa saja yang digunakan?
- 3) Tentukan nilai resistansi dan toleransi untuk beberapa komponen resistor yang memiliki lima kode warna berikut.
  - a) Merah, abu-abu, ungu, merah, cokelat
  - b) Biru, hitam, kuning, emas, cokelat
  - c) Putih, jingga, coklat, coklat, coklat
- 4) Tentukan susunan kode warna beberapa resistor berikut yang memiliki lima kode warna dengan asumsi toleransi sebesar 1%.  
(a) 14,7 k $\Omega$                       (b) 39,2  $\Omega$                       (c) 9,76 k $\Omega$

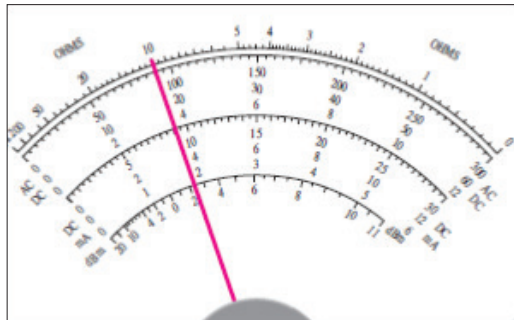
- 5) Hitung tegangan yang terbaca oleh alat ukur multimeter seperti yang ditunjukkan Gambar 1.17 jika skala pada posisi 600 V.



Sumber: Sedha (2013)

**Gambar 1.17** Skala Jarum Penunjuk Tegangan Multi-meter Analog untuk Soal No. 5

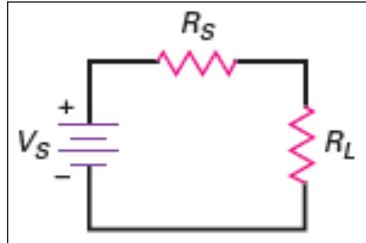
- 6) Hitung nilai resistansi yang terbaca oleh alat ukur multimeter seperti yang ditunjukkan Gambar 1.18 jika skala pada posisi  $R \times 10$ .



Sumber: Sedha (2013)

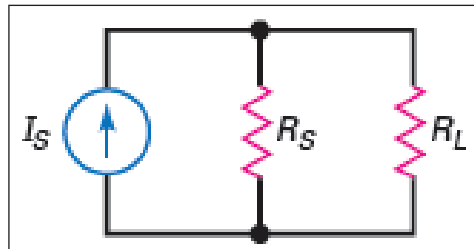
**Gambar 1.18** Skala Jarum Penunjuk Resistansi Multimeter Analog untuk Soal No. 6

- 7) Sebuah resistansi internal rangkaian memiliki nilai  $0,05 \Omega$ . Berapa tegangan jatuh yang melalui resistansi internal tersebut jika arus yang melaluinya sebesar  $2 \text{ A}$ ?
- 8) Pada Gambar 1.19, diketahui rangkaian memiliki sumber tegangan  $V_s$  ideal sebesar  $9 \text{ V}$  dan resistansi internal sebesar  $0,4 \Omega$ . Jika resistansi bebannya bernilai nol, tentukan arus bebannya.



**Gambar 1.19** Rangkaian Resistansi Serial Sederhana

- 9) Seperti yang ditunjukkan Gambar 1.20, jika diasumsikan sumber arus  $I_s$  ideal sebesar  $20 \text{ mA}$  memiliki resistansi internal  $200 \text{ k}\Omega$  dengan resistansi bebannya bernilai nol, tentukan arus bebannya.



**Gambar 1.20** Rangkaian Resistansi Paralel Sederhana

## DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentals of electric circuits* (5<sup>th</sup> ed). McGrawHill Companies, Inc.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronis fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R., (2014). *Electrical engineering: Principles and applications* (6<sup>th</sup> ed). Essex: Pearson Education Limited, 862–863.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2016). *Electronic principles* (8<sup>th</sup> ed.). McGrawHill-Education, New York.
- Mehta, V. K., & Mehta, R., (2020). *Priciples of electronics*. S. Chand Publishing.
- Sedha, R. S., (2013). *Electronic measurements and instrumentations*. S. Chand Publishing.

# BAB II

## MENGENAL TEORI DASAR RANGKAIAN ELEKTRONIKA

### **Materi pembelajaran:**

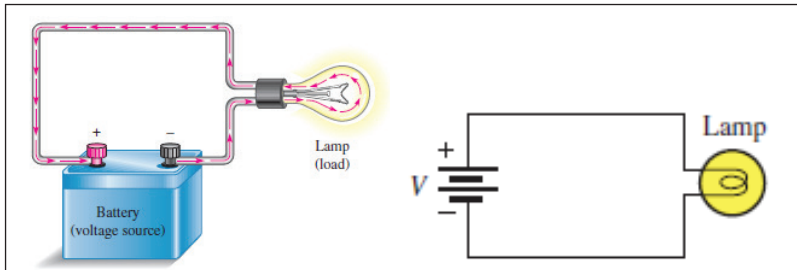
Materi yang dibahas pada bab ini tentang pengenalan berbagai model dan skema rangkaian elektronika yang banyak diterapkan di lapangan dengan disertai penggunaan beberapa metode atau hukum dalam menganalisis rangkaian-rangkaian ini.

### **Tujuan pembelajaran:**

- 1) mengenal dan memahami cara melakukan pengukuran arus, tegangan, dan resistansi pada suatu rangkaian elektronika;
- 2) mampu menggunakan dan mengoperasikan alat ukur untuk mengukur besaran-besaran listrik seperti arus, tegangan, dan resistansi secara baik dan benar;
- 3) mampu menerapkan hukum dan teorema yang berkaitan dengan rangkaian elektronika;
- 4) mampu menghitung dan menganalisa model-model rangkaian serial dan paralel secara benar dan akurat.

## A. Pendahuluan

Sudah banyak ahli, praktisi, penulis, dan ilmuwan yang membahas secara detail mengenai teori dan hukum tentang rangkaian. Adapun pembahasan tentang analisis rangkaian elektronika pada bab ini lebih pada membahas secara sederhana bagian-bagian tertentu saja yang berkaitan dengan implementasi perangkat elektronika berdasarkan teori rangkaian seri-paralel dan Thevenin-Norton beserta beberapa aplikasinya. Seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa pada dasarnya sebuah rangkaian elektronika tersusun dari adanya sumber energi (bisa berupa sumber arus atau tegangan), lintasan arus yang mengalir ke beban, serta nilai beban itu sendiri. Munculnya arus sendiri tidak terlepas dari adanya beban sehingga besarnya cukup dipengaruhi oleh perubahan beban sendiri. Rangkaian pada Gambar 2.1 memperlihatkan arus akan mengalir dari sumber tegangan searah dari baterai positif menuju beban lampu melewati jalur penghantar dalam lingkaran jaringan tertutup.



Sumber: Hambley (2014)

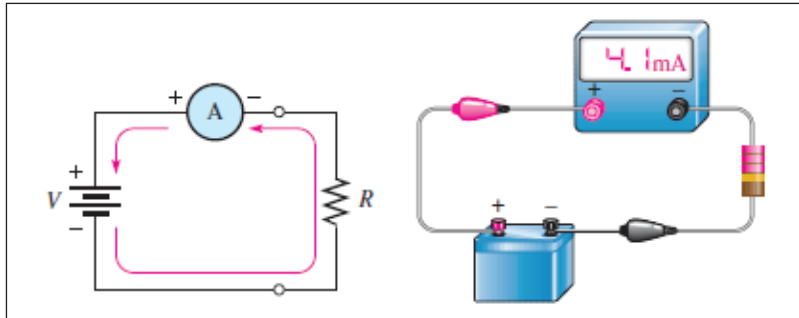
**Gambar 2.1** Rangkaian Elektronika dengan Beban Lampu

## B. Cara Mengukur Rangkaian Elektronika

Kegiatan mengukur sebuah rangkaian perlu dilakukan dan berguna untuk menentukan validitas nilai kebenaran dari besaran listrik yang kita cari. Faktanya, proses pengukuran ini sebaiknya didasarkan pada standar-standar metode pengukuran baku terutama yang selalu memperhatikan standar cara memperlakukan alat ukur dan cara mengoperasikannya sesuai standar yang ada.

## 1. Pengukuran Arus

Arus yang mengalir dalam sebuah rangkaian dapat diperoleh secara langsung menggunakan alat ukur arus, yaitu amperemeter. Gambar 2.2 memperlihatkan cara mengukur arus dan posisi alat ukur arus yang penempatannya harus serial dengan beban rangkaian.

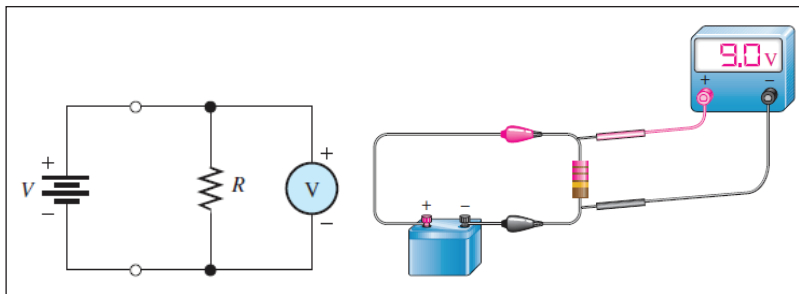


Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 2.2** Cara Pengukuran Arus Rangkaian

## 2. Pengukuran Tegangan

Pengukuran tegangan suatu rangkaian menggunakan alat ukur tegangan yaitu voltmeter. Gambar 2.3 menggambarkan penempatan posisi voltmeter pada rangkaian saat mengukur tegangan yang kedudukannya paralel terhadap resistansi beban  $R$ . Nilai tegangan hasil pengukuran ini akan sesuai standar yang diharapkan apabila nilainya sama dengan tegangan masukan yang diberikan pada rangkaian.

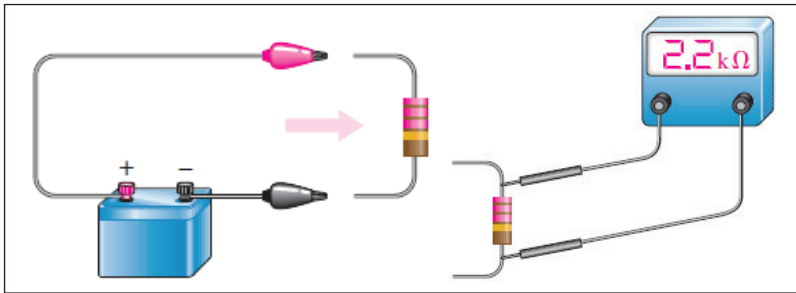


Sumber: Floyd & Buchla (2014)

**Gambar 2.3** Cara Pengukuran Tegangan Rangkaian

### 3. Pengukuran Resistansi

Cara mengukur nilai resistansi sebuah komponen elektronika pada rangkaian adalah terlebih dahulu komponen yang terpasang harus dipisahkan dari rangkaian tersebut kemudian secara langsung dapat diukur oleh alat ukur ohmmeter. Komponen harus dipisahkan karena jika komponen tersebut diukur dalam kondisi masih terhubung dengan rangkaian dikhawatirkan nilai yang diukur keakuratannya akan berkurang akibat adanya faktor resistansi internal sumber rangkaian yang memengaruhinya meskipun kadang-kadang nilai selisihnya bisa saja tidak terlalu besar. Gambar 2.4 memperlihatkan cara mengukur resistansi agar dihasilkan nilai lebih akurat.



Sumber: Floyd & Buchla (2014)

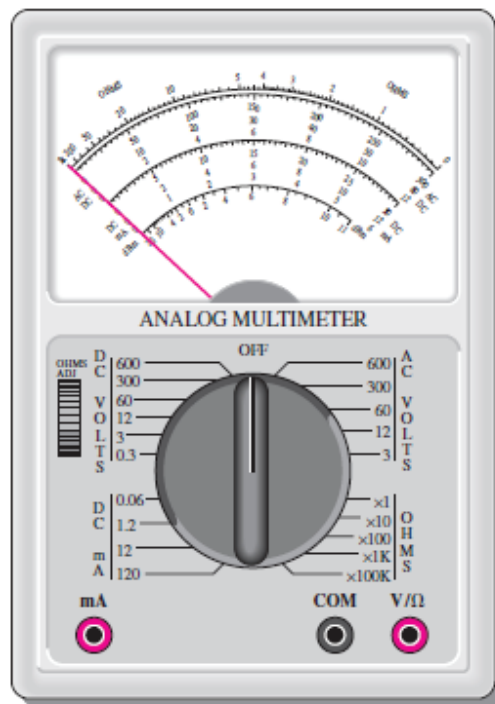
**Gambar 2.4** Cara Pengukuran Resistansi Rangkaian

### 4. Cara Membaca Multimeter

Multimeter merupakan salah satu alat ukur multiguna yang mampu menghasilkan lebih dari satu besaran listrik seperti tegangan, arus, dan resistansi. Pada awalnya, alat ukur ini digunakan hanya untuk mengukur tiga besaran listrik, yaitu arus, tegangan, dan resistansi saja sehingga sering dinamakan *avometer*, dengan AVO adalah kepanjangan dari ampere-voltage-ohm yang diambil sesuai dari masing-masing satuan ukurnya.

Ada dua jenis multimeter yang biasa digunakan, yaitu jenis multimeter analog dan digital, tentunya dengan masing-masing metode cara pengoperasiannya. Multimeter digital mungkin lebih mudah

digunakan karena pengguna tidak perlu menghitung skala ukurnya (seperti pada multimeter jenis analog). Namun, di lapangan, sebagai seorang *engineer* kita kadang-kadang dituntut harus mampu membaca dan mengukur besaran listrik tersebut menggunakan alat ukur analog. Dalam buku ini penulis menjelaskan langkah dan cara membaca serta mengukur arus, tegangan, dan resistansi menggunakan multimeter analog yang bertujuan agar membantu sebagian pembaca pemula agar mempermudah mengukur besaran listrik dengan benar dan akurat, khususnya jika menggunakan alat ukur analog.



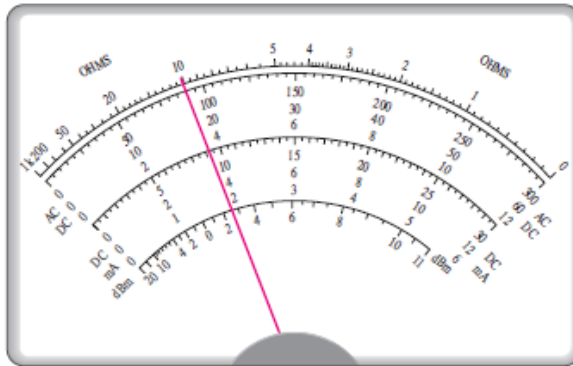
Sumber: Sedha (2013)

**Gambar 2.5** Model Multimeter Analog

### Contoh 2.1

Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6, tentukan berapa arus, tegangan, dan resistansi untuk spesifikasi skala berikut:

- tegangan DC pada skala tegangan 60 Volt
- arus DC pada skala arus 12 mA, dan
- resistansi pada skala OHM  $\times 1k$



Sumber: Sedha (2013)

**Gambar 2.6** Indikator Jarum Penunjuk Skala Ukur Multimeter Analog

### Penyelesaian

- Dengan melihat pada skala tengah AC-DC, diperoleh nilai tegangan 18 Volt
- Dengan melihat pada skala bawah AC-DC (DC-mA), diperoleh nilai arus 3,8 mA
- Dengan melihat pada OHMS, diperoleh nilai resistansi:  $10 \times 1k = 10 k\Omega$

### C. Penerapan Hukum Ohm pada Rangkaian

Hukum Ohm merupakan salah satu hukum rangkaian yang cukup terkenal dan biasanya dijadikan sebagai rujukan dalam menganalisis gejala kelistrikan dalam sebuah rangkaian elektronika. Hukum Ohm ini juga menjelaskan tentang adanya hubungan erat antara parameter-parameter kelistrikan, yaitu arus, tegangan, dan resistansi yang secara matematis dapat dinyatakan melalui persamaan (2.1).

$$I = \frac{V_s}{R} \quad (2.1)$$

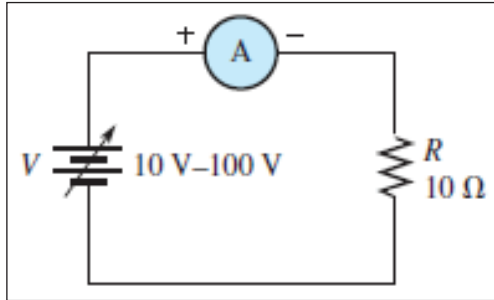
Dengan  $I$  menyatakan arus dalam satuan ampere,  $V$  menyatakan tegangan dalam satuan volt, serta  $R$  menunjukkan resistansi dalam satuan ohm. Dari persamaan (2.1), dapat dijelaskan dua hal penting berikut.

- 1) Dengan mengasumsikan resistansi bernilai tetap ketika tegangan sumber  $V_s$  dalam rangkaian meningkat, arus rangkaian akan mengalami peningkatan juga secara linier dan begitu pun sebaliknya.
- 2) Sementara itu, saat mengasumsikan nilai tegangan dibuat tetap, ketika nilai resistansi meningkat, arus akan berkurang dan begitu pun untuk kasus sebaliknya.

Persamaan (2.1) sendiri menunjukkan adanya hubungan linieritas antara arus dan tegangan sehingga gejala ini menunjukkan bahwa hukum Ohm setidaknya dapat mempermudah kita dalam menganalisis sifat rangkaian secara lebih sederhana. Contoh 2.2 merupakan salah satu contoh kasus sederhana dalam menggambarkan gejala ini.

#### Contoh 2.2

Diberikan sebuah rangkaian yang ditunjukkan Gambar 2.7 dengan sumber tegangan yang dapat diatur mulai dari 10 V sampai dengan 100 V dengan step perhitungan yang dilakukan di setiap kelipatan 10. Buatlah grafik kurva kelinieritasan arus terhadap tegangannya.



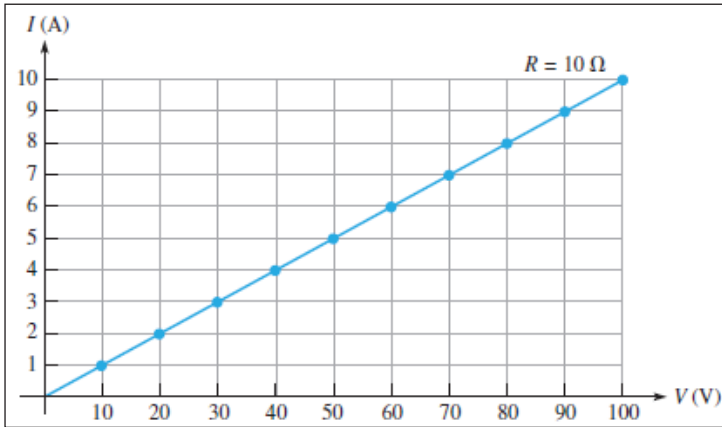
**Gambar 2.7** Penerapan Hukum Ohm pada Rangkaian Sederhana

### Penyelesaian

Dengan menerapkan persamaan (2.1), diperoleh tabel hasil perhitungan sebagai berikut.

$V$	$I$
10 V	1 A
20 V	2 A
30 V	3 A
40 V	4 A
50 V	5 A
60 V	6 A
70 V	7 A
80 V	8 A
90 V	9 A
100 V	10 A

Dari hasil data tabel tersebut, kinerja rangkaian dapat digambarkan melalui kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Kurva Kelinieritasan Arus terhadap Tegangan Rangkaian

#### D. Model Rangkaian Serial

Kaidah rangkaian resistansi seri adalah susunan beberapa resistor yang disusun secara berderet seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Model Rangkaian Serial Resistor Sederhana

Resistansi total dari rangkaian pada Gambar 2.9 dinyatakan sebesar

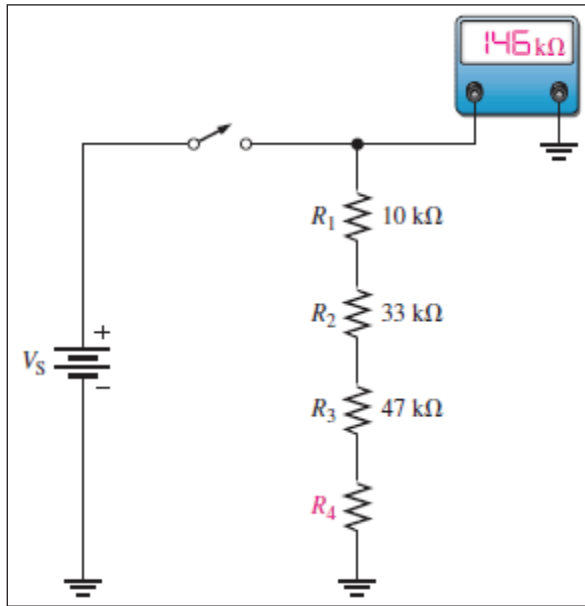
$$R_{Total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (2.2)$$

Apabila nilai resistansinya dibuat tak berhingga, persamaan (2.2) akan menjadi

$$R_{Total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_N. \quad (2.3)$$

### Contoh 2.3

Tentukan nilai resistansi di  $R_4$  dari rangkaian resistor seri seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bentuk Rangkaian Paralel Resistor

### Penyelesaian

Diketahui  $R_{Total} = 146 \text{ k}\Omega$  sehingga diperoleh  $R_4$  sebesar

$$R_4 = R_{Total} - (R_1 + R_2 + R_3) = 146 \text{ k}\Omega - (10 \text{ k}\Omega + 33 \text{ k}\Omega + 47 \text{ k}\Omega) = 56 \text{ k}\Omega$$

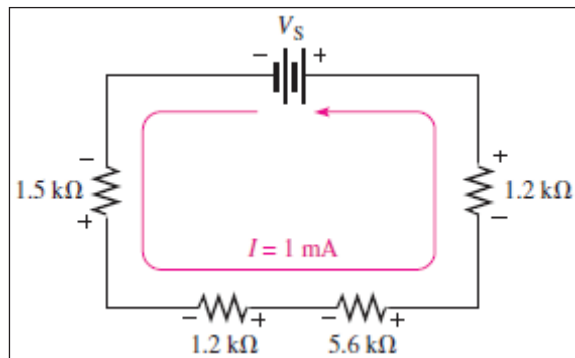
Dalam kaidah rangkaian serial ini tidak cukup sekadar menghitung resistansi total, tetapi sebuah rangkaian tentunya akan memiliki parameter lain seperti sumber tegangan, arus, dan daya di dalamnya. Kita tentu perlu juga melibatkan besaran-besaran lain untuk mengetahui sifat rangkaian yang dianalisis. Kembali kita lihat persamaan (2.2) sebelumnya, apabila sebuah sumber tegangan diberikan pada rangkaian serial lingkaran tertutup, secara tidak langsung

kita dapat mengukur arus rangkaian sehingga persamaan (2.2) akan menjadi

$$V_s = I (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_4). \quad (2.4)$$

### Contoh 2.4

Tentukan tegangan sumber dari rangkaian yang ditunjukkan Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Rangkaian Serial Resistor dengan Sumber Tegangan

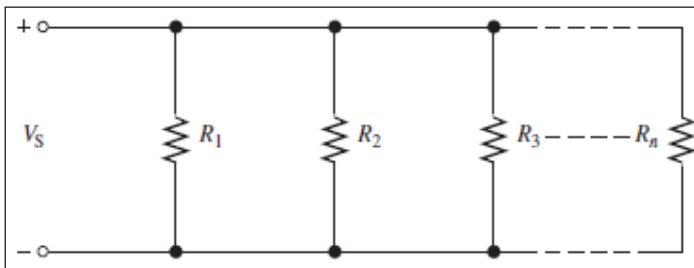
### Penyelesaian

Dengan menjumlahkan masing-masing resistor dalam rangkaian, diperoleh resistansi totalnya yaitu  $R_{Total} = 9,5\text{ k}\Omega$  sehingga tegangan  $V_s$  dapat dihitung sebesar  $V_s = (1\text{ mA})(9,5\text{ k}\Omega) = 9,5\text{ volt}$ .

### E. Model Rangkaian Paralel

Perbedaan dasar rangkaian paralel dengan seri adalah adanya percabangan dalam lingkaran rangkaiannya yang menyatakan adanya percabangan arus di dalamnya. Itulah sebabnya rangkaian seri lebih fokus menganalisis tegangan dibandingkan dengan rangkaian paralel yang lebih fokus mengukur karakteristik arus rangkaian. Dalam praktiknya

hukum-hukum rangkaian yang khusus seperti hukum Kirchoff dan teorema Thevenin-Norton banyak digunakan untuk mengukur dan menganalisis keberadaan besaran listrik di dalamnya.



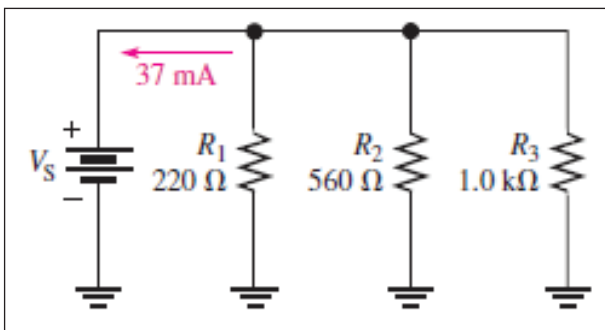
Gambar 2.12 Skema Rangkaian Paralel Resistor

Resistansi total dari rangkaian pada Gambar 2.12 dapat dinyatakan sebesar

$$R_{Total} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}. \tag{2.5}$$

Contoh 2.5

Tentukan resistansi total dan tegangan rangkaian dari skema rangkaian parallel pada Gambar 2.13 jika arus totalnya sebesar 37 mA.



Gambar 2.13 Rangkaian Paralel dengan Sumber Tegangan Searah

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Penyelesaian

Resistansi totalnya diperoleh sebesar

$$R_{Total} = \frac{1}{\frac{1}{200\Omega} + \frac{1}{560\Omega} + \frac{1}{1000\Omega}} = 136 \Omega.$$

Kemudian dengan menggunakan hukum Ohm, tegangan  $V_s$  dapat ditentukan besarnya, yaitu

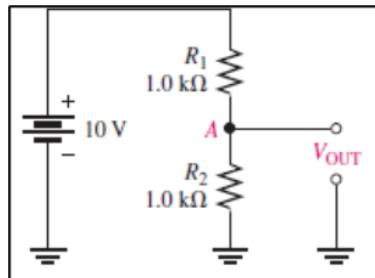
$$V_s = (37mA)(136\Omega) = 5,05 \text{ V}.$$

## F. Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Rangkaian

Dalam rangkaian elektronika belajar tentang hukum pembagi tegangan sangatlah membantu dalam mempermudah dan mempercepat menyelesaikan berbagai kasus rangkaian elektronika. Inilah sebabnya mengapa pembahasan hukum pembagi tegangan disampaikan di sini agar bagi seorang pemula (khususnya) dapat secara mudah belajar menganalisis guna mengimplentasikan rangkaian elektronika di masa mendatang. Contoh 2.6 merupakan salah satu kasus yang bisa dijadikan rujukan untuk menunjukkan salah satu skema rangkaian pembagi sederhana guna menentukan tegangan keluaran terhubung beban rangkaian.

### Contoh 2.6

Hitung berapa tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan yang ditunjukkan Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Tanpa Beban

## Penyelesaian

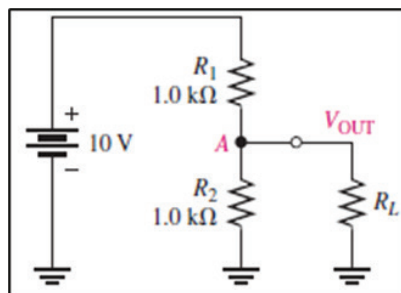
Dari rangkaian pembagi tegangan di atas pada prinsipnya dapat dinyatakan bahwa *hasil pembagi tegangan akan sama dengan hasil perbandingan antara nilai resistansi yang berhadapan dengan beban terhadap resistansi totalnya dikali dengan tegangan sumber rangkaian*. Secara matematis, pernyataan ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$V_{Out} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_s \quad (2.6)$$

sehingga dari rangkaian pada Gambar 2.14 serta menggunakan persamaan (2.6), dapat dihasilkan tegangan keluarannya sebesar

$$V_{Out} = \left( \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 1k\Omega} \right) \times 10\text{ V} = 5\text{ V}.$$

Selanjutnya, jika sebuah beban resistansi  $R_L$  kita tambahkan seperti pada rangkaian Gambar 2.15, hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.6) tidak secara langsung dapat dilakukan karena resistansi beban  $R_L$  yang ditambahkan tersebut sangat berpengaruh terhadap tegangan keluarannya.



**Gambar 2.15** Penerapan Hukum Pembagian Tegangan dengan Beban

Langkah pertama untuk mengukur tegangan keluaran ini adalah dengan cara menghitung terlebih dahulu resistansi total rangkaian yang berhubungan langsung antara resistansi rangkaian dengan beban  $R_L$  menggunakan hubungan persamaan pembagi tegangan berikut.

$$V_{Out} = \left( \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L} \right) V_s; \quad (2.7)$$

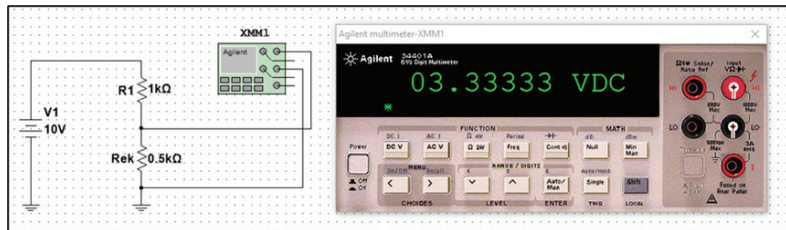
dengan nilai  $R_2 \parallel R_L = R_{ek} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$ .

Jika kembali melihat Contoh 2.6, kita dapat mengasumsikan bahwa nilai resistansi beban  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ . Oleh karena itu, tegangan hasil pembagiannya diperoleh sebesar

$$R_{ek} = R_2 \parallel R_L = \frac{1 \text{ k}\Omega \times 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 0,5 \text{ k}\Omega,$$

$$V_{Out} = \left( \frac{0,5 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 0,5 \text{ k}\Omega} \right) \times 10 \text{ V} = 3,3 \text{ V}.$$

Hasil perhitungan ini dapat dibandingkan dengan hasil simulasi berikut.

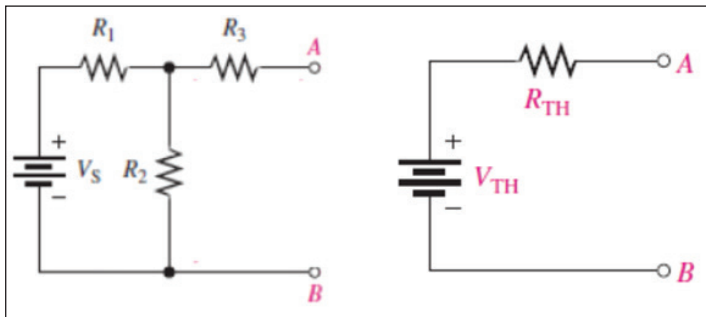


**Gambar 2.16** Skema Rangkaian Hasil Simulasi Contoh Soal 2.6

Kesimpulannya, rangkaian pembagi tegangan yang terhubung dengan sebuah resistansi beban akan mengalami pengurangan dibandingkan dengan rangkaian pembagi tegangan tegangan tanpa beban. Karena itu, peranan beban sangat besar sekali dampaknya terhadap perubahan tegangan yang diperoleh.

## G. Penerapan Teorema Thevenin pada Rangkaian

Teorema Thevenin pertama kali diperkenalkan oleh ilmuwan berkebangsaan Prancis yaitu Leon Charles Thevenin (1857–1926). Teorema Thevenin merupakan salah satu teori elektronika yang digunakan untuk menganalisis rangkaian yang rumit menjadi lebih sederhana dengan cara membuat rangkaian pengganti sumber tegangan yang dihubungkan secara serial dengan resistansi penggantinya. Secara lengkap teorema Thevenin menyatakan bahwa *sebuah rangkaian linier kompleks yang terdiri dari beberapa sumber tegangan dan resistansi dapat disederhanakan menjadi sebuah rangkaian ekuivalen sumber tegangan thevenin ( $V_{Th}$ ) yang di-seri-kan dengan sebuah resistansi ekuivalen Thevenin-nya ( $R_{Th}$ )*.



**Gambar 2.17** Penerapan Teorema Thevenin pada Rangkaian

Seperti terlihat pada Gambar 2.17, untuk mengubah tegangan pada rangkaian linier kompleks menjadi rangkaian ekuivalen sumber tegangan thevenin adalah dengan cara melihat dari terlebih dahulu dari sisi terminal A-B (bagian beban rangkaian) sehingga nantinya diperoleh tegangan thevenin sesuai persamaan (2.8).

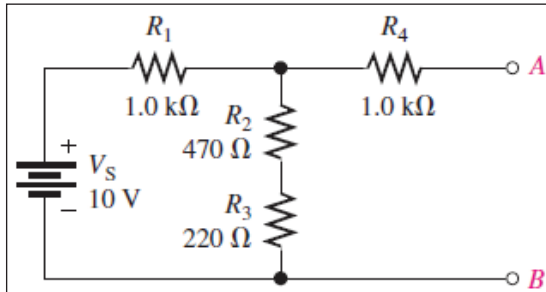
$$V_{Th} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_s. \quad (2.8)$$

Adapun resistansi ekuivalen  $R_{Th}$  diperoleh dari persamaan (2.9) berikut.

$$R_{Th} = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) + R_3. \quad (2.9)$$

### Contoh 2.7

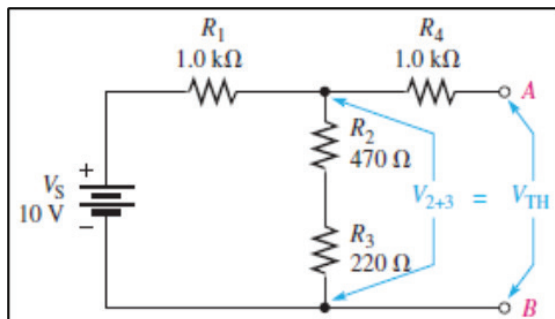
Tentukan rangkaian ekuivalen thevenin di terminal A-B seperti pada Gambar 2.18 jika diasumsikan resistansi beban yang terhubung terminal A-B diabaikan untuk kasus ini.



Gambar 2.18 Rangkaian Ekuivalen Thevenin

### Penyelesaian

Langkah pertama, kita uraikan terlebih dahulu rangkaian pada Gambar 2.18 sehingga menjadi rangkaian seperti yang ditunjukkan Gambar 2.19 berikut.



Gambar 2.19 Penentuan Nilai Tegangan Thevenin

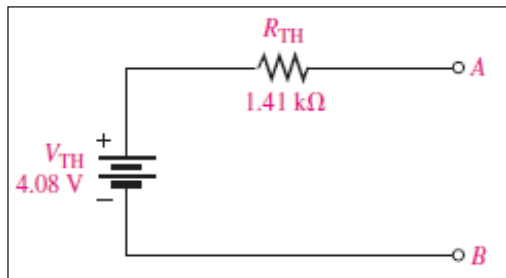
Dengan menggunakan pengembangan persamaan Thevenin, diperoleh tegangan ekuivalen rangkaiannya sebesar

$$V_{Th} = \left( \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \right) \times V_s = \left( \frac{470 \, \Omega + 220 \, \Omega}{1 \, \text{k}\Omega + 470 \, \Omega + 220 \, \Omega} \right) \times 10 \, \text{V} = 4,08 \, \text{V}.$$

Selanjutnya, resistansi ekuivalennya diperoleh sebesar

$$R_{Th} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} + R_4 = \frac{1 \, \text{k}\Omega (470 \, \Omega + 220 \, \Omega)}{1 \, \text{k}\Omega + 470 \, \Omega + 220 \, \Omega} + 1 \, \text{k}\Omega = 1,41 \, \text{k}\Omega$$

Akhirnya, model rangkaian thevenin dapat dihasilkan lebih sederhana dibandingkan dengan rangkaian awal yang agak rumit dan butuh waktu untuk dianalisis.



**Gambar 2.20** Hasil Rangkaian Ekuivalen Thevenin

Karena itu, untuk lebih memahami terkait konsep teorema Thevenin ini, berikut diberikan beberapa langkah untuk menganalisis rangkaian elektronika menggunakan teorema Thevenin.

- 1) Tentukan terlebih dahulu terminal (A-B) yang akan dijadikan referensi untuk mengukur tegangan ekuivalen thevenin  $V_{TH}$  dengan melepaskan terlebih dahulu resistansi bebannya (dibuat rangkaian terbuka).
- 2) Tentukan tegangan thevenin melalui terminal (A-B) menggunakan persamaan (2.8) (untuk kasus Contoh 2.7).

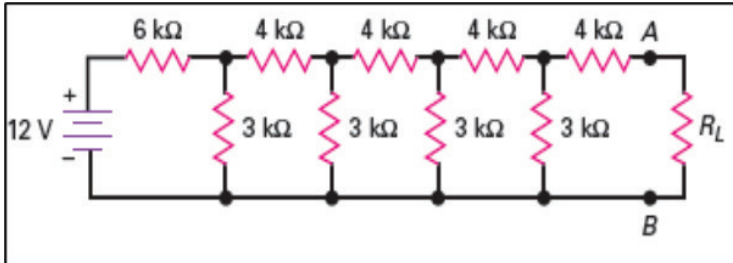
- 3) Tentukan resistansi thevenin  $R_{th}$  dengan menghubungkan-singkatkan (short circuit) sumber tegangan menggunakan persamaan (2.9) (untuk kasus contoh soal 2.7).
- 4) Hubungkan tegangan thevenin dengan resistansi thevenin-nya secara seri untuk mendapatkan rangkaian ekuivalen thevenin secara lengkap seperti contoh rangkaian pada Gambar 2.16.

## RANGKUMAN

- 1) Pada dasarnya model skema rangkaian elektronika tersusun atas model rangkaian serial dan paralel. Dalam praktiknya bentuk rangkaian ini tersusun secara bersamaan, yaitu kombinasi antara susunan serial dan paralel.
- 2) Cara melakukan pengukuran satuan kelistrikan dalam sebuah rangkaian memiliki metode yang berbeda-beda. Untuk mengukur arus rangkaian, alat ukur ditempatkan secara serial terhadap objek yang akan diukur, sedangkan untuk mengukur tegangan, alat ukurnya diposisikan secara paralel terhadap objek yang akan diukur.
- 3) Hukum Ohm merupakan salah satu hukum rangkaian yang cukup populer yang menjelaskan tentang adanya hubungan erat antara satuan kelistrikan, yaitu arus, tegangan, dan resistansi dalam suatu rangkaian.
- 4) Untuk menjelaskan dan memudahkan dalam menganalisis sebuah model rangkaian yang lebih rumit, hukum Kirchoff dan teorema Thevenin-Norton dapat digunakan sebagai cara untuk menjelaskan rangkaian tersebut.

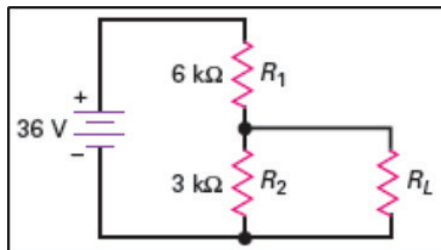
## LATIHAN SOAL

- 1) Pada Gambar 2.21, tentukan arus beban rangkaian jika masing-masing nilai resistansi beban  $R_L$  diubah-ubah sebesar  $100\ \Omega$ ,  $2\ \text{k}\Omega$ ,  $3\ \text{k}\Omega$ ,  $4\ \text{k}\Omega$ ,  $5\ \text{k}\Omega$ , dan  $6\ \text{k}\Omega$ .



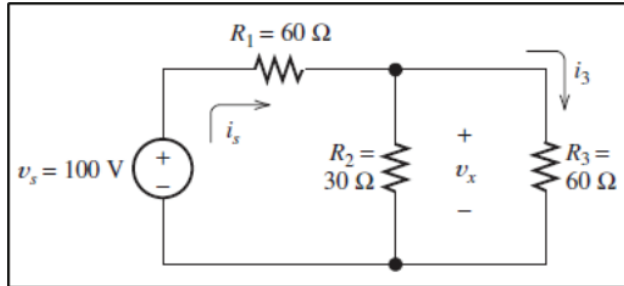
**Gambar 2.21** Rangkaian Serial-Paralel dengan Sumber Tegangan Searah

- 2) Tentukan tegangan thevenin dari rangkaian yang ditunjukkan Gambar 2.22 berikut.



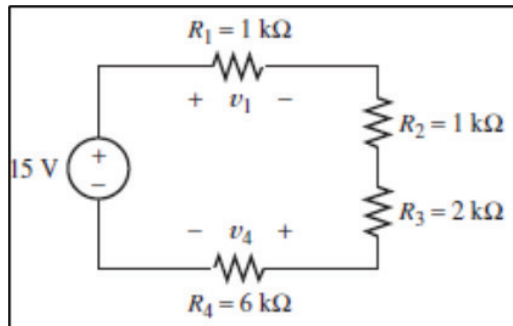
**Gambar 2.22** Penerapan Hukum Pembagian Tegangan Berbeban

- 3) Masih dengan rangkaian gambar pada soal 2 sebelumnya, tentukan arus beban untuk beberapa harga resistansi beban berikut:  $100\ \Omega$ ,  $2\ \text{k}\Omega$ ,  $3\ \text{k}\Omega$ ,  $4\ \text{k}\Omega$ ,  $5\ \text{k}\Omega$ , dan  $6\ \text{k}\Omega$ .



**Gambar 2.23** Rangkaian Paralel Resistor dengan Sumber Tegangan Searah

- 4) Gunakan metode hukum pembagian tegangan untuk menentukan tegangan  $V_x$  dan  $I_s$  seperti yang diilustrasikan Gambar 2.23 berikut.
- 5) Masih menggunakan gambar pada soal 4, selanjutnya tentukan arus  $I_3$  menggunakan hukum pembagian arus.
- 6) Dari rangkaian pada Gambar 2.24 berikut, tentukan tegangan di  $V_1$  dan  $V_2$ .



**Gambar 2.24** Rangkaian Serial Resistor

## DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentals of electric circuits* (5<sup>th</sup> ed.). McGrawHill Companies, Inc.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L., (2015). *Electronic devices and circuit theory* (7<sup>th</sup> ed.). Prentice Hall.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronis fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R., (2014). *Electrical engineerig principles and applications* (6<sup>th</sup> ed.). Essex: Pearson Education Limited, 862–863.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2016). *Electronic principles* (8<sup>th</sup> ed.). McGrawHill-Education, New York.
- Sedha, R. S., (2013). *Electronic measurements and instrumentations*. S. Chand Publishing.

# BAB III

## MENGENAL BAHAN DASAR KOMPONEN ELEKTRONIKA

### **Materi pembelajaran:**

Materi yang dibahas pada bab ini berkaitan dengan susunan bahan dasar pembuatan komponen-komponen elektronika. Jenis bahan dasar yang dipelajari adalah bahan dasar semikonduktor beserta susunan pembentukannya, seperti ikatan kovalen serta energi gap bahan dasar silikon dan germanium.

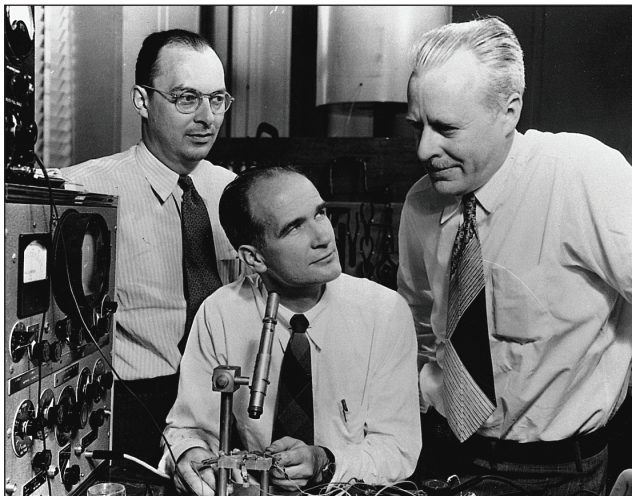
### **Tujuan pembelajaran:**

- 1) mengenalkan bahan semikonduktor sebagai dasar pembuatan komponen-komponen elektronika;
- 2) mampu mempelajari dan memahami bahan-bahan dasar sebagai bagian dari pembentukan bahan semikonduktor yang nantinya akan dijadikan bahan pembuatan komponen elektronika;
- 3) mampu membedakan cara kerja bahan semikonduktor dengan bahan jenis lainnya; dan
- 4) mampu memahami tentang energi gap, ikatan kovalen, lubang, dan elektron sebagai bagian dari penyusun bahan semikonduktor.

## A. Pendahuluan

Bahan semikonduktor adalah bahan dasar komponen aktif elektronika seperti bahan untuk membuat dioda, transistor, dan rangkaian ter-integrasi (*integrated circuit*). Bahan semikonduktor merupakan bahan yang memiliki resistansi jenis atau tahanan dalam di antara bahan konduktor sehingga dikategorikan bukan konduktor murni. Bahan-bahan logam adalah contoh kategori bahan konduktor murni seperti tembaga, besi, dan timah karena bahan logam tersebut memiliki susunan atom yang sedemikian rupa sehingga elektronnya dapat bergerak bebas dan mudah menghantarkan listrik dengan sangat baik.

William Schockley (1910–1988, Gambar 3.1) merupakan salah satu peneliti sekaligus penemu yang menggagas adanya bahan semikonduktor ini yang di kemudian hari akan mengubah dunia terutama di bidang perangkat elektronika. Salah satu hasil perwujudannya adalah komponen dioda, transistor, dan rangkaian terpadu (*integrated circuit*).



Sumber: Sack (2018)

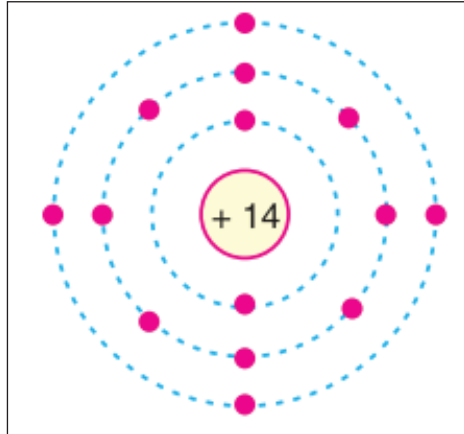
**Gambar 3.1** Penelitian transistor oleh John Bardeen, William Shockley, dan Walter Brattain (dari kiri ke kanan) di Laboratorium Bell Telepon

Ada beberapa sifat dan ciri khas yang dimiliki bahan semikonduktor dibandingkan dengan bahan jenis lainnya, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Bahan semikonduktor memiliki hambatan jenis ( $\rho$ ) yang nilainya berada di antara nilai hambatan jenis bahan konduktor dan isolator, yaitu  $10^{-6} \Omega \cdot m - 10^4 \Omega \cdot m$ .
- 2) Bahan semikonduktor memiliki nilai koefisien temperatur negatif yang tinggi sehingga ketika suhu lingkungan di sekitarnya meningkat, temperatur bahan semikonduktor ini akan mengalami penurunan.
- 3) Bahan semikonduktor mampu memberikan daya termoelektrik yang tinggi sehingga bahan semikonduktor ini mampu menyalurkan dan mengubah panas menjadi daya hantar listrik.
- 4) Hubungan (*junction*) antara semikonduktor tipe-N (negatif) dengan tipe-P (positif) akan menghasilkan sifat-sifat penyearahan (*rectification*) sehingga bahan semikonduktor ini mampu menyebarkan arus yang melaluinya.
- 5) Bahan semikonduktor cukup sensitif terhadap intensitas cahaya yang datang kepadanya sehingga sanggup mengubah nilai resistansi bahan. Adanya perubahan pada bagian nilai resistansi ini dampaknya akan membangkitkan perubahan tegangan maupun arus.

## B. Struktur Elemen Atom

Pada dasarnya kita mengetahui bahwa sebuah atom dibangun oleh elemen proton, elektron dan neutron. Salah satu bahan yang cukup banyak digunakan dalam pembuatan komponen elektronika adalah silikon (Si) yang ternyata memiliki struktur atom seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Sumber: Mehta dan Mehta (2020)

**Gambar 3.2** Struktur Atom Silikon

Struktur atom silikon seperti yang diperlihatkan Gambar 3.2 memiliki berat atom sebesar 28 dengan perincian sebagai berikut.

Berat atom silikon : 28  
 Jumlah elektron : 14  
 Jumlah proton : 14  
 Jumlah neutron :  $28 - 14 = 14$

Seperti yang terlihat pada struktur atom silikon ini bahwa elektron senantiasa mengelilingi inti atom (proton dan neutron) sesuai dengan masing-masing orbitnya. Total jumlah elektron yang mengelilingi inti atom silikon sebanyak 14 buah yang terbagi ke dalam 3 lintasan orbit, yaitu orbit kesatu terdiri dari 2 elektron, orbit kedua sebanyak 8 elektron, dan orbit ketiga sebanyak 4 buah elektron. Elektron sendiri bermuatan negatif dengan ciri sebagai berikut:

- muatan elektron ( $e$ ) :  $1,062 \times 10^{-19}$  coulomb,
- massa elektron ( $m$ ) :  $9,0 \times 10^{-31}$  Kg,
- diameter elektron ( $r$ ) :  $1,9 \times 10^{-15}$  meter.

Elektron sendiri merupakan bagian elemen atom yang selalu bergerak mengelilingi inti karena memiliki berat masa yang sangat kecil dibandingkan dengan muatannya sendiri sehingga elektron ini akan selalu bergerak yang dipengaruhi oleh medan magnet dan medan listrik serta didorong oleh adanya energi kinetik dan energi potensial. Energi pergerakan elektron untuk setiap orbit lintasannya berbeda-beda sesuai jumlahnya. Lintasan orbit dengan jumlah elektron terbanyak akan menghasilkan energi tertinggi. Untuk atom silikon, energi elektron tertinggi berada pada lintasan orbit kedua, yaitu 8 buah elektron.

### C. Penyusun Bahan Dasar Semikonduktor

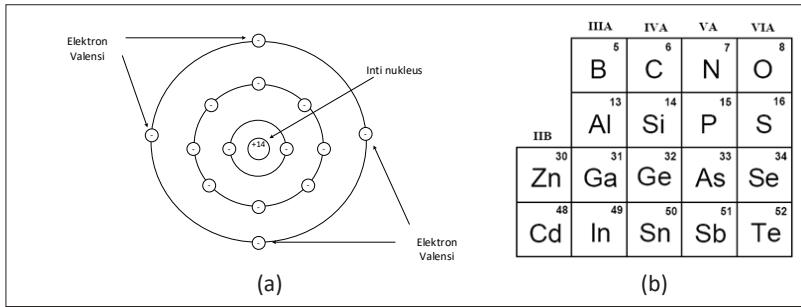
Ada sebagian bahan konduktor yang memiliki kemampuan terbaik dalam menghantarkan listrik seperti logam murni misalnya perak, emas, atau tembaga yang secara kimiawi memiliki satu elektron valensi saja dibandingkan dengan bahan insulator (jenis bahan penghantar listrik tidak baik) yang biasanya memiliki delapan elektron valensi. Semikonduktor sendiri terbentuk dari bahan-bahan empat elektron valensi seperti germanium, silikon, selenium, dan karbon.

Tabel 3.1 menunjukkan sifat bahan semikonduktor yang dapat diketahui dari nilai resistivitas atau hambatan jenis bahan. Nilai resistansi jenis semikonduktor akan mengalami penurunan atau mengecil maka saat itu temperatur bahan mengalami kenaikan sehingga kecenderungan bahan akan menjadi konduktor. Silikon (Si) dan germanium (Ge) adalah salah satu bahan dasar semikonduktor yang akan menjadi konduktor ketika temperatur meningkat dan sebaliknya akan menjadi isolator saat temperatur mengalami penurunan. Karena itu silikon ini tergolong bahan semikonduktor yang cukup baik yang mampu berperan sebagai konduktor maupun insulator. Silikon dan germanium sendiri di lintasan terluarnya memiliki empat elektron valensi dan termasuk ke dalam golongan IVA (Gambar 3.3).

Tabel 3.1 Beberapa Nilai Resistivitas Jenis Bahan

No.	Substrat	Sifat Bahan	Resistivitas
1.	Tembaga	Konduktor	$1,7 \times 10^{-8} \Omega.m$
2.	Germanium	Semikonduktor	$0,6 \Omega.m$
3.	Gelas	Insulator	$9 \times 10^{11} \Omega.m$

Sumber: Malvino dan Bates (2016)

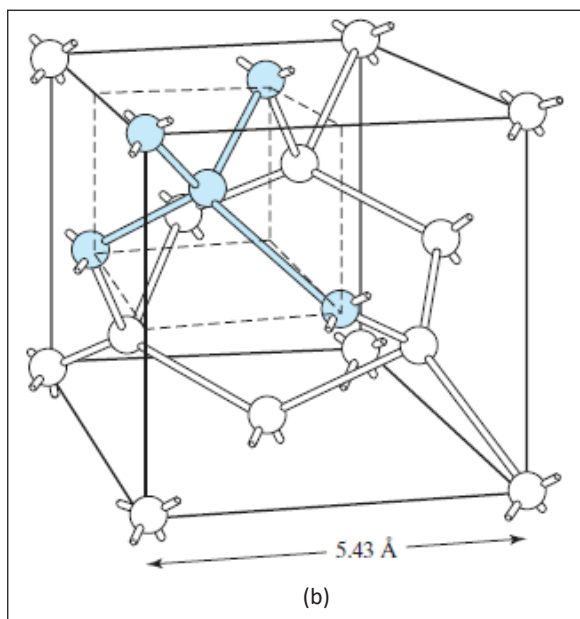
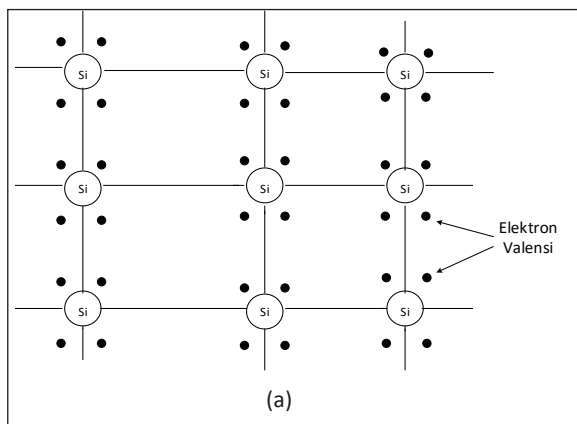


Keterangan: (a) Susunan elektron valensi, (b) Golongan atom Si dan Ge

Sumber: Sedra dan Smith (2004)

Gambar 3.3 Ikatan Elektron Valensi Bahan Silikon dan Germanium

Salah satu keunggulan lain dari silikon ini, yaitu bahan ini memiliki ikatan kovalen cukup kuat meskipun dicampur dengan bahan lain dari golongan IIIA. Adapun susunan ikatan valensi silikon ini ditunjukkan seperti pada Gambar 3.4.



Keterangan: (a) Satu Dimensi, (b) Tiga Dimensi

Sumber: Mehta dan Mehta (2020)

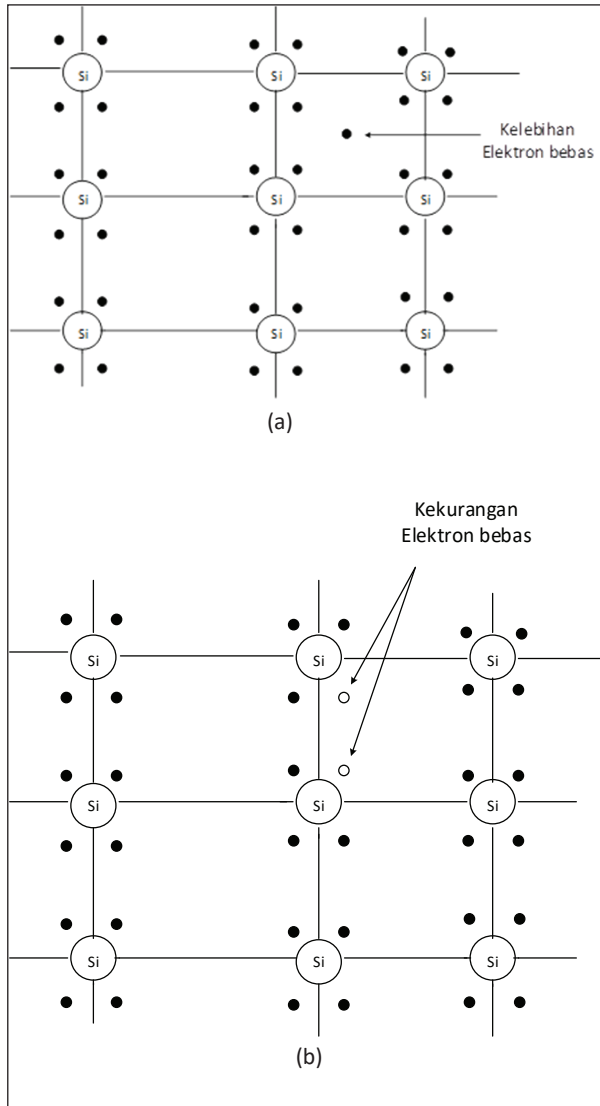
**Gambar 3.4** Ikatan Kovalen Atom Silikon

#### D. Konsep Elektron dan Lubang

Pada bahan semikonduktor pergerakan elektron-elektron bebas dan lubang (*hole*) pada ikatan kovalen atom golongan IVA menggambarkan adanya aliran arus akibat dari pergerakan tersebut. Elektron bebas dan lubang tersebut dinyatakan sebagai pembawa muatan listrik dari satu tempat ke tempat lainnya. Adanya pergerakan di antara elektron dan lubang menyebabkan satu sama lain saling meninggalkan dan mengisi rantai ikatan kovalennya sehingga dampaknya ada satu ikatan akan kehilangan elektron valensi karena meninggalkan lubang sedangkan ikatan yang lain akan kelebihan elektron. Kondisi ini menggambarkan bahwa sebuah ikatan kovalen akan mengalami kekurangan elektron sehingga memerlukan elektron dari luar untuk membentuk ikatan kovalen yang kuat kembali. Hal ini berlaku juga untuk kondisi sebaliknya sehingga fenomena ini pada akhirnya akan memunculkan dua tipe semikonduktor, yaitu tipe positif (tipe-P) dan tipe negative (tipe-N).

Adapun sumber terjadinya pergerakan atau mobilisasi (*mobility*) antara elektron bebas dan lubang antarikatan kovalen tersebut karena adanya energi kuat yang mampu melepaskan ikatan kovalen agar energi tersebut dapat disalurkan dalam sistem dengan baik dan sempurna. Secara garis besar energi tersebut digambarkan sebagai pita energi (*energy band*) dan energi terlarang (*energy gap*) dari elektron bebas dan lubang yang dinyatakan sebagai satuan eV (elektron volt), yaitu besarnya  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ . Gambar 3.5 menunjukkan ilustrasi aliran pita energi dan energi terlarang ketika elektron dan lubang bergerak dalam ikatan kovalen sebagai bahan konduktor, insulator dan semikonduktor.

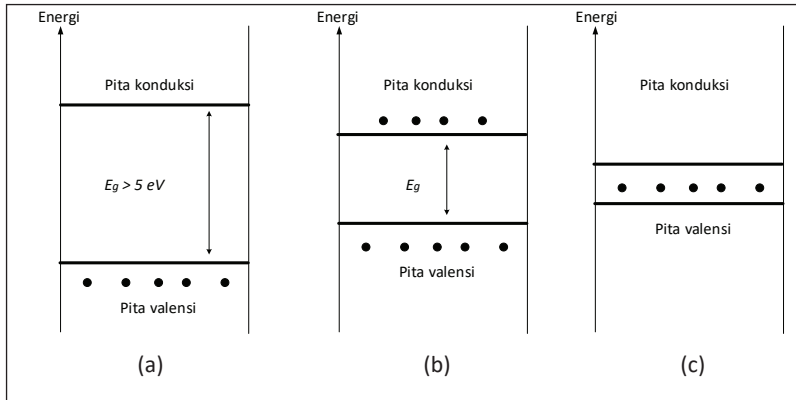
Pada Gambar 3.6 dapat dijelaskan bahwa makin besar energi terlarang antara pita konduksi dengan pita valensi maka bahan tersebut lebih berperan sebagai insulator. Sebaliknya, jika energi terlarang makin kecil, bahan cenderung akan bersifat sebagai konduktor sedangkan bagi bahan semikonduktor berada di antara keduanya.



Keterangan: (a) Tipe-N dan (b) Tipe-P

Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 3.5** Tipe Polaritas Bahan Semikonduktor



Keterangan: (a) Insulator, (b) Semikonduktor, (c) Konduktor

**Gambar 3.6** Energi Gap Bahan Dasar Semikonduktor

## E. Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik disebut juga konduktor murni. Seperti diketahui bahwa ada dua jenis dasar bahan murni semikonduktor yaitu silikon (Si) dan germanium (Ge) yang memiliki empat elektron valensi. Ketika perubahan temperaturnya mendekati nol, elektron valensinya akan terikat sangat kuat. Akibatnya tidak ada elektron bebas yang bergerak sehingga bahan silikon atau germanium ini akan menjadi penghantar listrik yang buruk atau memiliki sifat isolator. Karena itu, untuk melepaskan ikatan kovalen yang kuat tersebut dibutuhkan energi sebesar 1,1 eV agar ikatan kovalen silikon terlepas dan sebesar 0,7 eV untuk melepaskan ikatan kovalen germanium. Secara visual, struktur silikon dan germanium berbentuk tetrahedral seperti yang ditunjukkan Gambar 3.5. Pada temperatur ruang (sekitar 300 K) sejumlah elektron memiliki energi yang sangat besar untuk melepaskan diri dari ikatan ini dan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi menjadi elektron bebas. Besarnya energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron ini dinamakan energi terlarang (*energy gap*). Jika sebuah ikatan kovalen terputus, akan terjadi kekosongan sehingga akan membentuk lubang (*hole*). Pada daerah yang terjadi kekosongan tersebut akan terdapat kelebihan

muatan positif, sedangkan yang lainnya memiliki kelebihan muatan negatif. Kedua muatan inilah yang memberikan kontribusi munculnya aliran listrik pada semikonduktor intrinsik. Proses aliran muatan arus ini sendiri dinamakan sebagai arus *drift*. Arus *drift* menggambarkan tentang peristiwa hantaran listrik pada bahan dasar semikonduktor akibat adanya dua partikel bermuatan positif dan negatif yang bergerak dengan arah yang berlawanan disebabkan pengaruh medan listrik. Dengan adanya dua pembawa muatan tersebut, nilai kerapatan arusnya (*current density*) dapat dinyatakan oleh persamaan (3.1).

$$J = (n\mu_n + p\mu_p)q\varepsilon = \sigma\varepsilon \tag{3.1}$$

- dengan  $n$  : konsentrasi elektro ( $\text{m}^{-3}$ ),
- $p$  : konsentrasi lubang ( $\text{m}^{-3}$ ),
- $\mu_n$  : mobilitas elektro ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),
- $\mu_p$  : mobilitas lubang ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),
- $\sigma$  : konduktivitas (Siemens/cm) =  $(n\mu_n + p\mu_p)q$ .

Secara garis besar beberapa parameter silikon dan germanium pada saat suhu ruang 300 K dinyatakan dalam Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Karakteristik Bahan Dasar Semikonduktor

Parameter	Silikon (Si)	Germanium (Ge)
Mobilitas elektron ( $\mu_n$ )	0,13	0,39
Mobilitas lubang ( $\mu_p$ )	0,05	0,19
Konsentrasi instrinsik ( $n_i$ )	$1,5 \times 10^{16}$	$2,4 \times 10^{19}$
Energi terlarang ( $E_g$ )	1,1	0,7
Resistivitas intrinsik ( $\Omega.m$ )	2300	0,46

Sumber: Boylestad dan Nashelsky (2015)

Mobilitas pergerakan elektron dan lubang pada bahan dasar silikon atau germanium akan menentukan sifat dan kualitas komponen elektronika yang terbuat dari bahan-bahan ini. Ukuran untuk menentukan sifat dan kualitas ini dapat ditentukan berdasarkan nilai mobilitas pembawa elektron dan lubang semikonduktor intrinsik yang besarnya dapat dinyatakan oleh persamaan (3.2).

$$n_i = AT^{1,5} e^{\left[\frac{-E_g}{(kT)}\right]} \quad (3.2)$$

dengan

$T$  : temperatur dalam K (Kelvin),

$k$  : konstanta Boltzman ( $= 1,38 \times 10^{-23}$  J/K atau  $8,62 \times 10^{-5}$  eV/K),

$E_g$  : energi gap (1,21 eV dan 1,1 eV untuk bahan Si pada 0°K dan 300°K),

$A$  : nilai konstanta yang tergantung bahan semikonduktor,

$n_i$  : konsentrasi electron dalam bahan semikonduktor.

Besarnya energi gap ( $E_g$ ) yang dipengaruhi oleh perubahan temperatur bahan semikonduktor akibat adanya mobilitas electron dan lubang dapat dinyatakan oleh persamaan (3.3).

$$E_g(T) = 1,17 - 4,37 \times 10^{-4} \left( \frac{T^2}{T + 636} \right) \quad (3.3)$$

### Contoh 3.1

Buatlah program Matlab untuk menentukan nilai konstanta bahan semikonduktor untuk komponen elektronika jika diketahui  $T = 300$  K,  $n_i = 1,52 \times 10^{10}$  elektron/cm<sup>3</sup> dengan energi gap-nya sebesar 1,1 eV pada 300 K.

### Penyelesaian

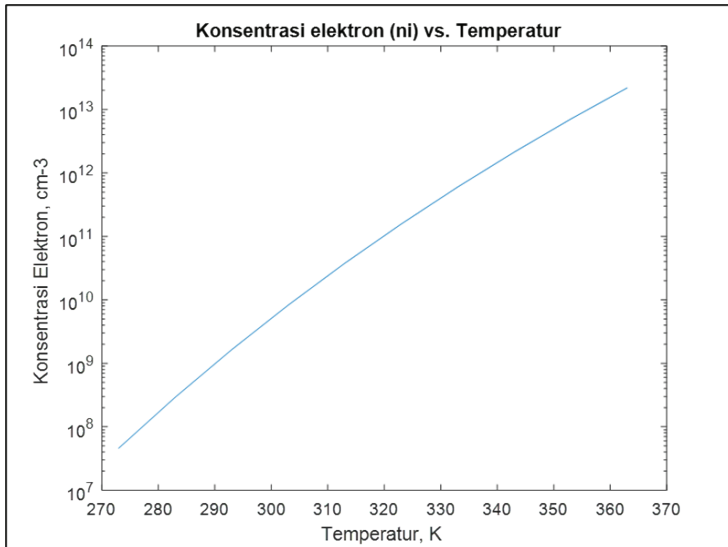
Dengan menggunakan pendekatan persamaan (3.2) dan (3.3), dapat dibuat sebuah program perkodingan Matlab sebagai berikut.

*Source code Matlab:*

```
%%Perhitungan Konstanta bahan Semikonduktor A khusus silikon
(Si)%%
k = 8.62e-5;
ni = 1.52e10;
T = 300;
Eg = 1.1;
ka = -Eg/(k*T);
t32a = T.^1.5;
A = ni/(t32a*exp(ka));
fprintf('constant A is %10.5e \n', A)
%% Konsentrasi elektron (ni) vs. temperatur %%%
for i = 1:10
    T(i) = 273 + 10*(i-1);
    Eg(i) = 1.17 - 4.37e-4*(T(i)*T(i))/(T(i) + 636);
    t32(i) = T(i).^1.5;
    ni(i) = A*t32(i)*exp(-eg(i)/(k*t(i)));
end
semilogy(t,ni)
title('Konsentrasi elektron (ni) vs. Temperatur')
xlabel('Temperatur, K')
ylabel('Konsentrasi Elektron, cm-3')
```

Hasilnya:

Konstanta A sebesar  $8.70225 \times 10^{24}$  ( $= 8,7 \times 10^{24}$ ). Hasil simulasinya ditunjukkan pada plot grafik sebagai berikut.



Kesimpulannya, perubahan temperatur pada bahan semikonduktor akan meningkatkan mobilitas elektron yang secara tidak langsung menunjukkan terjadinya transfer energi dalam bahan yang akan meningkatkan kinerja sistem atau komponen elektronika.

## F. Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik disebut semikonduktor tidak murni. Dikatakan demikian karena semikonduktor jenis ini sudah mendapatkan suntikan dari bahan lain, misalnya silikon atau germanium yang dicampur (dengan pengotor) dari atom pada golongan III atau V seperti yang terlihat pada Gambar 3.7. Hasil pengotoran tersebut kemudian melahirkan semikonduktor tipe-N dan tipe-P.

KOLOM III	KOLOM IV	KOLOM V
5 B BORON 10,82	6 C CARBON 12,01	7 N NITROGEN 14,008
13 Al ALUMINUM 26,97	14 Si SILICON 28,09	15 P PHOSPHORUS 31,02
31 Ga GALLIUM 69,72	32 Ge GERMANIUM 72,60	33 As ARSENIC 74,91
49 In INDIUM 114,8	50 Sn TIN 118,7	51 Sb ANTIMONY 121,8

Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 3.7** Golongan Campuran Bahan Dasar Semikonduktor

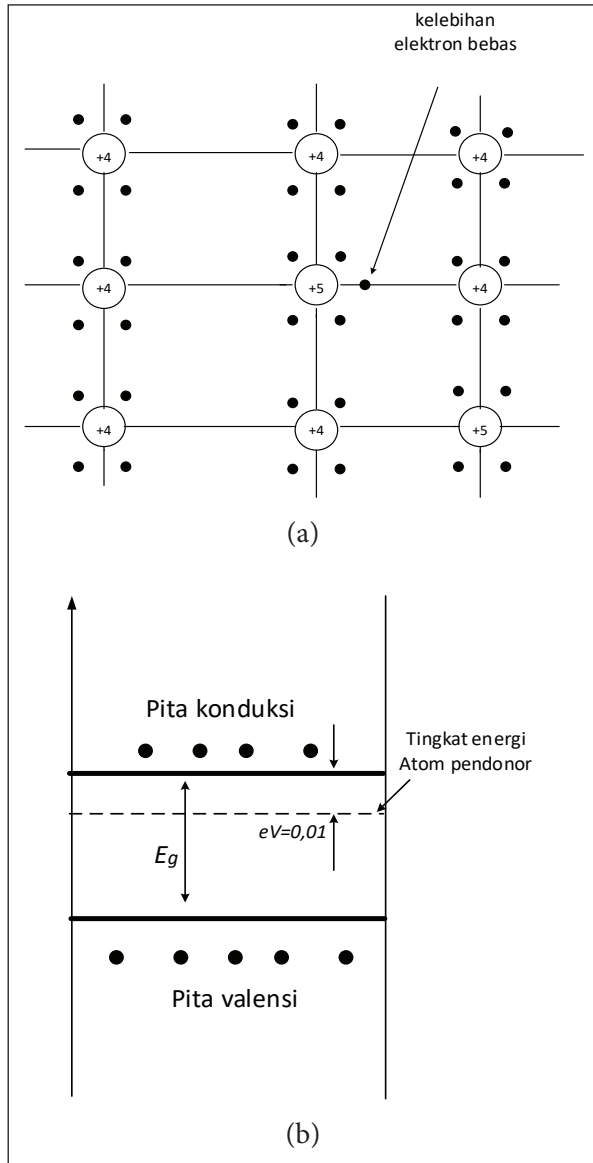
## 1. Semikonduktor Tipe-N

Semikonduktor tipe-N mayoritas bertindak sebagai pendonor (*doping*) yang dibuat dengan menambahkan atom pengotor contohnya antimoni, *phosphorus*, atau arsenik pada silikon murni. Atom-atom pengotor ini memiliki lima elektron valensi sehingga elektron-elektron bebasnya memiliki kelebihan jumlah lubang. Elektron-elektron bebas ini bertugas sebagai pembawa mayoritas sedangkan lubang-lubang sebagai pembawa minoritas. Pergerakan kedua pembawa ini selalu berlawanan yang akhirnya menghasilkan hantaran arus listrik. Struktur pita energi semikonduktor tipe-N ini diilustrasikan pada Gambar 3.8.

Besarnya pembawa konsentrasi mayoritas dan minoritas pada jenis semikonduktor tipe-N ini dinyatakan oleh persamaan (3.4).

$$p \cong \frac{n_i^2}{N_D}; \quad (3.4)$$

dengan  $p$  menunjukkan konsentrasi lubang dan  $N_D$  menyatakan konsentrasi sebagai bahan pendonor.



Keterangan: (a) Struktur dan (b) Pita energi

**Gambar 3.8** Bahan Semikonduktor Tipe-N

### Contoh 3.2

Sebuah semikonduktor tipe-N pada temperatur 300 K memiliki variasi nilai konsentrasi pendonoran dari  $10^{13}$  sampai dengan  $10^{18}$  atom/cm<sup>3</sup>. Tentukan pembawa minoritasnya dalam bahan semikonduktor yang didoping jika diketahui konsentrasi elektronnya sebesar  $1,52 \times 10^{10}$  elektron/cm<sup>3</sup> dengan menggunakan pemrograman Matlab.

### Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan (3.4), *script* program Matlab dapat dinyatakan sebagai berikut.

%% Perhitungan minoritas pembawa pada semikonduktor tipe-n %%

*nd* = logspace(13,18);

*n* = *nd*;

*ni* = 1.52e10;

*ni\_sq* = *ni*\**ni*;

*p* = *ni\_sq*./*nd*;

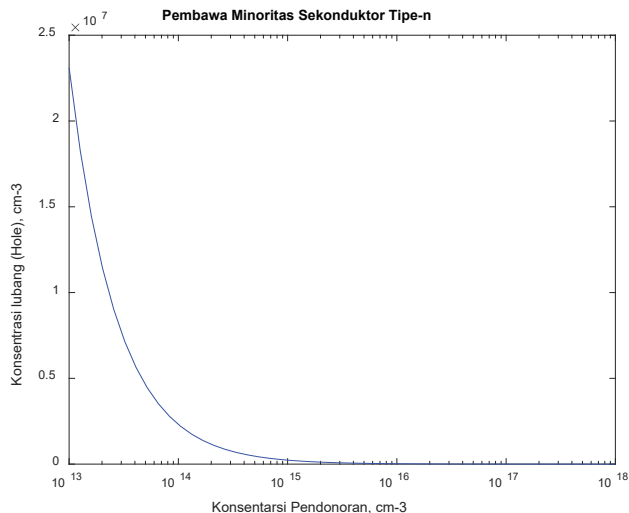
semilogx(*nd*,*p*, 'b')

title('Pembawa Minoritas Sekonduktor Tipe-n')

xlabel('Konsentarsi Pendonoran, cm-3')

ylabel('Konsentrasi lubang (Hole), cm-3')

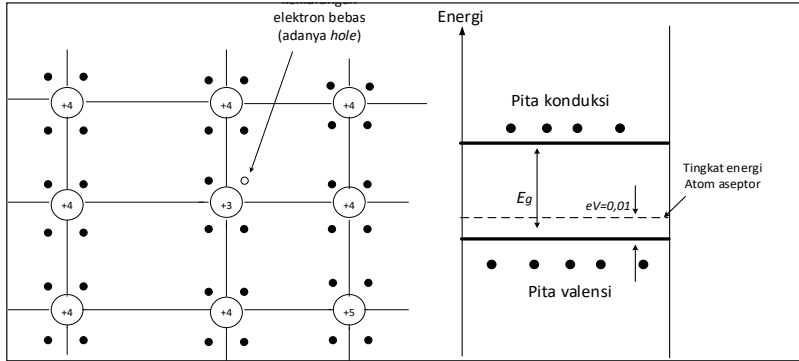
Hasil dari simulasi Matlab-nya ditunjukkan pada Gambar 3.9.



**Gambar 3.9** Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 3.2

## 2. Semikonduktor Tipe-P

Jenis semikonduktor tipe-P mayoritas sebagai akseptor (penerima) dari jenis bahan lain. Semikonduktor murni dikotori oleh atom *trivalent* atau atom dari golongan IIIA yang memiliki tiga elektron valensi, seperti aluminium, boron, galium atau indium. Atom trivalen pengotor ini menempati atom silikon atau germanium dalam kisi kristal sehingga membentuk tiga ikatan kovalen lengkap dan tersisa sebuah muatan positif dari atom silikon yang tidak berpasangan. Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini disebut semikonduktor tipe-P karena menghasilkan pembawa muatan negatif pada kristal yang netral. Karena atom pengotor menerima elektron, atom pengotor ini disebut atom akseptor (*acceptor*). Struktur pita energinya ditunjukkan seperti pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Bahan Semikonduktor Tipe-P

Sementara itu, pembawa konsentrasi mayoritas dan minoritas pada jenis semikonduktor tipe-P dinyatakan oleh persamaan (3.5).

$$n \cong \frac{n_i^2}{N_A} \quad (3.5)$$

### G. Hubungan P-N (*P-N Junction*)

Ketika semikonduktor tipe-P dikombinasikan atau dicampur dengan semikonduktor tipe-N akan menghasilkan sebuah bahan semikonduktor baru hasil campuran yang dinamakan persimpangan P-N (*P-N junction*). Sebuah rangkaian elektronika dengan komponen semikonduktor *P-N junction* yang terhubung langsung dengan sebuah sumber tegangan akan memunculkan arus maju (*forward bias*) dan arus mundur (*reverse bias*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11.

Nilai persimpangan tegangan pada semikonduktor P-N ini dapat ditentukan besarnya dan hasilnya sangat berpengaruh terhadap kualitas komponen semikonduktor tersebut.

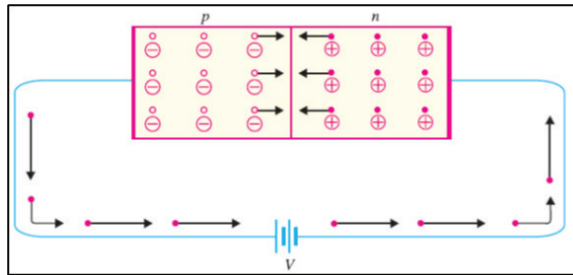
$$V_C = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \quad (3.6)$$

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{p_p}{p_n} = e^{\left[ \frac{q(V_C + V_S)}{kT} \right]}, \quad (3.7)$$

dengan

$V_C$ : tegangan hubungan P-N (*contact voltage P-N*) (volt),

$V_S$ : tegangan sumber (Volt).



Sumber: Mehta dan Mehta (2020)

**Gambar 3.11** Aliran Arus pada Bahan Semikonduktor *P-N Junction*

### Contoh 3.3

Sebuah bahan semikonduktor *P-N junction silicon* dengan  $N_D = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  dan  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dengan  $n_i^2 = 1,04 \times 10^{26} \text{ cm}^{-6}$  pada temperatur 300 K. Tentukan nilai hubungan tegangan P-N ( $V_C$ ) dan buatlah kurva hubungan tegangan persimpangan terhadap perubahan tegangan sumber pada semikonduktor P-N.

### Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan (3.6) dan (3.7), *source code script* program Matlab dapat dibuat sebagai berikut.

$T = 300;$

$NA = 1.0e17;$

$ND = 1.0e14;$

$nisq = 1.04e26;$

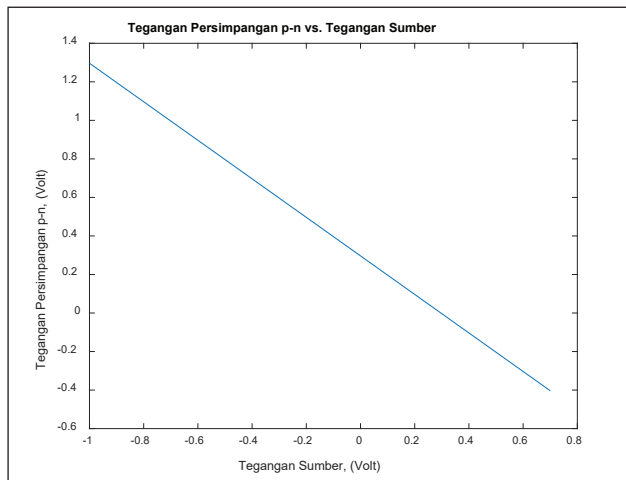
$q = 1.602e-19;$

$k = 1.38e-23;$

```
%% menghitung hubungan tegangan p-n %%
Vc = (k*T/q)*(log(NA*ND/nisq));
Vs = -1.0:0.1:0.7;
jct_pot = Vc - Vs;
%% memplot kurva%%
plot(Vs,jct_pot)
title('Tegangan Persimpangan p-n vs. Tegangan Sumber')
xlabel('Tegangan Sumber, (Volt)')
ylabel('Tegangan Persimpangan p-n, (Volt)')
```

Hasilnya:

- Nilai hubungan tegangan P-N ( $V_c$ ) diperoleh sebesar 0,2965 volt.
- Hasil kurva simulasinya ditunjukkan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 3.3

## H. Rekombinasi

Rekombinasi pada bahan semikonduktor menggambarkan keadaan ketika elektron dan lubang bertemu dan saling menetralkan satu sama lain. Proses ini terjadi ketika elektron yang bergerak melewati bahan

semikonduktor bertemu dengan lubang, dan keduanya bergabung membentuk pasangan muatan netral. Proses rekombinasi ini dapat memengaruhi kinerja perangkat atau komponen semikonduktor seperti dioda, transistor, atau bisa saja sel surya. Rekombinasi dapat terjadi secara spontan, artinya diinduksi oleh berbagai faktor seperti suhu, pendorong listrik, atau adanya pergerakan muatan.

Penting untuk mengendalikan rekombinasi dalam bahan semikonduktor karena dapat memengaruhi efisiensi dan performa komponen. Misalnya, pada bahan sistem sel surya ternyata rekombinasi yang tinggi dapat mengurangi efisiensi konversi energi Matahari menjadi listrik. Sebaliknya, pada komponen transistor, pengendalian rekombinasi ternyata juga mampu memengaruhi daya hantar dan daya mati perangkat atau sistem itu sendiri. Cara mengurangi rekombinasi pada semikonduktor dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti

- mengurangi konsentrasi elektro dan lubang;
- menggunakan atom pengotor;
- menggunakan bahan semikonduktor tipe-N dan tipe-P;
- menggunakan bahan semikonduktor yang murni; dan
- menggunakan bahan semikonduktor yang telah diberi atom pengotor.

Dengan menggunakan beberapa metode tersebut, seharusnya rekombinasi pada semikonduktor dapat dikurangi, sehingga di masa mendatang cukup banyak berpengaruh pada karakteristik elektronik dan aplikasi dari semikonduktor itu sendiri.

## RANGKUMAN

- 1) Bahan semikonduktor merupakan salah satu bahan dasar untuk pembuatan komponen-komponen elektronika yang memiliki nilai resistansi jenis berada di antara bahan konduktor dan insulator.
- 2) Salah satu jenis bahan dasar semikonduktor adalah silikon yang memiliki struktur atom terdiri dari elektron sebanyak 14 buah,

proton 14 buah, dan neutron 14 buah dengan berat atom sebesar 28.

- 3) Energi gap atau energi terlarang merupakan energi yang memisahkan antara pita valensi dan pita konduksi dalam atom. Perbedaan nilai energi gap ini akan menentukan perubahan hantaran energi listrik atau muatan listrik dalam bahan tersebut.
- 4) Semikonduktor instrinsik adalah jenis semikonduktor yang dibuat dari bahan murni tanpa adanya campuran dengan bahan dasar lainnya.
- 5) Arus *drift* merupakan peristiwa hantaran listrik pada bahan semikonduktor akibat adanya dua buah partikel bermuatan positif dan negatif yang dipengaruhi oleh adanya medan magnet.
- 6) Semikonduktor ekstrinsik adalah jenis bahan semikonduktor tidak murni atau adanya pencampuran bahan dasar dengan bahan lainnya.
- 7) Rekombinasi semikonduktor menunjukkan proses ketika muatan listrik (akibat adanya electron dan lubang) bertemu dan menetralkan atau saling menghilangkan polaritas satu sama lain yang selanjutnya membentuk muatan netral.

## LATIHAN SOAL

- 1) Jelaskan masing-masing sifat yang dimiliki oleh bahan dasar semikonduktor.
- 2) Bagaimana terjadinya gejala arus drift pada bahan semikonduktor?
- 3) Gambarkan dan jelaskan struktur atom silikon dan germanium sebagai bahan utama semikonduktor.
- 4) Sebuah bahan dasar semikonduktor memiliki energi gap sebesar 1,21 eV pada temperatur ruangan 0 K dengan konsentrasi partikel elektronnya diketahui sebesar  $1,52 \times 10$  elektron/cm<sup>2</sup>. Tentukan nilai konstanta bahan dasar semikonduktor tersebut.
- 5) Melanjutkan soal no. 4, apabila dalam perkembangannya terjadi perubahan temperatur dari 0 K menjadi 300 K, tentukan nilai konstanta bahan tersebut sekarang.

- 6) Sebuah semikonduktor tipe-N pada temperatur ruangan 300 K memiliki variasi nilai konsentrasi pendonorannya mulai dari nilai  $10^{13}$  sampai dengan  $10^{18}$  atom/cm<sup>3</sup>, tentukan pembawa minoritas bahan semikonduktor yang didoping jika diketahui konsentrasi elektronnya sebesar  $1,52 \times 10^{10}$  elektron/cm<sup>3</sup>.
- 7) Jelaskan gejala munculnya arus drift pada susunan bahan semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik.
- 8) Jelaskan mengenai terbentuknya hubungan (junction) P-N pada bahan semikonduktor.
- 9) Sebuah bahan semikonduktor *P-N junction silicon* dengan  $N_D = 10^{14}$  cm<sup>-3</sup> dan  $N_A = 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> dengan  $n_i^2 = 1,04 \times 10^{26}$  cm<sup>-6</sup> pada temperatur 300 K. Tentukan nilai hubungan tegangan P-N pada bahan semikonduktor tersebut.
- 10) Jelaskan perbedaan mendasar tentang energi gap (energi terlarang) dari setiap bahan semikonduktor.
- 11) Jelaskan proses rekombinasi dalam struktur bahan semikonduktor dan dampaknya terhadap kinerja pada suatu sistem elektronika.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic devices and circuit theory* (7<sup>th</sup> ed.). Pearson.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L. (2014). *Electronics fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering principles and applications* (6<sup>th</sup> ed.). Essex: Pearson Education Limited, 862–863.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2016). *Electronic principles* (8<sup>th</sup> ed.). McGrawHill-Education.
- Mehta, V. K., & Mehta, R. (2020). *Principles of electronics* [LPSPE]. S. Chand Publishing.
- Sack, H. (2018). *The birth of the transistor, key component of modern electronics*. Physics.
- Sedra, A. S., & Smith, K.C. (2004). *Microelectronic circuits* (5<sup>th</sup> ed.). Oxford University Press.

# BAB IV

## MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGGUNAKAN KOMPONEN DIODA

### **Materi pembelajaran:**

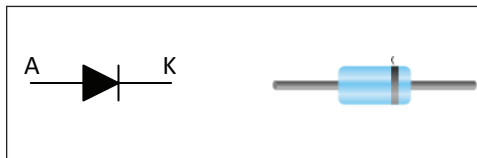
Materi yang dibahas pada bab ini berkaitan dengan pengenalan karakteristik sebuah dioda serta beberapa rangkaian aplikasi diode yang sering ditemui dalam bidang teknologi elektronika. Selain itu, dalam bab ini akan dipelajari tentang penerapan beberapa hukum dan teorema rangkaian untuk menjawab permasalahan yang sering muncul saat mendesain sebuah sistem elektronika.

### **Tujuan pembelajaran:**

- 1) mengenal sifat komponen dioda;
- 2) mampu memahami kinerja komponen dioda beserta cara menerapkannya; dan
- 3) mampu merancang sebuah rangkaian elektronika menggunakan komponen dioda

## A. Pendahuluan

Dioda merupakan sebuah komponen elektronika yang secara luas banyak digunakan dalam perangkat-perangkat elektronika. Dioda termasuk kategori komponen aktif yang kemampuannya dan kelebihan-nya bisa mengubah bentuk dan besaran. Misalnya, dioda mampu mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) melalui rangkaian penyearah (*rectifier*). Kemampuan lain dari dioda adalah dapat melakukan pemutusan dan menghidupkan arus dalam rangkaian atau berfungsi sebagai sebuah sakelar.



**Gambar 4.1** Simbol dan Bentuk Fisik Dioda

Gambar 4.1 menunjukkan kaki dioda terdiri dari anode (+) dan katode (-). Arus yang mengalir dari anode (+) menuju katode (-) dinamakan sebagai arus maju dioda (*forward bias*), sedangkan aliran arus sebaliknya dari katode (-) menuju anode (+) dinamakan arus balik dioda (*reverse bias*). Pada dasarnya tampilan fisik dioda ini dicirikan dengan adanya warna gelang pada badan dioda yang menunjukkan kaki katode. Untuk menggambarkan karakteristik kerja dioda ini, persamaan (4.1) dapat menjelaskan tentang parameter-parameter besaran listrik yang terkandung dalam sebuah komponen dioda.

$$I_d = I_s \left[ e^{\left(\frac{V_d}{nV_T}\right)} - 1 \right] \quad (4.1)$$

dengan

$I_d$  : arus dioda (ampere)

$I_s$  : arus mundur saturasi (ampere)

$V_d$  : tegangan dioda (volt)

$n$  : faktor konstanta dioda (nilainya antara 1 sampai dengan 2)

$V_T$  : tegangan termal dioda

Tegangan termal ( $V_T$ ) besarnya tergantung terhadap perubahan temperatur yang dinyatakan sebesar

$$V_T = \frac{kT}{q}; \quad (4.2)$$

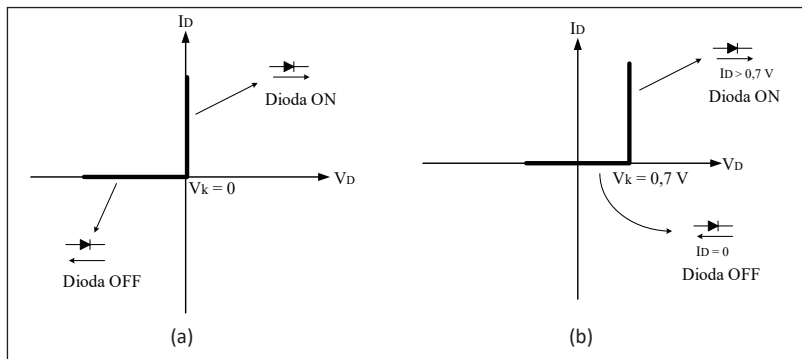
dengan

$k$ : konstanta Boltzmann ( $= 1,38 \times 10^{23}$  J/K)

$q$ : muatan elektron ( $= 1,6 \times 10^{-19}$  coulomb)

$T$ : temperatur (kelvin, K)

Gambar 4.2 merupakan kurva sifat kerja dioda ideal dan tidak ideal. Pada kondisi ideal kenaikan arus maju terjadi secara cepat saat tegangan kaki dioda ( $V_k$ ) bernilai nol (saat ini arus dioda mulai mengalir atau kondisi *on*), sedangkan untuk kondisi arus mundur dioda sama sekali tidak menghantarkan arus (tidak ada arus pada dioda atau kondisi *off*). Sifat kerja dioda ideal seperti ini sama persis layaknya kerja sebuah sakelar sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.3.

