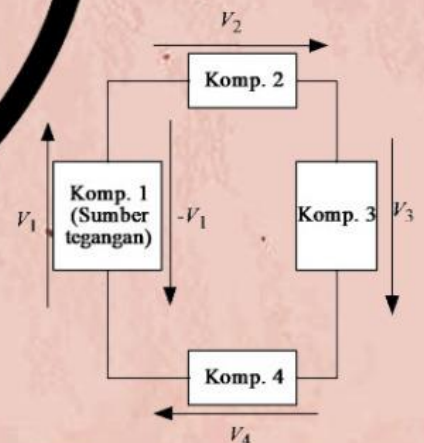
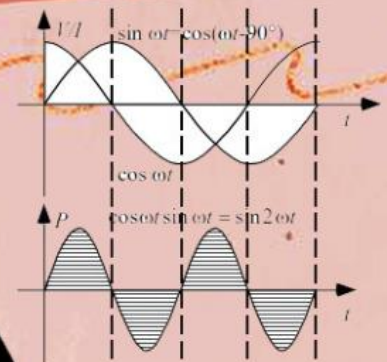
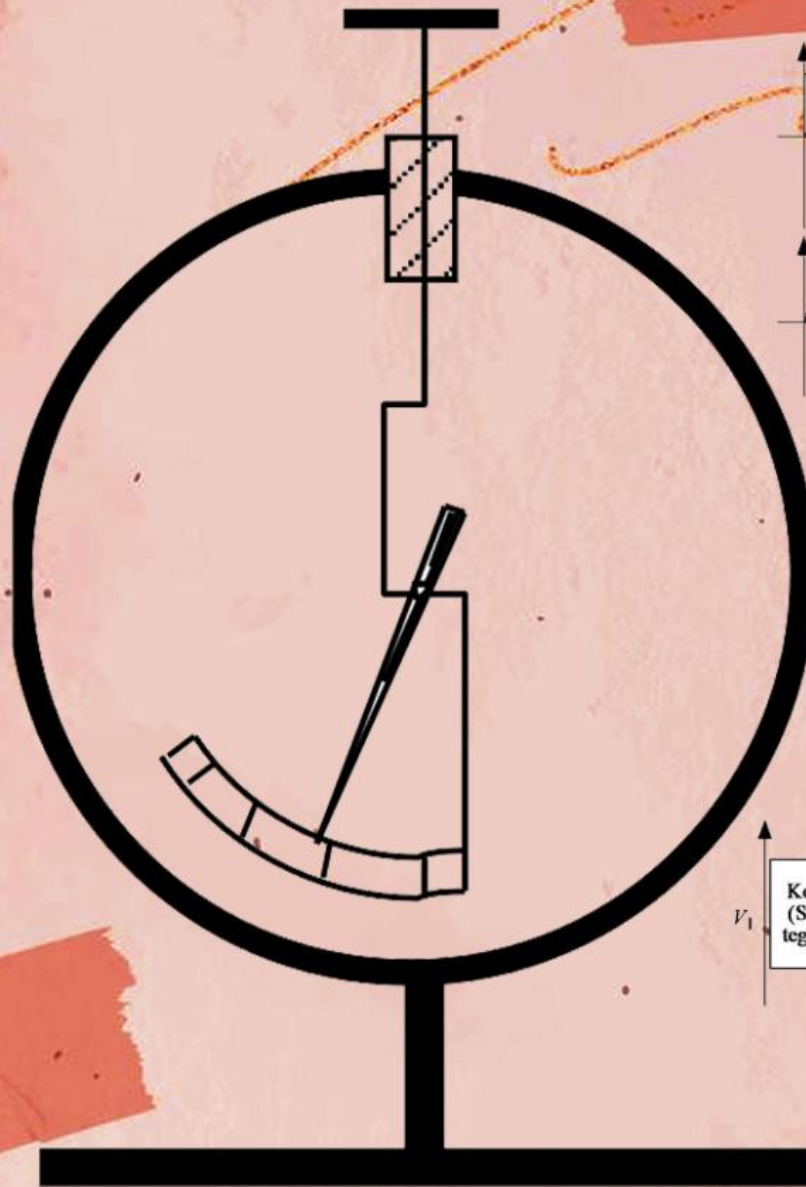
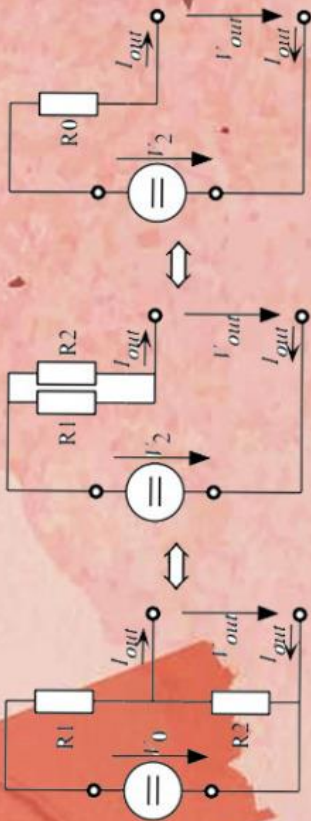


ELEKTRONIKA DASAR

Liefson Jacobus, S.Si., M.Sc.

Elyakim N. S. Patty, S.Si., M.Pd.



RAJAWALI
MEDIA UTAMA

ELEKTRONIKA DASAR

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

ELEKTRONIKA DASAR

Liefson Jacobus, S.Si., M.Sc.
Elyakim Nova Supriyedi Patty, S.Si., M.Pd.



ELEKTRONIKA DASAR

**Diterbitkan pertama kali oleh PT Rajawali Media Utama
Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang *All Rights Reserved*
Hak penerbitan pada PT Rajawali Media Utama
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa
seizin tertulis dari Penerbit**

Cetakan Pertama: Oktober 2023
21 cm x 29,7 cm

ISBN: 978-623-09-6244-8

Penulis:

Liefson Jacobus, S.Si., M.Sc.
Elyakim Nova Supriyedi Patty, S.Si., M.Pd.

Editor

Ketut Widya Kayohana, M.Pd.

Desain Cover:

Stevri Supriyeli Deosorio

Diterbitkan Oleh:

PT. Rajawali Media Utama

NIB. 2705230004279

Jln. ABG, Bagek Kembar, Tanjung Karang Permai, Kota Matara, Provinsi Nusa
Tenggara Barat

Email: rajawalimediautama@gmail.com

Website: <https://rajawalimediautama.site>

Whatshaap: 0821-3441-1432

PRAKATA

Buku Ajar kuliah Elektronika Dasar ini disusun berdasarkan rangkuman dari buku-buku sesuai dalam daftar pustaka dan disesuaikan dengan silabus yang ada, dengan maksud untuk memberikan kemudahan bagi para pembaca dan khususnya mahasiswa untuk belajar Elektronika dengan harapan memiliki kemampuan berpikir serta terampil dalam praktek.

Buku Ajar ini tidak menjelaskan seluruh bidang elektronika dan tidak ditulis untuk menggantikan textbook yang sudah ada, tetapi Buku Ajar ini mau mendukung para mahasiswa untuk mendapatkan suatu fondasi dasar dalam pengertian mengenai elektronika sehingga mereka bisa mengerti dan memanfaatkan buku-buku dalam bidang ini dengan mudah.

Dalam Buku Ajar ini telah dibicarakan hal yang paling dasar dari bidang elektronika, yaitu dasar-dasar dari fisika mengenai arus dan voltase, beberapa prinsip mengenai voltase dan arus AC dan DC disajikan dan kemudian hal-hal dasar mengenai sifat dari voltase dan arus dalam rangkaian-rangkaian sederhana, yaitu hukum-hukum Kirchoff dijelaskan. Mengenai sifat dari berbagai komponen dasar seperti resistor dan berbagai jenis diode tidak dibahas lagi dalam Buku Ajar ini.

Kemudian dalam Buku Ajar ini dibicarakan mengenai komponen yang memiliki ketergantungan waktu dalam sifat listriknya, yaitu kondensator dan kumparan. Sebelum sifat transistor dan pemakaiannya dalam rangkaian sederhana dijelaskan, masih ada satu pasal mengenai teori semikonduktor sehingga pembaca bisa mengerti secara kualitatif, apa yang terjadi dalam komponen semikonduktor. Rangkaian penguat dengan transistor dan sifatnya dijelaskan.

Semoga Buku Ajar ini bermanfaat bagi semua mahasiswa, Siswa, pendidik sehingga proses belajar mengajar semakin lancar dan setiap peserta didik semakin mengerti mengenai bidang elektronika dan pemakaiannya dalam segala kebutuhan.

Yogyakarta, Oktober 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TENTANG BUKU	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI	vi
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)	ix
1. Dasar-Dasar Fisika	1
1.1. Pendahuluan	1
1.2. Dasar tentang arus dan voltase	1
1.2.1. Muatan dan medan listrik.....	1
1.2.2. Voltase dalam satu Loop (dalam Rangkaian seri)	4
1.2.3. Arus listrik, daya listrik.....	5
1.2.4. Arus dalam rangkaian	6
2. Dasar Elektronika	7
2.1. Arus searah dan arus bolak-balik	7
2.1.1. Definisi DC (searah) dan AC (bolak-balik)	7
2.1.2. Voltase / arus campur	8
2.1.3. AC dalam bentuk sinus / cosinus	8
2.1.4. AC dalam bentuk cosinus dengan memakai bilangan kompleks	9
2.2. Daya Arus Bolak-Balik.....	11
2.2.1. Kalau fase sama.....	11
2.2.2. Kalau fase berbeda	14
3. Teori Rangkaian	16
3.1. Beberapa rangkaian dasar	16
3.1.1. Rangkaian seri	16
3.1.2. Rangkaian paralel.....	20
3.1.3. Rangkaian seri yang dibebani	22
3.1.4. Rangkaian seri dan paralel dengan banyak resistor	26
3.2. Sumber tegangan dan beban	26
3.3. Resistivitas Masukan (Resistivitas Input)	30
3.3.1. Definisi dari resistivitas masukan	30
3.3.2. Pengaruh dari Resistivitas Masukan pada Voltmeter dan Amperemeter	31
3.4. Penguat (Amplifier).....	32
3.4.1. Prinsip-Prinsip Kerja	32
3.4.2. Daya output	35
3.4.3. Beberapa definisi lagi mengenai penguat	36

4.	Kapasitansi dan Induktivitas	38
4.1.	Kapasitansi	38
4.2.	Induktivitas	40
4.3.	L, C dan R dalam Untai Arus Bolak-Balik.....	43
4.3.1.	Kumparan Real: L dan R dirangkai secara seri.....	43
4.3.2.	“Pembagi Tegangan” dengan Resistor dan Kondensator	44
4.3.3.	“Pembagi Tegangan” dengan Kondensator dan Kumparan	49
4.3.4.	L, C dan R dalam Untai Seri	51
4.3.5.	L, C dan R dalam Untai Paralel	51
4.3.6.	Filter dengan Orde yang lebih tinggi	51
5.	Teori Semikonduktor	54
5.1.	Arus Listrik dalam Bahan.....	54
5.2.	Struktur Kristal dari Semikonduktor	56
5.3.	Konduktivitas dari Atom Asing	59
5.3.1.	<i>Doping</i> dari Semikonduktor	59
5.3.2.	Semikonduktor n	59
5.3.3.	Semikonduktor p	61
5.3.4.	Kesimpulan mengenai Semikonduktor dengan Atom Asing	63
5.4.	Arus Listrik dalam Semikonduktor	63
5.4.1.	Arus Medan	63
5.4.2.	Arus Difusi	64
5.4.3.	Arus Seluruhnya.....	65
5.5.	Sambungan pn dalam Gambaran Kristal	65
5.5.1.	Sambungan pn tanpa Voltase.....	65
5.5.2.	Sambungan pn dengan Voltase bias balik	67
5.5.3.	Sambungan pn dengan Voltase bias maju	68
5.6.	<i>Injection Transistor</i> dalam Gambaran Kristal	69
6.	Transistor	72
6.1.	Sifat Transistor.....	72
6.1.1.	Definisi Istilah yang dipakai	72
6.1.2.	Sifat input (Sambungan antara Basis dan Emitor)	73
6.1.3.	Sifat Output (Sifat Kolektor).....	73
6.1.4.	Resistivitas Input dari Transistor.....	77
6.1.5.	Nilai-nilai Maksimal untuk Transistor	78
6.2.	Rangkaian Penguat Sederhana dengan satu Transistor	79
6.2.1.	Penjelasan Rangkaian.....	79
6.2.2.	Penguatan dari rangkaian ini	81
6.2.3.	Input dari rangkaian ini	84
6.2.4.	Daerah Kerja dari Rangkaian Penguat	84
6.2.5.	Mengatur Titik Kerja.....	85
6.2.6.	Impedansi Masukan dan Impedansi Keluaran	90
6.3.	Rangkaian-Rangkaian Penguat Transistor yang lain	91
6.3.1.	*Rangkaian Penguat dengan <i>Feedback</i> Arus oleh Resistor Emitor.....	91
6.3.2.	Rangkaian pengikut emitor	95
6.3.3.	Rangkaian Sumber Arus Konstan	98

6.3.4. Rangkaian Darlington	101
7. Transistor sebagai sakelar	103
7.1. Fungsi sebagai Sakelar	103
7.2. Contoh Rangkaian Digital	104
7.2.1. Flip-Flop RS	104
7.2.2. Multivibrator	105
DAFTAR PUSTAKA.....	107
PROFIL PENULIS.....	110

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)



UNIVERSITAS KRISTEN IMMANUEL (UKRIM) YOGYAKARTA

Jalan Solo KM 11.1 Purwomartani, Kalasan, Kabupaten, Sleman,

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY)

Telp. (0274) 496256, Fax. (0274) 496423, www.ukrimuniversity.ac.id ,

e-mail : humas@ukrimuniversity.ac.id

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS) PROGRAM STUDI FISIKA

Nama Mata Kuliah (MK)	Kode MK	Rumpun MK	Bobot (SKS)	Semester	Tanggal	Versi
Elektronika Dasar	412051	Elektronika Instrumentasi	2			Rev 0.0
Otorisasi	Pengembang RPS		Koordinator Rumpun MK		Ketua Program Studi	
	(Liefson Jacobus, M.Sc)		(Liefson Jacobus, M.Sc)		(Caesnan Marendra G.L., M.Sc.)	

Capaian Pembelajaran	CPL-PRODI
	<p>S6 Berkontribusi dalam peningkatan mutu kehidupan bermasyarakat, berbangsa, bernegara, dan kemajuan peradaban berdasarkan Pancasila;</p> <p>S11 Memiliki kemauan untuk terus belajar dan bersikap terbuka terhadap perubahan zaman</p> <p>KU1 Menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi sesuai dengan bidang keahliannya;</p> <p>KU2 Mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan, teknologi atau seni sesuai dengan keahliannya berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah untuk menghasilkan solusi, gagasan, desain, atau kritik seni serta menyusun deskripsi saintifik hasil kajiannya dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir;</p> <p>P3 Menguasai pengetahuan tentang teknologi yang berdasarkan fisika dan penerapannya</p> <p>KK3 Mampu menganalisis berbagai solusi alternatif yang ada terhadap permasalahan fisis dan menyimpulkannya Untuk pengambilan keputusan yang tepat;</p> <p>CP 4 Mampu menerapkan ilmu fisika dan melakukan rancang-bangun eksperimen sederhana, serta menerapkannya Dalam kehidupan sehari-hari.</p>
	CPL MK
Deskripsi Singkat Mata Kuliah	<p>CPMK 1; Mahasiswa mampu memahami tentang dasar fisika dari elektronika</p> <p>CPMK 2; Mahasiswa mampu memahami fungsi dari komponen elektronika resistor, kapasitor, induktor, dioda dan transistor</p> <p>CPMK 3; Mahasiswa mampu membaca dan menganalisis rangkaian elektronika yang sederhana</p>
	<p>Mata kuliah ini meliputi dasar-dasar elektronika yang diawali dengan dasar-dasar fisika kemudian mengkaji komponen-komponen elektronika seperti resistor, kapasitor, induktor, dioda, transistor termasuk menganalisis cara kerjanya dalam rangkaian. Juga akan dibahas teori semikonduktor yang merupakan bahan dasar dari komponen dioda dan transistor. Mata kuliah ini merupakan dasar dari matakuliah elektronika Lanjutan</p>
Materi Pembelajaran/Pokok Bahasan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gaya dari muatan listrik, Medan listrik, Voltase, Arus, Daya listrik 2. Hukum-hukum Kirchoff 3. Voltase DC, Voltase AC dan Voltase campuran; Daya listrik AC 4. Rangkaian resistor seri dan paralel; resistivitas pengganti, pembagian tegangan/arus; komponen potensiometer; 5. Rangkaian seri yang dibebani: resistivitas keluaran; rangkaian ekuivalen untuk keluaran; teorema Thévenin, teorema Norton; rangkaian ekuivalen Thévenin dan Norton 6. Bahan semikonduktor ekstrinsi, bahan semikonduktor intrinsik

	7. Sambungan PN pada Semikonduktor, Rangkaian ekivalen dioda 8. Analisa garis beban, Karakteristik Dioda 9. Aplikasi dioda pada rangkaian 10. Konstruksi dan prinsip kerja transistor, konfigurasi common base, emitter dan collector 11. Desain titik kerja transistor, rangkaian bias pada transistor 12. Penguat sederhana, Rangkaian penguat transistor						
Pustaka	1. Albert Paul Malvino, <i>Electronic Principles</i> , Mc Graw Hill Book Co, 1984 2. Richard Blocher, <i>Dasar Elektronika</i> , 2003 3. Sutrisno, <i>Elektronika Dasar</i> , 1986						
Media Pembelajaran	Google Classroom, Sistem Informasi (SI) Mahasiswa UKRIM, WhatsApp Group, YouTube.						
Team Teaching							
Mata Kuliah Syarat	-						
Minggu Ke-	Kemampuan Akhir yang diharapkan	Bahan Kajian (Materi Pelajaran)	Metode Pembelajaran	Waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa	Kriteria Penilaian dan Indikator	Bobot Nilai
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa dasar fisika dari elektronika	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dasar Fisika Gaya dari muatan listrik ▪ Medan listrik, Voltase, Arus, Daya listrik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas. 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi	7%
2	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa hukum	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hukum-hukum Kirchoff 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya- 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan,	7%