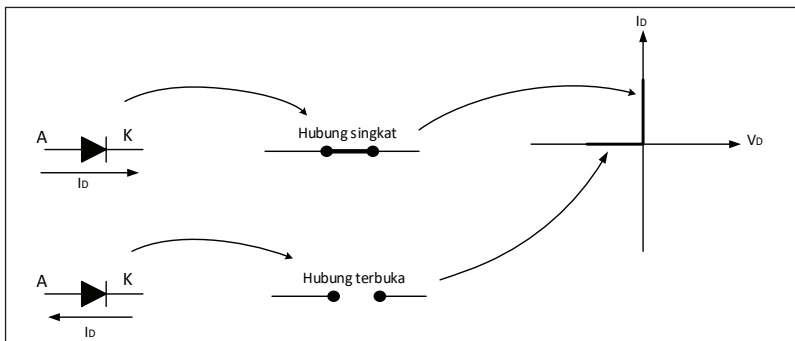


Keterangan: (a) Dioda Ideal, (b) Dioda Tak Ideal

**Gambar 4.2** Kurva Karakteristik Dioda

Mengimplementasikan sebuah rangkaian dioda menggunakan komponen dioda ideal tidak mudah dilakukan karena cukup sulit menemukan dioda jenis ini di pasaran. Namun, model pendekatan

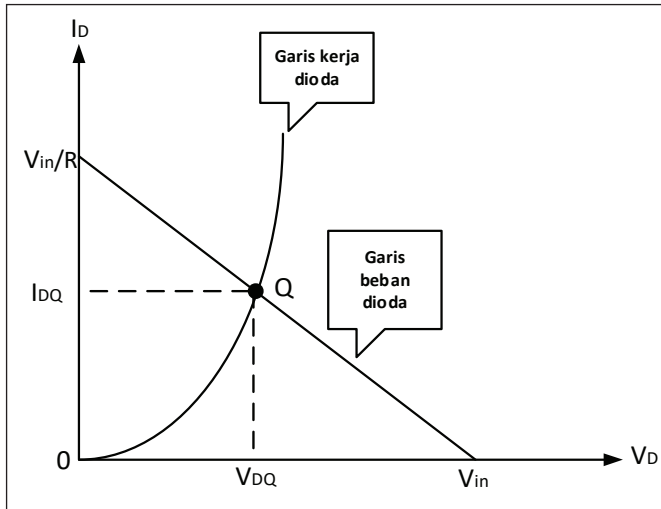
perhitungannya yang memungkinkan bisa dilakukan adalah model pendekatan dioda tak ideal. Salah satu ciri khas dioda tak ideal yaitu komponen ini akan bekerja sesaat setelah melewati tegangan ambang atau tegangan kaki  $V_k$  (*knee voltage*) yang nilainya sesuai dengan jenis bahan penyusunnya, yaitu silikon di tegangan 0,6–0,7 volt dan germanium di kisaran 0,2–0,3 Volt. Dioda akan mulai bekerja menyalurkan arusnya sesaat setelah tegangan kaki lebih besar atau sama dengan 1 volt ( $\geq 1$ ) saat kondisi dioda *on*) dan sebaliknya, dioda tidak akan menyalurkan arusnya saat di bawah tegangan kakinya ( $< V_k$ ) saat kondisi arus dioda *off*.



**Gambar 4.3** Kinerja Dioda Ideal saat Arus Maju dan Mundur

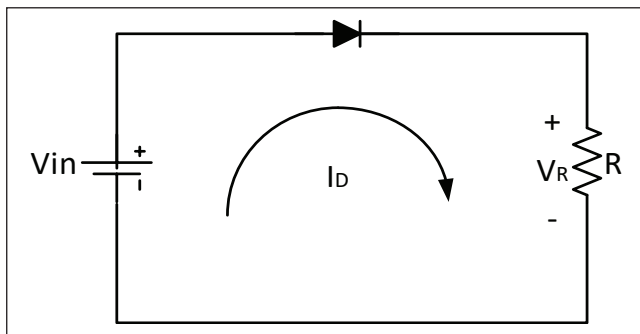
## B. Analisis Garis Beban Dioda

Belajar tentang garis beban dioda berarti memahami kondisi dioda saat diberi beban kerja. Jadi, garis beban kerja dioda menunjukkan garis perubahan kinerja pada saat dioda tersebut diterapkan pada suatu beban rangkaian. Perubahan besarnya garis kinerja dioda ini ditentukan oleh perubahan arus ( $I_D$ ) dan tegangan yang melalui dioda ( $V_D$ ) sesuai kurva kinerja seperti pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4** Kurva Garis Beban Dioda

Titik Q pada kurva garis beban dioda menunjukkan daerah “*quiescent*” yang artinya ‘istirahat’. Pada titik Q ini dioda biasanya bekerja sebagai *penyearah*, dengan operasi kerja berada pada garis bersinggungan antara arus  $I_{DQ}$  dengan tegangan  $V_{DQ}$ . Pada saat dioda bekerja di atas ataupun di bawah titik Q (arus dioda di atas atau di bawah  $I_{DQ}$ ), dioda akan bekerja sebagai sakelar. Cara mudah untuk membuat kurva garis beban seperti Gambar 4.4 adalah dengan membuat rangkaian dioda sederhana seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Skema Rangkaian Serial Dioda Sederhana

Untuk memperoleh hubungan arus  $I_D$  dengan tegangan  $V_D$  sesuai kurva beban di atas, dengan menggunakan hukum tegangan Kirchoff (*Kirchoff's voltage law*) dari Gambar 4.5 dapat ditentukan arus dan tegangan dioda sebesar

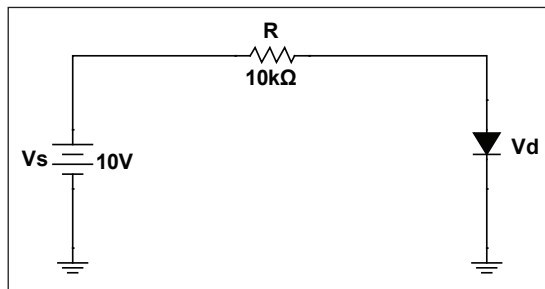
$$I_D = \frac{V_{in} - V_D}{R} \quad (4.3)$$

Selanjutnya dengan menerapkan suatu model persamaan garis lurus sederhana pada persamaan (4.3), secara mudah arus dan tegangan rangkaian dapat diperoleh. Pada Contoh (4.1) secara mudah dapat kita pahami tahapan proses dalam menentukan parameter kurva garis beban dioda.

#### Contoh 4.1

Sebuah rangkaian seri dioda seperti yang ditunjukkan Gambar 4.6. Buatlah kurva karakteristik dioda saat arus maju dan garis beban dioda menggunakan *script* program Matlab.

Penyelesaian



Gambar 4.6 Rangkaian Serial Satu Dioda

Dengan menggunakan pendekatan persamaan (4.1) dan (4.2), dapat dibuat *source code* program Matlab-nya sebagai berikut.

```
%% persamaan eksponensial dioda %%
k = 1.38e-23;
q = 1.6e-19;
T = 273 + 25;
VT = k*T/q;
```

```

Vd = 0.25:0.05:1.1;
Id = 1.0e-12*exp(Vd/(2.0*VT));
%% garis beban dioda %%
Vs = 10;
R = 1.0e4;
v2 = 0:2:10;
i2 = (Vs - v2)/R;
% memplot kurva karakteristik dioda saat arus maju %
plot(v1,i1,'b', v2,i2,'b')
axis([0,2, 0, 0.0015])
title('arus maju dioda vs garis beban kerja dioda')
xlabel('Tegangan dioda, (Volt)')
ylabel('Arus dioda, (Ampere)')
text(0.4,1.05e-3,'Garis beban dioda')
text(1.08,0.3e-3,'Kurva arus maju dioda')

```

Hasil simulasi Matlab-nya ditunjukkan pada Gambar 4.7.



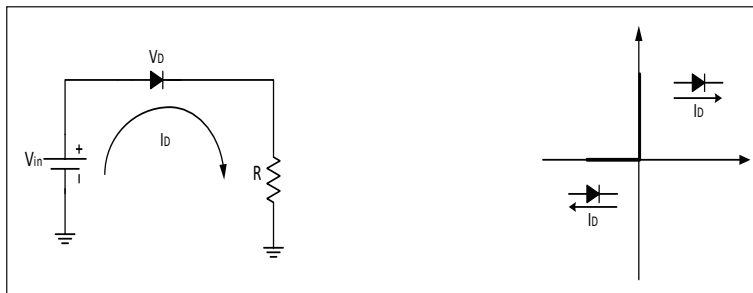
**Gambar 4.7** Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 4.1

### C. Model Pendekatan Dioda

Model pendekatan dioda merupakan salah satu cara untuk mempermudah dalam menganalisis rangkaian dioda sehingga secara cepat dan akurat dapat diperoleh nilai-nilai arus dan tegangan dioda. Ada tiga model pendekatan yang biasa digunakan untuk menganalisis rangkaian dioda, yaitu *pendekatan dioda ideal*, *pendekatan dioda tak ideal*, dan *pendekatan hibrida*.

#### 1. Pendekatan Dioda Ideal

Model pendekatan ini adalah model paling sederhana dan sangat mudah dalam perhitungannya karena diasumsikan tegangan ambang dioda dianggap berharga nol ( $V_k = 0$ ). Jadi, arus yang mengalir dalam rangkaian ini hanya tergantung pada tegangan sumber dan resistansi beban  $R_L$ . Adapun rangkaian dan kurva kinerja untuk pendekatan ini ditunjukkan seperti Gambar 4.8.



Keterangan: (a) Skema Rangkaian dan (b) Kurva Karakteristik Dioda Ideal

**Gambar 4.8** Model Pendekatan Dioda Ideal

Sesuai Gambar 4.8, dengan mengasumsikan nilai tegangan ambang dioda bernilai ( $V_D = 0\text{ V}$ ), persamaan (4.2) sekarang dapat dinyatakan sebagai

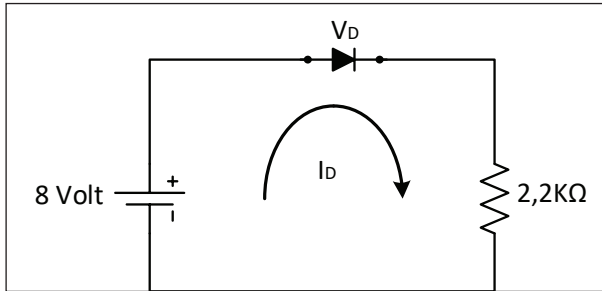
$$I_D = \frac{V_{in}}{R_L} \quad (4.4)$$

Arus dioda  $I_D$  dari persamaan (4.4) ini diperoleh saat dioda diasumsikan memiliki tegangan kaki atau tegangan ambang bernilai nol (kondisi dioda dianggap ideal).

### Contoh 4.2

Sebuah rangkaian seri dioda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Dengan menggunakan pendekatan dioda ideal, tentukan

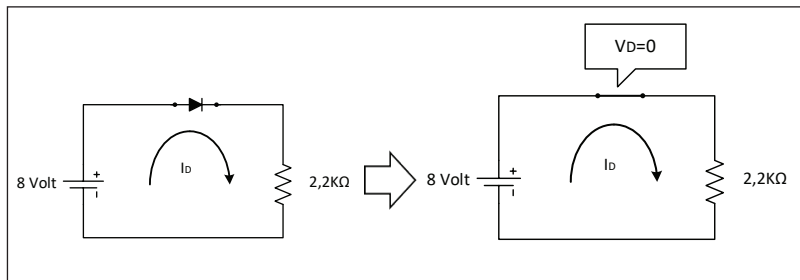
- arus rangkaian dan
- kurva karakteristik saat arus maju.



Gambar 4.9 Rangkaian Serial Dioda Ideal

### Penyelesaian

- Langkah pertama, gunakan persamaan (4.2) untuk menentukan arus rangkaiannya dengan memetakan dahulu rangkaian pada Gambar 4.9 menjadi seperti Gambar 4.10.

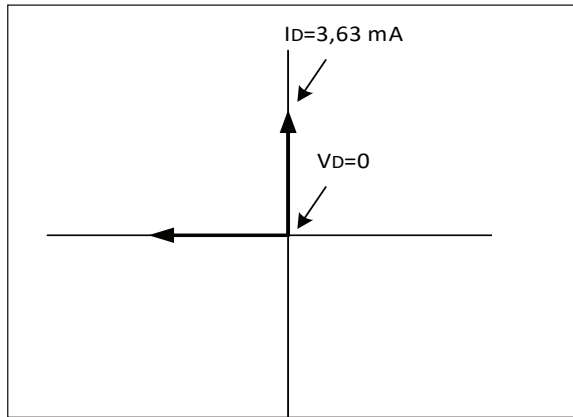


Gambar 4.10 Perhitungan Rangkaian Serial Dioda Model Ideal

Dari gambar, terlihat tegangan ambang  $V_k = V_D = 0$  maka arus dioda akan sebanding dengan arus beban rangkaian, yaitu sebesar

$$I_D = I_R = \frac{8V - 0V}{2,2K} = 3,63 \text{ mA.}$$

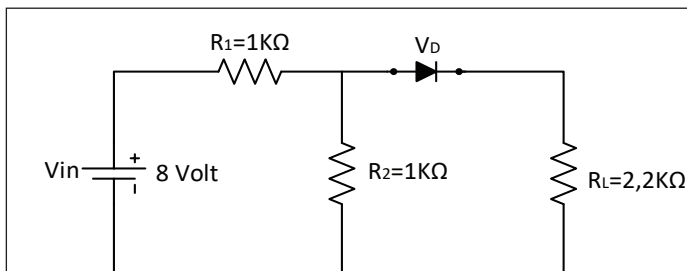
- b) Dari hasil arus ini dapat digambarkan sketsa kurva karakteristik kinerja dioda sebagai berikut (Gambar 4.11).



**Gambar 4.11** Kurva Karakteristik Rangkaian Dioda Ideal

### Contoh 4.3

Sebuah rangkaian dioda ideal yang tersusun paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12. Tentukan arus rangkaian dan gambarkan kurva karakteristik kerja dioda.



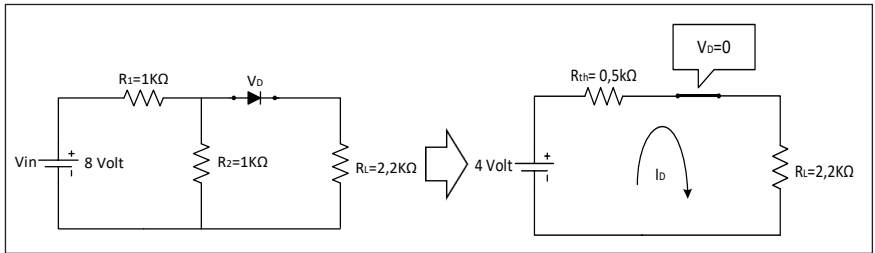
**Gambar 4.12** Rangkaian Paralel Dioda Model Ideal

## Penyelesaian

Langkah awal untuk menentukan arus rangkaian adalah menyederhanakan rangkaian Gambar 4.12 di atas menggunakan pendekatan teorema Thevenin. Oleh karena itu, secara mudah kita dapat menentukan arus rangkaian melalui tahapan-tahapan sebagai berikut.

$$V_{th} = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 1k\Omega} \times 8 \text{ Volt} = 4 \text{ V},$$

$$R_{th} = \frac{1k\Omega \times 1k\Omega}{1k\Omega + 1k\Omega} = 0,5 \text{ k}\Omega.$$

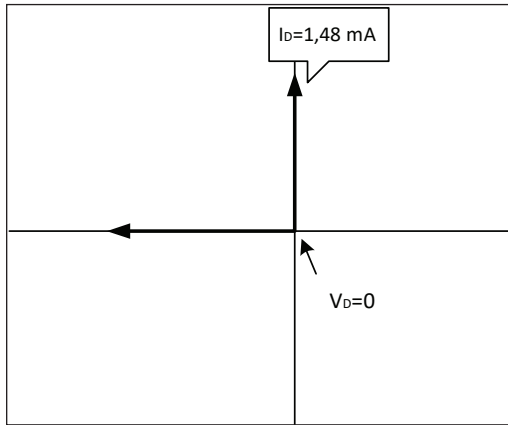


**Gambar 4.13** Perhitungan Rangkaian Paralel Dioda Model Ideal

Jadi, arus dioda dalam rangkaian diperoleh sebesar

$$I_D = \frac{4 \text{ V} - 0 \text{ V}}{0,5 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = 1,48 \text{ mA}.$$

Hasil kurva karakteristik kerja dioda dinyatakan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.14.

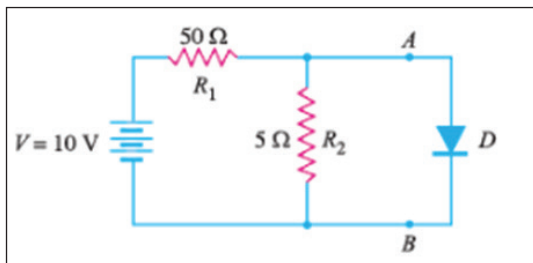


**Gambar 4.14** Hasil Kurva Karakteristik Dioda Ideal  
Contoh Soal 4.3

Nilai arus yang diperoleh seperti pada Contoh 4.2 dan Contoh 4.3 sangat tidak memungkinkan untuk diperoleh karena cukup sulit untuk mendapatkan nilai arus ideal tersebut. Sebenarnya bagi seorang pemula alangkah baiknya dalam mewujudkan sebuah rangkaian dioda sebaiknya menggunakan model pendekatan dioda ideal ini terlebih dahulu sebagai bahan rujukan agar lebih memudahkan dalam proses menganalisis.

#### Contoh 4.4

Tentukan arus yang mengalir melalui dioda seperti Gambar 4.15 jika diasumsikan dioda yang dipasang adalah ideal.



**Gambar 4.15** Rangkaian dengan Beban Dioda Ideal

### Penyelesaian

Untuk mempermudah perhitungannya, kita gunakan teorema Thevenin dalam menyelesaikan soal ini.

Langkah pertama, kita cari tegangan thevenin-nya dengan melihat dari terminal A-B sebesar

$$V_{Th} = \frac{5 \, \Omega}{50 \, \Omega + 5 \, \Omega} \times 10 \, V = 0,909 \, V.$$

Selanjutnya, dicari nilai resistansi thevenin-nya,

$$R_{Th} = \frac{50 \, \Omega \times 5 \, \Omega}{50 \, \Omega + 5 \, \Omega} = 4,55 \, \Omega$$

sehingga arus yang melalui dioda ideal ini diperoleh sebesar

$$I = \frac{0,909 \, V}{4,55 \, \Omega} = 200 \, \text{mA}.$$

Sebaliknya, apabila kita berikan sebuah komponen tidak ideal, arus yang diperoleh akan menjadi lebih kecil lagi.

### 2. Pendekatan Dioda Tak Ideal

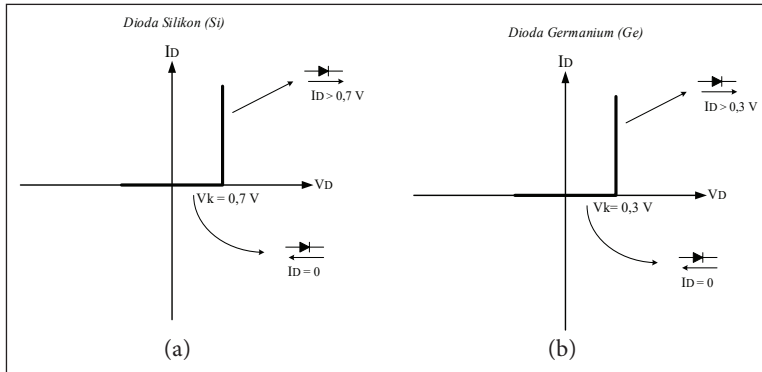
Perbedaan model pendekatan ini dengan pendekatan ideal adalah ditambahkan sebuah tegangan ambang (*barrier voltages*) saat menganalisis rangkaian yang disesuaikan dengan bahan penyusunnya seperti yang ditunjukkan Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Nilai Tegangan Ambang  $V_k$  (*knee*) Komponen Dioda

Bahan Penyusun	Tegangan ambang [V <sub>k</sub> ]	Kondisi Dioda
Germanium	0,2 V – 0,3 V	$> V_D, \text{dioda ON}; < V_D, \text{dioda OFF}$
Silikon	0,6 – 0,7 V	$> V_D, \text{dioda ON}; < V_D, \text{dioda OFF}$

Sumber: Malvino (2015)

Persamaan (4.1) dapat digunakan untuk mencari arus rangkaian dioda melalui pendekatan ini. Hanya saja, tegangan ambang dioda  $V_k$  akan berubah sesuai jenis bahan dasar dioda yang digunakan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.16.



Keterangan: (a) Silikon dan (b) Germanium

**Gambar 4.16** Kurva Karakteristik Dioda Ideal

### Contoh 4.5

Berdasarkan soal pada Contoh 4.2 sebelumnya, tentukan arus dioda rangkaian dengan menggunakan pendekatan dioda tak ideal untuk dioda berbahan dasar silikon.

#### Penyelesaian

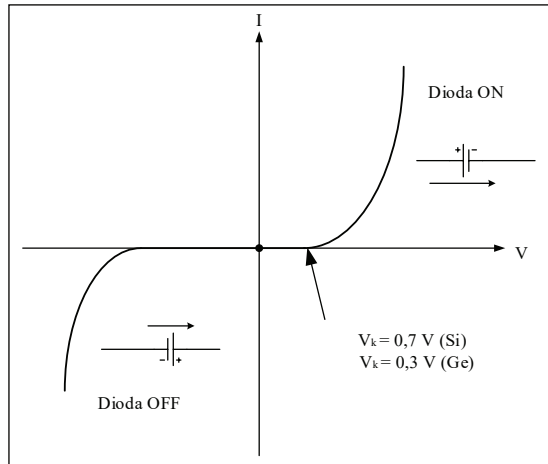
Langkah 1:

Dengan mengasumsikan nilai tegangan kaki (ambang) dioda silikon sebesar  $V_k = 0,7 \text{ V}$ , diperoleh arus diode sebesar

Langkah 2:

$$I_D = I_R = \frac{8 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{2,2 \text{ K}} = 3,31 \text{ mA.}$$

Hasil dari langkah pertama tersebut dapat dibuat kurva karakteristik kerja dioda, seperti pada Gambar 4.17.

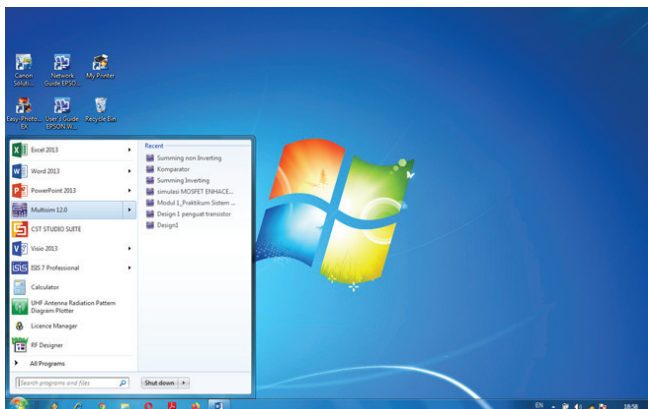


**Gambar 4.17** Hasil Kurva Karakteristik Dioda Tak Ideal Contoh Soal 4.5

Keberadaan tegangan kaki (ambang) dioda  $V_k$  cukup memengaruhi arus rangkaian, yaitu menjadi lebih kecil dibandingkan hasil yang diperoleh dari pendekatan dioda ideal.

Langkah simulasi menggunakan software *aplikasi* MULTISIM untuk menjawab soal pada Contoh 4.5.

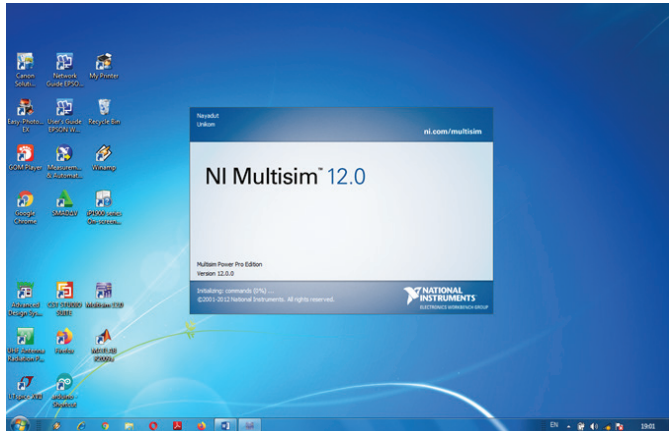
- 1) Membuka dan menampilkan program aplikasi *software* simulasi *Multisim* (Gambar 4.18)



**Gambar 4.18** Memulai Menjalankan Program Simulasi Multisim

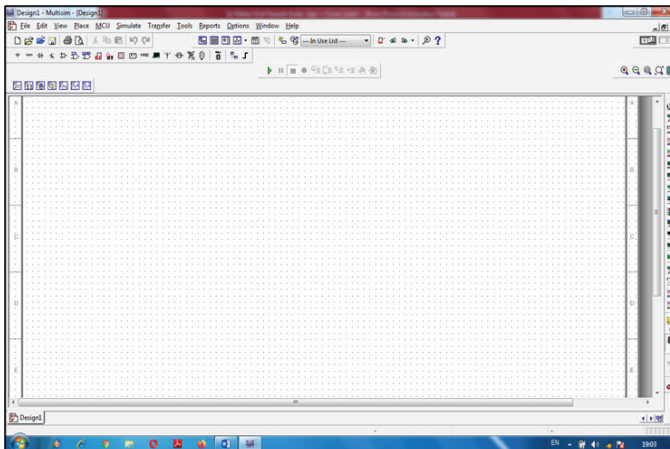
Buku ini tidak diperjualbelikan.

- 2) Setelah diklik ikon Multisim, muncul menu Gambar (4.19).



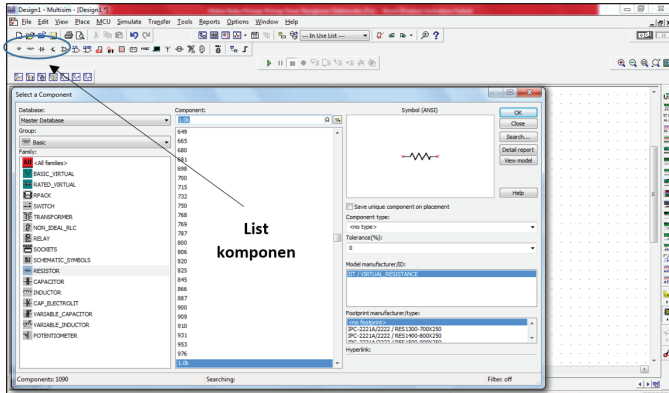
**Gambar 4.19** Tampilan Program Multisim

- 3) Selanjutnya akan muncul di *toolbar* lembar kerja simulasi seperti Gambar 4.20.



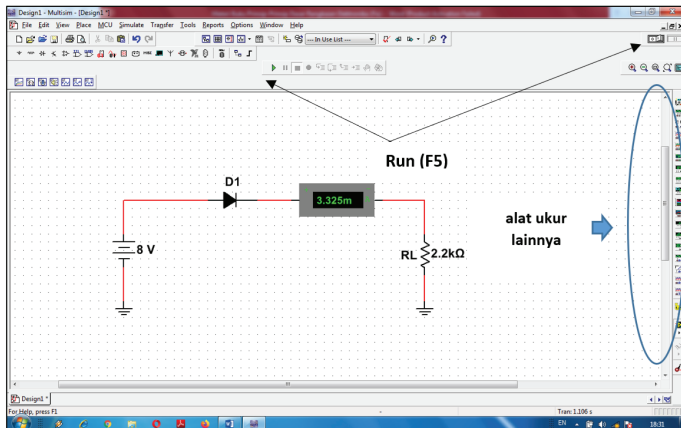
**Gambar 4.20** Lembar Kerja Simulasi Multisim

- 4) Memilih jenis komponen yang akan dipakai dengan mengklik menu “File”→ “New” dan klik menu pilihan komponen yang tersedia pada *toolbar*: “Select a Component”.



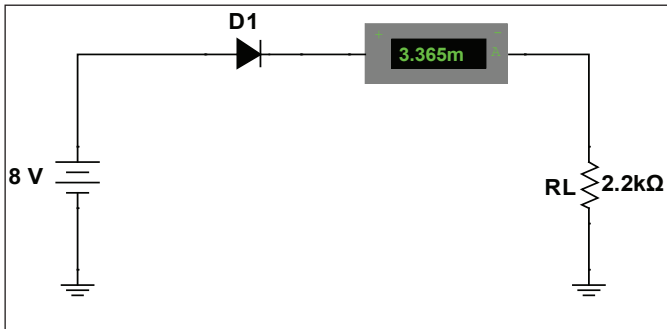
**Gambar 4.21** Menu Tampilan Komponen pada Multisim

- 5) Pilih menu alat ukur di bagian samping kanan, kemudian pilih salah satu alat ukur dengan cara mengeklik sesuai yang ditunjukkan Gambar 4.22. Klik menu “Run” (F5) untuk menjalankan hasil simulasi.



**Gambar 4.22** Proses Menjalankan Rangkaian Hasil Simulasi pada Multisim

- 6) Klik ikon multimeter di sisi kanan, kemudian ukur nilai arus rangkaiannya, tetapi terlebih dahulu klik “Run” (F5). Bandingkan hasilnya dengan hasil perhitungan sebelumnya.



**Gambar 4.23** Rangkaian Hasil Simulasi Multisim

#### Contoh 4.6

Dengan kembali melihat soal pada Contoh 4.4 sebelumnya, bagaimana menentukan arus dioda silikonnya?

#### Penyelesaian

Langkah ke-1, kita cari tegangan thevenin-nya dengan melihat pada terminal A-B, yaitu sebesar

$$V_{Th} = \frac{5 \Omega}{50 \Omega + 5 \Omega} \times 10 \text{ V} = 0,90 \text{ V}.$$

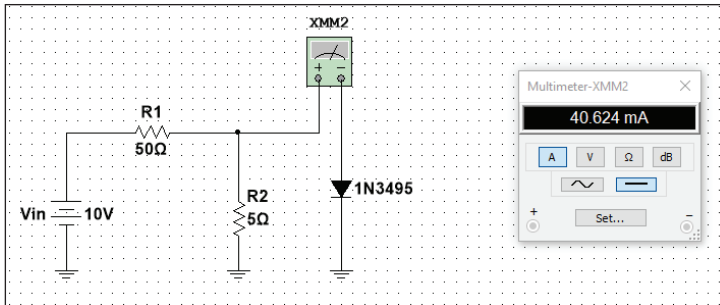
Kemudian kita cari resistansi thevenin-nya:

$$R_{Th} = \frac{50 \Omega \times 5 \Omega}{50 \Omega + 5 \Omega} = 4,55 \Omega.$$

Langkah ke-2, kita tentukan arus dioda ideal ini sebesar

$$I = \frac{0,909 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{4,55 \Omega} = 0,04 \text{ A} \approx 40 \text{ mA}.$$

Hasil perhitungan ini selanjutnya kita perbandingkan dengan hasil simulasinya maka didapatkan nilai arus yang sama.

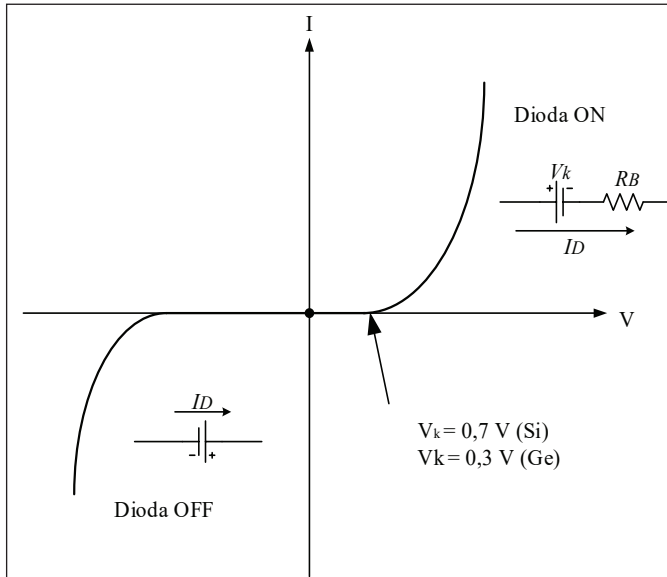


**Gambar 4.24** Hasil Simulasi Rangkaian Dioda Contoh Soal 4.6

Dapat kita lihat bahwa hasil perbandingan antara perhitungan dan simulasi menunjukkan kedekatan nilai arus rangkaian dioda yang diperoleh, yaitu  $\pm 40 \text{ mA}$ .

### 3. Pendekatan Hibrida

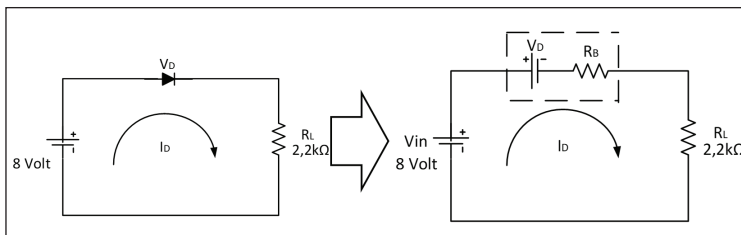
Pendekatan ketiga ini merupakan model kombinasi antara pendekatan dioda ideal dan pendekatan dioda tak ideal. Terdapat sedikit perbedaan dibandingkan dengan pendekatan sebelumnya, yaitu saat menganalisis rangkaian perlu ditambahkan sebuah resistansi internal dioda yang dinamakan resistansi *bulk* pada pendekatan ini. Nilai resistansi *bulk* ini besarnya selalu berubah-ubah tergantung pada perubahan beban rangkaian. Resistansi *bulk* saat mengalir arus maju bernilai kecil dibandingkan dengan daerah arus mundur sehingga untuk mendapatkan arus maupun tegangan rangkaian dibutuhkan pengaturan jenis resistansi internal ini. Ada dua jenis resistansi internal dioda, yaitu *resistansi statis* dan *resistansi dinamik*. Resistansi statis berhubungan dengan rangkaian dioda yang sumber tegangannya searah (DC), sedangkan resistansi dinamik sumber tegangannya bolak-balik (AC). Bentuk rangkaian pengganti resistansi ini beserta kurva karakteristik pendekatannya ditunjukkan pada Gambar 4.25.



**Gambar 4.25** Rangkaian Pengganti Resistansi *Bulk* dan Kurva Karakteristiknya

#### Contoh 4.7

Tentukan arus rangkaian dioda silikon menggunakan pendekatan ke-3 dengan mengasumsikan nilai tahanan *bulk* saat dioda diberikan arus maju sebesar  $23 \Omega$ .



**Gambar 4.26** Rangkaian Dioda menggunakan Pendekatan Ke-3

## Penyelesaian

- 1) Berdasarkan Gambar 4.18.b, kita bisa menerapkan hukum tegangan Kirchoff untuk memperoleh arus dioda melalui uraian persamaan berikut.

$$V_{in} - V_D - I_D R_B - I_D R_L = 0,$$

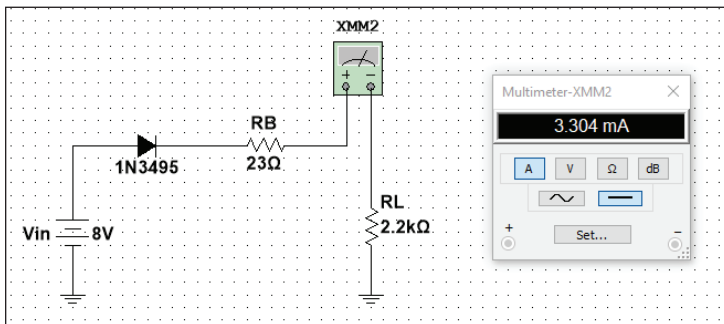
$$V_{in} - V_D - I_D (R_B + R_L) = 0$$

$$= \frac{V_{in} - V_D}{(R_L + R_B)}. \quad (4.5)$$

- 2) Dengan menggunakan persamaan (4.5), dapat diperoleh arus rangkaian jika kita asumsikan tahanan *bulk* ini bernilai  $23 \Omega$ , yaitu sebesar

$$I_D = I_R = \frac{8 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{(2,2 \text{ K} + 23 \Omega)} = 3,2 \text{ mA}.$$

Hasil simulasi dari contoh soal ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.27.



**Gambar 4.27** Hasil Simulasi Rangkaian Dioda Contoh Soal 4.7

Dapat kita lihat hasil perbandingan antara perhitungan dan simulasi menunjukkan kedekatan nilai arus rangkaian dioda yang diperoleh, yaitu  $\pm 3,3 \text{ mA}$ .

## D. Aplikasi Rangkaian Dioda

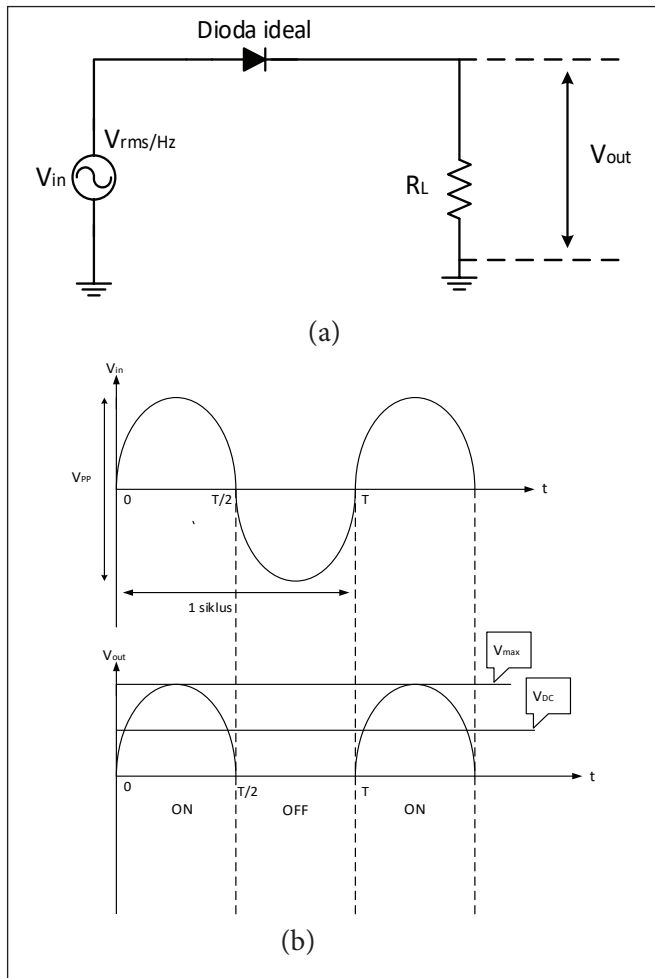
Dioda termasuk kategori komponen aktif karena jenis komponen ini memiliki kemampuan dalam mengubah sifat dan bentuk besaran listrik. Misalnya, dioda mampu menyearahkan sinyal AC menjadi DC yang biasanya kita lakukan saat membuat *power supply* atau adaptor. Inilah salah satu kelebihan dioda selain fungsi lainnya, seperti dapat dibuat sakelar dan sebagai sistem pengaman.

Rangkaian penyearah (*rectifier*) merupakan sebuah rangkaian yang berfungsi untuk mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Secara umum, ada dua jenis penyearah dioda, yaitu penyearah setengah gelombang (*half wave rectifier*) dan penyearah gelombang penuh (*full wave rectifier*).

### 1. Penyearah Setengah Gelombang

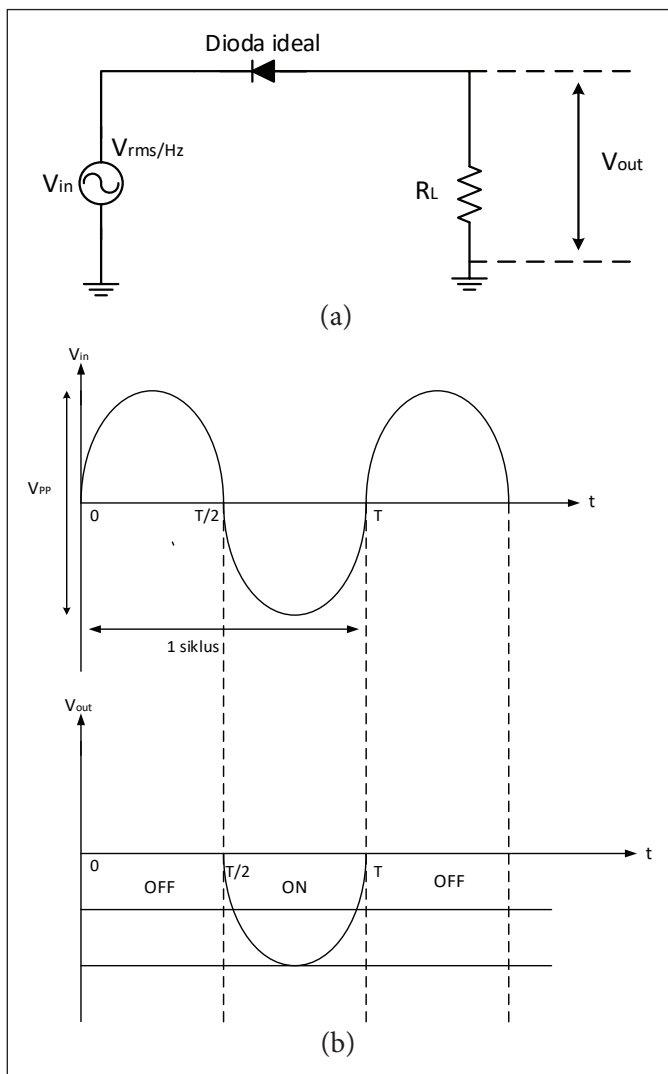
Rangkaian penyearah sederhana yang tersusun hanya terdiri dari satu dioda serial dengan sebuah beban resistansi seperti terlihat pada Gambar 4.28. Bagi seorang pemula sangat memudahkan untuk mulai belajar merancang rangkaian penyearah model ini yang nantinya akan menjadi sistem perangkat elektronika siap pakai.

Rangkaian pada Gambar 4.28a dapat diterapkan juga bagi sistem penyearahan dalam siklus positif (saat dioda bekerja pada arus maju). Sementara itu, untuk kondisi dioda yang dipasang secara terbalik seperti Gambar 4.29a akan menghasilkan bentuk gelombang keluaran dalam siklus negatif seperti yang terlihat pada Gambar 4.29.b.



Keterangan: (a) Penyearah Setengah Gelombang Arus Maju; (b) Gelombang Input dan Output Penyearah

**Gambar 4.28** Jenis Rangkaian Penyearah Dioda



Keterangan: (a) Penyearah Setengah Gelombang (Arus Balik) dan (b) Gelombang Input dan Output

**Gambar 4.29** Jenis Rangkaian Penyearah Arus Balik

Dari Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 dapat dijelaskan beberapa hal penting, di antaranya

- 1) Pada Gambar 4.28.b selama siklus waktu  $0 \rightarrow \frac{T}{2}$ , dioda *on*, artinya dioda pada saat ini berada pada arus maju sehingga di bagian sisi keluaran akan menghasilkan tegangan keluaran maksimum dan rata-rata (tegangan DC). Sementara itu, selama siklus waktu  $\frac{T}{2} \rightarrow T$ , keadaan dioda “*off*” artinya dioda pada saat ini berada pada arus balik sehingga di bagian sisi keluaran tidak menghasilkan besaran apa pun.
- 2) Pada Gambar 4.28.b juga selama siklus waktu  $0 \rightarrow \frac{T}{2}$ , keadaan dioda *off*, artinya dioda pada saat ini berada pada arus maju sehingga pada sisi keluaran tidak menghasilkan tegangan keluaran maksimum ataupun rata-rata. Sementara itu, selama siklus waktu  $\frac{T}{2} \rightarrow T$ , dioda *on*, artinya dioda pada saat ini berada pada arus balik sehingga pada sisi keluaran menghasilkan tegangan maksimum dan rata-rata (tegangan DC).

Secara sederhana arus rangkaian dioda pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 ini dapat dinyatakan sebesar

$$i_d = \frac{v_{in} - v_d}{R} \quad (4.6)$$

Selama dioda dalam kondisi *on*, tegangan maksimum  $V_{mak}$  dan tegangan rata-rata  $V_{DC}$  akan muncul pada bagian keluaran rangkaian penyearah sebesar

$$V_{mak} = \frac{V_{rms}}{0,707}; \quad (4.7)$$

$$V_{DC} = \frac{V_{mak}}{\pi} = 0,318 \times V_{mak} \quad (4.8)$$

Nilai tegangan maksimum rangkaian penyearah dioda ideal seperti yang diperlihatkan Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 memperlihatkan hasil yang sama dengan tegangan masukan dan tegangan keluarannya sesuai yang ditunjukkan oleh persamaan (4.9).

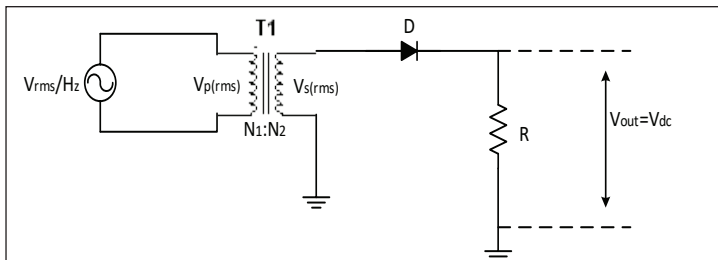
$$V_{mak(out)} = V_{mak(input)}, \quad (4.9)$$

sedangkan frekuensi keluarannya akan bernilai sama dengan frekuensi masukannya, yaitu

$$f_{out} = f_{in}. \quad (4.10)$$

Pada masukan rangkaian dapat diterapkan sebuah transformator bersamaan dengan dioda penyearah dengan tujuan untuk menjaga agar selalu bekerja dengan baik tanpa dikhawatirkan muncul kerusakan akibat tegangan jala-jala berlebih sehingga diharapkan mampu menghasilkan tegangan DC sesuai kebutuhan beban sistem selanjutnya. Kemampuan transformator ini dapat mengurangi tegangan jala-jala dan mengamankan rangkaian penyearah dari munculnya tegangan lebih jala-jala listrik.

Adapun skema rangkaian penyearah setengah gelombang dengan transformator sendiri ditunjukkan pada Gambar 4.30.



**Gambar 4.30** Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang

Secara perhitungan dan analisis, jenis penyearah dengan melibatkan transformator ini ada perbedaan dengan pendekatan sebelumnya. Dalam proses perhitungannya, jumlah lilitan sisi primer dan sekunder transformator perlu dilibatkan karena cukup memberikan dampak besar terhadap perubahan arus dan tegangan keluaran rangkaian.

Berikut dijelaskan tahapan proses perhitungan tentang pentingnya jumlah lilitan transformator dalam perhitungan pada pendekatan ini.

- 1) Menentukan terlebih dahulu tegangan efektif ( $V_{rms}$ ) di bagian transformator sekunder menggunakan persamaan (4.11).

$$V_{s(rms)} = \frac{N_2}{N_1} \times V_{p(rms)} \quad (4.11)$$

dengan  $V_{s(rms)}$  menunjukkan tegangan efektif sekunder,  $V_{p(rms)}$  berhubungan dengan tegangan efektif primer, sedangkan  $N_1$  dan  $N_2$  menunjukkan masing-masing jumlah lilitan primer dan sekunder transformator.

- 2) Dengan menggunakan persamaan (4.12) dapat diperoleh tegangan maksimum sekunder sebesar

$$V_{s(mak)} = \frac{V_{s(rms)}}{0,707} \quad (4.12)$$

- 3) Kita dapat memperoleh tegangan rata-rata (DC) rangkaian penyearah setengah gelombang ini sebesar

$$V_{dc} = \frac{V_{s(mak)}}{\pi} = 0,318 \times V_{s(mak)} \quad (4.13)$$

#### Contoh 4.8

Tentukan tegangan rata-rata (DC) dari rangkaian penyearah setengah gelombang sesuai rangkaian pada Gambar 4.30 jika diketahui resistansi beban sebesar  $1 \text{ k}\Omega$  dengan perbandingan jumlah lilitan sebesar 10:1.

#### Penyelesaian

Kita tentukan dahulu tegangan efektif di bagian sekunder transformatornya sebesar

$$V_{s(rms)} = \frac{1}{10} \times 220 \text{ V} = 22 \text{ V.}$$

Selanjutnya, kita hitung juga tegangan maksimum di bagian sekunder transformatornya sebesar

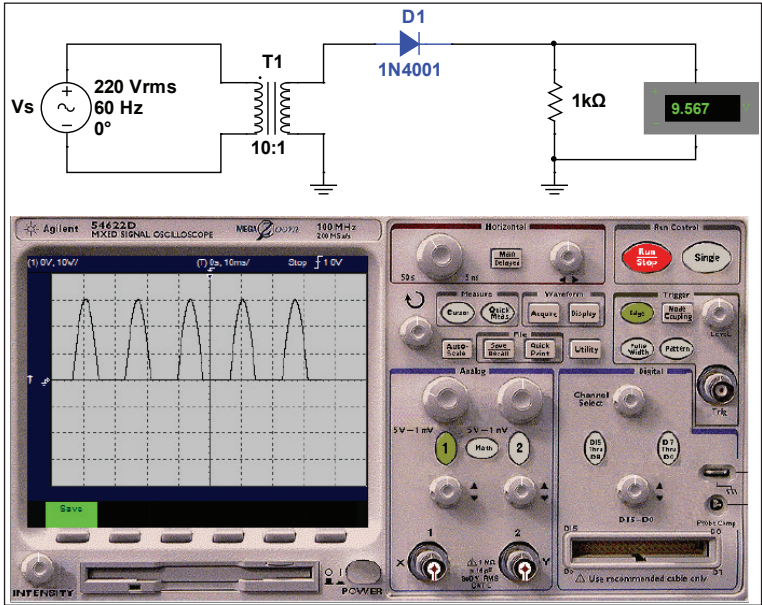
$$V_{s(mak)} = \frac{22 \text{ V}}{0,707} = 31,11 \text{ V}$$

sehingga tegangan rata-rata (DC) pada beban rangkaian diperoleh sebesar

$$V_{dc} = \frac{31,11 \text{ V}}{\pi} = 9,91 \text{ V}.$$

Contoh 4.9

Dengan menggunakan rangkaian yang sama seperti pada Contoh 4.8, dengan pendekatan simulasi dapat dihasilkan tegangan maksimum dan tegangan rata-rata, yaitu sebagai berikut (Gambar 4.31).



Gambar 4.31 Hasil Simulasi Penyearah Setengah Gelombang

Hasil perhitungan dan simulasi ini dapat dibandingkan hasilnya seperti terlihat pada tabel berikut.

Tegangan yang diamati	Perhitungan	Simulasi
Tegangan Maksimum	31,11 V	30,33 V
Tegangan Rata-rata	9,91 V	9,56 V

Sumber: Malvino (2015)

Apabila kita asumsikan dioda ideal dari rangkaian dioda sesuai Gambar 4.31 digantikan dengan dioda berbahan dasar silikon, akibatnya persamaan (4.12) sebelumnya akan menjadi persamaan (4.14) karena sekarang kita memasukkan tegangan ambang dioda sebesar 0,7 V sehingga

$$V_{dc} = \frac{V_{s(max)}}{\pi} = 0,318 \times (V_{s(max)} - 0,7 \text{ V}). \quad (4.14)$$

Kembali kita melihat lagi penyelesaian soal pada Contoh 4.8 sebelumnya. Apabila dioda idealnya kita gantikan dengan dioda berbahan silikon, tegangan DC sekarang adalah sebesar

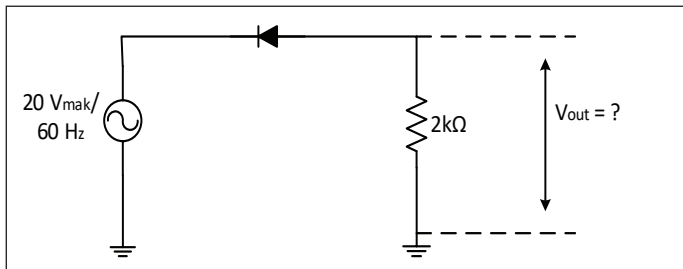
$$V_{dc} = 0,318 \times (31,11 - 0,7) = 9,67 \text{ V}. \quad (4.15)$$

Hasil ini memperlihatkan tegangan DC setelah digantikan dioda berbahan silikon akan turun sedikit akibat pengaruh adanya tegangan ambang ini.

#### Contoh 4.10a

Berdasarkan rangkaian penyearah seperti yang diperlihatkan Gambar 4.32, tentukan

- $V_{out}$  dan  $V_{dc}$  dengan mengasumsikan dioda yang terpasang adalah dioda ideal.
- $V_{out}$  dan  $V_{dc}$  dengan mengasumsikan dioda yang terpasang adalah dioda silikon dan germanium.



**Gambar 4.32** Rangkaian Penyearah *Reverse* Dioda

## Penyelesaian

Mengingat kembali persamaan (4.6) sebelumnya, tegangan  $V_{dc}$  dapat dihitung, tetapi dimungkinkan tegangan yang akan dihasilkan nantinya bisa bernilai negatif karena posisi dioda sendiri terpasang secara terbalik:

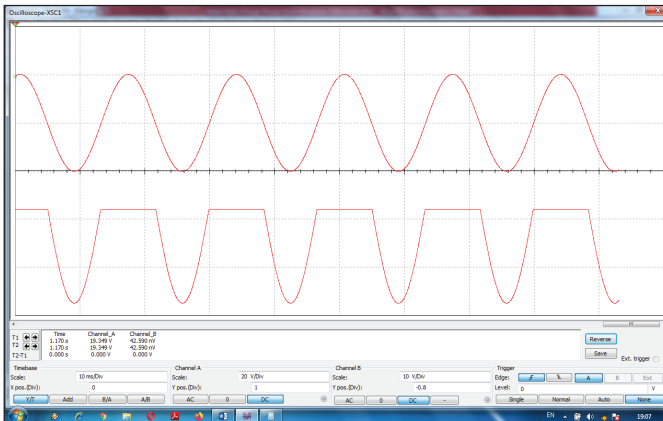
$$V_{dc} = -0,318 \times V_{mak} = -0,318 \times 20V = -6,36 V.$$

Jika dioda masing-masing digantikan dengan dioda silikon dan germanium, persamaan (4.12) dapat dijadikan solusi untuk memperoleh  $V_{dc}$ .

$$V_{dc} = -0,318 \times (20 V - 0,7V) = -6,14 V \text{ (dioda silikon), dan}$$

$$V_{dc} = -0,318 \times (20 V - 0,3V) = -6,26 V \text{ (dioda germanium).}$$

Hasil simulasinya ditunjukkan sebagai berikut (Gambar 4.33).

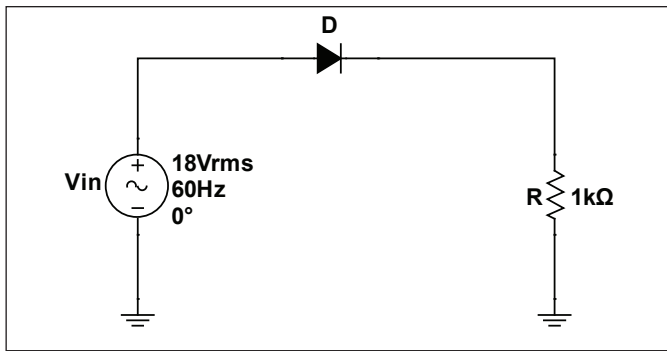


**Gambar 4.33** Hasil Simulasi Multisim Penyearah *Reverse* Dioda Setengah Gelombang

Tanda (-) menunjukkan bahwa arus mengalir secara terbalik (*reverse bias*). Terjadi penurunan dengan selisih  $V_{dc}$  sebesar 0,22 V jika kita perbandingan hasil antara penyearah dioda ideal dan dioda silikon. Penurunan ini diakibatkan oleh adanya tegangan kaki dioda silikon.

#### Contoh 4.10b

Buatlah sebuah program *source code* Matlab untuk menentukan arus rangkaian dioda yang ditunjukkan pada Gambar 4.34 dengan asumsi tegangan pada dioda sebesar 0,7 V.



Gambar 4.34 Rangkaian Penyearah Dioda Setengah Gelombang

#### Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan (4.6) kita dapatkan sebuah *script source code* Matlab-nya sebagai berikut. Adapun hasil simulasinya ditunjukkan pada Gambar 4.35.

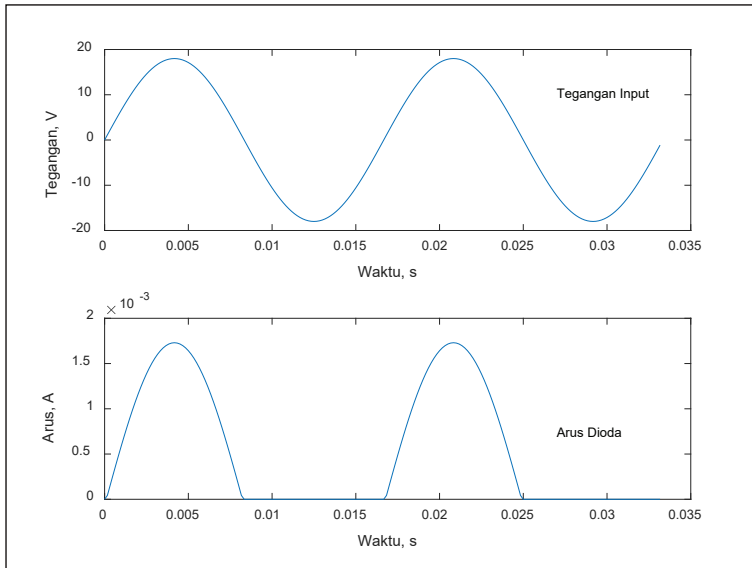
```
period1 = 1/60;
period2 = period1*2;
inc = period1/100;
npts = period2/inc;
vd = 0.7;
```

```

r = 10.0e3;
t = [];
for i = 1:npts
t(i) = (i-1)*inc;
vin(i) = 18*sin(120*pi*t(i));
if vin(i) > vd
idiode(i) = (vin(i) -vd)/r;
else
idiode(i) = 0;
end
end
subplot(211), plot(t,vin)
%title('Input Voltage')
xlabel('Waktu, s')
ylabel('Tegangan, V')
text(0.027,10, 'Tegangan Input')
subplot(212), plot(t,idiode)
%title('Arus Dioda')
xlabel('Waktu, s')
ylabel('Arus, A')
text(0.027, 0.7e-3, 'Arus Dioda')
% Sudut hantar %
theta1 = asin(vd/18); theta2 = pi - theta1;
sudut_hantar = (theta2 -theta1)/(2*pi);
% Arus maksimum %
Arus_maks = (18*sin(pi/2) - vd)/r;
% arus maksimum = max(idiode)%

```

Arus dioda maksimumnya diperoleh sebesar 1,7 mA

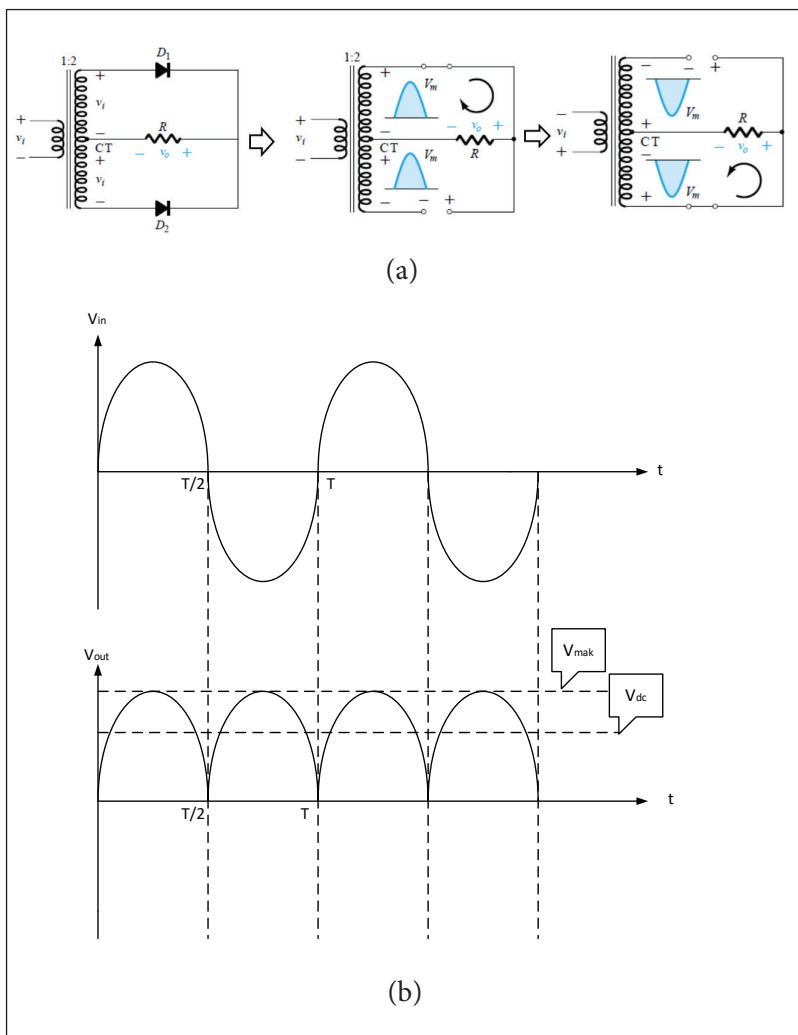


**Gambar 4.35** Hasil Sinulasi Matlab Penyearah Dioda Setengah Gelombang

## 2. Penyearah Gelombang Penuh

Tegangan DC dapat juga diperoleh dari model rangkaian penyearah gelombang penuh. Penyearah jenis ini mampu menghasilkan tegangan DC melalui dua metode penyearahan, yaitu metode tap pusat (*center tap*) dan metode jembatan (*bridge*).

Arus yang mengalir selama siklus  $0 \rightarrow \frac{T}{2}$  melalui D1 akan menghasilkan nilai rata-rata dengan tegangan maksimum sebesar  $+V_{mak}$ . Pada kondisi ini dioda D2 akan terbuka (*open circuit*). Sementara itu, siklus  $\frac{T}{2} \rightarrow T$  melalui D2 akan menghasilkan nilai rata-rata dengan tegangan maksimum  $-V_{mak}$ . Pada kondisi ini, D1 akan terbuka sehingga keluaran rangkaian penyearah gelombang penuh dapat dihasilkan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.36.a.



Keterangan: (a) Penyearah Metode Tap Terpusat dan (b) Sinyal  $V_{in}$  dan  $V_{out}$  Rangkaian

**Gambar 4.36** Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh

### a. Tegangan Rata-Rata

Berdasarkan Gambar 4.36, nilai rata-rata penyearah gelombang penuh dinyatakan sebesar

$$V_{dc} = \frac{2V_{mak}}{\pi} \quad (4.14)$$

Dikarenakan nilai  $\pi$ , persamaan (4.14) dapat dinyatakan kembali sebesar

$$V_{dc} = 0,636 V_{mak} \quad (4.15)$$

Dari persamaan (4.15) ini dapat kita pahami bahwa nilai rata-ratanya adalah 63,6% dari nilai tegangan maksimum. Hal yang sama seperti pada penyearah setengah gelombang terdahulu, pendekatan lain untuk menyatakan nilai rata-rata gelombang dari jenis dioda tak ideal dapat diperoleh dari hasil selisih antara tegangan maksimum dengan tegangan ambang dioda  $V_d$  dengan nilai tegangan ini untuk silikon sebesar 0,7 V dan germanium 0,3 V.

$$V_{dc} = 0,636(V_{mak} - V_d) \quad (4.16)$$

### b. Frekuensi Keluaran

Bentuk sinyal keluaran penyearah jenis ini adalah dua kali siklus dari gelombang masukan yang dicirikan dengan terbentuknya gelombang dua siklus positif (lihat Gambar 4.14b). Oleh karenanya, dengan dihasilkannya dua siklus positif ini secara tidak langsung menghasilkan penggandaan frekuensi atau memiliki keluaran sebesar dua kali frekuensi masukan yang dinyatakan oleh persamaan (4.17):

$$f_{out} = 2f_{in} \quad (4.17)$$

### Contoh 4.11

Rangkaian pada Gambar 3.37 menunjukkan sebuah rangkaian penyearah gelombang penuh metode tap terpusat yang terpasang transformer dengan perbandingan lilitan 10:1 untuk tegangan masukan  $120 V_{rms}/60$  Hz. Tentukan

- tegangan rata-rata hasil perhitungan dan
- tegangan rata-rata hasil simulasi

### Penyelesaian

- Langkah awal, kita cari nilai tegangan maksimum sisi primer sebesar

$$V_{p(mak)} = \frac{V_{rms}}{0,707} = \frac{120 \text{ V}}{0,707} = 170 \text{ V}.$$

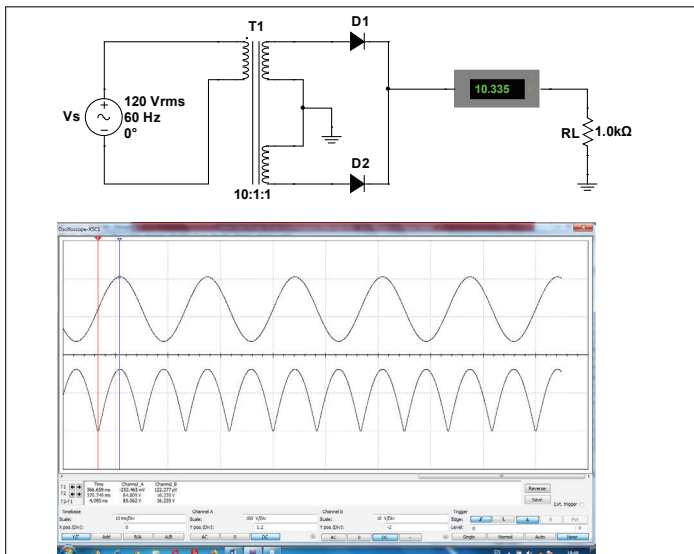
Selanjutnya, nilai tegangan maksimum sisi sekunder dapat dicari dengan melibatkan nilai jumlah lilitan transformator, yaitu sebesar

$$V_{s(mak)} = \frac{170 \text{ V}}{10} = 17 \text{ V}$$

sehingga nilai rata-rata penyearah ini dapat ditentukan sebesar

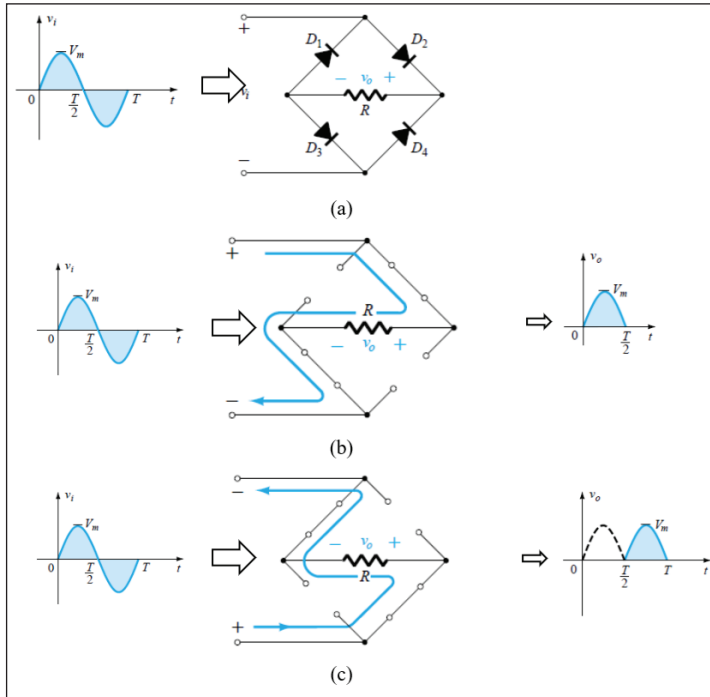
$$V_{dc} = 0,636 (17 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) = 10,366 \text{ V}.$$

- Hasil rangkaian simulasi Multisim ditunjukkan seperti pada Gambar 4.37.



**Gambar 4.37** Hasil Simulasi Multisim Penyearah Dioda Gelombang Penuh

Metode penyearahan selanjutnya adalah penyearah dioda jembatan (*bridge rectifier*). Model penyearah ini cukup bagus diaplikasikan untuk perangkat elektronika karena mampu menghasilkan kestabilan arus dan tegangan keluaran akibat adanya perubahan beban rangkaian. Adapun gambaran kinerja metode ini terlihat seperti Gambar 4.38.



Keterangan: (a) Metode Jembatan, (b) Aliran Arus Siklus Positif, (c) Aliran arus Siklus Negatif

Sumber: Malvino (2015)

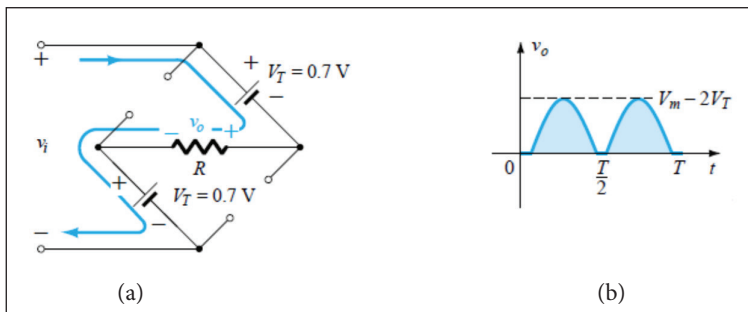
**Gambar 4.38** Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh Metoda Jembatan

Arus penyearah ini melewati dua dioda dengan jalur berbeda, yaitu saat  $0 \rightarrow \frac{T}{2}$  dan saat melewati  $\frac{T}{2} \rightarrow T$ . Akibatnya, ada dua tegangan ambang yang dilewati arus tersebut sehingga nilai rata-ratanya dihasilkan sebesar

$$V_{dc} = 0,636(V_{mak} - 2V_d). \quad (4.18)$$

Dari persamaan (4.18) ini secara fisis dapat dihasilkan sebuah bentuk gelombang DC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.39.

Tegangan ambang ( $V_k = 0,7 \text{ V}$ ) untuk dua jenis dioda yang dilalui arus dapat menghasilkan tegangan dua kali dari penyearah metode tap terpusat.



Keterangan: (a) Arus Maju dan (b) Sinyal  $V_{out}$

**Gambar 4.39** Lintasan Arus Rangkaian Penyearah Penuh Metode Jembatan

### Contoh 4.12

Sebuah rangkaian penyearah jembatan yang dibangun oleh empat dioda ideal diasumsikan memiliki tegangan maksimum pada sisi sekunder sebesar  $68 \text{ V}/60 \text{ Hz}$ , tentukan

- tegangan rata-rata Penyearah,
- frekuensi keluaran,
- tegangan balik maksimum (*peak inverse voltage*).

### Penyelesaian

- a) Nilai tegangan rata-rata diperoleh sebesar

$$V_{dc} = 0,636 \times 68 \text{ V} = 43,3 \text{ V.}$$

- b) Frekuensi keluaran penyearah sebesar

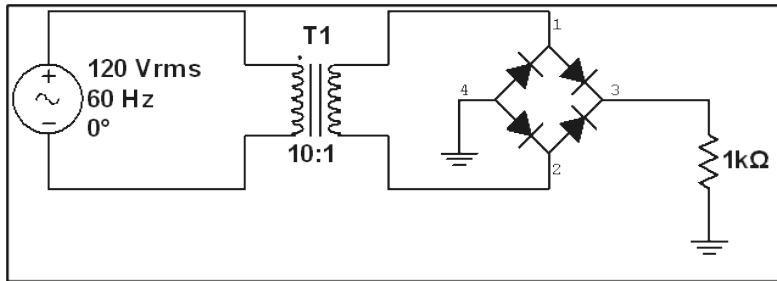
$$f_{out} = 2 \times 60 \text{ Hz} = 120 \text{ Hz}$$

- c) Nilai tegangan balik maksimum diperoleh sebesar:

$$V_{PIV} = V_{mak} = 68 \text{ V}$$

### Contoh 4.13

Tentukan nilai tegangan searah (DC) dari rangkaian jembatan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.40.



**Gambar 4.40** Rangkaian Penyearah Dioda Metoda Jembatan Dioda

### Penyelesaian

Seperi pada Contoh 4.11 sebelumnya, masing-masing tegangan maksimum primer  $V_{p(mak)}$  dan sekunder  $V_{s(mak)}$  dapat diperoleh sebesar

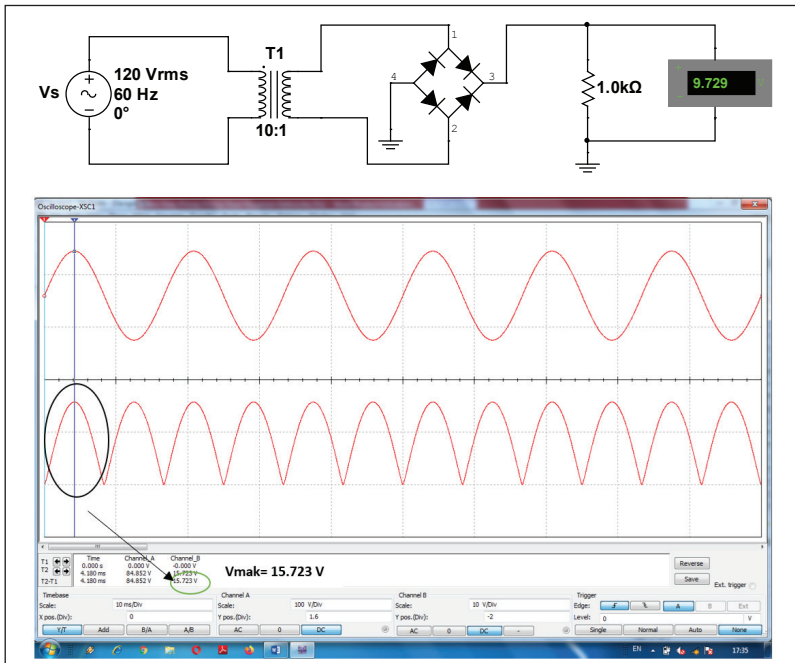
$$V_{p(mak)} = \frac{V_{rms}}{0,707} = \frac{120 \text{ V}}{0,707} = 170 \text{ V,}$$

$$V_{s(mak)} = \frac{170 \text{ V}}{10} = 17 \text{ V.}$$

Adapun untuk mendapatkan tegangan DC dari penyearah jembatan ini menggunakan persamaan (4.18) sehingga diperoleh nilai tegangannya sebesar

$$V_{dc} = 0,636(17 \text{ V} - 1,4 \text{ V}) = 9,92 \text{ V}.$$

Dari hasil simulasinya diperoleh tegangan sebesar 9,729 volt, terdapat selisih relatif kecil (Gambar 4.41).



**Gambar 4.41** Hasil Simulasi Multisim Penyearah Metode Jembatan Dioda

### c. Efisiensi Penyearah

Efisiensi penyearah merupakan parameter penyearah yang berkaitan dengan kemampuan sebuah rangkaian penyearah menghasilkan daya maksimum. Misalnya sebuah perangkat regulator tegangan DC harus menjamin kestabilan daya secara terus-menerus ke beban rangkaian meskipun pada beban terjadi perubahan tidak pasti.

Secara matematis, efisiensi penyearah ini didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran DC terhadap daya masukan AC yang dinyatakan sebesar

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluaran DC}}{\text{Daya Masukan AC}}. \quad (4.19)$$

Nilai efisiensi penyearah setengah gelombang ditentukan sebesar

$$\eta_{HWR} = \frac{0,406}{1 + \frac{r_f}{R_L}}. \quad (4.20)$$

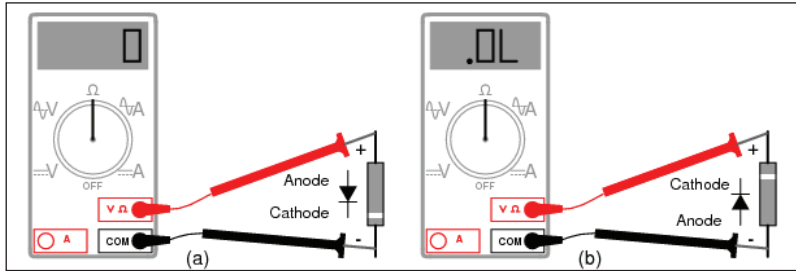
Sementara itu, efisiensi penyearah gelombang penuh diperoleh sebesar

$$\eta_{HWR} = \frac{0,812}{1 + \frac{r_f}{R_L}}. \quad (4.21)$$

Dengan kita asumsikan parameter  $r_f$  ini diabaikan terhadap beban  $R_L$ , akan diperoleh efisiensi  $\pm 40\%$  penyearah setengah gelombang dan  $\pm 80\%$  penyearah gelombang penuh (silakan buktikan!). Hasil ini menunjukkan daya rata-rata yang dihasilkan oleh penyearah gelombang penuh lebih besar dibandingkan penyearah setengah gelombang sebesar dua kalinya.

## E. Cara Pengujian Kualitas Dioda

Prinsipnya, cara kita mengetahui kondisi dioda dalam kondisi baik atau mengalami kerusakan dapat diukur langsung menggunakan alat ukur multimeter. Tahap pertama, multimeter ditempatkan pada skala ohmmeter dengan menghubungkan *probe* warna merah (+) ke kaki anode dan *probe* warna hitam ke kaki katode (-). Selanjutnya, posisi



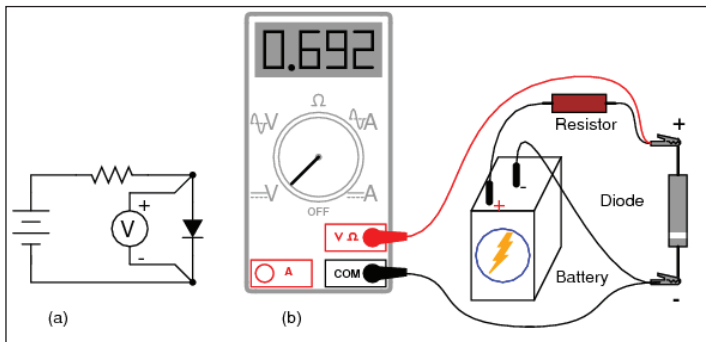
Keterangan: (a) Indikator Arus Maju Dioda dan (b) Indikator Arus Mundur Dioda  
Sumber: Sedha (2013)

**Gambar 4.42** Cara Pengujian Komponen Dioda

*probe* dibalik cara memasangnya. Jika yang terlihat seperti Gambar 4.42, maka dioda dinyatakan baik.

Pengujian lain untuk mengetahui kualitas dioda adalah dengan mengukur secara langsung tegangan ambang dioda menggunakan multimeter. Proses tahapan pengujian untuk memastikan tegangan dioda yang diukur kembali ke keadaan tegangan normalnya seperti yang ditunjukkan Gambar 4.43 bisa diterapkan untuk mengetahuinya.

Jika *setting*-an pengukuran seperti pada gambar 4.20 ternyata tegangan dioda tetap masih rendah, bahkan tidak ada nilai sama sekali, berarti dioda tersebut dapat dipastikan sudah rusak.



Keterangan: (a) Skema Rangkaian Pengujian dan (b) Pengujian Dioda  
Sumber: Sedha (2013)

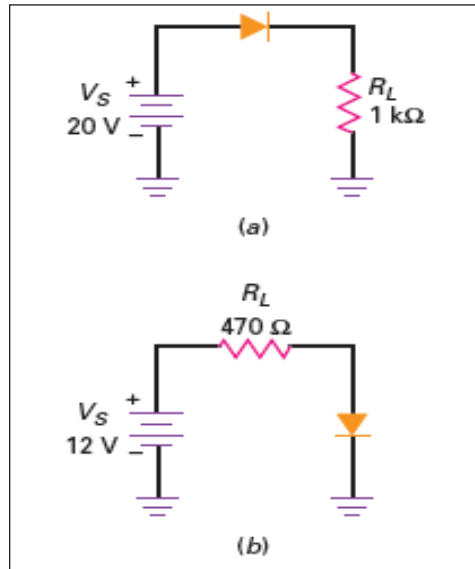
**Gambar 4.43** Cara Pengujian Arus Maju Dioda

## RANGKUMAN

- 1) Dioda merupakan salah satu komponen elektronika yang termasuk kategori komponen aktif. Dikatakan komponen aktif karena dioda sendiri akan bekerja apabila diberikan kepadanya energi dari luar.
- 2) Dioda dapat bekerja pada arus maju (*forward bias*) dan arus mundur (*reverse bias*). Pada saat bekerja di daerah arus maju, dioda dapat menghantarkan arus sehingga dalam kondisi ini dioda bersifat *on*, sedangkan saat bekerja pada daerah mundur, dioda ini tidak menghantarkan arus sehingga kondisinya *off*.
- 3) Untuk memudahkan dalam mendesain sebuah rangkaian dioda, dilakukan beberapa model pendekatan, antara lain, pendekatan dioda ideal, pendekatan dioda tak ideal, dan pendekatan hibrida (kombinasi).
- 4) Rangkaian penyearah dioda merupakan salah satu aplikasi populer. Jenis rangkaian penyearah ini, antara lain, penyearah setengah gelombang (*half wave rectifier*) dan penyearah gelombang penuh (*full wave rectifier*).

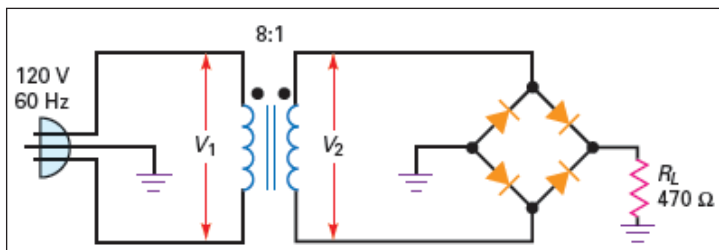
## LATIHAN SOAL

- 1) Sebuah dioda ideal disusun serial dengan sebuah resistansi  $220\ \Omega$ . Apabila tegangan yang melalui resistansi tersebut sebesar  $6\text{ V}$ , tentukan arus yang melalui dioda tersebut.
- 2) Merujuk pada rangkaian yang ditunjukkan Gambar 4.44a, tentukan arus beban, tegangan beban, daya beban, daya dioda dan daya total rangkaian.
- 3) Berdasarkan rangkaian yang ditunjukkan Gambar 4.44b, tentukan arus beban, tegangan beban, daya beban, daya dioda dan daya total rangkaian.
- 4) Jika pada rangkaian Gambar 4.44a diasumsikan dioda silikon yang terpasang memiliki resistansi *bulk*  $0,23\ \Omega$ , tentukan arus beban, tegangan beban, daya beban, daya dioda dan daya total rangkaian.



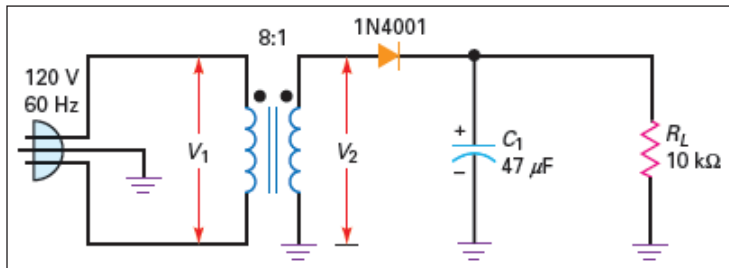
**Gambar 4.44** Rangkaian Serial Dioda Sederhana

- 5) Berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.45, seandainya tegangan input berubah dari tegangan  $100\text{ V}_{rms}$  ke tegangan  $125\text{ V}_{rms}$ , berapakah kira-kira tegangan DC minimum dan maksimumnya?
- 6) Sebuah sinyal setengah gelombang yang dihasilkan penyearah memiliki tegangan maksimum  $20\text{ V}$  yang dimasukkan ke rangkaian filter *choke inductor* yang memiliki reaktansi  $X_L = 1\text{ k}\Omega$  dan  $X_C = 25\ \Omega$ . Tentukan tegangan riak (*ripple*) pada komponen kapasitornya.



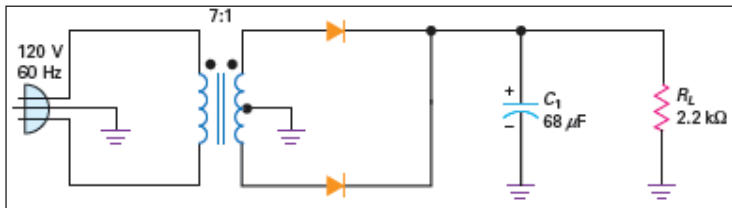
**Gambar 4.45** Rangkaian Penyearah Metode Jembatan Dioda

- 7) Tentukan tegangan DC *output* dan tegangan riak dari rangkaian yang ditunjukkan oleh Gambar 4.46.



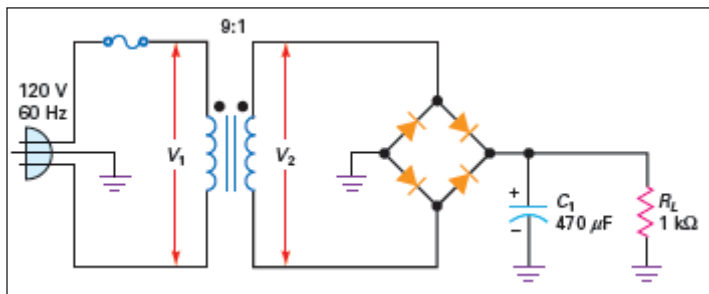
**Gambar 4.46** Penyearah Dioda Setengah Gelombang dengan Filter RC

- 8) Tentukan tegangan DC *output* dan tegangan riak dari rangkaian yang ditunjukkan oleh Gambar 4.47.



**Gambar 4.47** Penyearah Dioda Gelombang Penuh dengan Filter RC

- 9) Tentukan tegangan DC *output* dan tegangan riak dari rangkaian yang ditunjukkan oleh Gambar 4.48.



**Gambar 4.48** Penyearah Dioda Metode Jembatan dengan Filter RC

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic devices and circuit theory* (7<sup>th</sup> ed.). Prentice Hall.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronis fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering: principles and applications* (6<sup>th</sup> ed.). Essex: Pearson Education Limited, 862–863.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2016). *Electronic principles* (8<sup>th</sup> ed.). McGrawHill-Education.
- Mehta, V. K., & Mehta, R. (2014). *Principles of electronics*. S. Chand & Company Ram Nagar, New Delhi.
- Sedha, R. S., (2013). *Electronic measurements and instrumentations*. S. Chand Publishing.

# BAB V

## MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGGUNAKAN TRANSISTOR BIPOLAR (TRANSISTOR DUA POLARITAS)

### Materi pembelajaran:

Materi yang dibahas dalam bab ini dimulai dari belajar memahami tentang karakteristik dan operasi kerja sebuah transistor bipolar. Selain itu, dalam bab ini dibahas juga tentang langkah-langkah perhitungan sederhana guna mendukung desain rangkaian transistor bipolar, baik sebagai sebuah penguat sinyal maupun sebagai rangkaian sakelar. Dalam bab ini diperkenalkan beberapa model skematik rangkaian penguat transistor bipolar yang masing-masing memiliki karakteristik kinerja yang berbeda-beda disesuaikan kebutuhan aplikasinya.

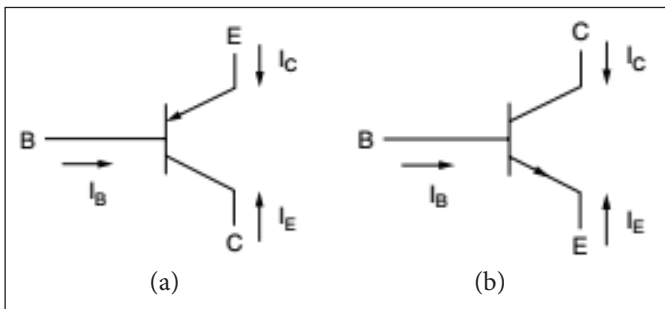
### Tujuan pembelajaran:

- 1) mampu memahami karakteristik transistor bipolar;
- 2) mampu menghitung dan mendesain rangkaian transistor bipolar sesuai dengan kebutuhan aplikasinya; dan
- 3) mampu memahami perbedaan di antara beberapa model rangkaian penguat bersama transistor bipolar, yaitu penguat bersama basis (*common base*), penguat bersama kolektor (*common collector*) dan penguat bersama emiter (*common emitter*).

## A. Pendahuluan

Pertama kali transistor sambungan (*common transistor*) ditemukan sekitar tahun 1950-an oleh William Schockley. Saat itu, transistor hanya digunakan untuk menguatkan sinyal-sinyal radio, televisi, dan sebagainya. Komponen transistor yang terbuat dari bahan semikonduktor biasanya memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan dengan transistor sistem tabung. Terbentuknya transistor berbahan semikonduktor banyak memberikan perubahan terhadap peningkatan kinerja serta ukuran fisik perangkat elektronika menjadi lebih kecil, ringan, dan lebih fleksibel. Transistor-transistor jenis ini juga sangat berkontribusi dalam terciptanya teknologi rangkaian terpadu (*integrated circuit*) guna mendukung lahirnya perangkat-perangkat elektronika berukuran mikro yang berkinerja sangat baik. Dalam bab ini kita akan membahas tentang sifat kinerja komponen transistor bipolar melalui pendekatan pemrograman dan simulasi menggunakan Matlab dan Multisim NI v.14 secara praktis disertai cara perhitungannya.

Prinsip kerja transistor bipolar ini berdasarkan “pengendalian arus” yang mengalir melalui kaki-kaki basis ( $I_B$ ), kolektor ( $I_C$ ) dan emiter ( $I_E$ ). Ketiga arus ini akan mengalir dan membentuk suatu garis beban kerja transistor yang disebut sebagai *garis beban transistor*.