	Kirchhoff		<ul style="list-style-type: none"> Jawab Tugas Individu 1 dalam bentuk latihan soal perhitungan 	BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> an pertanyaan. Menyampaikan pendapat dengan jelas. Melakukan soal perhitungan. 	<p>ketepatan, dan penugasaan.</p> <p>Indikator : Diskusi dan tugas tertulis</p>	
3	Mahasiswa mampu menjelaskan dan membedakan voltase DC dan voltase AC serta daya listrik AC	<ul style="list-style-type: none"> Voltase DC, Voltase AC dan Voltase campuran; Daya listrik AC 	<ul style="list-style-type: none"> Ceramah Diskusi Tanya-Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> Saling berbagi pengetahuan. Mengemukakan pertanyaan. Menyampaikan pendapat dengan jelas. Melakukan soal perhitungan. 	<p>Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan.</p> <p>Indikator : Diskusi dan kerjakan soal</p>	7%
4	Mahasiswa mampu membedakan dan menganalisis rangkaian seri dan paralel	<ul style="list-style-type: none"> Rangkaian resistor seri dan paralel; resistivitas pengganti, pembagian tegangan/arus; komponen potensiometer; 	<ul style="list-style-type: none"> Ceramah Diskusi Tanya-Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> Saling berbagi pengetahuan. Mengemukakan pertanyaan. Menyampaikan pendapat dengan jelas. Melakukan soal perhitungan. 	<p>Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan.</p> <p>Indikator : diskusi dan kerjakan soal</p>	7%
5	Mahasiswa mampu menganalisis	<ul style="list-style-type: none"> Rangkaian seri yang dibebani: resistivitas keluaran; 	<ul style="list-style-type: none"> Ceramah Diskusi 	TM : 2 x 50"	<ul style="list-style-type: none"> Saling berbagi pengetahuan. 	<p>Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa</p>	7%

	rangkaian seri yang dibebani; Mahasiswa mampu membedakan rangkaian ekuivalen Thévenin dan Norton	rangkaian ekuivalen untuk keluaran; teorema Thévenin, teorema Norton; rangkaian ekuivalen Thévenin dan Norton	▪ Tanya-Jawab	TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas. ▪ Melakukan soal perhitungan.	di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi dan kerjakan soal perhitungan	
6,7	Mahasiswa mampu menjelaskan tentang kapasitansi dan Induktansi	▪ Induktansi dan Kapasitansi	▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi	7%
8	UJIAN TENGAH SEMESTER						
9	Mahasiswa mampu menjelaskan dan membedakan dasar semikonduktor	Bahan semikonduktor ekstrinsi, bahan semikonduktor intrinsik	▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab ▪	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi	7%
10	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa karakteristik dioda	Analisa garis beban, Karakteristik Dioda	▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas.	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi	7%

11	Mahasiswa mampu menjelaskan dan memahami aplikasi dioda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplikasi dioda pada rangkaian 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas. 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi	7%
12	Mahasiswa mampu menjelaskan teori dasar dan menjabarkan karakteristik transistor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Konstruksi dan prinsip kerja transistor, konfigurasi common base, emitter dan collector 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas. ▪ Melakukan soal perhitungan. 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi dan kerjakan soal	7%
13,14	Mahasiswa mampu menjelaskan rangkaian untuk transistor NPN dan titik kerja	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desain titik kerja transistor, rangkaian bias pada transistor, ▪ Penguat sederhana, Rangkaian penguat transistor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya-Jawab 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60" BM : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan pertanyaan. ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas. ▪ Melakukan soal perhitungan 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan, ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi dan kerjakan soal	7%
15	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transistor sebagai saklar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ceramah ▪ Diskusi ▪ Tanya- 	TM : 2 x 50" TT : 2 x 60"	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Saling berbagi pengetahuan. ▪ Mengemukakan 	Kriteria : Partisipasi keaktifan mahasiswa di perkuliahan,	7%

	transistor pada rangkaian transistor sebagai saklar		Jawab	BM : 2 x 60"	an pertanyaan. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Menyampaikan pendapat dengan jelas ▪ Melakukan soal perhitungan.. 	ketepatan, dan penguasaan. Indikator : Diskusi dan kerjakan soal	
16	UJIAN AKHIR SEMESTER						

1. Dasar-Dasar Fisika

Setelah menempuh materi ini Mahasiswa Mampu menjelaskan dan menganalisa dasar fisika dari elektronika dan Mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa hukum Kirchhoff

1.1. Pendahuluan

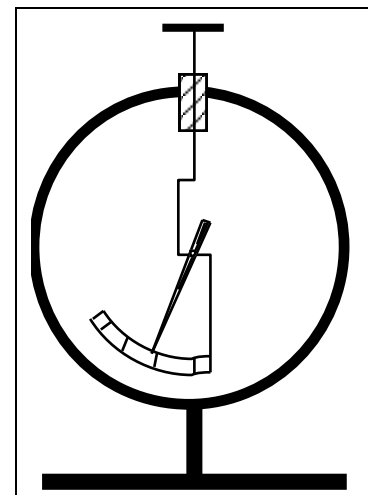
Manusia tidak bisa melihat, merasa, mencium atau menyadari tentang listrik dengan inderanya, baik untuk muatan maupun untuk medan listrik. Oleh sebab itu baru pada akhir abad ke 18 hal-hal mengenai listrik diperiksa. Tetapi pada masa sekarang listrik adalah sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari untuk digunakan sebagai sumber tenaga, misalnya untuk lampu, mesin listrik, telpon, alat-alat listrik, radio, dan komputer (Savitri 2019; Susanta and Agustoni 2007). Pada awal abad ini pemakaian listrik dalam berbagai bidang kehidupan mulai berkembang dengan pesat, apalagi setelah transistor ditemukan. Dengan transistor jalan untuk pengembangan elektronika terbuka dan sampai sekarang teknik semikonduktor yang dipakai dalam transistor masih terus berkembang menghasilkan elektronika yang semakin canggih, semakin kecil dan semakin murah. Inti dari semua alat elektronik masih tetap, yaitu transistor-transistor, walaupun sekarang sudah ada IC yang merupakan rangkaian kompleks dengan banyak transistor dalam satu IC.

Dalam kuliah elektronika ini kita akan mulai dengan mempelajari dasar-dasar fisika mengenai voltase, arus dan daya listrik terlebih dahulu, kemudian mengenal beberapa komponen elektronik yang sering digunakan dan mempelajari beberapa prinsip dasar rangkaian elektronik. Selanjutnya kita mempelajari tentang semikonduktor, fungsi dioda dan transistor secara rinci sampai akhirnya maju ke rangkaian yang lebih kompleks.

1.2. Dasar tentang arus dan voltase

1.2.1. Muatan dan medan listrik

Dalam eksperimen sederhana kita bisa melihat adanya muatan listrik: Kalau kita menggosok suatu batang plastik dengan wol, maka satu jenis muatan timbul pada batang plastik. Kalau kaca digosok dengan sutera, maka muatan yang berlawanan akan timbul pada kaca. Jumlah muatan yang timbul dapat dilihat pada Elektroskop ketika jarumnya naik. Terdapat dua jenis muatan, satu yang disebut muatan



Gambar 1.1.:
Elektroskop adalah alat untuk mengukur jumlah muatan yang terletak pada plat pengukurannya.

positif dan satu yang disebut muatan negatif(Syafriani 1999). Antara dua muatan terdapat gaya elektrostatik \vec{F} sesuai dengan rumus berikut:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (1.1)$$

dimana: ϵ_0 : konstanta dielektrik hampa udara

Q_1, Q_2 : besar dari muatan pertama dan muatan kedua

r : jarak antara kedua muatan tersebut

Gaya antara muatan bisa merupakan gaya tolak-menolak atau gaya tarik-menarik, tergantung jenis muatan(Elyakim Nova Supriyedi Patty, Liefson Jacobus, Agustina Purnami Setiawi, Bhujangga Ayu Putu Priyudahari, Muhammad Lintang cahyo Buono, Melkianus Sulus 2023). Arah dari gaya dilihat dari rumus. Kalau \vec{F} positif, berarti terdapat gaya tolak-menolak. Besar muatan diukur dalam satuan Coulomb (disingkat C).

Kalau menggambar gaya dari satu muatan Q_1 kepada suatu muatan acuan q , maka terdapat satu medan gaya. Kalau menggambar gaya \vec{F} per muatan percobaan q , maka terdapat medan listrik \vec{E} :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \Leftrightarrow \vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (1.2)$$

Berarti medan listrik merupakan gaya kepada muatan listrik. Kuat medan listrik adalah gaya per muatan yang ada di dalam medan listrik(Purba et al. 2023).

Dalam elektronika biasanya bukan medan listrik secara langsung yang dipakai, tetapi untuk mengerti sifat dari rangkaian dan komponen kita harus tahu bahwa medan listrik itu yang menggerakkan muatan dan menghasilkan arus listrik(Ponto 2018; Traska Permana et al. 2014). Kalau berbicara tentang voltase, yang sering dimaksud adalah medan listrik yang menghasilkan voltase.

Kalau suatu muatan q bergerak dalam medan \vec{E} , maka terdapat gaya kepada muatan selama digerakkan sejauh jarak \vec{s} , berarti terdapat usaha yang dikerjakan kepada muatan q . Usaha yang dikerjakan sebesar:

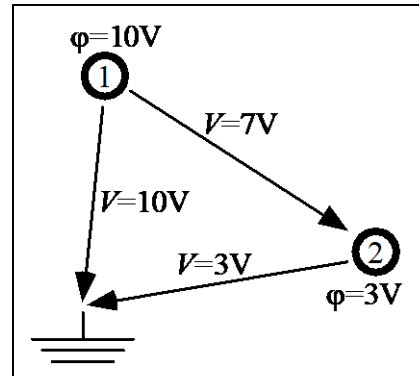
$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{s} \quad (1.3)$$

Karena medan listrik selalu merupakan medan potensial, maka usaha yang dikerjakan kepada suatu muatan q tertentu tidak akan tergantung pada jalur geraknya, tetapi hanya tergantung pada tempat awal dan tempat akhir geraknya. Sebab itu satu besaran baru bisa didefinisikan di mana besaran tersebut menunjukkan usaha yang dikerjakan kepada suatu muatan dan besaran itu tergantung hanya pada dua tempat dalam medan listrik saja, yaitu tempat awal dan tempat akhir dari gerakan muatan tersebut. Besaran tersebut diberi nama voltase V dan satuan yang dipakai adalah Volt (V)(Kuswanto 2010). Besar dari voltase ini adalah usaha per muatan percobaan. Dengan definisi ini dan (1.3), didapatkan rumus sbb.:

$$V = \frac{W}{q} = \vec{E} \cdot \vec{s} \quad (1.4)$$

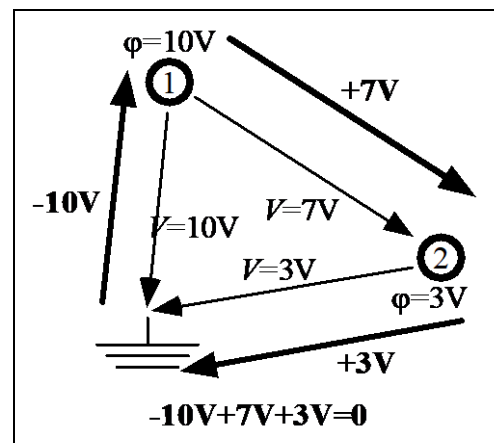
Berarti kalau muatan sebesar satu Coulomb dipindahkan antara dua tempat dan antara dua tempat tersebut terdapat voltase 1V, maka usaha yang dikerjakan pada muatan tersebut adalah 1 Joule.

Dari definisi ini langsung jelas bahwa voltase selalu merupakan sifat antara dua tempat, bukan sifat dari satu tempat saja. Untuk mendapatkan suatu sifat dari satu tempat tertentu, biasanya voltase diukur terhadap satu tempat netral, misalnya terhadap bumi(Sujana 2014). Tempat netral itu merupakan referensi dan voltase antara suatu tempat dan referensi disebut potensial dari tempat itu. Dengan definisi ini jelas bahwa voltase bisa juga dinyatakan sebagai beda potensial. Misalnya dalam gambar 1.2. point 1 berada pada potensial 10V, berarti voltase dari point 1 ke bumi (tempat referensi) sebesar 10V. Point 2 berada pada potensial 3V, berarti voltase antara point 2 dan bumi sebesar 3V. Dalam situasi ini voltase antara point 1 dan point 2 sebesar 7V, karena beda potensial $V = 10V - 3V = 7V$. Situasi ini digambarkan dalam gambar 1.2.. Voltase (beda potensial) sering digambarkan sebagai anak panah. Kita akan menghitung voltase positif kalau potensial pada kaki panah lebih tinggi daripada potensial pada ujung panah. Kalau potensial pada kaki panah lebih rendah, voltase dihitung negatif. Karena usaha untuk menggerakkan muatan dalam medan listrik tidak tergantung dari jalur gerakannya, maka kalau muatan digerakkan dari satu tempat tertentu dan akhirnya kembali ke tempat itu, maka jumlah usaha yang dikerjakan pada muatan itu akan nol(Tasiam 2017). Sebab itu usaha per muatan, yaitu voltase juga tidak tergantung dari jalur dan kalau kita jumlahkan voltase-voltase dalam lingkaran tertutup selalu akan nol kalau dihitung sesuai dengan definisi ini. Untuk contoh di atas terdapat perhitungan seperti yang diperlihatkan dalam gambar 1.3..



Gambar 1.2.: Definisi dari potensial dan voltase.

Dalam elektronika, dengan frekuensi yang tidak terlalu tinggi, medan listrik selalu ikut dalam sambungan kabel. Karena muatan dalam logam (dalam penghantar listrik atau dalam kabel atau sambungan lain) bisa bergerak (hampir) bebas, berarti resistivitas (hampir) nol, maka potensial pada seluruh permukaan dari suatu logam selalu (hampir) sama. Jadi di bagian kawat / kabel yang berbeda, misalnya pada dua ujung kabel, potensial selalu (hampir) sama. Untuk pendekatan pertama kita akan menganggap bahwa potensial pada ujung kabel atau sambungan lain persis sama, berarti voltase atau beda potensial antara dua ujung dari suatu kabel nol. Pendekatan ini cukup teliti untuk kebanyakan situasi. Hal ini berarti, kalau kita berbicara tentang potensial pada suatu tempat yang dimaksud adalah potensial dari suatu sambungan tertentu dan berlaku untuk seluruh sambungan. (Kita tidak perlu membedakan antara potensial pada ujung kanan dari kabel dengan potensial pada ujung kiri dari kabel.)



Gambar 1.3.: Kalau voltase dijumlahkan dalam lingkaran tertutup dengan memperhatikan arah dari voltase yang dihitung sesuai dengan arah gerak, maka jumlahnya selalu nol.

1.2.2. Voltase dalam satu Loop (dalam Rangkaian seri)

Jumlah voltase dalam lingkaran tertutup selalu nol. Hal ini juga berlaku untuk setiap rangkaian elektronik yang mana medan listrik diarahkan di dalam sambungan dan komponen (Husain, Duyo, and Zainuddin 2023). Kalau diperhatikan bahwa dalam sambungan kabel atau kawat tidak terdapat perbedaan potensial (voltase), maka jelas bahwa voltase pada komponen dalam lingkaran tertutup jika dijumlahkan akan menjadi nol. Satu contoh diperlihatkan dalam gambar 1.4.. Jumlah nol bisa hanya didapatkan kalau semua tambahan nol atau kalau ada minimal satu tambahan yang negatif. Voltase yang negatif terdapat pada sumber tegangan seperti baterai atau catu daya. Maka dengan adanya sumber tegangan jumlah nol,

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0$$

bisa didapatkan dengan voltase-voltase yang berbeda dari nol, berarti ada arus yang mengalir. Dalam gambar 1.4. dianggap bahwa komponen 1 merupakan sumber tegangan. Kalau voltase dihitung dalam lingkaran tertutup voltase dari sumber tegangan harus dihitung ke arah yang sama dengan arah yang dipakai untuk menghitung voltase yang lain. Sebenarnya voltase pada catu daya terbalik dengan arah panah voltase yang dipakai dalam penjumlahan, sehingga voltase pada catu daya dihitung negatif. Hal ini bisa juga dipandang dengan cara yang lain: terdapat sumber tegangan sebesar V_1 , di mana V_1 dihitung positif, dan jumlah dari voltase pada komponen lain harus sebesar V_1 . Pandangan ini pada umumnya dipakai dan tidak bertentangan dengan hukum di atas (bahwa hasil penjumlahan harus nol), hanya cara menghitung arah dibalikkan kalau terdapat sumber tegangan:

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0 \Leftrightarrow -V_1 = V_2 + V_3 + V_4 \quad (1.5)$$

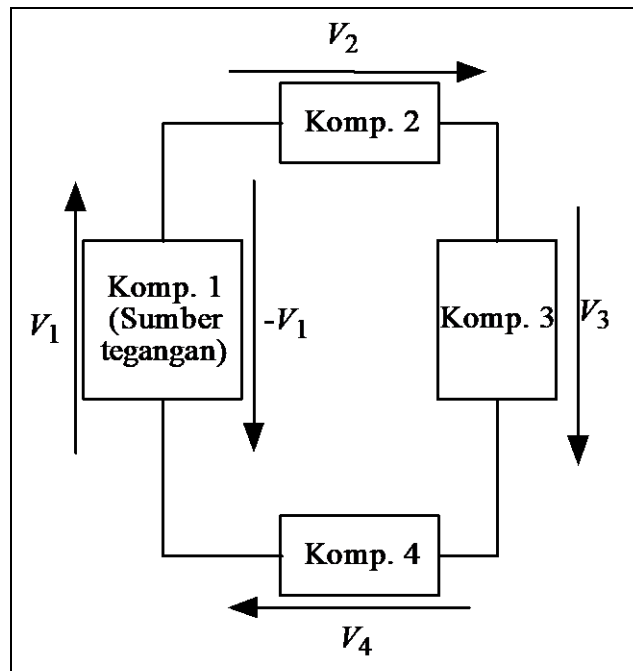
Seandainya terdapat sumber tegangan dengan voltase sebesar 10V, berarti terdapat voltase $V_1 = -10V$, (1.5) dibaca sbb.:

$$-10V + V_2 + V_3 + V_4 = 0 \Leftrightarrow 10V = V_2 + V_3 + V_4 \quad (1.6)$$

Pada rangkaian sederhana pandangan ini biasanya dipakai, tetapi kalau menyelidiki sifat rangkaian yang kompleks atau memakai komputer untuk menyelidiki rangkaian, kita harus sadar tentang cara menghitung yang jelas.