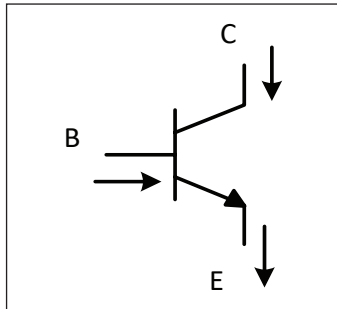
Keterangan: (a) PNP dan (b) NPN

**Gambar 5.1** Tipe Transistor Bipolar

Gambar 5.1 menunjukkan aliran arus pada pada dua tipe transistor bipolar, yaitu hubungan positif-negatif-positif (PNP) dan negatif-positif-negatif (NPN). Penentuan tipe-tipe transistor bipolar ini berkaitan dengan adanya hubungan mobilitas pergerakan elektron bebas dan lubang dalam bahan dasar transistor.

## B. Model Pengendalian Arus pada Transistor Bipolar

Telah disebutkan sebelumnya bahwa transistor bipolar ini prinsipnya bekerja berdasarkan pengendalian arus-arus kakinya sehingga memudahkan kita dalam menganalisis kinerja arus-arus ini. Gambar 5.2 menunjukkan arus yang mengalir dalam transistor bipolar (kita ambil contoh transistor tipe NPN).



**Gambar 5.2** Aliran Arus dalam Transistor Bipolar

Arus yang masuk pada suatu percabangan (simpul) akan bernilai sama dengan arus yang keluar dari simpul tersebut sesuai kaidah hukum arus Kirchoff, yaitu

$$I_E = I_C + I_B \quad (5.1)$$

Karena nilai arus basis  $I_B$  ini relatif sangat kecil terhadap arus kolektor  $I_C$ , arus basis ini akan dianggap nol sehingga persamaan (5.1) dapat diperbarui sebagai

$$I_E = I_C \quad (5.2)$$

Kecilnya nilai  $I_B$  ini tidak terlepas dari adanya pengaruh parameter alfa DC ( $\alpha_{dc}$ ) dan beta DC ( $\beta_{dc}$ ) yang menyatakan parameter penguatan arus transistor bipolar yang besarnya masing-masing adalah

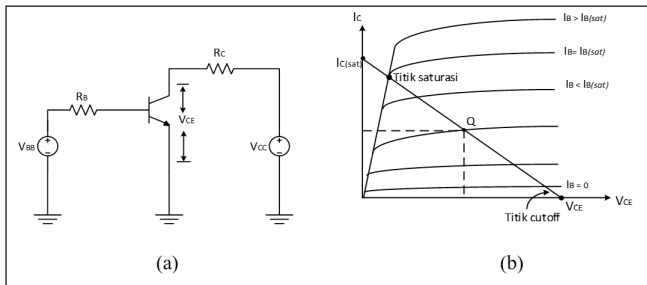
$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{dan} \quad (5.3)$$

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}. \quad (5.4)$$

Pada kondisi tertentu, nilai arus  $I_E$  dan  $I_C$  ini bernilai sama dengan alasan bahwa arus  $I_B$  relatif sangat kecil terhadap  $I_C$  sehingga mengakibatkan  $\alpha_{dc}$  akan mendekati nilai 1 (satu). Sementara itu, sebagian informasi *data sheet* transistor menyatakan bahwa nilai ini berada di antara 0,95–0,99. Untuk parameter  $\alpha_{dc}$  ini biasanya informasi *data sheet*-nya dinyatakan sebagai parameter.

### C. Garis Beban Kerja Transistor Bipolar

Garis beban kerja transistor bipolar memiliki peran dalam menentukan posisi daerah kerja transistor. Ada tiga posisi daerah kerja transistor sesuai garis beban kerjanya, yaitu *daerah jenuh* (saturasi), *daerah aktif*, dan *daerah cut-off*. Gambar 5.3 menunjukkan gambaran posisi daerah kerja transistor bipolar ini.



Keterangan: (a) Skema Rangkaian Dasar dan (b) Kurva Garis Beban Kerjanya

**Gambar 5.3** Daerah Kerja Transistor Bipolar

Besarnya nilai arus  $I_C$  dan tegangan kolektor-emiter  $V_{CE}$  di sepanjang garis beban akan selalu berubah-ubah setiap saat tergantung pengaruh dari perubahan arus  $I_B$  yang nilainya dinyatakan sebesar

$$I_C = \beta_{dc} I_B. \quad (5.5)$$

Dengan menerapkan kaidah hukum tegangan Kirchoff, rangkaian pada Gambar 5.3a dapat menentukan tegangan kolektor-emiter  $V_{CE}$  sebesar

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C. \quad (5.6)$$

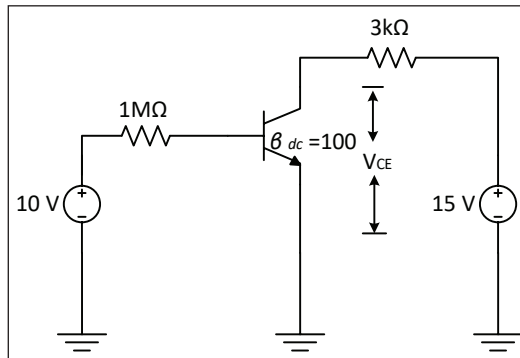
Perubahan tahanan basis  $R_B$  ternyata membuat arus basis  $I_B$  menjadi berubah-ubah yang turut mengubah juga nilai  $I_C$  dan  $V_{CE}$  sendiri. Sementara itu, hubungan  $I_B$  dengan  $R_B$  sendiri dinyatakan sebesar

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}. \quad (5.7)$$

Penjelasan persamaan (5.5) sampai dengan persamaan (5.7) ini merupakan tahapan proses perhitungan untuk memahami kinerja transistor bipolar berdasarkan garis bebannya.

### Contoh 5.1

Gambarkan garis beban transistor dari aplikasi rangkaian transistor seperti pada Gambar 5.4.



**Gambar 5.4** Rangkaian Bias Transistor Bipolar

## Penyelesaian

- 1) Tentukan terlebih dahulu arus pada basisnya ( $I_B$ ):

$$I_B = \frac{10\text{ V} - 0,7\text{ V}}{1\text{ M}\Omega} = 9,3\text{ }\mu\text{A}.$$

- 2) Selanjutnya, cari arus kolektor ( $I_C$ ),

$$I_C = 100 \times 9,3\text{ }\mu\text{A} = 0,93\text{ mA}.$$

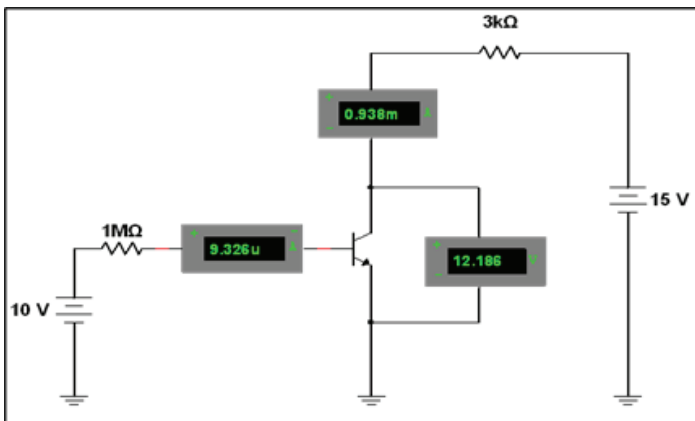
- 3) Selanjutnya, ditentukan tegangan  $V_{CE}$  sebesar

$$V_{CE} = 15\text{ V} - 0,93\text{ mA} \times 3\text{ k}\Omega = 12,21\text{ V}.$$

- 4) Arus kolektor jenuh  $I_{C(sat)}$  diperoleh sebesar

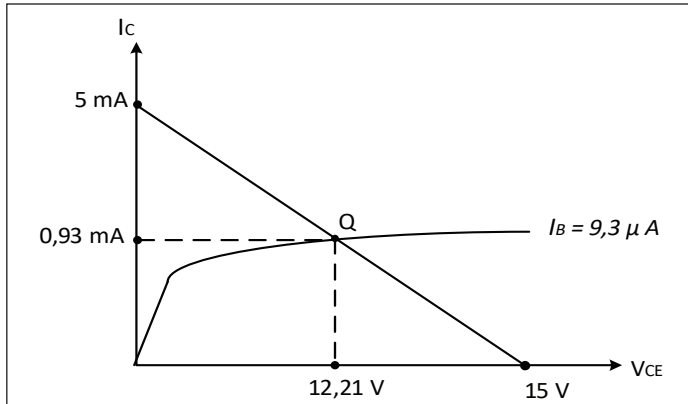
$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 5\text{ mA}.$$

- 5) Hasil simulasinya diperoleh sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.5.



**Gambar 5.5** Rangkaian Hasil Simulasi Contoh Soal 5.1

Keduanya menunjukkan kesamaan hasil sehingga kita dapat menggambarkan kurva garis beban transistor ini sebagaimana Gambar 5.6.



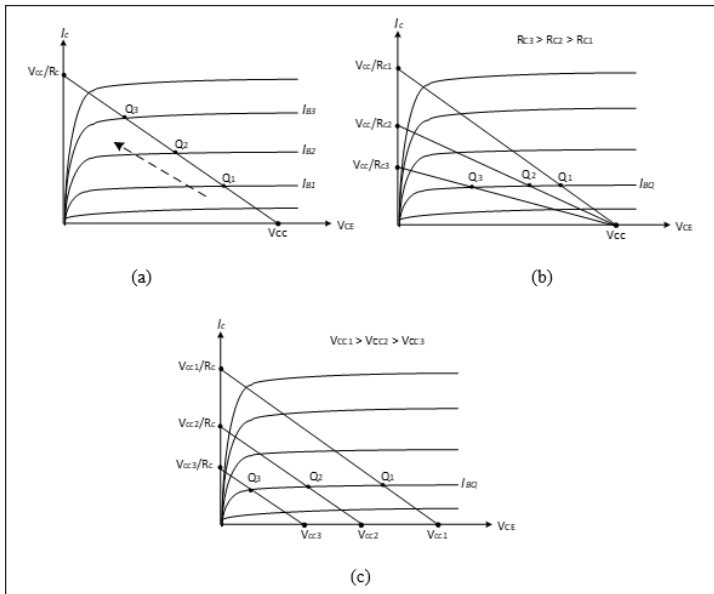
**Gambar 5.6** Kurva Garis Beban Hasil Perhitungan

Dari hasil analisis kurva pada Gambar 5.6, dapat dijelaskan hal-hal sebagai berikut.

- 1) Titik kerja arus dan tegangan transistor dari rangkaian Gambar 5.4 menghasilkan arus  $I_C$  sebesar 0,93 mA dan tegangan  $V_{CE}$  sebesar 12,21 V dengan arus jenuh ( $I_{sat}$ ) dan tegangan  $V_{CE}$  maksimum masing-masing sebesar 5 mA dan 15 V.
- 2) Jika nilai resistansi basis  $R_B$  digeser ke harga lebih tinggi, titik kerja transistor akan bergeser ke arah *cut-off* (arus basis  $I_B$  mengecil mendekati tegangan  $V_{CE}$  maksimum 15 V). Hal ini juga berlaku untuk posisi sebaliknya.
- 3) Perubahan nilai  $\beta_{ac}$  atau sering dinamakan juga sebagai  $h_{fe}$  (*hybrid parameter current gain*) yang menunjukkan penguatan arus transistor setidaknya dapat memengaruhi perubahan pergeseran titik kerja transistor. Jika nilai  $\beta_{ac}$  diperbesar dengan asumsi harga  $R_B$  dibuat tetap, titik kerjanya akan bergeser ke atas titik Q (arus  $I_C$  menjadi meningkat). Artinya, saat ini transistor bekerja mendekati titik jenuh. Hal ini juga berlaku posisi sebaliknya.

- 4) Jika transistor dipertahankan titik kerjanya di titik Q (posisi daerah aktif), transistor tersebut dapat difungsikan sebagai rangkaian penguat sinyal. Untuk kondisi sebaliknya, jika titik kerja transistor digeser ke posisi mendekati titik jenuh atau *cut-off*, pada kedudukan ini transistor lebih banyak berfungsi sebagai rangkaian sakelar atau *switching*.

Hasil analisis ini bisa kita kembangkan lagi menjadi beberapa kemungkinan kondisi posisi garis beban transistor ketika salah satu komponennya diubah-ubah nilai besarnya. Beberapa kemungkinan perubahan tersebut dapat dinyatakan seperti pada Gambar 5.7.



Keterangan: (a) Dampak arus  $I_B$  makin diperbesar, (b) dampak  $R_C$  makin diperbesar, dan (c) dampak level  $V_{CC}$  diperkecil.

Sumber: Malvino (2015)

**Gambar 5.7** Beberapa Kemungkinan Perubahan Garis Beban Transistor BJT (*Bipolar Junction Transistor*)

D. Karakteristik Transistor Bipolar

Operasi kerja transistor BJT tergantung pada mobilitas aliran mayoritas dan minoritas pembawa elektron bebas dan lubang dalam bahan semikonduktor. Pada BJT, operasi kerjanya dapat dilihat dari persimpangan (*junction*) tegangan basis kolektor dengan tegangan kolektor-emiter. Dampak dari persimpangan ini akan melahirkan daerah operasi kerja BJT, yaitu daerah aktif, jenuh, dan *cut-off* yang secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Daerah Operasi Kerja Transistor Bipolar (BJT)

Persimpangan Basis-Emiter (Base Emitter Junction)	Persimpangan Kolektor-Emiter (Base Collector Junction)	Daerah Operasi
Bias maju ( <i>forward bias</i> )	Bias mundur ( <i>reverse bias</i> )	Aktif
Bias maju ( <i>forward bias</i> )	Bias maju ( <i>forward bias</i> )	Jenuh
Bias mundur ( <i>reverse bias</i> )	Bias mundur ( <i>reverse bias</i> )	Cut-off

Sumber: Malvino (2015); Sedra & Smith (2004)

Apabila kita kembali melihat rangkaian pada Gambar 5.3a sebelumnya, untuk mengetahui karakteristik BJT ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menentukan karakteristik input dan *output* jenis transistor ini. Nilai yang dapat digunakan untuk mengindikasikan karakteristik input dan *output* BJT ini adalah dengan melihat perubahan nilai arus kolektor  $I_C$  dan basis  $I_B$  sebagai representasi dari kondisi input dan *output* yang secara persamaan eksponensial dapat dinyatakan masing-masing sebesar

$$I_C = I_{C(sat)} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_{AF}}\right) \tag{5.8}$$

$$I_B = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{dc}} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \tag{5.9}$$

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan  $V_{AF}$  menunjukkan tegangan mula-mula sebelum transistor bekerja dan dinyatakan sebagai nilai konstanta yang besarnya biasanya ditentukan oleh pabrik pembuat komponen tersebut.

### Contoh 5.2

Buatlah sketsa kurva karakteristik input BJT menggunakan bahasa pemrograman Matlab jika diasumsikan parameter nilai transistor yang diketahui adalah  $\beta_{dc} = 120$  (saat diberi arus maju),  $\beta_{dc(r)} = 0,3$  (saat diberi arus mundur),  $T = 300$  K, tegangan basis emiter  $V_{BE} = 0,7$  volt, tegangan basis kolektor  $V_{BC} = -1$  volt dengan kerapatan arusnya ( $J_s$ ) sebesar  $2 \times 10^{-15}$  J/luas<sup>2</sup>.

### Penyelesaian

*Script source code* Matlab:

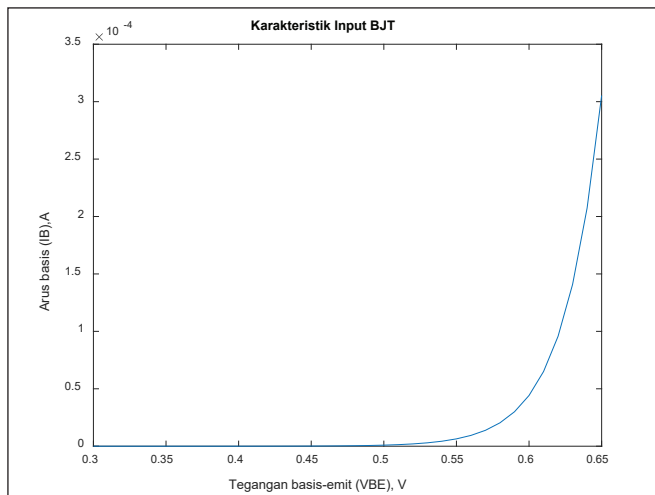
```
%%===== memplot kurva karakteristik input BJT===== %%%
%parameter transistor%
k=1.381e-23;
T=300;
q=1.602e-19;
Js=2e-15;
A=5.0;
beta_dc=120;
beta_dc_r=0.3;
% persamaan transistor %
vt=k*T/q;
ic_sat=Js*A;
alpha_dc=beta_dc/(1+beta_dc);
alpha_dc_r = beta_dc_r/(1+beta_dc_r);
ies=ic_sat/alpha_dc;
vbe=0.3:0.01:0.65;
ics=ic_sat/alpha_dc_r;
m=length(vbe);
```

```

% perhitungan%
for i = 1:m
ifr(i) = ies*exp((vbe(i)/vt)-1);
ir1(i) = ics*exp((-1.0/vt)-1);
ie1(i) = abs(-ifr(i) + alpha_dc_r*ir1(i));
end
% menampilkan kurva karakteristik input%
plot(vbe,ie1)
title('Karakteristik Input BJT')
xlabel('Tegangan basis-emit (VBE), V')
ylabel('Arus basis (IB), A')

```

Hasil simulasi Matlab-nya seperti pada Gambar 5.8.



**Gambar 5.8** Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 5.2

Hasil simulasi Matlab menunjukkan arus transistor secara eksponensial mulai bekerja dimulai saat tegangan  $V_{BE}$  berada pada 0,5 volt dan arus secara cepat berubah saat memasuki tegangan  $V_{BE}$  0,6 volt ke atas. Selanjutnya, pada Contoh 5.3 akan kita analisis

karakteristik *output* transistor bipolar berdasarkan data-data transistor yang diperoleh dari Contoh 5.2 sebelumnya.

### Contoh 5.3

Buatlah kurva karakteristik output transistor BJT untuk hubungan tegangan kolektor-emiter ( $V_{CE}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ) menggunakan pemrograman Matlab dari data yang diambil pada Contoh 5.2 dengan asumsi nilai  $\alpha_{dc} = 0,98$  (saat arus maju) dan  $\alpha_{dc(r)} = \beta_{dc(r)} = 0,3$  (saat arus mundur).

### Penyelesaian

*Script* Matlab:

```

%%=== Karakteristik output transistor tipe npn ===
% Parameter transistor
k=1.381e-23;
T=300;
q=1.602e-19;
Js=2.0e-15;
A=5.0;
alpha_dc_f=0.98;
alpha_dc_r=0.3;
% Perhitungan
vt=k*T/q;
is=Js*A;
ies=is/alpha_dc_f;
ics=is/alpha_dc_r;
vbe=[0.65];
vce=[0 0.07 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 1 2 4 6];
n=length(vbe);
m=length(vce);
for i=1:n

```

```

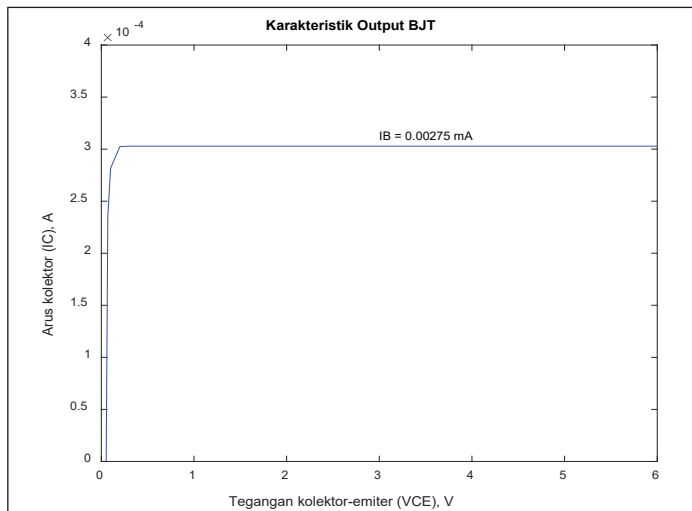
for j=1:m
    ifr(i,j)= ies*exp((vbe(i)/vt) - 1);
    vbc(j) = vbe(i) - vce(j);
    ir(i,j) = ics*exp((vbc(j)/vt) - 1);
    ic(i,j) = alpha_dc_f*ifr(i,j) - ir(i,j);
end

end

ic1 = ic(1,:);
% memplot kurva karakteristik output BJT %%
plot(vce, ic1,'b')
title('Karakteristik Output BJT')
xlabel('Tegangan kolektor-emiter (VCE), V')
ylabel('Arus kolektor (IC), A')
text(3,3.1e-4, 'IB = 0.00275 mA')
axis([0,6,0,4e-4])

```

Hasil simulasinya diperoleh sebagai berikut (Gambar 5.9).



**Gambar 5.9** Hasil Simulasi Matlab Contoh Soal 5.3

Hasil analisis kurva *output* transistor menunjukkan bahwa saat arus basis  $I_B$  sebesar 0,00275 mA diberikan ke dalam rangkaian transistor bipolar (BJT), akan terjadi penguatan di bagian arus kolektor  $I_C$  sebesar 3,3 mA. Hal ini menggambarkan bahwa transistor bekerja secara baik di daerah aktif.

### E. Transistor Bipolar sebagai Sakelar

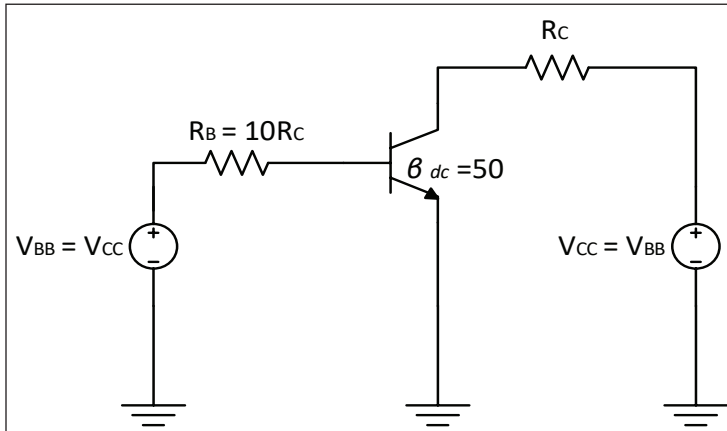
Penerapan transistor bipolar sebagai rangkaian sakelar dapat dilakukan dengan cara mengatur titik Q dari beban kerja transistor yang digeser menuju arah titik jenuh atau *cut-off*. Saat transistor akan dijadikan rangkaian sakelar tertutup (*on*), arus basis  $I_B$  dan arus kolektor  $I_C$  akan mengalami peningkatan secara linier menuju arus  $I_C$  maksimumnya,  $I_{C(sat)}$ , yang pada kondisi ini tegangan  $V_{CE}$  akan bergeser menuju tegangan nol. Sementara itu, saat transistor ini akan dijadikan rangkaian sakelar terbuka (*off*), arus  $I_B$  akan bergeser secara linier menuju arus  $I_C$  minimum mendekati nilai nol.

Untuk lebih memahami transistor ini bekerja di daerah jenuh atau *cut-off*, ada dua metode pendekatan, yaitu pertama, melakukan perubahan resistansi basis  $R_B$  dengan cara menempatkan sebuah resistansi variabel, sedangkan cara yang kedua adalah menggunakan kaidah aturan perbandingan tahanan  $R_B$  terhadap resistansi kolektor  $R_C$  sebesar 10:1 atau  $R_B = 10R_C$  dengan asumsi bahwa tegangan basis  $V_{BB}$  dan tegangan kolektor  $V_{CC}$  bernilai sama ( $V_{BB} = V_{CC}$ ). Aturan cara kedua ini lebih mudah dilakukan untuk memprediksi secara akurat kondisi transistor saat beroperasi, baik di titik jenuh maupun *cut-off* yang dapat dianalisis berdasarkan rangkaian pengujian seperti pada Gambar 5.10.

Langkah-langkah untuk menentukan titik kerja transistor (titik Q) berdasarkan pendekatan garis bebannya dapat dilakukan sebagai berikut.

- a) Menentukan tegangan emitter  $V_E$  pada rangkaian sebesar

$$V_E = V_{BB} - V_{BE} \quad (5.10)$$



**Gambar 5.10** Rangkaian Transistor sebagai Sakelar

- b) Kemudian, arus pada di bagian emitter  $I_E$  dapat dicari menggunakan persamaan

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \approx I_C \quad (5.11)$$

Nilai arus emitter ini akan memiliki nilai arus yang sama pada sisi kolektornya sesuai dengan analisis yang telah disampaikan pada bab sebelumnya.

- c) Selanjutnya, tegangan kolektor  $V_C$  perlu diperhitungkan karena saat arus melewati tahanan kolektor, tegangan kolektor ini akan mengalami penurunan sebesar

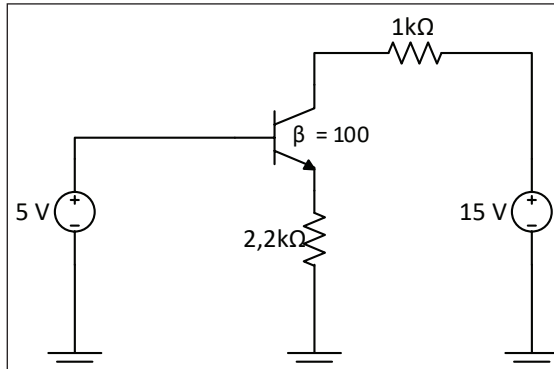
$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (5.12)$$

- d) Sementara itu, tegangan kolektor emitter  $V_{CE}$  berdasarkan pengembangan dapat dinyatakan sebesar

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (5.13)$$

### Contoh 5.4

Tentukan kurva garis beban untuk menentukan operasi kerja transistor dari rangkaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.11.



**Gambar 5.11** Model Rangkaian Titik Kerja Transistor Bias Emiter

### Penyelesaian

1) Untuk harga  $R_E = 2,2 \text{ k}\Omega$ , diperoleh hasil sebagai berikut.

a) Ditentukan tegangan emitter  $V_E$  sebesar

$$V_E = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

b) Kemudian ditentukan arus emitter  $I_E$  sebesar

$$I_E = \frac{4,3 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} = 1,95 \text{ mA}$$

c) Selanjutnya tegangan kolektor  $V_C$  ditentukan sebesar

$$V_C = 15 \text{ V} - (1,95 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 13,1 \text{ V}$$

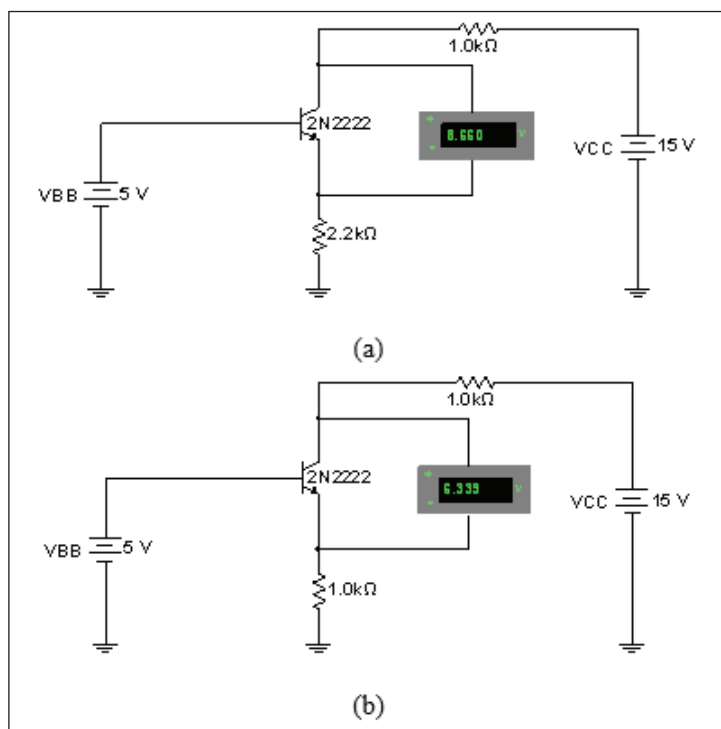
d) Akhirnya, tegangan kolektor emitter  $V_{CE}$  transistor dapat ditentukan sebesar

$$V_{CE} = 13,1 \text{ V} - 4,3 \text{ V} = 8,88 \text{ V}$$

- 2) Untuk harga  $R_E = 1\text{k}\Omega$ , diperoleh hasilnya sebagai berikut.  
 Dengan cara yang sama seperti pada penyelesaian no. 1, diperoleh parameter prategangan DC transistor sebagai berikut.

- a)  $V_E = 5\text{ V} - 0,7\text{ V} = 4,3\text{ V}$ ,  
 b)  $I_E = \frac{4,3\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 4,3\text{ mA}$ ,  
 c)  $V_C = 15\text{ V} - (4,3\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = 10,7\text{ V}$ , dan  
 d)  $V_{CE} = 10,7\text{ V} - 4,3\text{ V} = 6,4\text{ V}$ .

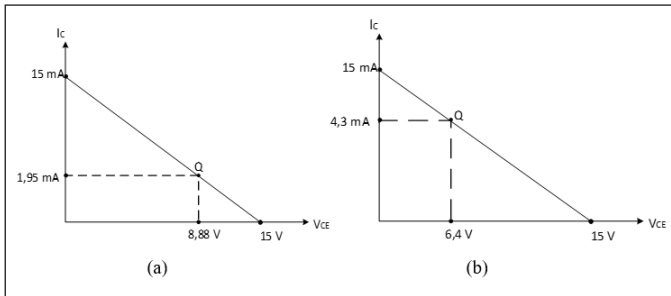
Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai tegangan kolektor emitter  $V_{CE}$  seperti yang ditunjukkan Gambar 5.12.



Keterangan: (a) Saat  $R_E = 2.2\text{K}$  dan (b) saat  $R_E = 1\text{K}$ .

**Gambar 5.12** Rangkaian Hasil Simulasi Multisim Rangkaian Transistor Bipolar

Dengan mengubah-ubah nilai resistansi emiter  $R_E$  akan diperoleh perubahan nilai tegangan emiter. Hasil perhitungan dan simulasi ini menunjukkan bahwa nilai tegangan emiter makin besar seiring bertambahnya nilai  $R_E$ . hal ini cukup berdampak pada perubahan garis beban kerja transistor saat nilai  $R_E$  yang diubah-ubah sesuai yang ditunjukkan oleh Gambar 5.13.



Keterangan: (a) Saat  $R_E = 2,2$  k $\Omega$  dan (b) saat  $R_E = 1$  k $\Omega$

**Gambar 5.13** Hasil Perhitungan Garis Beban Transistor Bipolar

Hasil garis beban ini menunjukkan bahwa  $R_E$  ini secara langsung mampu mengubah operasi daerah kerja transistor tersebut. Nilai tahanan  $R_E$  dapat memberikan perubahan cukup besar terhadap kedudukan titik Q disepanjang garis beban, yaitu saat  $R_E$  diperkecil nilainya, titik Q berkecenderungan bergeser ke posisi mendekati titik jenuh dan begitupun sebaliknya, jika  $R_E$  diperbesar, titik Q akan cenderung bergeser ke titik *cut off*. Sementara itu, ketika kita menginginkan agar posisi transistor ini selalu berada pada daerah aktif (tepat di titik Q), perlu dibutuhkan suatu pengaturan pada bagian  $R_E$  agar menghasilkan kestabilan titik kerja di daerah aktif ini. Pada posisi daerah aktif ini biasanya transisitor digunakan untuk memodelkan sebuah rangkaian penguat.

## F. Model Pembiasan Transistor Bipolar

Pembiasan transistor dilakukan sebagai langkah awal untuk menganalisis kinerja transistor bipolar sebagai sebuah rangkaian penguat

sinyal. Ada dua model pendekatan untuk menentukan penguatan transistor, yaitu *pendekatan model sinyal DC* dan *model sinyal AC*.

## 1. Model Sinyal DC

Pembiasan transistor sendiri diperlukan untuk mengetahui aliran arus pada rangkaian transistor bipolar dengan cara menelusuri jalur dari rangkaian transistor tersebut yang dilalui oleh arus searah dari sumber tegangan searah  $V_{CC}$  dengan terlebih dahulu meng-*opencircuit*-kan masing-masing kapasitansi yang terpasang pada rangkaian sesuai yang ditunjukkan Gambar 5.14a.

Rangkaian Gambar 5.14.b menggambarkan sebuah model rangkaian pembagi tegangan berdasarkan bias model sinyal DC. Prinsipnya model pendekatan ini berguna untuk memperkirakan “kelakuan” arus dalam rangkaian sebagai pengendali utama terhadap kinerja transistor BJT. Adapun langkah-langkah pembiasan model sinyal DC pada rangkaian transistor BJT ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1) menentukan dan menghitung tegangan bias basis ( $V_{BB}$ ) dengan menggunakan metode perhitungan pembagian tegangan sebesar;

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} \quad (5.13)$$

- 2) menentukan arus basis  $I_B$  sebagai arus input sebesar

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

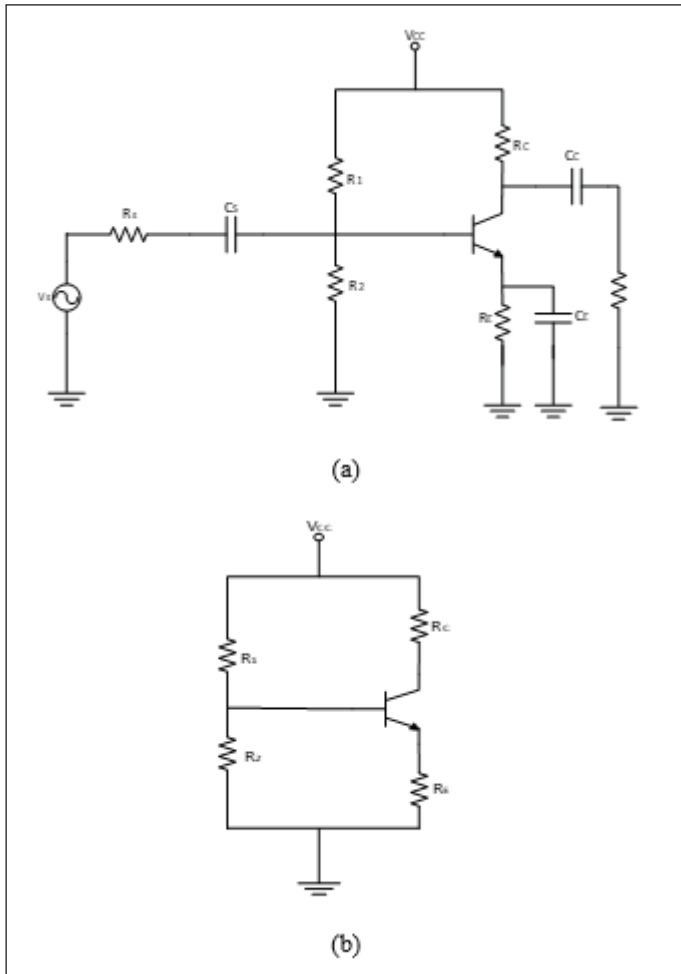
dengan

$$R_B = R_{th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad (5.14)$$

- 3) menentukan arus emitter  $I_E$  dan arus kolektor  $I_C$  sebesar

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \approx I_C;$$

- 4) menghitung tegangan kolektor  $V_C$ ; dan
- 5) menentukan tegangan kolektor emitter  $V_{CE}$  yang mewakili tegangan *output* penguat transistor BJT ini.

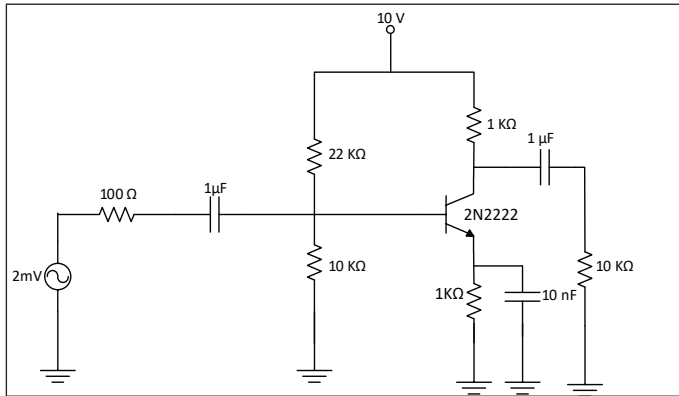


Keterangan: (a) Rangkaian Penguat Transistor dan (b) Bias Sinyal DC Transistor

**Gambar 5.14** Rangkaian Pembiasan Transistor BJT

### Contoh 5.5

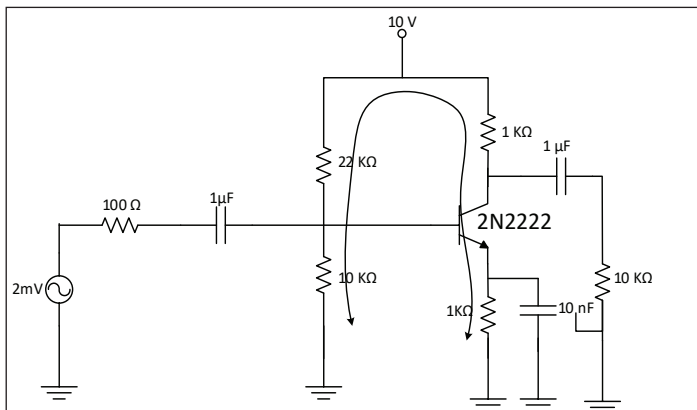
Sebuah model pembiasan sinyal DC pada rangkaian penguat transistor ditunjukkan pada Gambar 5.15. Hitung parameter-parameter penguatannya dan bandingkan hasilnya dengan hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan simulasi.



**Gambar 5.15** Rangkaian Penguat Transistor *Common Emitter* (CE)

### Penyelesaian

- 1) Telusuri jalur rangkaian yang dilalui oleh sinyal DC dan hubung-terbukaan (*open circuit*) komponen kapasitansi yang terpasang pada rangkaian transistor tersebut (Gambar 5.16).



**Gambar 5.16** Alur Sinyal DC pada Rangkaian Transistor BJT

- 2) Tegangan input basis  $V_{BB}$  dengan menggunakan hukum pembagian tegangan diperoleh sebesar

$$V_{BB} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{22 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \times 10 \text{ V} = 3,12 \text{ V}$$

- 3) Tegangan emitter ditentukan sebesar

$$V_E = 3,12 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 2,42 \text{ V}$$

- 4) Arus kolektor diperoleh sebesar

$$I_C = \frac{2,42 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 2,42 \text{ mA}$$

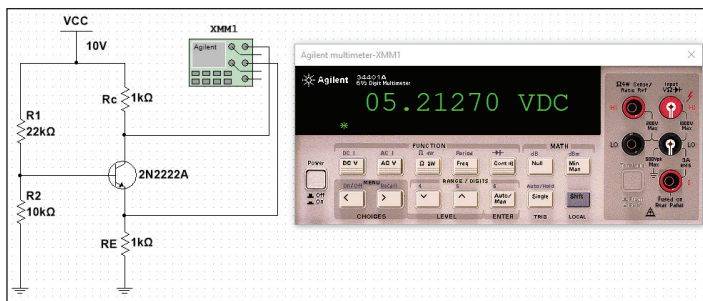
- 5) Tegangan kolektor diperoleh sebesar

$$V_C = 10 \text{ V} - (2,42 \text{ mA}) (1 \text{ k}\Omega) = 7,58 \text{ V}$$

- 6) Pada akhirnya, tegangan kolektor emitter diperoleh sebesar

$$V_{CE} = 7,58 \text{ V} - 2,42 \text{ V} = 5,16 \text{ V}$$

Dari hasil simulasi dengan menggunakan Multisim, diperoleh tegangan  $V_{CE}$  sebesar 5,264 volt (artinya cukup mendekati hasil perhitungannya) seperti yang ditunjukkan Gambar 5.17.



**Gambar 5.17** Hasil Simulasi Multisim Pembiasan Model Sinyal DC

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan  $V_{CE}$  yang diperoleh relatif mendekati hasil perhitungannya, yaitu sebesar  $\pm 5,2$  volt.

Source code Matlab:

===== Common Emitter Amplifier dengan Rangkaian Pembagi Tegangan =====

% Input parameters

Re = 1000; % resistansi emiter (ohm)

R1 = 22000; % resistansi R1 (ohms)

R2 = 10000; % resistansi R2 (ohm)

hFE = 100; % Penguatan arus DC

Rc = 1000; % resistansi kolektor (ohm)

Vcc = 10; % tegangan DC power supply (volt)

b = hFE;

fprintf('\*\*\*\*\* Common Emitter Amplifier \*\*\*\*\*\n');

fprintf(' Given Parameters \n');

fprintf(' \*\*\*\*\*\n')

fprintf(' Resistor R1 = %d ohms\n', R1);

fprintf(' Resistor R2 = %d ohms\n', R2);

fprintf(' Resistor Kolektor = %d ohms\n', Rc);

fprintf(' Resistor Emiter = %d ohms\n', Re);

fprintf('\*\*\*\*\*\n');

===== Analisis model DC =====

% set up persamaan matrix %

R = [-(hFE+1)\*Re R2+(hFE+1)\*Re;

R1 R2];

V = [0.7

Vcc];

% Penyelesaian persamaan matrix %

I = (inv(R))\*V ;

I1 = I(1); % arus pada R1

I2 = I(2); % arus pada R2

```

% menghitung arus & tegangan transistor
Ib = I1 - I2;    % arus basis
Ic = b*Ib;      % arus kolektor
Ie = Ib+Ic;     % arus emiter
Ve = Ie*Re;     % tegangan emiter
Vb = Ve+0.7;    % tegangan basis
Vc = Vcc - Ic*Rc; % tegangan kolektor
Vce = Vc - Ve;  % tegangan kolektor emiter
VbUnloaded = Vcc*R2/(R1+R2);
%%% Hasil %%%
fprintf('\n***** Analisa Hasil Model DC *****\n');
fprintf('Tegangan Basis = %.2f volts\n', Vb);
fprintf('Tegangan Basis Tanpa Beban = %.2f volts\n', VbUnloaded);
fprintf('Tegangan Kolektor = %.2f volts\n', Vc);
fprintf('Tegangan Emiter = %.2f volts\n', Ve);
fprintf('Tegangan Kolektor Emiter = %.2f volts\n', Vce);
fprintf('Arus Basis = %.2f uA\n', Ib*1e6);
fprintf('Arus Kolektor = %.2f mA\n', Ic*1000);
fprintf('Arus Emiter = %.2f mA\n', Ie*1000);
fprintf('*****\n');

```

Dari hasil simulasi diperoleh nilai parameter-parameter rangkaian transistor bipolar, yaitu sebagai berikut.

<i>Tegangan Basis (<math>V_B</math>)</i>	: 2.97 volt
<i>Tegangan Kolektor (<math>V_C</math>)</i>	: 7.75 volt
<i>Tegangan Emiter (<math>V_E</math>)</i>	: 2.27 volt
<i>Tegangan Kolektor Emiter (<math>V_{CE}</math>)</i>	: 5.48 volt
<i>Arus Basis (<math>I_B</math>)</i>	: 22.48 uA
<i>Arus Kolektor (<math>I_C</math>)</i>	: 2.25 mA
<i>Arus Emiter (<math>I_E</math>)</i>	: 2.27 mA

Kesimpulannya adalah hasil antara perhitungan dan simulasi menunjukkan kedekatan hasil sehingga dapat dianalisis sebagai sebuah hasil yang terbukti benar dan sesuai.

## 2. Model Sinyal AC

Model pembiasan sinyal AC disebut juga model sinyal kecil (*small signal model*). Sebenarnya, pembiasan sinyal AC ini dilakukan untuk mengetahui kinerja penguatan transistor jika diberi masukan berupa sinyal bolak-balik yang menunjukkan bahwa model pembiasan ini merupakan tahap lanjut untuk menganalisis penguatan sinyal. Perbedaan utama dengan model pembiasan sinyal DC adalah pada model sinyal AC ini peranan frekuensi input perlu diperhitungkan karena peranan frekuensi cukup memberikan efek besar terhadap penentuan daerah penguatan minimal dan maksimalnya. Selain itu, keberadaan kapasitansi kapasitor dalam rangkaian seperti yang terlihat pada Gambar 5.18 memiliki peranan untuk menahan sinyal DC agar tidak ikut serta dikuatkan. Kapasitansi ini juga cukup penting ditempatkan karena memiliki kemampuan untuk menghubungkan masukan sinyal AC ke bagian rangkaian penguat transistor tanpa memengaruhi kondisi kinerja titik operasi kerja transistor.

Posisi komponen kapasitor dalam pembiasan model AC rangkaian transistor seperti Gambar 5.18 di atas dilakukan melalui tiga cara pendekatan berikut.

- 1) Saat pembiasan model DC, kapasitor dalam keadaan terbuka.
- 2) Saat pembiasan model AC, kapasitor dalam keadaan terhubung singkat
- 3) Pada pembiasan model AC perlu dibuat rangkaian penggantinya untuk memudahkan dalam mengukur sinyal penguatannya.

## 3. Rangkaian Pengganti Pembiasan Sinyal AC

Analisisnya sama seperti pada pembiasan sinyal DC, dalam menentukan nilai parameter-parameter transistor pada pembiasan model AC ini juga terdapat beberapa notasi dan definisi. Hal yang membedakannya adalah notasi nilai yang umumnya menggunakan huruf-huruf kecil.

- 1) Notasi Arus pada pembiasan model sinyal AC:  
 $i_e$ : arus AC emiter,  
 $i_c$ : arus AC kolektor, dan  
 $i_b$ : arus AC basis.
- 2) Notasi tegangan pada pembiasan model AC:  
 $v_e$ : tegangan AC emiter,  
 $v_c$ : tegangan AC kolektor, dan  
 $v_b$ : tegangan AC basis.
- 3) Notasi tegangan antar terminal pada pembiasan model AC:  
 $v_{be}$ : tegangan AC basis-emiter,  
 $v_{ce}$ : tegangan AC kolektor-emiter, dan  
 $v_{cb}$ : tegangan AC kolektor-basis.
- 4) Resistansi pada pembiasan model AC:

$r'_e$ : resistansi AC emiter,

dengan parameter  $r'_e$  ini cukup memberikan pengaruh terhadap penguatan sinyal *output* yang dinyatakan sebesar

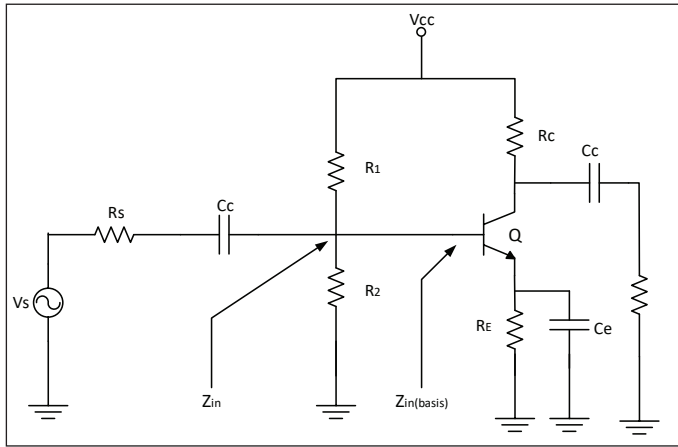
$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} \quad (5.15)$$

Nilai resistansi ac emiter ( $r'_e$ ) ini akan berubah akibat perubahan arus emitter sinyal searah  $I_E$ , sedangkan nilai 25 mV menunjukkan standar tegangan transistor pada suhu kamar yang dinotasikan sebagai  $V_T$ .

- 5) Beta AC ( $\beta = h_{fe}$ ):

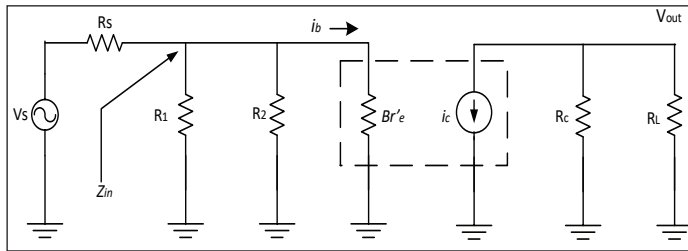
Notasi ini menunjukkan nilai penguatan arus AC yang memiliki perbedaan dengan penguatan arus DC, tetapi jika kita bandingkan berdasarkan pendekatan nilainya, kedua penguatan ini tidak berbeda jauh besarnya. Besarnya penguatan arus AC ini dinyatakan sebesar

$$\beta = h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}. \quad (5.16)$$



**Gambar 5.18** Dasar Rangkaian Penguat Transistor BJT

Rangkaian penguat transistor seperti Gambar 5.18 dapat dibuat rangkaian penggantinya seperti yang ditunjukkan Gambar 5.19.



**Gambar 5.19** Rangkaian Pengganti AC Penguat Dasar transistor BJT

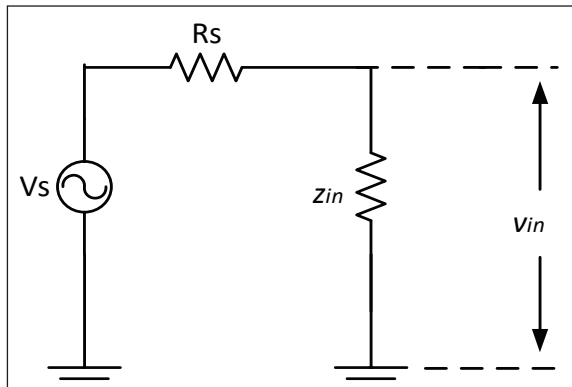
Sumber input sinyal AC  $v_s$  ini sebelum dikuatkan terlebih menyesuaikan dengan rangkaian penyesuai impedansi input yang besarnya ditentukan oleh resistansi  $R_1$  dan  $R_2$  yang dinyatakan sebagai  $Z_{in}$ . Hal ini menunjukkan bahwa  $v_s$  harus mampu mengendalikan nilai  $Z_{in}$  termasuk juga adanya dampak dari hasil pembiasan pada bagian resistansi  $R_1$  dan  $R_2$  yang terhubung paralel satu sama lain agar pelemahan sinyal tidak terjadi. Untuk itu, nilai  $Z_{in}$  ini dapat ditentukan sebesar

$$z_{in} = R_1 // R_2 // \beta r'_e \quad (5.17)$$

Parameter  $\beta r'_e$  menunjukkan nilai impedansi basis  $Z_{in(basis)}$ .  
 Karena, tegangan masukan  $v_{in}$  pada bagian kaki basis merupakan  
 sinyal masukan sebenarnya yang nilainya dapat ditentukan sebesar

$$v_{in} = \frac{z_{in}}{R_s + z_{in}} \times V_s. \quad (5.18)$$

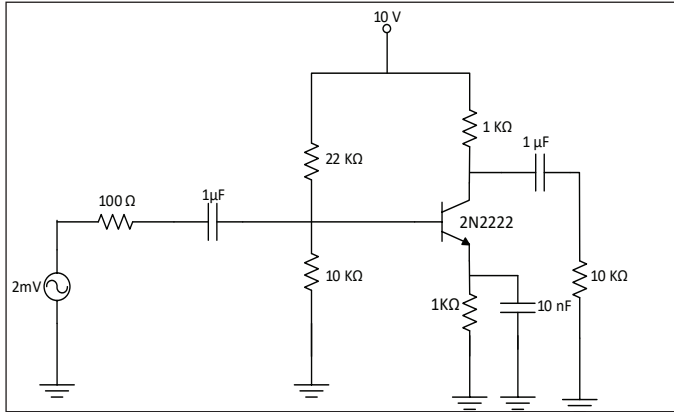
Nilai  $v_{in}$  ini nyatanya harus lebih kecil dari  $v_s$  karena di-  
 pengaruhi oleh besarnya  $Z_{in}$  yang menghasilkan pelemahan sinyal  
 masukan. Keadaan seperti ini sering disebut analisis sinyal kecil  
 rangkaian transistor (*small signal circuit analysis*) yang secara model  
 rangkaiannya dapat nyatakan seperti pada Gambar 5.20.



**Gambar 5.20** Pengaruh Sinyal AC terhadap Impedansi  
 Input Rangkaian

### Contoh 5.6

Sebuah rangkaian tersusun seperti yang ditunjukkan pada Gambar  
 5.21. Tentukanlah nilai impedansi masukan dan tegangan masukan  
 sebenarnya yang nantinya akan dikuatkan oleh rangkaian penguat  
 jika  $\beta = h_{fe} = 100$



**Gambar 5.21** Rangkaian Penguat Transistor BJT Sederhana

### Penyelesaian

- 1) Kita tinjau terlebih dahulu Contoh 5.5 sebelumnya, ketika kita mengasumsikan bahwa arus kolektor sebanding dengan arus emiter  $I_E$ , yaitu 2,42 mA sehingga nantinya akan ditentukan nilai resistansi AC emiter  $r'_e$  yang membantu mendapatkan impedansi masukan penguat secara akurat,

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{2,42 \text{ mA}} = 10,33 \Omega$$

- 2) Impedansi masukan pada sisi basis kita tentukan terlebih dahulu sebelum menentukan impedansi masukan rangkaian penguat sebesar

$$Z_{in(basis)} = \beta r'_e = 100 (10,33 \Omega) = 1033 \Omega.$$

Kemudian impedansi masukan rangkaian penguat ini dapat ditentukan sebesar

$$z_{in} = R_1 // R_2 // \beta r'_e = 22 \text{ k}\Omega // 10 \text{ k}\Omega // 1,033 \text{ k}\Omega = 898 \Omega$$

sehingga tegangan masukan sebenarnya yang dikuatkan diperoleh sebesar

$$v_{in} = \frac{898 \Omega}{100 \Omega + 898 \Omega} \times 2 \text{ mV} = 1,79 \text{ mV}$$

Jadi sinyal masukan AC yang sebenarnya akan dikuatkan oleh rangkaian penguat adalah sebesar 1,79 mV.

## G. Rangkaian Penguat Transistor Bipolar

Penguatan sinyal menunjukkan perbandingan hasil penguatan *output* penguat terhadap sinyal masukannya. Jika nilai yang dikuatkan tersebut adalah tegangan, terjadi penguatan tegangan yang didefinisikan sebagai hasil nilai perbandingan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan dengan syarat bahwa nilai tegangan keluaran harus lebih besar dari tegangan masukannya. Adapun pendekatan persamaan penguatannya dinyatakan sebesar

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (5.19)$$

Jika kita merujuk pada Gambar 5.17 sebelumnya dengan melihat pada arus yang terlibat dalam setiap percabangan, penguatan seperti yang dinyatakan oleh persamaan (5.19) juga dapat dikembangkan menjadi persamaan (5.20):

$$A_v = \frac{\beta i_b (R_C // R_L)}{i_b \beta r'_e} = \frac{(R_C // R_L)}{r'_e} \quad (5.20)$$

$R_C // R_L \approx r_c$  ini menunjukkan resistansi kolektor AC sehingga persamaan (5.20) dapat kita tulis kembali menjadi persamaan (5.21):

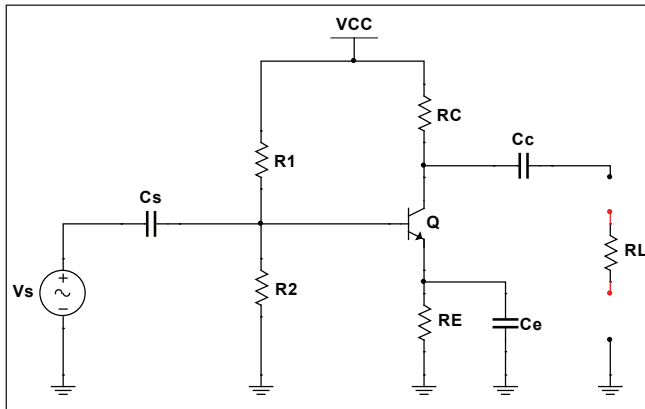
$$A_v = \frac{r_c}{r'_e} \quad (5.21)$$

Jadi, definisi lain dari penguatan adalah perbandingan resistansi kolektor AC terhadap resistansi AC emiter, seperti yang sudah dibahas sebelumnya terkait dengan tahapan penguatan sinyal yang mampu dihasilkan dari konfigurasi jaringan rangkaian transistor. Bentuk hubungan dalam jaringan ini disebut hubungan bersama atau *common*. Pada pembahasan ini kita akan menggambarkan tiga jenis konfigurasi hubungan bersama rangkaian transistor yang bisa dijadikan pilihan dalam merancang sebuah penguat transistor bipolar. Ketiga jenis konfigurasi ini antara lain penguatan emiter bersama

(*common emitter*), penguatan basis bersama (*common base*), dan penguatan kolektor bersama (*common collector*).

### 1. Penguatan Emiter Bersama (*Common Emitter*)

Konfigurasi rangkaian penguat emiter bersama merupakan jenis rangkaian penguat transistor sangat populer dan sering banyak diaplikasikan untuk penguatan sinyal karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya mampu menghasilkan penguatan lebih besar dan kelebihan lain memiliki konsistensi kestabilan penguatan sangat baik dibandingkan dengan penguat sejenis lainnya. Rangkaian penguat *common emitter* dapat kita analisis dalam dua keadaan, yaitu penguat dalam keadaan tanpa beban (*unloaded*) dan berbeban (*loaded*). Umumnya rangkaian penguat emiter bersama lebih banyak digunakan untuk menganalisis karakteristik penguatan tegangan meskipun sebenarnya bisa juga digunakan untuk menganalisis penguatan daya atau penguatan arus.



**Gambar 5.22** Model Dasar Rangkaian Penguat *Common Emitter* Tanpa Beban

Penguatan tegangan saat tidak ada beban seperti pada rangkaian Gambar 5.22 dapat dinyatakan sebesar:

$$A_v = \frac{R_C}{r_e}; \quad (5.22)$$

sedangkan penguatan tegangan saat beban disertakan diperoleh sesuai persamaan (5.21) di atas. Selanjutnya, jika kita asumsikan bahwa kapasitor *bypass*  $C_e$  tidak dipasang pada rangkaian Gambar 5.22, penguatan tanpa dan dengan beban dapat dinyatakan masing-masing sebesar

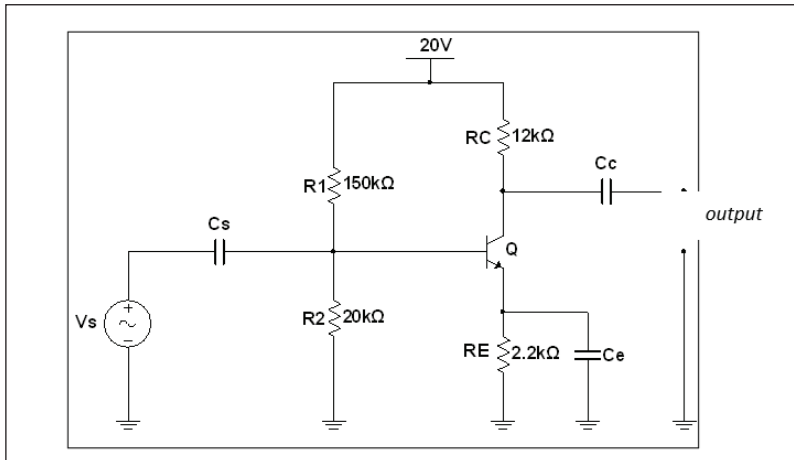
$$A_V = \frac{R_C}{r'_e + R_E} \quad (\text{tanpa beban}) \quad \text{dan} \quad (5.23)$$

$$A_V = \frac{r_C}{r'_e + R_E} = \frac{R_C \parallel R_L}{r'_e + R_E} \quad (\text{dengan beban}) \quad (5.24)$$

### Contoh 5.7

Dari rangkaian *common emitter* pada Gambar 5.23 tanpa beban, tentukan penguatan tegangan saat

- kapasitor *bypass* dilepas,
- kapasitor *bypass* dipasang.



**Gambar 5.23** Rangkaian Penguat Emiter Bersama dengan Tanpa Beban

### Penyelesaian

Pertama-tama kita cari dahulu arus emiter  $I_E$  untuk mendapatkan resistansi AC emitter  $r'_e$  dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) tegangan DC yang melalui basis di  $R_2$ :

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{cc} = \frac{20 \text{ K}\Omega}{150 \text{ K}\Omega + 20 \text{ K}\Omega} \times 20 \text{ V} = 2,35 \text{ V},$$

- 2) tegangan DC yang melalui  $R_E$ :

$$V_E = V_{BB} - V_{BE} = 2,35 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,65 \text{ V}, \text{ dan}$$

- 3) arus DC yang melalui emitter:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,65 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} = 0,75 \text{ mA}$$

maka

- 4) resistansi AC yang melalui emitter:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{0,75 \text{ mA}} = 33,3 \Omega.$$

Dengan demikian,

- a) saat kapasitor *bypass* dilepas, penguatannya akan sebesar

$$A_V = \frac{12 \text{ k}\Omega}{33,3 \Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = 5,38 \text{ dan}$$

- b) saat kapasitor *bypass* dipasang, maka penguatannya akan sebesar:

$$A_V = \frac{12 \text{ k}\Omega}{33,3 \Omega} = 360$$

Catatan: Penguatan maksimum akan didapatkan ketika rangkaian penguat emitter bersama menempatkan sebuah kapasitor *bypass* di bagian kaki emitter yang terpasang paralel dengan resistansi emitter  $R_E$  yang menyebabkan penguatan menjadi lebih besar.

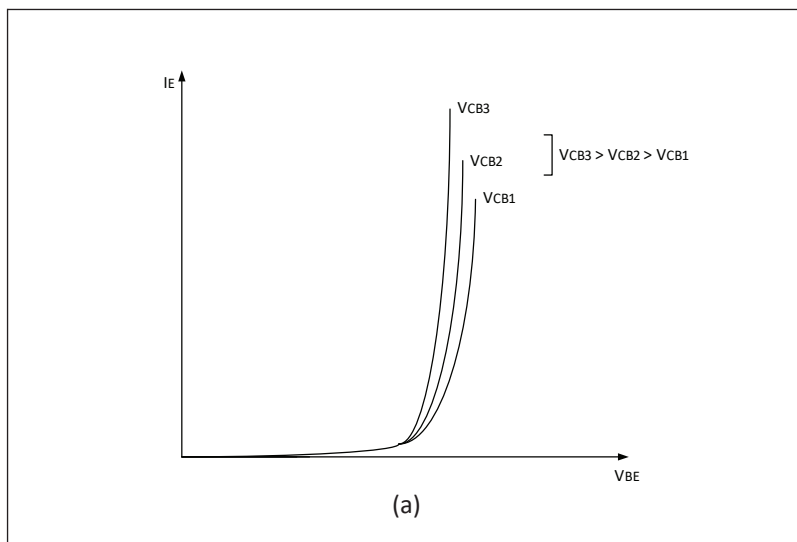
## 2. Penguatan Basis Bersama (*Common Base*)

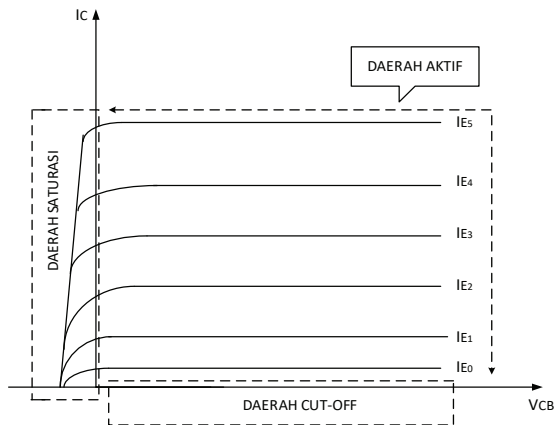
Konfigurasi rangkaian penguat basis bersama pada prinsipnya memiliki karakteristik relatif sama dengan penguatan emitter bersama, yaitu dapat diaplikasikan untuk menganalisis penguat sinyal. Hal ini

dapat dianalisis berdasarkan tiga gagasan dasarnya, yaitu sebagai berikut.

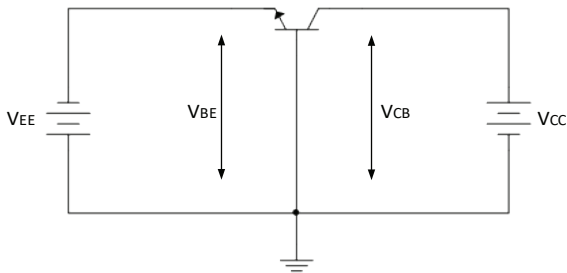
- 1) Pada keadaan normal, arus saat hubungan basis-emiter dibuat maju (*forward bias*) dan arus saat hubungan basis-kolektor dibuat mundur (*reverse bias*).
- 2) Kedudukan arus emiter  $I_E$  selalu hampir sebanding arus kolektor  $I_C$  ( $I_E \approx I_C$ ).
- 3) Nilai arus basis  $I_B$  dipastikan akan selalu bernilai sangat kecil jika dibandingkan dengan arus emiter dan arus kolektor.

Sama seperti pada pembahasan rangkaian emiter sebelumnya, gagasan dasar ini bisa dijadikan referensi untuk menganalisis penguatan sinyal pada rangkaian basis bersama yang hasil keluarannya diperoleh dari hasil analisis sifat masukan dan keluaran rangkaianannya. Karakteristik ini dapat diilustrasikan melalui kurva karakteristik basis bersama seperti yang ditunjukkan Gambar 5.24.





(b)



(c)

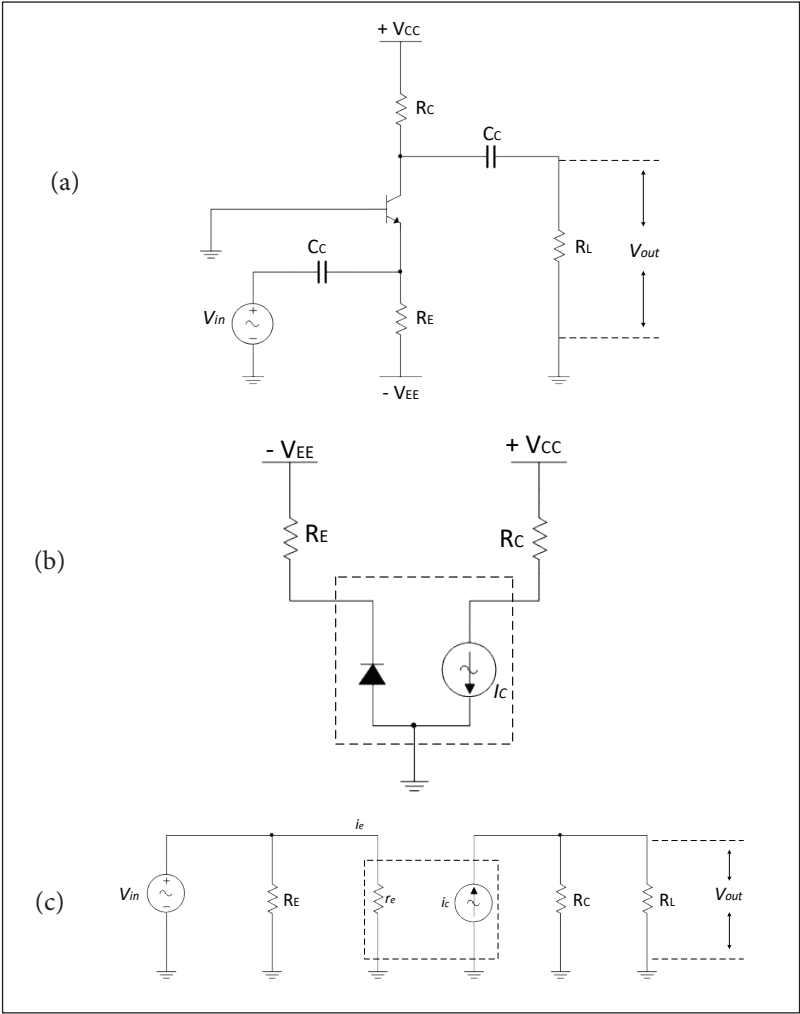
Keterangan: (a) Karakteristik Sinyal Masukan, (b) Karakteristik Sinyal Keluaran, (c) Rangkaian Dasar Basis Bersama

Sumber: Malvino & Bates (2016)

**Gambar 5.24** Model Dasar Rangkaian *Common Base*

Analisis pembiasan model DC dan AC pada rangkaian basis bersama perlu dilakukan untuk mengetahui dan menentukan karakteristik penguatan yang mungkin bisa dihasilkan oleh jenis rangkaian ini. Untuk menentukan bentuk pembiasannya, pada tahap awal perlu digambarkan rangkaian dasar penguat basis bersama

yang merujuk pada Gambar 5.24c dan menggambarkan rangkaian ekuivalen atau pengganti model AC-nya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.25.



Keterangan: (a) Rangkaian Penguat CB, (b) Ekuivalen Model DC, (c) Ekuivalen Model AC  
Sumber: Malvino & Bates (2016)

**Gambar 5.25** Rangkaian Pengganti AC Common Base

Melalui pendekatan matematis, secara praktis besarnya nilai pembiasan dan penguatan melalui rangkaian basis bersama ini dimulai dianalisis dari bagian masukan dan keluaran sehingga berdasarkan Gambar 5.25c, penguatan dapat dinyatakan sebesar

$$A_v = \frac{v_{in}}{v_{out}}; \quad (5.25)$$

dengan arus AC emiter sebagai arus masukan penguat besarnya yang dapat dinyatakan sebesar

$$i_e = \frac{v_{in}}{r'_e} \quad (5.26)$$

Sementara itu, arus AC kolektor sebagai arus keluaran penguat besarnya dapat dinyatakan sebesar

$$i_c = \frac{v_{out}}{(R_C // R_L)} \quad (5.27)$$

Kemudian, dengan menyubstitusikan persamaan (5.26) dan (5.27) ke persamaan (5.25), diperoleh nilai penguatan sebesar

$$A_v = \frac{(R_C // R_L)}{r'_e} \quad (5.28)$$

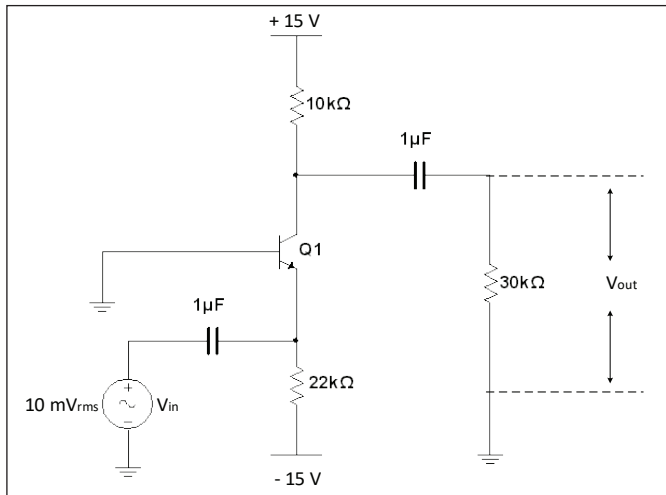
Jika diperhatikan dengan saksama, persamaan (5.28) ini sama persis dengan persamaan (5.21) pada analisis emiter bersama, tetapi pada dasarnya ada sedikit perbedaan cara perhitungan. Dalam perhitungan rangkaian basis bersama ini, pada penentuan nilai resistansi AC emiter  $r'_e$ , terlebih dahulu diperlukan penentuan nilai perubahan arus DC di bagian emiter  $I_E$  menggunakan persamaan (5.29):

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}. \quad (5.29)$$

Nilai  $V_{BE}$  ini adalah nilai konstanta yang tergantung dari jenis bahan komponen penyusunnya. Jika bahan silikon yang digunakan, nilai tegangan berada di antara 0,6 V–0,7 V, sedangkan untuk bahan germanium di kisaran 0,2V–0,3V.

### Contoh 5.8

Diberikan sebuah rangkaian transistor BJT basis bersama berbahan dasar silikon seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.26. Tentukan arus AC emitter, tegangan keluaran dan penguatan sinyalnya.



Gambar 5.26 Rangkaian Dasar Penguat *Common Base*

### Penyelesaian

- 1) Arus AC emitter  $i_e$  ini diperoleh dengan terlebih dahulu menetapkan nilai  $r'_e$  dan arus DC emitter  $I_E$  sebagai berikut.

$$I_E = \frac{15 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{22 \text{ k}\Omega} = 0,65 \text{ mA}$$

kemudian kita peroleh  $r'_e$  sebesar

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{0,65 \text{ mA}} = 38,5 \Omega$$

sehingga arus ac emitter dapat ditentukan adalah

$$i_e = \frac{10 \text{ mV}_{rms}}{38,5 \Omega} = 0,259 \text{ mA}$$

- 2) Karena  $i_c \approx i_e$ , tegangan keluaran penguat ini adalah sebesar

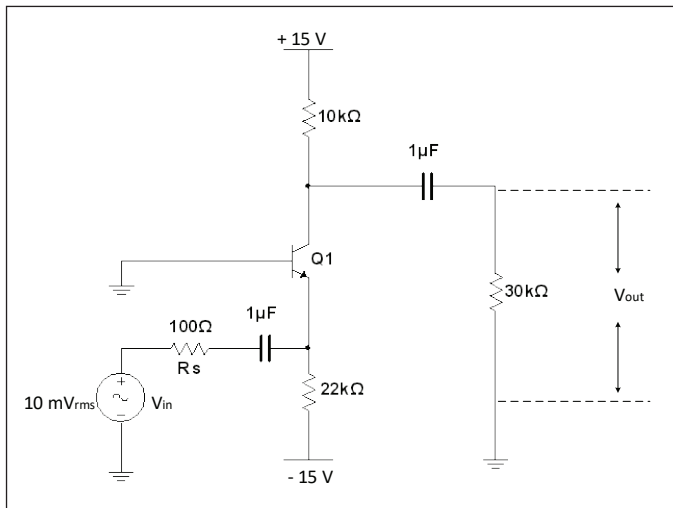
$$v_{out} = 0,259 \text{ mA} \times (10 \text{ k}\Omega // 30 \text{ k}\Omega) = 1,942 \text{ V.}$$

- 3) Nilai penguatan akhir yang dihasilkan adalah

$$A_v = \frac{1,942 \text{ V}}{10 \text{ mV}} = 194,2$$

### Contoh 5.9

Jika pada soal seperti contoh 5.8 kita terapkan resistansi sumber  $R_s$  sebesar  $100 \Omega$  seperti yang diperlihatkan gambar 5.27, maka bagaimanakah nilai penguatan sekarang dan bandingkan hasilnya dengan soal contoh 5.8 di atas.



**Gambar 5.27** Rangkaian Penguat *Common Base* dengan Resistansi Sumber

### Penyelesaian:

Prinsipnya cukup mudah dalam memahami bagaimana resistansi sumber ini cukup memberikan pengaruh setidaknya terhadap penguatan yang dihasilkan. Pertama, nilai  $R_s$  ini secara nyata ter-

hubung langsung dengan terminal emitter yang juga memiliki nilai resistansi ac emitter sebagai sumber masukan sinyal sehingga dampaknya menghasilkan suatu kombinasi penjumlahan antara resistansi pada terminal emitter secara total yaitu  $R_s + r_e'$ . Kedua, terkait dengan tujuan penguatan yang dicapai maka dengan merujuk pada persamaan 5.23 dan 5.24 sebelumnya dapat diterapkan guna mencari hubungan penguatan terhadap besaran-besaran resistansi sumber dengan resistansi di sisi terminal keluarannya. Karena itu, penguatan sinyal dengan melibatkan resistansi sumber dapat diperoleh dari persamaan:

$$A_v = \frac{(R_C // R_L)}{R_s + r_e'}$$

Sehingga diperoleh penguatannya sebesar:

$$A_v = \frac{(10k\Omega // 30k\Omega)}{100\Omega + 38,5\Omega} = 54,13$$

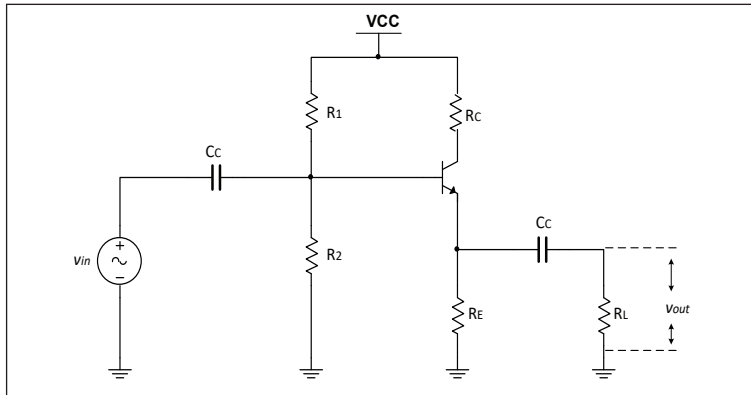
Sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya resistansi sumber mengakibatkan terjadinya perubahan nilai penguatan menjadi lebih kecil dibandingkan saat resistansi sumber ini tidak diperhitungkan.

### 3. Penguatan Kolektor Bersama (*Common Collector*)

Rangkaian kolektor bersama ini lebih dikenal juga sebagai pengikut emiter (*emitter follower*) karena memiliki beberapa ciri dan sifat, di antaranya sebagai berikut.

- 1) Sinyal masukan diberikan pada sisi basis dan sinyal keluarannya diambil dari sisi emitter.
- 2) Penguatan yang dihasilkannya tidak lebih dari hanya satu kali penguatan, bahkan untuk beberapa kasus tertentu, nilai penguatannya bisa berkurang dari satu kali.
- 3) Fase sinyal keluaran sama dengan fase sinyal masukannya, yaitu sefase.
- 4) Memiliki impedansi masukan cukup tinggi dan impedansi keluaran sangat kecil sehingga kemampuannya dalam menghasilkan penguatan arus sangat besar menyerupai rangkaian emiter ber-

sama. Karena alasan inilah biasanya rangkaian pengikut emiter sering banyak diaplikasikan sebagai penguat penyangga (*buffer*).



**Gambar 5.28** Rangkaian Dasar Penguat Transistor *Common Collector* (CC)

Rangkaian kolektor bersama pada Gambar 5.28 menunjukkan sebuah rangkaian pengikut emiter yang mampu menghasilkan variasi arus dan tegangan keluaran pada  $R_E$  di sisi emiter.

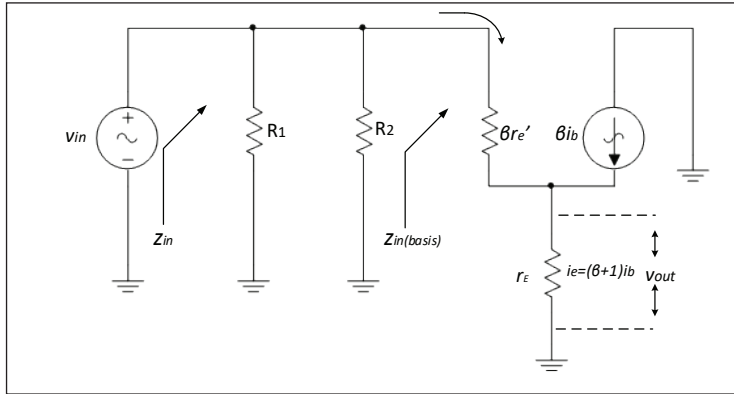
Untuk menganalisis pembiasan AC pada rangkaian pengikut emiter ini, diperlukan rangkaian ekuivalen pengganti model AC-nya agar lebih memudahkan kita dalam menentukan nilai penguatannya. Rangkaian ekuivalen AC pengikut emiter ini dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 5.29.

Berdasarkan rangkaian ekuivalen AC kolektor bersama ini dapat digambarkan bahwa sinyal AC masukan menghasilkan arus AC basis  $i_b$  dan arus AC emiter  $i_e$  melalui resistansi  $r_E$  sehingga tegangan masukan  $v_{in}$  dapat dinyatakan sebesar

$$v_{in} = i_b \beta r'_e + i_e r_E \quad (5.30)$$

dengan besarnya  $r_E$  ini ditentukan dari hubungan paralel antara resistansi emiter  $R_E$  dan tahanan beban  $R_L$ , yaitu

$$r_E = R_E \parallel R_L. \quad (5.31)$$



**Gambar 5.29** Rangkaian Ekuivalen Penguat Transistor *Common Collector*

Sementara itu, tegangan keluaran  $v_{out}$  diperoleh melalui terminal di sisi emiter, yaitu

$$v_{out} = i_e r_E. \quad (5.32)$$

Kemudian, dengan cara menghubungkan antara persamaan (5.29) sampai dengan persamaan (5.32), diperoleh nilai penguatan rangkaian kolektor bersama,

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{r_E}{r_E + r_e'}. \quad (5.33)$$

Seperti yang telah dijelaskan dalam pembahasan tentang penguatan pada rangkaian emiter bersama sebelumnya bahwa tidak hanya parameter arus yang menentukan faktor penguatan, tetapi juga ada parameter lain, antara lain, impedansi rangkaian yang merupakan faktor penentu penguatan terutama berkaitan dengan distribusi dalam rangkaian penguat. Karena itu, dengan melihat rangkaian ekuivalen kolektor bersama seperti yang telah digambarkan, impedansi pada sisi masukan basis rangkaian dapat diprediksikan nilainya sebesar

$$Z_{in(basis)} = \frac{v_{in}}{i_b} = \frac{i_e \beta r_e' + i_e r_E}{i_b}. \quad (5.34)$$

Dengan mengasumsikan  $i_c \approx i_e$ , persamaan (5.34) secara sederhana dapat dinyatakan kembali menjadi

$$z_{in(basis)} = \beta(r_E + r'_e) \quad (5.35)$$

Ketika  $r_E$  lebih besar terhadap  $r'_e$ , akibatnya impedansi masukan pada terminal basis  $z_{in(basis)}$  akan sebanding dengan  $\beta r_E$  sehingga persamaan (5.35) akan menjadi

$$z_{in(basis)} = \beta r_E. \quad (5.36)$$

Adapun impedansi masukan penguat  $z_{in}$  pengikut emiter dapat ditentukan dengan mudah mengikuti rangkaian ekuivalen dan persamaan (5.36), yaitu sebesar

$$z_{in} = R_1 // R_2 // z_{in(basis)}. \quad (5.37)$$

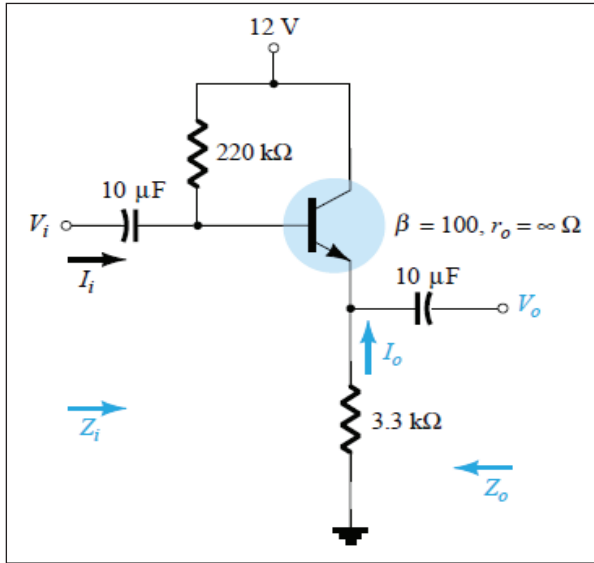
Selain melihat sisi impedansi masukan, tidak salahnya apabila impedansi keluaran rangkaian penguat jenis ini juga perlu diperhitungkan dengan melihat pada terminal emiter sebagai terminal keluaran. Berdasarkan analisis rangkaian ekuivalen AC-nya dapat digambarkan bahwa adanya rangkaian ekuivalen ini sangat membantu mempermudah analisis perhitungan penguatan merujuk pada impedansi keluaran penguat ini. Untuk memperoleh penguatan maksimal, diperlukan perancangan penguat agar arus emiter dibuat lebih besar terhadap resistansinya sehingga berdampak terhadap nilai impedansi keluaran yang dikontrol agar berharga kecil. Dari pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis besaran impedansi keluaran  $z_{out}$  penguat pengikut emiter ini sebesar

$$z_{out} = r_E // r'_e. \quad (5.38)$$

### Contoh 5.10

Sebuah rangkaian penguat kolektor bersama (*common collector*) disusun seperti Gambar 5.30. Tentukan parameter-parameter penguatan berikut:

- resistansi AC emiter ( $r'_e$ ),
- impedansi masukan penguat ( $z_{in}$ ),
- impedansi keluaran ( $z_{out}$ ), dan
- penguatan tegangan ( $A_v$ )



Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 5.30** Modifikasi Rangkaian Penguat Transistor *Common Collector*

### Penyelesaian

- Nilai  $r'_e$  diperoleh dari rumusan

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E};$$

dengan  $I_E \approx i_e \approx (\beta + 1)i_b$  dan arus pada basis ditentukan terlebih dahulu dari persamaan berikut:

$$i_b \approx I_B \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

sehingga diperoleh

$$i_b \approx I_B \approx \frac{12\text{ V} - 0,7\text{ V}}{220\text{ k}\Omega + (100 + 1)3,3\text{ k}\Omega} = 20,42\text{ }\mu\text{A}.$$

Kemudian, arus emiter diperoleh sebesar

$$I_E \approx i_e \approx (100 + 1)(20,42\text{ }\mu\text{A}) = 2,06\text{ mA}.$$

Selanjutnya, resistansi AC emiter didapatkan sebesar

$$r'_e = \frac{25\text{ mV}}{2,06\text{ mA}} = 12,13\text{ }\Omega.$$

- b) Kita perlu menentukan impedansi masukan rangkaian  $z_{in}$  yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$z_{in} = R_1 // R_2 // z_{in(basis)} = R_B // z_{in(basis)}.$$

Namun, sebelumnya kita tentukan tentukan impedansi sisi basis sebesar:

$$z_{in(basis)} = \beta r'_e.$$

Pada rangkaian ini resistansi beban diasumsikan tak terhingga maka  $r'_E \approx R_E$  sehingga impedansi sisi basis sekarang diperoleh sebesar:

$$z_{in(basis)} = (100)(3,3\text{ k}\Omega) \cong 330\text{ k}\Omega.$$

Dengan demikian, impedansi masukan rangkaian penguat diperoleh sebesar

$$z_{in} = 220\text{ k}\Omega // 330\text{ k}\Omega \cong 132\text{ k}\Omega.$$

- c) Impedansi keluaran rangkaian  $z_{out}$  kita tentukan dari persamaan

$$z_{out} = r_E // r'_e \cong R_E // r'_e$$

sehingga diperoleh nilai impedansi *output* sebesar

$$z_{out} = 3,3\text{ k}\Omega // 12,13\text{ }\Omega \cong 12,08\text{ }\Omega \cong r'_e.$$

- d) Nilai penguatan tegangan diperoleh menggunakan persamaan

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{r_E}{r_E + r'_e} \cong \frac{R_E}{R_E + r'_e}$$

sehingga akhirnya penguatan rangkaian diperoleh sebesar

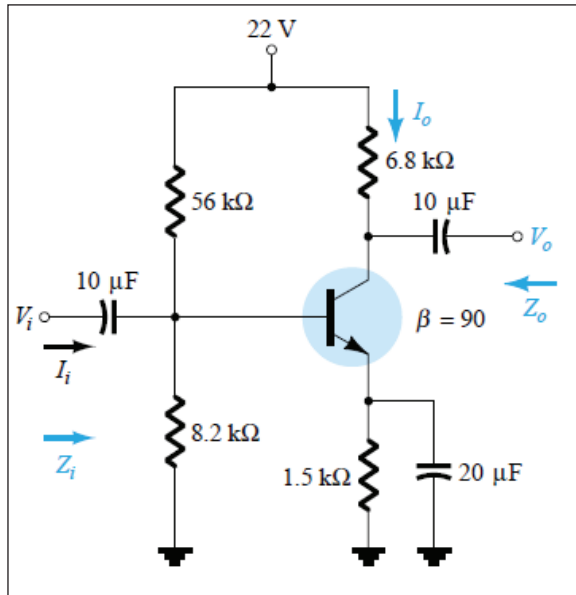
$$A_v \cong \frac{3,3 \text{ k}\Omega}{3,3 \text{ k}\Omega + 12,13 \text{ }\Omega} \cong 0,996 \cong 1.$$

Berdasarkan hasil perhitungan pada contoh soal ini dapat dinyatakan bahwa sesuai sifatnya, rangkaian pengikut emiter lebih relevan dan cocok diterapkan sebagai rangkaian penguat penyangga (*buffer*) saja karena penguatannya tidak lebih dari satu kali.

Pada subbab kali ini kita akan menampilkan beberapa contoh soal kasus untuk merancang, menghitung, dan mengaplikasikan sebuah rangkaian penguat emiter bersama sederhana. Hal ini membantu bagi para pemula khususnya dalam menganalisis sifat rangkaian penguat secara cermat dan akurat sesuai target yang diharapkan. Secara nyata tentu tidak mudah untuk menghasilkan penguatan persis sama sesuai hasil idealnya, tetapi setidaknya hal tersebut memberikan kepada kita pengetahuan dasar tentang cara membuat tahapan-tahapan perancangan sebuah rangkaian penguat mulai dari awal sampai kemudian mampu diterapkan secara baik di kehidupan nyata. Penulis mengambil satu contoh kasus di sini dengan menghadirkan beberapa pendekatan sederhana, tetapi tentu tidak melenceng terlalu jauh dari kaidah-kaidah pendekatan yang selama ini para perancang dan peneliti lakukan sebelumnya.

### Contoh Kasus Khusus

Sebuah rangkaian emiter bersama atau *common emitter* memiliki kemampuan untuk menguatkan sinyal masukan yang susunan rangkaiannya ditunjukkan seperti Gambar 5.31 dengan mengasumsikan bahwa resistansi keluaran AC kolektor ( $r_n$ ) sebanding dengan resistansi beban ( $R_L$ ) bernilai tak terhingga ( $\infty$ ) dan  $r_o \cong R_L = 50 \text{ k}\Omega$ . Dari informasi ini, tentukan (a) impedansi masukan, (b) impedansi



Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 5.31** Rangkaian Penguat Emiter Bersama (*Common Emitter*)

keluaran, (c) penguatan dan (d) tegangan keluaran jika pada sisi masukannya diberi tegangan 2 mV.

### Penyelesaian

Dari informasi soal kasus ini, kita gunakan dua pendekatan perhitungannya, yaitu saat rangkaian penguat tidak terpasang beban dan saat terpasang beban.

- 1) Pendekatan ke-1
- a) Nilai penguatan dirumuskan sebagai

$$A_v = \frac{(R_C // R_L)}{r'_e}.$$

Karena  $r_o \cong R_L = \infty$ , nilai penguatan sekarang menjadi

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

sehingga perlu ditentukan terlebih dahulu resistansi AC emiter

$$V_{BE} = \frac{8,2 \text{ k}\Omega}{56 \text{ k}\Omega + 8,2 \text{ k}\Omega} \times (22 \text{ V}) = 2,81 \text{ V},$$

$$I_E = \frac{2,81 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1,5 \text{ k}\Omega} = 1,41 \text{ mA}.$$

Kemudian didapatkan nilai resistansi emiternya sebesar

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{1,41 \text{ mA}} = 17,73 \Omega.$$

Akhirnya, impedansi masukan  $z_{in}$  diperoleh, yaitu

$$z_{in} = 56 \text{ k}\Omega // 8,2 \text{ k}\Omega // (90)(17,73 \Omega) = 1,3 \text{ k}\Omega.$$

- b) Impedansi keluaran  $z_{out}$  rangkaian emitter bersama dirumuskan sebagai berikut:

$$z_{out} = R_C // r_o \cong R_C // R_L.$$

Karena  $r_o \cong \infty$ , impedansi keluaran sekarang menjadi

$$z_{out} = R_C = 6,8 \text{ k}\Omega.$$

- c) Karena  $r_o \cong R_L = \infty$ , nilai penguatan sekarang menjadi

$$A_v = \frac{R_C}{r'_e} = \frac{6,8 \text{ k}\Omega}{17,73 \Omega} = 383,53.$$

- d) Nilai Tegangan keluarannya diperoleh sebesar

$$v_{out} = A_v v_{in} = (383,53)(2 \text{ mV}) = 767,06 \text{ mV}.$$

## 2) Pendekatan ke-2

Berbeda dengan analisis yang pertama, pada analisis kedua ini kita mengasumsikan nilai resistansi beban dinyatakan sebesar  $r_o \cong R_L = 50 \text{ k}\Omega$  sehingga kita akan mengetahui pengaruh ada tidaknya nilai beban terhadap perubahan nilai akhir penguat. Parameter penguat yang cukup berpengaruh akibat adanya resistansi beban ini adalah  $z_{out}$ , penguatan  $A_v$ , dan tentunya tegangan keluaran  $v_{out}$ .

- a) Impedansi masukan  $z_{in}$  rangkaian akan bernilai sama pada hasil analisis pertama dan kedua sehingga tidak memerlukan perhitungan kembali.

- b) Karena nilai resistansi beban diketahui besarnya,  $z_{out}$  dihitung dengan

$$z_{out} = R_C // r_o \cong R_C // R_L = 6,8 \text{ k}\Omega // 50 \text{ k}\Omega = 5,98 \text{ k}\Omega.$$

- c) Penguatannya diperoleh sebesar

$$A_v = \frac{(6,8 \text{ k}\Omega // 50 \text{ k}\Omega)}{17,73 \Omega} = 337,28.$$

- d) Setelah itu, tegangan keluaran saat nilai beban diketahui diperoleh sebesar

$$v_{out} = (337,28)(2 \text{ mV}) = 674,56 \text{ mV}.$$

Catatan: Sangat terlihat peranan resistansi beban cukup memberikan perubahan level penguatan tegangan yang dihasilkan. Ketika sebuah penguat terpasang beban, penguatan akan mengalami penurunan dikarenakan adanya efek pembebanan (*loading effect*).

## Penyelesaian Kasus

### Kasus 1

Sebuah penguat transistor pada dasarnya menghasilkan level sinyal *output* lebih besar terhadap sinyal masukannya, tetapi secara fakta, tidak sedikit justru sebuah rangkaian penguat transistor tidak meng-

hasilkan penguatan besar, bahkan sering kali mengalami pelemahan. Lalu, di mana letak permasalahannya? Pertama, permasalahan bisa terjadi karena pembiasan transistor tidak menghasilkan penguatan arus terutama saat resistansi-resistansi di sisi basis tidak tepat pemasangannya atau terbalik memasangnya. Kedua, masalah parameter penguatan arus transistor bipolar yang diwakili oleh nilai  $h_{fe}$  ( $\beta_{ac}$ ) sebaiknya berada di kisaran nilai lebih besar dari 200 ( $h_{fe} \geq 200$ ) seperti yang ditunjukkan gambar 5.32.

Disarankan untuk merancang sebuah penguat transistor bipolar dengan penguatan maksimum, maka lebih penting jika terlebih dahulu dicek nilai  $h_{fe}$  transistor tersebut. Hal tersebut dikarenakan apabila nilai  $h_{fe}$  di bawah nilai 100 ( $h_{fe} < 100$ ), penguatan yang dihasilkan tidak maksimal, bahkan cenderung lebih kecil dari sinyal yang dikuatkannya.



**Gambar 5.32** Contoh Tampilan Alat Ukur Multimeter Analog

## Kasus 2

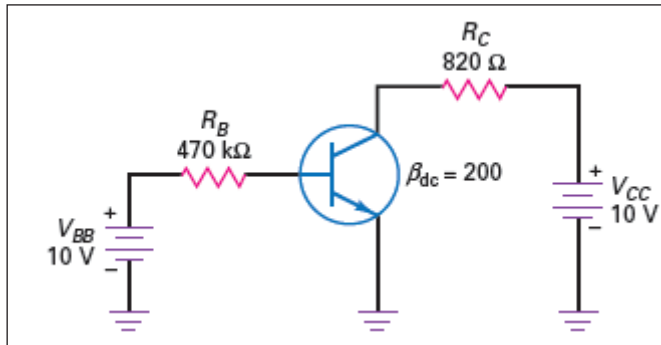
Jika sebuah transistor bipolar berbahan silikon atau germanium akan diaplikasikan untuk rangkaian penguat, disarankan diukur terlebih dahulu menggunakan multimeter tegangan di basis emiter-nya ( $V_{BE}$ ) supaya menghasilkan tegangan 0,6–0,7 V untuk transistor silikon dan 0,2–0,3 V untuk transistor germanium. Ketika nilai-nilai tegangan yang terukur tersebut tidak terpenuhi sesuai dengan rentang skala tegangannya, kemungkinan penguatan yang dihasilkan oleh penguat transistor tersebut akan tidak maksimum atau tidak ada sama sekali penguatan.

## RANGKUMAN

- 1) Transistor bipolar disebut juga sebagai transistor BJT (*bipolar junction transistor*) yang memiliki dua polaritas, yaitu positif dan negatif yang cukup berperan dalam meningkatkan kinerja transistor tersebut melalui pengaturan arus.
- 2) Kinerja transistor bipolar ini dikendalikan oleh arusnya yaitu arus basis ( $I_B$ ), arus kolektor ( $I_C$ ) dan arus emiter ( $I_E$ ).
- 3) Dalam sebuah rangkaian transistor bipolar, sisi emiter berperan sebagai sumber muatan dan energi, sisi basis sebagai pengendali arus, dan sisi kolektor sebagai pengumpul muatan.
- 4) Penguat bersama transistor bipolar ini dinamai sesuai dengan penamaan masing-masing kaki transistornya, yaitu penguat bersama basis (*common base*), penguat bersama kolektor (*common collector*), dan penguat bersama emiter (*common emitter*).
- 5) Analisis pembiasaan transistor dilakukan dengan menggunakan dua model, yaitu model sinyal searah (DC) dan model sinyal bolak-balik (AC).

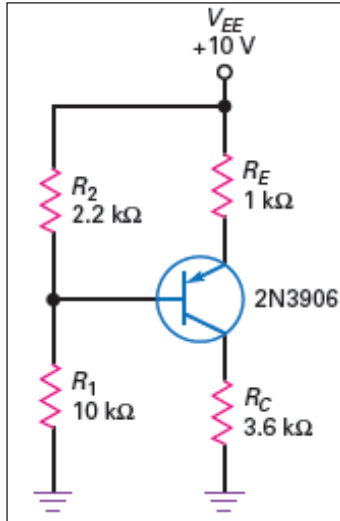
## LATIHAN SOAL

- 1) Diberikan sebuah rangkaian pembiasaan transistor bipolar pada Gambar 5.33. Tentukan arus basis  $I_B$ .

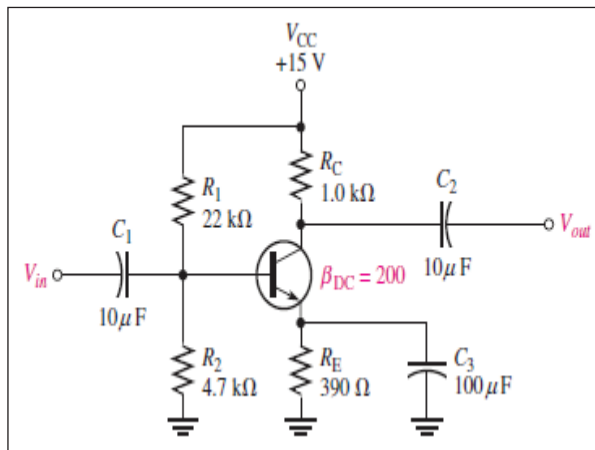


**Gambar 5.33** Rangkaian Pembiasan Transistor Bipolar

- 2) Jika diasumsikan penguatan arus ( $\beta_{dc}$ ) pada Gambar 5.33 diubah dari 200 menjadi 100, berapa arus basis  $I_B$ ?
- 3) Masih menggunakan analisis rangkaian pada Gambar 5.33, tentukan tegangan kolektor-emiter  $V_{CE}$  menggunakan pendekatan ideal dan pendekatan tak ideal.
- 4) Tentukan tegangan kolektor-emiter  $V_{CE}$  dan buatlah kurva garis beban transistor (koordinat titik Q) dari rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 5.34.
- 5) Sebuah penguat *common emitter* ditunjukkan oleh Gambar 5.35 dengan sumber sinyal masukan sebesar 20 mV ke rangkaian penguat tersebut. Tentukan nilai penguatan tegangan dan tegangan keluarannya.
- 6) Dari gambar rangkaian penguat CE (Gambar 5.36), tentukan penguatan tegangan dan tegangan keluaran jika diterapkan sebuah beban resistansi  $R_L$  sebesar 10 kΩ.
- 7) Dengan menggunakan rangkaian pada Gambar 5.36, jika diasumsikan beban resistansi diubah nilainya menjadi 1 kΩ, berapa penguatan tegangan dan tegangan keluaran saat ini?
- 8) Masih menggunakan rangkaian Gambar 5.36, jika sekarang tegangan  $V_{CC}$  dinaikkan menjadi 20 V, berapa penguatan tegangan dan tegangan keluarannya?

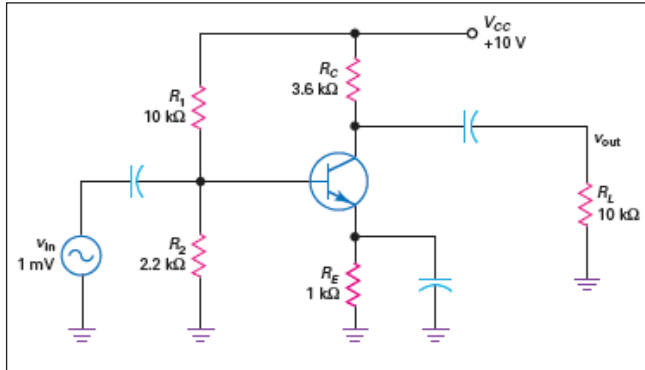


**Gambar 5.34** Rangkaian Bias Transistor Pembagi Tegangan



**Gambar 5.35** Rangkaian Penguat Transistor Bipolar *Common Emitter*

Buku ini tidak diperjualbelikan.



**Gambar 5.36** Rangkaian Penguat Transistor Emitter Bersama

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R. L. & Nashelsky, L. (2014). *Electronic devices and circuit theory* (7<sup>th</sup> ed.). Prentice Hall.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronics fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering: Principles and applications* Essex: Pearson education limited, 862–863
- Malvino, A. P. & Bates, D. J. (2016). *Electronic principles* (8<sup>th</sup> ed.). McGrawHill-Education.
- Sedra, A., & Smith, K. C. (2004). *Microelectronic circuits* (5<sup>th</sup> ed). Oxford University Press.

# BAB VI

## MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGGUNAKAN TRANSISTOR UNIPOLAR (TRANSISTOR SATU POLARITAS)

### Materi pembelajaran:

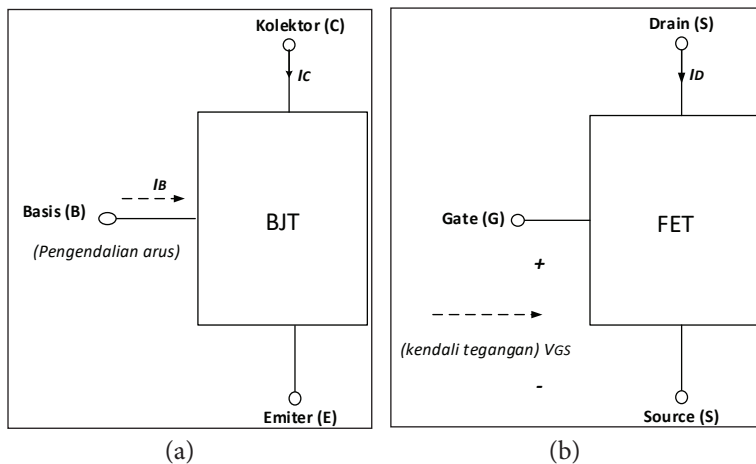
Dalam bab ini yang akan dipelajari adalah terkait dengan sifat-sifat dan operasi kerja dari suatu tipe transistor, yaitu transistor efek medan (*field effect transistor*). Selain itu, akan dipelajari tentang analisis pembiasan transistor jenis ini yang nantinya akan mendukung proses perancangan realisasi model rangkaian elektronika menggunakan jenis transistor ini yang disertai beberapa cara perhitungan secara praktis dan aplikatif.

### Tujuan pembelajaran:

- 1) mengenal dan memahami sifat-sifat transistor tipe unipolar beserta kinerjanya;
- 2) mampu menghitung dan menganalisis kinerja transistor unipolar menggunakan persamaan-persamaan yang terkait; dan
- 3) mampu merancang dan merealisasikan sebuah rangkaian elektronika menggunakan transistor unipolar sebagai komponen utamanya.

## A. Pendahuluan

Transistor efek medan (*field effect transistor*, FET) merupakan jenis transistor yang bekerja menggunakan salah satu hantaran atau konduksi pembawa mayoritas, yaitu elektron (*electron*) atau lubang (*hole*). Cara kerja transistor jenis ini menggunakan dua polaritas sebagai pembawa mayoritas secara bersamaan sehingga transistor efek medan dikategorikan sebagai transistor *unipolar*. Perbandingan prinsip kerja antara transistor bipolar dan transistor efek medan dapat diilustrasikan sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 6.1.

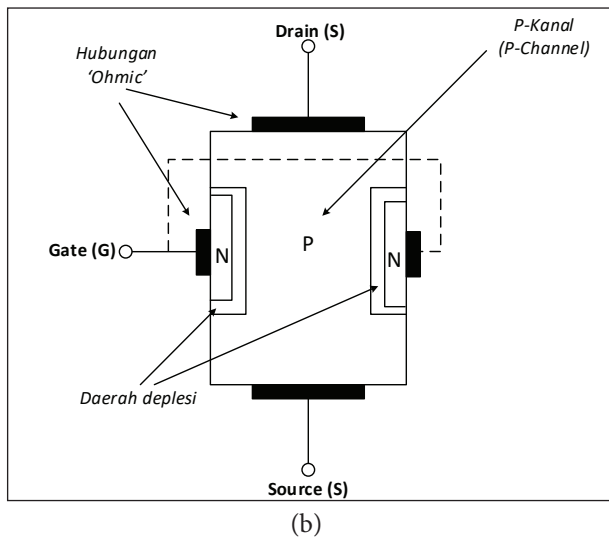
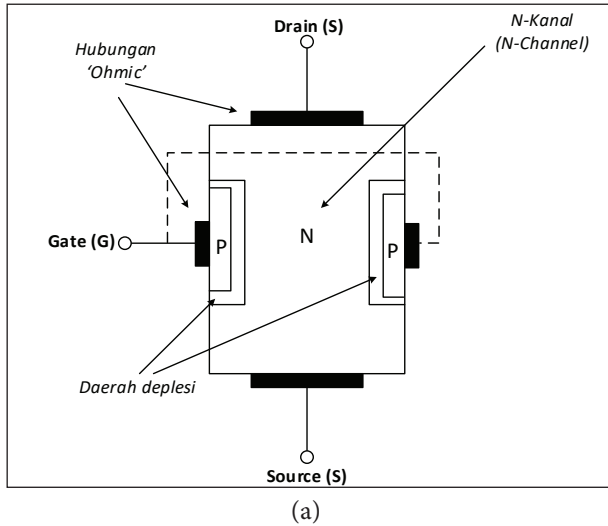


Keterangan: (a) Transistor BJT dan (b) Transistor FET

Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 6.1** Bentuk Proses Pengendalian Kinerja Antara Transistor BJT dan FET

Sumber pengendalian tegangan pada FET dilakukan melalui tiga terminal utama, yaitu *gate* (G), *drain* (D), dan *source* (S) dengan pusat pengendaliannya berada di sisi terminal *gate* yang dinyatakan sebagai fungsi  $V_{GS}$  (tegangan *gate-source*).

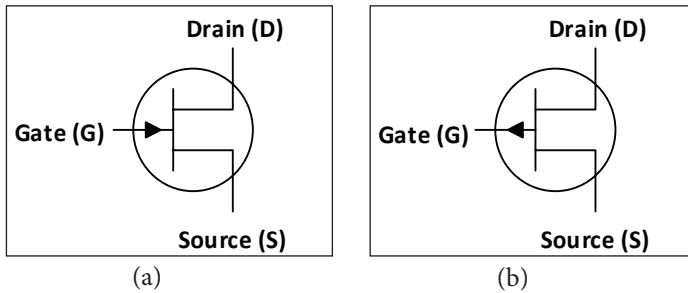


Keterangan: (a) N-Kanal dan (b) P-Kanal

Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 6.2** Tipe Transistor Efek Medan

Simbol tipe N-kanal dan P-kanal FET dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan Gambar 6.3.

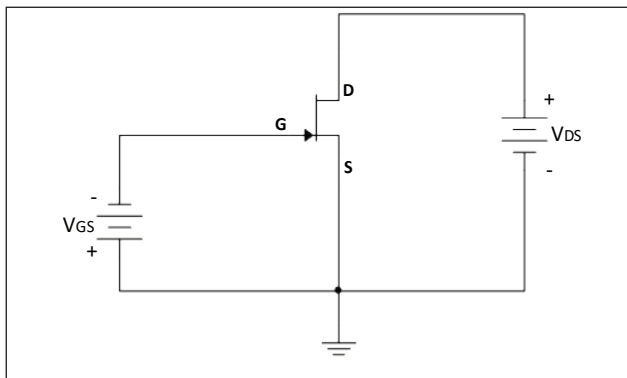


Keterangan: (a) N-Kanal dan (b) P-Kanal

**Gambar 6.3** Simbol Transistor Efek Medan

## B. Karakteristik Transistor Efek Medan (FET)

Mempelajari karakteristik transistor efek medan tidak jauh berbeda dengan saat membahas karakteristik transistor bipolar. Perbedaannya terletak pada parameter yang mengendalikan operasi kerja transistor tersebut. Ciri utamanya adalah menganalisis terminal masukan dan keluaran dengan menghitung parameter transistor sesuai pada masing-masing terminal. Untuk lebih memudahkan dalam menganalisis, pada bab ini kita fokuskan pada analisis tipe FET N-kanal karena lebih sering diaplikasikan.

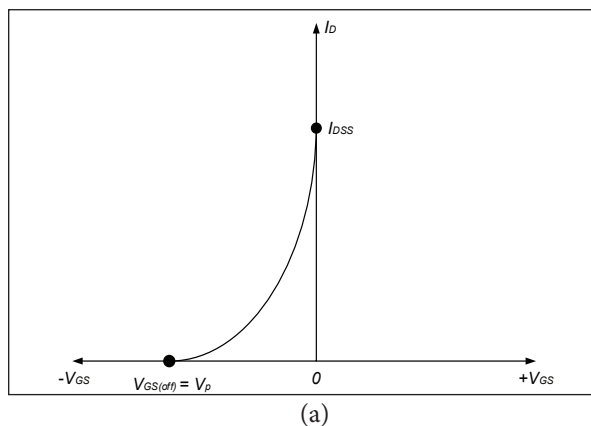


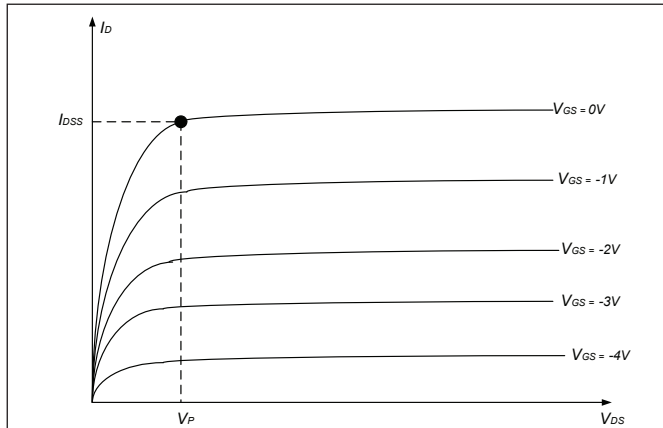
**Gambar 6.4** Alur Pengendalian Muatan pada FET Tipe N-Kanal

Analisis dari gambar 6.4 ini dapat dijelaskan bahwa pengendalian terminal masukan dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan *gate-source*  $V_{GS}$ , sedangkan dari sisi terminal keluaran pengendalian dinyatakan sebagai fungsi dari arus *drain* dan tegangan *drain-source*  $V_{DS}$ . Ada beberapa hal yang penting untuk diketahui, yaitu sebagai berikut.

- 1) Sisi terminal masukan (*gate-source*) rangkaian berada di bias mundur (*reverse biased*), yang pada kondisi ini FET memiliki impedansi masukan tinggi sehingga kemampuan untuk menghasilkan penguatan cukup besar.
- 2) Memiliki kelinieritasan cukup baik, artinya kemampuan FET meminimalisasi timbulnya distorsi sinyal keluaran.
- 3) Untuk keseluruhan FET, arus *source*  $I_S$  memiliki nilai sebanding dengan arus *drain*  $I_D$  ( $I_S \approx I_D$ ).

Kurva karakteristik FET untuk tipe N-kanal maupun P-kanal dinyatakan oleh kurva transkonduktansi dan kurva *drain* seperti ditunjukkan Gambar 6.5.





(b)

Keterangan: (a) Transkonduktansi dan (b) Kurva *Drain*

Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.5** Kurva Karakteristik FET

Penjelasan sederhana dari kurva *drain* pada Gambar 6.5b adalah sebagai berikut.

- 1) Arus *drain*  $I_D$  mengalami kenaikan yang cukup tajam terhadap perubahan tegangan *drain-source*  $V_{DS}$ , tetapi kemudian  $I_D$  akan menjadi konstan dan stabil yang artinya tidak akan ada kenaikan arus.
- 2) Kondisi tegangan  $V_{DS}$  di atas yang menjadikan  $I_D$  bernilai konstan dikenal sebagai tegangan *pinch off* ( $V_P$ ) atau disebut juga tegangan transisi saat  $I_D$  akan menjadi konstan.
- 3) Setelah tegangan *pinch off* tercapai, lebar kanal ( ) akan menjadi lebih sempit sehingga kenaikan  $I_D$  terhadap  $V_{DS}$  menjadi sangat kecil.

Parameter penting lainnya adalah transkonduktansi ( $g_m$ ) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.5.a. Parameter tersebut menyatakan sebuah perbandingan  $I_D$  terhadap tegangan  $V_{GS}$  didaerah sekitar titik kerja saat tegangan  $V_{DS}$  ini menuju nilai konstan. Garis nonlinier pada kurva transkonduktansi dapat dinyatakan oleh persamaan (6.1).

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2. \quad (6.1)$$

Berdasarkan kurva transkonduktansinya, nilai  $V_{GS(off)}$  akan sebanding dengan tegangan *pinch off*-nya ( $V_{GS(off)} \approx V_P$ ) sehingga persamaan (6.1) akan menjadi

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2. \quad (6.2)$$

Transkonduktansi ini diperoleh saat terjadi perubahan arus  $I_n$  akibat dipengaruhi oleh adanya perubahan tegangan  $V_{GS}$  saat  $V_{DS}$  mencapai nilai konstan, yaitu sebesar:

$$g_m = g_{mo} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]. \quad (6.3)$$

Selain itu, transkonduktansi  $g_m$  juga dapat dinyatakan melalui persamaan lainnya, yaitu sebesar

$$g_m = g_{mo} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}, \quad (6.4)$$

dengan

$g_m$  : nilai transkonduktansi pada posisi garis nonlinier dalam kurva transfer transkonduktansi ( $\bar{U} = \text{mho} = \text{siemens}$ ),

$g_{mo}$  : nilai transkonduktansi maksimum saat  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  ( $\bar{U} = \text{mho} = \text{siemens}$ ).

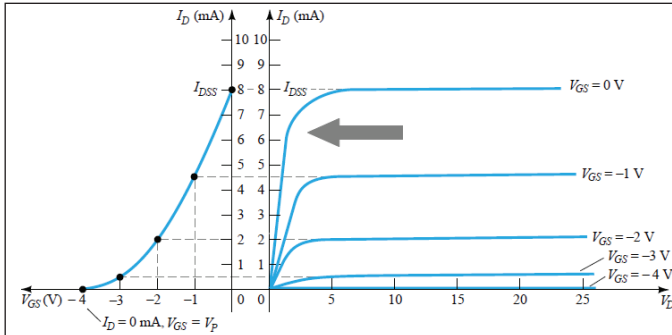
Biasanya nilai  $g_{mo}$  ini sudah tersedia informasinya dalam setiap *data sheet*, tetapi jika tidak ada informasi secara jelas terkait parameter ini, nilai  $g_{mo}$  ini dapat diperoleh menggunakan persamaan (6.5).

$$g_{mo} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}. \quad (6.5)$$

Parameter  $g_m$  ini perlu diperhitungkan karena cukup memberikan dampak besar terhadap penguatan tegangan maksimum nantinya.

### Contoh 6.1

Gambar 6.6 menampilkan sebuah kurva transfer karakteristik sebuah transistor efek medan. Tentukan arus *drain*  $I_D$  saat  $V_{GS} = -1$  volt dan  $V_{GS} = -1$  V serta berikan kesimpulan dari hasil analisis untuk kedua nilai  $V_{GS}$  ini.



Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.6** Kurva Transfer Transistor Efek Medan

### Penyelesaian

Arus *drain*  $I_D$  dari kurva pada Gambar 6.6 dapat dicari melalui pendekatan persamaan (6.2) yang juga dikenal sebagai persamaan Shockley.

- 1) Saat  $V_{GS} = -1$  V, arus *drain*  $I_D$  diperoleh sebesar

$$I_D = 8 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{(-1 \text{ V})}{(-4 \text{ V})} \right]^2 = 4,5 \text{ mA}.$$

- 2) Saat  $V_{GS} = 0$  V, arus *drain*  $I_D$  diperoleh sebesar,

$$I_D = 8 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{(0 \text{ V})}{(-4 \text{ V})} \right]^2 = 8 \text{ mA} = I_{DSS}.$$

- 3) Hal yang dapat dijelaskan dari hasil perhitungan untuk dua kondisi  $V_{GS}$  adalah arus *drain*  $I_D$  akan sebanding dengan nilai arus *drain* maksimumnya  $I_{DSS}$  saat tegangan *gate-source* bernilai nol ( $V_{GS} = 0$  V).

### Contoh 6.2

Dari *data sheet* sebuah transistor efek medan sambungan (JFET) diperoleh informasi berikut:  $I_{DSS} = 3 \text{ mA}$ ;  $V_{GS(off)} = -6 \text{ volt}$ ;  $g_{m(max)} = 5000 \text{ } \mu\text{S}$  (mikrosiemens). Berdasarkan data-data informasi ini, tentukan

- transkonduktansi saat  $V_{GS} = -4 \text{ volt}$  dan
- arus *drain* saat  $V_{GS} = -4 \text{ volt}$ .

### Penyelesaian

- Dengan menggunakan pendekatan persamaan (6.3), diperoleh nilai transkonduktansi saat  $V_{GS} = -4 \text{ V}$ , yaitu

$$g_m = 5000 \text{ } \mu\text{S} \left[ 1 - \frac{(-4 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right] = 1667 \text{ } \mu\text{S}.$$

Apabila kita plot nilai  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ , nilai  $g_m \cong g_{m(max)} \cong g_{mo}$ . Ini artinya transkonduktansi JFET tersebut memiliki nilai sebanding dengan nilai transkonduktansi maksimal saat tegangan *gate-source* diberi nilai nol volt.

- Dengan menggunakan persamaan Shockley, arus *drain* saat  $V_{GS} = -4 \text{ V}$  diperoleh sebesar

$$I_D = 3 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{(-4 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right]^2 = 333 \text{ } \mu\text{A}.$$

### Contoh 6.3

Tentukan beberapa harga transkonduktansi sebuah transistor efek medan jika berdasarkan *data sheet* yang ada diperoleh informasi parameter transistor sebagai berikut:  $I_{DSS} = 2 \text{ mA}$  dan  $V_{GS(off)} = -6 \text{ V}$  untuk beberapa nilai tegangan  $V_{GS}$  berikut ini.

- $V_{GS} = -0,5 \text{ V}$

- b)  $V_{GS} = -1 \text{ V}$
- c)  $V_{GS} = -3 \text{ V}$
- d)  $V_{GS} = -5 \text{ V}$

### Penyelesaian

Sebelum menentukan  $g_m$ , terlebih dahulu ditentukan  $g_{mo}$  sebesar

$$g_{mo} = \frac{2(8 \text{ mA})}{|-2 \text{ V}|} = 8 \text{ mS} = g_m \text{ saat } V_{GS} = 0 \text{ V}.$$

- a) Saat  $V_{GS} = -0,5 \text{ V}$ , nilai  $g_m$  diperoleh

$$g_m = 8 \text{ mS} \left[ 1 - \frac{(-0,5 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right] = 7,333 \text{ mS}.$$

- b) Saat  $V_{GS} = -1 \text{ V}$ , nilai  $g_m$  diperoleh

$$g_m = 8 \text{ mS} \left[ 1 - \frac{(-1 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right] = 6,666 \text{ mS}.$$

- c) Saat  $V_{GS} = -3 \text{ V}$ , nilai  $g_m$  diperoleh

$$g_m = 8 \text{ mS} \left[ 1 - \frac{(-3 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right] = 4 \text{ mS}.$$

- d) Saat  $V_{GS} = -5 \text{ V}$ , nilai  $g_m$  diperoleh

$$g_m = 8 \text{ mS} \left[ 1 - \frac{(-5 \text{ V})}{(-6 \text{ V})} \right] = 1,333 \text{ mS}.$$

Transkonduktansi tertinggi tercapai saat tegangan  $V_{GS}$  sama dengan nol dan jika  $V_{GS}$  diberi nilai lebih negatif,  $g_m$  akan makin mengecil. Besar kecilnya parameter  $g_m$  ini dapat mempengaruhi hasil penguatan. Hubungan antara penguatan dan transkonduktansi

ini dinyatakan sebagai faktor penguatan (*amplification factor*) dan besarnya dapat ditentukan melalui persamaan

$$\mu = g_m \times r_d \quad (6.6)$$

dengan  $r_d$  menunjukkan resistansi AC *drain* (*AC drain resistance*) yang didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan tegangan *drain-source* ( $\Delta V_{DS}$ ) terhadap perubahan arus *drain* ( $\Delta I_D$ ) yang secara matematis dinyatakan sebesar

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS} = \text{konstan}} \quad (6.7)$$

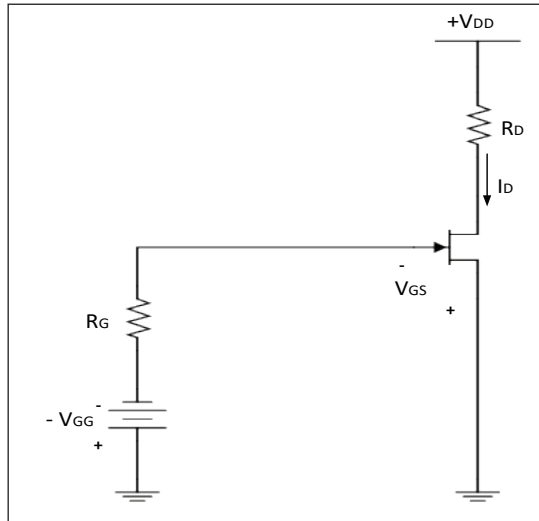
Persamaan (6.6) dan (6.7) ini secara detail dibahas dalam analisis rangkaian penguat FET pada bab selanjutnya.

### C. Pembiasan Transistor Efek Medan (FET)

Analisis pembiasan transistor jenis ini dilakukan untuk mengetahui sifat tegangan dan arus transistor yang bekerja pada sebuah rangkaian trnsistor sehingga memudahkan dalam menganalisis kemampuannya. Ada dua pendekatan model pembiasan jenis transistor ini, yaitu pembiasan yang ditetapkan (*fixed-biasing*), pembiasan sendiri (*self-biasing*), dan pembiasan pembagi tegangan (*voltage divider biasing*). Secara umum hubungan analisis pembiasan DC yang diterapkan terhadap semua rangkaian penguat transistor ini dinyatakan sebagai  $I_G \cong 0 \text{ A}$  dan  $I_D = I_S$ , sedangkan pembiasan jika dilihat dari parameter masukan dan keluaran rangkaian penguat tersebut dinyatakan oleh persamaan Shockley. Model pendekatan persamaan ini juga berlaku untuk tipe D-MOSFET yang akan dibahas di bab selanjutnya.

#### 1. Pembiasan Ditetapkan (*Fixed Biasing*)

Pendekatan model pembiasan ini secara konfigurasi rangkaiannya diperlihatkan seperti pada Gambar 6.7.



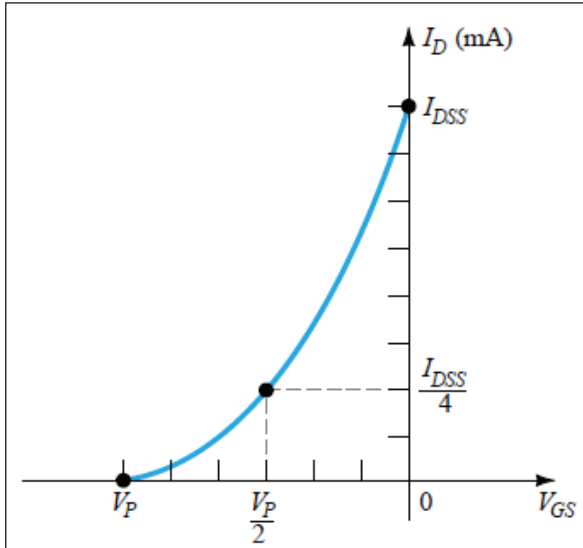
**Gambar 6.7** Pembiasan Kanal-N JFET Sumber Tegangan Searah ( $-V_{GG}$ )

Metode pembiasan seperti pada Gambar 6.7 disebut juga metode “*bias gate*”. Bias baterai  $-V_{GG}$  memastikan bahwa hubungan *source-gate* dalam keadaan dibias mundur. Hal ini menunjukkan bahwa saat arus *gate*  $I_G$  bernilai nol dan tidak ada jatuh tegangan pada resistansi *gate*  $R_G$ , nilai  $V_{GG} \approx V_{GS}$  yang menyatakan besarnya nilai pembiasan di sisi terminal *Gate* JFET kanal-N sehingga pembiasan sisi terminal keluaran yang diwakili oleh tegangan *drain-source*  $V_{DS}$  dapat ditentukan sebesar

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D, \quad (6.8)$$

dengan arus *drain*  $I_D$  ini diperoleh dari penerapan persamaan Shockley, yaitu

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right]^2$$



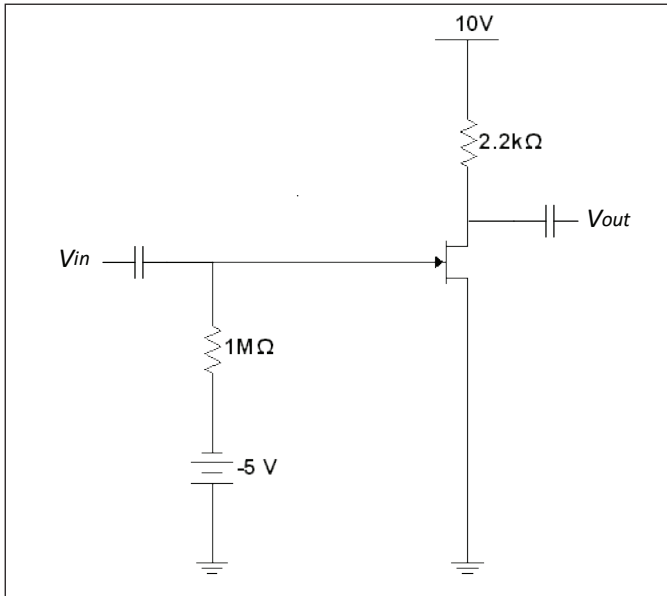
Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.8** Kurva Karakteristik Persamaan Shockley

yang secara kurva karakteristiknya dapat diplot seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.8.

#### Contoh 6.4

Sebuah FET pada rangkaian berikut ini memiliki nilai  $V_{GS(off)} = -8$  volt;  $I_{DSS} = 16$  mA. Tentukan  $V_{GS}$ ,  $I_D$  dan  $V_{DS}$  dari rangkaian tersebut.



**Gambar 6.9** Rangkaian Prategangan FET

### Penyelesaian

- 1) Ketika arus dan tegangan tidak terdapat pada *gate*, tegangan *gate-source* sebanding besarnya dengan tegangan bias baterai-*gate*, yaitu sebesar

$$V_{GS} = -V_{GG} = -5 \text{ V.}$$

- 2) Pendekatan persamaan Shockley dapat digunakan untuk menghitung arus *drain* sebesar

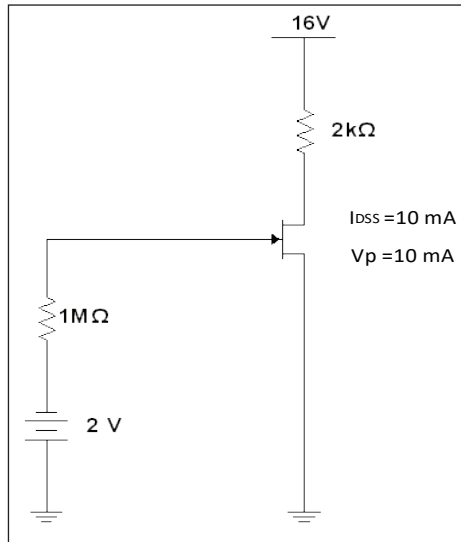
$$I_D = 16 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{(-5 \text{ V})}{(-8 \text{ V})} \right]^2 = 2,25 \text{ mA.}$$

- 3) Oleh karena itu, tegangan *drain-source*  $V_{DS}$  diperoleh dari persamaan (6.8) sebesar

$$V_{DS} = 10 \text{ V} - (2,25 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) = 5,05 \text{ V.}$$

### Contoh 6.5

Sebuah rangkaian FET disusun sepperti pada Gambar 6.10.



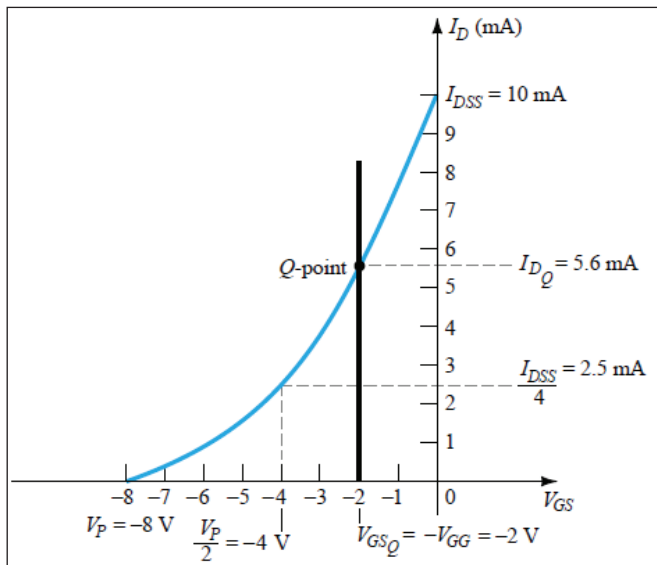
**Gambar 6.10** Rangkaian Prategangan FET Model Sinyal DC

Tentukan

- tegangan *gate-source* pada titik operasi kerjanya ( $V_{GSQ}$ ),
- arus *drain* pada titik operasi kerjanya ( $I_{DQ}$ ),
- tegangan *drain-source* ( $V_{DS}$ ),
- tegangan *drain* ( $V_D$ ),
- tegangan *gate* ( $V_G$ ),
- tegangan *source* ( $V_S$ ), dan
- gambaran sketsa kurva dari rangkaian pada Gambar 6.10.

### Penyelesaian

- $V_{GSQ} = V_{GS} = -2 \text{ V}.$
- $I_{DQ} = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{(-2 \text{ V})}{(-8 \text{ V})} \right]^2 = 5,625 \text{ mA}.$
- $V_{DS} = 16 \text{ V} - (5,625 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 4,75 \text{ V}.$
- $V_D = V_{DS} = 4,75 \text{ V}.$
- $V_G = V_{GSQ} = V_{GS} = -2 \text{ V}.$
- $V_S = 0 \text{ V}.$
- Dari hasil analisis perhitungan di atas, sketsa kurva kerja rangkaian FET (Gambar 6.10) ditunjukkan pada Gambar 6.11.



Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.11** Kurva Karakteristik FET Hasil Perhitungan

## 2. Pembiasan Sendiri (*Self-Biasing*)

Penerapan model pembiasan ini bertujuan untuk mengeliminasi terjadinya penggunaan sumber tegangan DC lebih dari satu. Gambar 6.12 menunjukkan sebuah pembiasan sendiri FET N-kanal dengan resistansi *source*  $R_S$  sebagai ciri utama pembiasan sendiri ini. Komponen arus *drain*  $I_D$  yang mengalir melewati resistansi *source*  $R_S$  menghasilkan pembiasan tegangan *source*  $V_S$  sebesar

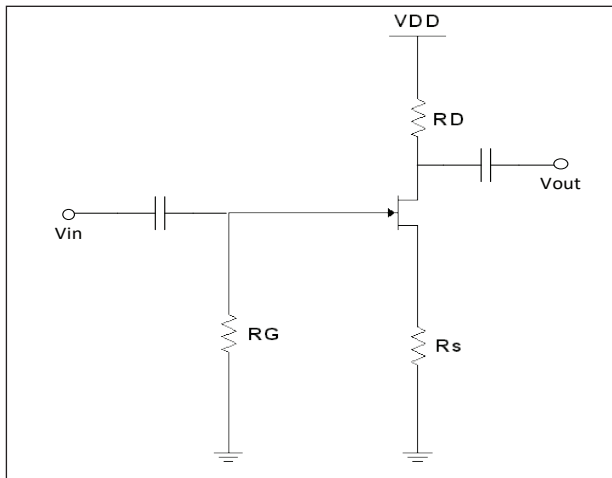
$$V_S = I_D R_S. \quad (6.9)$$

Saat arus *gate* menghasilkan arus relatif sangat kecil, kemudian tegangan pada terminal *gate* terhadap bumi (*grounding*) berharga nol ( $V_G = 0 \text{ V}$ ), diperoleh tegangan  $V_{GS}$  sebesar

$$V_{GS} = V_G - V_S. \quad (6.10)$$

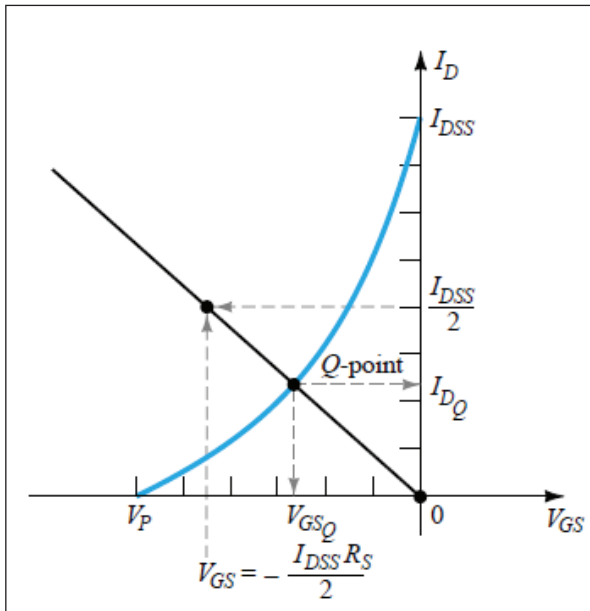
Karena  $V_G = 0 \text{ V}$ , persamaan (6.10) dinyatakan kembali sebesar

$$V_{GS} = -V_S = -I_D R_S. \quad (6.11)$$



**Gambar 6.12** Konfigurasi Pembiasan JFET (*self-biasing JFET configuration*)

Titik operasi kerja (titik Q) pada pembiasan sendiri ini dapat dianalisis di beberapa titik di sepanjang garis beban (*load line*) untuk mengetahui perubahan bias tegangan dan arus rangkaian FET. Kurva karakteristik titik operasi kerja FET secara umum digambarkan seperti Gambar 6.13.



Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.13** Garis Kerja *self-biasing* FET

Rangkaian pada Gambar 6.12 sebelumnya menjelaskan bahwa tegangan  $V_{DS}$  melalui pendekatan hukum Kirchoff tegangan (*Kirchoff's voltage law*) dinyatakan sebesar

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S). \quad (6.12)$$

Bentuk persamaan (6.12) persis sama seperti persamaan (6.8), tetapi ada sedikit perbedaannya, yaitu resistansi *source*  $R_S$  diperhitungkan karena pembiasan sendiri cukup dipengaruhi oleh besarnya resistansi ini. Adapun analisis garis kerja seperti Gambar

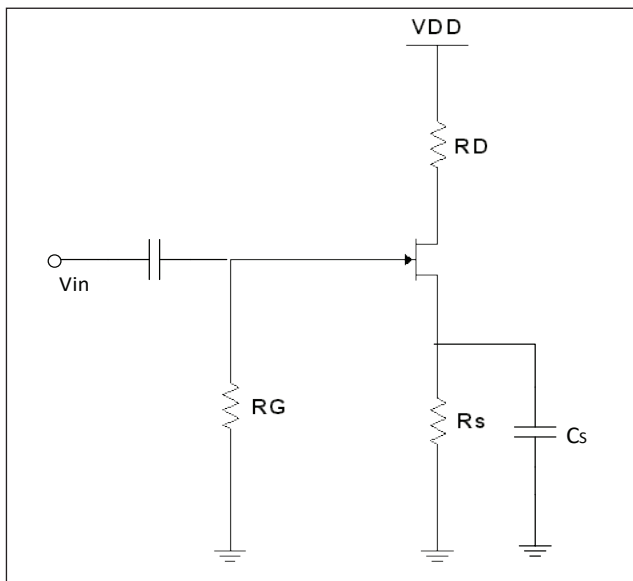
6.13 menunjukkan pembiasan FET bekerja pada titik tengah garis (Q) yang dalam kondisi ini arus *drain*  $I_D$  diperoleh sebesar

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2 = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{\frac{V_{GS(off)}}{3.4}}{V_{GS(off)}} \right]^2 = \frac{I_{DSS}}{2} \quad (6.13)$$

Pada kedudukan ini juga tegangan *drain*  $V_D = \frac{V_{DD}}{2}$  yang diperoleh dari pemilihan nilai resistansi *drain* untuk mendapatkan tegangan jatuh di sisi terminal *drain*.

### Contoh 6.6

Sebuah bias sendiri (*self-bias*) N-kanal JFET daerah titik operasi kerjanya di-*setting* pada  $I_D = 1,5 \text{ mA}$  dan  $V_{DS} = 10 \text{ V}$ , sedangkan informasi yang diberikan oleh parameter JFET tipe ini adalah  $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$ ;  $V_{GS(off)} = -2 \text{ V}$ , dan  $V_{DD} = 20 \text{ V}$ . Tentukan nilai resistansi *source*  $R_S$  dan resistansi *drain*  $V_D$  pada rangkaian Gambar 6.14.



Gambar 6.14 Rangkaian Prategangan FET Model Sinyal AC

### Penyelesaian

- 1) Resistansi *source* dapat ditentukan melalui pendekatan persamaan

$$R_S = \frac{V_S}{I_D}.$$

Sebelumnya kita mencari nilai tegangan *source* dan tegangan *gate-source* dari hubungan

$$V_S = V_G - V_{GS},$$

dengan  $V_{GS}$  harus ditentukan terlebih dahulu untuk mendapatkan tegangan *source* ini, yaitu menggunakan pendekatan Shockley.

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2,$$

$$1,5 \text{ mA} = 5 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{(-2 \text{ V})} \right]^2,$$

$$V_{GS} = -0,9 \text{ V}.$$

Kemudian, tegangan *source*  $V_S$  diperoleh sebesar

$$V_S = V_G - V_{GS} = 0 - (-0,9 \text{ V}) = 0,9 \text{ V}$$

sehingga nilai resistansi *source* kita dapatkan sebesar

$$R_S = \frac{0,9 \text{ V}}{1,5 \text{ mA}} = 600 \Omega.$$

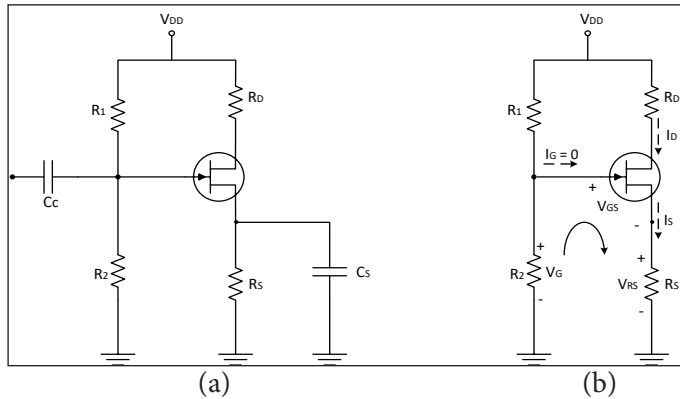
- 2) Untuk memudahkan mendapatkan resistansi *drain*  $R_D$ , dilakukan penerapan hukum Kirchoff tegangan sehingga diperoleh tegangannya sebesar

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S,$$

$$R_D = \frac{(20 \text{ V} - 10 \text{ V} - 0,9 \text{ V})}{1,5 \text{ mA}} = 6 \text{ k}\Omega.$$

### 3. Pembiasan Pembagi Tegangan (*Divider Voltage Biasing*)

Seperti pada transistor bipolar (BJT), pendekatan pembiasan metode pembagi tegangan digunakan untuk mempermudah analisis rangkaian dan meningkatkan stabilitas rangkaian penguat. Fakta ini menunjukkan bahwa metode pembiasan pembagi tegangan digunakan juga untuk menganalisis dan meningkatkan stabilitas rangkaian penguat FET. Gambar 6.15 merupakan contoh rangkaian FET yang menggambarkan model pembiasan AC dan DC sebagai tahapan awal dalam menentukan parameter-parameter bias rangkaian.



Keterangan: (a) Pembiasan pembagi tegangan dan (b) Analisis pembiasan DC

**Gambar 6.15** Rangkaian Pembiasan FET

Berdasarkan pendekatan analisis model DC pada Gambar 6.15, dapat dijelaskan bahwa tegangan *gate*  $V_G$  melalui resistansi  $R_2$  merupakan pintu masukan rangkaian yang pada kondisi ini  $I_G = 0$  sehingga besarnya tegangan *gate* ini diperoleh sebesar

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} \quad (6.14)$$

dengan tegangan  $V_{GS}$  sebagai pengendali operasi kerja FET dapat dicari dari hubungan persamaan sebelumnya,

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S \quad (6.15)$$

Resistansi  $R_1$  dan  $R_2$  merupakan ciri utama pembiasan dengan metode ini sehingga peranan resistansi-resistansi ini di sisi terminal *gate* cukup memberikan dampak yang besar terhadap hasil analisis rangkaian dirancang. Titik operasi kerja rangkaian FET pada Gambar 6.15 menunjukkan harga  $I_D R_S$  lebih besar dari  $V_G$  karena arus *gate*  $I_G = 0$ . Karena itu,  $V_{GS}$  bernilai sangat negatif. Itulah sebabnya FET tipe N-kanal bekerja melalui pengendalian tegangan *gate*  $V_{GS}$  negatif. Titik operasinya dinyatakan oleh persamaan

$$I_D = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S} \quad (6.16)$$

dan

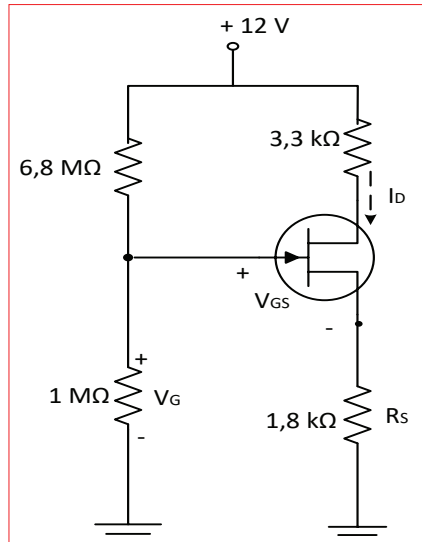
$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S). \quad (6.17)$$

Meskipun dalam perhitungannya pembiasan pembagi tegangan ini cukup kompleks, tetapi sisi kelebihanannya adalah mampu meningkatkan kestabilan titik operasi kerja rangkaian, terutama jika akan merancang sebuah rangkaian penguat karena merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat kualitas penguatan yang dihasilkan. Adapun parameter impedansi masukan  $Z_{in}$  besarnya dapat ditentukan dari pendekatan persamaan

$$Z_{in} = R_1 // R_2. \quad (6.18)$$

#### Contoh 6.7

Seperti yang terlihat dalam Gambar 6.16, tentukan tegangan drain  $I_D$  dan tegangan *gate-source*  $V_{GS}$  melalui pendekatan metode pembiasan pembagian tegangan saat  $V_D = 7 \text{ V}$ .



**Gambar 6.16** Pembiasan pada Rangkaian FET

### Penyelesaian

- 1) Arus *drain* dapat dicari besarnya menggunakan pendekatan persamaan berikut.

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R_D} = \frac{12 \text{ V} - 7 \text{ V}}{3,3 \text{ k}\Omega} = 1,52 \text{ mA.}$$

- 2) Sementara itu, untuk mendapatkan nilai  $V_{GS}$ , terlebih dahulu kita menentukan tegangan yang melewati terminal *gate* dan *source* menggunakan pendekatan persamaan

$$V_G = \frac{1 \text{ M}\Omega}{6,8 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} \times 12 \text{ V} = 1,54 \text{ V}$$

dan

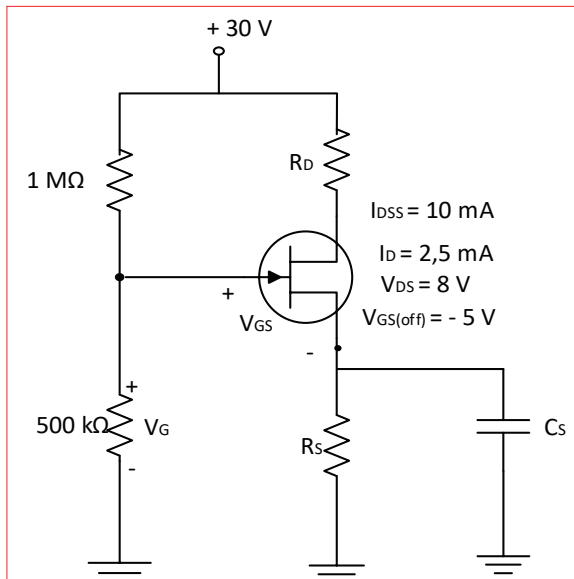
$$V_S = I_D R_S = (1,52 \text{ mA})(1,8 \text{ k}\Omega) = 2,74 \text{ V}$$

sehingga diperoleh tegangan *gate-source* sebesar

$$V_{GS} = V_G - V_S = 1,54 \text{ V} - 2,74 \text{ V} = -1,2 \text{ V}.$$

### Contoh 6.8

Sebuah rangkaian ditunjukkan pada Gambar 6.17. Berdasarkan rangkaian tersebut, tentukan resistansi *source*  $R_S$  menggunakan pendekatan analisis pembiasan pembagi tegangan.



**Gambar 6.17** Analisis Model DC pada Rangkaian FET

### Penyelesaian

Pendekatan Shockley dapat diterapkan sebagai langkah awal sebelum menentukan resistansi *source*  $R_S$ , yaitu

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2,$$

$$2,5 \text{ mA} = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{(-5 \text{ V})} \right]^2,$$

$$V_{GS} = -2,5 \text{ V} \cdot V_{GS} = -2,5 \text{ V}.$$

Kemudian tegangan *source*  $V_G$   $V_G$  dapat ditentukan dari persamaan

$$V_G = \frac{500 \text{ k}\Omega}{1 \text{ M}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \times 30 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

sehingga dari persamaan  $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ , dengan cara modifikasi, didapatkan resistansi *source* sebesar

$$R_S = \frac{10 \text{ V} + 2,5 \text{ V}}{2,5 \text{ mA}} = 5 \text{ k}\Omega.$$

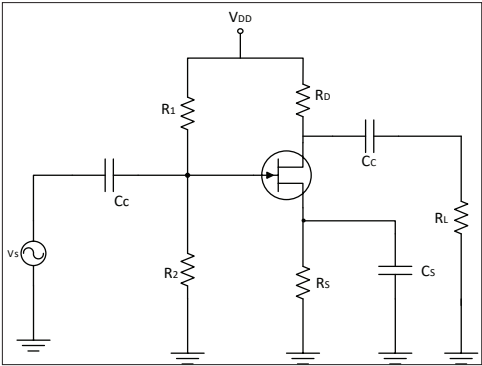
#### D. Rangkaian Penguat Transistor Efek Medan

Rangkaian penguat BJT maupun FET secara mudah dapat dianalisis menggunakan pendekatan model AC atau sinyal kecil. Pendekatan ini dilakukan agar sinyal masukan AC dapat diproses untuk dikuatkan oleh rangkaian FET dengan terlebih dahulu membuat rangkaian ekuivalennya. Dari sini dapat kita ketahui parameter-parameter penguat, antara lain penguatan ( $A_v$ ), tegangan keluaran ( $V_{out}$ ), impedansi masukan ( $Z_{in}$ ), dan impedansi keluaran ( $Z_{out}$ ). Cara mendapatkan parameter-parameter FET ini tentunya sedikit berbeda dengan model AC pada BJT. Ada beberapa konfigurasi rangkaian penguat FET yang menjadi acuan bagi perancang untuk merealisasikan rangkaian penguat ini. Ketiga konfigurasi tersebut adalah

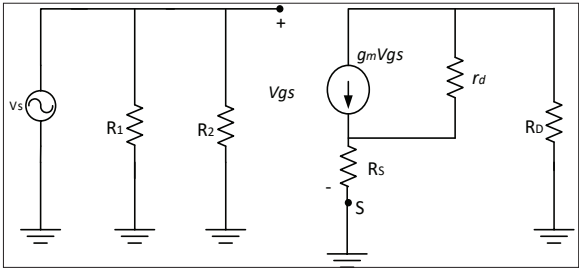
- 1) konfigurasi *gate* bersama (*common gate*),
- 2) konfigurasi *drain* bersama atau pengikut *source* (*common drain/ source follower*), dan
- 3) konfigurasi *source* bersama (*common source*).

Dari ketiga konfigurasi tersebut, penulis hanya memberikan analisis penguat FET untuk jenis konfigurasi *source* bersama (*common*

source) karena jenis konfigurasi ini lebih banyak diaplikasikan, mudah dianalisis, dan menjadi faktor pertimbangan bagi kebanyakan orang karena memiliki keunggulan, antara lain, memiliki impedansi masukan yang tinggi sehingga mampu menguatkan level sinyal masukan yang sangat kecil dan mampu meningkatkan stabilisasi penguatan. Konfigurasi rangkaian *source* bersama beserta rangkaian ekuivalennya ditunjukkan seperti pada Gambar 6.18. Perubahan dari rangkaian penguat menjadi rangkaian ekuivalen AC-nya bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter penguat yang nantinya membantu mempermudah menghitung dan memprediksi nilai penguatannya.



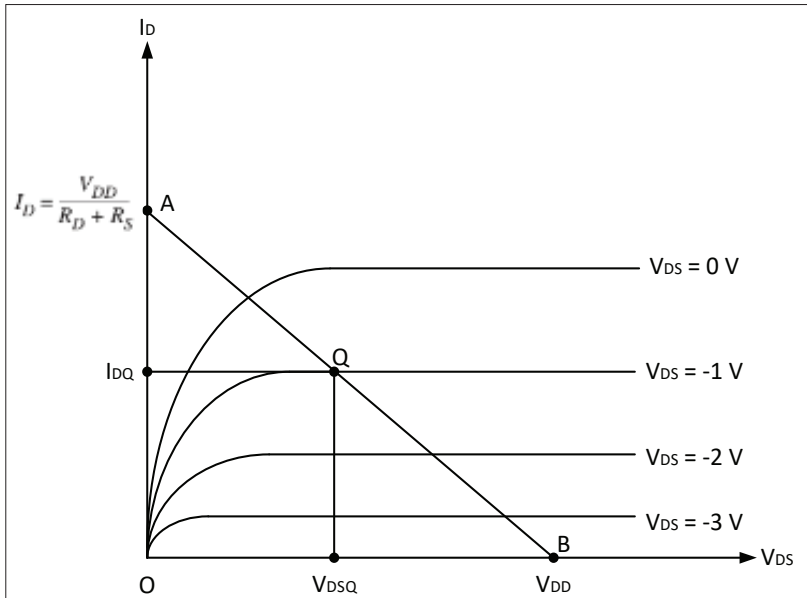
(a)



(b)

Keterangan: (a) Rangkaian dan (b) Ekuivalen AC  
**Gambar 6.18** Rangkaian Pengganti FET *Common Source*

Prinsip dasar analisis sinyal kecil pada penguat FET ini adalah untuk memperlihatkan bahwa *tegangan kecil sinyal AC yang dimasukkan ke terminal gate-source dapat mengendalikan arus drain-source pada FET*. Karena alasan itu, penyebab sebuah FET pada titik kerjanya dikendalikan oleh tegangan dan gambaran kerjanya tersebut diilustrasikan oleh kurva garis beban seperti yang diperlihatkan Gambar 6.19.



**Gambar 6.19** Garis Beban Rangkaian Penguat *Common Source* FET

Penjelasan sederhana terkait hasil analisis garis beban sesuai Gambar 6.19 tersebut adalah sebagai berikut.

- 1) Tegangan  $V_{DS}$  maksimum dicapai saat  $I_D = 0$ . Oleh karena itu, dengan arus *drain* bernilai nol ini menjadikan tegangan  $V_{DS}$  maksimum sebanding dengan  $V_{DD}$  atau  $V_{DS(max)} = V_{DD}$ . Pernyataan ini ditunjukkan pada titik  $OB \approx V_{DD}$  di sepanjang garis beban  $V_{DS}$ .

- 2) Nilai  $I_D$  akan mencapai maksimumnya saat nilai  $V_{DS} = 0$  sehingga diperoleh  $I_{D(max)} = \frac{V_{DD}}{R_D + R_S}$ . Pernyataan ini ditunjukkan pada titik OA di sepanjang garis beban  $I_D$ .

Pada awal bab ini dijelaskan bahwa salah satu faktor yang menentukan penguatan pada parameter FET adalah transkonduktansi  $g_m$ . Selanjutnya, parameter transkonduktansi akan sering digunakan untuk menentukan, menghitung, dan menganalisis penguatan penguat FET. Selanjutnya, ada parameter lain yang perlu diperhitungkan, yaitu resistansi AC drain  $r_d$ . Parameter ini menunjukkan perbandingan perubahan tegangan drain source  $\Delta V_{DS}$  terhadap perubahan arus drain  $\Delta I_D$  saat tegangan gate-source  $V_{GS}$  bernilai konstan yang dinyatakan sebesar

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \right|_{V_{GS} = \text{konstan}} \quad (6.19)$$

Nilai  $r_d$  ini faktanya relatif sulit untuk ditentukan berdasarkan kurva karakteristiknya karena diperlukan kurva yang cukup teliti. Akan tetapi, parameter ini biasanya sudah disediakan oleh data informasi komponen dari pabrikan yang sering dinyatakan sebagai parameter admintansi ( $y_{os}$ ). Hubungan antara  $r_d$  dengan  $y_{os}$  ini merupakan hubungan terbalik sehingga besarnya dinyatakan sebesar

$$r_d = \frac{1}{y_{os}} \quad (6.19)$$

### 1. Penguat Source Bersama (Common Source)

Rangkaian penguat ini, seperti yang telah disampaikan pada Gambar 6.18.a, dapat kita tentukan parameternya, antara lain  $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$ , dan  $A_V$ .

- 1) Impedansi masukan penguat dapat ditentukan dari hubungan persamaan

$$Z_{in} = R_1 \parallel R_2. \quad (6.20)$$

- 2) Impedansi keluaran penguat dapat ditentukan dari hubungan persamaan

$$Z_{out} = r_d \parallel R_D. \quad (6.21)$$

Saat kondisi  $r_d \geq 10R_D$ , impedansi keluaran sekarang menjadi

$$Z_{out} = R_D. \quad (6.22)$$

- 3) Penguatan tegangan penguat *source* bersama ini diperoleh sebesar

$$A_V = -g_m (r_d \parallel R_D). \quad (6.23)$$

Saat kondisi  $r_d \geq 10R_D$ , penguatan tegangan sekarang sebesar

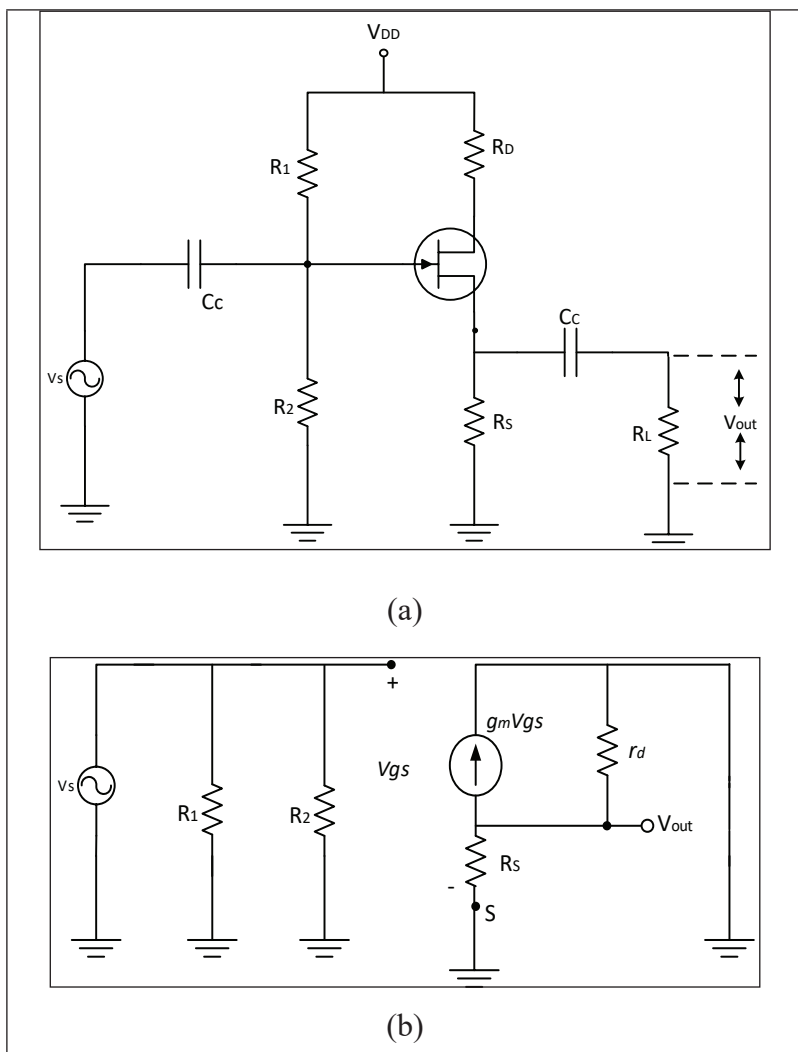
$$A_V = -g_m R_D. \quad (6.24)$$

- 1) Tegangan keluaran penguat ini diperoleh sebesar

$$v_{out} = (-g_m R_D) v_{in}. \quad (6.25)$$

## 2. Penguat Drain Bersama (*Common Drain*)

Rangkaian penguat berbasis *drain* bersama dikenal juga sebagai pengikut *source* yang sama halnya dengan pengikut emiter pada transistor BJT. Konfigurasi dasar dari rangkaian ini ditunjukkan pada Gambar 6.20.



Keterangan: (a) Rangkaian dan (b) Ekuivalen AC

Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 6.20** Rangkaian Penguat FET *Common Drain*

Rangkaian penguat CD ini—seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 6.20—dapat kita tentukan parameternya, antara lain,  $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$ ,  $A_V$ .

- 1) Impedansi masukan penguat ini sama seperti pada penguat CS, yaitu

$$Z_{in} = R_1 // R_2. \quad (6.26)$$

- 2) Impedansi keluaran penguat dapat ditentukan dari hubungan persamaan

$$Z_{out} = r_d // R_S // \frac{1}{g_m}. \quad (6.27)$$

Saat kondisi  $r_d \geq 10R_S$ , impedansi keluaran sekarang akan menjadi

$$Z_{out} = R_S // \frac{1}{g_m}. \quad (6.28)$$

- 3) Penguatan tegangan penguat ini diperoleh sebesar

$$A_V = \frac{g_m(r_d // R_S)}{1 + g_m(r_d // R_S)}. \quad (6.29)$$

Sehingga,  $A_V = \frac{g_m(R_S)}{1 + g_m(R_S)} \approx 10R_S$ , penguatan tegangan sekarang sebesar

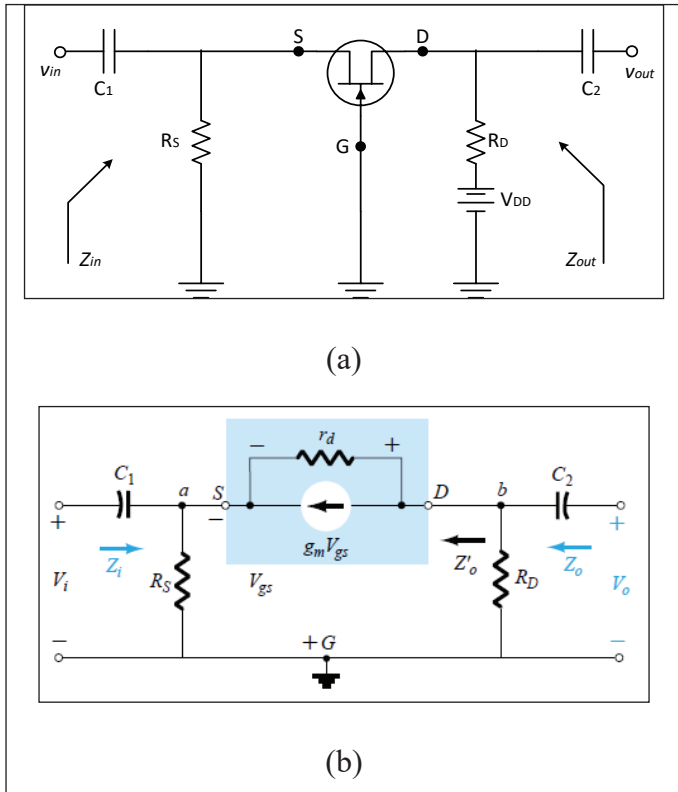
$$A_V = \frac{g_m(R_S)}{1 + g_m(R_S)} \quad (6.30)$$

- 4) Tegangan keluaran penguat ini diperoleh sebesar

$$v_{out} = \frac{g_m(R_S)}{1 + g_m(R_S)} v_{in}. \quad (6.31)$$

### 3. Penguat *Gate* Bersama (*Common Gate*)

Konfigurasi dasar dari rangkaian penguat *gate* bersama ini ditunjukkan pada Gambar 6.21.



Keterangan: (a) Rangkaian dan (b) Rangkaian Ekuivalen AC-nya

Sumber: Boylestad & Nashelsky (2014)

**Gambar 6.21** Rangkaian Penguat FET *Common Gate*

Rangkaian penguat ini seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 6.21. Dapat kita tentukan parameter rangkaian penguatnya, antara lain,  $Z_{in}$ ,  $Z_{out}$ ,  $A_V$ ,  $v_{out}$ .

- 1) Impedansi masukan penguat ini sama seperti pada penguat CS, yaitu

$$Z_{in} = R_S // \left[ \frac{r_d + R_D}{1 + g_m r_d} \right]. \quad (6.32)$$

Saat  $r_d \geq 10R_D$ , impedansi masukan sekarang menjadi

$$Z_{in} = R_S // \frac{1}{g_m}. \quad (6.33)$$

- 2) Impedansi keluaran penguat dapat ditentukan dari hubungan persamaan

$$Z_{out} = R_D // r_d. \quad (6.34)$$

Saat kondisi  $r_d \geq 10R_S$ , impedansi keluaran sekarang menjadi

$$Z_{out} = R_D.$$

- 3) Penguatan tegangan penguat CS FET ini diperoleh sebesar

$$A_V = \frac{g_m(r_d // R_S)}{1 + g_m(r_d // R_S)}. \quad (6.35)$$

Saat kondisi  $r_d \geq 10R_S$ , penguatan tegangan sekarang sebesar

$$A_V = \frac{g_m(R_S)}{1 + g_m(R_S)}. \quad (6.36)$$

- 4) Tegangan keluaran penguat ini diperoleh sebesar

$$v_{out} = \frac{g_m(R_S)}{1 + g_m(R_S)} v_{in}. \quad (6.37)$$

## Penyelesaian Masalah

### Kasus 1

Kaki gerbang (*gate*) pada FET dijadikan sebagai pengendali input mempunyai kapasitansi yang sangat kecil. Kapasitansi *gate* ini dapat menyimpan muatan listrik. Pada saat *probe* hitam dari multimeter ditempelkan pada kaki gerbang (G), kapasitansi *gate* mendapat muatan positif. Tegangan positif ini menyebabkan resistansi antara kaki *source* (S)-*drain* (D) mengecil sehingga jarum menyimpang. Pada saat kaki *drain* disentuh dengan jari, muatan positif akan hilang terbangun lewat sentuhan jari. Akibatnya, resistansi antara kaki *source* dan *drain* akan berubah menjadi sangat besar sekali sehingga jarum

tidak menyimpang. Seandainya keadaan ini tidak terpenuhi, FET dipastikan mengalami kebocoran atau terhubung singkat.

## Kasus 2

FET tidak memerlukan arus penggerak di bagian *gate* input untuk menjalankan komponen FET, tetapi hanya dibutuhkan tegangan penggerak di bagian *gate* input tanpa mengubah nilai resistansi dan kapasitansi masukan.

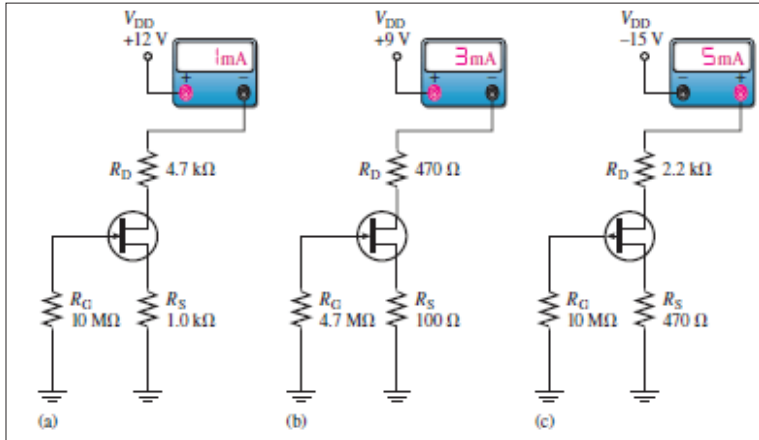
## RANGKUMAN

- 1) Transistor unipolar merupakan jenis transistor yang memiliki satu hubungan kutub atau satu polaritas dan bekerjanya dikendalikan oleh tegangan masukannya.
- 2) Transistor FET sendiri menggunakan tegangan *gate* ( $V_{GS}$ ) sebagai pusat pengaturan tegangannya bagi rangkaian transistor unipolar.
- 3) Untuk menganalisis pembiasan transistor tipe ini dilakukan dua pendekatan, yaitu model sinyal arus searah (DC) dan model sinyal arus bolak-balik (AC). Hal ini sama seperti pembiasan pada transistor jenis bipolar.
- 4) FET sendiri bekerja menggunakan satu polaritasnya sehingga FET bisa dikenali sebagai FET kanal-P atau kanal-N.

## LATIHAN SOAL

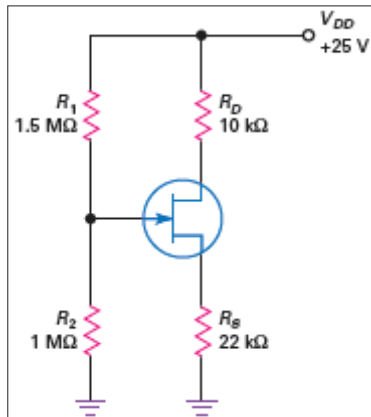
- 1) Jika tegangan  $V_{GS}$  sebuah FET tipe P-kanal dinaikkan dari 1 V ke 3 V, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut.
  - a. Apakah daerah pengosongan menjadi sempit atau lebar? Jelaskan alasannya.
  - b. Apakah resistansi kanal membesar atau mengecil? Jelaskan alasannya.
- 2) Kenapa tegangan  $V_{GS}$  sebuah FET tipe N-kanal harus selalu bernilai 0 atau negatif? Jelaskan alasannya.

- 3) Mengacu pada Gambar 6.22, tentukan tegangan  $V_{DS}$  dan  $V_{GS}$  untuk masing-masing ketiga rangkaian tersebut dan berikan kesimpulan dari hasil perhitungannya.



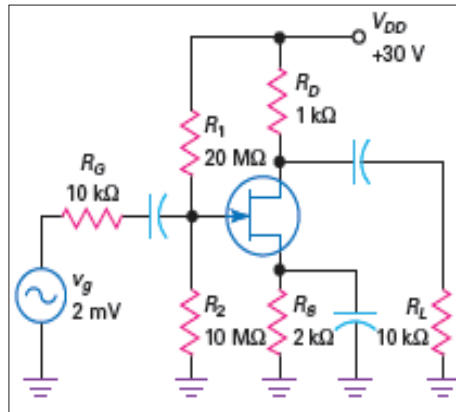
**Gambar 6.22** Set Up Pengukuran Arus pada Rangkaian FET

- 4) Tentukan tegangan *drain*  $V_D$  dari rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 6.23.



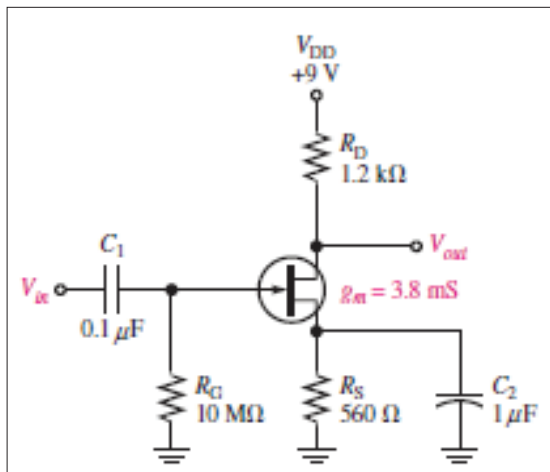
**Gambar 6.23** Rangkaian Pembiasan Model Sinyal DC pada FET

- 5) Masih menggunakan rangkaian pada Gambar 6.23, buatlah kurva garis beban DC dan titik Q-nya.
- 6) Sebuah rangkaian penguat FET seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.24, tentukan tegangan keluaran  $V_{out}$  penguat tersebut.



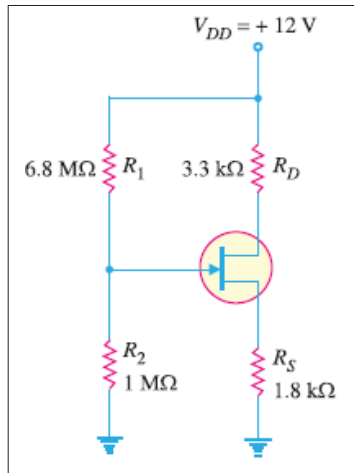
**Gambar 6.24** Rangkaian Penguat FET

- 7) Tentukan penguatan tegangan dari rangkaian penguat yang ditunjukkan Gambar 6.25.



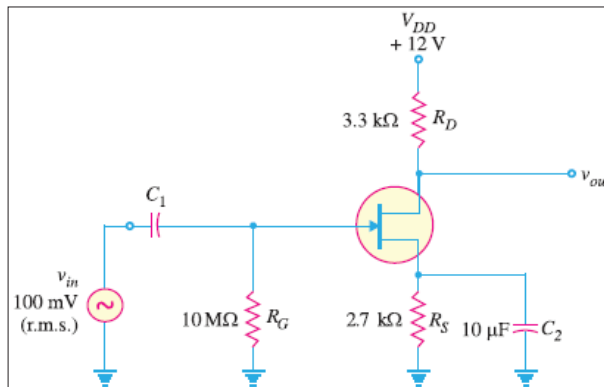
**Gambar 6.25** Rangkaian Penguat FET Tanpa Beban

- 8) Tentukan arus  $I_D$  dan  $V_{GS}$  dari rangkaian pada Gambar 6.26 jika diasumsikan tegangan  $V_D$  sebesar 7 volt.



**Gambar 6.26** Pembiasan Sinyal DC pada Rangkaian FET

- 9) Dari gambar penguat FET yang ditunjukkan Gambar 6.27, tentukan tegangan keluaran efektif  $V_{rms}$  dengan mengasumsikan  $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ ,  $V_{GS(off)} = -10 \text{ volt}$ ,  $I_D = 1.9 \text{ mA}$ .



Sumber: Floyd dan Buchla (2014)

**Gambar 6.27** Rangkaian Penguat FET

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R., & Nashelsky, L., (2014). *Electronic devices and circuit theory* (7th ed.). Prentice Hall.
- Floyd, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R., (2014). *Electrical engineering principles and applications*, (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A., & Bates, D. (2016). *Electronic principles*, 8th (ed.). McGrawHill-Education.
- Sedra & Smith. (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.

# BAB VII

## MENDESAIN RANGKAIAN MENGUNAKAN KOMPONEN MOSFET

### **Materi pembelajaran:**

Pada pembahasan kali ini yang dipelajari tentang sifat dan cara kerja jenis MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) yang merupakan kategori jenis transistor satu kutub (unipolar). Selanjutnya dibahas juga tentang tahapan perhitungan secara mudah dan praktis menggunakan persamaan-persamaan terkait guna merancang sebuah model aplikasi rangkaian elektronika menggunakan komponen MOSFET ini.

### **Tujuan pembelajaran:**

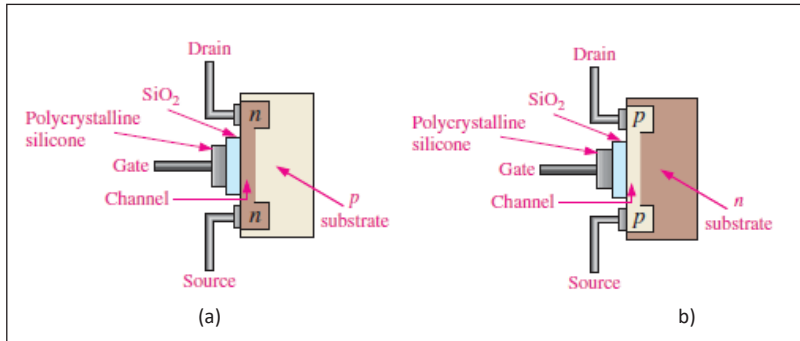
- mampu meningkatkan pengetahuan tentang sifat dan kinerja komponen MOSFET beserta aplikasinya;
- mampu menghitung, mengukur, dan merancang sebuah model rangkaian elektronika menggunakan komponen MOSFET; dan
- mampu menganalisis kinerja komponen MOSFET untuk mendukung implementasinya di masa mendatang.

## A. Pendahuluan

Pada pokok bahasan kali ini kita akan membahas secara lengkap dan praktis salah satu keluarga transistor efek medan atau FET yang cukup populer, yaitu transistor efek medan semikonduktor oksida logam atau lebih dikenal MOSFET (*metal oxid semiconductor field effect transistor*). Kepopuleran MOSFET ini sebenarnya cukup beralasan karena hampir mayoritas perangkat atau rangkaian elektronika, baik analog maupun digital, menggunakan komponen ini karena jenis komponen ini memiliki beberapa kelebihan dibanding dengan BJT maupun FET biasa. Sumber kelebihan ini sebenarnya berasal dari adanya bahan semikonduktor oksida logam atau MOS. Bahan ini membuat peranti dapat didesain sangat kecil jika diterapkan pada teknologi rangkaian terpadu seperti pembuatan mikroprosesor dan memori. Kelebihan lain MOS ini adalah memiliki impedansi masukan yang sangat besar serta kemampuannya mengonsumsi daya yang kecil sehingga cukup baik jika diterapkan pada rangkaian-rangkaian sakelar (*switching*) dan tidak cukup baik jika diaplikasikan pada rangkaian penguat karena bisa menghasilkan rugi-rugi daya yang besar dalam bentuk peningkatan panas. Tidak seperti pada FET yang hanya satu jenis tipe, yaitu pengosongan (*depletion*) saja, pada MOSFET selain tipe pengosongan juga ada tipe peningkatan (*enhancement*). Perbedaan lainnya adalah terdapatnya lapisan silikon oksida  $\text{SiO}_2$  sebagai pemisah antara gerbang dengan saluran yang berkedudukan sebagai osilator yang dapat menyebabkan arus gerbang (*gate current*) menjadi sangat kecil sekitar  $10^{-12} \text{ A}$  sampai dengan  $10^{-15} \text{ A}$  dan tidak dikendalikan oleh sambungan PN (*PN-junction*) seperti halnya berlaku pada FET. Hal ini menunjukkan bahwa bahan  $\text{SiO}_2$  pada komponen MOSFET dapat memberikan resistansi masukan yang sangat tinggi untuk segala kondisi dan menjadi pembeda utama dengan FET biasa.

## B. Mode Pengosongan (Depletion)

MOSFET mode pengosongan disebut juga sebagai D-MOSFET yang terdiri dari saluran N dan P yang struktur dasarnya terlihat seperti yang ditunjukkan Gambar 7.1.

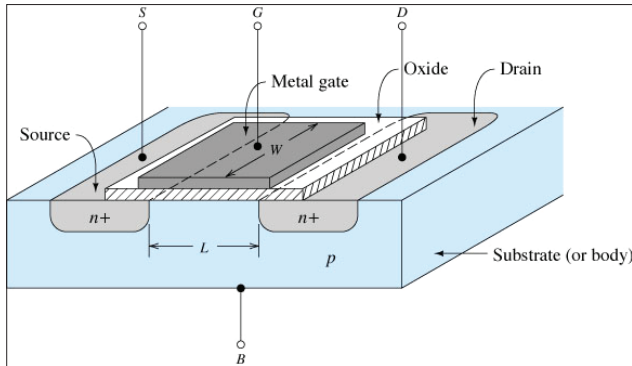


Keterangan: (a) Saluran N dan (b) Saluran P

Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 7.1** MOSFET Mode Pengosongan

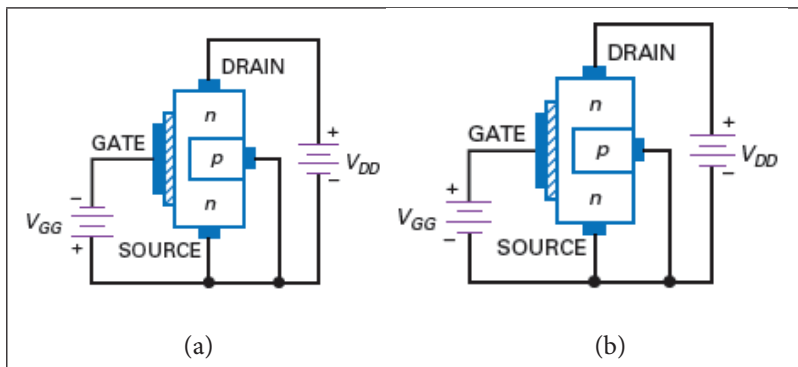
Penamaan saluran N maupun saluran P tidak terlepas dari adanya pengendalian nilai pembiasan tegangan dari sisi gerbang terhadap sumber (*gate-source*) seperti yang digambarkan pada Gambar 7.1. Jika kita menggeser tegangan gerbang  $V_{GS}$  ke arah lebih negatif, saluran di antara *drain* dan *source* akan lebih sempit. Akibatnya, resistansi saluran  $r_{DS}$  makin tinggi yang artinya distribusi arus dari *source* ke *drain* maupun sebaliknya sangat kecil, bahkan hampir bernilai nol. Seandainya tegangan  $V_{GS}$  ini dibuat lebih negatif sehingga menimbulkan suatu kondisi pengosongan muatan arus antara *source* dengan *drain* terjadi dengan  $V_{GS}$  pada keadaan ini dinyatakan sebagai tegangan *pinch-off* ( $V_p$ ). Penjelasan ini dapat dilihat dari struktur fisis MOSFET tipe pengosongan saluran N seperti yang digambarkan pada Gambar 7.2 berikut.



Sumber: Floyd & Buchla (2014)

**Gambar 7.2** Struktur Fisik D-MOSFET N-Kanal

Sifat MOSFET tipe pengosongan saluran N dengan tegangan  $V_{GS}$  dibuat lebih negatif ternyata mirip dengan sifat FET. Namun, yang membedakannya adalah pada MOSFET tegangan  $V_{GS}$  ini dapat dibuat menjadi lebih positif sehingga tidak hanya terdapat MOSFET mode pengosongan saluran N, tetapi ada juga saluran P. Khusus untuk MOSFET mode pengosongan saluran P ini gambaran operasi kerjanya merupakan kebalikan dari MOSFET mode pengosongan saluran N. Gambaran prinsip kerjanya terlihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.3, yaitu saat tegangan  $V_{GS}$  ini diberikan nilai tegangan lebih kecil dari nilai tegangan ambang atau saat tegangan lebih negatif maupun tegangan di atas nilai ambangnya atau saat tegangan lebih positif, untuk masing-masing saluran sesuai dengan spesifikasinya dapat diperlihatkan seperti Gambar 7.3.