Hukum ini disebut **hukum Kirchhoff mengenai voltase (Kirchhoff's voltage law)**:

$$\text{Dalam setiap loop (lingkaran tertutup): } \sum V_i = 0 \quad (1.7)$$



Gambar 1.4.: Jumlah voltase dalam lingkaran tertutup harus nol, berarti: $V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 0$. Kalau ada sumber tegangan, kita harus hati-hati dengan arah dari voltase dalam menjumlahkannya.

Hukum ini berlaku untuk setiap loop, juga loop yang merupakan hanya bagian dari suatu rangkaian. Misalnya dalam rangkaian gambar 1.5. terdapat satu loop dari komponen 2 ke atas dan kemudian turun pada komponen 3 dan kembali ke komponen 2. Disitu jumlah voltase akan nol juga.

1.2.3. Arus listrik, daya listrik

Muatan listrik yang bergerak kita sebut sebagai arus listrik (Laksono, Prasetyo, and Marausna 2022; Musyahar and Mubarak 2017). Besar dari arus listrik didefinisikan sebagai banyaknya muatan yang lewat suatu tempat per satuan waktu. Arus listrik dinyatakan dengan lambang I dan satuannya adalah Ampere, disingkat dengan A. Maka secara rumus definisi arus listrik adalah:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.8)$$

Dengan definisi (1.4) dan (1.8) terdapat besar daya listrik P yang dikerjakan kepada muatan-muatan yang mengalir antara dua tempat yang mana antara kedua tempat itu terdapat voltase V :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{V \cdot Q}{t} = V \cdot I \quad (1.9)$$

Perlu diingat bahwa usaha / daya ini adalah daya yang diberikan kepada muatan (elektron) yang bergerak antara dua tempat. Dalam elektronika biasanya arus mengalir dalam komponen elektronik dan usaha ini diberikan kepada elektron yang bergerak di dalam komponen itu. Tetapi muatan (elektron) sendiri tidak menambah energi ketika bergerak, maka dari azas kekekalan energi dilihat bahwa usaha / daya yang sudah diberikan kepada muatan langsung diteruskan dari muatan kepada bahan yang dialiri. Berarti kalau ada arus I yang mengalir dalam suatu komponen dan antara kaki komponen terdapat voltase sebesar V , maka daya $P = V \cdot I$ diberikan kepada komponen ini. Biasanya daya listrik ini menjadi panas yang timbul dari “gesekan”¹ antara muatan dan bahan yang dialiri. Sebab itu komponen elektronik yang dialiri arus menjadi panas (Basri and Irfan 2018; Wahyudi 2018). Suhu akan tergantung dari besar daya P yang diserap didalamnya, kapasitas panas bahan dan resistivitas termis² antara komponen dan lingkungan. Kalau daya pada suatu komponen terlalu besar, komponen akan rusak karena kepanasan. Besar resistivitas termis / daya yang bisa diserap oleh suatu komponen tergantung bahannya, luas permukaan yang mengalirkan panas ke luar dan suhu yang dapat ditahan oleh komponen tersebut. Dari perusahaan yang membuat komponen elektronik biasanya diberi informasi mengenai daya maksimal yang bisa diserap oleh suatu komponen dalam buku data. Daya maksimal yang bisa diserap juga disebut sebagai disipasi daya maksimal.

¹ Memang secara mikroskopis tidak benar kalau berbicara tentang gesekan. Yang sebenarnya terjadi adalah interaksi antara elektron dan atom bahan seperti misalnya tumbukan yang mana energi elektron diberikan kepada bahan sebagai energi panas. Situasi makroskopis sepertinya terdapat gesekan antara muatan dan bahan yang dialiri.

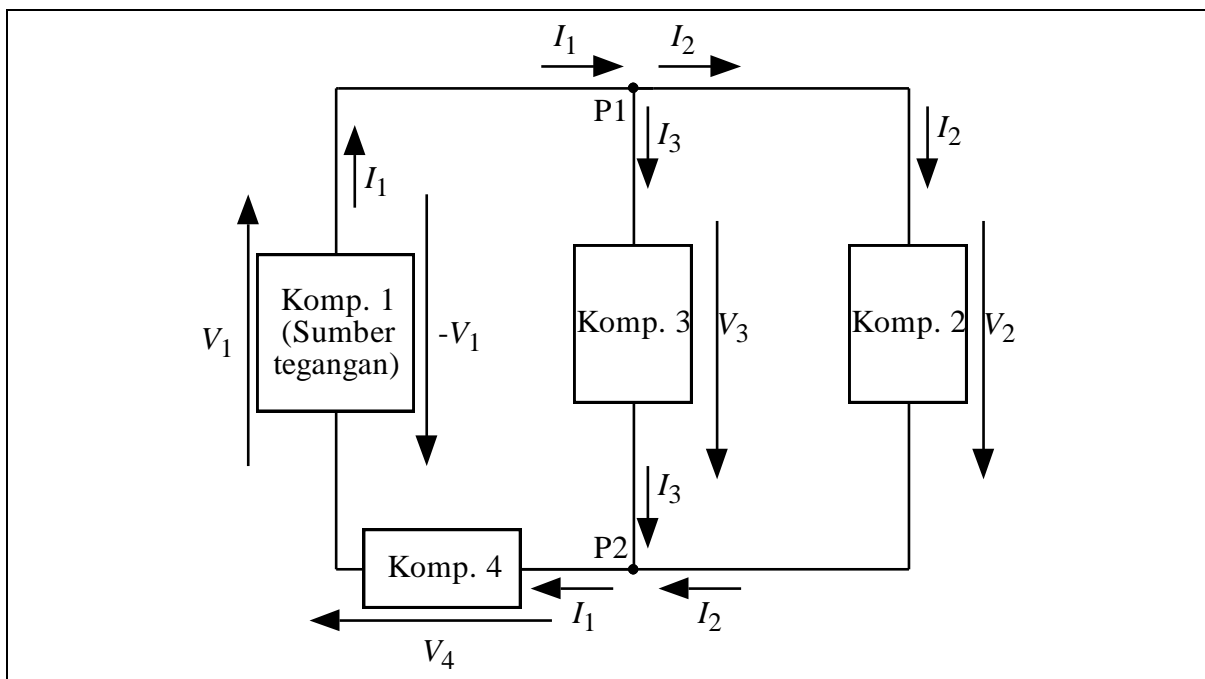
² Resistivitas termis R_{th} menunjukkan, berapa mudah / sulit energi panas P mengalir antara dua tempat dengan beda suhu ΔT .

1.2.4. Arus dalam rangkaian

Arus listrik adalah muatan listrik yang bergerak di dalam sambungan atau dalam komponen (Elyakim Nova Supriyedi Patty, Liefson Jacobus, Agustina Purnami Setiawi, Bhujangga Ayu Putu Priyudahari, Muhammad Lintang Cahyo Buono, Melkianus Sulus 2023). Seandainya arus yang keluar dari suatu tempat lebih kecil daripada arus yang masuk ke tempat itu, maka muatan pada tempat itu akan bertambah banyak terus. Tetapi hal ini tidak mungkin terjadi. Sebab arus listrik yang masuk satu tempat selalu akan keluar dari situ juga. Arti dari hukum fisika ini untuk suatu rangkaian bisa diuraikan sbb.: Kalau ada rangkaian seri, berarti tidak ada percabangan dalam aliran listrik, maka arus selalu sama pada setiap bagian dari rangkaian seri itu. Kalau ada titik percabangan yang mana aliran arus bercabang dalam suatu rangkaian, maka jumlah arus yang masuk ke dalam titik percabangan itu selalu sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik percabangan itu. Misalnya terdapat rangkaian seperti dalam gambar 1.5.. Arus I_1 masuk ke dalam point P1 dan arus I_2 dan I_3 keluar dari point P1, maka $I_1 = I_2 + I_3$. Kalau arus yang masuk ke dalam suatu titik dihitung positif dan yang keluar dihitung negatif, maka jumlah arus pada setiap titik dalam rangkaian selalu nol. Dengan definisi ini contoh titik P1 dihitung: $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Hal ini disebut sebagai **hukum Kirchoff mengenai arus (Kirchoff's current law)**:

$$\text{Untuk setiap titik rangkaian: } \sum I_i = 0 \quad (1.10)$$

Dengan memahami kedua hukum Kirchoff di atas dan mengerti sifat dari komponen yang ada dalam suatu rangkaian, maka semua rangkaian elektronik bisa diselidiki (Arizal 2016; Mismail 2011a). Dalam pasal 3 beberapa contoh rangkaian akan dibahas dengan memakai kedua hukum Kirchoff.



Gambar 1.5.: Rangkaian seri dan paralel untuk menjelaskan hukum Kirchoff mengenai arus.

2. Dasar Elektronika

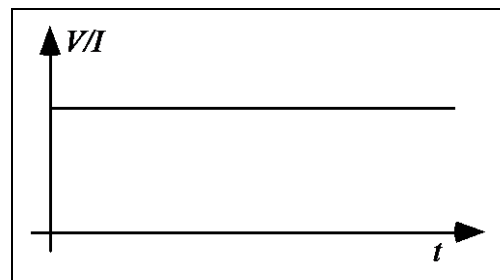
Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu menjelaskan dan membedakan voltase DC dan voltase AC serta daya listrik AC

2.1. Arus searah dan arus bolak-balik

2.1.1. Definisi DC (searah) dan AC (bolak-balik)

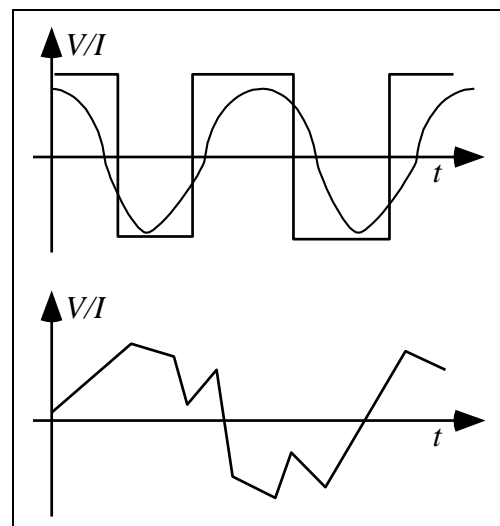
Mengenai perubahan voltase terhadap waktu, ada berbagai kemungkinan yang perlu dibedakan.

Kalau voltase itu konstan dan tidak berubah-ubah, berarti pada setiap saat memiliki nilai yang sama, voltase itu disebut voltase DC. DC adalah singkatan dari kata *Direct Current* (arus tetap) dalam bahasa Inggris (Mismail 2011a; Zuhail 2004). Arus yang dihasilkan voltase DC pada resistor disebut arus DC, berarti arus DC adalah arus yang konstan dan tidak berubah dengan waktu. Kalau menggambarkan arus atau voltase DC dalam grafik voltase / arus terhadap waktu, maka akan didapatkan gambar seperti dalam gambar 2.1..



Gambar 2.1: Voltase / arus DC

Voltase yang berubah pada setiap perubahan waktu, menjadi positif dan kemudian kembali menjadi negatif lagi sehingga terdapat voltase rata-rata nol, disebut voltase AC (*Alternating Current*) atau voltase bolak-balik. Kalau voltase ini digambarkan dalam grafik voltase terhadap waktu, maka terdapat suatu garis yang berosilasi antara atas dan bawah dari garis nol. Bentuk garis itu (bentuk dari fungsi voltase) bisa bermacam-macam. Dalam gambar 2.2 diperlihatkan beberapa bentuk voltase / arus AC. Arus AC didefinisikan sesuai dengan voltase AC.



Gambar 2.2: Tiga contoh untuk voltase / arus AC.

2.1.2. Voltase / arus campur

Sering terdapat situasi di mana voltase / arus AC terjumlah (tercampur) dengan voltase / arus DC. Dalam gambar 2.3. dua contoh untuk voltase campur diperlihatkan. Dalam situasi ini terdapat voltase DC yang tidak konstan, tetapi berubah-ubah. Voltase ini bisa ditulis:

$$V(t) = V_{DC} + V_{AC}(t) \quad (2.1)$$

di mana

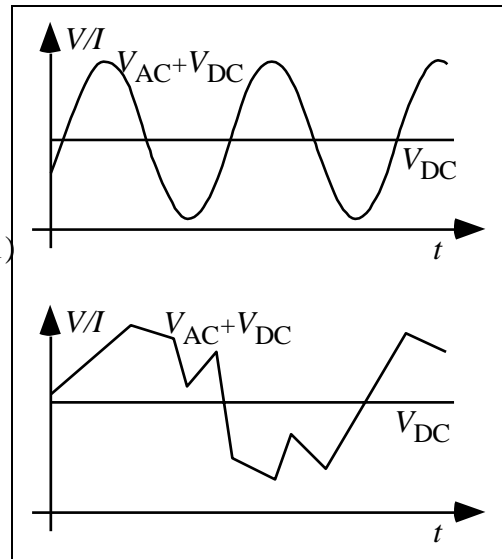
V_{DC} : voltase searah yang konstan
($V_{DC} = \text{konstan}$)

$V_{AC}(t)$: voltase bolak-balik yang berubah-ubah terhadap waktu

Kalau arus bolak-balik adalah voltase sinus, maka terdapat fungsi voltase sbb.:

$$V(t) = V_{DC} + V_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

di mana V_{DC} dan V_0 merupakan konstanta.



Gambar 2.3.: Dua contoh untuk voltase / arus DC ditambah dengan voltase / arus AC. (Voltase / arus campur.)

2.1.3. AC dalam bentuk sinus / cosinus

Dalam teknik dan dalam teori rangkaian voltase atau arus dalam bentuk sinus / cosinus sering dipakai. Voltase ini merupakan salah satu voltase AC. Jika berbicara mengenai voltase / arus AC, yang sering dimaksud adalah voltase / arus berbentuk sinus / cosinus, sehingga fungsi voltase terhadap waktu adalah fungsi sinus atau cosinus. Jika voltase terhadap waktu digambarkan dalam grafik, maka terdapat gambar sinus / cosinus. Fungsi dari voltase berbentuk sinus / cosinus adalah sbb.:

$$V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

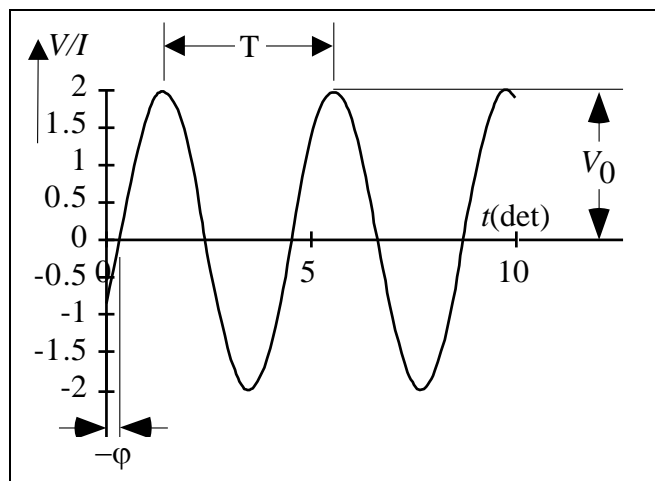
$$V(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

di mana:

$V(t) / I(t)$: Voltase / arus pada waktu t

V_0 / I_0 : Amplitude atau voltase / arus puncak dari voltase / arus sinus

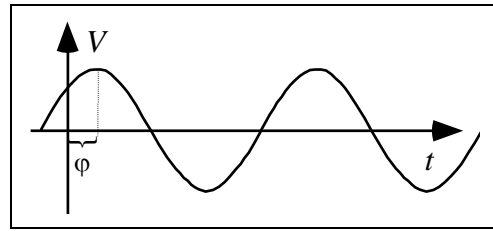


Gambar 2.4.: Voltase / arus AC dalam bentuk sinus dengan frekuensi putaran $\omega = 1.5$, atau frekuensi $f = 0.24$, dan amplitude $V_0 = 2V/A$.

Persamaan untuk bentuk voltase ini adalah.:

$$V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.4)$$

- ω : Frekuensi putar dari voltase sinus (bukan frekuensi !)
- φ : Pergeseran fase



Gambar 2.5.: Voltase berbentuk cosinus: $V(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi)$

Dalam gambar 2.4. dan gambar 2.5 voltase / arus sinus / cosinus diperlihatkan menyertakan beberapa simbol yang dipakai dalam persamaan untuk voltase / arus sinus / cosinus seperti dalam persamaan (2.3) dan (2.4). Besaran waktu osilasi T dan frekuensi f didefinisikan sama seperti kalau berbicara tentang osilasi (seperti amplitude, frekuensi putaran dan fase). Berarti terdapat hubungan sbb.:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}; f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \tag{2.5}$$

2.1.4. AC dalam bentuk cosinus dengan memakai bilangan kompleks

Voltase atau arus AC dalam banyak situasi didapati dalam bentuk cosinus. Sebab itu teori mengenai voltase atau arus AC biasanya yang dimaksud adalah voltase atau arus AC dalam bentuk cosinus. Kalau dalam suatu rangkaian voltase tidak memiliki bentuk cosinus, hasil dari penyelidikan dalam bentuk cosinus tetap bisa dipakai, karena setiap fungsi periodik bisa didapatkan sebagai jumlah dari fungsi-fungsi cosinus dan sinus dengan memakai deret Fourier.

Kalau semua perhitungan dilakukan dengan memakai fungsi cosinus atau sinus secara langsung, perhitungan dan teori sering menjadi kompleks dan sulit untuk dipahami. Sebab itu voltase atau arus AC berbentuk cosinus sering dinyatakan dengan memakai bilangan kompleks atau dengan memakai fasor / diagram panah.

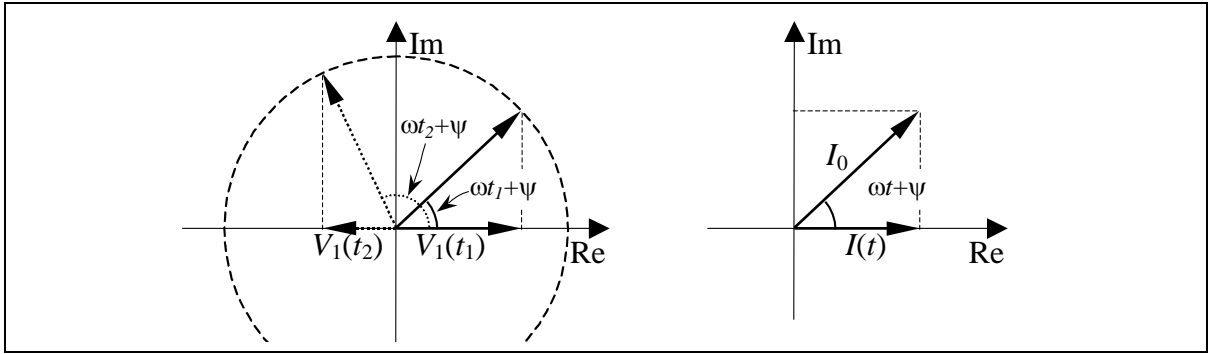
Pertama kita mengenal pemakaian bilangan kompleks. Dengan rumus Euler terdapat satu hubungan antara fungsi eksponensial yang imajiner dengan fungsi cosinus dan sinus:

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z \tag{2.6}$$

Untuk mendapatkan voltase dalam bentuk cosinus, voltase ditulis sebagai bagian real dari fungsi eksponensial dengan eksponen imajiner:

$$V(t) = \text{Re}(V_0 e^{i(\omega t - \varphi)}) = \text{Re}(V_0 (\cos(\omega t - \varphi) + i \sin(\omega t - \varphi))) = V_0 \cos(\omega t - \varphi) \tag{2.7}$$

Dalam persamaan (2.7) voltase dalam bentuk cosinus dinyatakan dengan memakai bilangan imajiner (Sudirham 2002). Bagian real dari fungsi eksponensial dengan eksponen imajiner persis sama dengan voltase berbentuk cosinus dalam (2.4). Biasanya "Re" tidak ditulis. Tetapi kalau bilangan kompleks dipakai untuk menggambarkan voltase atau arus, yang dimaksud selalu bagian real dari bilangan kompleks. Semua persamaan mengenai arus dan voltase tidak berubah kalau memakai bilangan kompleks. Misalnya terdapat resistivitas R dan voltase $V(t) = V_0 e^{i\omega t}$, maka ada arus $I(t)$ yang mengalir sebesar:

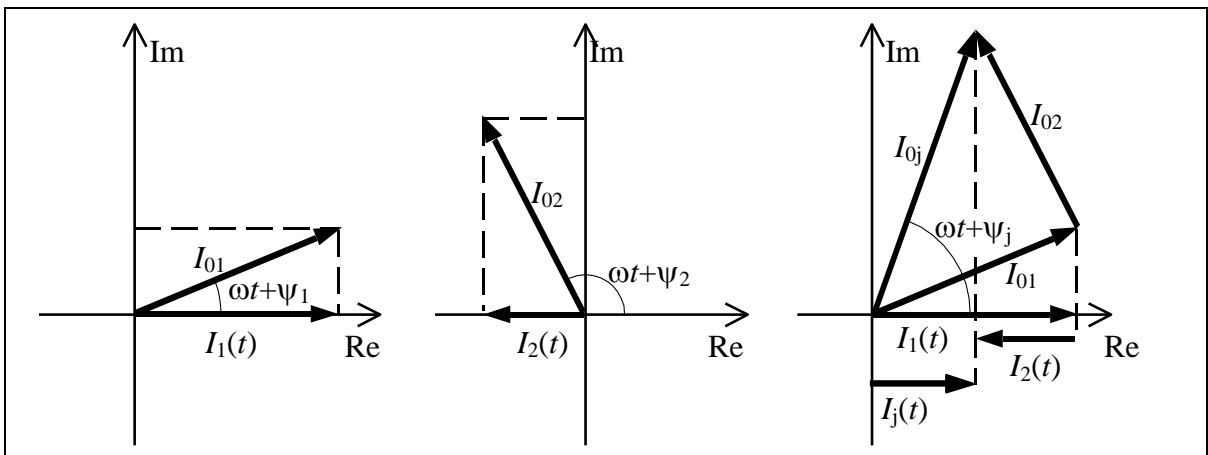


Gambar 2.6.: Menggambarkan arus dan voltase dengan fasor, berarti menggambarkan arus / voltase kompleks dalam bidang bilangan Gauss. Besar sudut naik dengan waktu, berarti panah berputar.

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} = \frac{V_0 e^{i\omega t}}{R} = I_0 e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

Kalau dalam suatu rangkaian hanya terdapat resistivitas-resistivitas real R , sama saja memakai bilangan kompleks atau bilangan real. Kalau terdapat kapasitansi dan induktivitas dalam rangkaian, perhitungan menjadi lebih sederhana dengan memakai bilangan kompleks. Perhitungan dengan kapasitansi dan induktivitas akan dipahami dalam pasal mengenai induktivitas dan kapasitansi.

Kalau voltase/arus dalam bilangan kompleks digambarkan ke dalam bidang bilangan Gauss, maka terdapat diagram panah atau Fasor. Besar dari amplitude (misalnya V_0) digambarkan sebagai panjang panah dan sudut $(\omega t \pm \phi)$ merupakan sudut dengan sumbu real. Pada bagian mendatar terdapat $V_0 \cos(\omega t \pm \phi)$. Di dalam fasor, dua voltase / dua arus bisa dijumlahkan sebagai jumlah vektor saja. Dengan menjumlahkan vektor terdapat jumlah yang benar seperti pada perhitungan bilangan kompleks. Dalam gambar 2.6. diperlihatkan cara menafsirkan fasor.



Gambar 2.7.: Dua arus $I_1(t)$ dan $I_2(t)$ dan jumlahnya $I_j(t)$ dalam diagram panah (fasor) dengan sudut $\omega t + \psi$ dan amplitude I_0 . Indeks 1 atau 2 dipakai untuk arus $I_1(t)$ dan $I_2(t)$ dan indeks j dipakai untuk jumlahnya.

Dalam gambar 2.7. diperlihatkan satu contoh dengan arus I_1 dan arus I_2 yang masuk ke dalam satu titik dalam rangkaian, sehingga dari titik itu akan ada arus yang keluar sebesar $I_j=I_1+I_2$. Di sebelah kiri digambarkan I_1 , di tengah digambarkan I_2 dan di sebelah kanan digambarkan $I_j=I_1+I_2$. Perlu diperhatikan bahwa sudut panah sebenarnya merupakan sudut dalam pangkat fungsi eksponensial atau sudut cosinus. Sudut ini berubah dengan waktu sesuai dengan rumus: $\phi = \omega t + \psi$. Besaran ωt menunjukkan bahwa panah berputar dengan kecepatan sudut ω . Kalau frekuensi dari kedua voltase / arus sama, maka besaran ωt akan selalu sama untuk kedua tambahan. Baik kedua tambahan maupun jumlah sebenarnya berputar dengan kecepatan sudut ω . Biasanya panah digambarkan untuk waktu $t = 0$.

2.2. Daya Arus Bolak-Balik

Kita telah belajar tentang daya listrik:

$$P = V \cdot I \quad (2.9)$$

Daya ini merupakan daya yang pada satu saat tertentu akan berubah ketika arus dan / atau voltase berubah. Sebab itu harus ditulis:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (2.10)$$

Dengan V dan I dalam bentuk cosinus maka terdapat:

$$P(t) = V_0 \cos(\omega_1 t + \psi_1) \cdot I_0 \cos(\omega_2 t + \psi_2) \quad (2.11)$$

Biasanya $\omega_1 = \omega_2$ (dalam situasi ini bisa menulis ω saja) tetapi sering ψ_1 dan ψ_2 berbeda.

2.2.1. Kalau fase sama

Kalau terdapat voltase $V(t)$ dan arus $I(t)$ pada resistor R , hukum Ohm berlaku, dan:

$$\begin{aligned} V(t) &= R \cdot I(t) = R I_0 \cos(\omega t + \psi_2) \\ \Leftrightarrow I(t) &= \frac{V(t)}{R} = \frac{V_0}{R} \cos(\omega t + \psi_1) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Jadi fase ψ_1 dari arus sama dengan fase ψ_2 dari voltase. Dalam situasi ini daya listrik yang diberikan kepada resistor bisa dihitung dari (2.10) sampai (2.12) dengan $\psi_1 = \psi_2$ dan $\omega_1 = \omega_2$, sehingga didapatkan hasil sbb.:

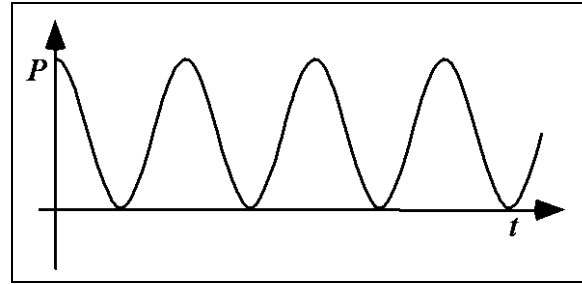
$$P(t) = R I_0^2 \cos^2(\omega t + \psi_2) \quad (2.13)$$

atau:

$$P(t) = \frac{V_0^2}{R} \cos^2(\omega t + \psi_1) \quad (2.14)$$

Dari (2.13) dan (2.14) dilihat bahwa daya berubah-ubah dengan \cos^2 . Perubahan daya ini biasanya cepat. Kalau frekuensi sebesar 50Hz yang dipakai dalam sumber daya

listrik, periode dari perubahan ini sebesar 100Hz^3 . Karena resistor memiliki kapasitas panas, maka perubahan daya yang cepat tidak mempengaruhi pemanasan resistor. Yang menentukan panas resistor adalah daya rata-rata yang diberikan kepada resistor. Daya rata-rata itu diperoleh dengan menghitung usaha W yang diberikan kepada resistor dalam selang waktu t , di mana besar dari selang waktu t sebaiknya dipilih sebagai waktu periode dari voltase bolak-balik. Karena usaha dalam setiap periode T sama, maka terdapat daya rata-rata yang tidak akan tergantung dari waktu awal di mana perhitungan dimulai. Usaha W dalam waktu satu periode sebesar:



Gambar 2.8.: Daya dari arus dan voltase kosinus terhadap waktu kalau tidak ada pergeseran fase antara arus dan voltase.

$$W = \int_{t=0}^T P(t) dt \quad (2.15)$$

Daya rata-rata \bar{P} terdapat kalau usaha W yang timbul dalam selang waktu T dibagikan dengan besar dari selang waktu T :

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T RI_0^2 \cos^2(\omega t + \psi) dt \\ &= \frac{1}{T} RI_0^2 \int_0^T \cos^2(\omega t + \psi) dt \end{aligned} \quad (2.16)$$

Karena

$$\cos^2(\omega t + \psi) = \frac{1}{2} (1 + \cos(2(\omega t + \psi))) \quad (2.17)$$

maka:

$$\begin{aligned} \int_0^T \cos^2(\omega t + \psi) dt &= \frac{1}{2} \int_0^T 1 dt + \frac{1}{2} \int_0^T \cos(2(\omega t + \psi)) dt \\ &= \frac{T}{2} + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2\omega} \sin(2(\omega t + \psi)) \right]_0^T \\ &\quad \underbrace{=0, \text{ karena sin periodik dengan periode } 2\pi} \\ &= \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (2.18)$$

³ $\cos^2(\omega t + \psi) = \frac{1}{2} (1 + \cos(2(\omega t + \psi)))$

Dengan memasukkan (2.18) ke dalam (2.16) maka terdapat daya rata-rata untuk arus bolak-balik dalam bentuk cosinus dengan tidak ada pergeseran fase antara arus dan voltase:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} RI_0^2 \int_0^T \cos^2(\omega t + \psi) dt = \frac{1}{T} RI_0^2 \frac{T}{2} = \frac{1}{2} RI_0^2 \quad (2.19)$$

Daya ini sesuai dengan arus searah (arus DC) yang sebesar $I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} RI_0^2 = RI_{eff}^2 \quad (2.20)$$

Arus ajeg I yang menghasilkan daya yang sama dengan daya yang dihasilkan oleh arus bolak-balik mempunyai nama arus efektif (I_{eff}). Untuk arus bolak-balik dalam bentuk cosinus terdapat besar dari arus efektif: $I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.

Untuk arus bolak-balik dalam bentuk lain definisi arus effective sama: arus efektif sebesar arus DC yang menghasilkan daya yang sama dengan daya yang dihasilkan oleh arus bolak-balik itu. Untuk menghitung besar dari arus efektif, perlu kita ingat perhitungan daya pada (2.16):

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot I^2(t) dt = R \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt = R \cdot I_{eff}^2 \quad (2.21)$$

Dari kedua ruas kanan (2.21) diperoleh besar arus efektif:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad (2.22)$$

Seperti daya rata-rata bisa dihitung dengan memakai (2.13), daya rata-rata bisa juga dihitung dengan memakai (2.14). Dengan cara ini terlihat daya rata-rata tergantung dari voltase. Voltase efektif bisa didefinisikan dengan cara yang sama seperti cara mendefinisikan arus efektif:

Voltase ajeg V yang menghasilkan daya yang sama dengan daya yang dihasilkan oleh voltase bolak-balik disebut voltase efektif (V_{eff}).

Dengan definisi ini terdapat:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (2.23)$$

Untuk voltase dalam bentuk cosinus ($V(t) = V_0 \cos \omega t$), terdapat voltase efektif:

$$V_{eff} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (2.24)$$

2.2.2. Kalau fase berbeda

Dalam untai dengan kapasitansi dan induktivitas, biasanya fase dari arus berbeda dengan fase dari voltase. Untuk mempermudah perhitungan kita anggap fase dari voltase $\psi_1=0$, sehingga fase dari arus ψ_2 merupakan perbedaan fase. Anggapan ini tidak mempengaruhi hasil perhitungan karena daya rata-rata tidak berubah kalau waktu awal dari perhitungan digeserkan. Kecepatan putaran ω untuk arus dan voltase sering sama: $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Maka dengan semua penetapan ini dari (2.11) terdapat:

$$P(t) = V_0 I_0 \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \psi_2) \quad (2.25)$$

Faktor $\cos(\omega t + \psi_2)$ bisa diubah sbb.:

$$\cos(\omega t + \psi_2) = \cos \omega t \cdot \cos \psi_2 - \sin \omega t \cdot \sin \psi_2 \quad (2.26)$$

Dari (2.25) dan (2.26) terdapat:

$$P(t) = V_0 I_0 (\cos \psi_2 \cdot \cos^2 \omega t - \sin \psi_2 \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t) \quad (2.27)$$

Untuk mendapatkan daya rata-rata \bar{P} , daya dalam satu periode harus diintegrasikan. Dengan (2.27) dalam (2.21) terdapat daya rata-rata:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = V_0 I_0 \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T \cos \psi_2 \cdot \cos^2 \omega t dt - \int_0^T \sin \psi_2 \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t dt \right\} \\ \Rightarrow \bar{P} &= V_0 I_0 \left\{ \cos \psi_2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2 \omega t dt - \sin \psi_2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos \omega t \cdot \sin \omega t dt \right\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Pada (2.28) terdapat dua integral yang dijumlahkan. Integral pertama sama dengan integral yang terdapat dalam (2.18). Hanya disini ada satu faktor $\cos \psi_2$ di depan integral itu. Faktor ini menunjukkan pergeseran fase antara arus dan voltase. $\cos \psi_2$ menunjukkan berapa besar bagian dari arus dan voltase yang tidak memiliki pergeseran fase. Kalau pergeseran fase nol, berarti $\psi_2 = 0$, faktor ini menjadi satu dan dari integral ini terdapat hasil yang sama seperti dalam pasal di atas dengan pergeseran fase nol. Dengan perhitungan yang sama seperti dalam (2.18) dari integral pertama terdapat:

$$\cos \psi_2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t + \psi) dt = \frac{1}{2} \cos \psi_2 \quad (2.29)$$

Pada integral kedua dalam (2.28) terdapat perkalian antara sinus dan cosinus, berarti terdapat dua fungsi cosinus yang fasenya tergeser 90° . Dalam gambar 2.9 dua fungsi dan perkalian digambarkan. Disitu dilihat bahwa perkalian mempunyai bagian yang positif dan bagian yang negatif. Integral dari perkalian terhadap waktu (luas di bawah grafik dari perkalian itu) mempunyai bagian yang positif dan bagian yang negatif. Karena harga mutlak dari bagian positif dan bagian negatif sama, maka rata-rata integral tersebut menjadi nol. Kalau dihitung terdapat:

$$\cos \omega t \cdot \sin \omega t = \frac{1}{2} \sin 2\omega t \Rightarrow \int_0^T \cos \omega t \cdot \sin \omega t dt = \frac{1}{2} \int_0^T \sin 2\omega t dt = 0 \quad (2.30)$$

Dengan (2.29) dan (2.30) di dalam (2.28) terdapat daya rata-rata \bar{P} :

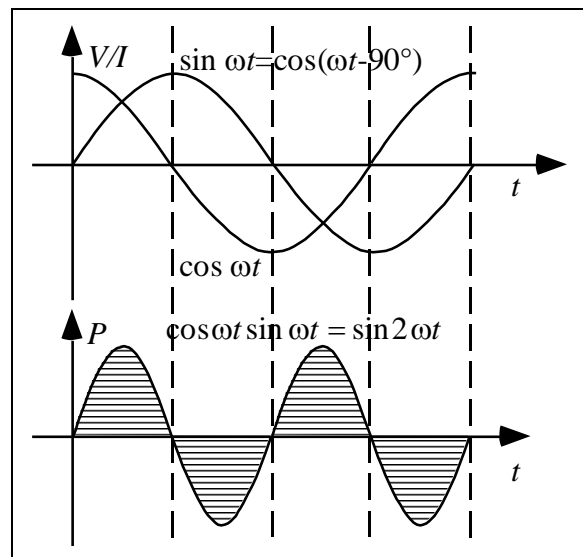
$$\bar{P} = \frac{1}{2} V_0 I_0 \cos \psi_2 \quad (2.31)$$

Dengan memakai voltase efektif untuk voltase AC dalam bentuk sinus $\left(V_{eff} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \right)$

dan arus efektif untuk arus AC dalam bentuk sinus $\left(I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \right)$ terdapat daya rata-rata dengan pergeseran fase ψ antara arus dan voltase:

$$\bar{P} = V_{eff} I_{eff} \cos \psi_2 \quad (2.32)$$

Dengan (2.32) kita memiliki satu rumus untuk menghitung daya yang diserap oleh suatu rangkaian atau alat listrik yang memakai arus AC, tetapi voltase dan arus pada alat itu tidak sefase (seperti misalnya lampu neon yang memakai *ballast* biasa). Perlu diperhatikan bahwa arus dan voltase bisa besar dengan daya rata-rata yang kecil kalau pergeseran fase mendekati 90° sehingga kosinus mendekati nol. Dilihat bahwa dalam situasi ini daya menjadi positif beberapa saat dan kemudian kembali menjadi negatif selama beberapa waktu seperti dalam contoh di gambar 2.9., di mana pergeseran fase sebesar 90° (satu fungsi digambar sebagai sinus dan satu fungsi digambar sebagai kosinus). Kalau daya positif berarti usaha diberikan kepada alat (komponen) listrik dan ketika daya negatif alat (komponen) listrik itu mengeluarkan daya menjadi tenaga listrik. Situasi pada waktu itu seperti pada catu daya yang mana arah voltase dan arus juga berlawanan sehingga terdapat daya negatif. Artinya catu daya tidak menyerap daya, tetapi memberikan daya kepada komponen yang lain. Hal ini berarti alat atau komponen yang memiliki pergeseran fase antara arus dan voltasenya bisa menyimpan energi listrik dan dikeluarkan beberapa waktu kemudian.