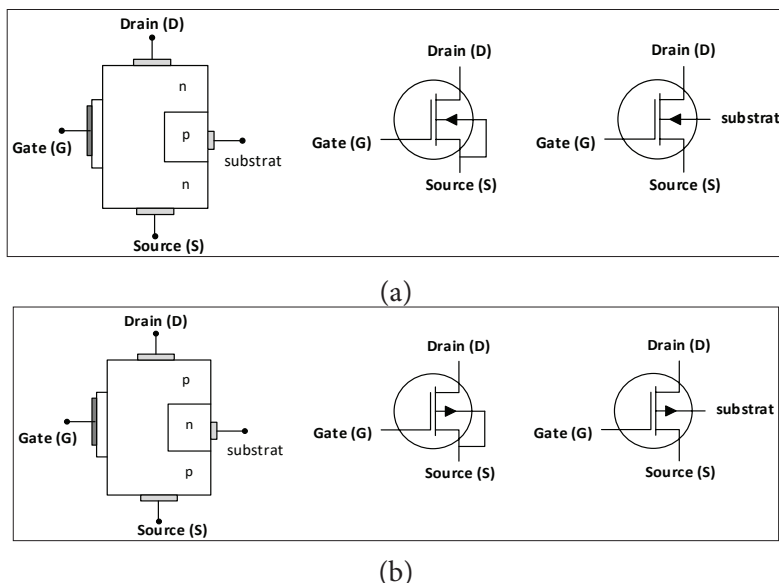


Keterangan: (a) Tegangan *Gate* Negatif dan (b) Tegangan *Gate* Positif

Sumber: Malvino & Bates (2016)

**Gambar 7.3** Model Pembiasan Tegangan D-MOSFET

Sementara itu, simbol D-MOSFET sendiri untuk masing-masing tegangan *gate* negatif (saluran N) maupun tegangan *gate* positif (saluran P) ditunjukkan pada Gambar 7.4.

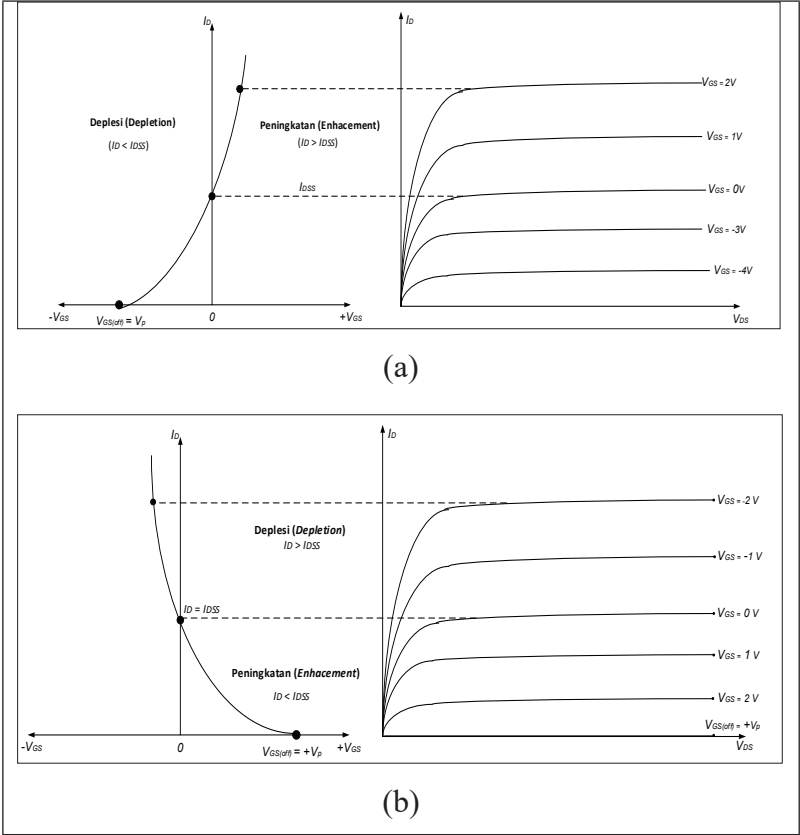


Keterangan: (a) N-Kanal, (b) P-Kanal

**Gambar 7.4** Konstruksi dan Simbol Jenis Kanal D-MOSFET

C. Karakteristik MOSFET Mode Pengosongan

Kurva karakteristik jenis mode MOSFET ditunjukkan untuk memahami prinsip kerja secara utuh terutama terkait dengan daerah operasi kerja komponen ini. Hal ini bertujuan agar lebih memudahkan bagi perancang dalam memulai merancang sebuah rangkaian elektronika menggunakan MOSFET sebagai komponen utamanya. Pada dasarnya tipe D-MOSFET ini dapat bekerja pada daerah tegangan *gate-source* negatif maupun positif maka secara lengkap bentuk kurvanya digambarkan seperti pada Gambar 7.5.



Keterangan: (a) N-Kanal, (b) P-Kanal

Gambar 7.5 Kurva Karakteristik Mode D-MOSFET

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kurva karakteristik seperti pada Gambar 7.5a disebut juga kurva transkonduktansi yang bentuknya hampir sama dengan kurva JFET sehingga persamaan transkonduktansinya akan bernilai sama seperti pada JFET, yaitu sebesar

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2. \quad (7.1)$$

Perubahan pada arus *drain* dapat menentukan kedudukan daerah kerja MOSFET tipe ini karena besarnya tergantung pada perubahan tegangan *gate-source* yang bisa berharga positif atau negatif sehingga kita dapat menentukan kategori tipe MOSFET ini apakah mode pengosongan atau peningkatan dan kita mampu menggambarkan sketsa kurva karakteristiknya secara presisi.

Ada beberapa catatan yang dapat dijelaskan terkait dengan kurva karakteristik MOSFET yang ditunjukkan Gambar 7.5a, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Arus  $I_D = I_{DSS}$  tercapai saat  $V_{GS} = 0$ . Kondisi ini tercapai saat terminal *gate* dan *source* terhubung singkat. Keadaan ini menjadi rujukan kondisi awal kerja dari D-MOSFET ini.
- 2) Saat tegangan  $V_{GS}$  bergeser menuju nilai negatif, arus *drain*  $I_D$  akan berkurang di bawah  $I_{DSS}$ . Pada kondisi ini,  $I_D$  akan terus menuju nol atau kondisi saat  $V_{GS} = V_{GS(off)}$  (untuk beberapa kasus nilai  $V_{GS(off)} \approx V_p$ ).
- 3) Sebaliknya, ketika tegangan  $V_{GS}$  bergeser menuju nilai positif, arus *drain*  $I_D$  akan bertambah besar di atas  $I_{DSS}$ . Pada kondisi ini,  $I_D$  akan terus menuju harga maksimum.
- 4) Gambar 7.5.b merupakan kurva karakteristik operasi kerja D-MOSFET P-kanal yang prosesnya merupakan kebalikan dari tahapan penjelasan seperti pada N-kanal sebelumnya.
- 5) Terjadinya pergeseran tegangan  $V_{GS}$  baik bernilai negatif maupun positif dapat diaplikasikan untuk menganalisis pembiasan MOSFET tipe N-kanal ini (akan dibahas pada subbab selanjutnya)

### Contoh 7.1

Sebuah D-MOSFET memiliki arus *drain-source* yang dihubungkan singkat  $I_{DSS} = 1 \text{ mA}$  dan tegangan *pinch-off*  $V_{GS(off)} = -6 \text{ volt}$ . Gambarkan kurva karakteristiknya jika secara berurutan masing-masing tegangan *gate-source* diketahui sebesar  $V_{GS1} = -3 \text{ V}$ ;  $V_{GS2} = -1 \text{ V}$ ;  $V_{GS3} = 1 \text{ V}$ ;  $V_{GS4} = 3 \text{ V}$ .

### Penyelesaian

Kita terlebih dahulu melokalisasi penempatan arus *drain* saat  $I_D = I_{DSS}$ , yaitu saat tegangan  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  yang digunakan sebagai titik acuan operasi kerja MOSFET tipe ini.

- 1) Saat  $V_{GS1} = -3 \text{ V}$ , diperoleh

$$I_D = 1 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-3 \text{ V}}{-6 \text{ V}} \right]^2 = 0,25 \text{ mA.}$$

- 2) Saat  $V_{GS2} = -1 \text{ V}$ , diperoleh

$$I_D = 1 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-1 \text{ V}}{-6 \text{ V}} \right]^2 = 0,69 \text{ mA.}$$

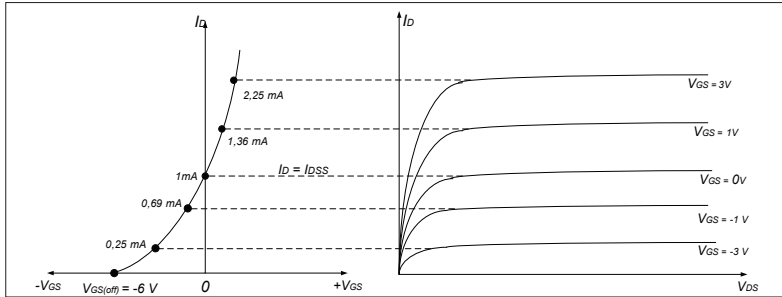
- 3) Saat  $V_{GS3} = 1 \text{ V}$ , diperoleh

$$I_D = 1 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{1 \text{ V}}{-6 \text{ V}} \right]^2 = 1,36 \text{ mA.}$$

- 4) Saat  $V_{GS4} = 3 \text{ V}$ , diperoleh

$$I_D = 1 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{3 \text{ V}}{-6 \text{ V}} \right]^2 = 2,25 \text{ mA.}$$

Dari hasil perhitungan ini terbentuk sketsa kurva transkonduktansinya seperti yang ditunjukkan Gambar 7.6.



**Gambar 7.6** Kurva Karakteristik Transkonduktansi Mode D-MOSFET

### Contoh 7.2

Buatlah sketsa kurva transfer karakteristik sebuah D-MOSFET N-kanal dengan arus  $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$  dan  $V_{GS(off)} = -4 \text{ volt}$  pada saat  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ;  $V_{GS} = V_{GS(off)}$ ;  $V_{GS} = 0,5 V_{GS(off)}$ ;  $V_{GS} = 0,3 V_{GS(off)}$ ;  $V_{GS} = 1 \text{ volt}$ .

### Penyelesaian

Pertama, kita mencoba menentukan dahulu nilai tegangan *gate-source* ketika arus *drain*  $I_D$  berharga sama dengan  $I_{DSS}$ . Hal ini digunakan untuk mengplot nilai rujukan bagi pembagian daerah operasi kerja D-MOSFET ini mulai bekerja sehingga diperoleh nilai ini saat  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  dengan arus *drain* sebesar  $I_D = 10 \text{ mA}$  (dengan menggunakan persamaan (6.1)). Ini juga menunjukkan bahwa saat ini  $I_D = I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ . Kemudian, untuk  $V_{GS}$  lainnya diperoleh sebagai berikut.

- 1) Saat  $V_{GS} = V_{GS(off)} = -4 \text{ volt}$ , arus drain diperoleh sebesar

$$I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-4 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right]^2 = 0 \text{ mA}.$$

- 2) Saat  $V_{GS} = 0,5 V_{GS(off)} = -2 \text{ volt}$ , arus drain diperoleh sebesar

$$I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-2 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right]^2 = 2,5 \text{ mA.}$$

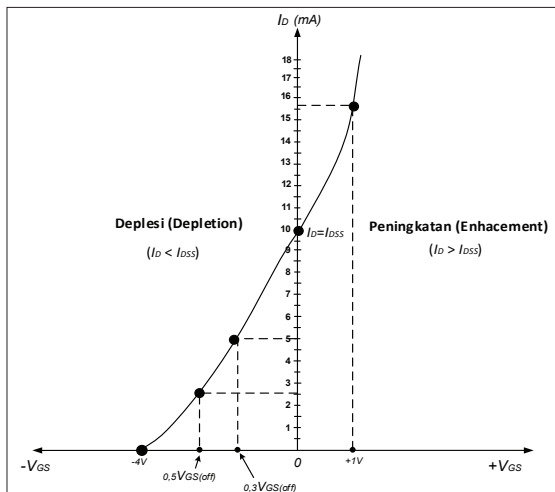
- 3) Saat  $V_{GS} = 0,3 V_{GS(off)} = -1,2 \text{ volt}$ , arus drain diperoleh sebesar

$$I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-1,2 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right]^2 = 4,9 \text{ mA} \approx 5 \text{ mA.}$$

- 4) Saat  $V_{GS} = 1 \text{ volt}$ , arus drain diperoleh sebesar

$$I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{1 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right]^2 = 15,6 \text{ mA.}$$

Dengan demikian, dari hasil-hasil ini dapat dibuat sebuah sketsa kurva transfernya seperti yang ditunjukkan Gambar 7.7.



**Gambar 7.7** Kurva Transfer Mode D-MOSFET N-kanal (hasil perhitungan)

Kesimpulan yang dapat dijelaskan dari hasil kurva transfer pada Gambar 7.7 adalah bahwa bergesernya tegangan  $V_{GS}$  makin ke arah positif maka perubahan daerah akan menuju ke daerah peningkatan atau *enhancement* yang ditandai dengan nilai  $I_D > I_{DSS}$ . Begitu pun sebaliknya, berlaku untuk kondisi saat  $V_{GS}$  makin ke arah negatif maka MOSFET berkecenderungan bekerja pada daerah pengosongan atau *depletion*. Ini artinya bahwa D-MOSFET dapat bekerja pada daerah pengosongan maupun peningkatan dengan mengubah-ubah harga tegangan  $V_{GS}$  sesuai gambaran kurva pada Gambar 7.7.

#### D. Pembiasan MOSFET Mode Pengosongan

Analisis pembiasan pada tipe MOSFET jenis ini pada dasarnya persis sama seperti berlaku pada JFET saat tegangan  $V_{GS}$  bernilai negatif, tetapi tidak berlaku apabila tegangan  $V_{GS}$  bernilai positif. Untuk itu, perhitungannya akan lebih memudahkan jika MOSFET yang digunakan adalah N-kanal karena tahapan perhitungannya akan sama seperti pada JFET yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Prinsipnya ada empat metode yang sering digunakan dalam menganalisis pembiasan pada D-MOSFET ini, yaitu

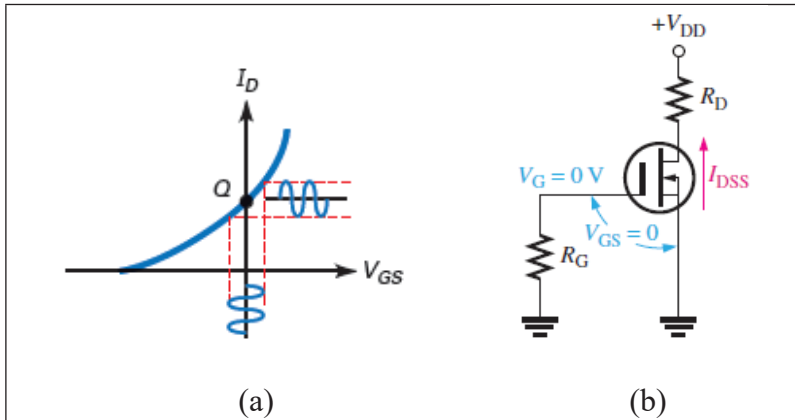
- 1) pembiasan *gate (gate bias)*,
- 2) pembiasan sendiri (*self-bias*),
- 3) pembiasan nol (*zero bias*), dan
- 4) pembiasan pembagi tegangan (*voltage divider bias*).

Dalam buku ini, penulis hanya menggambarkan metode *zero bias* dan *voltage divider bias* karena lebih mudah dipahami dan lebih banyak diaplikasikan pada rangkaian-rangkaian MOSFET.

##### 1. Pembiasan Nol (*Zero Biasing*)

Jenis pembiasan ini dilakukan dengan menempatkan titik Q pada kedudukan nilai  $V_{GS} = 0$  seperti yang diperlihatkan pada Gambar 8.8a. Dengan memasukkan sebuah tegangan AC pada sisi gerbang, dimungkinkan akan menghasilkan variasi titik Q ke atas maupun ke

bawah sehingga berdampak pada kedudukan wilayah operasi kerja D-MOSFET, yaitu daerah *ohmic*, saturasi, atau *cut-off*.



Keterangan: (a) Garis beban kerja; (b) Rangkaian Pembiasan Tipe Zero Bias

Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 7.8** Model Pembiasan pada Mode D-MOSFET

Agar memudahkan dalam menganalisis pembiasan ini, pendekatan rangkaian depleksi MOSFET seperti Gambar 7.8b dapat dijadikan acuan untuk menghitung pembiasan nol (zero bias) ini. Rangkaian pada gambar 7.8.b ini memiliki tegangan  $V_{GS} = 0$  saat  $I_D = I_{DSS}$  sehingga tegangan *drain-source*  $V_{DS}$  dapat ditentukan sebesar

$$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS}R_D. \quad (7.2)$$

Pada pembiasan ini, tahanan *source*  $R_D$  tidak terlalu perlu diperhitungkan karena ketika tahanan *source*  $R_S$  ini tidak dipasang,  $V_{GS}$  berharga nol. Hal ini sesuai dengan penerapan metode pembiasan nol. Sementara itu, untuk memperoleh titik Q sesuai Gambar 8.8a, yaitu di daerah titik tengah (daerah *ohmic*), pada  $V_{DS}$  ditetapkan sebesar setengahnya dari tegangan *drain* atau  $V_{DD}/2$ .

### Contoh 7.3

Tentukan tegangan *drain-source* seperti yang ditunjukkan dalam rangkaian pada gambar 7.8b jika  $V_{DD} = +14 \text{ V}$ ;  $R_D = 620 \Omega$  dan dari *data sheet* MOSFET ini menunjukkan  $V_{GS(off)} = -8 \text{ V}$  dan  $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$ .

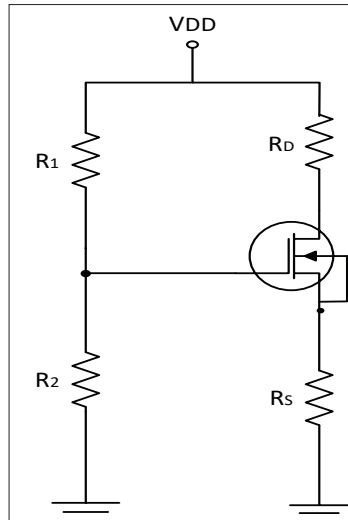
#### Penyelesaian

Kondisi ini dicapai saat  $I_D = I_{DSS} = 12 \text{ mA}$  sehingga tegangan *drain source* ( $V_{DS}$ ) diperoleh dengan menerapkan persamaan (7.2) yaitu sebesar

$$V_{DS} = 14 \text{ V} - (12 \text{ mA})(620 \Omega) = 10,6 \text{ volt}.$$

## 2. Pembiasan Pembagi Tegangan (*Voltage Divider Biasing*)

Penerapan metode pembiasan ini lebih umum digunakan oleh sebagian besar perancang karena tidak begitu sulit dalam menganalisis dalam memperkirakan unjuk kerja MOSFET deplesi saat diterapkan pada rangkaian-rangkaian elektronika. Tahapan perhitungannya hampir sama dengan perhitungan pada pembiasan JFET karena sifat kerjanya sama dengan D-MOSFET cuma perbedaannya terletak pada variasi tegangan *gate-source*  $V_{GS}$  dapat bernilai negatif maupun positif. Jadi, persamaan pada JFET dapat dipergunakan dalam menghitung nilai pembiasan ini seperti yang tergambarkan pada analisis sinyal DC sesuai Gambar 7.9.



**Gambar 7.9** Pembiasan pada Rangkaian Pembagi Tegangan Mode D-MOSFET N-Kanal

Mengingat kembali tahapan persamaan yang digunakan untuk menganalisis pembiasan JFET yang diterapkan juga pada D-MOSFET sekaligus menggambarkan atau mengplot kurva transfer karakteristik kerjanya beserta garis bebannya, tahapannya dinyatakan sebagai berikut.

- 1) Berdasarkan Gambar 7.9, hukum Kirchoff dapat digunakan untuk menentukan tegangan gerbang  $V_G$  melalui tahanan  $R_2$  sebesar

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} \quad (7.3)$$

- 2) Kemudian tegangan *gate-source*  $V_{GS}$  dapat dicari guna merancang sketsa kurva garis beban kerja MOSFET, yaitu sebesar

$$V_{GS} = V_G - I_D R_D \quad (7.4)$$

- 3) Selanjutnya untuk membuat sketsa kurva garis beban D-MOSFET dilakukan dengan cara mengasumsikan nilai  $V_{GS}$  dan  $I_D$  dari persamaan (7.4) berdasarkan persamaan-persamaan berikut.

$$V_{GS} = V_G |_{I_D=0} \text{ dan} \quad (7.5.a)$$

$$I_D = \frac{V_G}{R_S} \Big|_{V_{GS}=0}. \quad (7.5.b)$$

- 4) Dengan demikian, nilai  $V_{DS}$  sebagai salah satu bagian parameter untuk membentuk kurva karakteristik D-MOSFET ini dapat dinyatakan berdasarkan pendekatan analisis model sinyal DC dari rangkaian Gambar 7.9, yaitu sebesar

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D(R_D + R_S) \quad (7.6.a)$$

dengan tegangan *source*  $V_S$  dapat ditentukan nilainya dari persamaan

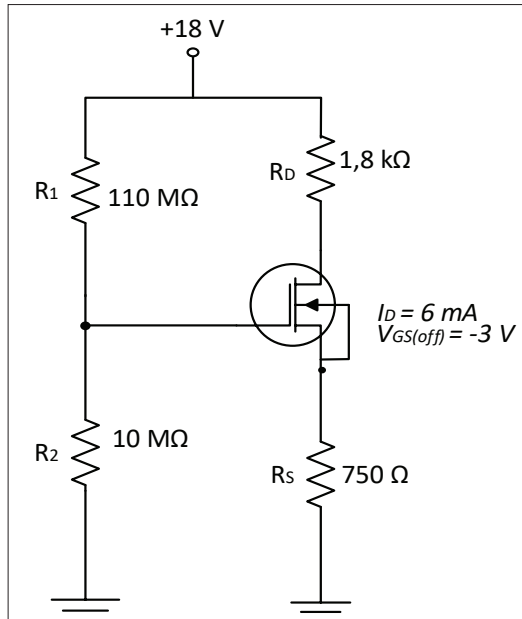
$$V_S = I_D R_S. \quad (7.6.b)$$

Jika pada rangkaian di atas harga tahanan *source*  $R_S$  tidak dipasang, nilai  $V_{DS}$  akan sebanding dengan tegangan *drain*  $V_D$ , yaitu sebesar

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D. \quad (7.6.c)$$

#### Contoh 7.4

Rancanglah sebuah kurva transfer dan garis beban dari D-MOSFET N-kanal dan tentukan arus *drain* pada titik Q garis beban  $I_{DQ}$  serta tegangan *gate-source*  $V_{GSQ}$  pada titik tersebut dari rangkaian berikut ini saat  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ;  $V_{GS} = +1 \text{ V}$ ;  $V_{GS} = -1,5 \text{ V}$ .



**Gambar 7.10** Contoh Rangkaian Pembiasan Mode D-MOSFET N-Kanal

### Penyelesaian

Pertama, kita terlebih dahulu mengplot kurva transfer menggunakan persamaan (7.1) sehingga diperoleh parameter-parameter berikut.

- 1) Untuk  $V_{GS} = 0 \text{ V}$ , arus *drain* didapatkan sebesar

$$I_D = 6 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{0}{-3 \text{ V}} \right]^2 = 6 \text{ mA} = I_{DSS}.$$

- 2) Untuk  $V_{GS} = -1,5 \text{ V}$ , arus *drain* didapatkan sebesar

$$I_D = 6 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-1,5 \text{ V}}{-3 \text{ V}} \right]^2 = 1,5 \text{ mA}.$$

- 3) Untuk  $V_{GS} = +1 \text{ V}$ , arus *drain* didapatkan sebesar

$$I_D = 6 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{+1 \text{ V}}{-3 \text{ V}} \right]^2 = 10,6 \text{ mA}.$$

Kedua, kita mengplot garis beban kerja menggunakan persamaan pembiasan di atas sehingga diperoleh parameter-parameter berikut.

- 1) Tegangan *gate* ( $V_G$ ) dari persamaan (7.3), yaitu sebesar

$$V_G = \frac{10 \text{ M}\Omega}{110 \text{ M}\Omega + 10 \text{ M}\Omega} \times 18 \text{ V} = 1,5 \text{ V}.$$

- 2) Kemudian, kita memulai menentukan titik kerja garis bebannya dengan menerapkan persamaan (7.4), (7.5a), dan (7.5b) maka dihasilkan tegangan *gate-source* sebesar

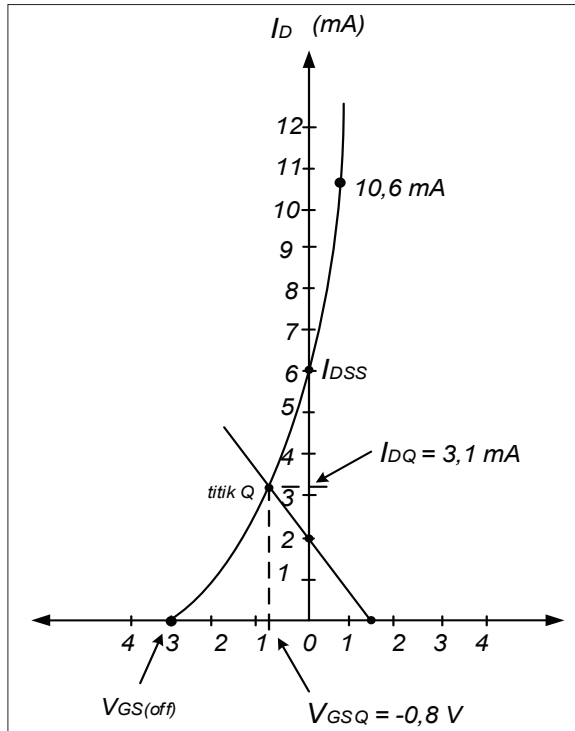
$$V_{GS} = V_G - I_D R_D = 1,5 \text{ V} - I_D (750 \Omega).$$

Dari persamaan tersebut, untuk membuat suatu garis beban, kita asumsikan  $I_D$  dan  $V_{GS}$  bernilai nol (pada daerah titik Q) secara bergantian sesuai persamaan (7.5a) dan (7.5b).

$$V_{GS} = V_G |_{I_D=0} = 1,5 \text{ V} \quad \text{dan}$$

$$I_D = \frac{V_G}{R_S} \Big|_{V_{GS}=0} = \frac{1,5 \text{ V}}{750 \Omega} = 2 \text{ mA}.$$

- 3) Dengan demikian, kurva transfer dan garis bebannya dapat digambarkan seperti pada Gambar 7.11.



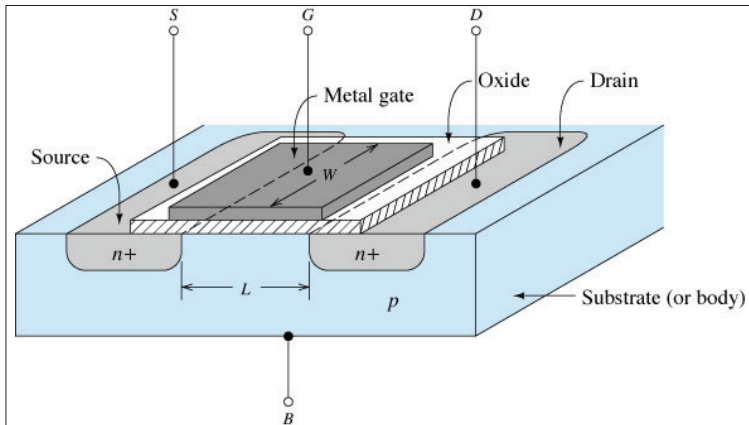
**Gambar 7.11** Kurva Transfer dan Garis Beban Kerja Mode D-MOSFET N-Kanal

Hasil kurva pada Gambar 7.11 menunjukkan bahwa arus *drain* dan tegangan *gate-source* pada titik Q dihasilkan  $I_{DQ} = 3,1 \text{ mA}$   $I_{DQ} = 3,1 \text{ mA}$ ;  $V_{GSQ} = -0,8 \text{ V}$   $V_{GSQ} = -0,8 \text{ V}$ .

### E. Pembiasan MOSFET Tipe Peningkatan

Sama halnya seperti MOSFET pengosongan, pada jenis MOSFET peningkatan ini juga memiliki tipe kanal P dan Kanal N. Dalam pembahasan kali ini kita lebih memfokuskan pada jenis MOSFET peningkatan tipe kanal N yang tentunya tidak ada bedanya

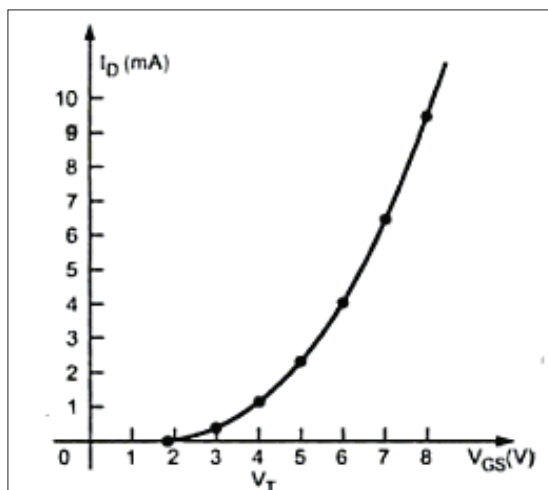
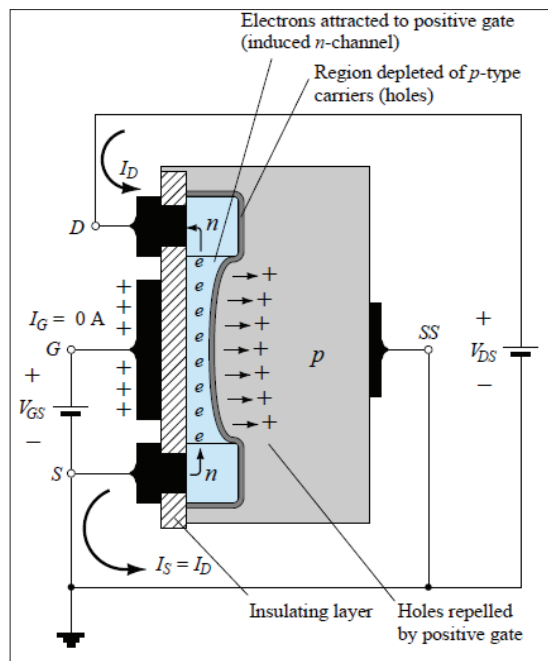
prinsip kerjanya dengan kanal P. Perbedaannya hanya terletak pada polaritasnya. Susunan konstruksi dan prinsip kerja MOSFET peningkatan tipe kanal N ditunjukkan seperti pada Gambar 7.12 dan 7.13.



Sumber: Floyd & Buchla (2014)

**Gambar 7.12** Susunan Konstruksi Bahan Mode E-MOSFET Kanal-N

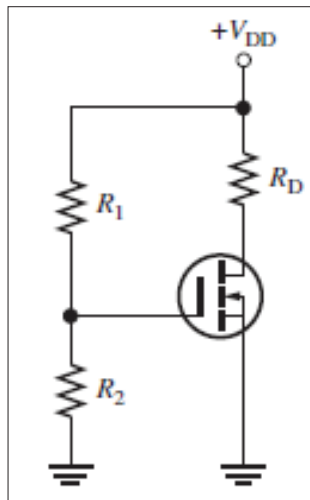
Struktur konstruksi bahan MOSFET mode peningkatan tipe kanal N ini terdiri atas substrat tipe p (+) sebagai pengendali MOSFET dengan daerah *source* dan *drain* diberi difusi n+. Di antara daerah *source* dan *drain* terdapat suatu daerah sempit dari substrat p (+) yang disebut *channel* yang ditutupi oleh lapisan isolator yang terbuat dari  $\text{SiO}_2$  yang memiliki panjang (L) dan lebar (W). Gerbang (*gate*) terbuat dari poli-silikon dan ditutup oleh penyekat yang diendapkan. Parameter lain yang memiliki peranan penting adalah ketebalan lapisan oksida yang menutupi daerah *channel*. Di atas lapisan *insulating* tersebut didepositkan *polycrystalline silicon* (*polysilicone*) *electrode*, sebagai bahan dengan gerbang (*gate*).



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 7.13** Daerah Operasi Kerja Mode E-MOSFET Kanal-N

Kurva karakteristik MOSFET peningkatan tipe kanal N menunjukkan arus *drain*  $I_D$  sebagai fungsi  $V_{DS}$  terhadap parameter  $V_{GS}$  seperti diperlihatkan Gambar 7.13. Ada tiga daerah operasi kerja MOSFET tipe ini, yaitu daerah *cut-off*, daerah linear (*ohmic*) dan daerah jenuh (*saturation*). Pada daerah *cut-off*, tegangan gerbang  $V_{GS}$  lebih kecil dari tegangan ambang  $V_{GS(th)}$  sehingga tidak terbentuk saluran dan arus *drain* tidak dapat mengalir ( $I_D = 0$ ). Sementara itu, pada daerah linear awalnya sisi gerbang (*gate*) diberi tegangan positif ( $V_{GS} \geq V_{GS(th)}$ ) sampai terbentuk saluran karena substrat P di dekat daerah saluran antara *drain-source* akan ditekan keluar menjauhi saluran akibat tegangan *gate* positif. Ini mengakibatkan terbukanya “keran” saluran antara *drain-source* yang dampaknya elektron akan mengalir dari *source* menuju *drain* atau arus akan mengalir dari *drain* ke *source*. Selanjutnya saluran tersebut akan bertindak sebagai suatu tahanan sehingga arus *drain* akan sebanding dengan tegangan *drain*. Untuk memudahkan dalam menganalisis proses pembiasan pada MOSFET jenis peningkatan ini, penulis mencoba memberikan contoh rangkaian MOSFET seperti yang ditunjukkan Gambar 7.14.



**Gambar 7.14** Skema Rangkaian Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N

Biasanya pada pembiasan ini, tegangan  $V_{GS}$  berada di atas tegangan ambang  $V_{GS(th)}$ . Di sini, teknik pembiasan nol tidak bisa diterapkan. Besarnya hasil analisis pembiasannya dapat ditinjau dari parameter masukannya dan keluarannya dengan menentukan besaran tegangan  $V_{GS}$  yang mewakili pembiasan sisi masukan serta tegangan  $V_{DS}$  yang merepresentasikan sisi keluarannya.

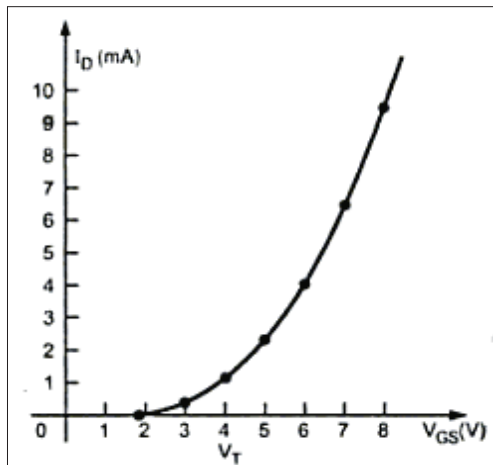
$$V_{GS} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} \quad \text{dan} \quad (7.7)$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (7.8)$$

dengan  $I_D = K(V_{GS} - V_{GS(off)})^2$  dan  $K$  menyatakan sebuah nilai konstanta yang merupakan fungsi dari susunan *device* komponen. Besarnya nilai  $K$  ini dapat dinyatakan sebagai

$$K = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS} - V_{GS(off)})^2}. \quad (7.9)$$

Secara kurva karakteristik bentuk pembiasan jenis ini dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.15.

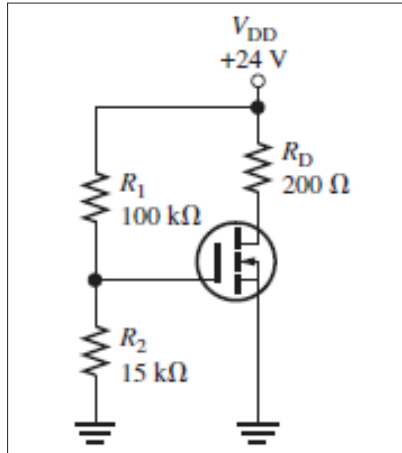


Keterangan:  $V_T \approx V_{GS(off)}$   $V_T \approx V_{GS(off)}$

**Gambar 7.15** Kurva Karakteristik Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N

### Contoh 7.5

Tentukan nilai tegangan  $V_{DS}$  dari rangkaian MOSFET peningkatan berikut ini dengan mengasumsikan bahwa MOSFET ini memiliki nilai-nilai minimum  $I_{D(on)} = 200 \text{ mA}$  saat  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  dan  $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$ .



**Gambar 7.16** Contoh Rangkaian Pembiasan Mode E-MOSFET Kanal-N

### Penyelesaian

- 1) Tegangan  $V_{GS}$  dapat ditentukan nilainya dengan menggunakan persamaan pembiasan pembagi tegangan—persamaan (6.7), yaitu sebesar

$$V_{GS} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left( \frac{100\text{K}}{15\text{K} + 100\text{K}} \right) \times 24 \text{ V} = 3,13 \text{ V}.$$

- 2) Tegangan  $V_{DS}$  dapat dicari dengan terlebih dahulu menentukan nilai konstanta  $K$  menggunakan nilai-nilai minimum  $I_{D(on)}$  dan spesifikasi nilai lainnya.

$$K = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS} - V_{GS(off)})^2} = \frac{200 \text{ mA}}{(4 \text{ V} - 2 \text{ V})^2} = 50 \text{ mA/V}^2$$

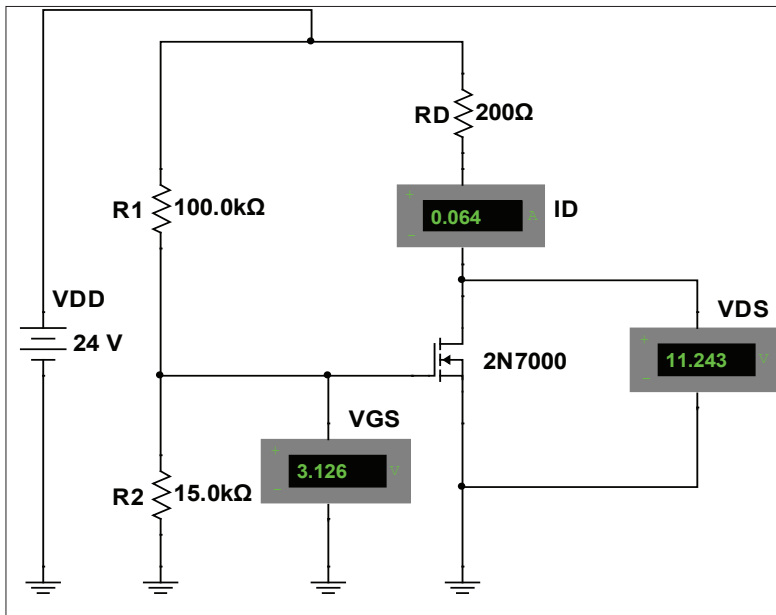
sehingga arus *drain*  $I_D$  untuk  $V_{GS} = 3,13$  volt dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(off)})^2 = 50(3,13 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 63,8 \text{ mA}.$$

3) Akhirnya, tegangan  $V_{DS}$  dapat dicari nilainya sebesar

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24 \text{ V} - (63,8 \text{ mA})(200 \Omega) = 11,2 \text{ V}.$$

Secara simulasi menggunakan Multisim, diperoleh perbandingan hasilnya seperti pada Gambar 7.17.



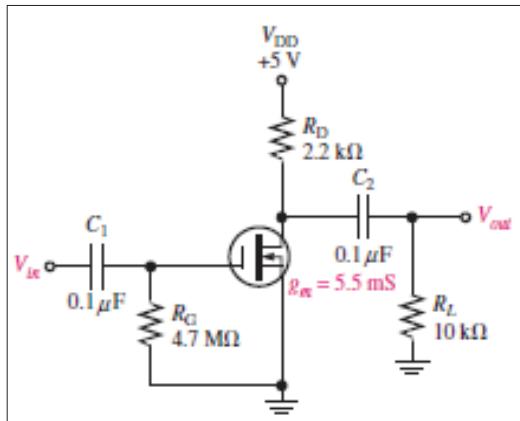
**Gambar 7.17** Rangkaian Hasil Simulasi (Contoh Soal 7.5)

## RANGKUMAN

- 1) *Metal oxide semiconductor field effect transistor* (MOSFET) merupakan jenis transistor unipolar yang tersusun dari bahan *metal oxyde*, yaitu silikon oksida ( $\text{SiO}_2$ ) sebagai bahan dasar penyusunnya.
- 2) MOSFET ini bekerja pada daerah pengosongan (*depletion*) dan peningkatan (*enhancement*) sehingga inilah yang membedakan kinerja dengan FET yang hanya bekerja pada daerah pengosongan saja.
- 3) MOSFET mode pengosongan terjadi saat sumber pengendali tegangan *gate-source* ( $V_{GS}$ ) mengendalikan saluran dari *source* ke *drain* menjadi lebih negatif sehingga di daerah ini terjadi pengosongan atau muatan menjadi lebih negatif. Sementara itu, untuk mode peningkatan prosesnya kebalikan dari mode pengosongan ini.
- 4) Kinerja MOSFET ini sangat ditentukan oleh perubahan saluran atau *channel* antara *source* dengan *drain* atau sebaliknya yang besarnya dikendalikan oleh tegangan di bagian *gate-source*.

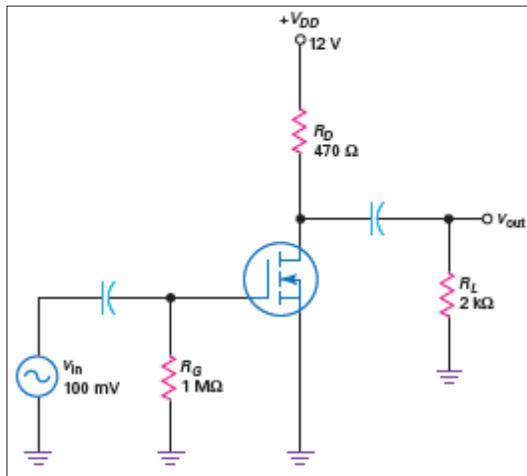
## LATIHAN SOAL

- 1) Apa perbedaan mendasar operasi kerja D-MOSFET dengan E-MOSFET?
- 2) Sebuah D-MOSFET tipe N-kanal memiliki spesifikasi  $V_{GS(off)} = -2 \text{ V}$  dan  $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$  dengan asumsi nilai  $V_{GS}$  masing-masing sebesar:  $-0.5 \text{ V}$ ,  $-1 \text{ V}$ ,  $-1.5 \text{ V}$ ,  $+0.5 \text{ V}$ , dan  $+10 \text{ V}$ . Tentukan arus *drain*  $I_D$  rangkaian D-MOSFET tersebut.
- 3) Sebuah E-MOSFET tipe N-kanal memiliki spesifikasi  $V_{GS(off)} = +3 \text{ V}$  dan  $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$  dengan asumsi nilai  $V_{GS}$  masing-masing sebesar:  $-1 \text{ V}$ ,  $-2 \text{ V}$ ,  $-1.5 \text{ V}$ ,  $0 \text{ V}$ ,  $+1.5 \text{ V}$ , dan  $+2.5 \text{ V}$ . Tentukan arus *drain*  $I_D$  rangkaian E-MOSFET tersebut.
- 4) Tentukan penguatan tegangan dari rangkaian penguat *common source* (CS) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.18.



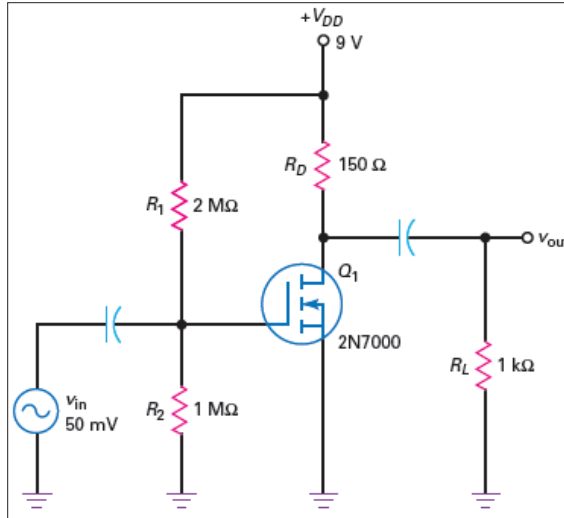
**Gambar 7.18** Rangkaian Pembiasan *Common Source*

- 5) Seperti yang ditunjukkan rangkaian pada Gambar 7.19, tentukan arus *drain*  $I_D$  dan tegangan *drain source*  $V_{DS}$  jika diketahui  $V_{GS(off)} = -3 \text{ V}$  dan  $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$ .



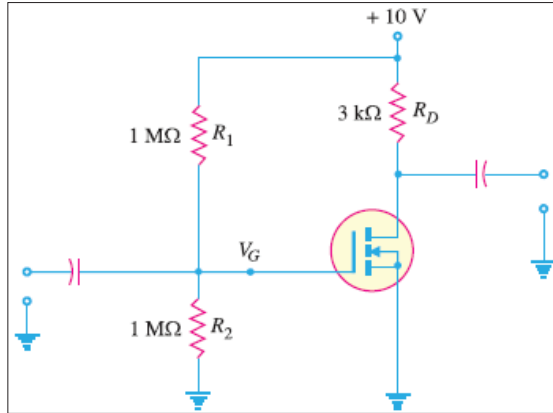
**Gambar 7.19** Dasar Rangkaian Penguat MOSFET *Common Source*

- 6) Tentukan konstanta nilai  $K$  dan arus *drain*  $I_D$  dari rangkaian penguat E-MOSFET seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.20 menggunakan nilai-nilai minimum  $I_{D(on)}$ ,  $V_{GS(on)}$  dan  $V_{GS(th)}$  dari tipe MOSFET 2N7000.



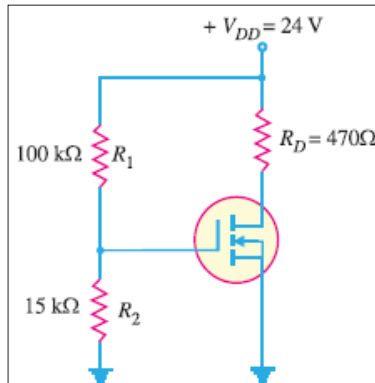
**Gambar 7.20** Rangkaian Penguat MOSFET Mode Peningkatan

- 7) Tentukan arus  $I_D$  dari rangkaian pada Gambar 7.21 jika mengacu pada informasi *data sheet* MOSFET yang diketahui  $I_{D(on)} = 10$  mA pada nilai  $V_{GS} = 10$  V dan  $V_{GS(th)} = 1.5$  V.



**Gambar 7.21** Dasar Rangkaian Penguat MOSFET Mode Peningkatan

- 8) Tentukan  $V_{GS}$  dan  $V_{DS}$  dari rangkaian E-MOSFET pada Gambar 7.22 jika berdasarkan informasi *data sheet* MOSFET tersebut diketahui  $I_{D(on)} = 500 \text{ mA}$  pada nilai  $V_{GS} = 10 \text{ V}$  dan  $V_{GS(th)} = 1 \text{ V}$ .



**Gambar 7.22** Pembiasan MOSFET Mode Peningkatan

## DAFTAR PUSTAKA

- Sedra & Smith, (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R., (2014). *Electrical engineering principles and applications* (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A., & Bates, D. (2016). *Electronic principles* (8th ed.). McGrawHill-Education.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB VIII

## MENDESAIN RANGKAIAN ELEKTRONIKA MENGGUNAKAN KOMPONEN PENGUAT OPERASIONAL (OP-AMP)

### Materi pembelajaran:

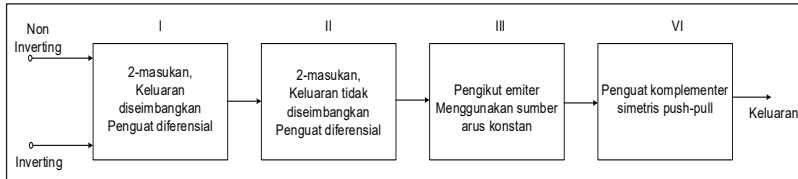
Pada bab in akan dibahas tentang karakteristik sebuah penguat operasional (op-amp) ideal maupun non-ideal. Selain itu, akan dipelajari juga tentang langkah-langkah perhitungan dan perancangan secara praktis menggunakan persamaan-persamaan yang terkait. Selanjutnya dalam bab ini akan dilengkapi dengan beberapa aplikasi rangkaian elektronika menggunakan komponen penguat operasional yang populer diterapkan dalam perangkat teknologi elektronika.

### Tujuan pembelajaran:

- 1) mengenal kinerja dan sifat yang dimiliki oleh komponen penguat operasional beserta aplikasinya;
- 2) mampu menghitung dan merancang rangkaian menggunakan komponen penguat operasional menggunakan teorema dan persamaan-persamaan yang terkait; serta
- 3) mampu membuat sebuah model rangkaian elektronika menggunakan komponen penguat operasional yang dapat diterapkan dan diimplementasikan dalam kehidupan sehari-hari.

## A. Pendahuluan

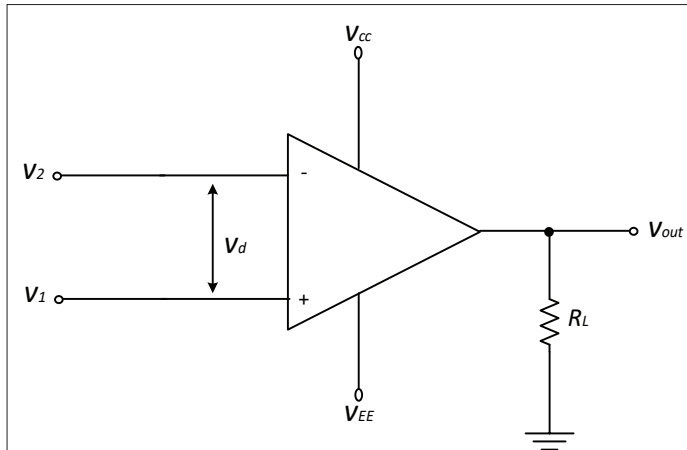
Penguat operasional adalah suatu rangkaian terintegrasi yang berisi beberapa tingkat dan konfigurasi penguat diferensial. Penguat operasional memiliki dua masukan dan satu keluaran serta memiliki penguatan DC yang tinggi. Tipikal penguat operasional digambarkan oleh sebuah blok diagram seperti yang diperlihatkan Gambar 8.1.



Sumber: Malvino & Bates (2016)

**Gambar 8.1** Blok Diagram Tipikal Penguat Operasional

Tipikal penguat operasional tersebut menunjukkan bahwa penguat operasional terdiri dari penguat-penguat bertingkat yang setiap tingkatannya memiliki tingkat penguatan yang berbeda. Disebut sebagai penguat operasional karena komponen ini memiliki kelebihan, yaitu mampu menguatkan sinyal masukan dengan stabilitas yang baik juga mampu melakukan operasi matematika seperti operasi penjumlahan, pengurangan, perkalian, pembagian, integrator, diferensiator, dsb. Untuk dapat bekerja dengan baik, penguat operasional memerlukan tegangan catu yang simetris, yaitu tegangan yang berharga positif (+V) dan tegangan yang berharga negatif (-V) terhadap tanah (*ground*). Berikut ini adalah simbol dari penguat operasional seperti yang ditunjukkan Gambar 8.2



Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 8.2** Konfigurasi Dasar Penguat Operasional

Prinsip dasar penguat operasional ini adalah penguat diferensial karena dua sinyal masukan diterapkan pada terminal balik fase (*inverting*) dan tak balik fase (*non-inverting*) yang artinya kedua masukan ini memiliki karakteristik berbeda. Karena itu, kedua masukan ini secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$v_d = v_1 - v_2. \quad (8.1)$$

Kemudian, tegangan keluaran  $v_{out}$  penguat operasional ini diperoleh sebesar

$$v_{out} = A_d V_d + A_c V_c, \quad (8.2)$$

dengan

$V_d$  : tegangan diferensial (*voltage differential*) (volt),

$V_c$  : tegangan bersama (*voltage common*) (volt),

$A_d$  : penguatan diferensial (*defferential amplifier*),

$A_c$  : penguatan bersama (*common amplifier*).

Faktor penguatan penguat operasional merupakan faktor menentukan kinerja op-amp dan biasanya dinyatakan oleh parameter CMRR (*common mode rejection ratio*). Perubahan CMRR dipengaruhi oleh perubahan faktor penguatan pada bagian diferensial maupun mode bersama. Penguatan yang baik memiliki nilai CMRR besar yang artinya menunjukkan penguatan di sisi diferensial harus lebih besar atau penguatan mode bersamanya bernilai relatif kecil. Jadi CMRR diperoleh berdasarkan hasil perbandingan antara penguatan diferensial terhadap penguatan mode bersama yang secara matematis dinyatakan sebesar

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} \quad (8.3)$$

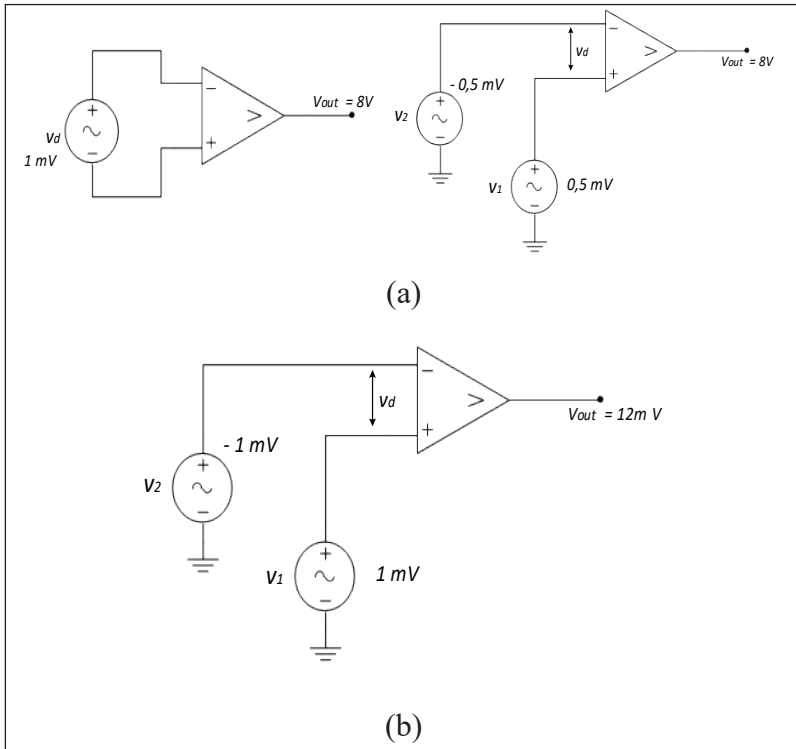
Nilai CMRR ini dapat dinyatakan juga dengan satuan logaritmik, yaitu

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} \quad (8.4)$$

Nilai CMMR untuk kondisi ideal bernilai tak terhingga, tetapi pada nyatanya harga sebesar itu sangat sulit untuk dihasilkan.

### Contoh 8.1

Tentukan nilai CMRR dari rangkaian pada Gambar 8.3.



Keterangan: (a) Diferensial dan (b) Mode Bersama

**Gambar 8.3** Nilai CMMR Penguat Operasional

### Penyelesaian

Dari Gambar 7.3a diperoleh penguatan diferensial  $A_d$  sebesar

$$A_d = \frac{v_o}{v_d} = \frac{8 \text{ V}}{1 \text{ mV}} = 8000.$$

Selanjutnya, dari Gambar 7.3b diperoleh penguatan mode bersama  $A_c$  sebesar

$$A_c = \frac{v_o}{v_c} = \frac{12 \text{ mV}}{1 \text{ m}} = 12$$

sehingga dengan menggunakan persamaan (7.3), nilai CMRR didapatkan sebesar

$$CMRR = \frac{8000}{12} = 666,7.$$

Dalam satuan logaritmik, dinyatakan sebesar

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{8000}{12} = 56,48 \text{ dB}.$$

## B. Karakteristik Penguat Operasional

Pada dasarnya penguat operasional harus mampu merasakan adanya pengaruh dari masukan-masukan yang diberikan pada masing-masing terminal  $v_1, v_1$  maupun  $v_2, v_2$ . Kemudian dengan mengalikan dengan faktor penguatan A, akan diperoleh tegangan keluaran sebesar

$$AV_d = v_o = A(v_1 - v_2), \quad (8.5)$$

dengan

$A$  : penguatan tegangan,

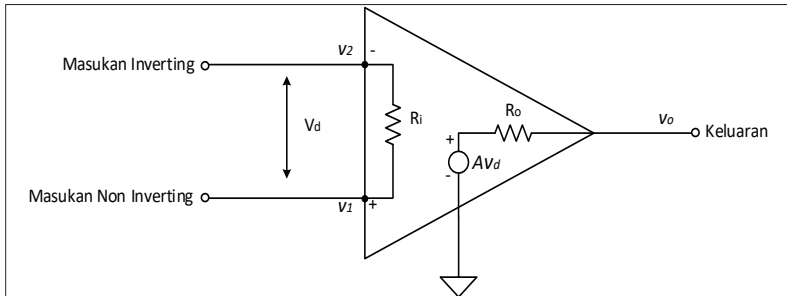
$v_d$  : tegangan masukan diferensial,

$v_1$  : tegangan masukan pada terminal non-inverting,

$v_2$  : tegangan masukan pada terminal inverting,

$v_o$  : tegangan keluaran penguat operasional.

Rangkaian ekuivalen penguat operasional seperti ditunjukkan Gambar 8.4 terdiri dari dua masukan terminal, yaitu *inverting* yang mewakili terminal negatif (-) dan *non-inverting* yang mewakili terminal positif (+).



Sumber: Malvino & Bates, 2016

**Gambar 8.4** Rangkaian Ekuivalen Penguat Operasional

Dari gambar 8.4, karakteristik penguat operasional ideal dapat dianalisis guna mempermudah dalam perancangan rangkaian penguat operasional ini. Adapun karakteristik ideal yang dimilikinya, antara lain, sebagai berikut.

- Penguatan rantai terbukanya (*open loop amplification*) bernilai tak terhingga ( $A_{OL} = \infty$ ).
- Resistansi masukan  $R_{in}$  dan keluaran  $R_o$  masing-masing bernilai tak terhingga dan nol ( $R_{in} = \infty$ ;  $R_o = 0$ ).
- Lebar pita kerja (*bandwidth*) bernilai tak terhingga ( $B_w = \infty$ ).
- Nilai *common mode ratio rejection* bernilai tak terhingga ( $CMRR = \infty$ ).

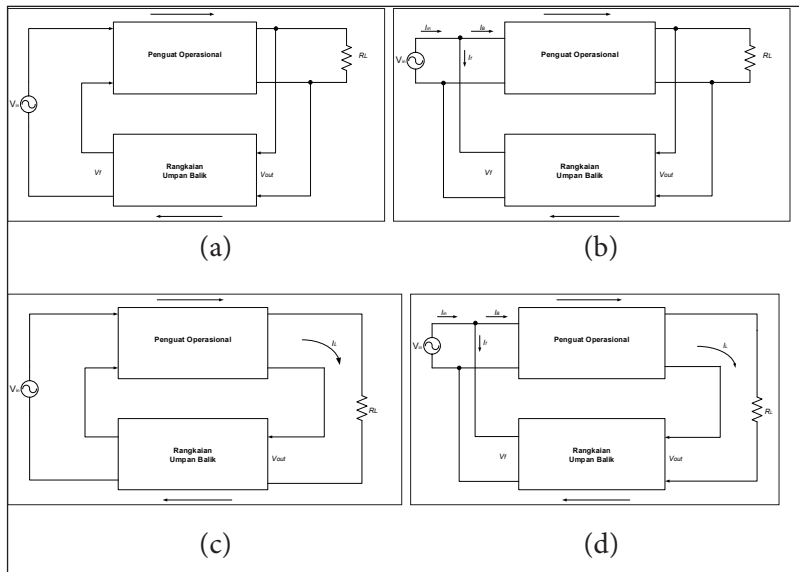
### C. Sistem Umpan Balik Penguat Operasional

Lahirnya konsep umpan balik (*feedback*) pada sistem penguat operasional untuk menjaga stabilitas sistem serta mengendalikan penguatan sinyal yang penerapannya digunakan konfigurasi model penguatan lingkaran tertutup (*closed loop amplification*). Ada beberapa konfigurasi umpan balik rangkaian penguat operasional, antara lain,

- 1) umpan balik tegangan-seri (*voltage-series feedback*)
- 2) umpan balik tegangan-paralel (*voltage-paralel feedback*)

- 3) umpan balik arus-seri (*current-series feedback*)
- 4) umpan balik arus-paralel (*current-paralel feedback*)

Dari keempat konfigurasi tersebut, hanya umpan balik tegangan seri dan paralel yang sering diterapkan sehingga hanya dua konfigurasi ini yang akan dibahas dan dianalisis. Secara umum keempat konfigurasi blok diagram umpan balik tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 8.5.



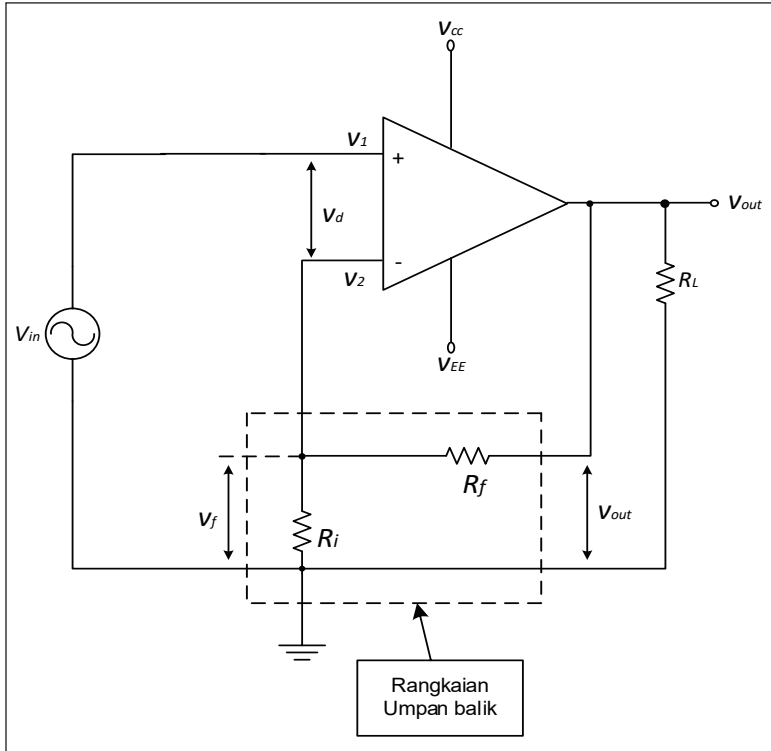
Keterangan: (a) Tegangan Seri, (b) Tegangan Paralel, (c) Arus Seri, dan (d) Arus Paralel

Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 8.5** Konfigurasi Umpan Balik Penguat Operasional

## 1. Umpan Balik Tegangan Seri

Representasi rangkaian penguat operasional menggunakan model umpan balik tegangan seri bisa ditemui dalam rangkaian penguat bukan pembalik fase (*non-inverting amplifier*) seperti yang ditunjukkan Gambar 8.6.



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 8.6** Konfigurasi Rangkaian Penguat Operasional Umpan Balik Seri

Beberapa istilah penting yang perlu kita pahami sebelum menganalisis jenis rangkaian penguat tidak membalik fase ini, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Penguat lingkaran terbuka atau penguatan tanpa umpan balik dinyatakan sebesar

$$A = \frac{V_{out}}{V_d} \quad (8.6)$$

- 2) Penguat lingkaran tertutup atau penguatan dengan umpan balik dinyatakan sebesar

$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}}. \quad (8.7)$$

- 3) Penguatan pada bagian rangkaian umpan baliknya dinyatakan sebesar

$$\beta = \frac{V_f}{V_{out}}. \quad (8.8)$$

Perlu diingat bahwa rangkaian penguat seperti pada Gambar 8.6 merupakan salah satu implementasi rangkaian lingkaran tertutup sehingga secara nyata nilai penguatannya seharusnya mampu dikendalikan oleh rangkaian umpan baliknya. Oleh karena itu, kita akan menurunkan secara matematis persamaan-persamaan praktis terkait dengan jenis rangkaian penguat ini agar diperoleh sebuah formulasi penguatan rangkaian dengan model konfigurasi ini. Karena penguat dibangun dari lingkaran tertutup, persamaan (8.7) dapat dinyatakan kembali sebesar

$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Merujuk pada persamaan (8.5) sebelumnya, diperoleh tegangan keluaran penguat operasional sebesar  $v_o = A(v_1 - v_2)$ , dengan  $v_1 = v_{in}$  dan  $v_2 = v_f = \frac{R_i}{R_i + R_f} v_{out}$  sehingga tegangan keluaran penguat menjadi

$$v_o = A \left( v_{in} - \frac{R_i}{R_i + R_f} v_{out} \right) = \frac{A(R_i + R_f)v_{in}}{R_i + R_f + AR_i}.$$

Dengan memasukkan nilai  $v_o$  hasil ini ke persamaan (8.7), diperoleh penguatan sekarang sebesar

$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A(R_i + R_f)}{R_i + R_f + AR_i}.$$

Penguatan  $A$  sangat besar, dengan  $AR_i \gg (R_i + R_f)$  dan  $(R_i + R_f + AR_i) \cong AR_i$  maka  $A_f$  sekarang menjadi

$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_i}. \quad (8.9)$$

Adapun faktor umpan baliknya sendiri dinyatakan sebesar

$$\beta = \frac{V_f}{V_{out}} = \frac{R_i}{R_i + R_f}. \quad (8.10)$$

Pada akhirnya kita akan mengetahui seberapa besar penguatan lingkaran tertutup ini jika kita kaitkan dengan penguatan lingkaran terbuka  $A$  dan rangkaian umpan balik  $\beta$  berdasar hubungan persamaan berikut.

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta}; \quad (8.11)$$

dengan

$A_f$ : penguatan tegangan lingkaran tertutup,

$A$ : penguatan tegangan lingkaran terbuka,

$\beta$ : penguatan umpan balik,

$A\beta$ : penguatan lingkaran sistem.

Selain parameter penguatan yang kita analisis, juga ada parameter lain yang perlu diperhitungkan, yaitu resistansi masukan  $R_{if}$ , resistansi keluaran  $R_{of}$  serta lebar pita frekuensi rangkaian penguatan  $f_f$  dengan umpan balik yang besarnya dapat hitung menggunakan persamaan berikut.

1) Resistansi masukan rangkaian,

$$R_{if} = R_i(1 + A\beta). \quad (8.12)$$

- 2) Resistansi keluaran rangkaian,

$$R_{of} = \frac{R_o}{1+A\beta}. \quad (8.13)$$

- 3) Lebar pita frekuensi rangkaian,

$$f_f = f_o(1 + A\beta). \quad (8.14)$$

dengan  $f_o$  menunjukkan frekuensi kerja saat rangkaian penguat tanpa rangkaian umpan balik. Jika kita hubungkan antara penguatan dengan lebar pita saat tanpa umpan balik ini, dapat dinyatakan bahwa penguatan  $A_f$  yang dihasilkan akan mengalami penurunan. Akibatnya lebar pita  $f_o$  makin besar.

### Contoh 8.2

Sebuah rangkaian *non-inverting* yang tersusun oleh penguat operasional tipe 741 seperti pada Gambar 8.6 diketahui memiliki parameter rangkaian:  $R_i = 1 \Omega$ ,  $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $A = 200000$ ,  $R_{in} = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $R_o = 75 \Omega$  dan  $f = 5 \text{ Hz}$ . Tentukan

- penguatan umpan balik,
- resistansi masukan umpan balik,
- resistansi keluaran umpan balik.

### Penyelesaian

- a) Dengan menggunakan persamaan (8.10) kita peroleh terlebih dahulu faktor umpan baliknya sebesar

$$\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{11}$$

sehingga diperoleh  $A_f$  sebesar

$$A_f = \frac{200.000}{1 + (200.000)(\frac{1}{11})} = 10,99.$$

- b) Resistansi masukan umpan baliknya diperoleh dari persamaan (8.12) sebesar:

$$R_{if} = 2 \text{ M}\Omega \left( 1 + (200.000) \left( \frac{1}{11} \right) \right) = 36,4 \text{ G}\Omega.$$

- c) Resistansi keluaran umpan baliknya diperoleh dari persamaan (8.13) sebesar

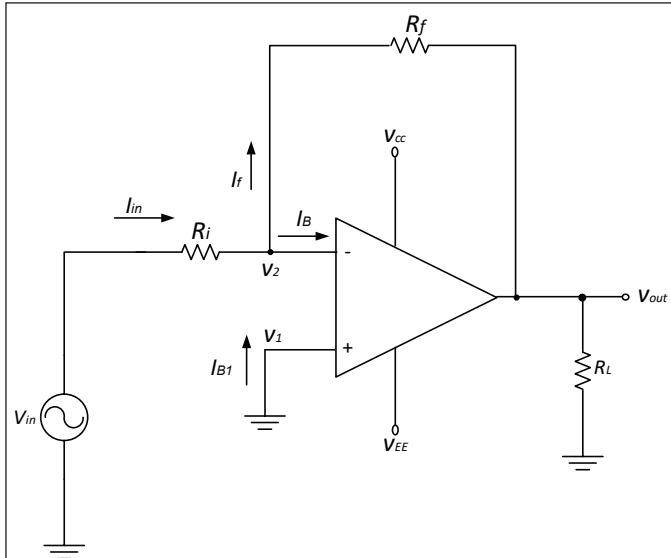
$$R_{of} = \frac{75 \text{ }\Omega}{1 + (200.000) \left( \frac{1}{11} \right)} = 4,12 \text{ m}\Omega.$$

Lebar pita rangkaian dinyatakan dari persamaan (8.14) sebesar

$$f_f = 5 \text{ Hz} \left( 1 + (200.000) \left( \frac{1}{11} \right) \right) = 90,9 \text{ kHz}.$$

## 2. Umpan Balik Tegangan Paralel

Representasi penguat operasional menerapkan model umpan balik tegangan paralel secara nyata bisa dilihat pada rangkaian penguat pembalik fase (*inverting amplifier*) seperti yang ditunjukkan Gambar 8.7.



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 8.7** Konfigurasi Rangkaian Penguat Umpan Balik Paralel

Analisis penguatan lingkaran tertutup dari rangkaian membalik fase di atas secara sederhana dapat diuraikan menggunakan model pendekatan hukum arus Kirchoff melalui titik  $v_2$ , yaitu

$$I_{in} = I_f + I_B. \quad (8.15a)$$

Karena arus  $I_B$  relatif kecil, nilainya dapat diabaikan sehingga menjadi

$$I_{in} \cong I_f.$$

Karena itu,

$$\frac{v_{in} - v_2}{R_i} = \frac{v_2 - v_{out}}{R_f}. \quad (8.15b)$$

Setelah diurai dari persamaan (8.15a). dan (8.15.b), diperoleh persamaan sebesar

$$v_1 - v_2 = \frac{v_{out}}{A}.$$

Saat  $v_1 = 0$  karena terhubung dengan *ground*, persamaan 8.15b sekarang menjadi

$$v_2 = -\frac{v_{out}}{A}.$$

Dengan memasukkan persamaan ini ke persamaan 8.15b, diperoleh penguatan tegangan paralel dengan umpan balik sebesar

$$A_f = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{AR_f}{R_i + R_f + AR_i}. \quad (8.16)$$

Karena penguatan  $A$  internal lingkaran terbuka penguat operasional sangat besar, menjadikan  $AR_f \gg R_i + R_f$  sehingga  $R_i + R_f \cong 0$ . Akibatnya persamaan (8.16) menjadi

$$A_f = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_f}{R_i}. \quad (8.17)$$

Akan tetapi, secara pendekatan analisis umpan baliknya, persamaan (8.17) dapat dinyatakan sebesar

$$A_f = -\frac{AK}{1 + A\beta} \quad (8.18)$$

dengan  $K = \frac{R_f}{R_i + R_f}$  menyatakan faktor peredaman tegangan dan  $\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f}$  menyatakan penguatan rangkaian umpan baliknya.

Selain itu, pada rangkaian *inverting* ini dapat ditentukan nilai resistansi masukan  $R_{if}$  rangkaian sebesar

$$R_{if} = R_i + \frac{R_f}{1 + A}; \quad (8.19)$$

sedangkan resistansi keluarannya diperoleh sebesar

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A\beta}. \quad (8.20)$$

Lebar pita rangkaian dapat dianalisis nilainya sebesar

$$f_f = f_0 (1 + A\beta), \quad (8.21)$$

dengan  $f_0 = \frac{UGB}{A} = \frac{\text{unity gain bandwidth}}{\text{open loop voltage gain}},$

sedangkan nilai UGB ini sebanding dengan lebar pita pada umpan balik rangkaian tidak membalik fase (*non-inverting*) yang telah dibahas sebelumnya sehingga persamaan (8.21) dapat dinyatakan menjadi

$$f_f = \frac{UGB}{K} (1 + A\beta). \quad (8.22)$$

Jika diasumsikan nilai  $R_i = R_f$  pada rangkaian membalik fase, penguatan pada rangkaian tegangan paralel dengan umpan balik dinyatakan sebesar

$$f_f = \frac{UGB}{A}. \quad (8.23)$$

### Contoh 8.3

Sebuah rangkaian penguat inverting seperti yang ditunjukkan Gambar 8.7 memiliki  $R_i = 470 \, \Omega$  dan  $R_f = 4,7 \, k\Omega$ . Tentukan

- penguatan umpan baliknya,
- resistansi masukan,
- resistansi keluaran, dan
- lebar pita.

### Penyelesaian

Sebelum menentukan penguatan  $A_f$  menggunakan persamaan (8.18), terlebih dahulu kita tentukan faktor peredaman tegangan dan penguatan sisi umpan baliknya sebesar

$$K = \frac{R_f}{R_i + R_f} = \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{470 \text{ }\Omega + 4,7 \text{ k}\Omega} = 0,9,$$

$$\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{470 \Omega}{470 \Omega + 4,7 \text{ k}\Omega} = 0,09.$$

Kemudian kita tentukan juga nilai  $1 + A\beta$  sebesar  
 $1 + A\beta = [1 + (200.000)(0,09)] = 18182.$

Dengan menggunakan persamaan (8.18), (8.19), (8.20) serta (8.22), diperoleh masing-masing parameter penguat operasional, yaitu sebesar

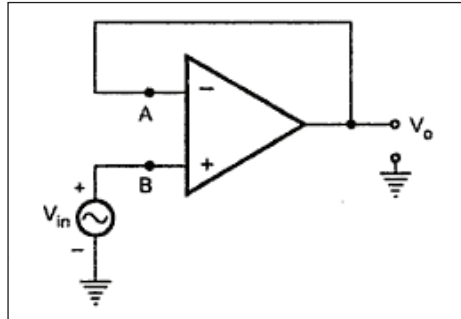
- a)  $A_f = -10,$
- b)  $R_{if} = 470 \text{ }\Omega,$
- c)  $R_{of} = 4,12 \text{ m}\Omega,$
- d)  $f_f = 100 \text{ kHz}.$

#### D. Aplikasi Rangkaian Penguat Operasional

Penguat operasional secara luas banyak diaplikasikan di hampir seluruh perangkat dan sistem elektronika. Hal ini dikarenakan penguat operasional ini lebih mudah dan cukup sederhana untuk diimplementasikan dalam berbagai aplikasi rangkaian. Untuk menganalisis operasi kerja penguat operasional dasarnya harus merujuk pada model pendekatan kerja penguat operasional ideal. Melalui model pendekatan ideal ini semua tahapan perancangan dan perhitungan akan selalu merujuk pada nilai standar atau nilai acuan meski secara fakta nilai ideal ini tidak mudah untuk dicapai, tetapi setidaknya dapat memberikan alur yang jelas tentang cara tahapan merancang rangkaian-rangkaian berbasis penguat operasional jenis ini di masa mendatang.

## 1. Rangkaian Pengikut Tegangan (*Voltage Follower*)

Rangkaian dikatakan sebagai pengikut tegangan jika tegangan keluarannya mengikuti perubahan tegangan masukannya secara linier dan biasanya memiliki penguatan yang sebanding atau sama. Untuk lebih memahami hal ini, secara jelas ditunjukkan sebuah rangkaian dasar pengikut tegangan seperti yang diilustrasikan Gambar 8.8.



Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 8.8** Rangkaian Penguat Operasional Pengikut Tegangan (*Voltage Follower*)

Berdasarkan rangkaian pada Gambar 8.8 dapat dijelaskan bahwa tegangan di titik A dan B merupakan representasi tegangan  $V_{in}$  yang nilainya dapat dinyatakan sebesar

$$V_{in} = V_B = V_A. \quad (8.24)$$

Kemudian jika kita lihat bahwa tegangan di titik A terhubung secara langsung dengan tegangan keluaran  $V_{out}$ , secara tidak langsung di sini dapat dinyatakan bahwa tegangan di titik A akan sebanding dengan tegangan keluarannya, yaitu sebesar

$$V_A = V_{out}. \quad (8.25)$$

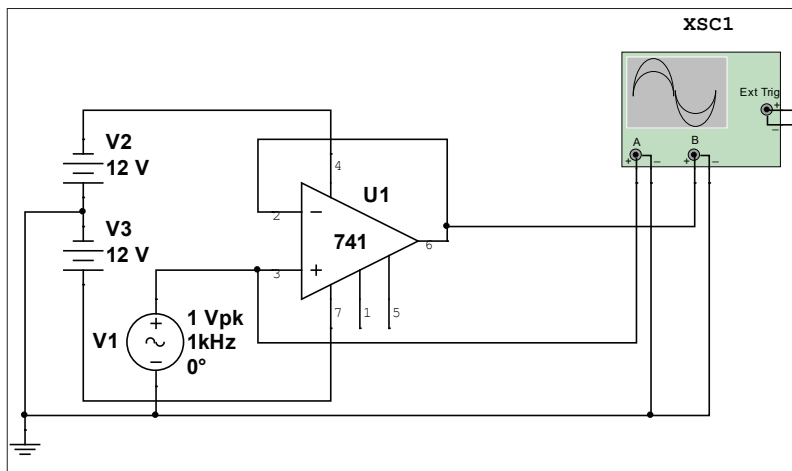
Dengan mengolaborasi persamaan (8.24) dengan (8.25), rumusan dasar untuk rangkaian pengikut tegangan diperoleh sebesar

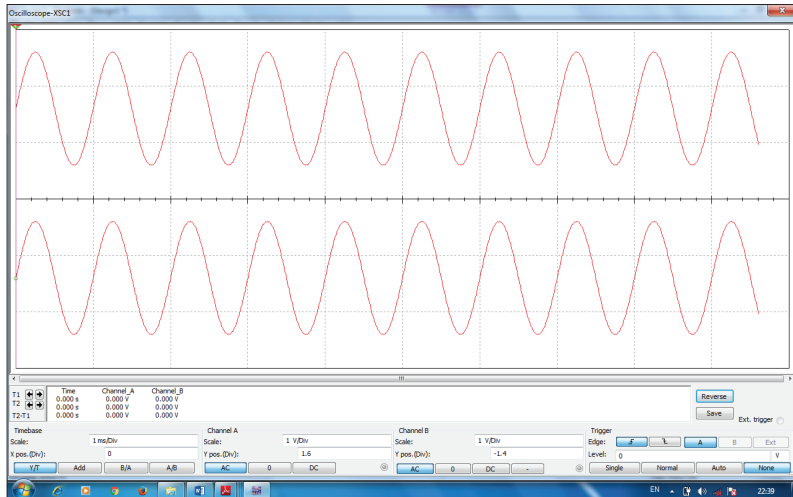
$$V_{out} = V_{in}. \quad (8.26)$$

Kesimpulan yang bisa diambil dari rumusan tersebut, antara lain, adalah tegangan keluaran  $V_{out}$  akan bernilai sama dengan tegangan masukannya,  $V_{in}$ . Jika  $V_{in}$  meningkat,  $V_{out}$  juga akan meningkat dan begitu pun sebaliknya. Hal ini menjelaskan bahwa tegangan keluaran akan mengikuti tegangan masukannya atau lebih dikenal juga sebagai rangkaian penyangga (*buffer*). Ciri rangkaian penyangga ini adalah memiliki penguatan hanya satu kali.

#### Contoh 8.4

Simulasikan rangkaian penguat op-amp *open loop* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8.8. Selanjutnya gambarkan gelombang output yang dihasilkannya.

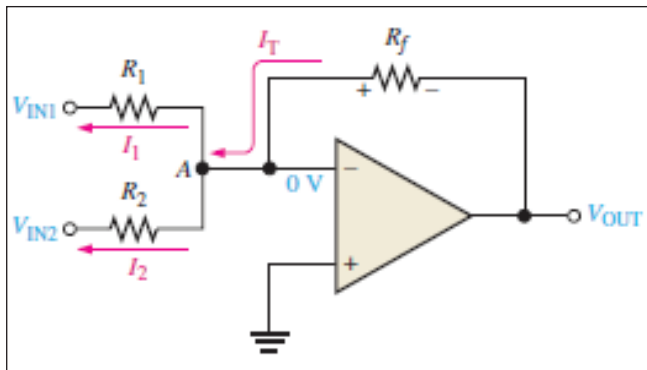




**Gambar 8.9** Hasil Simulasi Multisim Contoh Soal 8.4

## 2. Penguat Penjumlah (Summing Amplifier)

Rangkaian penguat penjumlah memiliki minimal dua masukan yang keluarannya nanti merupakan hasil akumulasi penjumlahan dari masing-masing masukannya tersebut. Penguat penjumlah merupakan bentuk dasar dari rangkaian pencampur (*mixer*) karena keluarannya merupakan campuran dari masing-masing masukannya. Adapun skema dasar rangkaiannya ditunjukkan seperti Gambar 8.10.



Sumber: Floyd dan Buchla (2014)

**Gambar 8.10** Rangkaian Penguat Penjumlah 2 Masukan

Analisis rangkaian Gambar 8.10 menjelaskan bahwa dengan menerapkan masing-masing masukan  $V_{IN1}$  dan  $V_{IN2}$  ke rangkaian penjumlah ternyata mengakibatkan arus akan mengalir di antara masing-masing masukannya sehingga secara rumusan matematisnya dapat dinyatakan sebesar

$$I_T = I_1 + I_2, \quad (8.27)$$

sedangkan tegangan keluarannya diperoleh sebesar

$$V_{out} = -I_T R_f. \quad (8.28)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (8.27) ke persamaan (8.28) diperoleh nilai tegangan keluaran sekarang sebesar

$$V_{out} = -(I_1 + I_2) R_f. \quad (8.29)$$

Kemudian untuk memudahkan dalam menganalisis rangkaian penguat penjumlah, persamaan (8.29) dapat diuraikan kembali menjadi

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{IN1}}{R_1} + \frac{V_{IN2}}{R_2}\right) R_f. \quad (8.30)$$

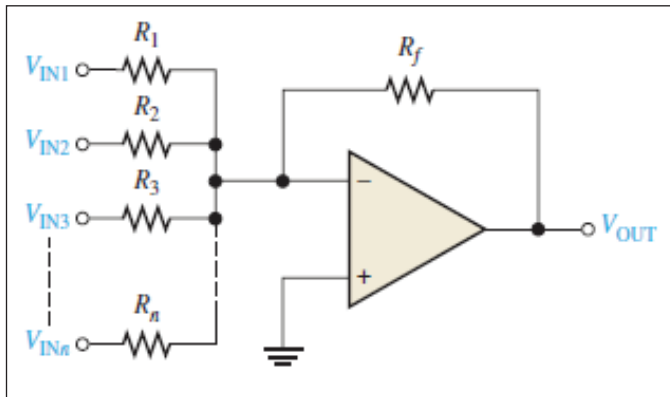
Jika diasumsikan harga resistansi  $R_1 = R_2 = R_f = R$ , persamaan (8.30) dapat dinyatakan sebesar

$$V_{out} = -(V_{IN1} + V_{IN2}), \quad (8.31)$$

dengan simbol (-) menunjukkan bahwa masukan rangkaian penjumlah adalah jenis pembalik fase (*inverting*). Rangkaian penguat penjumlah seperti pada Gambar 8.10 dapat kita modifikasi dengan masukan lebih dari dua buah seperti pada Gambar 8.11 maka persamaan (8.31) dapat dikembangkan dan dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{out} = -(V_{IN1} + V_{IN2} + \dots + V_{INn}). \quad (8.32)$$

Adapun skema rangkaiannya digambarkan sebagai berikut (Gambar 8.11).

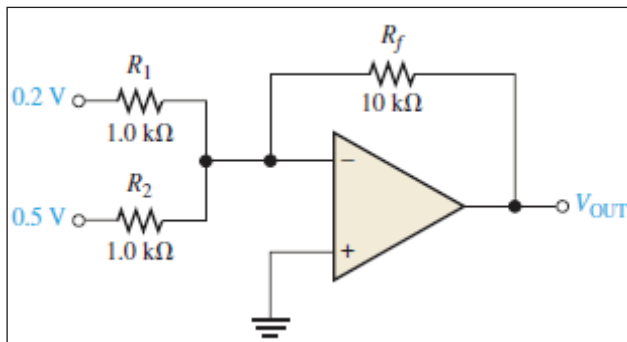


Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 8.11** Rangkaian Penguat Penjumlah dengan  $n$  Masukan

### Contoh 8.5

Tentukan tegangan keluaran dari rangkaian penguat penjumlah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.12.



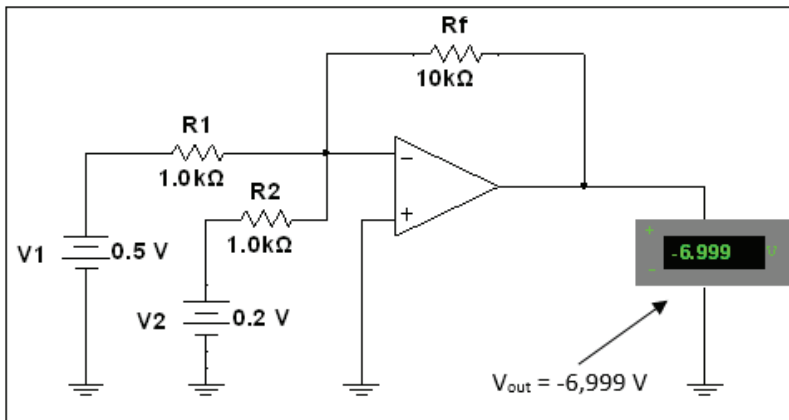
**Gambar 8.12** Rangkaian Penguat Penjumlah (Kasus Soal)

### Penyelesaian

Karena masukannya hanya dua buah, persamaan (8.30) dapat digunakan untuk menentukan tegangan keluarannya, yaitu

$$V_{out} = -\left(\frac{0,2 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} + \frac{0,5 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega}\right) 10 \text{ k}\Omega = -7 \text{ volt.}$$

Apabila kita simulasikan dengan menggunakan *software* Multisim, diperoleh hasil perbandingannya sebagai berikut (Gambar 8.13).

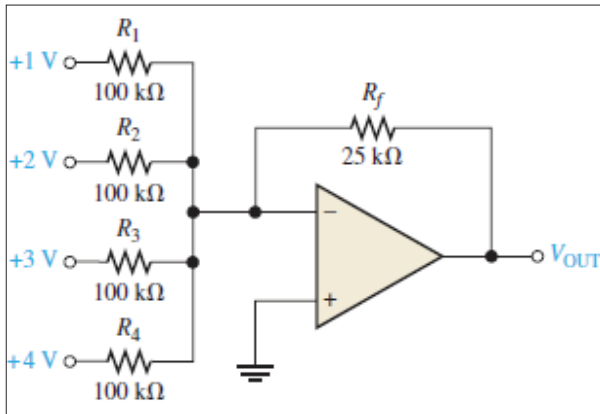


**Gambar 8.13** Hasil Simulasi Multisim Penguat Penjumlah

Kesimpulan yang bisa diambil dari perbandingan hasil perhitungan dengan simulasi menunjukkan bahwa adanya kesesuaian hasil. Meskipun faktanya ada selisih sebesar 0,1 V, hasil simulasi dianggap sama dengan hasil perhitungannya. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan persamaan yang dijelaskan di atas bisa digunakan untuk merancang rangkaian penguat penjumlah berbasis penguat operasional.

### Contoh 8.6

Sebuah rangkaian penguat penjumlah dengan banyak masukan seperti yang diperlihatkan Gambar 8.14 Tentukan tegangan keluarannya dan perbandingkanlah dengan hasil simulasinya.



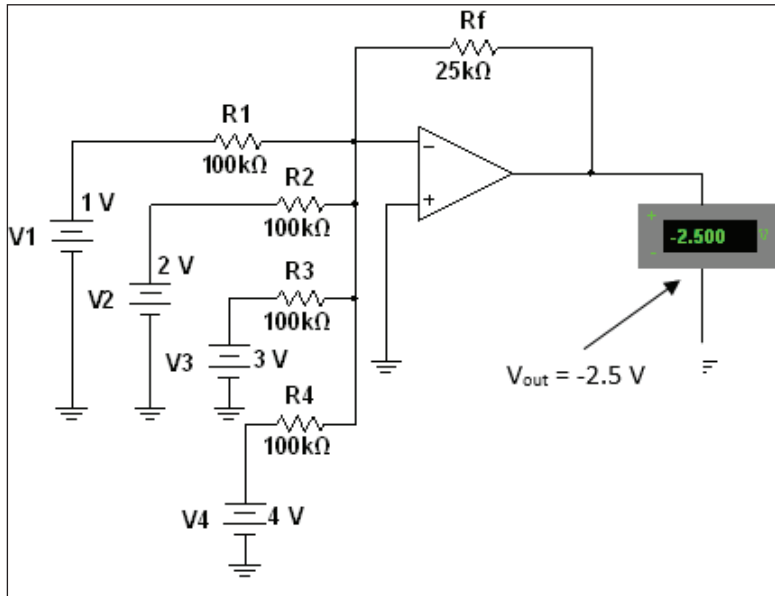
Gambar 8.14 Rangkaian Penguat Penjumlah *Multiple Input*

### Penyelesaian

Untuk memperoleh dan memprediksikan hasil tegangan keluaran dari rangkaian ini, diperoleh tegangan keluarannya, yaitu sebesar

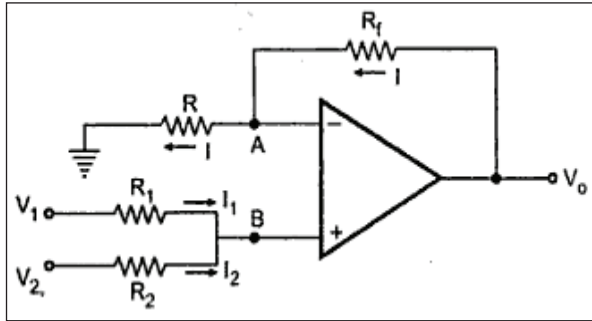
$$V_{out} = -\frac{25 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} (1 \text{ V} + 2 \text{ V} + 3 \text{ V} + 4 \text{ V}) = -2,5 \text{ volt.}$$

Hasil simulasinya ditampilkan pada Gambar 8.15.