Gambar 2.9.: Fungsi kosinus dan sinus dengan perkalian antara dua fungsi ini.

3. Teori Rangkaian

Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu membedakan dan menganalisis rangkaian seri dan parallel dan mahasiswa mampu menganalisis rangkaian seri yang dibebani; membedakan rangkaian ekuivalen Thévenin dan Norton

3.1. Beberapa rangkaian dasar

3.1.1. Rangkaian seri

3.1.1.1. Arus dan voltase dalam rangkaian seri

Kita akan menyelidiki rangkaian seri dengan dua komponen yang disambung dengan sumber tegangan (berarti dengan sumber tegangan terdapat tiga komponen dalam rangkaian ini) seperti diperlihatkan dalam gambar 3.1.. Karena ini rangkaian seri, maka hukum Kirchoff mengenai voltase menyatakan bahwa jumlah voltase pada semua komponen (termasuk sumber tegangan) nol, atau dengan kata lain jumlah voltase dari dua komponen yang kita perhatikan sebesar (harga mutlak dari) voltase sumber tegangan:

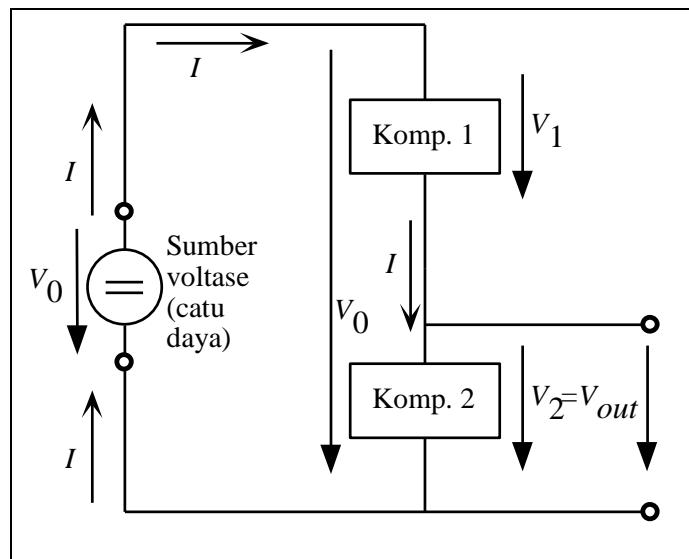
$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (3.1)$$

Dari hukum Kirchoff mengenai arus, terdapat arus I yang sama besar dalam semua komponen.

Semua penjelasan ini tetap sama walaupun ada lebih dari dua komponen. Hanya saja, dengan lebih banyak komponen, rumus (3.1) perlu tambahan-tambahan lagi sesuai dengan jumlah komponen.

3.1.1.2. Rangkaian seri dengan dua resistor

Kalau kedua komponen merupakan resistor, maka hubungan antara arus dan voltase dalam resistor R_1 dan R_2 dengan resistivitas R_1 dan R_2 sesuai dengan hukum Ohm(Pertiwi, Sudjito, and Rondonuwu 2019; Rosman et al. 2020):



Gambar 3.1.: Rangkaian seri dengan dua komponen.

$$\begin{aligned} V_1 &= R_1 \cdot I \\ V_2 &= R_2 \cdot I \end{aligned} \quad (3.2)$$

Karena arus I sama besar dalam kedua resistor, maka dari (3.2) langsung didapatkan hubungan antara perbandingan voltase dengan perbandingan resistivitas pada kedua resistor:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1 \cdot I}{R_2 \cdot I} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.3)$$

Karena voltase pada dua resistor dijumlahkan menghasilkan voltase V_0 antara ujung atas dari R_1 dan ujung bawah dari R_2 , maka dengan (3.2) terdapat:

$$V_0 = V_1 + V_2 = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = \underbrace{(R_1 + R_2)}_{\equiv R_0} \cdot I \quad (3.4)$$

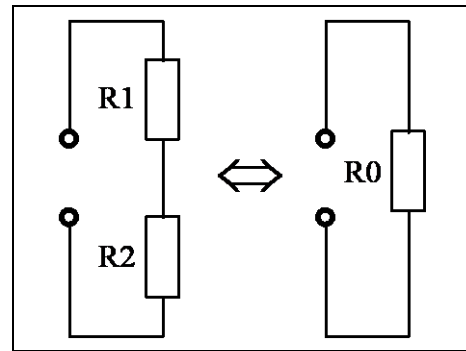
$$\Leftrightarrow V_0 = R_0 \cdot I$$

Dari perhitungan (3.4) dilihat bahwa hukum Ohm juga berlaku untuk dua resistor bersama, berarti voltase dan arus pada seluruh rangkaian seri dari dua resistor berbanding lurus. Sebab itu rangkaian seri ini bisa diganti dengan resistor pengganti yang resistivitasnya merupakan jumlah dari resistivitas kedua resistor itu. Resistor pengganti bisa dipakai untuk perhitungan atau untuk menyederhanakan rangkaian sehingga tidak perlu sambungan dua resistor. Sifat dari rangkaian dengan satu resistor dengan resistivitas $R_0 = R_1 + R_2$ sama persis dengan rangkaian seri dari dua resistor tersebut. Hal ini diperlihatkan dalam gambar 3.2..

Sering kali rangkaian seri dengan dua komponen dipakai untuk mendapatkan voltase tertentu pada komponen kedua (V_2). Kemudian voltase V_2 dipakai sebagai sumber voltase untuk bagian rangkaian yang lain, sehingga keluaran dari rangkaian tersebut $V_{out} = V_2$ (gambar 3.1.). Kalau kedua komponen merupakan dua resistor R_1 dan R_2 , maka hubungan antara voltase V_2 dan voltase input V_0 bisa dihitung dengan mudah memakai (3.2) dan (3.4), berarti memakai hukum Ohm untuk resistor masing-masing dan untuk resistor pengganti R_0 :

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} V_0 &= R_0 \cdot I \\ V_2 &= R_2 \cdot I \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \frac{V_0}{V_2} = \frac{R_0}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \\ \Leftrightarrow V_2 = V_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dari (3.5) terlihat bahwa perbandingan voltase sama dengan perbandingan resistivitas seperti dalam (3.3). Hanya disini terdapat perbandingan antara resistivitas dan voltase pada resistor masing-masing, dan resistivitas dan voltase seluruhnya (resistivitas dan voltase pada resistor pengganti).



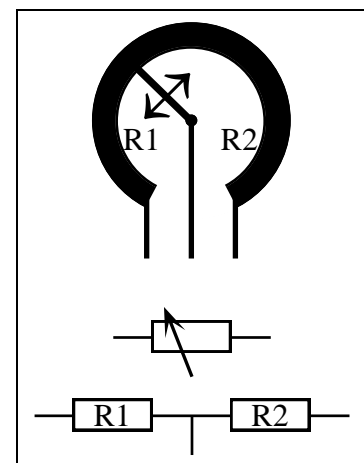
Gambar 3.2.: Rangkaian seri dari dua resistor dengan resistivitas R_1 dan R_2 dapat diganti dengan satu resistor dengan resistivitas $R_0 = R_1 + R_2$.

Pada rangkaian seri dengan dua resistor, voltase input V_0 dibagikan kepada dua resistor R_1 dan R_2 . Sebab itu rangkaian seri dengan dua resistor juga disebut sebagai pembagi tegangan.

Dalam perhitungan (3.5) arus dalam semua komponen sama besar. Tetapi kalau rangkaian pembagi tegangan ini dipakai sebagai sumber tegangan untuk bagian rangkaian yang lain, pada bagian rangkaian tersebut pasti ada arus yang mengalir. Arus dalam bagian rangkaian tersebut merupakan arus I_{out} yang mengalir keluar dari rangkaian pembagi tegangan. Maka arus I_1 dalam resistor R_1 akan berbeda dengan arus I_2 yang mengalir dalam resistor R_2 . Dengan hukum Ohm dan hukum-hukum Kirchoff kita bisa menghitung voltase dan arus di berbagai bagian dalam rangkaian. Dalam pasal mengenai “Rangkaian seri yang dibebani” akan kita hitung voltase dan arus dalam rangkaian. Kita juga akan mengukurnya dalam praktikum.

Tentu saja semua penjelasan ini juga benar untuk lebih banyak resistor yang dirangkai secara seri. Berarti perbandingan voltase selalu sama dengan perbandingan resistivitas dalam rangkaian seri, dan resistor pengganti selalu merupakan jumlah dari semua resistor yang dirangkai secara seri.

Satu komponen khusus yang sering dipakai sebagai pembagi tegangan adalah potensiometer. Potensiometer merupakan suatu resistor yang terbuat dari suatu lapisan karbon tipis. Selain lapisan karbon tipis, potensiometer juga bisa dibuat dari bahan lain. Dua ujung dari lapisan karbon diberi sambungan keluar dan di atas lapisan karbon diberi satu kontak yang bisa digeser sehingga pembagian dari lapisan karbon bisa diatur dengan menggeser kontak tersebut. Dalam gambar 3.3 diperlihatkan satu cara yang sering dipakai: Lapisan karbon melingkar dan kontak geser dipasang pada suatu poros. Dengan memutar poros, kontak bisa digeser dan resistivitas bagian kiri dan bagian kanan dari lapisan karbon bisa diubah. Komponen ini memiliki satu resistivitas tertentu antara dua kaki ujungnya, tetapi resistivitas total ini bisa dilihat sebagai jumlah resistivitas dari dua resistor yang dibentuk oleh lapisan karbon di sebelah kanan dan di sebelah kiri dari kontak geser di tengah. Resistivitas antara ujung dan sambungan tengah bisa diatur dengan mengubah posisi kontak. Artinya resistivitas dari resistor bisa diubahkan dari nol sampai ke resistivitas maksimal yang sama dengan besar resistivitas total antara ujung kaki. Dengan mengubah posisi dari kontak, perbandingan R_1/R_2 antara dua resistor (yang dibentuk oleh lapisan karbon di sebelah kiri dan di sebelah kanan) bisa diatur dengan bebas. Dalam gambar 3.3. suatu potensiometer (di atas) digambarkan beserta dengan lambang rangkaian untuk potensiometer (di tengah) dan rangkaian pengganti yang sama dengan potensiometer (di bawah).



Gambar 3.3.:
Potensiometer (di atas),
lambangnyanya (tengah)
dan resistor pengganti
dengan dua resistor R_1
dan R_2 .

3.1.1.3. Rangkaian seri dengan dua komponen umum

Kalau dua komponen dalam rangkaian seri atau salah satu dari dua komponen tersebut bukan resistor, maka hukum Kirchoff sesuai (3.1) tetap berlaku (Basri and Irfan 2018). Bahwa arus sama dalam kedua komponen tetap berlaku, tetapi hukum Ohm tidak lagi berlaku. Hukum Ohm harus diganti dengan persamaan karakteristik dari sifat komponen yang dipakai. Sering kita tidak tahu persamaan itu secara persis dan biasanya perhitungan menjadi sulit. Kalau sifat dari kedua komponen diketahui secara grafis, berarti grafik hubungan antara arus dan voltase pada kedua komponen diketahui, maka voltase V_2 dari rangkaian seri bisa ditentukan dengan cara grafis:

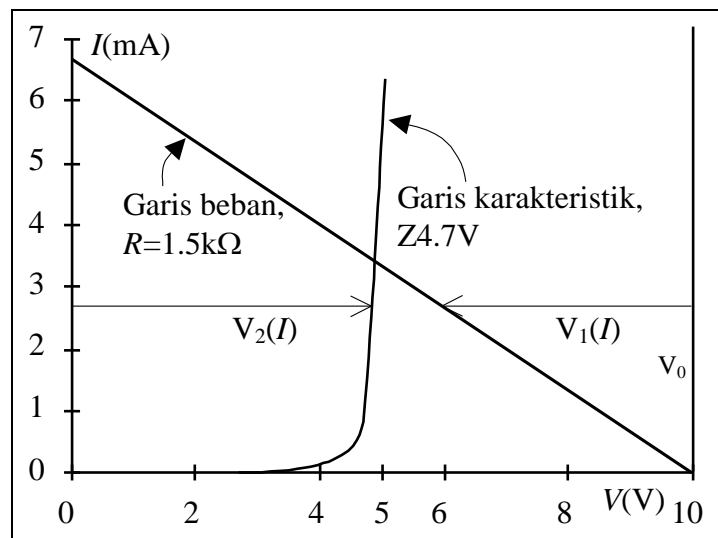
Dari (3.1) terdapat voltase V_2 sebagai perbedaan antara voltase seluruhnya V_0 dan voltase pada komponen pertama, V_1 :

$$V_2 = V_0 - V_1 \quad (3.6)$$

Karena V_0 konstan dan hubungan antara voltase dan arus pada komponen 1 diketahui, maka V_2 terhadap arus I yang mengalir dalam rangkaian seri bisa digambarkan ke dalam suatu grafik. Garis yang didapatkan akan kita sebutkan sebagai garis beban. Sebagai contoh dalam gambar 3.4. kita pakai satu resistor dengan resistivitas sebesar $R_1 = 1.5k\Omega$ sebagai komponen 1 dan voltase dari sumber tegangan sebesar $V_0 = 10V$. Karena komponen 1 resistor, maka garis beban dapat dihitung dengan hukum Ohm:

$$V_2 = V_0 - V_1 = V_0 - R_1 \cdot I \quad (3.7)$$

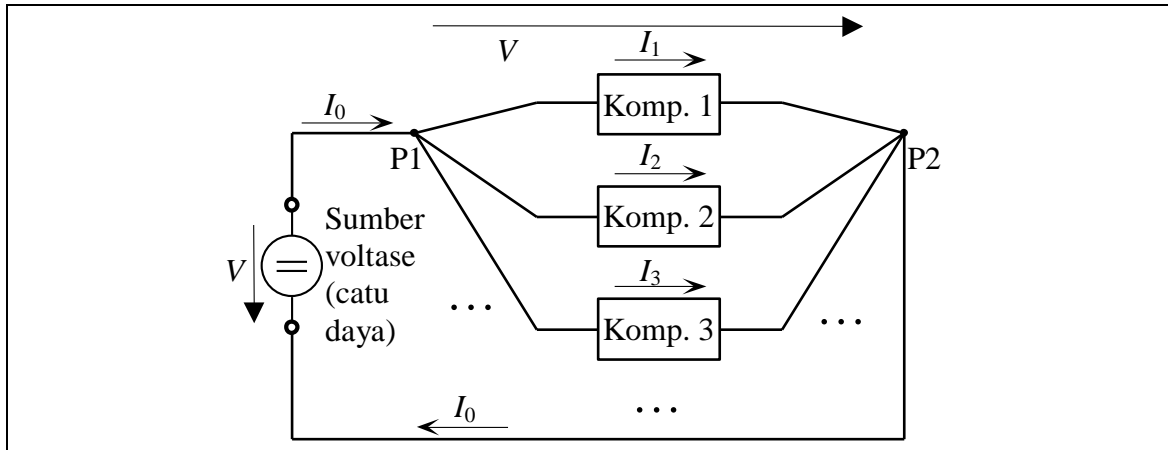
$$\Leftrightarrow V_2 = 10V - 15k\Omega \cdot I$$



Gambar 3.4.: Garis beban dan garis karakteristik untuk rangkaian seri dengan resistor $1.5k\Omega$ dan dioda Zener $4.7V$.

Dari (3.7) dan (3.6) dilihat bahwa garis beban adalah sifat komponen 1 yang digambar dari voltase supply ke kiri. Untuk mendapatkan garis beban ini garis sifat resistor harus dicerminkan pada sumbu arus dan kemudian digeser pada skala voltase (ke kanan) sejauh voltase supply.

Setelah mencari dan menggambarkan garis beban ke dalam suatu grafik, sifat karakteristik dari komponen ke dua bisa dipakai. Arus yang mengalir dalam komponen ke dua sama besar dengan arus yang mengalir dalam komponen pertama dan voltase V_2 telah dipakai sebagai sumbu mendatar dalam grafik garis beban, maka arus terhadap voltase pada komponen kedua bisa langsung digambarkan ke dalam grafik garis beban



Gambar 3.5.: Dalam rangkaian paralel voltase sama untuk semua komponen, tetapi arus terbagi ke dalam berbagai cabang rangkaian.