**Gambar 8.15** Hasil Simulasi Penguat Penjumlah Multi Input

Seluruh uraian di atas menunjukkan penguat penjumlah lebih termasuk model rangkaian berbasis pembalik fase. Secara fakta, penguat jumlah juga dapat dirancang menggunakan rangkaian dasar penguat tak membalik fase (*non-inverting*). Adapun model perhitungan dan penjelasan rumusannya sangat berbeda, tetapi jika kita pahami tentang konsep rumusan persamaan tak membalik fase sebenarnya tidaklah terlalu sulit untuk memahaminya.



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 8.16** Rangkaian Penguat Penjumlah Tak Membalik Fase

Pada dasarnya nilai tegangan keluaran dari rangkaian Gambar 8.16 bisa diuraikan dari rumusan dasar penguat *non-inverting* sehingga secara mudah dapat diprediksikan harga tegangan keluarannya. Dengan menerapkan konsep analisis rangkaian melalui pendekatan hukum arus dan tegangan Kirchoff, kita dapat menentukan tegangan keluaran rangkaian penjumlah ini, yaitu sebesar

$$V_{out} = \frac{R_2(R+R_f)}{R(R_1+R_2)} V_1 + \frac{R_1(R+R_f)}{R(R_1+R_2)} V_2. \quad (8.32)$$

Biasanya, untuk lebih memudahkan seorang perancang dalam merealisasikan penguat penjumlah tipe ini adalah dengan mengasumsikan seluruh harga resistansi yang digunakan dibuat bernilai sama sehingga persamaan (8.32) akan menjadi lebih dihitung sebesar

$$V_{out} = V_1 + V_2. \quad (8.33)$$

### Contoh 8.7

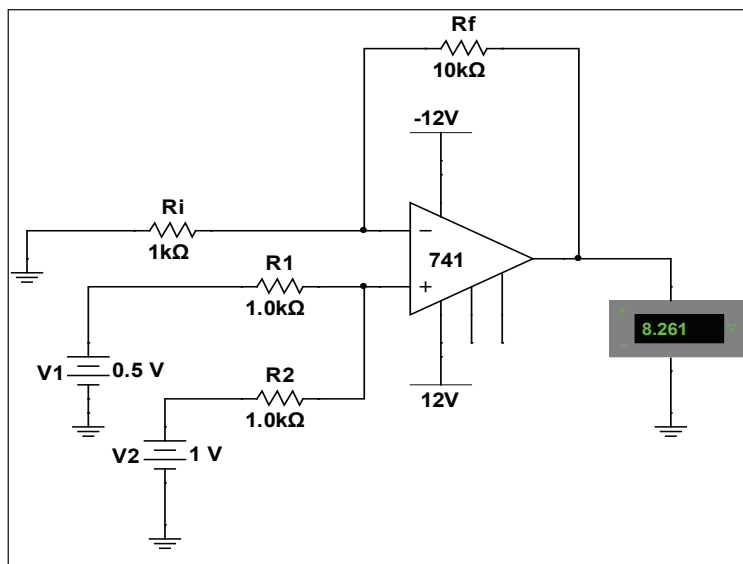
Sebuah rangkaian penguat penjumlah multi input noninverting ditunjukkan seperti pada Gambar 8.16. Tentukan tegangan keluarannya berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi jika diketahui  $V_1 = 0,5$  V;  $V_2 = 1$  V;  $R_f = 10$  k $\Omega$ ;  $R_1 = R_2 = R = 1$  k $\Omega$ .

## Penyelesaian

- 1) Dengan menggunakan persamaan (8.32) kita bisa mendapatkan nilai tegangan keluaran sebesar

$$V_{out} = \frac{1 \text{ k}\Omega (1 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega)}{1 \text{ k}\Omega (1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega)} (0,5 \text{ V}) + \frac{1 \text{ k}\Omega (1 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega)}{1 \text{ k}\Omega (1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega)} (1 \text{ V}) = 8,24 \text{ volt.}$$

- 2) Adapun secara simulasi diperoleh sebagai berikut (Gambar 8.17).



**Gambar 8.17** Hasil Simulasi Multisim Contoh Soal 8.7

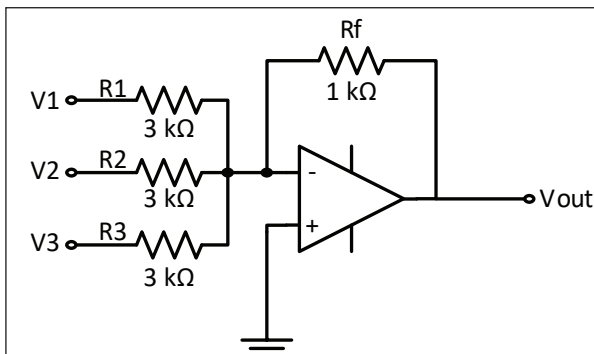
Ada beberapa aplikasi rangkaian penguat penjumlah yang sering diterapkan pada beberapa rangkaian elektronika, di antaranya rangkaian penjumlah rata-rata (*average circuit*) dan rangkaian pengurang (*subtraction circuit*).

### 3. Rangkaian Penjumlah Rata-Rata (*Average Circuit*)

Rangkaian penjumlah rata-rata merupakan pengembangan dari rangkaian penjumlah biasa yang dirancang dengan mengikuti beberapa kondisi, di antaranya sebagai berikut.

- 1) Semua harga tahanan masukan yang diterapkan ke sisi masukan rangkaian penjumlah berharga sama.
- 2) Perbandingan seluruh nilai tahanan masukan terhadap tahanan umpan balik rangkaian dijaga harus bernilai sama terutama terhadap jumlah tahanan masukan yang digunakan.

Agar memudahkan dalam memahami dua kondisi di atas, di bawah ini diberikan salah satu aplikasi rangkaian penjumlah yang dijadikan sebagai model dasar rangkaian rata-rata yang diperlihatkan seperti Gambar 8.18.



**Gambar 8.18** Rangkaian Penguat Penjumlah Rata-Rata

Rangkaian pada Gambar 8.18 dikatakan sebagai rangkaian penjumlah rata-rata karena telah memenuhi dua kondisi di atas. Di sini semua tahanan masukan dibuat bernilai sama, yaitu  $3\text{ k}\Omega$  dan secara rasio perbandingan antara tahanan masukan dan tahanan umpan balik dinyatakan sebesar  $3\text{ k}\Omega:1\text{ k}\Omega = 3$ . Hal ini menunjukkan bahwa nilai yang sama didasarkan pada jumlah tahanan masukan yang bernilai sama, yaitu tiga buah. Oleh karena itu, dari rangkaian ini, tegangan keluarannya dapat ditentukan sebesar

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right). \quad (8.34)$$

Sesuai dengan pemenuhan dua kondisi tersebut, perbandingan antara tahanan masukan dan umpan baliknya adalah sebesar

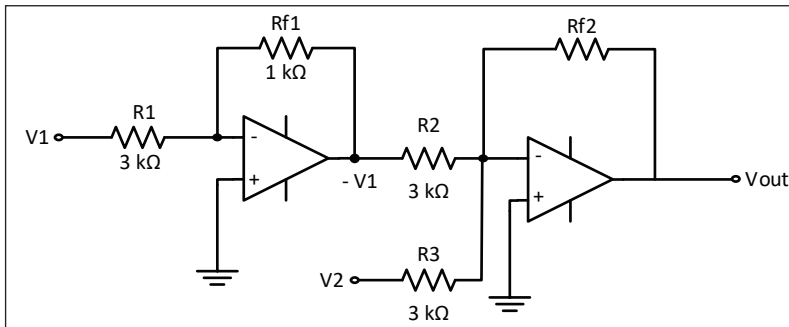
$$\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_f}{R_2} = \frac{R_f}{R_3} = \frac{1}{3}. \quad (8.35)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (8.34) ke persamaan (8.35) diperoleh tegangan keluaran rangkaian ini sebesar

$$V_{out} = -\left(\frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}\right). \quad (8.36)$$

#### 4. Rangkaian Pengurang (*Subtractor Circuit*)

Sebuah rangkaian penjumlah digunakan sebagai rangkaian pengurang jika diperbandingkan dengan kondisi tegangan masukan yang berbeda satu sama lainnya. Bentuk rangkaian pengurang yang ditunjukkan Gambar 8.19 menjelaskan bahwa rangkaian akan menghasilkan tegangan keluaran yang sama untuk keadaan dua tegangan masukan yang berbeda polaritas.



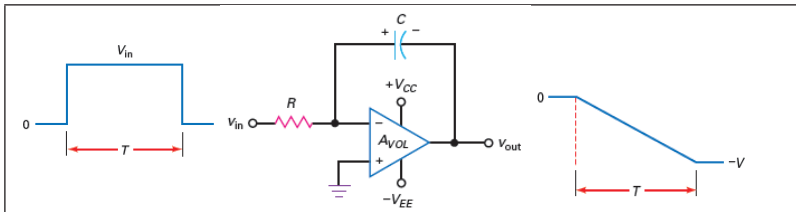
**Gambar 8.19** Rangkaian Penguat Pengurang

Berdasarkan rangkaian pengurang tersebut dapat dijelaskan bahwa tegangan  $V_1$  yang diberikan ke masukan *inverting* (-) menghasilkan keluaran tegangan  $-V_1$  yang memiliki polaritas yang terbalik. Selanjutnya tegangan  $-V_1$  ini diterapkan secara bersama-sama dengan  $V_2$  pada rangkaian penjumlah sehingga menghasilkan tegangan keluaran pengurang sebesar

$$V_{out} = -(-V_1 + V_2) = V_1 - V_2. \quad (8.37)$$

## 5. Rangkaian Integrator

Integrator merupakan sebuah rangkaian elektronika yang mampu melakukan proses integrasi pada sinyal masukannya. Aplikasi yang paling terkenal dari rangkaian integrator adalah rangkaian yang bisa menghasilkan tegangan segitiga (*ramp*) yang secara linieritas besarnya tergantung pada peningkatan atau penurunan tegangan masukannya. Integrator ini juga disebut sebagai integrator miller (*miller's integrator*). Secara sederhana bentuk rangkaian integrator ditunjukkan seperti pada Gambar 8.20.



**Gambar 8.20** Rangkaian Penguat *Integrator*

Analisis rangkaiannya adalah sebagai berikut. Sebuah sinyal masukan yang memiliki lebar pulsa sebesar  $T$  saat kondisi *low*, tegangan  $v_{in} = 0$  dan saat kondisi *high*, tegangan  $v_{in} = V_{in}$ . Seperti yang terlihat bahwa ketika tegangan masukan menuju nilai tegangan positif (saat durasi  $T$ ), pada tegangan keluaran akan meningkat ke arah tegangan negatif. Hal ini dipengaruhi oleh keberadaan kapasitor dalam menyimpan dan mengeluarkan muatan sehingga menghasilkan nilai magnitudo atau level tegangan sebesar

$$V = \frac{T}{RC} V_{in} \quad (8.38)$$

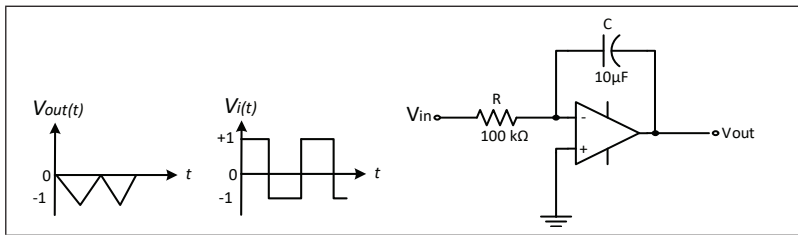
dengan  $RC = \tau$  menyatakan konstanta waktu dan  $\frac{1}{RC}$  menunjukkan faktor skala integrator. Seperti kita pahami bahwa keluaran integrator

merupakan representasi luasan dari sinyal masukannya yang dibatasi oleh waktu yang secara persamaan dapat dinyatakan sebesar

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^T v_{in} dt. \quad (8.39)$$

### Contoh 8.8

Tentukan tegangan keluaran integrator dari sinyal segi empat sebagai masukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.21.



**Gambar 8.21** Rangkaian Penguat Integrator Contoh Soal 8.8

### Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan (8.39) kita bisa menentukan tegangan keluarannya dengan sebelumnya ditentukan dahulu nilai konstanta waktunya.

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^T v_{in} dt,$$

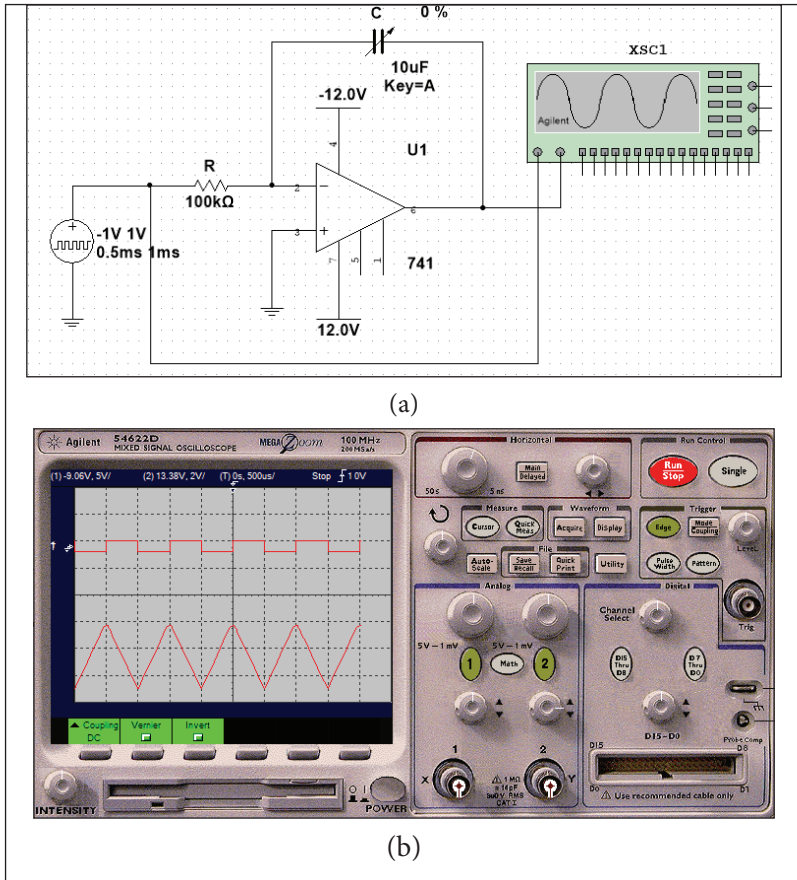
dengan nilai konstanta waktu dicari terlebih dahulu, sebesar

$$\tau = RC = (100k\Omega)(10\mu F) = 1 \text{ sekon}$$

sehingga

$$v_{out} = -\int_0^T v_{in} dt = -1 \text{ volt.}$$

Hasil simulasinya dapat ditunjukkan sebagai berikut (Gambar 8.22).



**Gambar 8.22** Rangkaian Hasil Simulasi Multisim (Contoh Soal 8.8)

### Contoh 8.9

Sebuah sinyal sinusoidal memiliki tegangan maksimum 6 mV dan frekuensi 2 kHz yang diterapkan sebagai masukan bagi rangkaian integrator dengan  $R = 100 \text{ k}\Omega$  dan  $C = 1\mu\text{F}$ . Tentukan tegangan keluaran integratornya.

### Penyelesaian

Kita coba menulis persamaan sinyal sinusoidalnya terlebih dahulu,

$$v_{in} = 6mV \sin 2\pi ft.$$

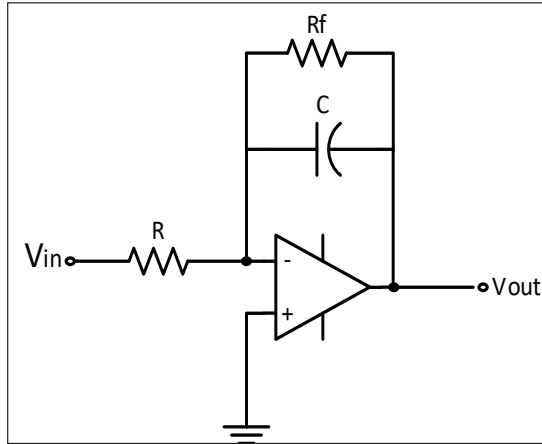
Kemudian menggunakan persamaan (8.39) diperoleh tegangan keluaran sebesar:

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{1}{RC} \int_0^T v_{in} dt \\ &= -\frac{1}{100 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} \int_0^t 6 \times 10^{-3} \sin(4\pi \times 10^3 t) dt \\ &= -0,06 \left[ \frac{-\cos(4\pi \times 10^3 t)}{4\pi \times 10^3} \right]_0^t \\ &= 4,77 \times 10^{-6} [\cos(4000\pi t) - 1] V. \end{aligned}$$

Hal yang perlu diperhatikan terkait dengan rangkaian integrator adalah adanya kecenderungan ketidakstabilan akibat adanya perubahan karakter sinyal masukan yang kontinu terhadap perubahan frekuensi yang diterapkan pada rangkaian integrator. Karena itu, untuk meningkatkan nilai kestabilan rangkaian, dipasang sebuah tahanan umpan balik yang diparalelkan dengan kapasitor. Ukuran dari nilai kestabilan ini dapat diukur berdasarkan nilai frekuensi kritisnya (*critical frequency*) yang besarnya dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C}. \quad (8.40)$$

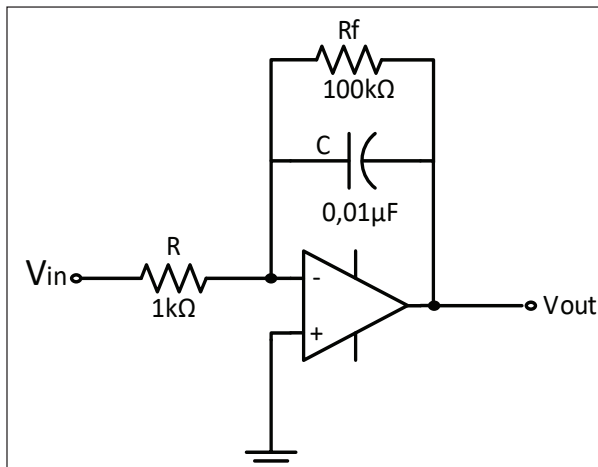
Adapun bentuk skema rangkaiannya diperlihatkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.23.



**Gambar 8.23** Rangkaian Integrator dengan Tahanan Umpan Balik

### Contoh 8.10

Tentukan batas frekuensi bawah atau frekuensi kritis dari rangkaian integrator pada Gambar 8.24.



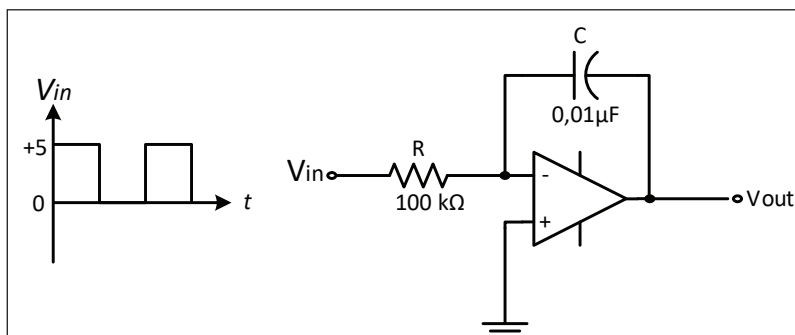
**Gambar 8.24** Integrator dengan Umpan Balik (Kasus Soal)

Dengan menggunakan persamaan (8.40) kita peroleh frekuensi kritisnya sebesar

$$f_c = \frac{1}{2\pi(100 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 159 \text{ Hz.}$$

### Contoh 8.11

Dari rangkaian berikut ini, tentukan laju perubahan respons tegangan keluarannya dan gambarkan bentuk sinyal keluarannya.



**Gambar 8.25** Integrator dengan Umpan Balik Kapasitor

### Penyelesaian

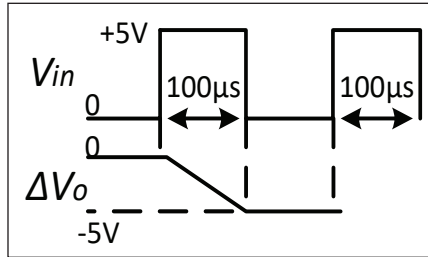
- 1) Penentuan laju perubahan tegangan keluarannya didapatkan dari uraian penurunan persamaan (8.17) sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\Delta v_o}{dt} = -\frac{v_{in}}{RC} = -\frac{5 \text{ V}}{(100 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = -\frac{50 \text{ kV}}{\text{s}} = -50 \text{ mV}/\mu\text{s.}$$

- 2) Saat tegangan masukan pulsa + 5 volt, sinyal keluaran *ramp*-nya menuju nilai tegangan negatif saat  $t = 100 \text{ }\mu\text{s}$  sehingga diperoleh level tegangan keluaran negatifnya sebesar

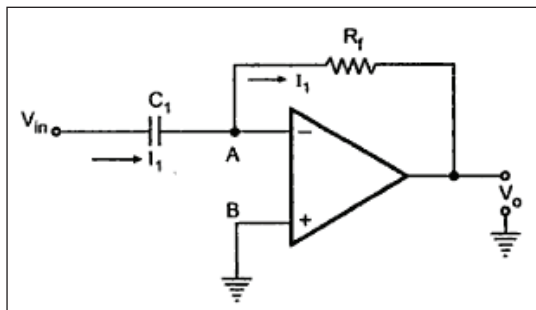
$$\Delta v_o = \frac{\Delta v_o}{dt} \times t = - \frac{50 \text{ mV}}{\mu\text{S}} \times 100 \mu\text{S} = -5 \text{ volt.}$$

3) Hasil sinyal keluarannya ditunjukkan seperti gambar berikut.



## 6. Rangkaian Diferensiator

Rangkaian diferensiator merupakan sebuah rangkaian elektronika yang mampu melakukan operasi matematis diferensial terhadap tegangan masukannya yang digambarkan pada tegangan keluarannya. Konstruksi rangkaian ini terdiri dari sebuah penguat operasional, kapasitor  $C$ , dan tahanan umpan balik  $R_f$ . Secara sederhana bentuk rangkaiannya ditunjukkan seperti pada Gambar 8.26.



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 8.26** Rangkaian Penguat Operasional Diferensiator

Secara langsung pada persamaan akhir dari rangkaian diferensiator dihasilkan tegangan keluarannya, yaitu sebesar

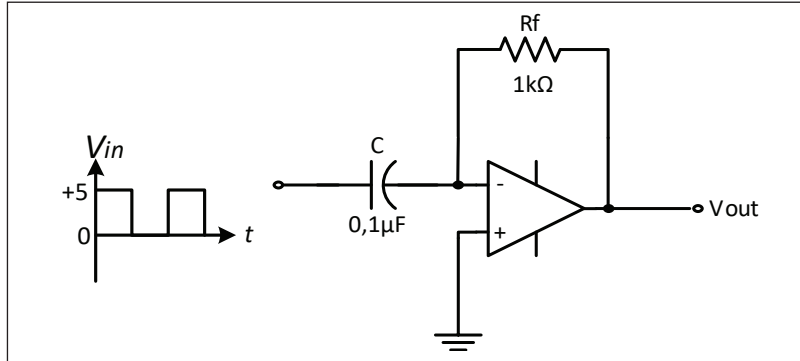
$$v_o = -C_1 R_f \frac{dv_{in}}{dt} = -C_1 R_f \left( \frac{V_{C_1}}{t} \right). \quad (8.41)$$

Persamaan (8.41) menjelaskan bahwa  $C_1 R_f$  menyatakan konstanta waktu diferensial yang nilainya umumnya relatif kecil dan memiliki sifat fase yang berbeda  $180^\circ$  antara sinyal masukan dan keluarannya. Aplikasi rangkaian diferensiator yang sering banyak digunakan di bidang teknologi telekomunikasi, antara lain,

- 1) sebagai rangkaian pendeteksi frekuensi tinggi di sisi pesawat penerima dan
- 2) sebagai detektor pada perangkat FM demodulator, dll.

### Contoh 8.12

Sebuah sinyal segi empat yang diterapkan pada masukan rangkaian diferensiator memiliki tegangan dari 0 V s/d 5 V pada durasi waktu 0,1 ms. Tentukan tegangan keluarannya dan gambarkan bentuk sinyalnya dari rangkaian pada Gambar 8.27.



**Gambar 8.27** Rangkaian Diferensiator (Contoh Soal 8.12)

### Penyelesaian

- 1) Kita gunakan persamaan (8.41) untuk menentukan tegangan keluarannya dengan terlebih dahulu mencari parameter berikut ini.

$$RC = (1 \text{ k}\Omega)(0,1 \text{ }\mu\text{F}) = 0,1 \text{ ms.}$$

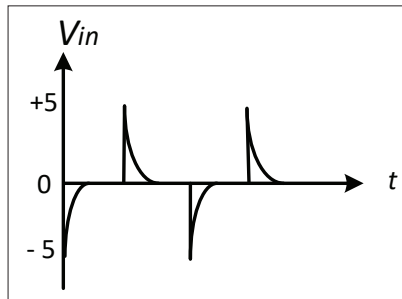
Kemudian ditentukan,

$$\frac{dv_{in}}{dt} = \frac{(5 \text{ V} - 0 \text{ V})}{0,1 \text{ ms}} = 5 \times 10^4 \text{ V/s.}$$

Jadi diperoleh tegangan keluarannya sebesar

$$v_o = -(0,1 \text{ ms}) \left( \frac{5 \times 10^4 \text{ V}}{\text{s}} \right) = -5 \text{ V.}$$

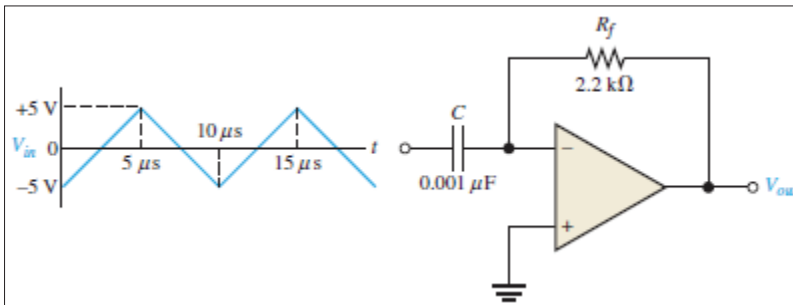
- 2) Secara visual, bentuk sinyal keluarannya dapat digambarkan sebagai berikut (Gambar 8.28).



**Gambar 8.28** Bentuk Sinyal Output Diferensiator (Contoh Soal 8.12)

### Contoh 8.13

Tentukan tegangan keluaran rangkaian diferensiator dari sinyal masukan segitiga (triangular) seperti yang diperlihatkan Gambar 8.29.



**Gambar 8.29** Rangkaian Diferensiator dengan Input Sinyal Segitiga

### Penyelesaian

- 1) Dimulai saat  $t = 0$ , tegangan masukan mulai bergeser ke arah positif dari -5 V ke +5 V atau +10V dalam 5  $\mu s$ . Kemudian, tegangan menuju nilai negatif dari +5 V ke -5 V atau sebesar -10 V dalam 5  $\mu s$ . Karena itu, kita menghitung dahulu konstanta waktu ,yaitu sebesar

$$R_f C = (2,2 \text{ k}\Omega)(0,001 \text{ }\mu\text{F}) = 2,2 \text{ }\mu\text{s}.$$

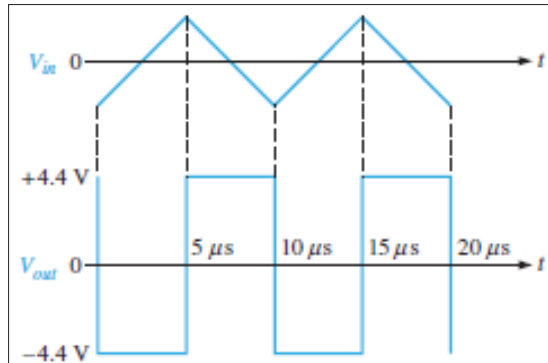
- 2) Tahapan pertama, kita menentukan laju perubahan saat tegangan masukan menuju ke arah positif sesuai persamaan (8.41). Saat ini tegangan keluaran diferensiator diperoleh sebesar

$$v_o = -\left(\frac{V_c}{t}\right) R_f C = -\left(\frac{10 \text{ V}}{5 \text{ }\mu\text{s}}\right) (2,2 \text{ }\mu\text{s}) = -4,4 \text{ volt}.$$

- 3) Tahapan kedua, laju perubahan saat tegangan masukan menuju ke arah negatif menghasilkan  $\frac{V_c}{t} = -2 \text{ V}/\mu\text{s}$  sehingga tegangan keluarannya diperoleh sebesar

$$v_o = -\left(\frac{V_c}{t}\right) R_f C = -\left(-2 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}\right) (2,2 \text{ }\mu\text{s}) = +4,4 \text{ volt}.$$

- 4) Secara visual bentuk sinyal keluarannya ditunjukkan seperti Gambar 8.30.



**Gambar 8.30** Bentuk Gelombang Keluaran Rangkaian Diferensiator

## 7. Rangkaian Komparator

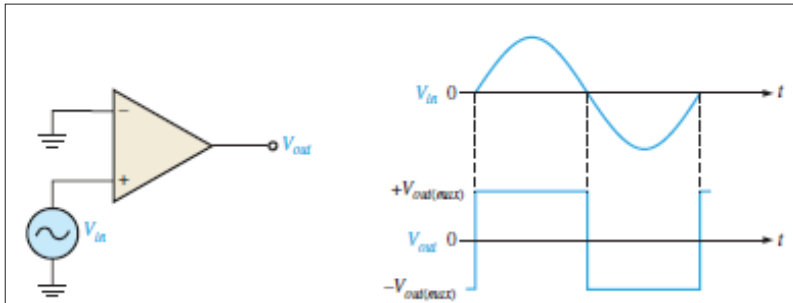
Pada dasarnya kita sering menginginkan membandingkan satu tegangan dengan tegangan lain untuk melihat seberapa besar dampak terhadap sistem tertentu. Karena itu, dalam kondisi seperti ini diperlukan rangkaian komparator sebagai rangkaian pembandingnya. Rangkaian komparator secara umum memiliki dua karakteristik utama sebagai berikut.

- 1) Rangkaian ini tidak memiliki jaringan umpan balik sehingga penguatannya cukup besar bahkan sebanding dengan penguatan ideal penguat operasional.
- 2) Rangkaian ini juga beroperasi dalam daerah non-linier.

Selain memiliki karakteristik yang telah disebutkan di atas, komparator juga memiliki beberapa fungsi yang sering dijadikan rujukan dalam merancang rangkaian-rangkaian elektronika lainnya. Adapun beberapa fungsi tersebut antara lain pendeteksi level nol (*zero-crossing detector*) dan pendeteksi level tak nol (*non-zero level detector*).

### a. Pendeteksi Level Nol (*Zero-Crossing Detector*)

Rangkaian komparator jika difungsikan sebagai sebuah *zero crossing detector* terjadi saat salah satu tegangan masukannya dihubungkan ke bumi (*ground*) yang pada sisi keluarannya akan mengalami perubahan seiring dengan salah satu masukannya terhubung ke bumi (tegangan menuju 0 volt). Skema rangkaian dasarnya diperlihatkan seperti pada Gambar 8.31.

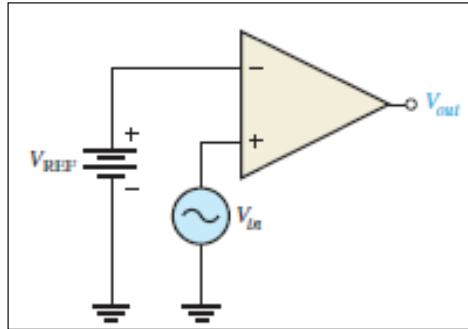


**Gambar 8.31** Rangkaian Komparator *Zero-Crossing Detector*

Analisis rangkaiannya adalah sebagai berikut. Saat sinyal sinusoidal masukan menuju siklus negatif, keluaran tegangan menghasilkan nilai maksimum negatif. Begitu pun sebaliknya, saat sinusoidal menuju siklus positif, tegangan keluarannya akan menghasilkan nilai maksimum positif. Pada dasarnya *zero-crossing detector* ini dapat juga digunakan sebagai pembangkit sinyal segi empat atau *square wave generator* dari gelombang masukan sinusoidalnya.

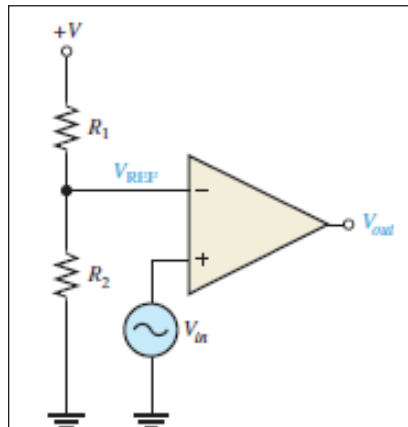
### b. Pendeteksi Level Tak Nol (*Non-Zero Level Detector*)

Rangkaian komparator yang salah satu masukannya ingin diperbandingkan dengan tegangan referensi (tegangan DC) pada sisi masukan lainnya dinamakan sebagai *non-zero level detector* atau *level detector*. Skema rangkaian dasarnya ditunjukkan seperti pada Gambar 8.32.



**Gambar 8.32** Angkaiian Dasar *Non-Zero Level Detector*

Akan tetapi, susunan rangkaian *non-zero level detector* lebih praktis dan banyak digunakan dalam menganalisis rangkaian komparator secara nyata, yaitu dengan menerapkan sebuah rangkaian pembagi tegangan sebagai referensi tegangannya.

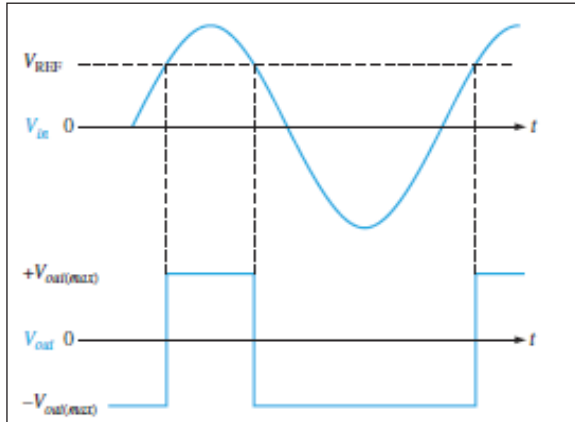


**Gambar 8.33** Rangkaian *Non-Zero Level Detector* dengan Pembagi Tegangan

Besarnya tegangan referensi dari skema rangkaian diperoleh sebesar

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V). \quad (8.42)$$

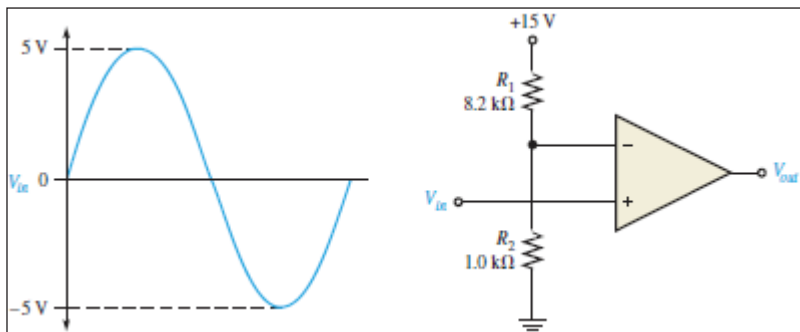
Adapun bentuk sinyal keluaran dari jenis rangkaian ini ditunjukkan seperti pada Gambar 8.34.



**Gambar 8.34** Bentuk Sinyal Keluaran *Non-Zero Detector*

### Contoh 8.14

Sebuah sinyal masukan sinus diterapkan pada sebuah rangkaian komparator yang ditunjukkan Gambar 8.35. Jika diasumsikan level maksimum tegangan keluarannya  $\pm 12$  volt, gambarkan sketsa bentuk sinyal keluarannya.



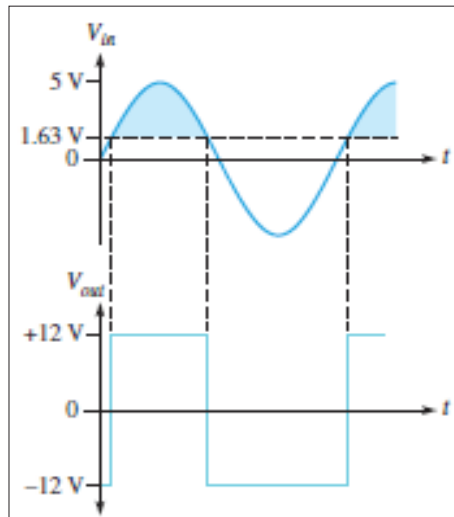
**Gambar 8.35** Rangkaian Penguat Komparator (Kasus Soal)

### Penyelesaian

Pertama, kita cari dahulu tegangan referensi dari persamaan (8.42) sehingga diperoleh sebesar

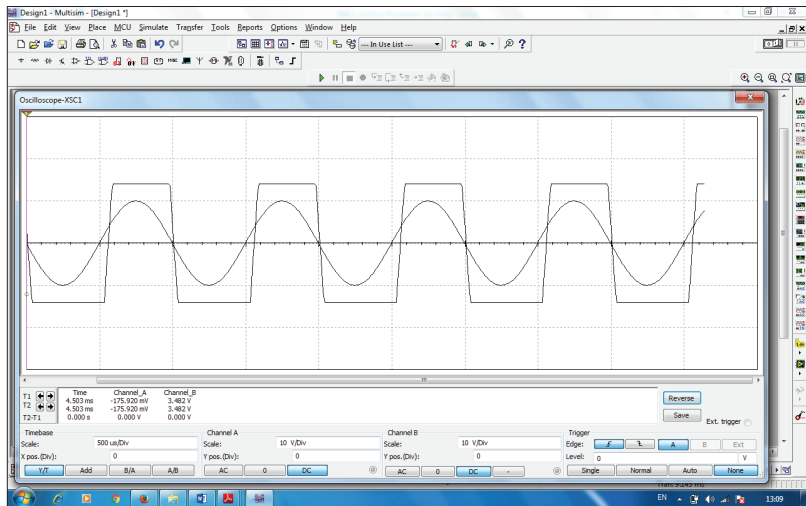
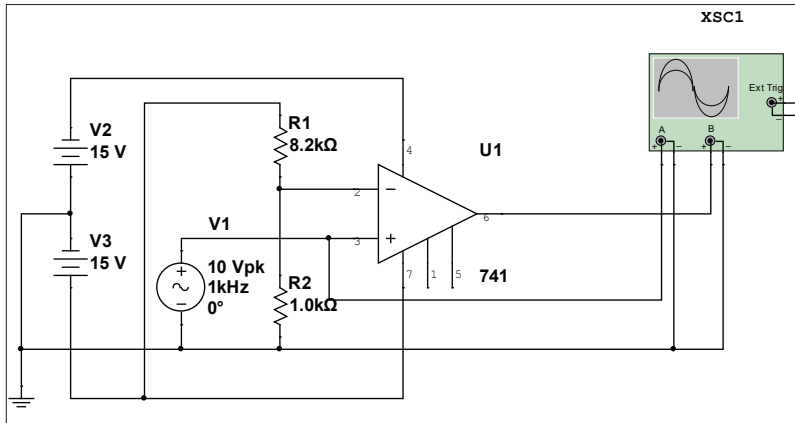
$$V_{REF} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{8,2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} (+15 \text{ V}) = 1,63 \text{ V}.$$

Kemudian kita gambarkan bentuk gelombang keluarannya, yaitu sebagai berikut (Gambar 8.36).



**Gambar 8.36** Bentuk Gelombang Keluaran Komparator

Hasil simulasi rangkaian dan bentuk sinyal *output*-nya dinyatakan sebagai berikut (Gambar 8.37).



**Gambar 8.37** Hasil Simulasi Rangkaian dan Bentuk Sinyal Output (Contoh Soal 8.14)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

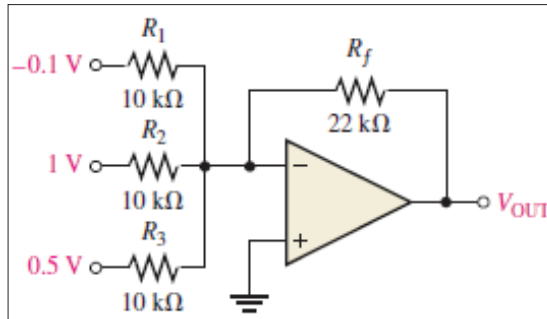
## RANGKUMAN

- 1) Secara sistem, penguat operasional merupakan sebuah sistem terintegrasi yang dibangun oleh beberapa tahapan penguat diferensial.
- 2) Disebut sebagai penguat operasional karena di samping dapat menguat sinyal masukannya, juga dapat melakukan operasi matematika seperti penjumlahan, pengurangan, perkalian, pembagian, integral, dan diferensial. Penguat operasional ini dapat mudah diaplikasikan karena dapat membuat sebuah rangkaian menjadi lebih sederhana dan mudah dianalisis.
- 3) Kategori penguat operasional ini dibagi menjadi dua tipe, yaitu penguat *inverting* (pembalik fase) dan *noninverting* (tidak membalik fase).
- 4) Pada penguat *inverting* sinyal keluarannya selain menghasilkan penguatan juga menghasilkan fase yang terbalik  $180^\circ$ , sedangkan penguat *non-inverting* akan menghasilkan penguatan yang fasenya sama seperti sinyal masukannya.
- 5) Penguatan lingkaran terbuka atau *open loop gain* ( $A_{oL}$ ) sebuah penguat operasional menunjukkan keadaan saat penguat ini akan menghasilkan penguatan yang tak terhingga sehingga untuk mendapat pengaturan penguatan yang diharapkan diperlukan penambahan sistem umpan balik padanya.

## LATIHAN SOAL

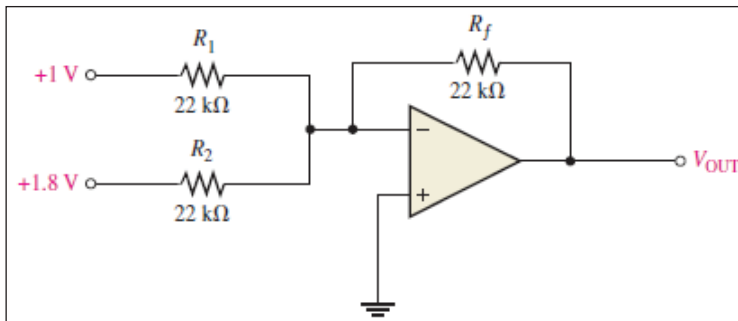
- 1) Jelaskan bagaimana karakteristik ideal sebuah penguat operasional.
- 2) Jelaskan beberapa parameter sebuah penguat operasional berikut:
  - a) penguatan lingkaran terbuka (*open loop gain*),
  - b) *slew rate*,
  - c) CMMR, dan
  - d) *Bandwidth*.

- 3) Tentukan tegangan keluaran dari rangkaian yang ditunjukkan Gambar 8.38.



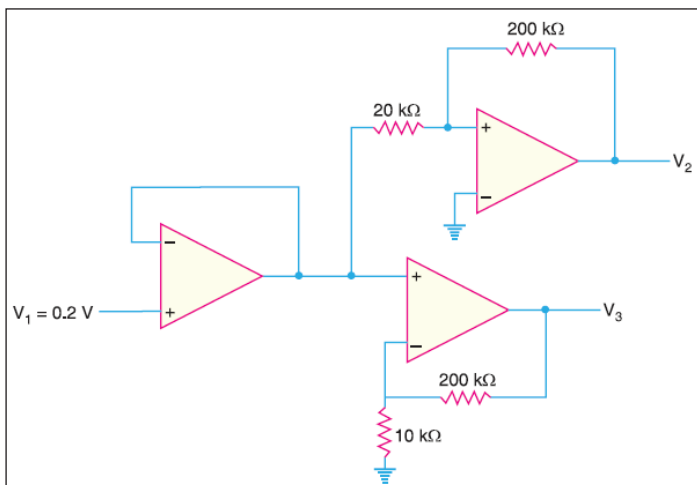
**Gambar 8.38** Rangkaian Penguat Penjumlah Tiga Masukan

- 4) Dengan melihat rangkaian pada Gambar 8.39, tentukan
- tegangan pada resistansi  $R_1$  dan  $R_2$ ,
  - arus yang melalui  $R_f$  dan
  - tegangan keluaran  $V_{out}$ .



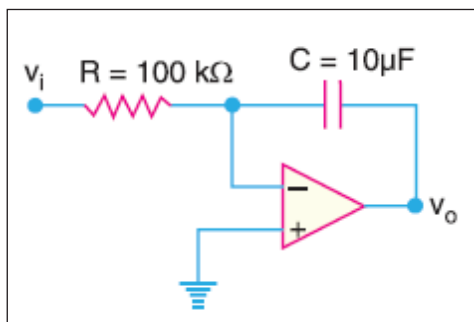
**Gambar 8.39** Rangkaian Penguat Penjumlah Dua Masukan

- 5) Tentukan tegangan  $V_2$  dan  $V_3$  dari rangkaian yang ditunjukkan oleh Gambar 8.40.



**Gambar 8.40** Rangkaian Penguat Diferensial Satu Masukan

- 6) Tentukan tegangan keluaran dari sebuah rangkaian op-amp integrator berikut ini.



**Gambar 8.41** Rangkaian Integrator

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic devices and circuit theory* (7th ed). Prentice Hall.
- Floyd, T. L., & Buchla, D. L., (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices, and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R., (2014). *Electrical engineering principles and applications* (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A., & Bates, D. (2016). *Electronic principles* (8th ed.). McGrawHill-Education.
- Sedra & Smith, (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB IX

## PRINSIP KERJA TANGGAPAN FREKUENSI PENGUAT TRANSISTOR

### **Materi pembelajaran:**

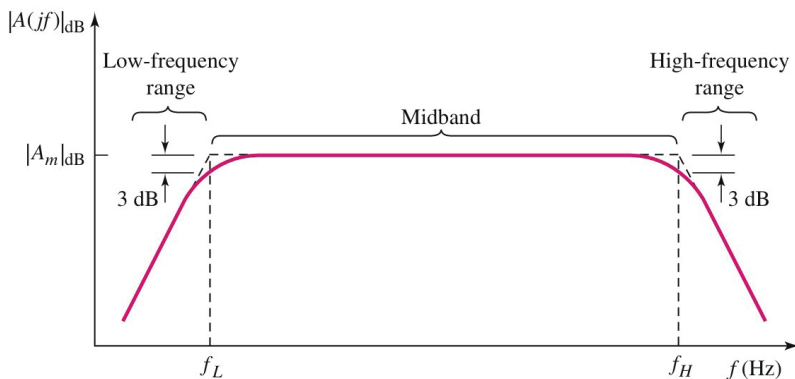
Pada bab ini akan dibahas tentang tanggapan sebuah penguat transistor terhadap perubahan frekuensi masukannya yang nantinya cukup besar memengaruhi penguatan yang dihasilkan oleh penguat tersebut. Dalam bab ini juga akan dibahas tentang cara menghitung dan menentukan lebar pita frekuensi kerja sebuah penguat transistor menggunakan persamaan-persamaan yang terkait.

### **Tujuan pembelajaran:**

- 1) memahami cara kerja penguat transistor terhadap adanya perubahan frekuensi masukannya;
- 2) mampu menentukan lebar pita frekuensi kerja dan penguatan sebuah penguat transistor; dan
- 3) mampu merancang dan memodelkan sebuah penguat transistor yang dipengaruhi oleh adanya perubahan frekuensi di dalamnya.

## A. Pendahuluan

Tanggapan frekuensi sebuah penguat transistor digambarkan sebagai bentuk tanggapan penguatan sinyal terhadap frekuensi. Tanggapan frekuensi penguat ini dapat ditentukan dan diukur jika perubahan frekuensi masukannya dapat menghasilkan sebuah perubahan penguatan pada sisi keluarannya. Gambaran secara sederhana dari tanggapan frekuensi sebuah penguat transistor ini dapat ditunjukkan seperti yang diperlihatkan oleh kurva karakteristik pada Gambar 9.1.



Sumber: Sedra dan Smith (2004)

**Gambar 9.1** Kurva Tanggapan Frekuensi Penguat Transistor

Gambar 9.1 menjelaskan bahwa penguatan pada daerah kerja frekuensi rendah  $f_L$  (*low frequency*) akan mengalami penurunan disebabkan oleh adanya efek kapasitansi kopling dan kapasitansi *bypass* (dibahas pada bab ini, di bagian selanjutnya). Sementara itu, pada daerah frekuensi tinggi  $f_H$  (*high frequency*) penguatan juga mengalami penurunan penguatan yang disebabkan oleh adanya kapasitansi *stray* atau kapasitansi internal penguat (dibahas selanjutnya pada bab ini). Daerah frekuensi tengah (*mid frequency*) dari penguat akan mendapatkan nilai penguatan maksimumnya. Daerah ini disebut juga sebagai daerah frekuensi kerja penguat. Luas daerah frekuensi

kerja penguat ini dibatasi oleh dua frekuensi batas yang disebut sebagai frekuensi kritis (*cut off*) yang terdiri dari daerah sisi frekuensi rendah ( $f_L f_L$ ) dan frekuensi tinggi ( $f_H f_H$ ). Rentang di antara kedua frekuensi kritis ini selanjutnya dinamakan sebagai lebar pita frekuensi atau *bandwidth* penguat tersebut. Adapun besarnya lebar pita penguat ini sesuai Gambar 9.1 dapat dihitung menggunakan persamaan (9.1):

$$\text{Bandwidth (BW)} = f_H - f_L. \quad (9.1)$$

Oleh karena itu, berbicara tentang tanggapan frekuensi penguat transistor berarti secara tidak langsung kita bisa mengatakan bahwa selain mampu menguatkan sinyal masukan, sebuah penguat sendiri memiliki lebar pita frekuensi kerja sehingga kriteria dalam melakukan perancangan penguat senantiasa dibatasi oleh parameter lebar pita ini. Inilah sebabnya kita tidak bisa asal-asalan dalam merancang dan memodelkan sebuah penguat transistor sehingga perlu memperhatikan faktor-faktor ini.

## B. Frekuensi Kritis (*Cut-off*) Penguat Transistor

Frekuensi kritis sebuah penguat transistor menunjukkan batas frekuensi ketika penguatan daya penguat mengalami penurunan sebesar setengah daya maksimum keluarannya. Sebagai tahap awal dalam menentukan nilai frekuensi kritis sebagai fungsi penguatan tentu kita perlu memahami satuan tanggapan penguat yang dinyatakan dalam satuan desibel (*decibel*, dB). Jika yang menjadi objek adalah nilai penguatan daya, satuan dalam bentuk desibel dinyatakan oleh persamaan (9.2).

$$A_p(\text{dB}) = 10 \log_{10}(0,5) = -3 \text{ dB}. \quad (9.2)$$

Sementara itu, jika nilai penguatannya menggunakan pendekatan nilai tegangannya, besarnya dinyatakan sebesar  $\pm 70,7\%$  terhadap tegangan maksimum atau dinyatakan sebesar

$$A_v(dB) = 20\log_{10}(0,707) = -3 \text{ dB.} \quad (9.3)$$

**Tabel 9.1** Nilai Satuan *Decibel* Penguatan Tegangan

Penguatan Tegangan ( $A_v$ )	Nilai <i>Decibel</i> (dB)
32	$20 \log (32) = 30 \text{ dB}$
16	$20 \log (16) = 24 \text{ dB}$
8	$20 \log (8) = 18 \text{ dB}$
4	$20 \log (4) = 12 \text{ dB}$
2	$20 \log (2) = 6 \text{ dB}$
1	$20 \log (1) = 0 \text{ dB}$
0,707	$20 \log (0,707) = -3 \text{ dB}$
0,5	$20 \log (0,5) = -6 \text{ dB}$
0,25	$20 \log (0,25) = -12 \text{ dB}$
0,125	$20 \log (0,125) = -18 \text{ dB}$
0,0625	$20 \log (0,0625) = -24 \text{ dB}$
0,03125	$20 \log (0,03125) = -30 \text{ dB}$

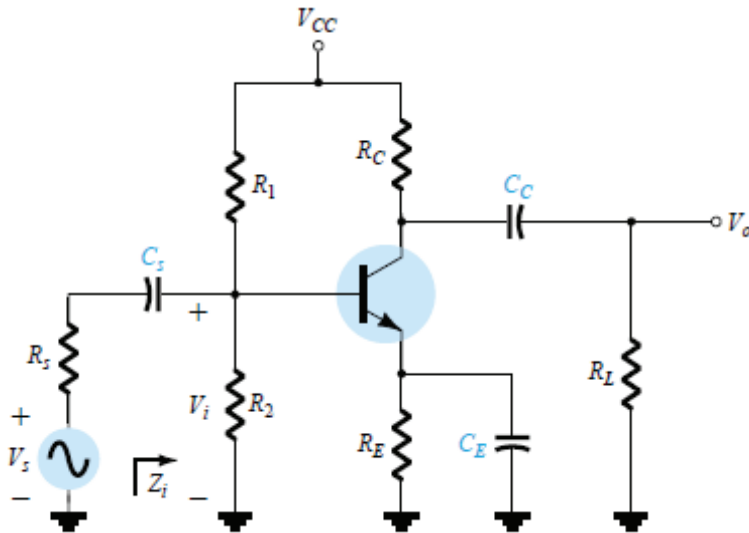
Sumber: Malvino dan Bates (2016)

### C. Frekuensi Kerja Penguat Transistor

Ada beberapa daerah frekuensi kerja penguat berkaitan dengan daerah tanggapan frekuensi penguat yang mampu memengaruhi perubahan hasil penguatannya, di antaranya daerah frekuensi rendah (*low frequency*), frekuensi tengah (*midband frequency*), dan frekuensi tinggi (*high frequency*). Dalam pembahasan kali ini kita lebih terfokus pada tanggapan frekuensi pada penguat transistor bipolar emiter bersama dan penguat FET *source* bersama karena hampir pada umumnya penguat dirancang menggunakan jenis transistor ini.

## 1. Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat Transistor

Tanggapan frekuensi penguat transistor bipolar pada sisi frekuensi kritis rendah dapat dianalisis berdasarkan tiga posisi atau titik kerja penguat, yaitu di sisi basis yang diwakili oleh reaktansi kapasitif melalui kopling kapasitor masukan penguat; di sisi keluaran melalui reaktansi kapasitif pada bagian kolektor; dan yang terakhir adalah reaktansi pada sisi kapasitor *bypass* sisi emiter. Adapun analisis tanggapan frekuensi dari skema dasar rangkaian penguat transistor bipolar ditunjukkan seperti pada Gambar 9.2.



Sumber: Boylestad dan Nashelsky (2015)

**Gambar 9.2** Rangkaian Penguat Transistor BJT pada Frekuensi Rendah

### a. Kopling Kapasitor Masukan ( $C_s$ )

Frekuensi kritis pada daerah frekuensi rendah di sisi masukan penguat dapat ditentukan besarnya dari pendekatan persamaan berikut berdasarkan Gambar 9.2.

$$f_{L_s} = \frac{1}{2\pi R_i C_{in}}; \quad (9.4)$$

dengan

$$R_{in} = R_1 // R_2 // \beta r'_e. \quad (9.5)$$

Jika resistansi sumber diasumsikan, persamaan (8-4) akan menjadi

$$f_{L_s} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_{in})C_{in}}. \quad (9.6)$$

### b. Kopling Kapasitor Keluaran ( $C_c$ )

Frekuensi kritis pada daerah frekuensi rendah di sisi keluaran penguat transistor BJT sesuai Gambar 9.2 dapat ditentukan besarnya, yaitu

$$f_{L_c} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_L)C_c}; \quad (9.7)$$

dengan  $R_o$  menyatakan resistansi keluaran penguat yang besarnya diperoleh sebesar

$$R_o = R_C // r_o. \quad (9.8)$$

Karena nilai  $r_o$  relatif lebih kecil terhadap  $R_C$ , untuk memudahkan dalam perhitungannya biasanya  $R_o = R_C$  sehingga persamaan (9.7) dapat ditulis kembali sebagai

$$f_{L_c} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_c}. \quad (9.9)$$

### c. Kapasitor Bypass ( $C_E$ )

Frekuensi kritis pada daerah frekuensi rendah kapasitansi *bypass* di sisi emiter pada penguat transistor BJT sesuai Gambar 9.2 dapat ditentukan besarnya sebagai berikut.

$$f_{L_E} = \frac{1}{2\pi R_E C_E}; \quad (9.10)$$

dengan

$$R_e = R_E // \left( \frac{R_s // R_1 // R_2}{\beta} + r'_e \right). \quad (9.11)$$

### Contoh 9.1

Tentukan *cut-off* frekuensi rendah pada rangkaian penguat BJT yang ditunjukkan seperti pada Gambar 8.2 dengan parameter yang diketahui sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_s &= 10 \mu\text{F}, C_E = 20 \mu\text{F}, C_C = 1 \mu\text{F}, R_s = 1 \text{ k}\Omega, R_1 = 40 \text{ k}\Omega, \\ R_2 &= 10 \text{ k}\Omega, R_E = 2 \text{ k}\Omega \\ R_C &= 4 \text{ k}\Omega, R_L = 2,2 \text{ k}\Omega, \beta = 100, r_o = \infty \Omega, V_{CC} = 20 \text{ V}. \end{aligned}$$

### Penyelesaian

Bagian masukan penguat bipolar

- 1) Nilai frekuensi *cut-off* pada frekuensi rendah sisi masukan dapat ditentukan dari persamaan (9.4) dengan terlebih dahulu kita tentukan resistansi masukan atau impedansi masukannya, yaitu sebesar

$$R_{in} = R_1 // R_2 // \beta r'_e.$$

Kita tentukan dahulu  $r'_e$  dari tahapan berikut:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{40 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \times 20 \text{ V} = 4 \text{ volt}.$$

Kemudian arus emiter  $I_E$  ditentukan sebesar

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 1,65 \text{ mA.}$$

sehingga  $r'_e$  diperoleh sebesar

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{1,65 \text{ mA}} = 15,76 \Omega.$$

- 2) Kedua, resistansi masukan penguat dapat ditentukan sebesar

$$R_{in} = R_1 // R_2 // \beta r'_e =$$

$$40 \text{ k}\Omega // 10 \text{ k}\Omega // (100 \times 15,76 \Omega) = 1,32 \text{ k}\Omega$$

- 3) Ketiga, frekuensi kritis sisi frekuensi rendah masukannya diperoleh sebesar

$$f_{L_s} = \frac{1}{2\pi(1 \text{ k}\Omega + 1,32 \text{ k}\Omega) 10 \mu\text{F}} = 6,86 \text{ Hz.}$$

### Bagian keluaran penguat bipolar

Dengan menggunakan persamaan (9.9) kita dapat memperoleh frekuensi kritis sisi keluaran sebesar

$$f_{L_c} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_C} = \frac{1}{2\pi(4 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega) 1 \mu\text{F}} = 25,68 \text{ Hz.}$$

### Bagian *bypass* (sisi emiter) penguat bipolar

- 1) Pertama, kita tentukan dahulu  $R_e$  sesuai persamaan (9.11) sebelum menentukan frekuensi kritisnya,

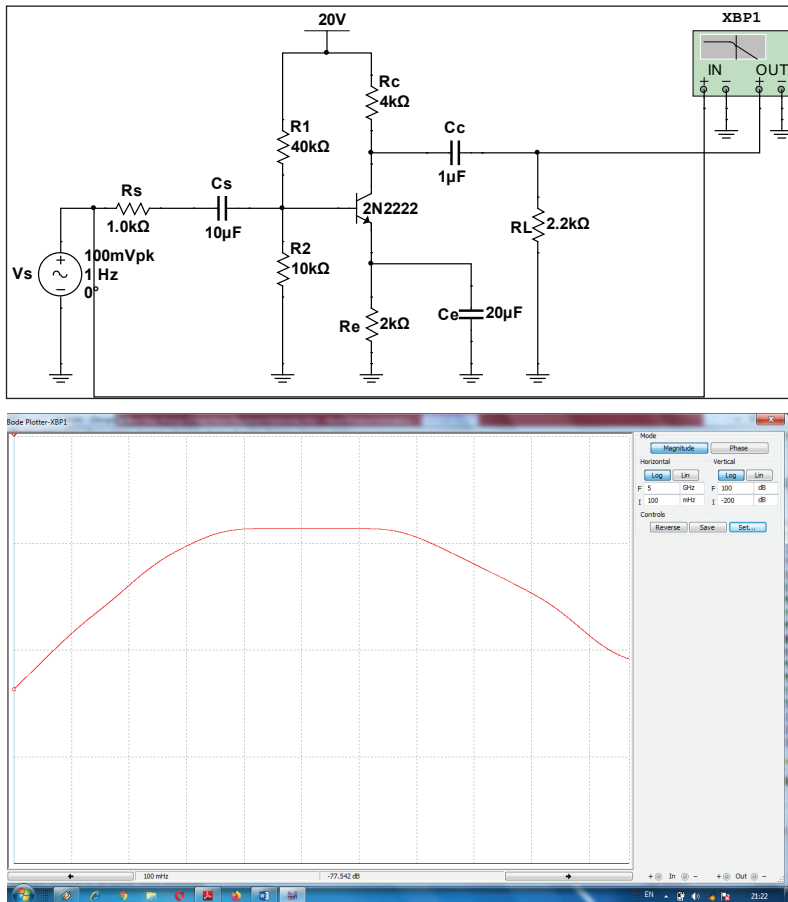
$$R_e = R_E // \left( \frac{R_s // R_1 // R_2}{\beta} + r'_e \right) =$$

$$2 \text{ k}\Omega // \left( \frac{1 \text{ k}\Omega // 40 \text{ k}\Omega // 10 \text{ k}\Omega}{100} + 15,76 \Omega \right) \cong 24,35 \Omega.$$

- 2) Kemudian diperoleh frekuensi kritis sisi *bypass* (kaki emiter) sesuai persamaan (9.10), yaitu sebesar

$$f_{L_E} = \frac{1}{2\pi R_e C_E} = \frac{1}{2\pi(24,35 \Omega)(20 \mu F)} \cong 327 \text{ Hz.}$$

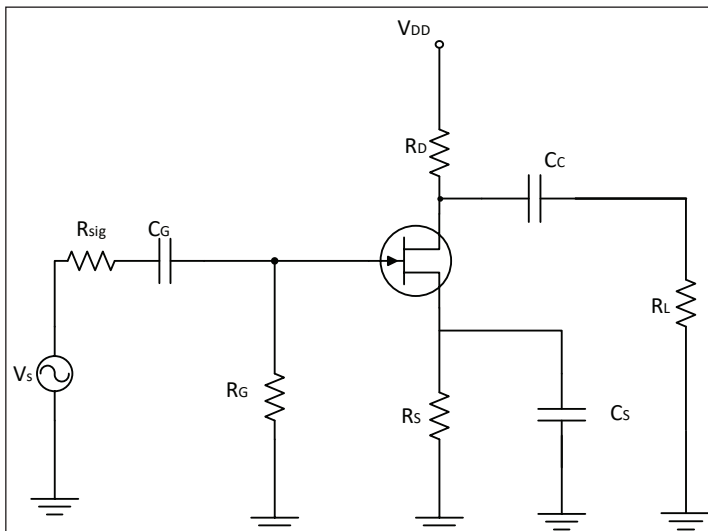
Hasil simulasi rangkaian dan sinyal *output*-nya diperoleh sebagai berikut (Gambar 9.3).



**Gambar 9.3** Hasil Simulasi Multisim (Contoh 9.1)

## 2. Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat FET

Analisis tanggapan frekuensi penguat FET dalam daerah frekuensi rendahnya dinyatakan dalam tiga daerah kerja yang diwakili oleh tiga posisi kedudukan kapasitansi, yaitu kapasitor di gerbang ( $C_G$ ), kapasitor kopling di kaki *drain* ( $C_C$ ) dan kapasitor di kaki *source* ( $C_E$ ). Dari sini bisa terlihat bahwa daerah kerja frekuensi kritis sebuah penguat FET memiliki tiga daerah tanggapan frekuensinya berdasarkan kedudukan komponen kapasitor sama seperti halnya analisis pada tanggapan frekuensi penguat transistor bipolar sebelumnya.



**Gambar 9.4** Dampak Kapasitansi Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat FET

Sama seperti pada penguat bipolar sebelumnya, kita dapat mengamati dan menganalisis frekuensi kritis pada frekuensi rendahnya dimulai dari sisi masukan dengan menitikberatkan pada peranan nilai kapasitansi gerbang  $C_G$ . Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi kritis masukan penguat FET besarnya dipengaruhi, antara lain, oleh resistansi sumber  $R_s$ , resistansi masukan  $R_{in}$  dan kapasitansi  $C_G$

sehingga hubungan ketiga parameter ini akan menentukan frekuensi kritis masukan penguat ini, yaitu

$$f_{LG} = \frac{1}{2\pi (R_{sig} + R_{in}) C_G}; \quad (9.12)$$

dengan  $R_{in}$  juga disebut sebagai tahanan gerbang  $R_G$  yang besarnya dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$f_{LG} = \frac{1}{2\pi (R_{sig} + R_G) C_G}. \quad (9.13)$$

Sementara itu, pada bagian keluaran penguat FET, kapasitor kopling  $C_C$  yang terhubung dengan resistansi beban  $R_L$  menjadi acuan penentuan frekuensi *cut-off* yang besarnya dapat dicari dari persamaan berikut.

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi (R_o + R_L) C_C}; \quad (9.14)$$

dengan resistansi AC keluaran  $R_o$  ini sebanding dengan resistansi *drain*  $R_D$  dan dinyatakan sebesar

$$R_o = R_D. \quad (9.15)$$

Selanjutnya, untuk frekuensi *cut-off* pada bagian kapasitansi *source*  $C_s$  besarnya dapat dinyatakan sebesar

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi R_{ek} C_C}; \quad (9.16)$$

dengan resistansi ekuivalen  $R_{ek}$  besarnya diperoleh dari persamaan berikut:

$$R_{ek} = R_S // \frac{1}{g_m}. \quad (9.17)$$

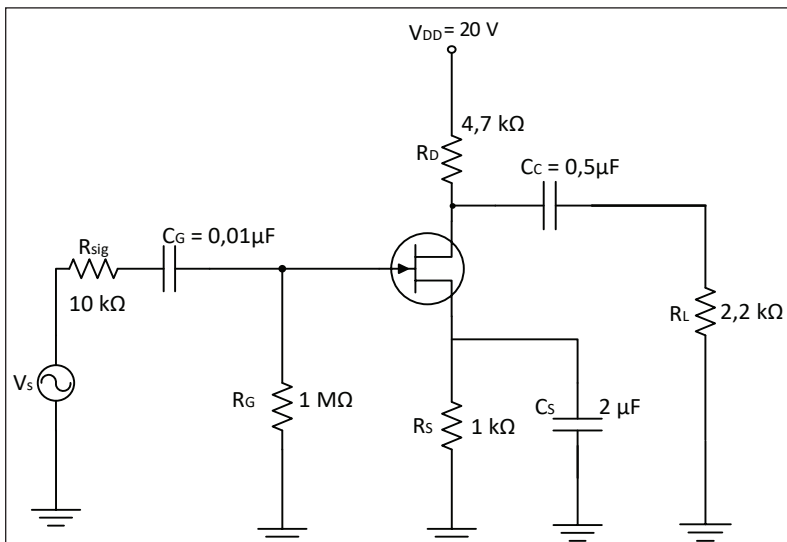
## Contoh 9.2

Dari rangkaian berikut (Gambar 9.5), tentukan

- frekuensi kritis untuk masing-masing daerah penguat jika diketahui

$$I_{DSS} = 8 \text{ mA}; V_p = -4 \text{ V}; r_d = \infty \Omega; I_{DQ} = 2 \text{ mA}.$$

- Kurva respons frekuensi atau dinamakan kurva *bode plot*.



**Gambar 9.5** Rangkaian Penguat FET (Contoh 9.2)

## Penyelesaian

- Pada tahap awal, kita perlu dapatkan frekuensi kritis rendah di sisi masukan penguat FET dari persamaan (9.13) maka diperoleh frekuensinya sebesar

$$f_{LG} = \frac{1}{2\pi(10 \text{ k}\Omega + 1 \text{ M}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 15,8 \text{ Hz}.$$

Kemudian di sisi keluaran (berkaitan dengan beban), frekuensi *cut-off* diperoleh menggunakan persamaan (9.14) sebesar

$$f_{Lc} = \frac{1}{2\pi(4,7 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega)(0,5 \text{ }\mu\text{F})} = 46,1 \text{ Hz.}$$

Sementara itu, frekuensi *cut-off* untuk daerah *source* melalui kapasitansi  $C_s$  diperoleh dengan terlebih dahulu menentukan resistansi ekuivalen  $R_{ek}$  melalui persamaan (9.17). Selanjutnya kita menerapkan persamaan (9.16) untuk menentukan frekuensi kritisnya.

$$g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|} = \frac{2 \times 8 \text{ mA}}{4 \text{ V}} = 4 \text{ mS},$$

$$g_m = g_{m_0} \left( 1 - \frac{V_{GSQ}}{V_p} \right),$$

dengan  $V_{GSQ} = -I_{DQ} R_s = (2 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = -2 \text{ V}$  sehingga diperoleh

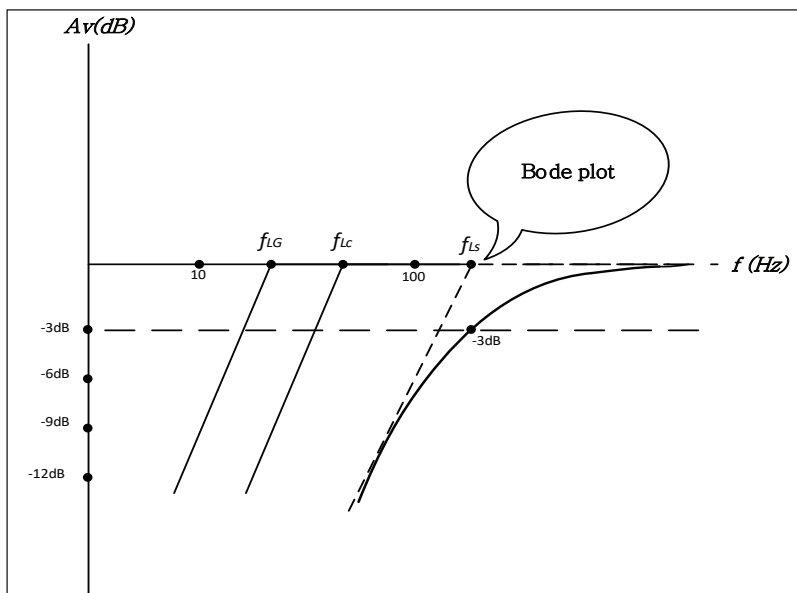
$$g_m = 4 \text{ mS} \left( 1 - \frac{-2 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right) = 2 \text{ mS},$$

$$R_{ek} = 1 \text{ k}\Omega // \frac{1}{2 \text{ mS}} = 3,33 \text{ k}\Omega.$$

Jadi, akhirnya frekuensi *cut-off*-nya diperoleh sebesar

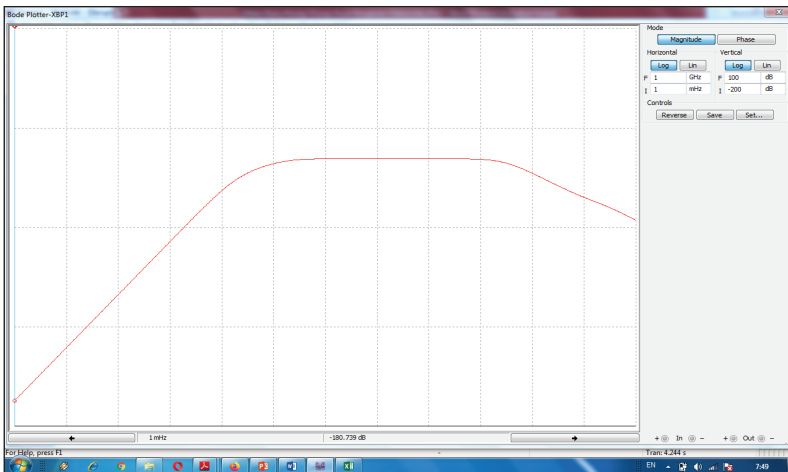
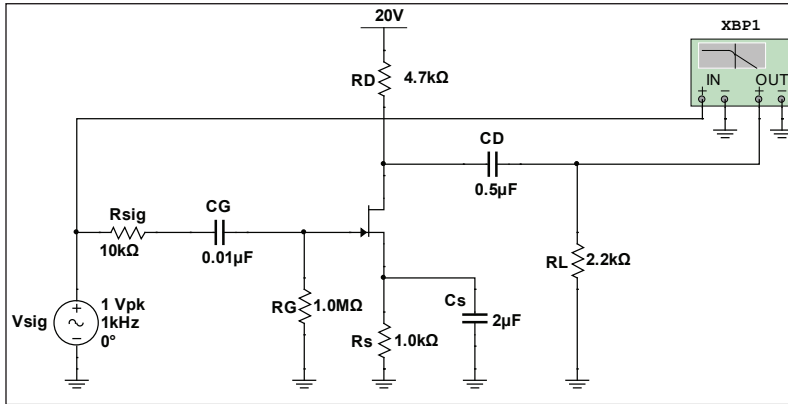
$$f_{Lc} = \frac{1}{2\pi(3,33 \text{ k}\Omega)(2 \text{ }\mu\text{F})} = 238,7 \text{ Hz.}$$

- b) Kurva tanggapan frekuensinya melalui kurva *bode plot* digambarkan sebagai berikut (Gambar 9.6).



**Gambar 9.6** Kurva Karakteristik Tanggapan Frekuensi Rendah Penguat FET

Hasil simulasi rangkaian dan sinyal *output*-nya diperoleh sebagai berikut (Gambar 9.7).



**Gambar 9.7** Hasil Simulasi Multisim (Contoh 9.3)

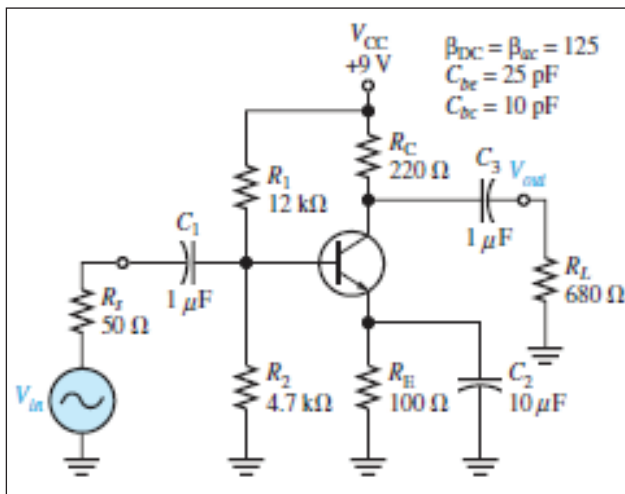
## RANGKUMAN

- 1) Tanggapan frekuensi sebuah penguat menunjukkan adanya respons dari sebuah sinyal terhadap nilai frekuensi yang dimasukkan kepadanya. Terjadinya perubahan pada frekuensi masukannya akan mengakibatkan penguatan pada sisi keluarannya juga. Apabila hal ini terjadi, hal ini menjadi indikasi awal bahwa penguat tersebut sudah bekerja dengan baik meskipun ada faktor-faktor lain yang juga perlu dianalisis.

- 2) Perlunya analisis terkait dengan tanggapan frekuensi sebuah penguat adalah untuk membuktikan bahwa sebuah penguat tidak hanya mampu menguatkan, tetapi juga memiliki daerah frekuensi kerja dan lebar pita.
- 3) Lebar pita sebuah penguat besarnya ditentukan oleh frekuensi kritisnya, yaitu frekuensi kritis sisi atas dan bawah.
- 4) Umumnya penguatan maksimum sebuah penguat diperoleh saat penguat tersebut bekerja pada daerah rentang frekuensi antara (*band pass*) atau disebut frekuensi tengahnya.

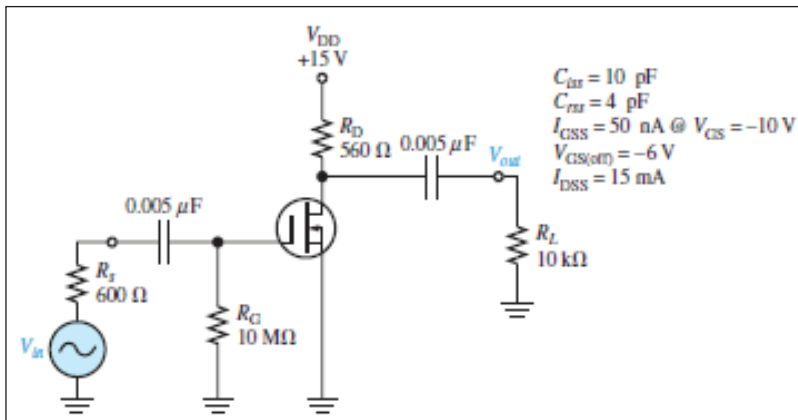
## LATIHAN SOAL

- 1) Pada tanggapan frekuensi sebuah penguat, kenapa kopling kapasitor tidak memiliki dampak terhadap hasil penguatan untuk daerah tanggapan frekuensi tinggi?
- 2) Tentukan frekuensi kritis (*cut-off*) pada daerah frekuensi bawah untuk penguat bipolar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.8 serta gambarkan juga kurva tanggapannya (*bode plot*).



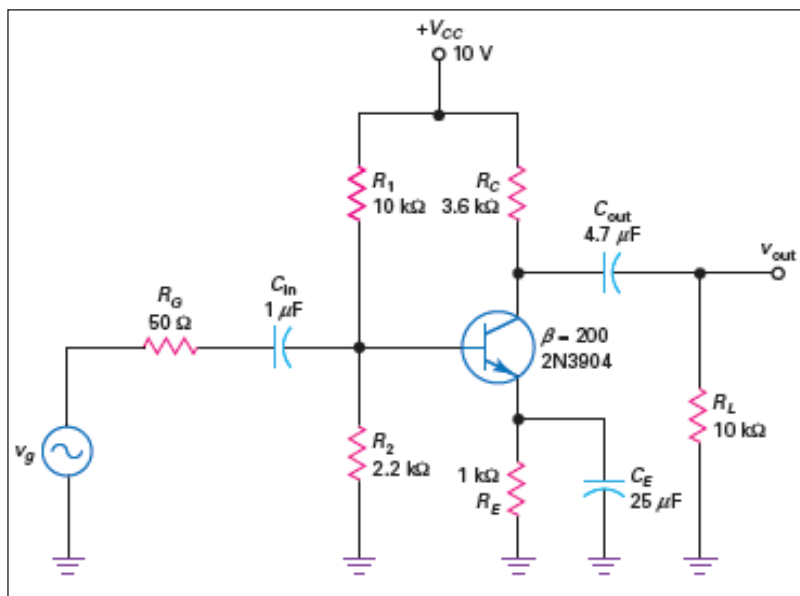
**Gambar 9.8** Respons Frekuensi Rangkaian Penguat Transistor Bipolar

- 3) Tentukan frekuensi kritis pada daerah frekuensi atas untuk penguat bipolar seperti yang ditunjukkan Gambar 9.8 serta gambarkan pula bentuk kurva tanggapan frekuensinya (*bode plot*).
- 4) Dari rangkaian penguat pada gambar seperti pada soal 2, tentukan lebar pita (*bandwidth*) penguatnya.
- 5) Tentukan frekuensi kritis (*cut-off*) pada daerah frekuensi bawah untuk penguat MOSFET seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.9 serta gambarkan kurva tanggapannya (*bode plot*).



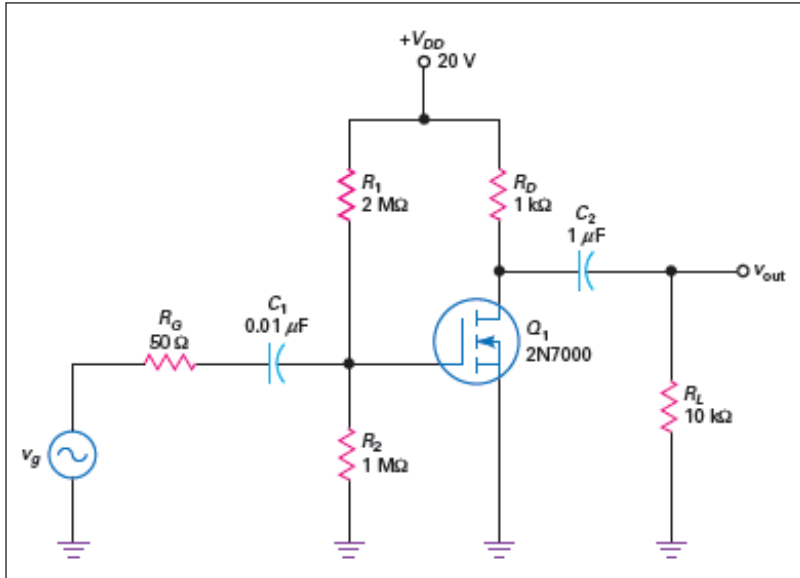
**Gambar 9.9** Respons Frekuensi Rangkaian Penguat MOSFET

- 6) Dari rangkaian penguat yang ditunjukkan pada Gambar 9.10, tentukan beberapa parameter berikut:
  - a) daerah frekuensi kritis bawah pada kopling kapasitansi bagian basis,
  - b) daerah frekuensi kritis bawah pada kopling kapasitansi bagian kolektor, dan
  - c) daerah frekuensi kritis bawah pada kopling kapasitansi bagian emiter *bypass*.



**Gambar 9.10** Respons Frekuensi Rangkaian Penguat Transistor CE

- 7) Simulasikan rangkaian penguat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9.11 kemudian tentukan frekuensi kritis pada daerah frekuensi tingginya.



**Gambar 9.11** Respons Frekuensi Rangkaian Penguat MOSFET

## DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic devices and circuit theory* (7th ed.). Prentice Hall.
- Sedra & Smith. (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.
- Flyod, T. L., & Buchla, D. L. (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering principles and applications*, (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A., & Bates, D. (2016). *Electronic principles* (8th ed.). McGrawHill-Education.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB X

## MENDESAIN RANGKAIAN PENGUAT DAYA

### **Materi pembelajaran:**

Pada bab ini dibahas tentang prinsip kerja rangkaian penguat daya beserta langkah-langkah perhitungan dan perancangan menggunakan persamaan-persamaan yang berkaitan. Selanjutnya dalam bab ini juga akan dibahas secara detail beberapa kategori atau model penguat daya seperti penguat daya kelas A, kelas B, kelas AB, dan kelas C.

### **Tujuan pembelajaran:**

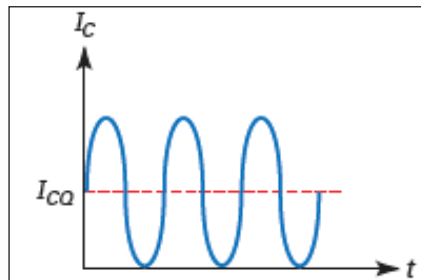
- 1) mampu memahami karakteristik dan kinerja sebuah rangkaian penguat daya;
- 2) mampu memahami perbedaan kinerja untuk beberapa klasifikasi penguat daya, yaitu penguat kelas A, kelas B, kelas B, kelas AB, dan kelas C; dan
- 3) mampu merancang dan memodelkan sebuah penguat daya sesuai dengan persamaan-persamaan yang berkaitan.

## A. Pendahuluan

Rangkaian penguat dalam sistem elektronika sebenarnya tidak hanya sebatas rangkaian penguat tegangan atau arus yang telah dikemukakan pada pembahasan sebelumnya, tetapi ada jenis penguat lainnya, yaitu penguat daya (*power amplifier*). Penjelasan terkait penguat daya dapat diuraikan berdasarkan tiga parameter, yaitu kelas operasi, tipe pengoplingan, dan rentang frekuensi kerja.

## B. Operasi Kerja Kelas Penguat Daya

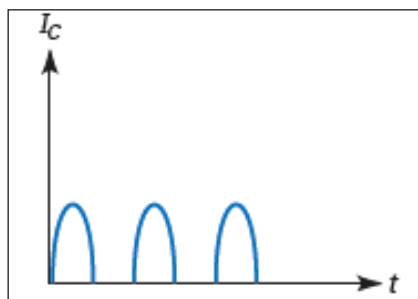
Operasi penguat daya kelas A adalah sebuah penguat daya yang beroperasi pada daerah aktif dari garis beban kerja transistor atau berada di titik Q (*quesient*), yaitu saat arus kolektor mengalir sebesar siklus  $360^\circ$  seperti yang ditunjukkan Gambar 10.1. Bagi seorang perancang, merealisasikan sebuah rangkaian penguat daya dalam operasi kelas A ini biasanya mengusahakan agar transistor sedekat mungkin selalu berada di titik Q pada garis beban kerjanya.



**Gambar 10.1** Arus Kolektor Penguat Daya Kelas A

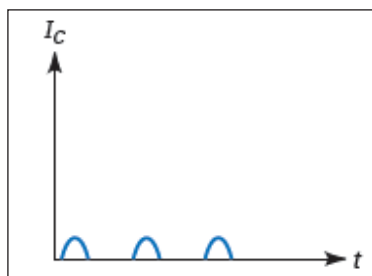
Operasi penguat daya kelas B adalah penguat daya yang memiliki perbedaan dalam hal aliran arus kolektor yang menghasilkan hanya setengah siklus dari penguat daya kelas A, yaitu  $180^\circ$ . Biasanya jika akan merealisasikan rangkaian penguat kelas ini, seorang perancang memosisikan penguat bekerja pada daerah *cut-off* atau titik Q selalu digeser lebih ke arah garis beban *cut-off*. Operasi kelas B ini hanya setengah siklus positif tegangan AC basis yang menghasilkan arus

kolektor dan berdampak mengurangi panas yang terbangun pada transistor daya. Adapun secara ilustrasi ditunjukkan pada Gambar 10.2.



**Gambar 10.2** Siklus Arus Kolektor Penguat Daya Kelas B

Operasi penguat daya kelas C adalah operasi yang menggambarkan aliran arus kolektor yang memiliki siklus lebih kecil dari  $180^\circ$ . Sama seperti penguat kelas B, pada kelas C ini arus kolektor dibangkitkan dari bagian setengah siklus positif tegangan AC basisnya. Secara ilustrasi, bentuk siklusnya seperti pada Gambar 10.3.

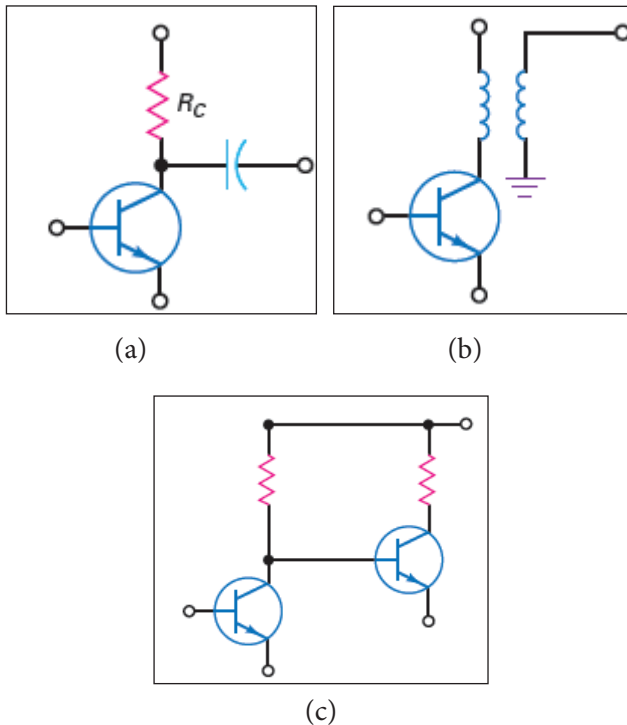


**Gambar 10.3** Siklus Arus Kolektor Penguat Daya Kelas C

## 1. Pengoplingan pada Rangkaian Penguat Daya

Tahapan selanjutnya dalam membahas dan menganalisis karakteristik sebuah penguat daya adalah mengenal tentang metode pengoplingan (*coupling*). Pengoplingan ini pada prinsipnya sangat berkaitan

dengan distribusi daya masukan yang akan diterapkan pada sebuah sistem penguat daya serta berkaitan juga dengan distribusi daya keluaran sistem penguat daya yang akan diterapkan ke tahapan sistem selanjutnya. Peranan sederhananya, kopling ini lebih kepada memastikan daya yang dihasilkan penguat tidak mengalami permasalahan seperti peredaman atau distorsi. Secara umum, kategori kopling ini terbagi ke dalam dua konfigurasi, yaitu kopling kapasitif (*capasitive coupling*) dan kopling transformer (*transformer coupling*). Ada satu lagi jenis pengoplingan yang biasa ditemui, yaitu pengkoplingan langsung (*direct coupling*), tetapi jenis kopling ini lebih khusus penempatannya, yaitu hanya di antara dua penguat yang tersusun secara bertingkat (*multistage amplifiers*).