(dari komponen pertama). Titik pertemuan dari dua grafik tersebut adalah titik yang memenuhi sifat dari kedua komponen, yang mana arus dalam kedua komponen sama besar dan yang mana jumlah voltase dari kedua komponen sama dengan voltase supply, maka pada titik itu terdapat arus yang memang akan mengalir dalam rangkaian ini dan voltase V_2 sebagai voltase output. Titik pertemuan ini disebut sebagai titik kerja dari rangkaian, karena disitu (pada arus dan voltase V_2 itu) rangkaian akan bekerja. Kalau tidak ada arus yang keluar dari rangkaian ini, voltase V_2 pada titik kerja berlaku sebagai voltase output. Kalau ada arus yang mengalir, voltase turun sesuai dengan resistivitas dalam yang terdapat dari rangkaian paralel dari resistivitas diferensial kedua komponen yang dipakai. (Mengenai resistivitas output lihat pasal 3.1.3. Rangkaian seri yang dibebani.)

3.1.2. Rangkaian paralel

3.1.2.1. Secara umum

Kalau beberapa komponen dirangkai secara paralel, berarti kaki komponen disambungkan sehingga arus tidak mengalir dari satu komponen ke komponen lain, tetapi arus yang datang dari catu daya dibagi ke dalam berbagai komponen (Muda 2013; Setiyo and others 2017). Maka terdapat rangkaian seperti dalam gambar 3.5. Hukum Kirchhoff tentang arus menyatakan bahwa arus I_0 yang masuk ke dalam titik P1 akan dibagi ke dalam berbagai cabang dan jumlah arus dalam cabang sama dengan arus total I_0 :

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (3.8)$$

Karena kaki kiri dari semua komponen tersambung dengan sambungan listrik (tersambung dengan logam), maka potensial dari kaki kiri sama untuk semua komponen. Sama juga untuk kaki kanan, maka voltase (beda potensial) sama untuk semua komponen. Dalam rangkaian gambar 3.5 voltase pada rangkaian paralel ini sebesar V dari sumber voltase. Arus yang mengalir pada cabang masing-masing tergantung dari sifat / karakteristik komponen masing-masing dan voltase V .

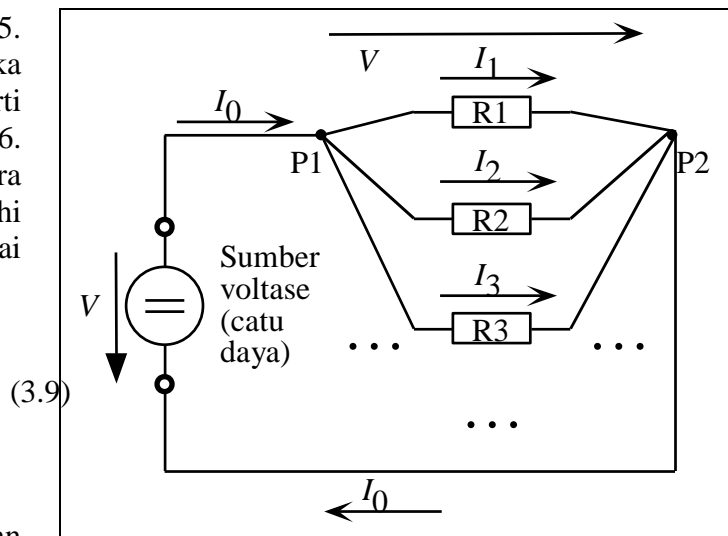
Perlu diperhatikan bahwa hukum Kirchhoff mengenai voltase disini bisa diterapkan untuk setiap loop yang bisa dibentuk dalam rangkaian ini. Misalnya kita memakai loop yang terbentuk mulai dari P1 melalui komponen 1 ke P2 dan kemudian kembali ke P1 melalui komponen 3. Menurut hukum Kirchhoff mengenai voltase, jumlah voltase dalam loop tertutup ini nol. Karena komponen 3 dalam arah terbalik, maka voltase dihitung negatif, sehingga jumlah voltase dalam loop menjadi nol dan hukum Kirchhoff terpenuhi kalau harga mutlak dari voltase pada komponen 3 sama dengan voltase pada komponen 1.

3.1.2.2. Rangkaian Paralel dengan Resistor

Kalau komponen dari gambar 3.5. merupakan resistor-resistor, maka terdapat situasi seperti diperlihatkan dalam gambar 3.6. Dalam situasi ini hubungan antara arus dan resistivitas memenuhi hukum Ohm. Dengan memakai konduktivitas G terdapat:

$$\begin{aligned} I_1 &= G_1 \cdot V \\ I_2 &= G_2 \cdot V \\ I_3 &= G_3 \cdot V \\ &\text{dst.} \end{aligned}$$

Karena arus total I_0 merupakan jumlah arus dalam komponen masing-masing, maka didapatkan:



Gambar 3.6.: Rangkaian paralel dengan resistor sebagai komponennya.

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + \dots = G_1 \cdot V + G_2 \cdot V + G_3 \cdot V + \dots = \underbrace{(G_1 + G_2 + G_3 + \dots)}_{=G_0} \cdot V \quad (3.10)$$

$$\Leftrightarrow I_0 = G_0 \cdot V$$

Dari (3.10) terdapat hubungan linear antara arus dan voltase untuk seluruh rangkaian paralel ini. Berarti rangkaian paralel memiliki sifat seperti satu resistor Ohm dengan resistivitas $R_0 = \frac{1}{G_0}$.

Sebab itu seluruh rangkaian paralel ini bisa diganti dengan satu resistor pengganti dengan konduktivitas G_0 (resistivitas R_0). Besar G_0 , dilihat dari (3.10), merupakan jumlah konduktivitas pada masing-masing resistor:

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 + \dots \quad (3.11) \quad G_0 = \sum G_i$$

Persamaan (3.11) bisa juga ditulis sebagai persamaan untuk resistivitas dengan definisi konduktivitas sebagai kebalikan dari resistivitas:

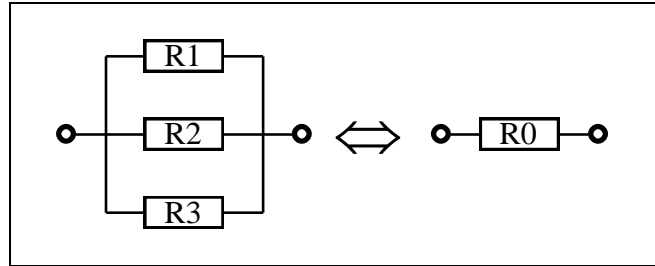
$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (3.12)$$

Jika hanya dua resistor yang disambung paralel, (3.12) bisa diubah menjadi:

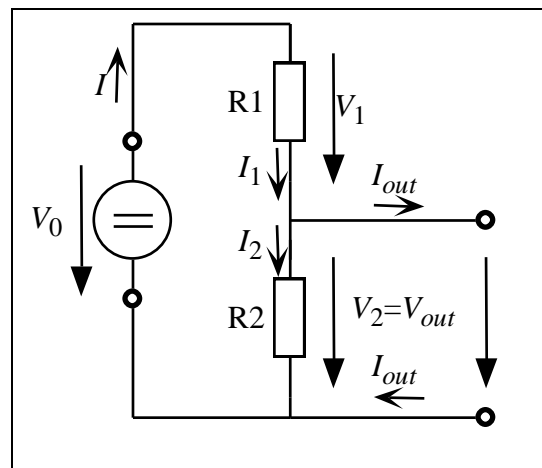
$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.13)$$

3.1.3. Rangkaian seri yang dibebani

Rangkaian seri seperti dalam gambar 3.1. atau rangkaian seri dengan dua resistor seperti dalam gambar 3.8. sering dipakai sebagai sumber tegangan untuk bagian rangkaian yang lain. Kalau rangkaian ini dipakai sebagai sumber tegangan, maka akan ada arus yang mengalir keluar dari rangkaian ini, sehingga bisa dikatakan rangkaian diberi beban sebesar arus I_{out} yang mengalir keluar dari rangkaian ini. Dalam situasi ini arus dalam R1 akan bertambah besar dan arus dalam R2 akan berkurang sehingga mengakibatkan voltase V_1 ($V_1 = R_1 \cdot I_1$) akan bertambah dan voltase V_2 ($V_2 = R_2 \cdot I_2$) akan berkurang. Berarti voltase output ($V_{out} = V_2$) akan lebih kecil daripada situasi ketika $I_{out} = 0$. Kita akan meng-



Gambar 3.7.: Rangkaian paralel dari resistor bisa diganti dengan resistor pengganti yang mempunyai resistivitas $R_0 = \frac{1}{G_0}$, di mana konduktivitas pengganti adalah jumlah dari konduktivitas resistor masing-masing:



Gambar 3.8.: Rangkaian seri dengan dua resistor sebagai pembagi tegangan diberi beban, maka voltase output akan turun.

hitung perubahan voltase output (ΔV_{out}) ketika arus output berubah sebesar ΔI_{out} . (Misalnya arus output berubah dari nol menjadi sebesar I_{out} .)

Dari hukum Kirchhoff mengenai arus terdapat hubungan antara arus I_1 , I_2 dan I_{out} :

$$I_1 - I_2 = I_{out} \quad (3.14)$$

Kalau arus output bertambah sebesar ΔI_{out} , maka:

- voltase V_1 berubah sejauh ΔV_1 menjadi $V_1' = V_1 + \Delta V_1$
- voltase V_2 berubah sejauh ΔV_2 menjadi $V_2' = V_2 + \Delta V_2$
- arus I dalam resistor R1 berubah sejauh ΔI_1 menjadi $I_1 = I + \Delta I_1$
- arus I dalam resistor R2 berubah sejauh ΔI_2 menjadi $I_2 = I + \Delta I_2$
- perubahan arus output I_{out} terdapat dari perubahan arus dalam resistor R1 dan dalam resistor R2 sesuai dengan (3.14):

$$\begin{aligned} \Delta I_{out} &= (I_1' - I_2') - (I_1 - I_2) \\ \Rightarrow \Delta I_{out} &= ((I_1 + \Delta I_1) - (I_2 + \Delta I_2)) - (I_1 - I_2) = \Delta I_1 - \Delta I_2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Dari hukum Kirchhoff mengenai voltase diketahui bahwa jumlah voltase pada resistor tidak tergantung dari arus I_{out} yang mengalir keluar. Maka:

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} V_1 + V_2 &= V_0 \\ V_1' + V_2' &= V_0 \Leftrightarrow V_1 + \Delta V_1 + V_2 + \Delta V_2 = V_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta V_1 + \Delta V_2 = 0 \\ \Leftrightarrow \Delta V_1 &= -\Delta V_2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Dari hukum Ohm terdapat perubahan arus pada kedua resistor:

$$\Delta I_1 = G_1 \cdot \Delta V_1 \text{ dan } \Delta I_2 = G_2 \cdot \Delta V_2 \quad (3.17)$$

Dari perubahan arus masing-masing resistor (3.17) dan dari (3.15) terdapat perubahan arus output ΔI_{out} :

$$\Delta I_{out} = \Delta I_1 - \Delta I_2 = G_1 \cdot \Delta V_1 - G_2 \cdot \Delta V_2 \stackrel{\Delta V_1 = -\Delta V_2}{=} -\underbrace{(G_1 + G_2)}_{=G_0} \cdot \Delta V \quad (3.18)$$

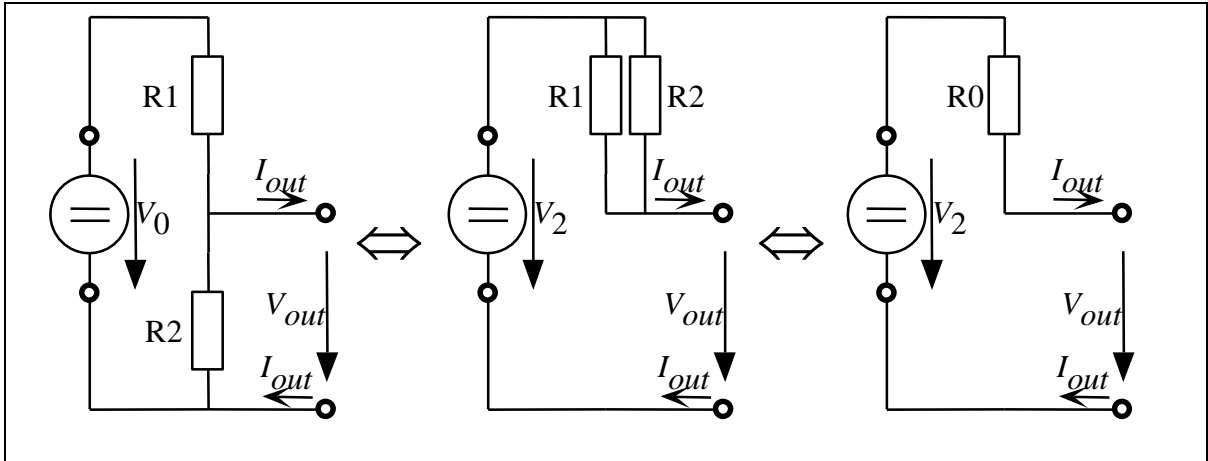
Dengan (3.18) terdapat voltase output $V_{out} = V_2'$ dari rangkaian ini sbb.:

$$V_{out} = V_2' = V_2 + \Delta V_2 = V_2 - \frac{\Delta I_{out}}{G_0} = V_2 - R_0 \cdot \Delta I_{out} \quad (3.19)$$

di mana $R_0 = \frac{1}{G_0}$ dan $G_0 = G_1 + G_2$.

Untuk perubahan voltase output ketika arus output berubah terdapat dari (3.18):

$$\Delta V_{out} = \Delta V_2 = -\frac{1}{G_0} \cdot \Delta I_{out} = -R_0 \cdot \Delta I_{out} \quad (3.20)$$



Gambar 3.9.: Mengenai sifat outputnya saja, rangkaian pembagi voltase bisa diganti dengan rangkaian yang terdiri dari sumber voltase dan resistor seri. Rangkaian itu disebut rangkaian ekuivalen mengenai output dari rangkaian pembagi tegangan.

Dalam (3.20) terdapat persamaan mengenai perubahan arus dan perubahan voltase. Kalau perubahan itu cukup kecil, besar resistivitas dan konduktivitas bisa diganti dengan resistivitas dan konduktivitas diferensial. Dengan cara itu persamaan tersebut menjadi benar kalau kedua komponen dalam rangkaian seri bukan resistor, tetapi merupakan komponen lain yang tidak memiliki hubungan linear antara arus dan voltase. Maka untuk komponen umum (3.20) bisa ditulis sbb.:

$$\Delta V_{out} = -\frac{1}{g_0} \cdot \Delta I_{out} = -r_0 \cdot \Delta I_{out} \tag{3.21}$$

$$\text{dengan } g_0 = g_1 + g_2 \text{ atau } \frac{1}{r_0} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

Dari hasil (3.19) dilihat bahwa dengan penambahan arus output sebesar ΔI_{out} voltase V_2 akan berkurang sejauh ΔV_2 . Besar penurunan voltase output didapat dari perubahan arus output yang mengalir dalam rangkaian paralel dari dua resistor R_1 dan R_2 ($G_0 = G_1 + G_2$). Sifat dari rangkaian ini sama seperti sifat rangkaian pengganti yang digambarkan dalam gambar 3.9.: Terdapat satu sumber tegangan ideal dengan tegangan V_2 dan satu resistor seri yang merupakan rangkaian paralel dari R_1 dan R_2 . Ketika arus output nol ($I_{out} = 0$) terdapat voltase output V_2 dan kalau ada arus output, maka voltase turun sejauh voltase yang terdapat pada resistivitas R_0 yang merupakan rangkaian paralel dua resistor R_1 dan R_2 . (Perhatikanlah: arus output ΔI bisa negatif. Dalam situasi ini ΔV_2 akan positif, berarti V_2 akan bertambah.) Untuk hubungan antara voltase output dan arus output dalam rangkaian pengganti ini, terdapat persamaan yang sama dengan (3.19):

$$V_{out} = V_2 - R_0 I_{out} \tag{3.22}$$

Perlu diperhatikan bahwa penyerapan daya akan berbeda dalam rangkaian pengganti. (Silahkan hitunglah sendiri penyerapan daya dari rangkaian masing-masing.)

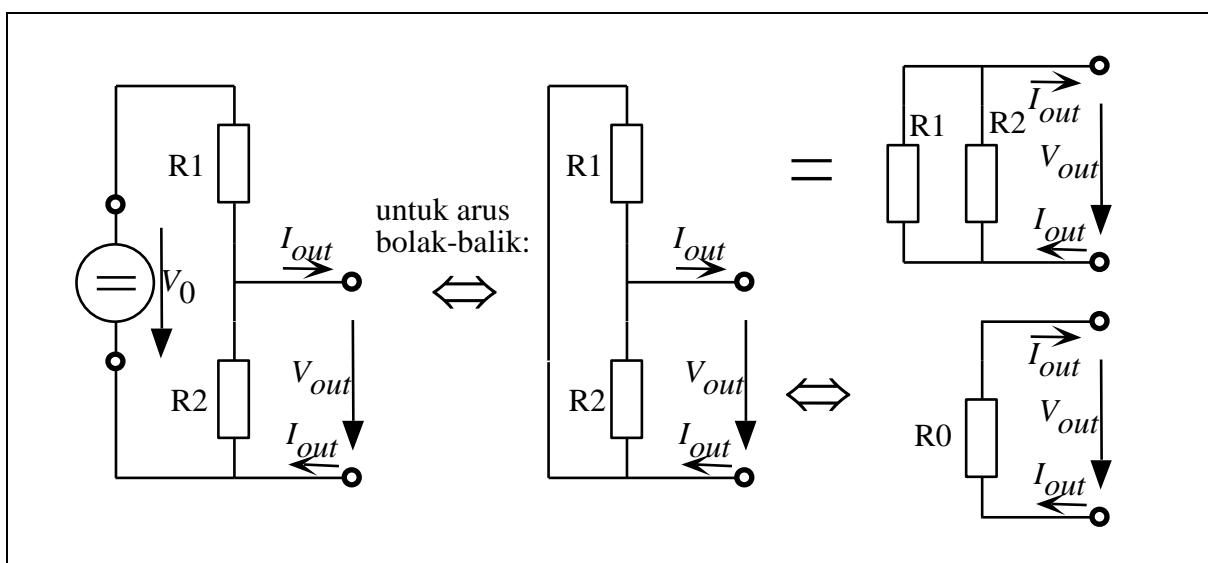
Yang dihitung dalam perhitungan di atas adalah perubahan arus ΔI dan perubahan voltase ΔV yang kecil. Sebab yang sebenarnya adalah bukan resistivitas yang masuk ke dalam perhitungan, tetapi resistivitas diferensial seperti dijelaskan dalam persamaan (3.21). Kalau rangkaian terdiri dari dua resistor, maka resistivitas diferensial sama dengan resistivitas. Kalau salah satu komponen bukan resistor, tetapi komponen yang lain (misalnya dioda atau dioda Zener), maka bukan resistivitasnya, tetapi resistivitas diferensialnya yang dipakai untuk menentukan sifat output dari rangkaian tersebut.