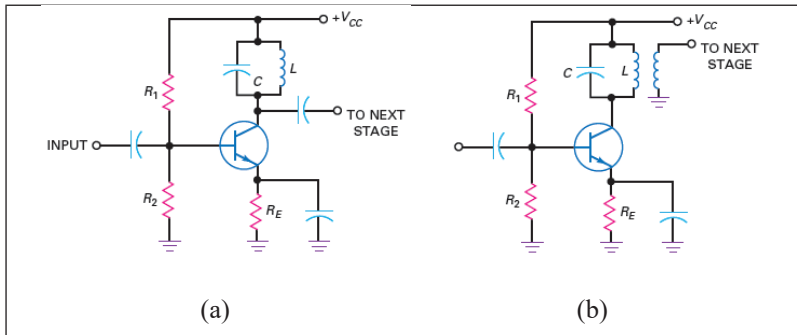


Keterangan: (a) Model Kapasitif, (b) Model Transformer, (c) Model Langsung

**Gambar 10.4** Jenis Kopling pada Penguat Daya

## 2. Frekuensi Kerja Penguat Daya

Parameter lain yang bisa dijadikan referensi untuk menjelaskan tentang sistem penguat daya adalah rentang frekuensi kerjanya. Ada beberapa penamaan jenis penguat daya ini yang disesuaikan dengan rentang frekuensi kerjanya, di antaranya penguat audio yang bekerja di frekuensi 20 Hz–20 kHz dan penguat radio frekuensi (RF) yang biasanya bekerja di atas frekuensi 20 kHz. Penguat RF ini lebih familier dan banyak diaplikasikan pada daerah-daerah frekuensi siaran seperti AM (535 kHz–1065 kHz), FM (88 MHz–108 MHz) serta frekuensi di atasnya. Dalam analisis selanjutnya, penguat RF sendiri dapat diperluas tipenya menjadi penguat dengan pita sempit (*narrowband*) dan pita lebar (*wideband*). Penguat pita sempit dicirikan tertalaanya (*tuned*) pada bagian rangkaian *tank*-nya, sedangkan untuk penguat pita lebar lebih banyak tidak tertala. Adapun ilustrasi skema rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 10.5.



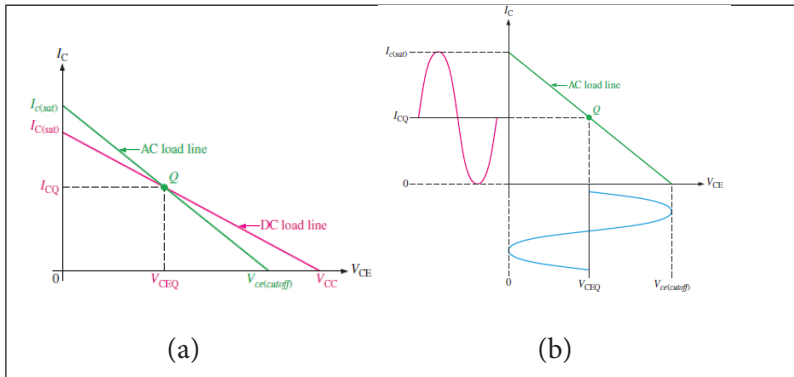
Keterangan: (a) Kapasitif dan (b) Transformer

**Gambar 10.5** Model Rangkaian Penguat Daya Tertala

## C. Penguat Daya Kelas A

Pada pembahasan tentang penguat transistor bipolar sebelumnya telah dijelaskan bahwa penguat transistor bipolar emiter bersama (*common emitter*) termasuk juga ke dalam kategori penguat daya kelas A. Seperti kita pahami bahwa setiap transistor jika akan diaplikasikan

untuk rangkaian penguat perlu diatur posisinya di daerah linier (titik Q di tengah-tengah) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 10.6. Karena itu, jenis penguat daya ini memiliki tingkat kelinieritas yang cukup tinggi dibandingkan dengan penguat daya sejenis lainnya. Kelinieritas di sini artinya bahwa daya keluaran merupakan gambaran replika dari sinyal daya masukannya.



**Gambar 10.6** Kurva Titik Operasi Kerja Penguat Daya Kelas A

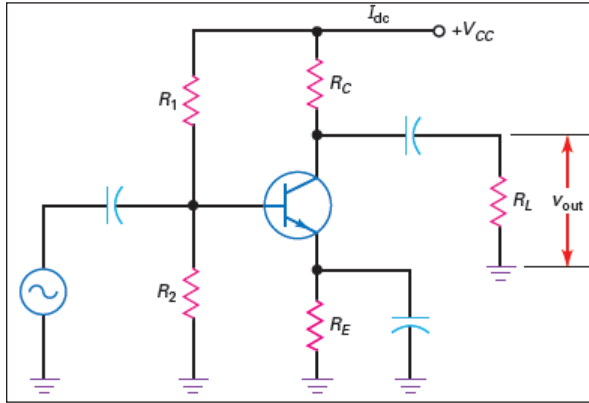
Berdasarkan Gambar 10.6a, operasi penguatan kelas penguat daya ini dapat ditinjau dari garis beban AC. Pada saat ini arus kolektor  $I_{CQ}$  berada pada posisi titik Q di tengah-tengah dan arus kolektor ini akan mengalami pergeseran ke daerah saturasi  $I_{C(sat)}$  serta bergeser menuju ke daerah *cut-off* (nol). Sementara itu, Gambar 10.6b dapat dianalisis ketika nilai maksimum arus kolektor sama dengan  $I_{CQ}$  serta tegangan maksimum kolektor-emiter bernilai sama dengan  $V_{CEQ}$ . Apabila kondisi ini tercapai, sinyal maksimum akan diperoleh oleh sebuah penguat daya kelas A ini.

### 1. Analisis Penguatan Daya Kelas A

Penguatan daya dapat ditentukan berdasarkan nilai perbandingan daya yang dihasilkan terhadap daya masukannya. Secara matematis, dapat dirumuskan

$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (10.1)$$

Skema rangkaian dasar penguat daya kelas A ditunjukkan pada Gambar 10.7.



**Gambar 10.7** Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas A (Model Kopling)

Dari skema rangkaian yang diilustrasikan pada Gambar 10.7 secara sederhana dapat ditentukan besar daya AC yang didistribusikan ke beban dalam tiga pendekatan, yaitu:

- 1) daya keluaran dalam satuan rms:

$$P_{out(ac)} = \frac{V_{C(rms)}^2}{R_L}; \quad (10.2)$$

- 2) daya keluaran dalam satuan maksimum (*peak*):

$$P_{out(ac)} = \frac{V_{CE(max)}^2}{2R_L}; \text{ dan} \quad (10.3)$$

- 3) daya keluaran dalam satuan puncak ke puncak (*peak to peak*):

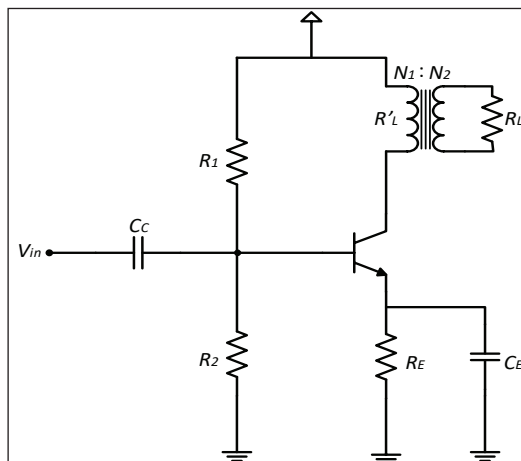
$$P_{ut(ac)} = \frac{V_{CE(pp)}^2}{8R_L}. \quad (10.4)$$

Adapun nilai efisiensi penguat yang menyatakan seberapa besar daya dapat diserap oleh beban adalah sebesar

$$\eta = \frac{P_{out(ac)}}{P_{in(dc)}} \times 100\%. \quad (10.5)$$

## 2. Penguat Daya Kelas A Terkopling Transformer

Khusus untuk tipe penguat daya kelas A dengan terkopling transformator pada sisi keluaran penguat memiliki pendekatan yang berbeda dalam menentukan daya keluaran karena ada beberapa parameter yang menentukan besar kecilnya daya keluaran, yaitu tegangan transformator, arus transformator, dan impedansi transformator. Skema rangkaian penguat jenis ini ditunjukkan seperti pada Gambar 10.8.



**Gambar 10.8** Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas A Terkopling Transformer

Total arus kolektor selama puncak setengah siklus positif pada rangkaian Gambar 10.8 sebesar  $2I_C$  dan  $V_{ce} = 0$ , sedangkan selama puncak setengah siklus negatif arus kolektor bernilai nol ( $I_C = 0$ ) dan  $V_{ce} = 2V_{CC}$ .

- 1) Tegangan puncak ke puncak emiter-kolektor ( $V_{ce(pp)}$ ):

$$V_{ce(pp)} = 2V_{CC}. \quad (10.6)$$

- 2) Arus kolektor puncak ke puncak:

$$i_{c(pp)} = 2I_C = \frac{V_{ce(pp)}}{R'_L} = \frac{2V_{CC}}{R'_L}. \quad (10.7)$$

- 3) Daya DC masukan diperoleh sebesar

$$P_{DC} = V_{CC} I_{CC} = I_C^2 R'_L. \quad (10.8)$$

- 4) Daya ac maksimum keluarannya diperoleh sebesar

$$P_{out (mak)} = \frac{V_{ce(pp)} i_{c(pp)}}{8} = \frac{1}{2} I_C^2 R'_L. \quad (10.9)$$

- 5) Tegangan pada transformasi diperoleh

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (10.10)$$

Persamaan (10.10) menunjukkan jumlah lilitan sekunder lebih banyak dibanding dengan jumlah lilitan primernya sehingga tegangan yang dihasilkan sisi sekunder juga lebih besar dari tegangan primer. Adapun arus pada transformer diperoleh sebesar

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (10.11)$$

Saat tegangan dan arus transformer berubah, hal ini berdampak juga pada perubahan impedansi transformer yang besarnya dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\frac{R'_L}{R_L} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = a^2 \quad (10.12)$$

sehingga resistansi beban transformer sisi primer sebagai cerminan dari beban sekundernya berdasarkan persamaan (10.12) diperoleh sebesar

$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L = a^2 R_L. \quad (10.13)$$

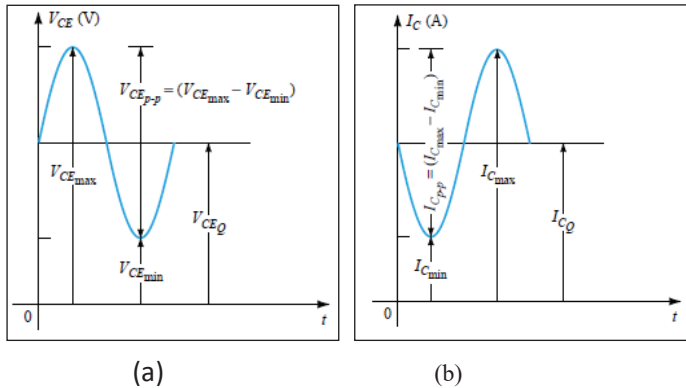
dengan  $a = \frac{N_1}{N_2}$  adalah perbandingan jumlah lilitan primer terhadap jumlah lilitan sekundernya. Dengan mengasumsikan bahwa transformer yang digunakan pada penguat daya kelas A ini adalah ideal dengan efisiensi transformer sebesar 90%, persamaan (10.9) dapat diuraikan kembali jika kita akan menghitung daya keluaran maksimum yang didistribusikan ke beban dari transformer sisi sekundernya. Adapun persamaannya dinyatakan sebesar

$$P_{out(max)} = \frac{V_{ce(pp)} i_{c(pp)}}{8} = \frac{(V_{CE(max)} - V_{CE(min)})(I_{C(max)} - I_{C(min)})}{8}. \quad (10.14)$$

Jika daya keluaran yang terdistribusi pada beban dinyatakan dalam *rms*, daya keluarannya dinyatakan sebesar

$$P_{out(rms)} = \frac{V_L^2}{R_L} = I_L^2 R_L. \quad (10.15)$$

Secara ilustrasi, daya yang diberikan ke beban dari transformer dari persamaan (10.14) dapat digambarkan sebagai berikut (Gambar 10.9).



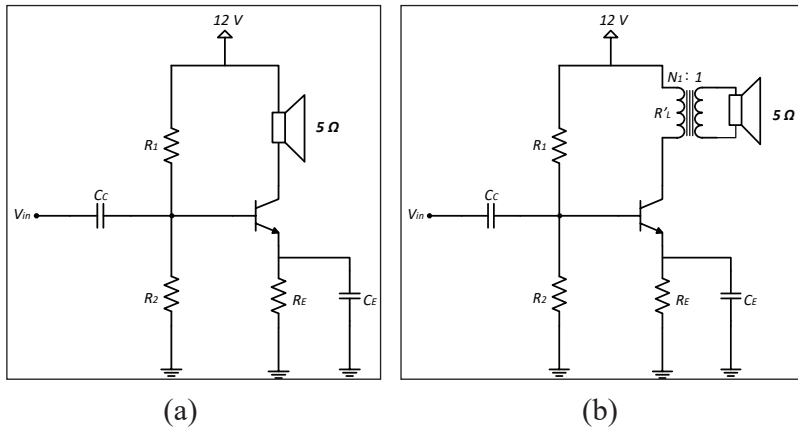
Keterangan: (a) sudut fase  $0^\circ$ , (b) sudut fase  $180^\circ$

**Gambar 10.9** Bentuk Gelombang *Output* Penguat Daya Kelas A Terkopling Transformer

### Contoh 10.1

Sebuah transistor daya yang dioperasikan pada kelas A diberikan tegangan *supply* sebesar 12 Volt dari sumber DC. Jika arus kolektor maksimum sebesar 100 mA, tentukan daya yang diberikan ke sebuah speaker yang memiliki resistansi  $5\ \Omega$  seperti yang ditunjukkan Gambar 10.10 apabila

- keluaran penguat langsung terkopling dengan *speaker*,
- keluaran penguat terkopling dengan transformer.



Keterangan: (a) Model Langsung, (b) Terkopling Transformer

**Gambar 10.10** Rangkaian Penguat Daya Kelas A dengan Beban Speaker

### Penyelesaian

Diketahui:

perubahan arus maksimum kolektor,  $\Delta I_C = 100 \text{ mA}$ ,

tegangan supply (tegangan maksimum kolektor-emiter),  $\Delta V_{CE} = 12 \text{ V}$

resistansi loudspeaker,  $R_L = 5 \Omega$ .

a) *Loudspeaker* terhubung langsung (Gambar 10.10a):

tegangan maksimum pada *loudspeaker* =  $100 \text{ mA} \times 5 \Omega = 0,5 \text{ volt}$ ;

daya yang dibangkitkan *loudspeaker* =  $0,5 \text{ V} \times 100 \text{ mA} = 50 \text{ mW}$ .

b) *Loudspeaker* terkopling transformer (gambar 10.10b):

keluaran impedansi transistor,  $R'_L = \frac{12 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 120 \Omega$ ;

jumlah perbandingan lilitan a transformer:

$$R'_L = a^2 R_L$$

$$120 \Omega = a^2 5 \Omega,$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{120}{5}} = 4,9;$$

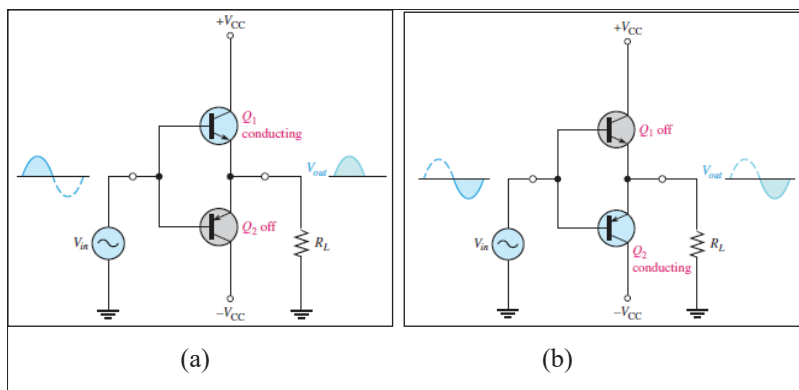
tegangan sekunder transformer (tegangan beban), ; arus beban (arus keluaran transformer),  $I_L = \frac{2,47 \text{ V}}{5 \Omega} = 0,49 \text{ A};$

daya yang dibangkitkan *loudspeaker*,  $P_{out(rms)} = (0,49)^2 \times 5 \Omega = 1200 \text{ mW}.$

Kesimpulan: daya yang dibangkitkan oleh penguat daya kelas A terkopling transformer memiliki daya lebih besar dibandingkan dengan daya yang dihasilkan penguat dengan hubung langsung (*direct connected*).

#### D. Penguat Daya Kelas B

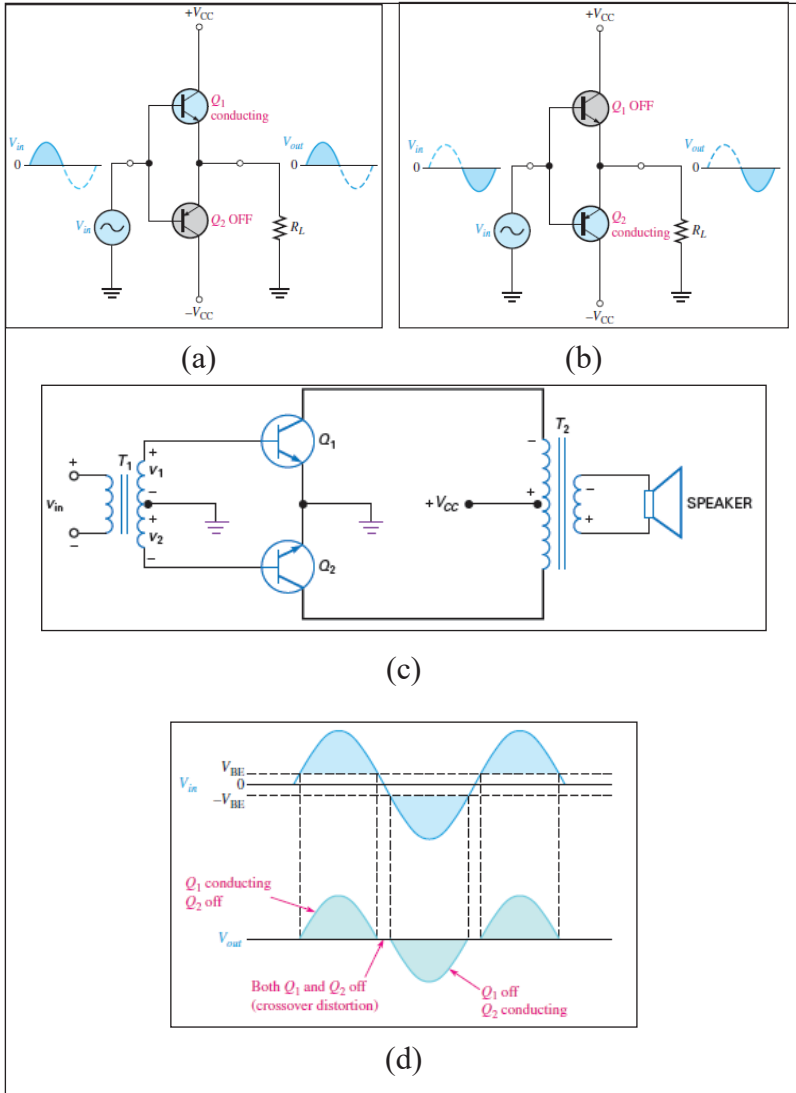
Penguat daya kelas B merupakan sebuah penguat daya yang bekerja pada daerah linier sebesar siklus  $180^\circ$  dari siklus masukannya dan sebesar  $180^\circ$  pada daerah *cut-off*-nya. Kelebihan utamanya dibanding penguat daya kelas A adalah penguat kelas B memiliki efisiensi lebih besar artinya seluruh daya yang didistribusikan pada beban semuanya dapat diserap dan sedikit terbuang dalam bentuk rugi-rugi panasnya. Kemudian salah satu kelemahannya adalah jenis penguat ini tidak mudah untuk diimplementasikan dan mendapatkan daerah kelinieritasan untuk memperoleh penguatan yang baik. Konfigurasi penguat daya kelas B yang umumnya dikenal dan sering diimplementasikan adalah *push full* seperti yang ditunjukkan Gambar 10.11.



Keterangan: (a) Siklus Positif, (b) Siklus Negatif

**Gambar 10.11** Operasi Kerja Penguat Kelas B *Push Full*

Seperti ditampilkan pada Gambar 10.12 bahwa penguat daya kelas B *push full* memiliki ciri menggunakan dua buah transistor pengikut emiter (*emitter follower*) yang satu sama lain secara bergantian melakukan operasi penguatan sinyal, dengan  $Q_1$  berkonduksi selama siklus positif kemudian  $Q_2$  berkonduksi selama siklus negatif. Karena itu, penguat jenis ini juga disebut *penguat komplementer*.



Keterangan: (a) dan (b) komplementer; (c) transformator; (d) cacat silang

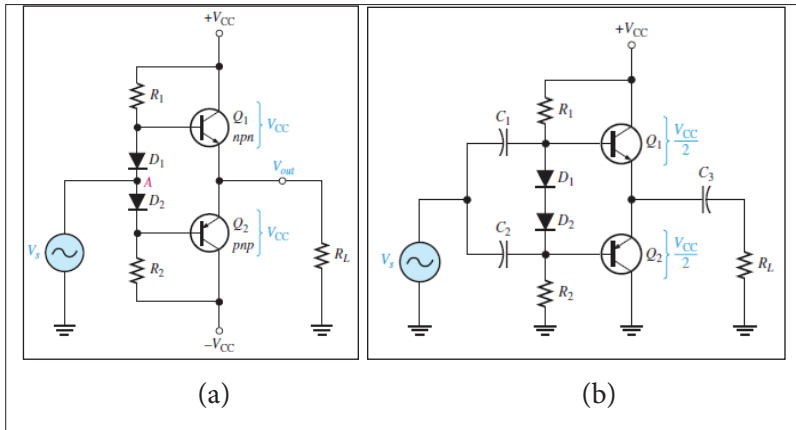
Sumber: Malvino & Bates (2016)

**Gambar 10.12** Operasi Kerja Penguat Kelas B

Cacat silang (*crossover distortion*) timbul ketika terjadi peralihan operasi konduktivitas dari transistor  $Q_1$  ke transistor  $Q_2$  dan begitu pun sebaliknya. Daerah cacat terjadi saat interval peralihan waktu siklus positif ke siklus negatif dan sebaliknya seperti yang diilustrasikan Gambar 10.12b. Sementara itu, Gambar 10.12.a menggambarkan alur pembiasan penguat yang digunakan untuk mengurangi cacat silang tersebut dengan cara menempatkan transistor di atas daerah *cut-off* saat tidak ada sinyal masukan. Untuk mendapatkan kondisi ini tetap terjadi, disusun rangkaian pembagi tegangan dan dioda pada sisi basis transistor. Cacat silang pada penguat kelas B ini dapat diperbaiki dengan mengombinasikan penguat kelas A dengan kelas B sehingga jenis penguat ini dikenal sebagai *penguat kelas AB*. Secara sederhana operasi kerja penguat kelas B *push full* terdiri dari penguat komplementer simetris dan penguat terkopling transformator seperti yang ditunjukkan Gambar 10.11 sebelumnya.

### E. Penguat Daya Kelas AB

Kebutuhan penguat kelas AB atau disebut juga penguat kelas B *push full* dalam sebuah rancangan penguat daya adalah sebagai solusi untuk mereduksi atau menekan terjadinya cacat silang pada penguat kelas B, yaitu dengan cara menambahkan komponen dioda pada sisi masukan basis untuk menghasilkan arus maju (*forward bias*). Dengan adanya arus maju ini, dimungkinkan cacat silang dapat direduksi secara baik. Secara skema dasar rangkaian penguat daya kelas AB ini ditunjukkan pada Gambar 10.13.



Keterangan: (a) Supply Ganda, (b) Supply Tunggal

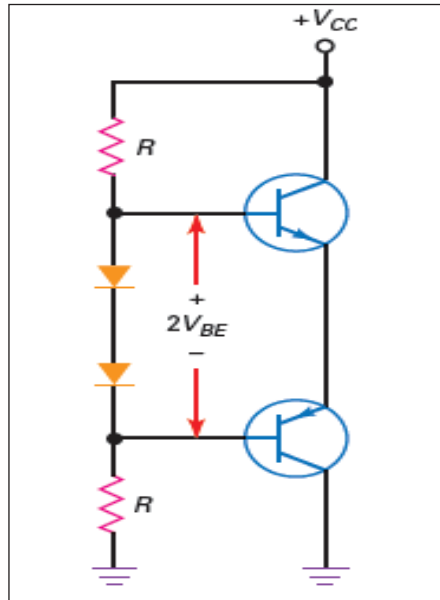
Sumber: Floyd dan Buchla (2014)

**Gambar 10.13** Rangkaian Penguat Daya Kelas AB

Rangkaian penguat daya seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10.13 analisis pembiasannya dapat dilakukan melalui dua model pendekatan, yaitu model pembiasan DC dan AC.

### 1. Pembiasan Model DC

Analisis pembiasan pada penguat daya kelas AB ini pada prinsipnya hampir sama dengan analisis pembiasan pada pembahasan transistor bipolar atau FET, yaitu seluruh rangkaian yang hanya dilalui oleh tegangan searah  $V_{cc}$ . Pendekatan yang cukup mudah untuk menganalisis pembiasan model ini biasanya menggunakan metode pembiasan pembagi tegangan (*voltage divider bias*) yang secara rangkaian ditunjukkan pada Gambar 10.14.



**Gambar 10.14** Pembiasan Dioda pada Penguat Daya Kelas AB

Dari rangkaian pada Gambar 10.14, nilai arus pembiasan dapat ditentukan sebesar

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{2R}. \quad (10.16)$$

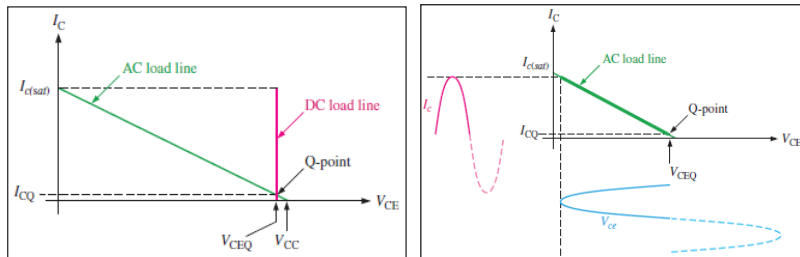
Persamaan 10.16 ini hanya dapat digunakan apabila tegangan masukan dari sumber tegangan searah ( $V_{CC}$ ) hanya satu masukan tegangan seperti pada gambar 10.13b. Sementara itu, untuk rangkaian dengan dua tegangan masukan (tegangan positif dan tegangan negatif) seperti gambar 10.13a, arus pembiasannya dapat ditentukan sebesar

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}; \quad (10.17)$$

dengan nilai R ini diperoleh ketika kondisi  $R_1 = R_2 = R$ . Jika sebaliknya, antara  $R_1$  dan  $R_2$  berbeda nilai, analisis pembiasan pada penguat daya kelas AB ini sulit untuk dilakukan secara akurat.

## 2. Pembiasan Model AC

Analisis model AC dapat dilakukan dengan mengambil referensi dari sebuah garis beban kerja penguat tersebut untuk tujuan mempermudah dalam menentukan operasi kerja transistor.

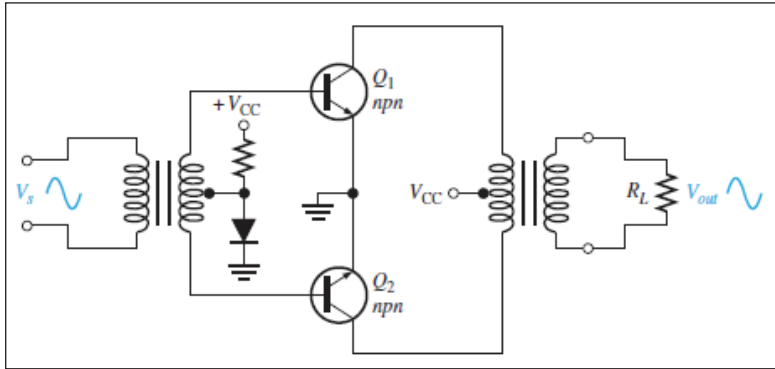


**Gambar 10.15** Garis Beban Kerja Penguat Daya Kelas AB

Besarnya arus saturasi (jenuh) dari analisis garis beban ditentukan karena berkaitan dengan besar kecilnya nilai penguatan penguat kelas AB ini yang bersumber adanya hubung singkat konduksi (ON) sebagai kedudukan keluaran penguat.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (10.18)$$

Penggunaan persamaan (10.17) dan (10.18) juga berlaku bagi jenis penguat kelas AB dengan terkopling transformator seperti yang diperlihatkan rangkaian dasarnya sebagai berikut:



**Gambar 10.16** Rangkaian Penguat Daya Kelas AB Terkopling Transformator

Daya yang dihasilkan pada beban merepresentasikan sebagai daya keluaran maksimum rata-ratanya yang nilainya dinyatakan sebesar

$$P_{out} = 0,25 I_{C(sat)} V_{CC}; \quad (10.19)$$

sedangkan daya yang didistribusikan dari sumber daya searah (DC), besarnya dapat ditentukan dari persamaan

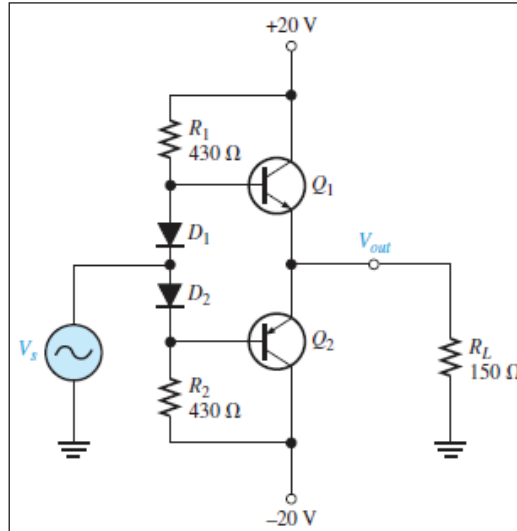
$$P_{DC} = \frac{I_{C(sat)} V_{CC}}{\pi}. \quad (10.20)$$

Dengan demikian, efisiensi daya dari penguat kelas AB ini dapat diperkirakan besarnya berdasarkan perbandingan antara daya keluaran maksimum rata-ratanya terhadap daya DC-nya yang dinyatakan oleh persamaan

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}}. \quad (10.21)$$

### Contoh 10.2

Tentukan nilai arus puncak maksimum pada rangkaian penguat daya yang ditunjukkan seperti Gambar 10.17.



**Gambar 10.17** Rangkaian Penguat Daya Kelas B  
(Contoh 10.2)

### Penyelesaian

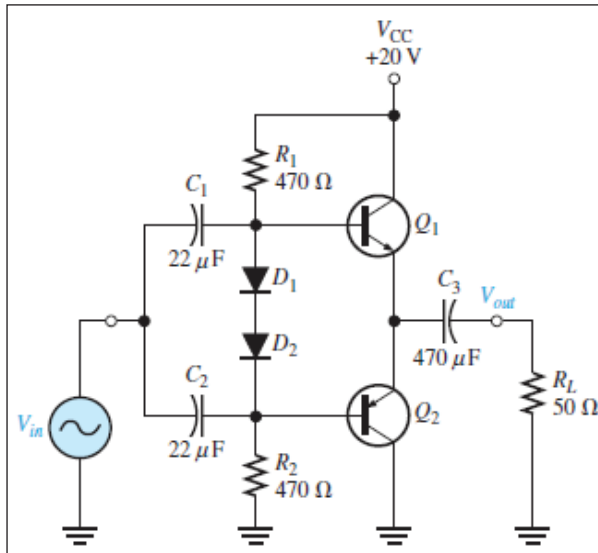
Arus maksimum diperoleh dari suatu keadaan saturasi sebagai representasi nilai penguatannya, dengan besarnya ditentukan sebesar

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{150 \Omega} = 133 \text{ mA.}$$

Hasilnya menunjukkan bahwa besar arus puncak maksimumnya relatif tidak besar.

### Contoh 10. 3

Tentukan nilai arus puncak maksimum pada rangkaian penguat daya yang ditunjukkan seperti Gambar 10.18.



**Gambar 10.18** Rangkaian Penguat Daya Kelas B (Contoh 10.3)

### Penyelesaian

Pertama, tentukan tegangan puncak maksimum dari persamaan berikut:

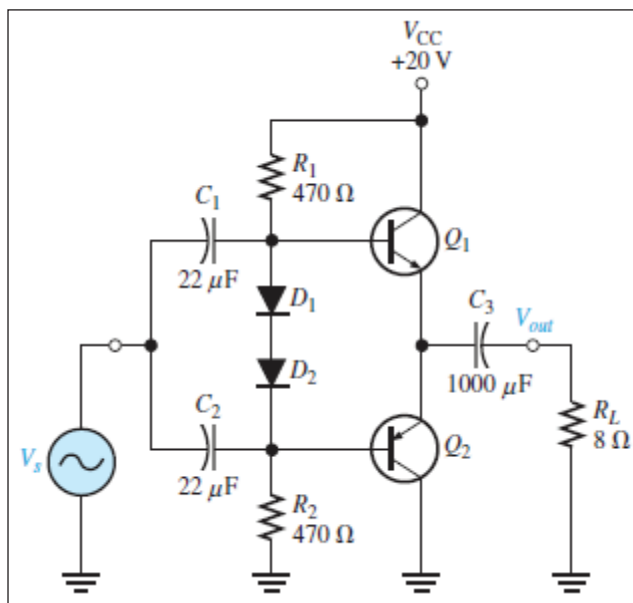
$$V_{o(max)} \cong V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} = \frac{20 \text{ V}}{2} = 10 \text{ V}.$$

Kemudian arus puncak maksimumnya dapat diperoleh sebesar

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CEQ}}{R_L} = \frac{10 \text{ V}}{50 \Omega} = 200 \text{ mA}.$$

### Contoh 10.4

Tentukan daya keluaran maksimum pada rangkaian penguat daya yang ditunjukkan pada Gambar 10.19.



**Gambar 10.19** Rangkaian Penguat Daya Kelas B (Contoh 10.4)

### Penyelesaian

Pertama, kita tentukan dahulu tegangan keluaran maksimumnya sebesar

$$V_{o(max)} \cong V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} = \frac{20 \text{ V}}{2} = 10 \text{ V}.$$

Kemudian, diteruskan dengan menentukan nilai arus maksimumnya sebesar

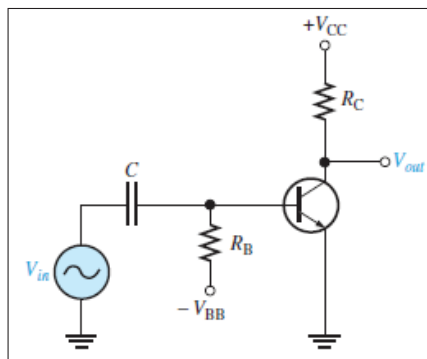
$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CEQ}}{R_L} = \frac{10 \text{ V}}{8 \Omega} = 1,25 \text{ A}.$$

Selanjutnya, daya keluarannya diperoleh sebesar

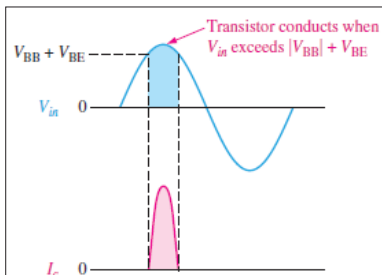
$$P_{out} = 0,25(1,25 \text{ A})(20 \text{ V}) = 6,25 \text{ W}.$$

## F. Penguat Daya Kelas C

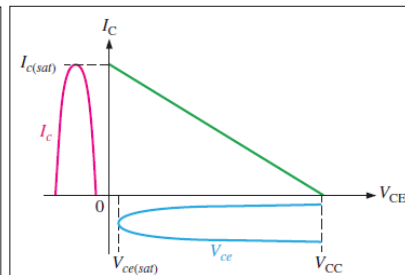
Pada prinsipnya penguat daya kelas C memiliki siklus keluaran kurang dari  $180^\circ$ , tetapi memiliki efisiensi daya lebih besar dibanding penguat daya kelas A, B, atau AB meskipun secara kelinieritasannya tidak terlalu baik sehingga penguat kelas C ini cocok bekerja pada daerah tidak linier. Contoh aplikasinya bisa ditemukan pada penguat radio frekuensi (RF) yang memiliki rangkaian resonansi atau *tank circuit* pada sisi keluaran yang terhubung ke beban. Dasar operasi kerja dan rangkaian penguat kelas C diilustrasikan pada Gambar 10.20.



(a)



(b)



(c)

Keterangan: (a) Rangkaian, (b) Siklus Operasi Kerjanya, (c) Garis Beban Kerja Penguat

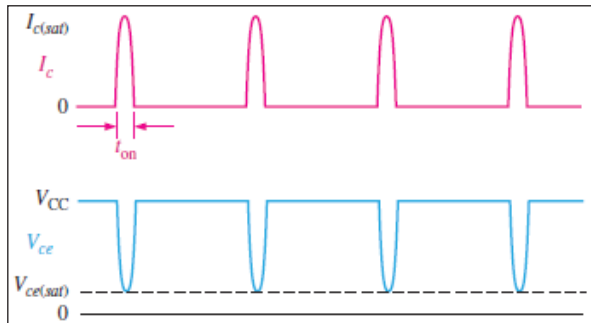
**Gambar 10.20** Operasi Kerja Penguat Daya Kelas C

## 1. Disipasi Daya Penguat Kelas C

Daya disipasi merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis penguat daya kelas C ini karena cukup menentukan dalam menghasilkan nilai efisiensi daya penguat. Operasi garis beban kerja penguat seperti pada Gambar 10.17c menunjukkan bahwa daya disipasi dapat diperoleh ketika pergeseran ke kondisi arus kolektor maksimum  $I_{C(sat)}$  dan tegangan kolektor minimum  $V_{ce(sat)}$  tercapai sehingga secara persamaan dapat ditentukan dayanya sebesar

$$P_{D(rata-rata)} = \left[ \frac{t_{on}}{T} \right] I_{C(sat)} V_{ce(sat)}. \quad (10.22)$$

Adapun bentuk gelombang ideal penguat kelas C ini ditunjukkan seperti Gambar 10.21.



**Gambar 10.21** Bentuk Gelombang *Output* Ideal Penguat Daya Kelas C

## 2. Daya Maksimum Penguat Kelas C

Sama seperti peranan penting daya disipasi yang telah disinggung sebelumnya, sekarang keluaran daya maksimum yang diperoleh penguat jenis ini juga memiliki peranan dalam menentukan besar kecilnya efisiensi dayanya. Secara persamaan besarnya keluaran daya maksimum ditentukan sebesar

$$P_{out} = \frac{V_{CC}^2}{2R_C} \quad (10.23)$$

sehingga daya total keseluruhan yang seharusnya diberikan pada penguat daya kelas C ini untuk mendapat nilai penguatan dan efisiensi daya dapat dinyatakan sebesar

$$P_{total} = P_{out} + P_{D(rata-rata)}. \quad (10.24)$$

Oleh karena itu, efisiensi penguat dayanya dapat ditentukan sebesar

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{D(rata-rata)}}. \quad (10.25)$$

Efisiensi akan mencapai nilai mendekati nilai 1 atau 100 % jika daya keluaran maksimumnya lebih besar dari daya disipasi rata-ratanya ( $P_{out} > P_{D(rata-rata)}$ ).

### Contoh 10.5

Sebuah penguat daya kelas C memiliki frekuensi kerja 200 kHz saat transistor dalam keadaan *on* selama 1  $\mu$ S, jika  $I_{C(sat)} = 100$  mA dan  $V_{ce(sat)} = 0,2$  V. Tentukan daya disipasi rata-ratanya.

### Penyelesaian

Pertama, kita mencari periodanya,

$$T = \frac{1}{200 \text{ kHz}} = 5 \mu\text{s}.$$

Kemudian daya rata-ratanya dapat diperoleh sebesar

$$P_{D(rata-rata)} = \left[ \frac{t_{on}}{T} \right] I_{C(sat)} V_{ce(sat)} = (0,2)(100 \text{ mA})(0,2 \text{ V}) = 0,2 \text{ mW}.$$

### Contoh 10.6

Seperti pada soal Contoh 10.5, jika tegangan *supply*  $V_{cc}$  yang diberikan ke penguat sebesar 24 V dan resistansi kolektor yang terpasang sebesar 100  $\Omega$ , tentukan efisiensi dayanya.

### Penyelesaian

Daya keluaran maksimum dapat diperoleh sebesar

$$P_{out} = \frac{(24 \text{ V})^2}{2(100 \Omega)} = 2,88 \text{ W}.$$

Dengan demikian, efisiensi daya penguat kelas C ini diprediksikan sebesar

$$\eta = \frac{2,88 \text{ W}}{2,88 \text{ W} + 4 \text{ mW}} = 0,999.$$

## G. Penguat Daya Kelas C Tertala (*Tuned Circuit*)

Seperti penerapan pada penguat daya kelas B *push pull* untuk meningkatkan efisiensi dan penguatan dibanding penguat kelas B biasa, pada penguat daya kelas C diterapkan teknik penguat tertala (*tuned*) atau disebut rangkaian *tank circuit* yang biasanya terdiri dari komponen induktansi  $L$  dan kapasitansi  $C$  yang tersusun secara paralel sehingga penguat kelas C ini dinamai juga sebagai penguat RF yang nilai penguatan maksimumnya diperoleh ketika berada pada daerah frekuensi resonansi atau frekuensi kerjanya, yaitu sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (10.26)$$

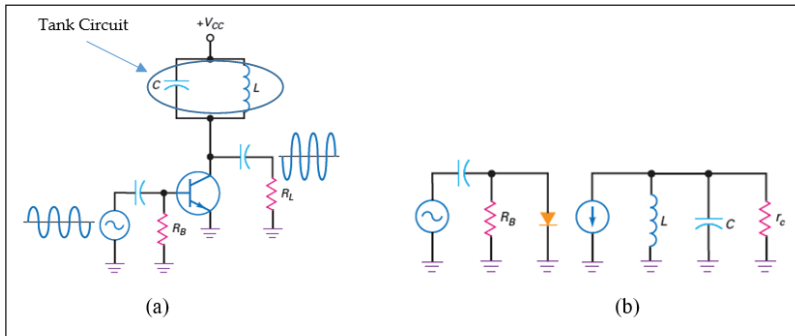
dengan

$f_r$ : frekuensi resonansi *tank circuit* (hertz)

$L$ : Induktansi (henry)

$C$ : Kapasitansi (farad)

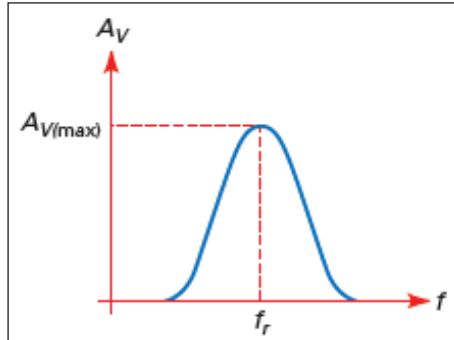
Di luar frekuensi kerjanya, penguatan yang dihasilkan akan mengalami penurunan, bahkan makin mengecil sehingga penguat daya kelas C ini merupakan jenis penguat yang bekerja pada daerah kerja frekuensi sempit (*narrow band*). Skema rangkaian dasar penguat daya kelas C ini ditunjukkan seperti Gambar 10.22.



Keterangan: (a) Rangkaian Dasar, (b) Rangkaian Ekuivalen AC

**Gambar 10.22** Model Penguat Daya Kelas C Tertala

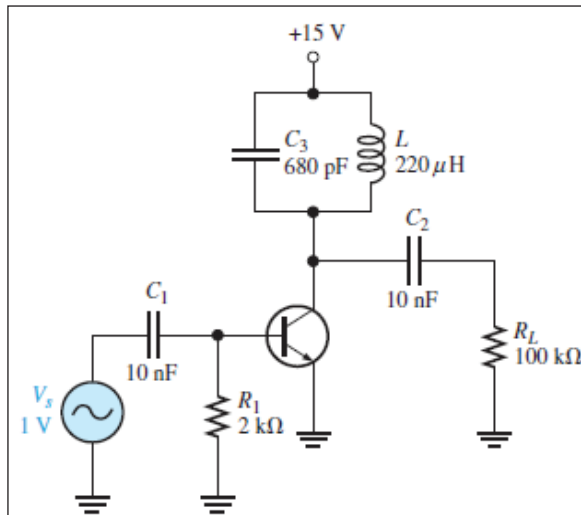
Adapun bentuk tanggapan penguatan maksimum terhadap frekuensi kerjanya dapat digambarkan sebagai berikut (Gambar 10.23).



**Gambar 10.23** Kurva Tanggapan Penguatan terhadap Frekuensi Input

### Contoh 10.7

Tentukan frekuensi kerja dan tegangan yang dihasilkan penguat daya kelas C pada Gambar 10.24.



**Gambar 10.24** Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas C

## Penyelesaian

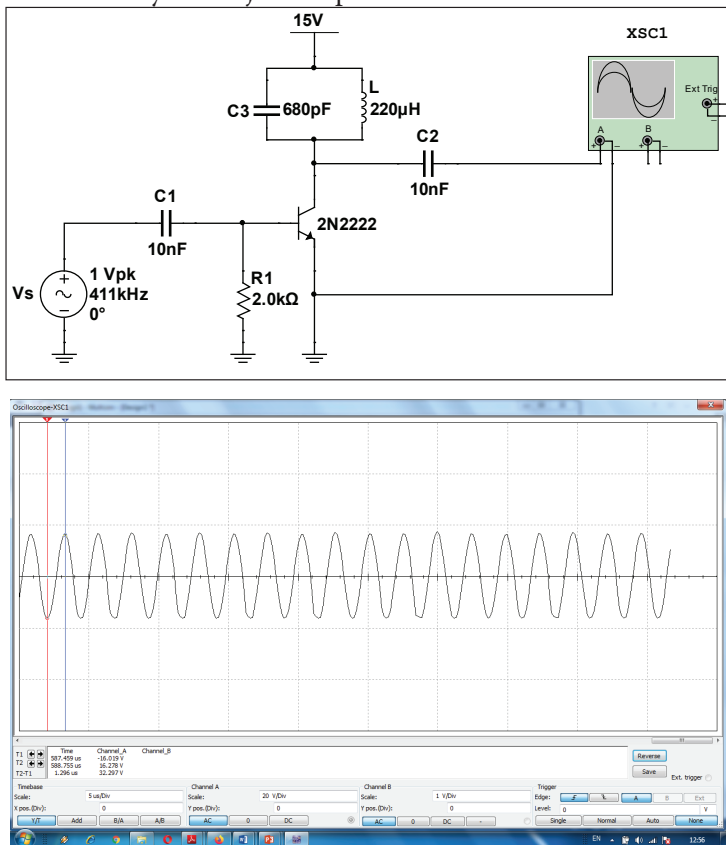
Frekuensi kerja penguat diperoleh sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(220\ \mu\text{H})(680\ \text{pF})}} = 411\ \text{kHz}.$$

Tegangan keluaran puncak ke puncak diperoleh sebesar

$$V_{PP} = 2V_{CC} = 2(15\ \text{V}) = 30\ \text{V}.$$

Hasil simulasinya ditunjukkan pada Gambar 10.25.



**Gambar 10.25** Hasil Simulasi Multisim Rangkaian (Contoh 10.7)

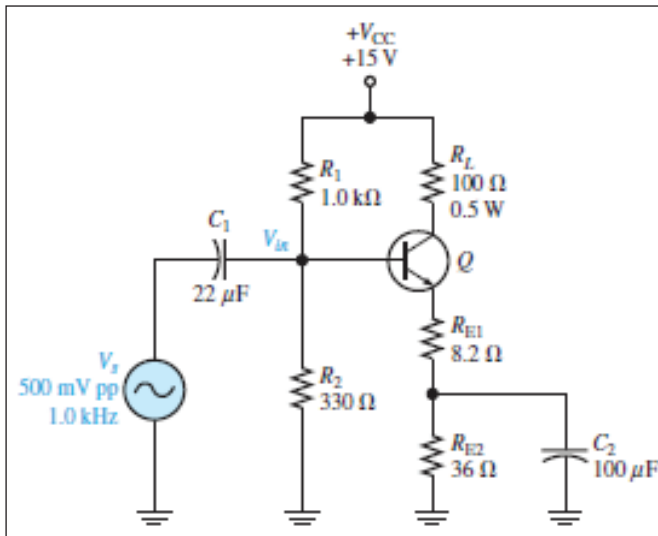
Perbandingan hasil keduanya menunjukkan bahwa selisih hasil tidak terlalu jauh, tetapi perbedaan ini lebih banyak dipengaruhi oleh besaran nilai yang tentunya bisa dimodifikasi atau dirancang ulang secara akurat.

## RANGKUMAN

- 1) Penguat daya merupakan sebuah rangkaian penguat yang digunakan untuk memperkuat atau menaikkan level daya dari sinyal masukannya. Penggunaan komponen transistor sebagai komponen utama rangkaian ini dapat mengendalikan arus dan tegangan yang besar sehingga pada sisi keluarannya mampu memperoleh daya yang cukup besar.
- 2) Rangkaian penguat daya ini memiliki daerah operasi kerja yang dibedakan berdasarkan kategori kelas penguat, yaitu kelas A, kelas B, kelas AB, dan kelas C.
- 3) Garis beban pada penguat daya menunjukkan daerah kerja penguat ini yang dibagi menjadi tiga daerah kerja, yaitu daerah aktif, daerah saturasi, dan daerah *cut-off*.
- 4) Berdasarkan daerah kerja frekuensinya, penguat daya ini dapat bekerja pada rentang frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Karena itu, penguat daya yang bekerja pada daerah rendah ini sering dinamakan penguat daya audio, sedangkan pada frekuensi tinggi sering disebut sebagai penguat daya RF (radio frekuensi).
- 5) Kelinearitas sebuah penguat daya menunjukkan kemampuan sebuah penguat dalam menghasilkan perubahan daya keluarannya mengikuti perubahan sinyal masukannya.
- 6) Efisiensi sebuah penguat daya menunjukkan seberapa besar daya yang mampu dihasilkan yang nantinya mampu diberikan oleh penguat tersebut ke bebannya. Makin tinggi nilai efisiensinya maka daya yang dihasilkan akan makin besar tanpa adanya sebuah peredaman yang besar.

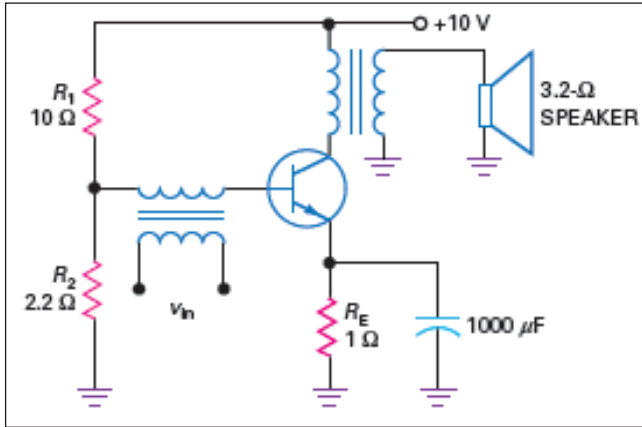
## LATIHAN SOAL

- 1) Sebuah penguat daya kelas A memiliki tegangan keluaran puncak ke puncaknya sebesar 15 V yang diukur pada resistansi beban 1 k $\Omega$ . Tentukan penguatan daya penguat jika daya masukannya sebesar 400  $\mu$ W.
- 2) Rangkaian penguat daya A seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10.26 yang diasumsikan memiliki  $\beta_{dc} = 100$ . Tentukan penguatan tegangan dan dayanya.



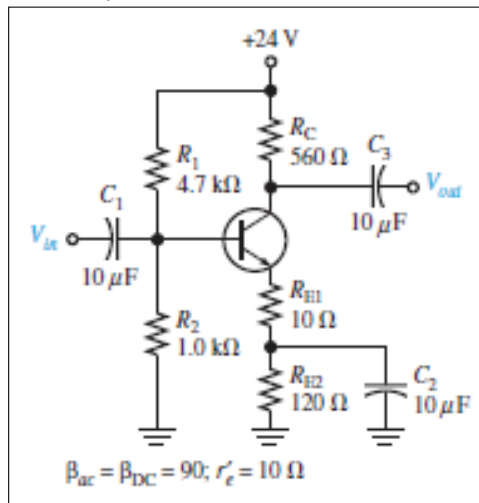
**Gambar 10.26** Skema Rangkaian Penguat Daya Kelas A

- 3) Sebuah penguat daya kelas A dengan beban *speaker* sebesar 2.3  $\Omega$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.27. Diasumsikan tegangan melalui beban *speaker* diketahui sebesar 5 V<sub>pp</sub>, tentukan daya keluaran dan efisiensi penguat tersebut.



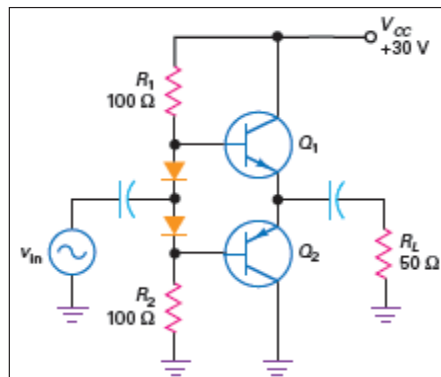
**Gambar 10.27** Rangkaian Dasar Penguat Daya dengan Beban Speaker

- 4) Tentukan daya *output* beban dan efisiensi daya dari rangkaian penguat kelas A seperti yang ditunjukkan Gambar 10.28 dengan resistansi bebannya sebesar  $500\ \Omega$ .



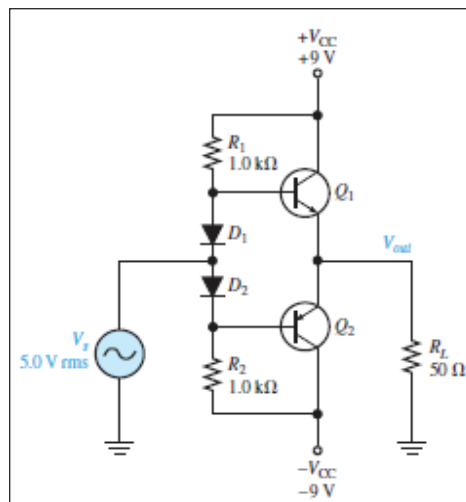
**Gambar 10.28** Skema Rangkaian Penguat Sederhana Kelas A

- 5) Tentukan nilai efisiensi penguat kelas B seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.29.



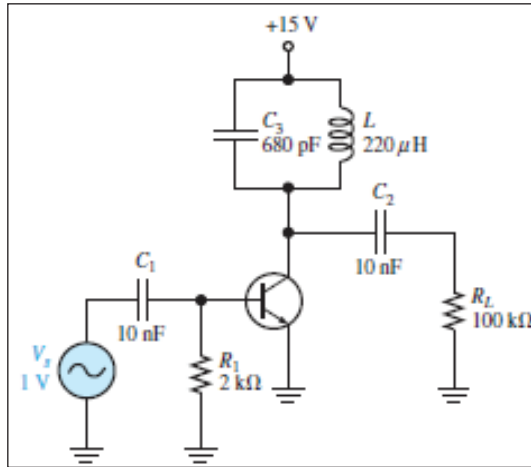
**Gambar 10.29** Skema Rangkaian Sederhana Penguat Daya Kelas B

- 6) Jika tegangan input  $50\text{ V}_{rms}$  diberikan ke rangkaian penguat kelas B seperti yang ditunjukkan Gambar 10.30, tentukan daya yang diberikan ke bebannya.



**Gambar 10.30** Skema Rangkaian Penguat Daya Kelas B

- 7) Tentukan frekuensi kerja dan tegangan keluaran puncak ke puncak serta daya keluaran maksimum dari penguat daya kelas C seperti yang diperlihatkan Gambar 10.31.



**Gambar 10.31** Rangkaian Dasar Penguat Daya Kelas C Tak Tertala

## DAFTAR PUSTAKA

- Flyod, T. L., & Buchla, D. L. (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering principles and applications* (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A. & Bates, D. (2016). *Electronic principles* (8th ed.). McGrawHill-Education.
- Sedra & Smith. (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB XI

## MENDESAIN RANGKAIAN OSILATOR SEBAGAI PEMBANGKIT SINYAL DAN FREKUENSI

### **Materi pembelajaran:**

Pembahasan materi pada bab ini lebih menjelaskan tentang berbagai bentuk model rangkaian osilator yang digunakan untuk proses pembangkitan berbagai bentuk gelombang atau sinyal dan variasi frekuensi tertentu. Pembahasan osilator juga berkaitan dengan cara proses awal terjadinya pembangkitan sinyal dan frekuensi yang disertai dengan munculnya gejala osilasi. Dalam bab ini juga akan dibahas tentang tipe-tipe osilator beserta model rangkaian serta cara perhitungannya menggunakan persamaan-persamaan terkait secara mudah dan praktis disertai simulasi.

### **Tujuan pembelajaran:**

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan mampu

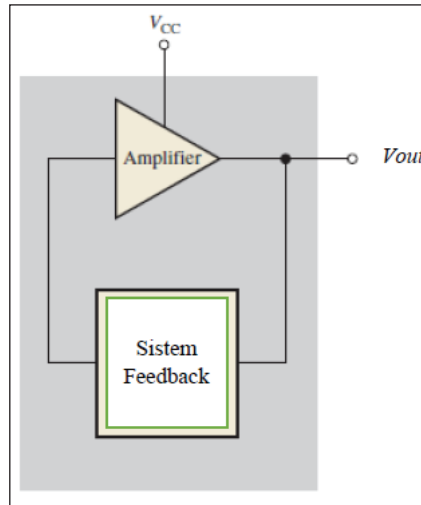
- 1) memahami operasi kerja sebuah rangkaian osilator sebagai sebuah sistem pembangkit sinyal dan penghasil frekuensi;
- 2) mengetahui proses terjadinya pembangkitan sinyal yang berasal dari suatu gejala osilasi pada rangkaian pembangkit sinyal;

- 3) memahami masing-masing kinerja dari tipe-tipe osilator yang dibahas pada bab ini beserta aplikasinya; dan
- 4) merancang dan memodelkan rangkaian osilator menggunakan metode-metode perhitungan yang lebih sederhana dan praktis.

## A. Pendahuluan

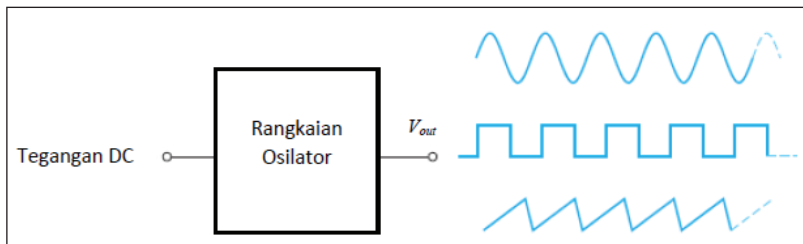
Hampir seluruh perangkat elektronika dapat bekerja dengan baik jika perangkat tersebut memiliki sumber energi untuk menggerakkannya seperti *supply power*, sumber sinyal, dan lain-lain. Karenanya setiap perangkat elektronika selama ini jelas membutuhkan sumber-sumber energi tersebut sebagai pemicu bekerjanya perangkat tersebut. Salah satunya adalah rangkaian osilator yang merupakan sebuah sistem penghasil jenis-jenis gelombang dengan berbagai bentuk karakteristik. Selain menghasilkan berbagai ragam gelombang yang dihasilkan, osilator juga dapat menghasilkan berbagai macam nilai frekuensi mulai dari yang terkecil sampai yang terbesar. Terkait dengan osilator ini, hal yang dibutuhkan untuk menjaga agar keluarannya tetap terjaga adalah nilai kestabilan. Nilai kestabilan ini membutuhkan sebuah sistem yang mampu menjaganya, yaitu sistem umpan balik (*feedback system*) seperti yang ditunjukkan Gambar 11.1. Osilator sendiri prinsipnya merupakan sebuah perangkat pembangkit gelombang dengan variasi frekuensi tertentu berdasarkan pemanfaatan gejala “osilasi”. Gejala ini merupakan tahap awal terjadinya proses pembangkitan bentuk gelombang sinyal (pembahasan terkait osilasi ini dapat dijelaskan pada sub bab selanjutnya).

Secara fungsi dasar, sebuah osilator diharuskan untuk mampu menghasilkan berbagai macam bentuk gelombang sekaligus mampu melakukan pengaturan variasi nilai frekuensinya dan memiliki kemampuan memberikan tingkat kestabilan terhadap keluaran frekuensi-frekuensi yang dihasilkan. Karena itu, sistem umpan balik pada rangkaian osilator merupakan komponen penting guna menjamin menjaga sekaligus mengendalikan agar osilator benar-benar memperoleh gelombang dan frekuensi sesuai keinginan seperti yang terilustrasikan dalam Gambar 11.2.



Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 11.1** Blok Dasar Sistem Umpan Balik Osilator



**Gambar 11.2** Konsep Dasar Osilator Keluaran Multi Gelombang

## B. Gejala Osilasi

Seperti yang disebutkan sebelumnya bahwa osilator dapat menghasilkan berbagai bentuk gelombang, salah satunya adalah osilator gelombang sinusoidal. Osilator sinusoidal ini cukup populer dan relatif lebih luas aplikasinya dalam teknologi elektronika khususnya karena secara sistem cukup mudah didesain dan diimplementasikan.

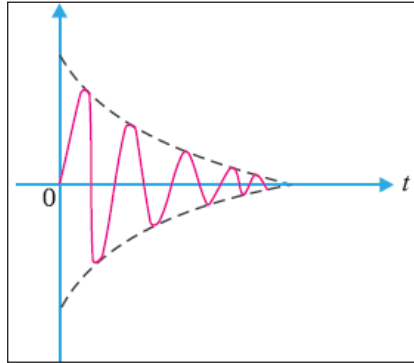
Untuk lebih memudahkan dalam pembahasan terkait gejala osilasi ini, penulis mencoba menggambarannya melalui pendekatan pada jenis osilator ini. Sebelum pembahasan lebih lanjut, ada beberapa kelebihan berkaitan dengan sifat yang dimiliki sebuah osilator, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Pada osilator tidak ada perangkat keras yang selalu bergerak atau berputar sehingga berdampak pada sedikit timbulnya keausan sistem sehingga osilator mampu bertahan lebih lama.
- 2) Frekuensi osilasinya dengan mudah dapat dikendalikan dan diubah-ubah sesuai yang diinginkan dengan cara mengubah-ubah sebagian atau semua harga komponen pada sumber rangkaian pembangkitnya atau disebut rangkaian *tank circuit*.
- 3) Osilator memiliki kemampuan menghasilkan frekuensi mulai dari yang terkecil (10 Hz) sampai dengan frekuensi tinggi (lebih dari 100 MHz).
- 4) Osilator memiliki kestabilan frekuensi keluaran yang lebih baik.
- 5) Efisiensi yang dimiliki osilator lebih tinggi.

Ada dua bentuk keadaan yang berkaitan dengan gejala osilasi pada osilator sinusoidal, yaitu osilasi yang teredam (*damped oscillations*) dan osilasi yang tak teredam (*undamped oscillations*).

### **1. Osilasi Teredam (*Damped Oscillation*)**

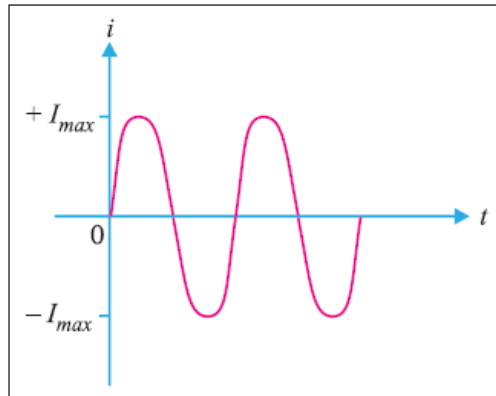
Pada kondisi teredam ini, sinyal sinusoidal yang dibangkitkan akan mengalami peredaman seiring dengan waktu. Ini artinya bahwa energi yang terdapat dalam gelombang tersebut menjadi hilang sehingga mengakibatkan amplitudo sinyal secara eksponensial akan mengalami penurunan (mengecil) cukup tajam yang berdampak juga pada frekuensi yang akan mengalami perubahan setiap saat (*free running*). Gejala-gejala ini tentunya tidak diharapkan dari sistem pembangkitan sinyal.



**Gambar 11.3** Gejala Pembangkitan Osilasi pada Sistem Osilator

## 2. Osilasi yang Tak Teredam (*Undamed Oscillation*)

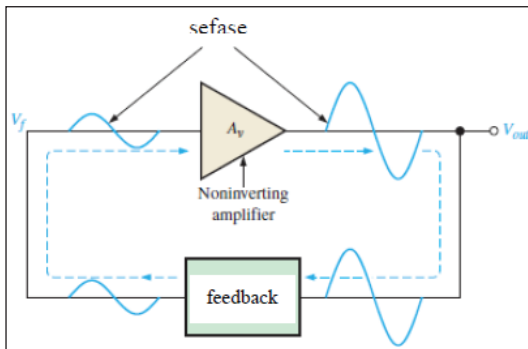
Pada keadaan osilasi tak teredam, letak perbedaannya adalah saat kondisi amplitudo sinyal sinusoidal yang dihasilkannya bernilai konstan selama selang waktu. Kondisi seperti ini merupakan keadaan yang diinginkan ketika kita akan membangun sebuah sistem pembangkitan sinyal seperti osilator ini.



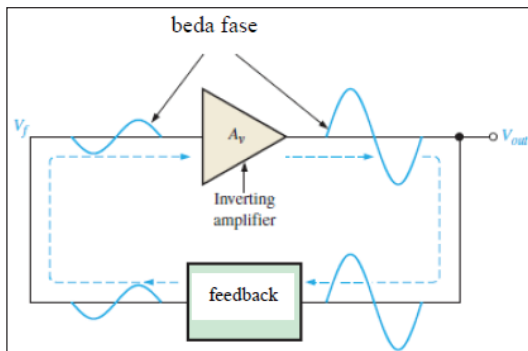
**Gambar 11.4** Gejala Osilasi yang Tak Teredam

### C. Model Umpan Balik Sistem Osilator

Sistem umpan balik dalam suatu konstruksi osilator merupakan sistem yang sangat penting dalam menentukan baik atau tidaknya hasil keluarannya. Salah satu fungsi utamanya adalah mengendalikan pembangkitan sinyal dengan frekuensi tertentu dan mampu juga mengendalikan penguatan sinyal yang diperoleh. Secara umum sistem umpan balik pada sebuah rangkaian osilator diilustrasikan seperti pada Gambar 11.3.



(a)



(b)

Keterangan: (a) Sefase dan (b) Berbalik Fase

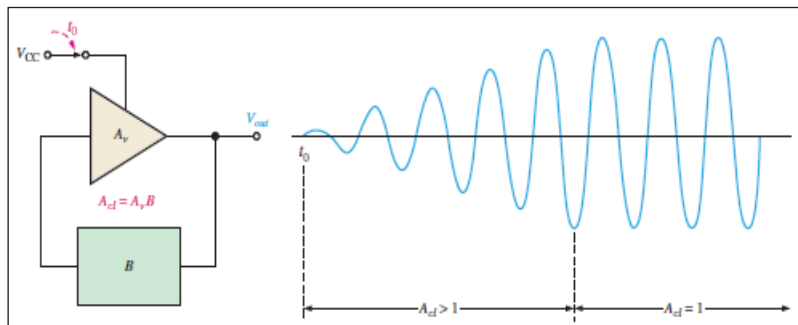
Sumber: Malvino dan Bates (2016)

**Gambar 11.5** Model Fase Umpan Balik Osilator

Sistem umpan balik pada dasarnya dibangun oleh sebuah jaringan lingkaran tertutup (*close loop network*) yang mampu membangkitkan gejala *osilasi* sebagai sumber pembangkitan sinyal yang selanjutnya dikuatkan oleh jaringan penguat ( $A_v$ ) untuk menguatkan tegangan ( $V_f$ ). Secara rumusan matematis, penguatan pada umpan balik ini dapat dinyatakan sebesar

$$A_{cl} = A_v B. \quad (11-1)$$

dengan  $A_{cl}$  menunjukkan penguatan tegangan lingkaran tertutup,  $A_v$  menunjukkan besar penguatan tegangan, dan  $B$  menyatakan peredaman sistem umpan balik. Terkait dengan kriteria penguatan sistem umpan balik yang berdampak pada kontinuitas pembangkitan sinyal oleh osilator secara proses dapat diilustrasikan seperti yang ditunjukkan Gambar 11.6.



**Gambar 11.6** Gejala Perubahan Penguatan Umpan Balik pada Proses Osilasi

Gambar 11.6 menunjukkan bahwa ada dua kondisi osilasi yang terjadi, yaitu pertama, ketika awal osilasi penguatan lingkaran tertutupnya bernilai lebih besar dari satu ( $A_{cl} > 1$ ) dan kedua, ketika osilasi dalam kondisi stabil, penguatannya akan bernilai sama dengan satu kali ( $A_{cl} = 1$ ). Untuk kondisi pertama sebelumnya, mula-mula saat  $t_0$  sinyal dalam keadaan belum mengalami osilasi, sampai kemudian

mengalami peningkatan penguatan secara bertahap menuju ke keadaan konstan ketika kedudukan penguat lingkaran tertutup berada pada daerah penguatan tetap.

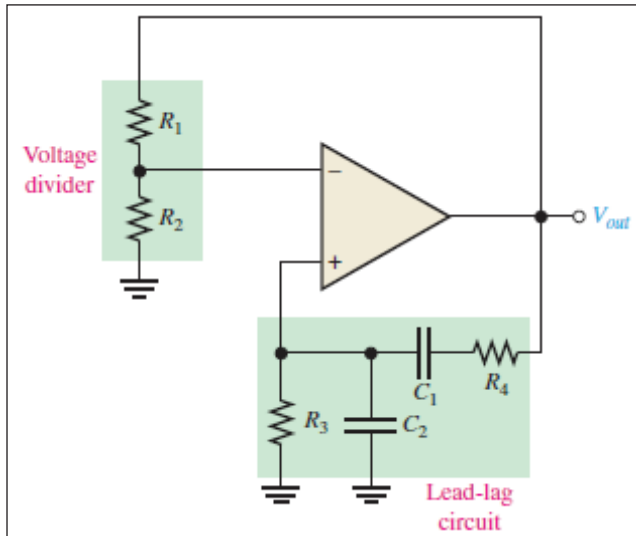
## D. Beberapa Tipe Osilator

Pada dasarnya telah banyak tipe osilator yang telah diimplementasikan dan diterapkan pada beberapa perangkat elektronika. Dalam hal ini penulis mencoba menggambarkan dan menghadirkan kembali beberapa tipe osilator melalui pendekatan praktis beserta cara merancang dan melakukan estimasi perhitungan berdasarkan pendekatan kuantitatif dan simulasi. Secara umum, tipe osilator dapat dikategorikan berdasarkan susunan komponen dasar yang digunakan sebagai sumber pembangkit osilasi, yaitu osilator RC dan osilator LC. Dalam pembahasan ini, penulis menyuguhkan beberapa contoh kasus tipe rangkaian osilator beserta solusi praktis penyelesaian masalah disertai dengan hasil simulasi sebagai pembandingan agar kebenaran hasil rancangan di awal dapat teruji secara baik dan ilmiah.

### 1. Osilator RC

Osilator RC merupakan salah satu jenis osilator yang sumber pembangkitan sinyalnya ditentukan oleh perubahan nilai-nilai resistansi dan kapasitansi yang ditempatkan pada sistem umpan baliknya. Secara sederhana ilustrasi kerjanya dapat digambarkan pada Gambar 11.7, yaitu frekuensi osilasi dapat dibangkitkan oleh adanya interaksi antara resistansi  $R$  dengan reaktansi kapasitansi dari kapasitor  $X_c$ . Frekuensi osilasi meningkat terjadi ketika  $X_c$  mengalami penurunan sehingga berdampak pada mengecilnya nilai tegangan yang dihasilkan dan begitu pula kondisi sebaliknya. Karena itu, dari hubungan dari keadaan ini dapat ditentukan besarnya frekuensi osilasinya sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} \quad (11.2)$$



Sumber: Hambley (2014)

**Gambar 11.7** Jenis Rangkaian Dasar Osilator RC

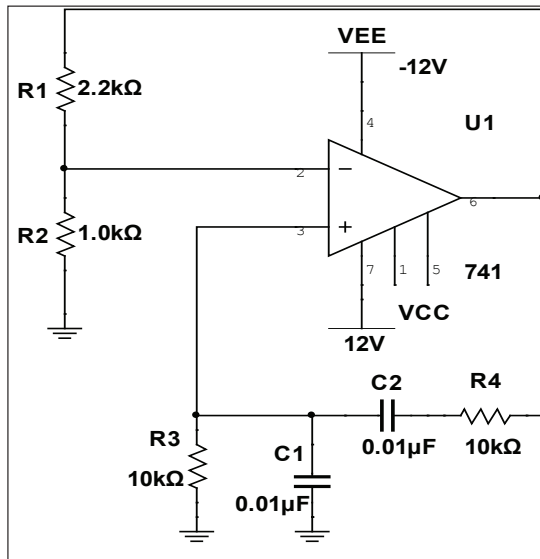
Dari rangkaian Gambar 11.7, penguatan sinyal  $A_{cl}$  diperoleh dari rangkaian pembagi tegangan dan perubahan  $R_1$  dan  $R_2$  menentukan perubahan tingkat penguatannya.

$$A_{cl} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \quad (11.3)$$

Selanjutnya, frekuensi osilasi dapat dicari dari rangkaian pada Gambar 11.7 maka persamaan (11.2) dapat digunakan dengan syarat bahwa komponen RC pada sisi umpan baliknya haruslah bernilai sama, yaitu  $R_1 = R_2$  dan  $C_1 = C_2$  sehingga akan menjadi mudah dalam menentukan frekuensi kerja osilatornya. Karena itu, bentuk operasi kerja osilator ini merupakan prinsip kerja osilator jembatan Wien. Akan tetapi, salah satu kelemahan jenis osilator ini adalah frekuensi kerja osilator umumnya bekerja di daerah frekuensi menengah ke bawah.

### Contoh 11.1

Tentukan berapa nilai frekuensi resonansi (osilasi) sebuah rangkaian osilator yang ditunjukkan oleh Gambar 11.8.



**Gambar 11.8** Skema Rangkaian Osilator RC Jembatan Wien

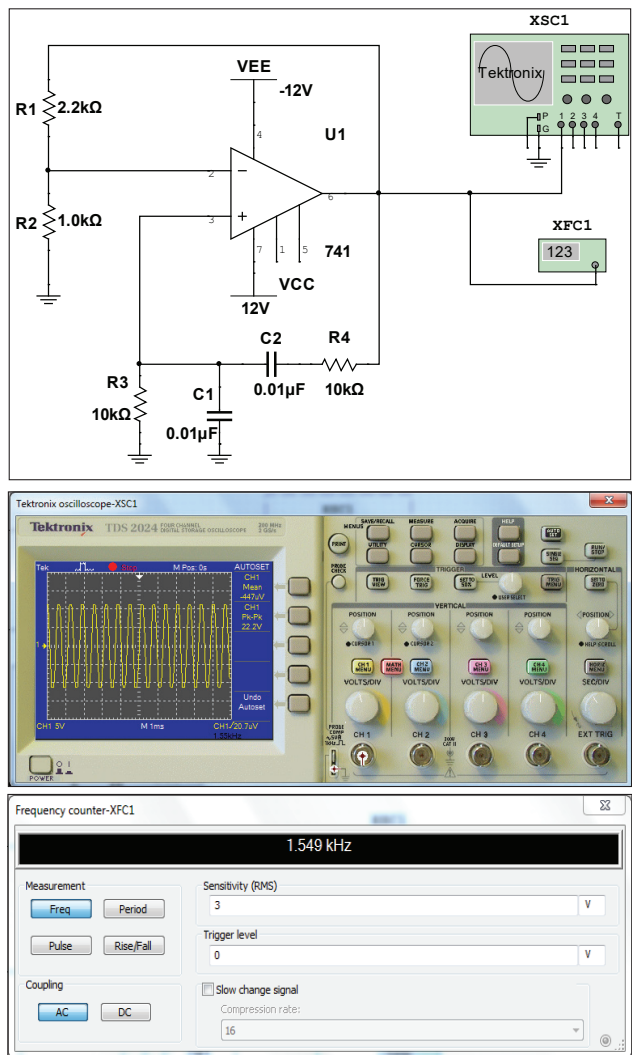
### Penyelesaian

Dengan kita menganalisis rangkaian umpan baliknya, maka dapat kita tentukan nilai  $R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$  dan  $C_1 = C_2 = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$ . Karena itu, frekuensinya dapat ditentukan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi(10 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 1,6 \text{ kHz.}$$

Untuk meningkatkan penguatan sinyal yang dihasilkannya, caranya adalah dengan mengatur nilai  $R_1$  lebih besar dari  $R_2$ , tetapi perlu diperhatikan juga bahwa penguatannya disarankan tidak terlalu besar karena dikhawatirkan akan menimbulkan distorsi (cacat) sinyal.

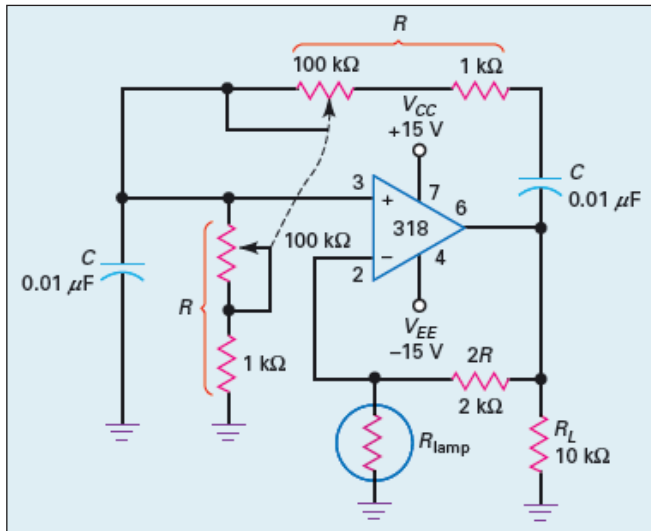
Adapun hasil simulasi pada Gambar 11.9 menunjukkan bahwa frekuensi hasil perhitungan dengan hasil simulasi menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu jauh, yaitu hasil simulasi menunjukkan frekuensi keluarannya sebesar 1,56 kHz.



**Gambar 11.9** Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal *Output* (Contoh 11.1)

### Contoh 11.2

Prediksikan berapa nilai frekuensi minimum dan maksimum yang dibangkitkan oleh rangkaian osilator seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11.10.



**Gambar 11.10** Modifikasi Rangkaian Osilator RC Jembatan Wien.

### Penyelesaian

Pertama, kita harus memastikan bahwa sistem umpan baliknya dibangun oleh komponen-komponen yang memiliki nilai yang sama agar memudahkan dalam perhitungan dan sesuai dengan model osilator yang dirancang.

Kedua, berdasarkan persamaan frekuensi osilasinya, dapat kita analisis bahwa sesuai rangkaian pada Gambar 11.9, perubahan nilai resistansi umpan baliknya mulai dari nilai terkecil, yaitu 1 kΩ sampai nilai terbesar 101 kΩ dapat menentukan rentang frekuensi kerja osilator.

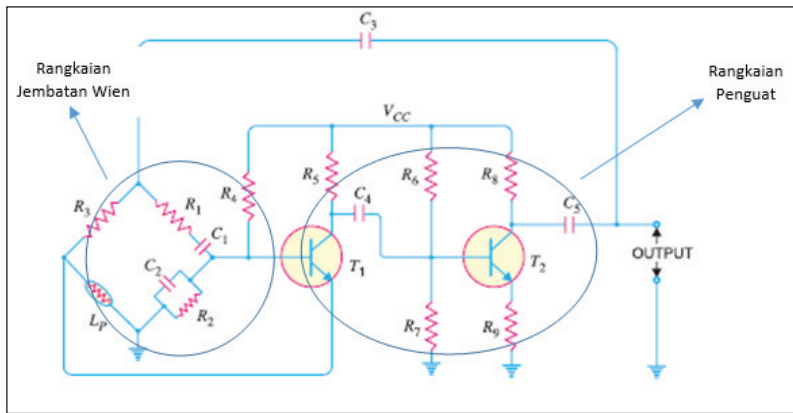
Untuk nilai  $R = 1 \text{ k}\Omega$ , diperoleh frekuensi keluarannya sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi(1 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 15,9 \text{ kHz.}$$

Untuk nilai  $R = 101 \text{ k}\Omega$ , diperoleh frekuensi keluarannya sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi(101 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 158 \text{ Hz.}$$

Kesimpulannya bahwa saat resistansi bernilai minimum, frekuensi yang dihasilkannya bernilai maksimal, sedangkan saat resistansi umpan balik bernilai maksimal, diperoleh frekuensi bernilai minimal. Selanjutnya, bagaimana apabila rangkaian osilator jembatan Wien ini dibangun oleh sebuah komponen transistor? Hal yang perlu diperhatikan terkait dengan penggunaan transistor sebagai komponen utama osilator adalah memiliki kestabilan keluaran lebih baik, mudah untuk direalisasikan, dan memiliki penguatan lebih tinggi jika jumlah transistor yang digunakan lebih banyak serta lebih mudah diatur nilai frekuensinya. Selain kelebihanannya itu, ada beberapa juga sisi kelemahannya, antara lain, dengan adanya penambahan komponen transistor lebih dari satu tingkat, akan lebih kompleks skema rangkaian yang dirancang dan biasanya frekuensi yang dihasilkan tidak terlalu tinggi sehingga diperlukan modifikasi rangkaian osilator model ini lebih lanjut agar menghasilkan frekuensi keluaran lebih tinggi lagi.



**Gambar 11.11** Rangkaian Osilator Transistor Jembatan Wien (*Model Cascade*)

Pada osilator berbasis transistor yang diilustrasikan pada Gambar 11.11, diperlihatkan bahwa sebuah rangkaian jembatan Wien berfungsi membangkitkan frekuensi gelombang sinusoidal yang besarnya dipengaruhi oleh perubahan nilai komponen-komponen penyusunnya yaitu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  dan  $C_2$ . Besarnya frekuensi osilasinya dapat dinyatakan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (11.4)$$

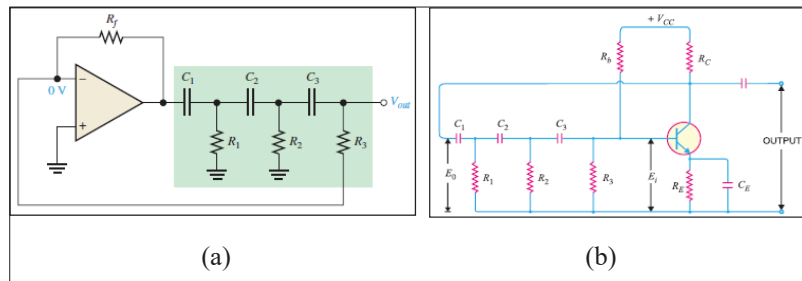
Jika nilai  $C_1 = C_2 = C$  dan  $R_1 = R_2 = R$ , persamaan (11.4) dapat dinyatakan seperti pada persamaan (11.2) sebelumnya. Persamaan (11.4) ini digunakan untuk kondisi saat nilai-nilai resistansi dan kapasitansi sumber pembangkit frekuensi memiliki harga yang berbeda. Selanjutnya, adanya rangkaian penguat yang diterapkan pada osilator ini digunakan sebagai antisipasi agar level gelombang yang dihasilkannya tidak mengalami pelemahan yang bisa berdampak pada sistem-sistem selanjutnya. Dalam praktiknya, jenis penguat yang digunakan bisa berupa penguat jenis penyangga maupun penguat bertingkat yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

Model osilator tipe RC lain yang cukup populer di kalangan perancang adalah osilator penggeser fase (*phase shift oscillator*).

Pergeseran nilai-nilai fase dapat ditentukan besarnya oleh nilai-nilai resistansi dan kapasitansi yang tersusun paralel yang dapat dilihat pada Gambar 11.12a. Untuk lebih memudahkan dalam melakukan perhitungan dan menentukan frekuensi keluarannya, seluruh resistansi dan kapasitansi dibuat bernilai sama, yaitu

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R \text{ dan } C_1 = C_2 = \dots = C_n = C.$$

Dalam praktiknya, model rancangan rangkaian osilator tipe ini dapat menggunakan transistor maupun penguat operasional karena peranan komponen-komponen utama ini lebih kepada sebagai penguat sinyal keluaran untuk mengantisipasi pelemahan sinyal.



Keterangan: (a) Berbasis Op-Amp dan (b) Berbasis Transistor Bipolar

**Gambar 11.12** Skema Rangkaian Osilator Penggeser Fase

Seperti yang terlihat di rangkaian osilator penggeser fase pada Gambar 11.12 bahwa setiap bagian RC menghasilkan nilai maksimum pergeseran fase sebesar  $60^\circ$  sehingga apabila bagian RC ini disusun dalam tiga bagian, total pergeseran fasenya sebesar  $180^\circ$ . Secara fakta, untuk mendapatkan variasi pergeseran fase-nya, pada bagian salah satu rangkaian RC-nya dapat dimodifikasi menjadi nilai variabel, baik untuk parameter R maupun C. Karena itu, berdasarkan prasyarat yang telah digambarkan sebelumnya, besaran frekuensi resonansi dari rangkaian osilator jenis ini dapat dinyatakan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}; \quad (11.5)$$

dengan,  $R_1 = R_2 = R_3 = R$  dan  $C_1 = C_2 = C_3 = C$ .

Sementara itu, pada rangkaian osilator yang diperlihatkan pada Gambar 11.11a, besaran peredaman akan muncul selama proses osilasi berlangsung. Besarnya nilai peredaman ini cukup berdampak pada besarnya nilai pelemahan sehingga secara matematis dapat diperkirakan besarnya seperti yang ditunjukkan persamaan (11.6).

$$B = \frac{1}{A_{cl}} = \frac{1}{29}; \quad (11.6)$$

dengan B menunjukkan level pelemahan (atenuasi) sinyal yang besarnya dapat dinyatakan sebesar

$$B = \frac{R_s}{R_f}. \quad (11.7)$$

Jika kita substitusikan persamaan (11.6) ke persamaan (11.7), dapat diperoleh penguatan yang diwakili oleh nilai  $R_f$ , yaitu sebesar

$$R_f = 29R_s. \quad (11.8)$$

Ada beberapa ciri khas berkaitan dengan kelebihan dan kekurangan osilator penggeser fase ini, yaitu

- 1) dapat digunakan untuk menghasilkan frekuensi rendah (+);
- 2) memiliki tingkat kestabilan frekuensi yang lebih baik (+);
- 3) menghasilkan level keluaran bernilai kecil (-); dan
- 4) cukup sulit bagi rangkaian osilator ini untuk memulai berosilasi karena sangat kecil level sinyal yang dibangkitkan (-).

### Contoh 11.3

Rangkaian seperti yang ditunjukkan rangkaian osilator pada Gambar 11.12.a di atas memiliki nilai  $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$  dan  $C_1 = C_2 = C_3 = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$ , tentukan

- a) frekuensi osilasi osilator,
- b) nilai frekuensi osilasinya jika seluruh nilai kapasitor diganti menjadi  $C = 1 \text{ nF}$ ,

- c) kesimpulan dari kedua hasilnya.

### Penyelesaian

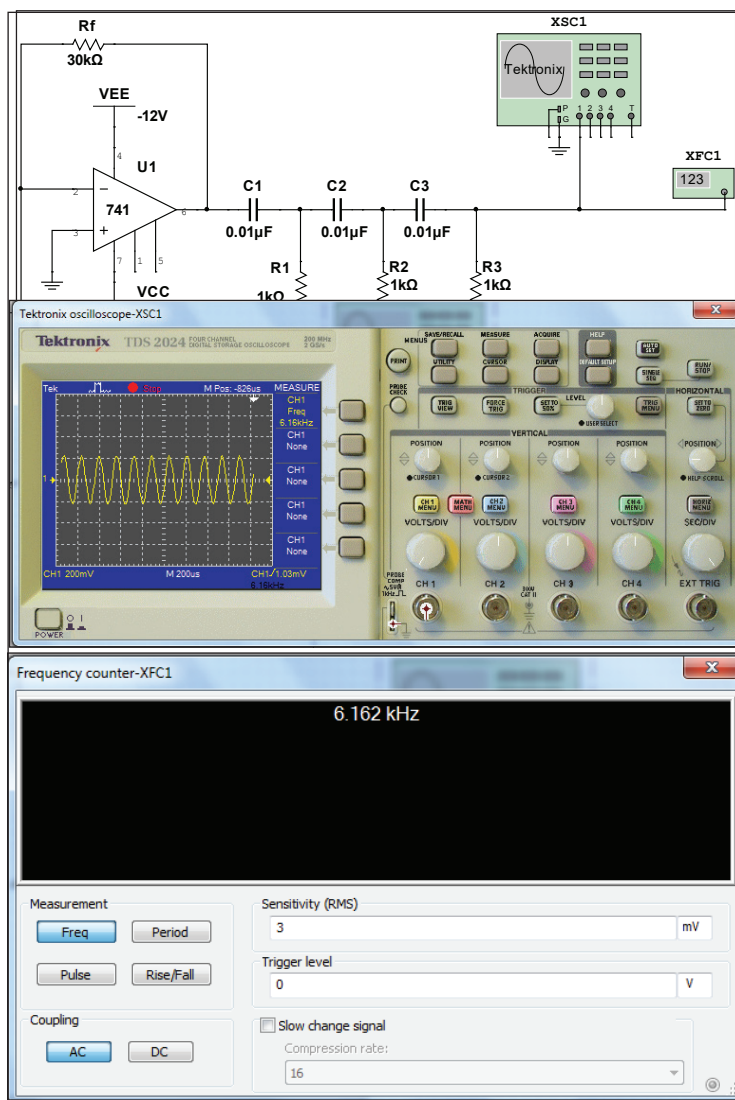
- a) Frekuensi osilasi osilator diperoleh sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} = \frac{1}{2\pi (1 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})\sqrt{6}} = 6,49 \text{ kHz.}$$

- b) Untuk  $C = 1 \text{ nF}$ , frekuensi osilasinya menjadi

$$f_r = \frac{1}{2\pi (1 \text{ k}\Omega)(1 \text{ nF})\sqrt{6}} = 64,9 \text{ kHz.}$$

- c) Dengan memperkecil nilai kapasitansi dari  $0,01 \text{ }\mu\text{F}$  ke  $1 \text{ nF}$  dengan mengasumsikan nilai resistansi dibuat tetap, frekuensi yang dibangkitkan akan menjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa komponen kapasitansi merupakan salah satu komponen yang cukup besar memengaruhi perubahan nilai frekuensi yang dihasilkan rangkaian osilator. Hasil simulasinya diperoleh sebagai berikut (Gambar 11.13).