Dari pengertian bahwa sebenarnya resistivitas diferensial yang menentukan sifat keluaran, maka dengan mudah bisa dimengerti bahwa resistivitas output R_0 dibentuk oleh rangkaian paralel dari dua resistor R_1 dan R_2 :

Sumber voltase dianggap sebagai sumber voltase yang sempurna, (voltase tidak tergantung arus), maka resistivitas diferensial dari sumber voltase akan nol:

$$r = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0}{\Delta I} = 0 \quad (3.23)$$

Untuk mengerti apa yang terjadi kalau arus atau voltase output berubah sedikit, sumber voltase bisa digantikan dengan resistor yang memiliki resistivitas nol, berarti kaki sumber voltase disambungkan secara langsung. Dengan cara ini rangkaian seri di sebelah kiri dari gambar 3.10. berubah menjadi rangkaian di tengah atau di sebelah kanan dari gambar 3.10.. Rangkaian ini disebut rangkaian ekuivalen untuk arus bolak-balik karena dengan voltase / arus campur pada outputnya (misalnya terdapat voltase asli V_2 dan tambahan voltase bolak-balik) rangkaian ekuivalen ini menggambarkan sifat dari bagian voltase bolak-balik. Dalam rangkaian ekuivalen untuk arus bolak-balik semua voltase DC bisa diabaikan. Dari rangkaian ekuivalen untuk arus bolak-balik, memang langsung jelas bahwa rangkaian paralel dua resistor R_1 dan R_2 menentukan perubahan voltase output ketika terdapat perubahan arus ΔI_{out} pada output dari rangkaian pembagi tegangan ini. Resistivitas R_0 yang merupakan resistivitas pengganti dari rangkaian paralel R_1 dan R_2 disebut resistivitas output dari sumber tegangan. Arti

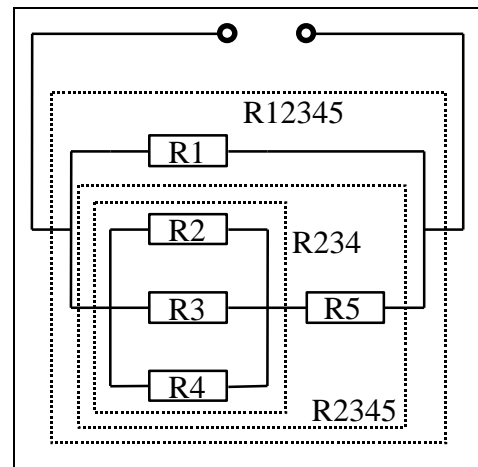


Gambar 3.10.: Rangkaian pembagi tegangan digambarkan dengan rangkaian ekuivalen untuk arus bolak-balik untuk mendapatkan sifat dari outputnya.

resistivitas output bisa dimengerti dari rangkaian di sebelah kanan dalam gambar 3.9. Resistivitas output dari suatu rangkaian, akan lebih banyak dibicarakan dalam pasal “3.2. Sumber tegangan dan beban”.

3.1.4. Rangkaian seri dan paralel dengan banyak resistor

Kalau terdapat rangkaian yang kompleks, resistor pengganti untuk seluruh rangkaian bisa dicari dengan membagi rangkaian itu ke dalam bagian-bagian rangkaian yang merupakan rangkaian paralel dan rangkaian seri, dan resistor pengganti dihitung langkah demi langkah. Satu contoh diperlihatkan pada rangkaian dalam gambar 3.11.. Dalam rangkaian itu pertama kita menghitung resistivitas R_{234} dari resistor pengganti R_{234} untuk rangkaian paralel yang dibentuk oleh resistor R_2 , R_3 dan R_4 . Kemudian kita menghitung resistivitas R_{2345} resistor pengganti R_{2345} dari rangkaian seri yang dibentuk oleh resistor R_{234} dan resistor R_5 . Akhirnya resistivitas R_{12345} dari resistor pengganti R_{12345} untuk seluruh rangkaian ini dihitung dari rangkaian paralel yang dibentuk oleh R_1 dan R_{2345} .



Gambar 3.11.: Kalau ada rangkaian resistor yang lebih kompleks, resistor pengganti bisa dicari dengan membagikannya ke dalam bagian rangkaian seri dan rangkaian paralel.

3.2. Sumber tegangan dan beban

Dalam pasal “3.1.3. Rangkaian seri yang dibebani” kita telah mengenal suatu sumber voltase yang tidak ideal, berarti voltasenya tidak konstan (Jacobus et al. 2023). Voltase akan turun ketika arus output naik. Sumber-sumber voltase yang sebenarnya ada biasanya bukan sumber voltase ideal, di mana voltase konstan dan sama sekali tidak tergantung dari besar arus yang mengalir. Kalau ada sumber voltase yang ideal, maka jika output dari sumber voltase itu dihubungkan dengan sebuah resistor dengan resistivitas R , arus yang mengalir akan ditentukan oleh hukum Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Ketika resistivitas R mendekati nol, arus akan mendekati tak berhingga dan daya yang dikeluarkan dari sumber voltase tersebut akan menjadi tak berhingga juga. Tetapi arus dan daya tidak mungkin menjadi tak berhingga.

Pada sumber tegangan, voltase akan turun kalau sumber dibebani dengan arus. Situasi ini selalu bisa digambarkan dengan dua rangkaian untuk sumber tegangan sbb.:

Rangkaian pertama:

Situasi seolah-olah menunjukkan bahwa sumber tegangan dibentuk oleh satu **sumber tegangan ideal** yang dirangkai secara **seri dengan satu resistor**. Situasi ini seperti dalam gambar 3.9. sebelah kanan dalam pasal "3.1.3. Rangkaian seri yang dibebani" atau dalam gambar 3.13. tengah. Kalau ada arus yang keluar dari sumber tegangan ini, maka voltase pada sumber voltase ideal tetap konstan, tetapi voltase pada resistor seri R_d bertambah sesuai dengan hukum Ohm:

$$V_{R_d} = R_d \cdot I_{out} \tag{3.25}$$

Voltase pada output sesuai dengan hukum Kirchoff yaitu sebesar selisih antara voltase pada sumber voltase ideal V_0 dengan voltase V_{R_d} pada resistor seri.:

$$V_{out} = V_0 - V_{R_d} = V_0 - R_{dalam} \cdot I_{out} \tag{3.26}$$

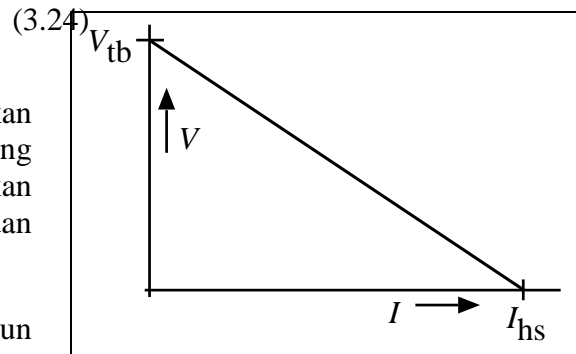
Besar dari resistivitas seri ini disebut sebagai "resistivitas dalam" R_{dalam} dari sumber tegangan.

Memang jelas bahwa voltase output tidak mungkin negatif sehingga arus output terbatas sampai arus maksimal I_{max} di mana $V_{out} = 0$. Arus maksimal ini akan mengalir kalau terminal dari sumber tegangan dihubung singkat. Hubungan antara voltase dan arus output yang terdapat dari model ini digambarkan dalam gambar 3.12.. Hubungan antara arus output dan voltase output dengan dua titik ujung adalah linear. Satu ujung terdapat pada arus nol yang mana voltase output maksimal dan sebesar V_0 atau voltase tanpa beban V_{tb} . Titik ujung kedua terdapat pada hubungan singkat di mana voltase output dari sumber tegangan menjadi nol dan arus menjadi sebesar arus hubung singkat I_{hs} . Besar arus hubung singkat terdapat dari (3.26):

$$V_{out} = 0 = V_0 - R_{dalam} \cdot I_{hs} \Leftrightarrow I_{hs} = \frac{V_0}{R_{dalam}} \tag{3.27}$$

Rangkaian kedua:

Satu model lain yang menjelaskan sifat dari output sumber tegangan adalah seperti rangkaian dalam gambar 3.13. sebelah kanan. Seolah-olah sumber tegangan dibentuk oleh satu **sumber arus yang ideal** dan dirangkai secara **paralel dengan satu resistor**. Kalau rangkaian ini dihubung singkat, maka terdapat arus output sebesar I_0 dari sumber arus, karena voltase akan nol dan sebab itu tidak ada arus yang mengalir dalam resistor



Gambar 3.12.: Hubungan antara voltase dan arus output dari sumber tegangan yang terdapat dari rangkaian linear.

R_{dalam} di dalam sumber tegangan. Jadi arus hubung singkat I_{hs} yang mengalir (ketika terdapat hubungan singkat pada keluaran sumber tegangan) sebesar arus I_0 dari sumber arus ideal. Kalau output dihubungkan lewat suatu resistor, maka pada output ini terdapat voltase tertentu. Karena adanya voltase, maka ada arus yang mengalir di dalam resistor dalam sehingga arus output akan berkurang sebesar selisih antara arus I_0 dari sumber tegangan dan arus I_{Rd} dalam resistor paralel:

$$I_{out} = I_0 - I_{R_{dalam}} = I_0 - \frac{V_{out}}{R_{dalam}} \Leftrightarrow V_{out} = \underbrace{I_0 \cdot R_{dalam}}_{=V_0 \text{ dari rangkaian pertama}} - \underbrace{R_{dalam} \cdot I_{out}}_{=R_{dalam} \cdot I_{out} \text{ dari rangkaian pertama}} \quad (3.28)$$

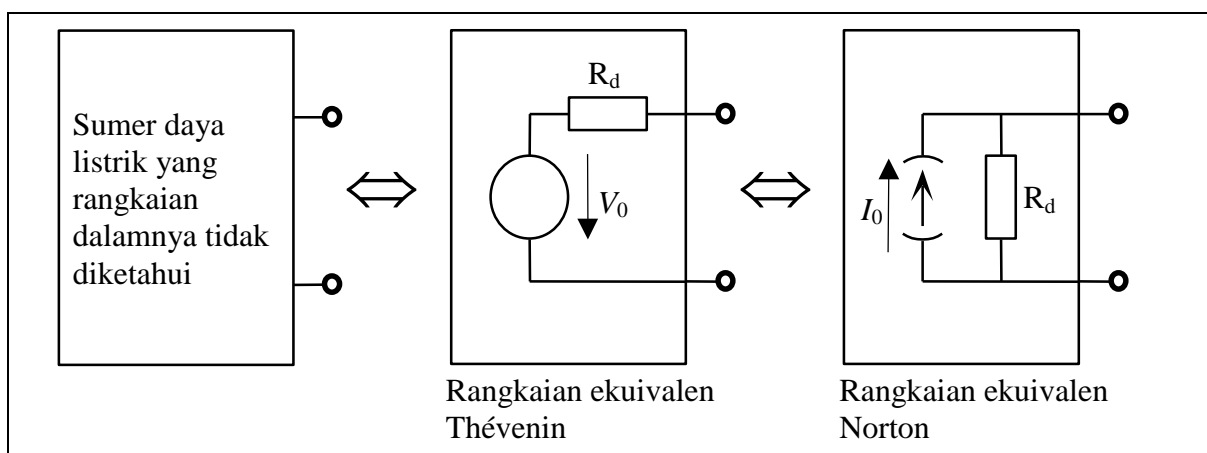
Kalau kedua rangkaian ini dibandingkan mengenai sifat outputnya, maka keduanya sama persis. Hubungan antara kedua rangkaian dan antara besaran-besaran dari kedua rangkaian bisa langsung dilihat dari (3.28) dan didaftarkan dalam tabel 3.1..

Setiap sumber tegangan yang memiliki rangkaian linear di dalamnya bisa digambarkan dengan dua rangkaian pada gambar 3.13.. Dua rangkaian ini disebut rangkaian ekuivalen untuk keluaran. Rangkaian pertama adalah rangkaian ekuivalen Thévenin dan rangkaian kedua adalah rangkaian ekuivalen Norton.

Rangkaian pertama dijelaskan dengan **teorema Thévenin**:

Mengenai sifat dari luar (sifat output) setiap jaringan linear dengan resistor-resistor dan sumber-sumber energi bisa digantikan dengan rangkaian seri dari satu sumber voltase ideal dan satu resistor dalam R_{dalam} . Besar voltase V_0 dari sumber voltase sama dengan voltase pada output V_{tb} ketika rangkaian terbuka, berarti ketika tidak ada sambungan pada output dan tidak ada arus yang mengalir dari sumber tegangan. Resistivitas R_{dalam} dari resistor R_{dalam} sebesar perbandingan antara voltase V_{tb} dan arus hubung singkat I_{hs} yang mengalir ketika output dihubung singkatkan:

$$R_{dalam} = \frac{V_{tb}}{I_{hs}}$$



Gambar 3.13.: Sifat keluaran dari suatu sumber tegangan selalu bisa dimengerti dengan rangkaian ekuivalen Thévenin dan rangkaian ekuivalen Norton.

<u>Besaran-besaran dalam rangkaian Thévenin</u>		<u>Besaran-besaran dalam rangkaian Norton</u>
V_0 dari rangkaian Thévenin	=	Arus dari sumber arus dari rangkaian Norton dikali dengan resistivitas dalam $I_0 \cdot R_{dalam}$
Arus hubung singkat dalam rangkaian Thévenin: $\frac{V_0}{R_{dalam}}$	=	Arus I_0 dari sumber arus dalam rangkaian Norton
Resistivitas dalam R_{dalam} dari Rangkaian Thévenin	=	Resistivitas dalam R_{dalam} dari rangkaian Norton

Tabel 3.1.: Hubungan antara besaran-besaran dalam rangkaian ekuivalen Norton dan rangkaian ekuivalen Thévenin.

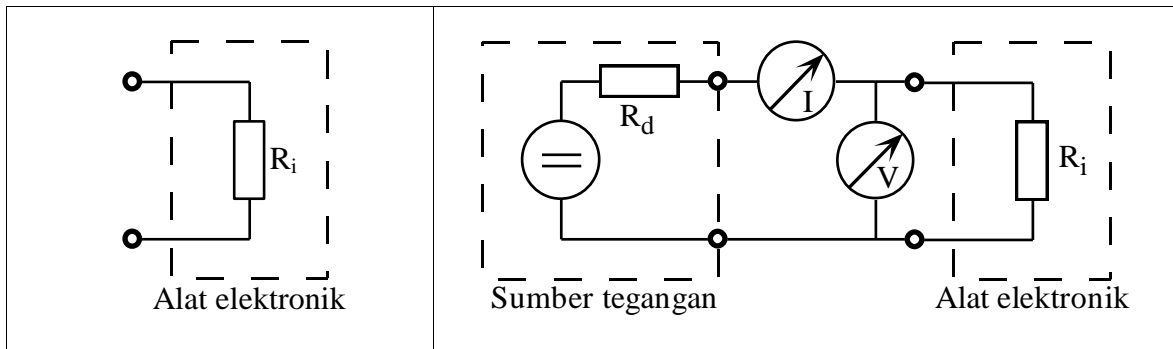
Rangkaian kedua dijelaskan dengan **teorema Norton**(Surjono 2011):

Mengenai sifat dari luar (sifat output) setiap jaringan linear dengan resistor-resistor dan sumber-sumber energi bisa digantikan dengan rangkaian paralel dari satu sumber arus yang ideal dan satu resistor R_{dalam} . Besar arus I_0 dari sumber arus sama besar dengan arus I_{hs} yang mengalir dari output ketika output dihubung - singkat. Resistivitas R_{dalam} dari resistor R_{dalam} sebesar perbandingan dari voltase V_{tb} yang terdapat kalau rangkaian terbuka, berarti tidak ada sambungan pada output dan tidak ada arus yang mengalir dari sumber tegangan dan arus hubung singkat I_{hs} :

$$R_{dalam} = \frac{V_{tb}}{I_{hs}}$$

Mengenai dua rangkaian ekuivalen, harus diperhatikan bahwa hanya sifat outputnya yang sama dengan rangkaian asli. Rangkaian asli sendiri mungkin jauh berbeda dari rangkaian ekuivalen. Mengenai sifat lain, misalnya pemakaian daya listrik, rangkaian ekuivalen tidak sama dengan rangkaian asli.

Satu hal lagi yang harus diperhatikan adalah bahwa dua rangkaian ekuivalen ini hanya bisa dipakai secara sempurna untuk rangkaian linear. Kalau suatu sumber tegangan tidak merupakan rangkaian linear (berarti kalau di dalamnya ada komponen yang tidak linear seperti dioda atau dioda Zener), maka rangkaian ekuivalen tidak lagi menggambarkan sifat dari sumber tegangan itu dengan benar. Tetapi kita tetap bisa memakai rangkaian ekuivalen dengan catatan bahwa rangkaian ekuivalen ini sekarang merupakan suatu pendekatan. Pendekatan biasanya cukup baik untuk perubahan voltase / arus yang tidak terlalu besar. (Apa yang terlalu besar tergantung dari rangkaian dan dari permintaan mengenai ketelitian perhitungan - contoh dalam tugas praktikum.)



Gambar 3.14.: Rangkaian ekuivalen untuk masukan dari suatu alat elektronik.

Gambar 3.15.: Rangkaian untuk mengukur resistivitas masukan dari suatu rangkaian.