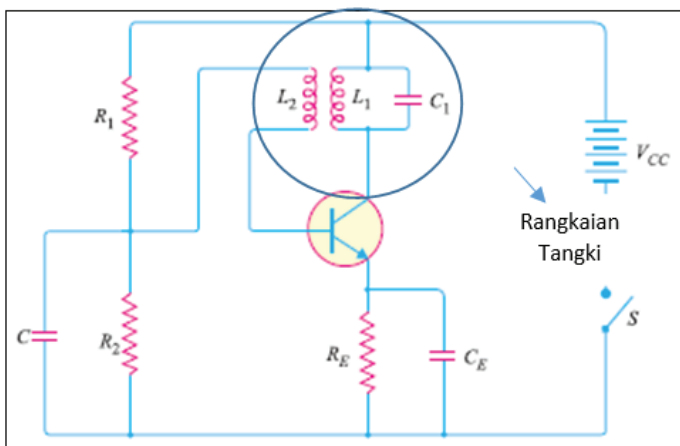


**Gambar 11.13** Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal *Output* (Contoh 11.3)

*Catatan:* Pada hasil perhitungan dengan simulasi terdapat perbedaan hasil yang tidak terlalu jauh. Kondisi ini menunjukkan bahwa secara fungsi dasar perbandingan rumusan perhitungan dengan skema rangkaian osilator ini memberikan hasil frekuensi yang hampir sama.

## 2. Osilator LC

Pada dasarnya secara praktis hampir mayoritas osilator jenis RC bekerja pada daerah frekuensi menengah ke bawah meskipun sebenarnya dapat ditingkatkan lagi menjadi lebih tinggi dari itu. Hal tersebut tidak mudah diwujudkan karena salah satu faktornya adalah adanya keterbatasan frekuensi kerja dan lebar pita dari komponen penguat operasional. Salah satu teknik untuk membangkitkan frekuensi tinggi adalah dengan mengganti komponen RC dengan LC (L: Induktor, C: kapasitor) sehingga jenis osilatornya dinamakan osilator LC. Umumnya osilator jenis ini memiliki rentang frekuensi kerja antara 1 MHz sampai dengan 500 MHz, bahkan bisa lebih dari itu. Nilai frekuensi ini dapat dikendalikan besarnya oleh rangkaian resonansi yang tersusun dari satu atau lebih komponen kapasitansi dan induktansi yang dikenal sebagai *tank circuit* atau rangkaian tangki. Salah satu model osilator LC yang cukup populer adalah jenis osilator LC tertala (*tuned oscillator circuit*) yang untuk mendapatkan frekuensi kerja osilatornya, salah satu atau kedua komponen LC dibuat variabel yang secara skema rangkaiannya ditunjukkan Gambar 11.14. Analisis dan perancangan osilator frekuensi tinggi tidaklah mudah untuk diimplementasikan karena pada frekuensi tinggi, kapasitansi *stray* dan induktansi dalam dapat memberikan pengaruh penting dalam menentukan osilasi dan pembangkitan frekuensi.



**Gambar 11.14** Skema Rangkaian Osilator LC Tertala

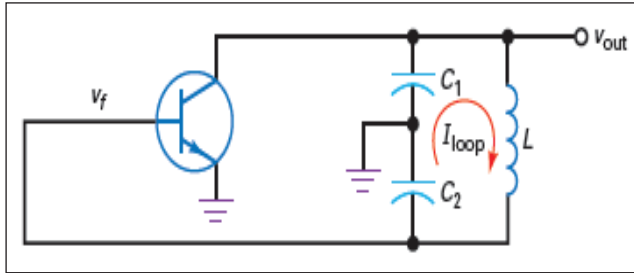
Rangkaian *tank* pada osilator LC tertala seperti yang ditunjukkan Gambar 11.14 merupakan sumber pembangkit osilasi frekuensi yang besarnya ditentukan oleh nilai-nilai  $L_1$  dan  $C_1$  yang secara persamaan dinyatakan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (11.9)$$

Secara praktis, untuk mendapatkan frekuensi yang presisi sesuai dengan hasil analisis perhitungan, pada bagian rangkaian *tank* salah satu komponen  $L$  dan  $C$  atau keduanya dapat dibuat variabel sehingga jenis rangkaian ini umumnya dikenal sebagai osilator tertala (*tuned oscillator*).

#### a. Osilator Colpitts

Osilator colpitts merupakan salah satu model osilator tipe LC yang skema rangkaian dasarnya ditunjukkan oleh Gambar 11.15. Pada osilator ini yang membentuk rangkaian tangkinya adalah  $L$  yang diparalel dengan  $C_1$  dan  $C_2$  yang tengah-tengahnya terhubung dengan *ground*.



**Gambar 11.15** Skema Dasar Rangkaian Osilator Colpitts

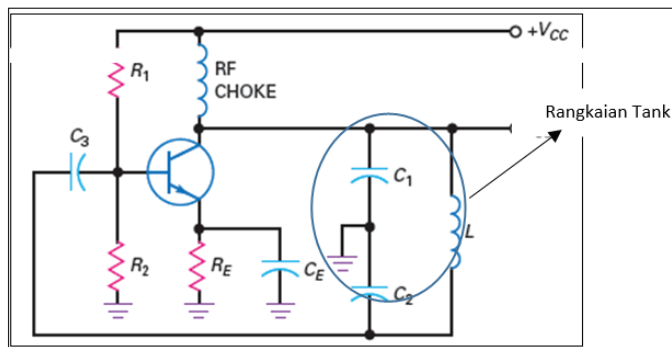
Besar frekuensi osilasinya ditentukan  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $L$  yang membentuk suatu lingkaran tertutup sebagaimana yang dijelaskan sebelumnya sehingga dari rangkaian osilator colpitts ini besaran frekuensi yang dibangkitkan adalah sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{ek}}}; \quad (11.10)$$

dengan

$$C_{ek} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (11.11)$$

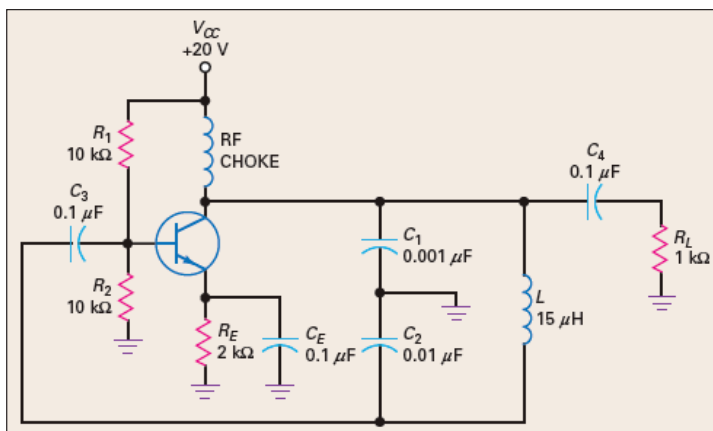
Komponen  $C_1$ ,  $C_2$ , dan  $L$  akan membentuk suatu rangkaian tangki (*tank circuit*) yang berfungsi sebagai sumber pembangkitan frekuensi dan gelombang yang secara tidak langsung akan menghasilkan rentang kerja frekuensi yang sempit (*narrow band*). Karena itulah biasanya osilator LC yang dibangun oleh sebuah rangkaian tank ini selalu berada pada daerah kerja frekuensi sempit (lihat materi penguat kelas C di bab sebelumnya). Bentuk modifikasi secara lengkap dari rangkaian osilator colpitts seperti pada Gambar 11.15. Dapat digambarkan bentuk skema detailnya seperti yang diperlihatkan Gambar 11.16.



**Gambar 11.16** Modifikasi Rangkaian Osilator Colpitts

### Contoh 11.4

Tentukan frekuensi keluaran dari rangkaian osilator colpitts berikut (Gambar 11.17).



**Gambar 11.17** Rangkaian Modifikasi Osilator Colpitts

### Penyelesaian

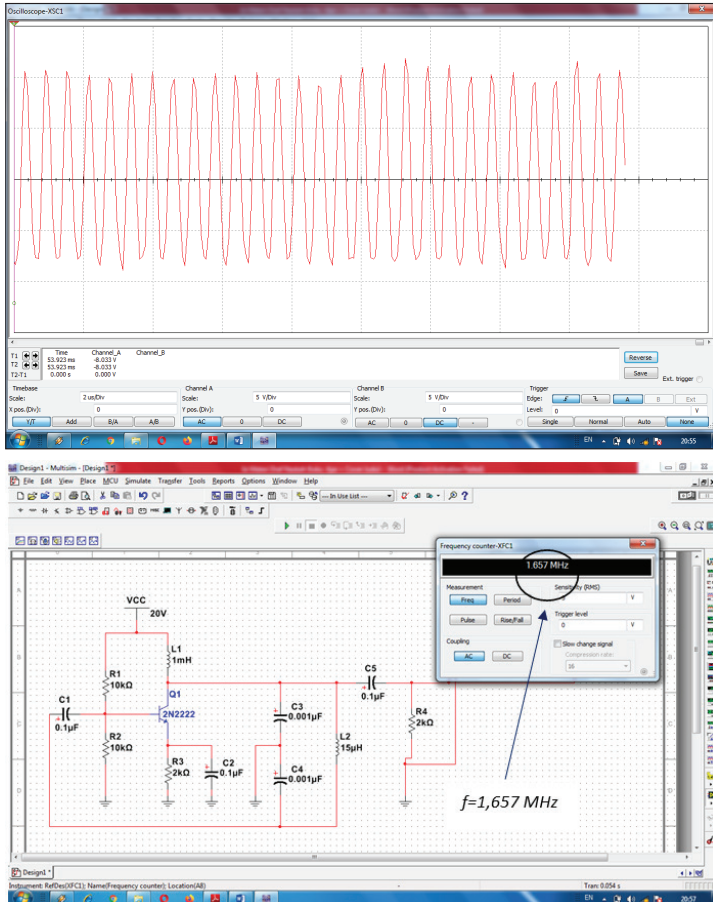
Pertama, kita tentukan kapasitansi ekuivalen terlebih dahulu,

$$C_{ek} = \frac{(0,001 \mu\text{F})(0,001 \mu\text{F})}{(0,001 \mu\text{F}) + (0,001 \mu\text{F})} = 909 \text{ pF.}$$

Kedua, frekuensi keluaran osilator diperoleh sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi(15 \mu\text{H})(909 \text{ pF})} = 1,36 \text{ MHz.}$$

Ketiga, bentuk level sinyal hasil simulasinya diperoleh sebagai berikut (Gambar 11.18).

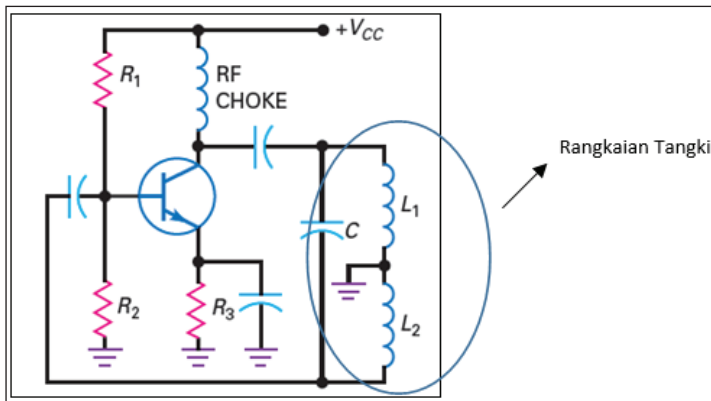


**Gambar 11.18** Hasil Simulasi Rangkaian dan Sinyal *Output* (Contoh 11.4)

Catatan: Hasil perhitungan dengan hasil simulasinya menunjukkan adanya perbedaan tidak terlalu jauh, tetapi tentu perbedaan itu tidak terlepas dari sifat yang dimiliki komponen yang sedikit berbeda. Biasanya komponen yang digunakan dalam simulasi memiliki sifat komponen ideal dibandingkan dengan kenyataannya.

## b. Osilator Hartley

Pada prinsipnya skema rangkaian osilator hartley ini memiliki kesamaan dengan tipe osilator colpitts. Perbedaan hanya ada pada komposisi pada rangkaian *tank*-nya. Pada osilator ini, komponen induktansi  $L_1$ ,  $L_2$  tersusun paralel satu sama lain yang ditap ke tanah (*grounding*) yang terpasang secara paralel dengan sebuah kapasitansi  $C$  seperti yang ditunjukkan Gambar 11.19 berikut.



**Gambar 11.19** Skema Dasar Rangkaian Osilator Hartley

Besarnya frekuensi osilasi yang dihasilkan oleh osilator hartley ini dapat dinyatakan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ek}C}} \quad (11.12)$$

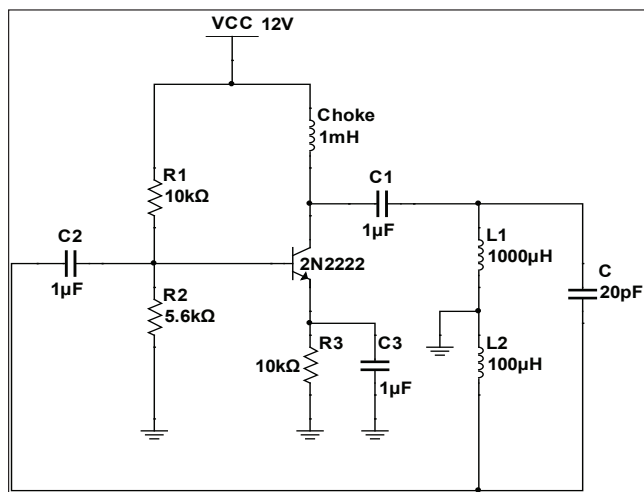
dengan

$$L_{ek} = L_1 + L_2 + 2M. \quad (11.13)$$

Parameter  $M$  menunjukkan nilai mutual induktansi antara  $L_1$  dan  $L_2$ , tetapi untuk sebagian perancang, nilai  $M$  ini tidak disertakan atau diabaikan dengan tujuan mempermudah dalam menganalisis rangkaian osilator yang akan diimplementasikan sehingga pada persamaan (11.13) dapat dirumuskan juga sebesar  $L_{ek} = L_1 + L_2$  meskipun dalam prosesnya, mutual induktansi dapat memberikan dampak terhadap hasil akhirnya. Catatan penting di sini adalah bahwa  $L_1$ ,  $L_2$ , dan  $C$  akan menghasilkan nilai pergeseran fase sebesar  $180^\circ$ . Hal ini juga berlaku untuk osilator colpitts.

### Contoh 11.5

Tentukan frekuensi keluaran dari rangkaian osilator hartley seperti yang ditunjukkan Gambar 11.20 jika diasumsikan mutual induktansi antarlilitan bernilai  $M = 20\mu\text{H}$ .



Gambar 11.20 Rangkaian Osilator Hartley

### Penyelesaian

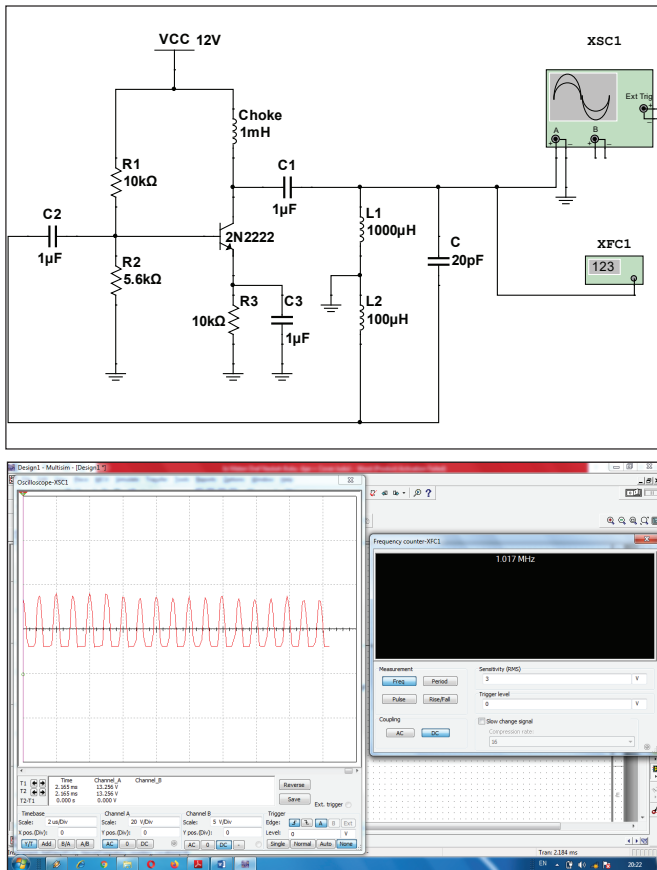
Pertama, kita tentukan terlebih dahulu induktansi ekuivalen total sebesar

$$L_{ek} = L_1 + L_2 + 2M = 1000 \mu\text{H} + 100 \mu\text{H} + 2(20 \mu\text{H}) = 1140 \mu\text{H}.$$

Kedua, frekuensi rangkaian osilator hartley (Gambar 11.20) dapat ditentukan sebesar

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1140 \mu\text{H}) (20 \text{ pF})}} = 1,052 \text{ MHz.}$$

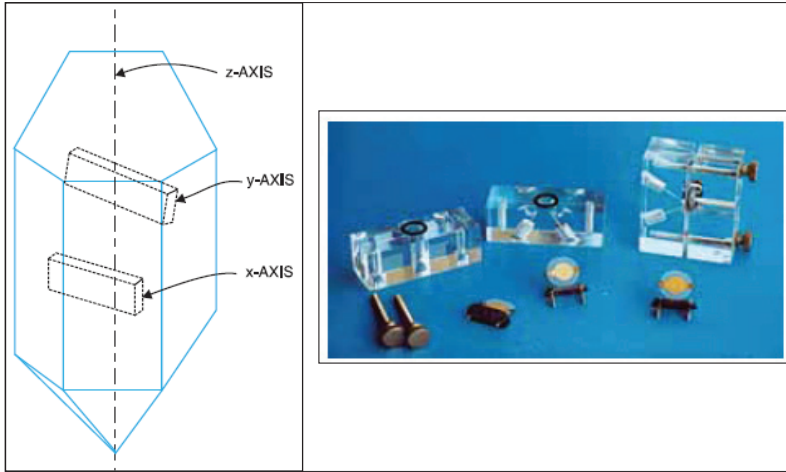
Ketiga, rangkaian tersebut dapat disimulasikan sebagai berikut (Gambar 11.21).



**Gambar 11.21** Hasil Simulasi rangkaian dan Sinyal *Output* (Contoh 11.5)

Kristal biasanya digunakan sebagai sebuah rangkaian osilator dikarenakan kemampuannya memiliki kestabilan frekuensi yang tinggi dalam rentang waktu yang cukup lama. Alasan utamanya ialah karena nilai perubahan frekuensi kristal terhadap waktu jauh lebih kecil dibandingkan dengan jenis osilator lain atau disebut sebagai *faktor penuaan frekuensi*. Faktor ini untuk kristal berkisar pada angka 5 ppm sampai 6 ppm per tahunnya dan secara fakta lebih kecil jika dibandingkan dengan frekuensi osilator RC maupun osilator LC yang biasanya berada di atas  $\pm 1\%$  per tahun. Fungsi **kristal osilator** sendiri diperuntukkan menghasilkan sinyal dengan tingkat kestabilan frekuensi yang sangat tinggi. Kristal pada osilator ini **terbuat dari kwarsa (quartz)** atau *Rochelle salt* dengan kualitas yang baik. Material ini memiliki kemampuan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa getaran atau sebaliknya. Kemampuan ini lebih dikenal sebagai *piezoelectric effect*.

Konsep kerjanya adalah menghasilkan resonansi listrik-mekanik sehingga kristal akan bergetar atau beresonansi pada frekuensi alami tertentu jika diberi energi listrik bolak-balik. Frekuensi alami ini ditentukan oleh potongan dan dimensi keping kristal yang ditetapkan pada saat proses fabrikasi. Karena potongan dan dimensi keping kristal dapat dikontrol secara presisi pada saat proses produksi, kristal mempunyai frekuensi getar alami yang sangat akurat. Akurasi kristal umumnya berada pada kisaran  $\pm 30$  ppm dengan tingkat keakurasian lebih tinggi meskipun secara harga tentunya lebih mahal. Potongan keping kristal mengacu kepada orientasi sudut pemotongan keping kristal terhadap garis struktur kristalin dan bentuk keping kristal tersebut. Gambaran terkait proses ini dapat dilihat pada Gambar 11.22 yang secara struktur lengkap dapat dianalisis lebih lanjut.



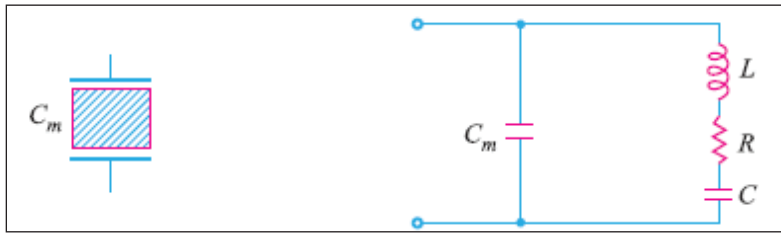
**Gambar 11.22** Struktur Kristal sebagai Bahan Dasar Rangkaian Osilator

Berdasarkan Gambar 11.22 dapat dijelaskan bahwa ada tiga daerah sumbu yang menyatakan struktur kristal, yaitu sumbu z yang mewakili sumbu optikal, sumbu x yang mewakili sumbu listrik dan sumbu y mewakili sumbu mekanik. Ketiga parameter ini pada prinsipnya mampu membangkitkan frekuensi kristal sebesar

$$f = \frac{K}{t}; \quad (11.14)$$

dengan  $K$  menunjukkan sebuah konstanta yang tergantung pada potongan kristal dan  $t$  menunjukkan ketebalan bahan. Secara rata-rata, frekuensi yang mampu dibangkitkan adalah di antara rentang 25 kHz sampai dengan 5 MHz. Kristal sendiri dapat dioperasikan sebagai rangkaian tangki, yaitu kristal diletakkan sebagai jaringan umpan balik maka kristal akan menanggapi sebagai peranti penghasil resonansi seri. Selain itu, kristal juga sebenarnya mampu merespons sebagai sebuah tapis atau filter dengan *cut-off* yang tajam. Kristal dapat dioperasikan pada frekuensi fundamental atau salah satu dari frekuensi-frekuensi harmonik ganjil (*odd harmonics*) yang biasa disebut *overtone*s.

Frekuensi fundamental maksimum sebuah kristal ditentukan oleh potongan dan dimensi keping kristal. Makin tinggi frekuensi fundamental sebuah kristal maka akan makin tipis keping sehingga keping kristal menjadi rapuh dan mudah patah. Jadi, untuk mencapai spesifikasi frekuensi resonansi yang lebih tinggi, kristal harus beroperasi menggunakan salah satu *overtone* yang ada. Khusus pada osilator kristal yang berfungsi sebagai rangkaian resonansi seri, kristal seolah-olah memiliki induktansi (L), kapasitansi (C) dan resistansi (R). Nilai L ditentukan oleh massa kristal, harga C ditentukan perubahan secara mekanik, dan R berhubungan dengan gesekan mekanik.



**Gambar 11.23** Rangkaian Ekuivalen Kristal untuk Sistem Osilator

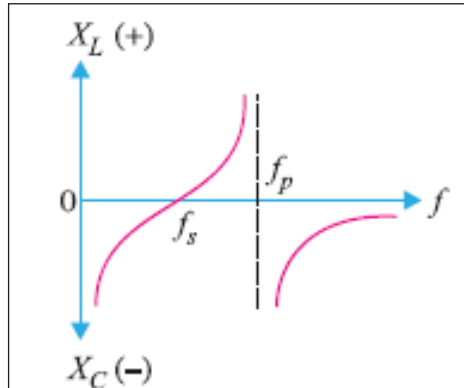
Gambar 11.23 merupakan ilustrasi rangkaian ekuivalen kristal. Ada dua hal yang perlu kita analisis terkait penjelasan Gambar 11.23 tersebut, yaitu sebagai berikut.

- 1) Saat kristal tidak mengalami getaran, kedudukannya akan sebanding dengan sebuah kapasitansi  $C_m$  atau disebut *mounting capacitance*.
- 2) Saat kristal mengalami getaran, kedudukannya sebanding sebagai sebuah rangkaian seri RLC yang terhubung paralel dengan sebuah kapasitansi *shunt*  $C_m$ .

Oleh karena itu, untuk mendapatkan tingkat kestabilan frekuensi yang tinggi diperlukan faktor kualitas  $Q$  dari kristal tersebut yang memiliki nilai sangat besar. Secara persamaan, faktor kualitas kristal dinyatakan sebesar

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11.15)$$

Parameter lain yang cukup perlu untuk dianalisis adalah tanggapan frekuensi sebuah Kristal yang besarnya akan mengalami perubahan tergantung pada susunan rangkaian ekuivalennya, yaitu rangkaian RLC seri dan paralel.



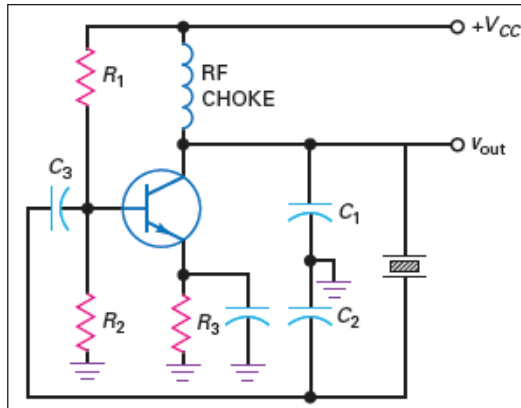
**Gambar 11.24** Tanggapan Frekuensi Kristal

Untuk rangkaian seri, frekuensi resonansi yang dihasilkan kristal ini dinyatakan oleh persamaan (11.16), sedangkan untuk frekuensi yang dibangkitkan oleh rangkaian paralelnya dinyatakan oleh persamaan (11.17).

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ dan} \quad (11.16)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \quad (11.17)$$

dengan  $C_T = \frac{C \times C_m}{C + C_m}$  yang dalam hal ini jika nilai  $C_T$  lebih kecil dari  $C$ ,  $f_p$  akan lebih besar dari nilai frekuensi  $f_s$  (sebagai catatan bahwa antara frekuensi  $f_p$  dan  $f_s$  ini pada dasarnya sangat dekat satu sama lain nilainya). Salah satu penerapan osilator kristal dengan modifikasi sebuah rangkaian osilator colpitts diperlihatkan pada Gambar 11.25.



**Gambar 11.25** Rangkaian Osilator Kristal Colpitts

### Contoh 11.6

Sebuah rangkaian ekuivalen kristal diketahui memiliki nilai  $L = 1$  henry,  $C = 0,01$  pF,  $C_m = 20$  pF, dan  $R = 1$  k $\Omega$ . Tentukan frekuensi resonansi seri dan paralel kristalnya.

### Penyelesaian

- a) Frekuensi resonansi seri kristal:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times 0,01 \times 10^{12}}} = 1,589 \text{ MHz}$$

- b) Frekuensi resonansi paralel kristal:

$$C_T = \frac{C \times C_m}{C + C_m} = \frac{0,01 \text{ pF} \times 20 \text{ pF}}{0,01 \text{ pF} + 20 \text{ pF}} = 0,00999 \text{ pF},$$

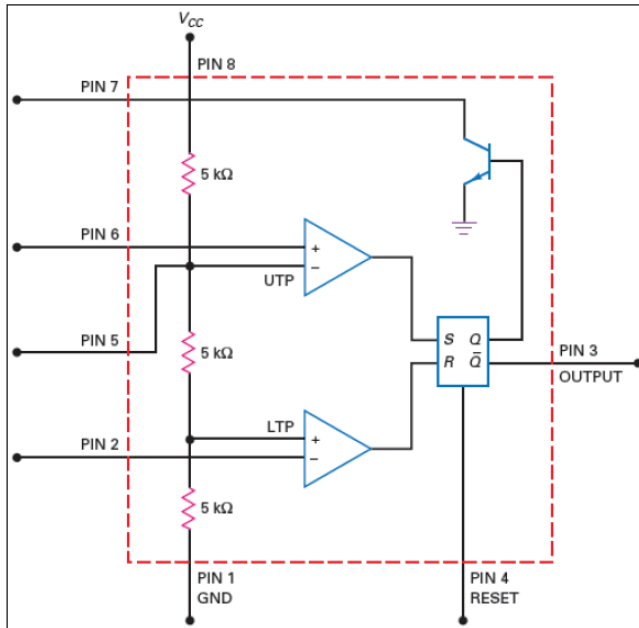
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times 0,00999 \times 10^{12}}} = 1,590 \text{ MHz}.$$

Jadi, dari analisis perhitungan ini dapat dipahami bahwa antara frekuensi yang dihasilkan oleh rangkaian seri dan paralel memiliki nilai yang sangat dekat. Hal ini berarti bahwa kristal mampu menghasilkan perubahan nilai yang relatif stabil dan konstan, apa pun bentuk konfigurasi rangkaian yang dipakai.

#### 4. Rangkaian Multivibrator (Pembangkit Pulsa)

Pada pembahasan jenis osilator pulsa ini, penulis lebih memperkenalkan sebuah pembangkitan gelombang pulsa yang dibangun oleh sebuah rangkaian terintegrasi jenis pewaktu (*timer*) 555. Osilator ini tentunya lebih banyak diaplikasikan oleh hampir semua perancang karena selain lebih mudah dalam memahami prinsip operasi kerjanya serta mudah untuk dianalisis. Ada dua model pembangkitan gelombang pulsa yang dibangun oleh IC 555 ini, yaitu operasi pembangkitan *monostabil* dan *astabil*. Secara fungsional, blok diagram sistem dari sebuah IC555 diperlihatkan pada Gambar 11.26 yang susunan sistemnya terdiri dari sebuah pembagi tegangan, 2 buah pembanding (komparator), RS flip-flop dan sebuah transistor bertipe NPN.

Prinsip kerja pembangkitannya adalah saat pin 6 terhubung dengan UTP (*upper trip point*) komparator, tegangan akan terhubung (*on*). Nilai ini dinyatakan sebagai tegangan ambang batas (*threshold*). Saat tegangan ambang ini lebih besar dari UTP, keluaran yang dihasilkan menjadi tinggi (*high*) atau berlogika 1. Sementara itu, pin 2 dihubungkan dengan LTP (*lower trip point*) komparator maka di sini akan menghasilkan tegangan pemicu (*trigger*) yang tegangan pemicu ini nantinya akan digunakan untuk operasi pembangkitan monostabil. Pada saat rangkaian tidak aktif, tegangan pemicu akan bernilai tinggi (*high*), serta saat tegangan ini lebih kecil nilainya dari LTP, LTP komparator akan menghasilkan keluaran tinggi atau berlogika 1. Pin 4 lebih banyak digunakan untuk reset tegangan keluaran ke kedudukan nol, sedangkan pin 5 digunakan untuk mengendalikan frekuensi keluaran saat sistem rangkaian ini digunakan untuk model pembangkitan astabil. Adapun nilai UTP dan LTP dari gambaran kinerja komparator pada sistem pembangkitan sinyal digital berbasis



**Gambar 11.26** Blok Diagram Dasar IC555

IC555 ini dinyatakan masing-masing sesuai persamaan (11.18) dan (11.19).

$$UTP = \frac{2V_{CC}}{3} \quad \text{dan} \quad (11.18)$$

$$LTP = \frac{V_{CC}}{3}. \quad (11.19)$$

### a. Multivibrator Monostabil

Pada pembangkitan sinyal pulsa yang dilakukan oleh mode monostabil ini diperlukan tegangan pemicu sehingga perubahan lebar pulsa yang dihasilkan akan tergantung pada keberadaan tegangan pemicu ini. Skema dasar rangkaian monostabil diperlihatkan pada Gambar 11.27.

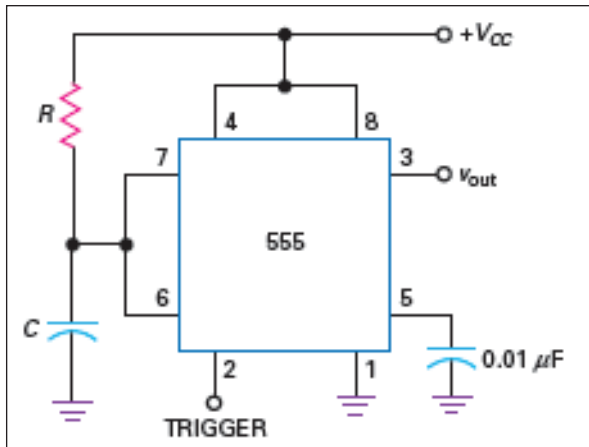
Lebar pulsa  $\tau$  yang diperlihatkan pada Gambar 11.27 menunjukkan juga keadaan pulsa tinggi yang besarnya dapat dinyatakan sebesar

$$\tau = 1,1RC \quad (11.20)$$

dengan perubahan lebar pulsanya sangat ditentukan oleh perubahan nilai resistansi  $R$  pada pin 7 serta nilai kapasitansi yang terhubung ke pin 6 dan *grounding*.

### Contoh 11.5

Rangkaian monostabil seperti yang ditunjukkan Gambar 11.28 memiliki nilai  $V_{cc} = 12\text{ V}$ ,  $R = 33\text{ k}\Omega$  dan  $C = 0,47\text{ }\mu\text{F}$ .



**Gambar 11.28** Rangkaian Multivibrator Monostabil

### Tentukan

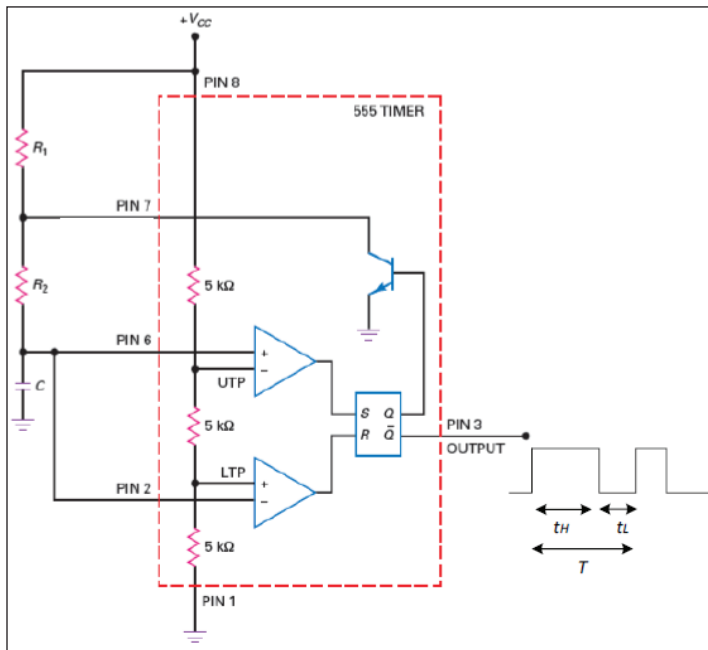
- tegangan pemicu minimum yang mampu menghasilkan sinyal pulsa,
- tegangan kapasitor maksimum,
- lebar pulsa yang dihasilkan.

## Penyelesaian

- a)  $LTP = \frac{12\text{ V}}{3} = 4\text{ V}$
- b)  $UTP = \frac{24\text{ V}}{3} = 8\text{ V}$
- c)  $\tau = 1,1(33\text{ k}\Omega)(0,47\text{ }\mu\text{F}) = 17,1\text{ ms}$

### b. Osilator Multivibrator Astabil

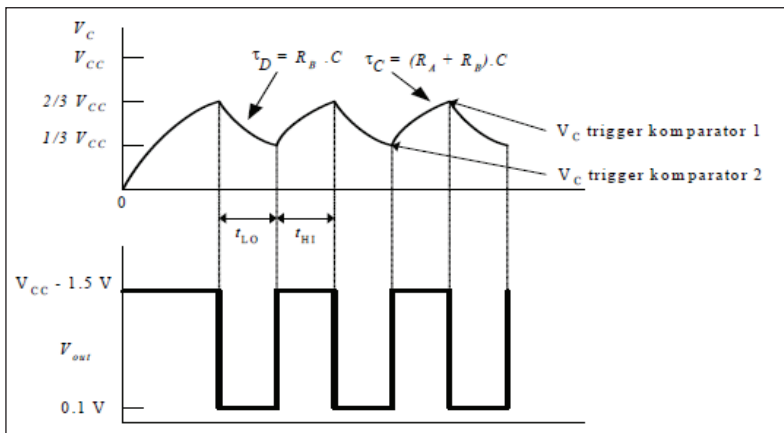
Operasi astabil memiliki dua keadaan dan mengalami osilasi secara kontinu guna menghasilkan bentuk gelombang segi empat atau pulsa. Pada operasi astabil ini, keluaran yang diperoleh tidak mengalami kestabilan, tetapi akan mengalami perubahan secara kontinu dari keadaan 0 ke 1 dan 1 ke 0. Kondisi seperti ini sering disebut *free running*.



Gambar 11.29 Blok Diagram Operasi Astabil IC555

Berdasarkan Gambar 11.29, gambaran terkait dengan spesifikasi operasi kerja IC555 untuk diterapkan pada operasi astabil dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1) IC555 dikenal sebagai rangkaian terintegrasi pewaktu yang serba guna.
- 2) IC555 memiliki tiga buah resistansi internal yang digunakan sebagai proses pembagi tegangan yang memiliki efek terhadap perubahan sinyal yang dihasilkan.
- 3) Secara internal sistem, IC555 memiliki dua buah komparator dengan level tegangan masing-masing sebesar  $V_{cc}/3$  untuk kedudukan komparator 1 dan  $2V_{cc}/3$  untuk komparator 2. Komparator-komparator ini digunakan sebagai penentu tinggi atau rendahnya sinyal keluaran yang didasarkan perbandingan level tegangan masukannya. Saat tegangan masukan positif lebih besar dari tegangan negatifnya, keluarannya akan bernilai tinggi (logika 1). Sebaliknya, saat masukan tegangan positif lebih kecil dari tegangan negatifnya, keluarannya akan bernilai rendah (*low*). Secara detail gambarannya dapat dilihat pada Gambar 11.30.



**Gambar 11.30** Tegangan Pemicu Masukan dan Keluaran Sinyal Pulsa

Dari analisis Gambar 11.29 dan 11.30, penjelasannya adalah terdapat beberapa parameter yang dapat dihitung untuk menentukan karakteristik sinyal keluaran yang dihasilkan operasi astabil ini, antara lain, lebar pulsa saat mencapai nilai tinggi ( $t_H$ ), lebar pulsa ( $t_L$ ), periode ( $T$ ), frekuensi ( $f$ ) dan *duty cycle* ( $D$ ).

Lebar pulsa saat kondisi tinggi (logika 1):

$$t_H = 0,693(R_1 + R_2)C. \quad (11.21)$$

Lebar pulsa saat kondisi rendah (logika 0):

$$t_L = 0,693R_2C. \quad (11.22)$$

Periode sinyal pulsa:

$$T = t_H + t_L. \quad (11.23)$$

Frekuensi keluarannya:

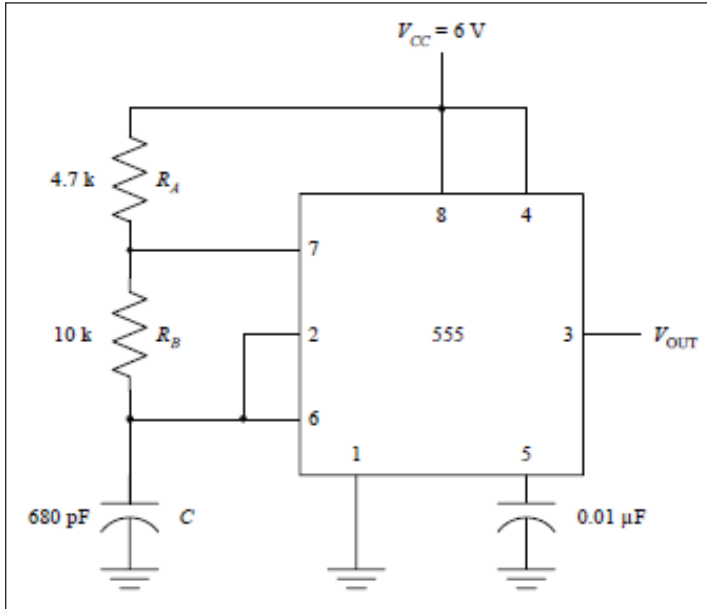
$$f = \frac{1}{t_H + t_L} = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C}. \quad (11.24)$$

*Duty cycle* yang dihasilkan:

$$D = \frac{t_H}{t_H + t_L} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}. \quad (11.24)$$

### Contoh 11.6

Dari rangkaian astabil berikut ini tentukan  $t_H$ ,  $t_L$ ,  $D$ , dan frekuensi keluarannya.



**Gambar 11.31** Rangkaian Multivibrator Astabil IC555

### Penyelesaian

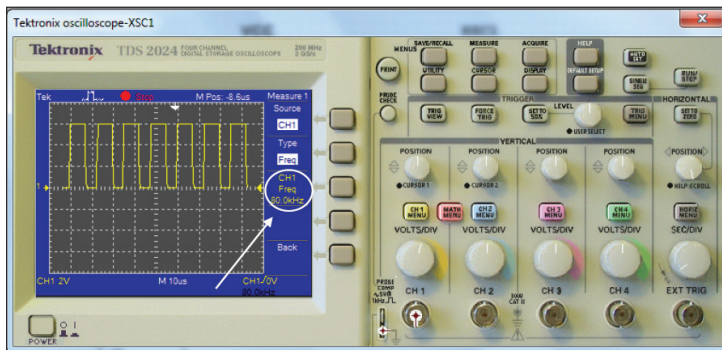
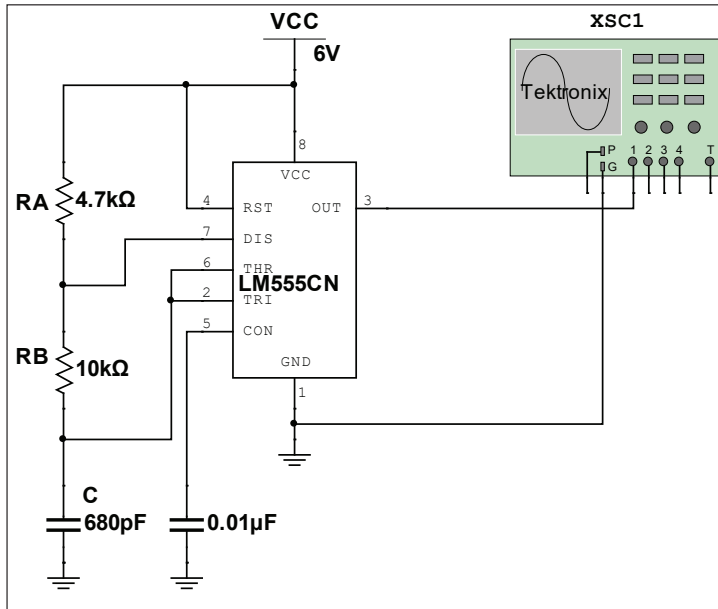
$$t_H = 0,693 (R_A + R_B)C = 0,693 (4,7 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega)(680 \text{ pF}) = 6,9 \text{ }\mu\text{s}.$$

$$t_L = 0,693 R_B C = 0,693 (10 \text{ k}\Omega)(680 \text{ pF}) = 4,7 \text{ }\mu\text{s}.$$

$$D = \frac{t_H}{t_H + t_L} = \frac{6,9\mu\text{s}}{6,9\mu + 4,7\mu\text{s}} = 59,5\%.$$

$$f = \frac{1}{11,6\mu\text{s}} = 85,6 \text{ kHz}.$$

Hasil simulasi untuk rangkaian di atas dan bentuk sinyal keluarannya adalah sebagai berikut (Gambar 11.32).



**Gambar 11.32** Hasil Simulasi Multisim (Contoh 11.6)

Catatan: Perbandingan antara hasil perhitungan dengan simulasi memperlihatkan adanya selisih hasil sebesar 5 KHz. Ada beberapa faktor yang menjadi penyebab, yaitu dimungkinkan komponen yang digunakan memiliki tingkat perbedaan toleransi. Akan tetapi, hasil keduanya tersebut cukup mendekati.

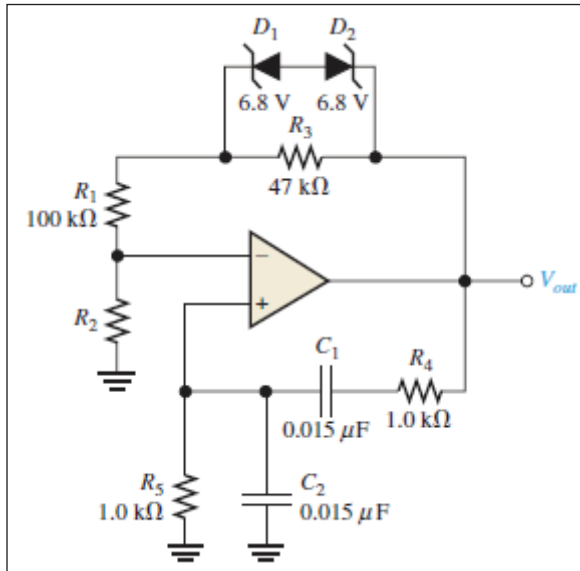
## RANGKUMAN

- 1) Osilator adalah suatu rangkaian elektronik atau perangkat yang menghasilkan gelombang osilasi atau sinyal berulang secara teratur. Osilasi ini dapat berupa gelombang sinusoidal, gelombang kotak, atau gelombang lainnya tergantung pada jenis osilator yang digunakan.
- 2) Fungsi utama osilator adalah menghasilkan sinyal frekuensi tertentu tanpa adanya input sinyal eksternal.
- 3) Osilator sangat penting dalam berbagai aplikasi elektronik, seperti dalam pembangkit frekuensi radio, pemancar sinyal, *clock generator* dalam sistem komputer, dan berbagai aplikasi lainnya.
- 4) Osilator dapat dirancang untuk menghasilkan frekuensi yang sangat stabil atau dapat diatur sesuai kebutuhan.
- 5) Multivibrator adalah suatu jenis rangkaian osilator yang menghasilkan gelombang keluaran yang berubah-ubah di antara dua keadaan stabil atau bisa dinamakan pembangkit gelombang pulsa.
- 6) Multivibrator monostabil adalah suatu rangkaian osilator yang memiliki satu keadaan stabil dan satu keadaan tidak stabil.
- 7) Multivibrator astabil adalah suatu rangkaian osilator yang tidak memiliki keadaan stabil. Gelombang keluarannya terus-menerus beralih di antara dua keadaan tidak stabil.
- 8) Konfigurasi sistem osilator ini dibangun oleh sebuah sistem penguat dan umpan balik. Sistem umpan balik memiliki peranan dalam mengendalikan dan membentuk gelombang keluaran sesuai kebutuhan serta mampu menjaga kestabilan sistem. Sementara itu, sistem penguat digunakan agar gelombang atau sinyal yang dihasilkan tidak mengalami peredaman saat dihubungkan dengan beban atau rangkaian lainnya.
- 9) Rentang frekuensi yang dihasilkan osilator bisa mulai dari frekuensi rendah sampai frekuensi tinggi sesuai dengan kebutuhan dan model rangkaian yang digunakan.

## LATIHAN SOAL

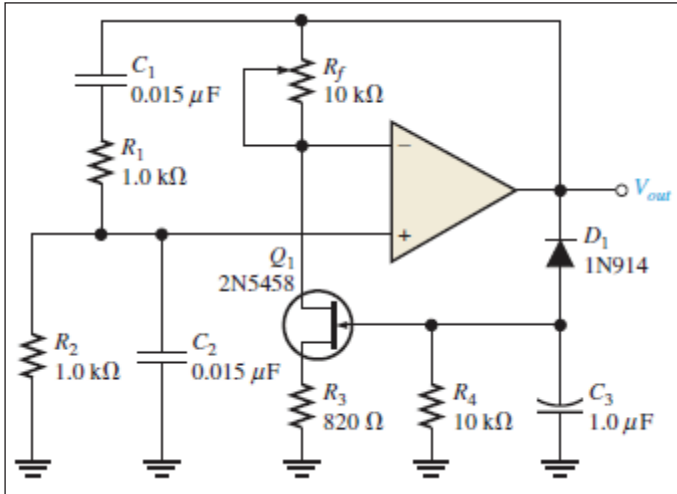
Jelaskan peranan sistem umpan balik dalam suatu rangkaian osilator.

- 1) Jelaskan komponen-komponen dasar sebuah rangkaian osilator.
- 2) Tentukan nilai resistansi  $R_2$  rangkaian pembangkit sinyal seperti yang ditunjukkan Gambar 11.26 serta jelaskan juga peranan  $R_3$  dalam rangkaian tersebut.



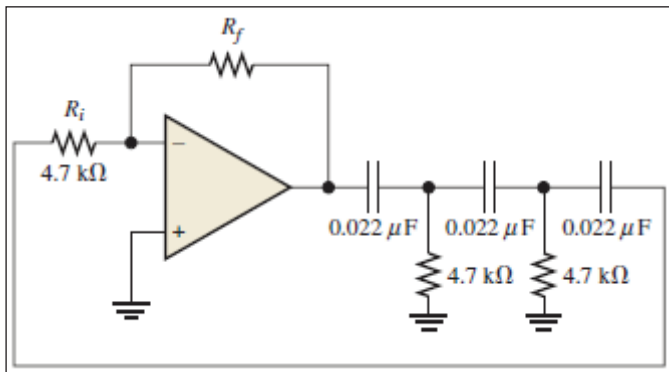
**Gambar 11.33** Rangkaian Osilator Relaksasi

- 3) Tentukan frekuensi kerja rangkaian osilator jembatan Wien seperti yang ditunjukkan Gambar 10.27.



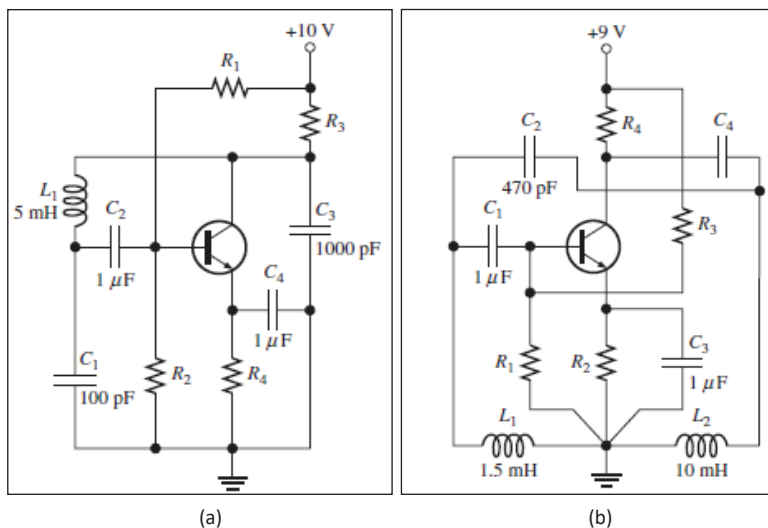
**Gambar 11.34** Rangkaian Dasar Osilator Model Jembatan Wien

- 4) Tentukan resistansi  $R_f$  dan frekuensi resonansi  $f_r$  rangkaian osilator yang diperlihatkan pada Gambar 11.28.



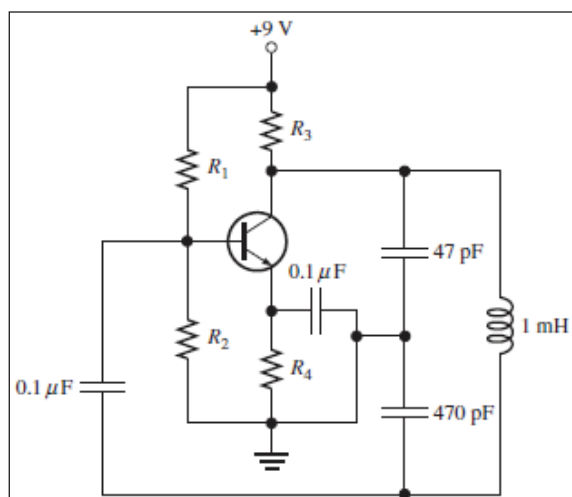
**Gambar 11.35** Rangkaian Osilator Model Penggeser Fase

- 5) Hitunglah frekuensi kerja kedua rangkaian osilator seperti yang diilustrasikan Gambar 11.29 dengan mengasumsikan nilai  $Q > 10$  dan tentukan jenis tipe dari masing-masing kedua rangkaian osilator tersebut.



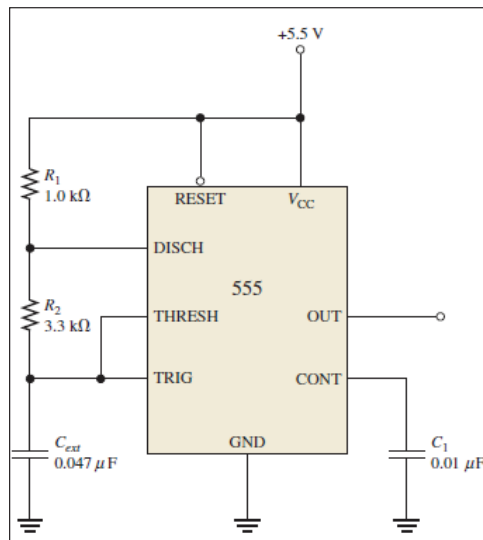
**Gambar 11.36** Rangkaian Osilator Jenis LC

- 6) Berapakah penguatan yang dibutuhkan oleh penguat yang diterapkan pada rangkaian osilator seperti Gambar 11.30 agar proses pembangkitan sinyal tetap selalu konsisten?



**Gambar 11.37** Rangkaian Osilator LC Tak Tertala

- 7) Dari rangkaian pembangkit sinyal astabil multivibrator IC timer 555 pada Gambar 11.33 tentukan beberapa hal berikut.
- Frekuensi kerja rangkaian multivibrator astabil ini.
  - Untuk mendapatkan frekuensi 25 kHz, berapakah nilai kapasitor eksternal  $C_{ext}$  yang harus dipasang?
  - Jika pada rangkaian nilai  $R_1$  diubah menjadi 3.3 k $\Omega$ , tentukan nilai  $R_2$  ketika *duty cycle* yang dihasilkan sebesar 75 %.



**Gambar 11.38** Rangkaian Multivibrator Astabil

## DAFTAR PUSTAKA

- Floyd, T. L. (2018). *Electronic device* (9th ed.). Pearson Education Inc.
- Floyd, T. L., & Buchla, D. L. (2014). *Electronic fundamentals circuits, devices and applications*. Pearson New International Edition.
- Hambley, A. R. (2014). *Electrical engineering principles and applications* (6th ed.). Pearson Education Limited.
- Malvino, A., & Bates, D. (2016). *Electronic principles* (8th ed.). McGrawHill-Education.
- Sedra & Smith. (2004). *Microelectronic circuits* (5th ed.). Oxford University Press.

# Lampiran

## Lampiran 1. Datasheet Komponen Dioda Silikon Tipe 1N4xxx

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007  
[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

Vishay General Semiconductor

## General Purpose Plastic Rectifier

DO-41 (DO-204AL)

### FEATURES

- Low forward voltage drop
- Low leakage current
- High forward surge capability
- Solder dip 275 °C max. 10 s, per JESD 22-B106
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc/799912](http://www.vishay.com/doc/799912)

RoHS  
COMPLIANT

### PRIMARY CHARACTERISTICS

$I_{F(AV)}$	1.0 A
$V_{RRM}$	50 V, 100 V, 200 V, 400 V, 600 V, 800 V, 1000 V
$I_{FSM}$ (8.3 ms sine-wave)	30 A
$I_{FSM}$ (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
$V_F$	1.1 V
$I_n$	5.0 $\mu$ A
$T_J$ max.	150 °C
Package	DO-41 (DO-204AL)
Circuit configuration	Single

### TYPICAL APPLICATIONS

For use in general purpose rectification of power supplies, inverters, converters, and freewheeling diodes application.

### MECHANICAL DATA

**Case:** DO-41 (DO-204AL), molded epoxy body  
**Molding compound** meets UL 94 V-0 flammability rating  
**Base P/N-E3 - RoHS-compliant, commercial grade**

**Terminals:** matte tin plated leads, solderable per J-STD-002 and JESD 22-B102  
**E3 suffix** meets JESD 201 class 1A whisker test

**Polarity:** color band denotes cathode end

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25$ °C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at $T_A = 75$ °C	$I_{F(AV)}$	1.0							A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	$I_{FSM}$	30							A
Non-repetitive peak forward surge current square waveform $T_A = 25$ °C (fig. 3)	$I_{FSM}$	45							A
$t_p = 1$ ms									
$t_p = 2$ ms		35							
$t_p = 5$ ms		30							
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length $T_L = 75$ °C	$I_{R(AV)}$	30							$\mu$ A
Rating for fusing ( $t < 8.3$ ms)	$P_{T(1)}$	3.7							A <sup>2</sup> s
Operating junction and storage temperature range	$T_J, T_{STG}$	-50 to +150							°C

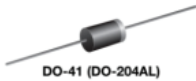
#### Note

(1) For device using on bridge rectifier application

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## General Purpose Plastic Rectifier



DO-41 (DO-204AL)

### FEATURES

- Low forward voltage drop
- Low leakage current
- High forward surge capability
- Solder dip 275 °C max. 10 s, per JESD 22-B106
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



RoHS  
COMPLIANT

PRIMARY CHARACTERISTICS	
$I_{FAV}$	1.0 A
$V_{RRM}$	50 V, 100 V, 200 V, 400 V, 600 V, 800 V, 1000 V
$I_{FSM}$ (8.3 ms sine-wave)	30 A
$I_{FSM}$ (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
$V_F$	1.1 V
$I_R$	5.0 $\mu$ A
$T_J$ max.	150 °C
Package	DO-41 (DO-204AL)
Circuit configuration	Single

### TYPICAL APPLICATIONS

For use in general purpose rectification of power supplies, inverters, converters, and freewheeling diodes application.

### MECHANICAL DATA

**Case:** DO-41 (DO-204AL), molded epoxy body  
Molding compound meets UL 94 V-0 flammability rating  
Base P/N-E3 - RoHS-compliant, commercial grade

**Terminals:** matte tin plated leads, solderable per J-STD-002 and JESD 22-B102  
E3 suffix meets JESD 201 class 1A whisker test

**Polarity:** color band denotes cathode end

MAXIMUM RATINGS (T <sub>A</sub> = 25 °C unless otherwise noted)								
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007 UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000 V
Maximum RMS voltage	V <sub>RMS</sub>	35	70	140	280	420	560	700 V
Maximum DC blocking voltage	V <sub>DC</sub>	50	100	200	400	600	800	1000 V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at T <sub>A</sub> = 75 °C	I <sub>FAV</sub>	1.0						A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I <sub>FSM</sub>	30						A
Non-repetitive peak forward surge current square waveform T <sub>A</sub> = 25 °C (fig. 3)	$t_p = 1\text{ ms}$	45						A
	$t_p = 2\text{ ms}$	35						
	$t_p = 5\text{ ms}$	30						
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length T <sub>L</sub> = 75 °C	I <sub>RAV</sub>	30						μA
Rating for fusing (t < 8.3 ms)	Pt (1)	3.7						A°s
Operating junction and storage temperature range	T <sub>J</sub> , T <sub>STG</sub>	-50 to +150						°C

#### Note

(1) For device using on bridge rectifier application

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum instantaneous forward voltage	1.0 A	$V_F$	1.1							V
Maximum DC reverse current at rated DC blocking voltage	$T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_R$	5.0							$\mu\text{A}$
	$T_A = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$		50							
Typical junction capacitance	4.0 V, 1 MHz	$C_J$	15							pF

**THERMAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Typical thermal resistance	$R_{\theta JA}^{(1)}$	50							$^{\circ}\text{C/W}$
	$R_{\theta JL}^{(1)}$	25							

**Note**<sup>(1)</sup> Thermal resistance from junction to ambient at 0.375" (9.5 mm) lead length, PCB mounted**ORDERING INFORMATION** (Example)

PREFERRED P/N	UNIT WEIGHT (g)	PREFERRED PACKAGE CODE	BASE QUANTITY	DELIVERY MODE
1N4004-E3/54	0.33	54	5500	13" diameter paper tape and reel
1N4004-E3/73	0.33	73	3000	Ammo pack packaging

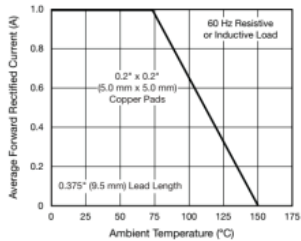
**RATINGS AND CHARACTERISTICS CURVES** ( $T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  unless otherwise noted)

Fig. 1 - Forward Current Derating Curve

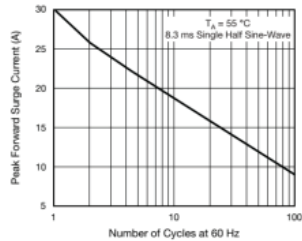



Fig. 2 - Maximum Non-repetitive Peak Forward Surge Current

Sumber: Vishay Intertechnology Inc. (2024)

Lampiran 2. *Datasheet* Transistor Bipolar Npn Tipe 2N2222

<b>2N2222 / 2N2222A</b>				
<b>NPN Silicon Epitaxial Planar Transistor</b>				
for switching and AF amplifier applications.				
The transistor is subdivided into one group according to its DC current gain.				
On special request, these transistors can be manufactured in different pin configurations.				
				
1. Emitter 2. Base 3. Collector TO-92 Plastic Package				
<b>Absolute Maximum Ratings (T<sub>a</sub> = 25 °C)</b>				
Parameter	Symbol	Value	Unit	
Collector Base Voltage	2N2222	60	V	
	2N2222A	75		
Collector Emitter Voltage	2N2222	30	V	
	2N2222A	40		
Emitter Base Voltage	2N2222	5	V	
	2N2222A	6		
Collector Current	I <sub>C</sub>	600	mA	
Power Dissipation	P <sub>tot</sub>	625	mW	
Junction Temperature	T <sub>J</sub>	150	°C	
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	- 55 to + 150	°C	

## 2N2222 / 2N2222A

Characteristics at  $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Unit
DC Current Gain				
at $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_C = 0.1\text{ mA}$	$h_{FE}$	35	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_C = 1\text{ mA}$	$h_{FE}$	50	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_C = 10\text{ mA}$	$h_{FE}$	75	-	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_C = 150\text{ mA}$	$h_{FE}$	100	300	-
at $V_{CE} = 10\text{ V}$ , $I_C = 500\text{ mA}$	$h_{FE}$	30	-	-
	$h_{FE}$	40	-	-
Collector Base Cutoff Current				
at $V_{CB} = 50\text{ V}$	$I_{CBO}$	-	10	nA
at $V_{CB} = 60\text{ V}$		-	10	
Collector Base Breakdown Voltage				
at $I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)CBO}$	60	-	V
		75	-	
Collector Emitter Breakdown Voltage				
at $I_C = 10\text{ mA}$	$V_{(BR)CEO}$	30	-	V
		40	-	
Emitter Base Breakdown Voltage				
at $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)EBO}$	5	-	V
		6	-	
Collector Emitter Saturation Voltage				
at $I_C = 150\text{ mA}$ , $I_B = 15\text{ mA}$	$V_{CE(sat)}$	-	0.4	V
		-	0.3	
at $I_C = 500\text{ mA}$ , $I_B = 50\text{ mA}$		-	1.6	
		-	1	
Base Emitter Saturation Voltage				
at $I_C = 150\text{ mA}$ , $I_B = 15\text{ mA}$	$V_{BE(sat)}$	-	1.3	V
		0.6	1.2	
at $I_C = 500\text{ mA}$ , $I_B = 50\text{ mA}$		-	2.6	
		-	2	
Gain Bandwidth Product	$f_T$	250	-	MHz
at $I_C = 20\text{ mA}$ , $V_{CE} = 20\text{ V}$ , $f = 100\text{ MHz}$				
Collector Output Capacitance	$C_{ob}$	-	8	pF
at $V_{CB} = 10\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$				

Sumber: Semiconductor Components Industries, LLC (2013)

Lampiran 3. Datasheet Jenis Transistor Bipolar PNP 2N3906

2N3906

General Purpose Transistors

PNP Silicon

Features

- Pb-Free Packages are Available\*

MAXIMUM RATINGS


Rating	Symbol	Value	Unit
Collector – Emitter Voltage	$V_{CEO}$	40	Vdc
Collector – Base Voltage	$V_{CBO}$	40	Vdc
Emitter – Base Voltage	$V_{EBO}$	5.0	Vdc
Collector Current – Continuous	$I_C$	200	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ Derate above $25^{\circ}\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/ $^{\circ}\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 60^{\circ}\text{C}$	$P_D$	250	mW
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^{\circ}\text{C}$ Derate above $25^{\circ}\text{C}$	$P_D$	1.5 12	W mW/ $^{\circ}\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	$^{\circ}\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS (Note 1)

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^{\circ}\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^{\circ}\text{C/W}$

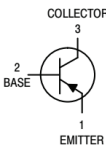
Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. Indicates Data in addition to JEDEC Requirements.




ON Semiconductor®


<http://onsemi.com>




COLLECTOR  
3  
2 BASE  
1  
EMITTER



TO-92  
CASE 29  
STYLE 1

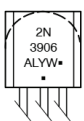


STRAIGHT LEAD  
BULK PACK



BENT LEAD  
TAPE & REEL  
AMMO PACK

MARKING DIAGRAM



Buku ini tidak diperjualbelikan.

394      Teknik Dasar Mendesain ...

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector – Emitter Breakdown Voltage (Note 2)	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $I_B = 0$ )	$V_{(BR)CEO}$	40	–	Vdc
Collector – Base Breakdown Voltage	( $I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$ , $I_E = 0$ )	$V_{(BR)CBO}$	40	–	Vdc
Emitter – Base Breakdown Voltage	( $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$ , $I_C = 0$ )	$V_{(BR)EBO}$	5.0	–	Vdc
Base Cutoff Current	( $V_{CE} = 30\text{ Vdc}$ , $V_{EB} = 3.0\text{ Vdc}$ )	$I_{BL}$	–	50	nAdc
Collector Cutoff Current	( $V_{CE} = 30\text{ Vdc}$ , $V_{EB} = 3.0\text{ Vdc}$ )	$I_{CEX}$	–	50	nAdc
<b>ON CHARACTERISTICS</b> (Note 2)					
DC Current Gain	( $I_C = 0.1\text{ mA}$ , $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 10\text{ mA}$ , $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 50\text{ mA}$ , $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 100\text{ mA}$ , $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$ )	$h_{FE}$	60 80 100 60 30	– – 300 – –	–
Collector – Emitter Saturation Voltage	( $I_C = 10\text{ mA}$ , $I_B = 1.0\text{ mA}$ ) ( $I_C = 50\text{ mA}$ , $I_B = 5.0\text{ mA}$ )	$V_{CE(sat)}$	– –	0.25 0.4	Vdc
Base – Emitter Saturation Voltage	( $I_C = 10\text{ mA}$ , $I_B = 1.0\text{ mA}$ ) ( $I_C = 50\text{ mA}$ , $I_B = 5.0\text{ mA}$ )	$V_{BE(sat)}$	0.65 –	0.85 0.95	Vdc
<b>SMALL – SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
Current – Gain – Bandwidth Product	( $I_C = 10\text{ mA}$ , $V_{CE} = 20\text{ Vdc}$ , $f = 100\text{ MHz}$ )	$f_T$	250	–	MHz
Output Capacitance	( $V_{CB} = 5.0\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )	$C_{obo}$	–	4.5	pF
Input Capacitance	( $V_{EB} = 0.5\text{ Vdc}$ , $I_C = 0$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )	$C_{bo}$	–	10	pF
Input Impedance	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$h_{ie}$	2.0	12	k $\Omega$
Voltage Feedback Ratio	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$h_{re}$	0.1	10	$\times 10^{-4}$
Small – Signal Current Gain	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$h_{fe}$	100	400	–
Output Admittance	( $I_C = 1.0\text{ mA}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	$h_{oe}$	3.0	60	$\mu\text{mhos}$
Noise Figure	( $I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$ , $V_{CE} = 5.0\text{ Vdc}$ , $R_S = 1.0\text{ k}\Omega$ , $f = 1.0\text{ kHz}$ )	NF	–	4.0	dB
<b>SWITCHING CHARACTERISTICS</b>					
Delay Time	(V <sub>CC</sub> = 3.0 Vdc, V <sub>BE</sub> = 0.5 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 mA, I <sub>B1</sub> = 1.0 mA)	t <sub>d</sub>	–	35	ns
Rise Time		t <sub>r</sub>	–	35	ns
Storage Time	(V <sub>CC</sub> = 3.0 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 mA, I <sub>B1</sub> = I <sub>B2</sub> = 1.0 mA)	t <sub>s</sub>	–	225	ns
Fall Time	(V <sub>CC</sub> = 3.0 Vdc, I <sub>C</sub> = 10 mA, I <sub>B1</sub> = I <sub>B2</sub> = 1.0 mA)	t <sub>f</sub>	–	75	ns

2. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$ ; Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

Sumber: Semiconductor Components Industries, LLC. (1998)

Lampiran 4. Datasheet Penguat Operasional (Op-Amp) Tipe 741



LM741  
SNOSC25D –MAY 1988–REVISED OCTOBER 2015

LM741 Operational Amplifier

1 Features

- Overload Protection on the Input and Output
- No Latch-Up When the Common-Mode Range is Exceeded

2 Applications

- Comparators
- Multivibrators
- DC Amplifiers
- Summing Amplifiers
- Integrator or Differentiators
- Active Filters

3 Description

The LM741 series are general-purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439, and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common-mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

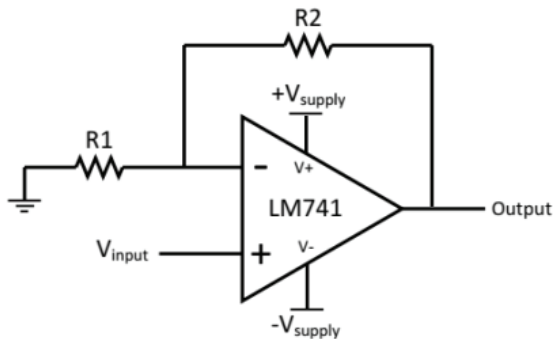
The LM741C is identical to the LM741 and LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM741	TO-99 (8)	9.08 mm × 9.08 mm
	CDIP (8)	10.16 mm × 6.502 mm
	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Typical Application



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Table of Contents

1	Features .....	1	7.3	Feature Description .....	7
2	Applications .....	1	7.4	Device Functional Modes .....	8
3	Description .....	1	8	Application and Implementation .....	9
4	Revision History .....	2	8.1	Application Information .....	9
5	Pin Configuration and Functions .....	3	8.2	Typical Application .....	9
6	Specifications .....	4	9	Power Supply Recommendations .....	10
6.1	Absolute Maximum Ratings .....	4	10	Layout .....	11
6.2	ESD Ratings .....	4	10.1	Layout Guidelines .....	11
6.3	Recommended Operating Conditions .....	4	10.2	Layout Example .....	11
6.4	Thermal Information .....	4	11	Device and Documentation Support .....	12
6.5	Electrical Characteristics, LM741 .....	5	11.1	Community Resources .....	12
6.6	Electrical Characteristics, LM741A .....	5	11.2	Trademarks .....	12
6.7	Electrical Characteristics, LM741C .....	6	11.3	Electrostatic Discharge Caution .....	12
7	Detailed Description .....	7	11.4	Glossary .....	12
7.1	Overview .....	7	12	Mechanical, Packaging, and Orderable Information .....	12
7.2	Functional Block Diagram .....	7			

## 4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

## Changes from Revision C (October 2004) to Revision D


• Added Applications section, Pin Configuration and Functions section, ESD Ratings table, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section .....	1
• Removed NAD 10-Pin CLGA pinout .....	3
• Removed obsolete M (S0-8) package from the data sheet .....	4
• Added recommended operating supply voltage spec .....	4
• Added recommended operating temperature spec .....	4

## Changes from Revision C (March 2013) to Revision D

• Added Applications section, Pin Configuration and Functions section, ESD Ratings table, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section .....	1
• Removed NAD 10-Pin CLGA pinout .....	3
• Removed obsolete M (S0-8) package from the data sheet .....	4
• Added recommended operating supply voltage spec .....	4
• Added recommended operating temperature spec .....	4

Sumber: Texas Instruments (2015)

## Lampiran 5. Datasheet MOSFET Tipe N-Peningkatan (N-Enhancement)

**MICROCHIP**

**2N7000**

**N-Channel Enhancement-Mode Vertical DMOS FET**

**Features**

- Free from Secondary Breakdown
- Low Power Drive Requirement
- Ease of Paralleling
- Low  $C_{ISS}$  and Fast Switching Speeds
- Excellent Thermal Stability
- Integral Source-Drain Diode
- High Input Impedance and High Gain

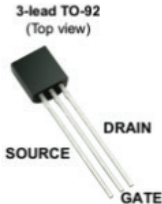
**General Description**

The 2N7000 is an Enhancement-mode (normally-off) transistor that uses a vertical DMOS structure and a well-proven silicon gate manufacturing process. This combination produces a device with the power handling capabilities of bipolar transistors as well as the high input impedance and positive temperature coefficient inherent in MOS devices. Characteristic of all MOS structures, this device is free from thermal runaway and thermally induced secondary breakdown.

Microchip's vertical DMOS FETs are ideally suited to a wide range of switching and amplifying applications where very low threshold voltage, high breakdown voltage, high input impedance, low input capacitance, and fast switching speeds are desired.

**Applications**

- Motor Controls
- Converters
- Amplifiers
- Switches
- Power Supply Circuits
- Drivers (Relays, Hammers, Solenoids, Lamps, Memory, Displays, Bipolar Transistors, etc.)

**Package Type**

3-lead TO-92  
(Top view)

SOURCE DRAIN GATE

See Table 3-1 for pin information.

Sumber: Microchip Technology Inc. (2021)

# Glosarium

amplification	: proses menaikkan level sinyal menjadi level lebih besar yang umumnya terjadi di dalam rangkaian penguat
buffer	: penguat penyangga yang digunakan untuk mempertahankan kedudukan sinyal agar tidak mengalami pelemahan akibat adanya perubahan beban rangkaian
depletion MOSFET	: jenis MOSFET pengosongan
efisiensi daya	: menunjukkan besarnya daya yang diserap oleh beban tanpa menghasilkan rugi-rugi daya yang besar
efisiensi penyearah	: kemampuan rangkaian penyearah untuk menghasilkan daya maksimal tanpa terpengaruh oleh perubahan beban
elektron valensi	: susunan jumlah elektron bagian lintasan terluar dari atom
enhancement MOSFET	: jenis MOSFET Peningkatan

energi gap	: Energi yang dimiliki oleh suatu bahan yang memisahkan pita konduksi dengan pita valensi. Energi pemisah ini dapat menentukan kategori sifat bahan yaitu konduktor, semikonduktor, dan insulator.
<i>filter choke</i>	: Rangkaian filter regulator yang terdiri dari induktor dan kapasitor, berfungsi untuk mengurangi munculnya tegangan riak atau <i>ripple</i> .
forward bias	: menunjukkan arus maju yang melalui sebuah bahan semikonduktor.
frekuensi <i>cut-off</i>	: frekuensi transisi atau kritis yang membatasi daerah pelolosan dengan daerah redaman dalam rentang frekuensi tertentu sebagai bagian dari fungsi penguatan
garis beban	: garis kerja komponen semikonduktor seperti dioda dan transistor yang kedudukannya dikendalikan oleh arus dan tegangan melalui komponen tersebut
impedansi	: nilai resistansi yang muncul akibat adanya pengaruh dari perubahan masukannya berupa sinyal bolak-balik
insulator	: bahan yang tidak memiliki kemampuan menghantarkan arus listrik dengan baik, bahkan cenderung buruk karena dipengaruhi oleh tingginya nilai resistivitas jenis bahan penyusunnya.
konduktor	: bahan yang memiliki kemampuan menghantarkan arus listrik dengan baik, bahkan cenderung sempurna karena kecilnya nilai resistivitas jenis bahan penyusunnya.

multistage amplifier	:	sebuah rangkaian penguat yang memiliki lebih dari satu tingkatan dan kecenderungan menghasilkan level penguatan lebih besar dibandingkan dengan penguat satu tingkat.
osilasi	:	gejala yang timbul akibat adanya getaran pada sebuah komponen seperti kapasitor, inductor inductor, atau resistor akibat adanya energi yang mempengaruhinya dari luar. Gejala ini merupakan cikal bakal terbangkitkannya sebuah gelombang.
osilator	:	rangkaian elektronika yang digunakan untuk membangkitkan suatu bentuk gelombang dan frekuensi tertentu.
pendekatan dioda	:	Metodametode atau teknik untuk memahami sifat yang dimiliki dioda dalam upaya membatumembantu mempermudah dalam mengimplementasikannya pada sebuah rangkaian atau sistem elektronika.
penguatan sinyal	:	kenaikan level sinyal keluaran yang besarnya melebihi level sinyal masukannya.
penguat <i>inversting</i>	:	kemampuan sebuah rangkaian penguat yang mampu menghasilkan fase sinyal yang berbeda antara sinyal masukan dengan dan sinyal keluarannya.
penguat <i>non-inverting</i>	:	sebuah rangkaian penguat yang menghasilkan fase yang sama dengan masukannya dan hanya mampu menguatkan level sinyal masukan saja
penguatan lingkaran terbuka	:	nilai penguatan terbuka yang dimiliki oleh sebuah op-amp yang besarnya tak berhingga

penguatan lingkaran tertutup	:	nilai penguatan yang dimiliki sebuah op-amp yang besarnya berhingga serta mampu dikendalikan sesuai dengan kebutuhan
rangkaian ekuivalen	:	rangkaian pengganti dari rangkaian aslinya yang bertujuan menyederhanakan dan memudahkan dalam menganalisis suatu besaran atau objek yang diteliti
rangkaian umpan balik	:	rangkaian yang memiliki peranan sebagai pengendali dan penstabil sistem serta mampu menentukan hasil akhir dari suatu sistem yang dirancang
reaktansi	:	Nilai resistansi yang dimiliki oleh sebuah komponen yang besarnya dipengaruhi oleh perubahan sinyal bolak-balik masukannya, seperti reaktansi pada komponen kapasitor dan induktor.
rectification	:	proses konversi atau mengubah sinyal bolak-balik (AC) menjadi sinyal searah (DC) yang terjadi dalam sistem penyearah
reverse bias	:	menunjukkan kondisi arus dalam keadaan mundur (balik) melalui bahan semikonduktor
semikonduktor	:	bahan yang memiliki kemampuan menghantarkan arus listrik di antara bahan konduktor dengan insulator yang harga resistivitas jenisnya di antara kedua bahan tersebut
semikonduktor ekstrinsik	:	semikonduktor yang tersusun dari campuran bahan lain selain bahan utamanya, yaitu silikon atau germanium
semikonduktor intrinsik	:	semikonduktor murni yang tersusun hanya dari satu bahan utama, yaitu silikon atau germanium

semikonduktor tipe-P	: Bahan semikonduktor mengalami kekurangan elektron (meninggalkan lubang) akibat adanya pencampuran dengan bahan lain yang memiliki perbedaan jumlah elektron valensinya.
semokinduktor tipe-N	: Bahan semikonduktor mengalami kelebihan elektron akibat adanya pencampuran dengan bahan lain yang memiliki perbedaan jumlah elektro valensinya.
skala ukur	: Rentang batas nilai minimum dan maksimum sebagai wilayah kerja sistem terutama lebih diterapkan pada sebuah alat ukur.
tank circuit	: rangkaian yang menentukan frekuensi kerja penguat daya kelas C yang nilainya dapat dibuat tetap atau bervariasi
tegangan <i>barrier</i>	: tegangan penghalang dioda saat dioda tersebut mulai bekerja pada daerah arus maju
tegangan kaki	: tegangan <i>barrier</i> yang memiliki harga 0,7 V untuk bahan dasar silikon dan 0,3 V untuk bahan dasar germanium.
tegangan rata-rata	: tegangan searah hasil dari proses penyearahan sinyal oleh rangkaian penyearah
tegangan <i>ripple</i>	: Tegangan riak atau tegangan searah yang masih mengandung tegangan bolak-balik yang cukup besar disebabkan ketidaksempurnaan proses penyearahan. Nilai tegangan riak ini tidak cukup besar dibandingkan tegangan searah.

- teorema Norton : salah satu teori elektronika atau model analisis untuk menyederhanakan rangkaian kompleks dengan menggunakan sumber arus (*current source*) ekuivalen dan pe-rangkaian resistor ekuivalen secara paralel.
- teorema Thevenin : salah satu teori elektronika atau model analisis untuk menyederhanakan rangkai-an kompleks menjadi sebuah rangkaian sederhana dengan cara membuat rangkaian pengganti yang terdiri dari sebuah sumber tegangan yang terhubung seri dengan sebuah resistansi ekuivalennya
- titik Q (*quiescent*) : Titik kerja komponen semikonduktor di sepanjang garis beban yang posisinya akan bergeser dan berubah. Titik Q ini akan menentukan daerah operasi saturasi, aktif, dan *cut-off* dari sebuah komponen semikonduktor seperti transistor.
- transfer daya maksimum : nilai yang menunjukkan distribusi daya yang dikirim oleh sumber daya ke beban-nya pada sebuah rangkaian

# Daftar Pustaka

- Asadi, F., (2022). *Essential circuits analysis using NI Multisim and Matlab*. Springer.
- Asadi, F., (2022). *Simulation of power electronics circuits with Matlab: Design, analyze, and prototype power electronics*. Apress.
- Asadi, F., (2023). *Applied op amp circuits: Analysis and design with NI Multisim*. Springer Nature Singapore.
- Attia, J. O., (2010). *PSpice and Matlab for Electronics: An integrated approach* (2nd ed.). CRC Press.
- Berns, K., Kopper, A., & Schurmann, B., (2021). *Technical foundations of embeded system: Electronics, system theory, component and analysis*. Springer.
- Lopez, D. B., & Castro, F. E. G. (2011). *Circuit analysis with Multisim*. Morgan & Claypool Publishers.
- Lopez, D. B., Castro, F. E. G., & Villagomez, O. C., (2012). *Advanced circuit simulation using Multisim workbench*. Morgan & Claypool Publishers.
- Long, S., (2024). *Communication electronics: RF design with practical application using Pathwave/ADS software*. River Publishers.
- Microchip Technology Inc. (2021). N-Channel Enhancement-Mode Vertical DMOS FET [Datasheet]. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/2n7000-n-channel-enhancement-mode-vertical-dmos-fet-data-sheet-20005695a.pdf>

- Semiconductor Components Industries, LLC. (1998). *2N3906 general purpose transistors, PNP silicon* [datasheet]. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3906-d.pdf>
- Semiconductor Components Industries, LLC. (2013). [Datasheet transistor bipolar NPN Tipe 2N2222].
- Sobot, R., (2021). *Wireless communication electronics: Introduction to RF circuits and design techniques*. Springer International Publishing.
- Texas Instruments. (2015). *LM741 operational amplifier* [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>
- Vishay Intertechnology Inc. (2024). [Datasheet komponen dioda silikon tipe 1N4xxx]. <https://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>
- Yang, W. Y., Kim, J., Park K. W., Baek, D., Lim S., Joung J., Park S., Lee H. L., Choi W. J., & Im, T. (2020). *Electronic circuits with Matlab, PSpice, and Smith chart*. Wiley.

## Tentang Penulis



**Budi Herdiana** dilahirkan di Tasikmalaya, tanggal 14 Agustus 1977. Ia merupakan dosen pengajar pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Komputer Indonesia (UNIKOM) Bandung untuk KK Elektronika Telekomunikasi.

Penulis adalah lulusan sarjana (S-1) dari Universitas Kebangsaan tahun 2002 dengan mengambil Jurusan Teknik Elektro dengan bidang keahlian elektronika telekomunikasi. Pada tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan S-2 pada Program Studi Teknik Elektro Telekomunikasi Fakultas Pascasarjana di Universitas Telkom dengan mengambil bidang keahlian *wireless communication system* serta menyelesaikan program magisternya pada tahun 2014.

Saat ini penulis dipercaya mengampu beberapa mata kuliah keahlian, antara lain, Sistem Elektronika, Antena & Propagasi, Mobile Communication System, Digital Communication System, Optic Communication System, Wireless Communication System. Saat ini

penulis masih aktif melakukan penelitian khususnya di bidang aplikasi *artificial intelligence* pada bidang pertanian, *mobile communication system*, *antenna design technology*, *internet of things*, *renewable energy system* dan *instrumentation electronics design*.

# Indeks

- amplification*, 2, 181, 245, 399
- amplifier*, 241, 246, 251, 310, 401, 406, 410, 411
- anode, 72, 111, 409
- arus drift, 57, 69, 70, 409
- average circuit*, 265
- bandwidth*, 245, 291, 305
- bipolar junction transistor* (BJT), 172, 191, 195, 199, 210, 293, 294, 295
- bode plot*, 300, 301, 304, 305
- buffer* (penyangga), 257, 399
- bypass capacitor* (kapasitor bypass), 149, 150, 151, 295
- cacat silang (*cross distortion*), 323, 324
- closed loop amplification*, 245
- CMMR, 242, 243, 284
- common amplifier*, 241
- common drain*, 195
- common emitter*, 313
- common gate*, 195
- common source*, 195, 233
- critical frequency*, 271, 410
- daerah aktif, 120, 124, 125, 130, 135, 312, 341
- daerah *cut-off*, 229, 314, 321, 324, 339
- daerah deplesi (*depletion*), 176, 210, 219, 233, 399
- daerah jenuh (saturasi), 120
- daya termoelektrik, 49
- drop voltage*, 6
- efek pembebanan, 410
- emitter follower*, 322
- energi terlarang (*energy gap*), 54, 56, 69, 70
- enhancement*, 233, 405

faktor penguatan (*amplification factor*), 181, 242, 244

*forward bias*, 324, 400

frekuensi kritis (*critical frequency*), 272, 291, 293, 296, 297, 298, 299, 300, 304, 305, 306

*full wave rectifier*, 92, 113

garis beban, 188, 197, 198, 206, 222, 223, 225, 310, 314, 327, 333, 400, 404

gate bias, 219

ikatan kovalen, 47, 52, 54, 56, 64

impedansi, 175, 192, 195, 196, 199, 201, 202, 203, 210, 295, 316, 317, 320, 400

integrator, 240, 268, 269, 270, 271, 272, 286

*inverting amplifier*, 246, 251

kaki dioda, 72, 73, 101

katode, 72, 111

komparator, 278, 279, 280, 281, 376, 380

*loading effect* (efek pembebanan), 166, 411

medan listrik, 51, 57

medan magnet, 51, 69

metode jembatan (*bridge*), 103

millers' integrator, 268

mobilitas elektron, 60

mobilitas lubang, 57

model sinyal AC, 135, 142, 143

model sinyal DC, 223

multimeter, 22, 28, 29, 88, 111, 112, 167, 203

multivibrator astabil, 388

*narrow band*, 336, 365

*non-inverting amplifier*, 246

*open loop amplification*, 245

osilasi, 345, 346, 348, 349, 351, 352, 353, 354, 360, 361, 363, 364, 368, 379, 384, 401

osilator, 210, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 374, 376, 384, 385, 386, 387, 401

osilator tertala, 364

pendekatan (aproksimasi) dioda, 74, 78, 79, 82, 84, 85, 89, 113 401

penguatan bersama (*common amplifier*), 241

penguatan diferensial, 241, 242, 243

penguat bipolar, 295, 296, 298, 304, 305

penguat komplementer, 322, 324

penguat operasional, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 246, 248, 250, 251, 253, 255, 261, 274, 278, 283, 284, 359, 363

penguat penjumlah (*summing amplifier*), 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265

penyangga, 257, 358, 399  
 persamaan Shockley, 178, 181, 182, 184  
 pita energi (*energy band*), 54, 61  
 P-N junction, 65, 66, 70  
*push pull*, 335  
*quiescent*, 73, 404  
 rangkaian diferensiator, 274, 275, 276  
 rangkaian terintegrasi, 240, 376, 380  
 rangkaian umpan balik, 249, 250, 402  
*rectifier*, 72, 92, 107, 113  
 rekombinasi, 68, 70  
 resistansi AC *emitter*, 150  
 resistansi bulk, 89, 113  
 resistansi dinamik, 89  
 resistansi internal, 6, 7, 8, 9, 10, 21, 23, 28, 89, 380  
 resistansi statis, 89  
*reverse bias*, 65, 72, 101, 113, 125, 151, 402  
 semikonduktor ekstrinsik, 402  
*small signal circuit analysis*, 143  
*subtraction circuit*, 265  
*tank circuit*, 332, 335, 348, 363, 365, 403  
 tegangan kaki, 71, 72, 76, 82, 83, 99, 403  
 tegangan *pinch off*, 176, 177  
 tipe pengosongan, 210, 211, 212  
 tipe peningkatan, 210  
 titik Q, 188, 206, 219, 220, 223, 225, 226, 310, 314, 404  
 transistor efek medan, 171, 172, 174, 178, 179, 210  
*zero crossing detector*, 279

Sistem elektronika adalah sebuah fundamental dari teknologi-teknologi modern. Sistem elektronika terdiri atas rangkaian elektronika yang dibangun dari beberapa komponen yang saling berhubungan, bekerja sama, dan digerakkan oleh energi guna menghasilkan suatu sistem yang memiliki fungsi tertentu. Hampir setiap aspek kehidupan modern sehari-hari bergantung pada elektronika, mulai dari proses komputerisasi, komunikasi, otomatisasi, hingga penggunaan spesifik seperti dalam bidang energi, medis, keuangan, dan hiburan. Saat ini, sistem elektronika adalah bagian tak terpisahkan dari kemajuan iptek dunia. Oleh karena itu, mempelajari dasar-dasar elektronika tentulah akan menjadi sebuah wawasan yang sangat berfaedah di kehidupan modern ini.

Secara komprehensif, buku ini membahas dasar-dasar elektronika, penjelasan mendasar fungsi-fungsi setiap komponen elektronika, dan penyusunan rangkaian elektronika. Buku ini dilengkapi dengan petunjuk untuk mendesain tiap rangkaian yang dibahas, analisis karakteristik rangkaian, dan contoh soal pada tiap bahasan. Pada contoh soal diberikan tahapan langkah-langkah penyelesaiannya dan hasil simulasinya menggunakan beberapa peranti lunak dan pemrograman sehingga kedua hasil tersebut dapat dibandingkan. Selain itu, pada akhir tiap bab diberikan soal-soal untuk menguji pemahaman pembaca. Oleh karena itu, buku ini baik dibaca oleh kalangan pelajar menengah atas tingkat akhir, mahasiswa, serta kalangan masyarakat yang tertarik atau memiliki hobi dalam mempelajari sistem elektronika.

BRIN Publishing  
*The Legacy of Knowledge*

Diterbitkan oleh:  
**Penerbit BRIN**, anggota Ikapi  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,  
Jln. M.H. Thamrin No. 8,  
Kota Jakarta Pusat 10340  
E-mail: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)  
Website: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

DOI: 10.55981/brin.1002



ISBN 978-602-6303-81-3



Buku ini tidak diperjualbelikan.