Teori ini bukan hanya berlaku untuk arus DC saja, tetapi untuk setiap sumber tegangan dengan bentuk tegangan apapun juga (seperti AC dan voltase campur).

3.3. Resistivitas Masukan (Resistivitas Input)

3.3.1. Definisi dari resistivitas masukan

Setiap rangkaian elektronika yang memiliki suatu masukan, seperti misalnya suatu amplifier atau alat ukur, ketika terdapat voltase pada masukan, maka akan ada arus yang mengalir ke dalam masukan tersebut(Listiyarini 2018; Mismail 2011b). Biasanya besar dari arus yang mengalir bisa dimengerti dengan rangkaian ekuivalen untuk masukan seperti dalam gambar 3.14. yang mana antara dua sambungan masukan terdapat satu resistor R_i dengan resistivitas R_i yang disebut resistivitas masukan.

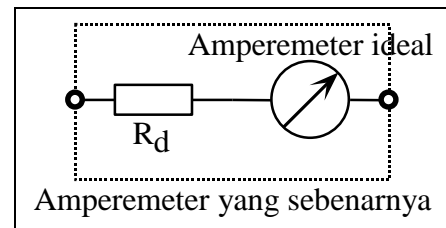
Umumnya besar resistivitas masukan R_i bisa dilihat dari skema rangkaian, tetapi kadang-kadang (khususnya kalau skema rangkaian tidak diketahui) resistivitas masukan perlu diukur. Untuk mengukur resistivitas masukan, suatu voltase dipakai pada masukan dan hubungan antara arus dan voltase diukur. Cara pengukuran ini sama dengan cara mengukur sifat dari komponen. Rangkaian ukur seperti dalam gambar 3.15. bisa dipakai. Rangkaian ini hanya merupakan suatu contoh. Ada juga beberapa rangkaian lain yang bisa digunakan untuk mengukur resistivitas masukan.

3.3.2. Pengaruh dari Resistivitas Masukan pada Voltmeter dan Amperemeter

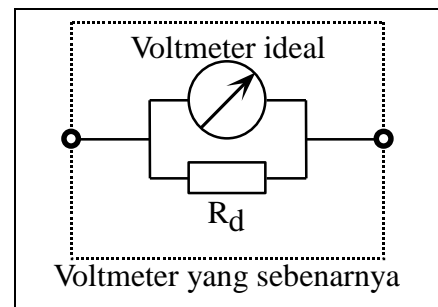
Kalau kita mengukur arus dalam suatu rangkaian, maka sambungan di mana arus mau diukur dibuka dan amperemeter dirangkai secara seri di dalam sambungan itu. Kalau mau mengukur voltase dalam suatu rangkaian, maka voltmeter dirangkai secara paralel pada dua titik di mana voltase mau diukur. Alat ukur yang ideal tidak akan mempengaruhi rangkaian yang diukur.

Kalau seandainya amperemeter memiliki resistivitas dalam nol, maka arus bisa mengalir dalam amperemeter dan bisa diukur tanpa adanya voltase pada amperemeter. Berarti sama sekali tidak ada perbedaan dalam rangkaian ketika amperemeter dipasang atau tidak dipasang. Amperemeter dengan resistivitas dalam nol disebut amperemeter ideal. Tetapi amperemeter ideal tidak ada. Setiap amperemeter memiliki resistivitas dalam yang lebih besar dari nol. Sebab itu, ketika arus mengalir dalam amperemeter, akan ada voltase pada amperemeter dan voltase itu akan mempengaruhi rangkaian yang asli. Kalau voltase itu cukup kecil (dibandingkan dengan voltase lain yang terdapat dalam rangkaian), voltase itu bisa diabaikan, tetapi kalau besar voltase dalam amperemeter hampir sebesar atau bahkan lebih besar daripada voltase lain dalam rangkaian, pengaruh dari amperemeter kepada rangkaian akan besar. Amperemeter yang ada mempunyai sifat seperti diperlihatkan dalam gambar 3.16. di mana suatu amperemeter ideal dirangkai secara seri dengan resistor dalam.

Situasi dengan voltmeter sebagai berikut: Kalau suatu voltmeter memiliki resistivitas dalam yang tak berhingga, maka tidak ada arus yang mengalir di dalamnya. Ketika voltmeter ini dipasang pada rangkaian, rangkaian itu sama sekali tidak dipengaruhi oleh voltmeter. Voltmeter dengan resistivitas dalam yang tak berhingga akan kita sebutkan sebagai voltmeter ideal. Voltmeter ideal jelas tidak ada, tetapi setiap voltmeter memiliki resistivitas dalam yang berhingga. Maka akan ada arus dalam voltmeter dan arus itu akan mempengaruhi rangkaian yang diukur. Kalau arus ini cukup kecil dibandingkan dengan arus-arus lain dalam rangkaian, arus dalam voltmeter bisa diabaikan, tetapi kalau arus-arus lain dalam rangkaian kira-kira sama atau bahkan lebih kecil daripada arus dalam voltmeter, maka arus dalam voltmeter bisa mempengaruhi kerja dari rangkaian asli secara drastis. Voltmeter yang ada bisa dimengerti seperti dalam gambar 3.17. di mana suatu voltmeter digambarkan sebagai rangkaian paralel dengan voltmeter ideal dan resistor dalam.



Gambar 3.16.: Amperemeter yang sebenarnya mempunyai sifat seperti rangkaian seri dengan amperemeter ideal dan resistor dalamnya.



Gambar 3.17.: Voltmeter yang sebenarnya sebagai rangkaian paralel dengan voltmeter ideal dan resistor dalamnya.

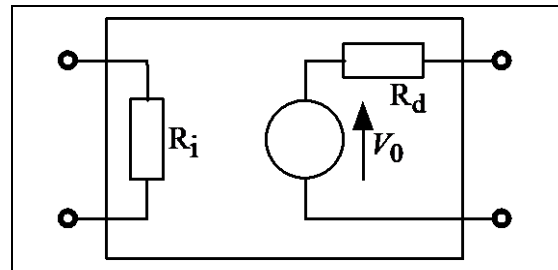
Pengaruh dalam contoh rangkaian ukur ketika kita mau mengukur voltase dan arus secara serentak bisa saudara mengerti dalam praktikum fisika dasar II dalam percobaan 2 tentang karakteristik lampu pijar.

3.4. Penguat (Amplifier)

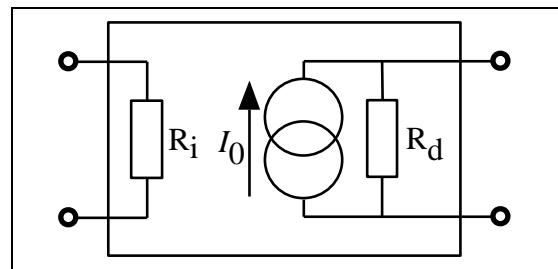
3.4.1. Prinsip-Prinsip Kerja

Fungsi dari suatu penguat sudah jelas dari namanya: menguatkan suatu sinyal (Dewantara n.d.; Muda 2013). Sering sinyal yang terdapat dari suatu pengukuran atau penerimaan dari antena pada radio atau sinyal asli yang lain tidak cukup kuat untuk dipakai secara langsung, tetapi perlu dikuatkan untuk diperlihatkan pada suatu display atau untuk menggerakkan suatu alat sebagai reaksi pada sinyal pada input. Beberapa contoh adalah sbb.:

- Sinyal yang dibaca oleh *reading head* pada tape merupakan suatu sinyal yang kecil. Untuk menggerakkan speaker dari tape diperlukan sinyal yang kuat, maka diperlukan suatu penguatan untuk menguatkan sinyal asli.
- Sinyal yang didapatkan dari suatu dioda peka cahaya kecil dan perlu dikuatkan sehingga suatu lampu atau suatu *counter* bisa dihidupkan atau dimatikan oleh sinyal tersebut.
- Sinyal yang diterima oleh antena radio kecil dan perlu dikuatkan supaya bisa menggerakkan speaker.



Gambar 3.18.: Rangkaian ekuivalen untuk penguat dengan memakai rangkaian ekuivalen Thévenin. $V_0 = A \cdot V_{in}$.



Gambar 3.19.: Rangkaian ekuivalen untuk penguat dengan memakai rangkaian ekuivalen Norton. $I_0 = A \cdot I_{in}$.

Suatu penguat elektronik adalah suatu rangkaian yang memiliki satu masukan dan satu keluaran. Masukan terdiri dari dua sambungan dan keluaran juga terdiri dari dua sambungan. Satu pasangan sambungan yang berhubungan disebut satu gerbang. Berarti penguat memiliki dua gerbang, satu gerbang input dan satu gerbang output. Sering pemakai tidak perlu mengetahui seluruh rangkaian di dalam penguat, tetapi cukup mengerti sifat dari input dan output rangkaian. Untuk mengerti sifat dari input dan output rangkaian, input dan output bisa diganti dengan rangkaian-rangkaian ekuivalennya. Sifat terpenting dari gerbang input adalah resistivitas input. Sebab itu input yang sebenarnya bisa diganti dengan rangkaian ekuivalen untuk input yang terdiri dari satu resistor antara kedua sambungan input saja. Output dari suatu penguat

merupakan satu sumber daya listrik, berarti satu sumber voltase atau sumber arus dengan resistivitas dalam. Resistivitas dalam ini sering disebut sebagai resistivitas output dari penguat. Sebab itu output bisa digambarkan dengan rangkaian ekuivalen Thévenin atau rangkaian ekuivalen Norton untuk sumber daya listrik. Jadi suatu penguat keseluruhan bisa digambarkan seperti dalam gambar 3.18. atau seperti dalam gambar 3.19.. Besar penguatan A bisa didefinisikan sebagai penguatan voltase di mana A adalah perbandingan antara voltase output tanpa beban, V_0 , dengan voltase input V_{in} yang bisa dituliskan sebagai persamaan:

$$V_0 = A \cdot V_{in} \quad (3.29)$$

Dimana dianggap bahwa penguatan linear, berarti faktor A tidak tergantung dari voltase input. Kalau penguatan tidak linear, persamaan (3.29) hanya berguna untuk voltase input tertentu.

Kalau output dinyatakan dengan rangkaian ekuivalen Norton seperti dalam gambar 3.19. lebih praktis untuk mendefinisikan penguatan arus sebesar A . Dengan mendefinisikan penguatan arus terdapat arus hubung singkat pada output sebesar:

$$I_0 = A \cdot I_{in} \quad (3.30)$$

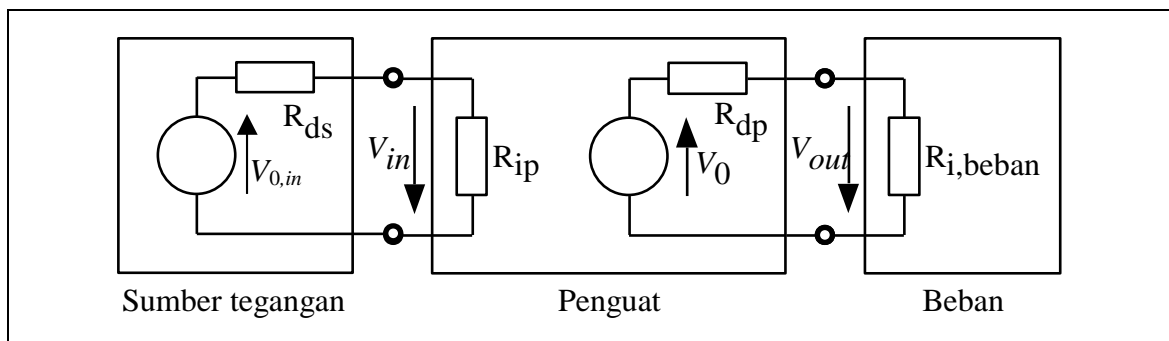
Di mana persamaan (3.30) juga ditulis untuk penguatan yang linear.

Berarti besaran-besaran yang penting untuk mengerti sifat dari suatu penguat adalah resistivitas input, resistivitas output, penguatan dan linearitas.

Pentingnya dari besaran-besaran tersebut akan menjadi jelas kalau kita menghitung voltase-voltase dan daya-daya pada satu sistem elektronik secara keseluruhan yang terdiri atas sumber tegangan, penguat dan beban. Sumber tegangan bisa merupakan antenna radio, reading head pada tape, output dari satu sensor suhu atau sensor cahaya atau sensor untuk besaran fisik yang lain atau bisa juga merupakan satu rangkaian lain dll.. Beban bisa berupa speaker radio, lampu, display, tahap penguat atau rangkaian pengelola berikutnya, dll. Secara keseluruhan terdapat rangkaian seperti dalam gambar 3.20. yang mana sumber, penguat dan beban dirangkai bersama dalam satu sistem elektronik.

Kita akan menghitung voltase output dan daya yang diberikan kepada beban dalam sistem ini.

Dari gambar 3.20. terlihat situasi dalam rangkaian ini. Voltase input V_{in} dari penguat



Gambar 3.20.: Satu sistem elektronik dengan sumber tegangan, penguat dan beban.

diperoleh dari sumber tegangan yang digambarkan dengan rangkaian ekuivalen Thévenin. Maka voltase V_0 dari sumber tegangan dibagi oleh pembagi tegangan yang dibentuk oleh resistor dalam sumber tegangan, R_{ds} , dan resistor input penguat, R_{ip} . Maka terdapat voltase input V_{in} pada penguat sebesar:

$$V_{in} = V_{0,in} \cdot \frac{R_{ip}}{R_{ip} + R_{ds}} \quad (3.31)$$

Maka dari penguatan voltase sebesar A terdapat voltase pada sumber voltase output sebesar:

$$V_0 = A \cdot V_{in} = A \cdot V_{0,in} \cdot \frac{R_{ip}}{R_{ip} + R_{ds}} \quad (3.32)$$

Arus yang mengalir dalam beban ditentukan oleh rangkaian seri dari resistivitas output penguat, R_{dp} , dan resistivitas input pada beban, $R_{i,beban}$. Maka terdapat voltase, arus dan daya pada beban:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_0 \frac{R_{i,beban}}{R_{dp} + R_{i,beban}} \\ I_{out} &= \frac{V_0}{R_{dp} + R_{i,beban}} \\ P_{beban} &= V_{out} \cdot I_{out} = V_0^2 \frac{R_{i,beban}}{(R_{dp} + R_{i,beban})^2} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Dari (3.31) sampai (3.33) terdapat rumus untuk voltase, arus dan daya output terhadap besar voltase input tanpa beban adalah sbb.:

$$V_{out} = V_{0,in} \cdot \frac{R_{ip}}{R_{ip} + R_{ds}} \cdot A \cdot \frac{R_{i,beban}}{R_{dp} + R_{i,beban}} \quad (3.34)$$

$$I_{out} = V_{0,in} \cdot \frac{\frac{R_{ip}}{R_{ip} + R_{ds}} \cdot A}{R_{dp} + R_{i,beban}} \quad (3.35)$$

$$P_{beban} = V_{out} \cdot I_{out} = V_{0,in}^2 \cdot \left(\frac{R_{ip}}{R_{ip} + R_{ds}} \cdot A \right)^2 \cdot \frac{R_{i,beban}}{(R_{dp} + R_{i,beban})^2} \quad (3.36)$$

Sebagai contoh kita menghitung situasi dimana terdapat suatu penguat dengan penguatan voltase sebesar $A = 100$. Input dari penguat dipasang pada suatu sumber tegangan yang menyediakan voltase AC dengan voltase efektif sebesar $V_{eff,0} = 10\text{mV}$ pada rangkaian terbuka (tanpa beban). Resistivitas output dari sumber itu sebesar $R_{ds} = 50\Omega$. Beban yang mau dijalankan dengan penguat ini memiliki resistivitas masuk sebesar $R_{i,beban} = 100\Omega$. Kita menghitung arus dan voltase output serta daya yang diberikan kepada beban pada dua resistivitas input, yaitu $R_{ip} = 10\text{k}\Omega$ dan $R_{ip} = 20\Omega$ dari penguat dan dua resistivitas output dari penguat, yaitu $R_{dp} = 100\Omega$ dan $R_{dp} = 10\text{k}\Omega$. Hasil dicatat dalam tabel 3.2..

$R_{ip} (\Omega)$	$R_{dp} (\Omega)$	$I_{out} (mA)$	$V_{out} (mV)$	$P_{out} (\mu W)$
20	100	1.43	143	204.5
20	10k	0.0283	2.83	0.08
10k	100	4.975	497.5	2475.2
10k	10k	0.099	9.85	0.97

Tabel 3.2.: Beberapa nilai untuk output dari penguat kalau resistivitas-resistivitas dalam dari penguat berbeda-beda.

Dari perhitungan di atas dilihat bahwa penguatan voltase yang sebenarnya didapatkan jauh lebih kecil daripada penguatan A dari penguat. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari resistivitas input dan output. Kalau dikehendaki supaya penguatan voltase paling besar, maka resistivitas input dari penguat harus dibuat besar dan resistivitas outputnya harus dibuat kecil. Suatu penguat voltase yang ideal memiliki resistivitas input yang tak berhingga dan resistivitas output nol. Tetapi penguat seperti ini tidak mungkin dibuatkan. Juga dengan mengubah resistivitas dalam dari sumber tegangan dan dari beban, voltase output dari penguat dan daya yang diberikan kepada beban akan berubah. Untuk setiap rancangan penguat terdapat situasi tersendiri dengan nilai tertentu untuk resistivitas dalam dari sumber tegangan yang dipakai, resistivitas beban, penguatan yang dibutuhkan dan syarat-syarat lain yang terdapat dalam konstruksi. Situasi ini akan menentukan, bagaimana penguat akan dirancang.

Kalau yang dikehendaki bukan penguatan voltase, tetapi penguatan arus yang maksimal, situasi menjadi lain ! Resistivitas input dan output harus berapa besar untuk mendapatkan penguat arus yang ideal ?

Jadi berapa besar resistivitas input dan output yang paling baik tergantung situasi pemakaian dari suatu penguat. Resistivitas-resistivitas dalam itu selalu merupakan besaran yang harus diperhatikan dengan baik.

3.4.2. Daya output

Satu pertanyaan yang bisa diajukan pada suatu sumber daya adalah: beban harus memiliki resistivitas berapa besar sehingga daya pada beban menjadi maksimal. Hal ini menjadi penting kalau daya yang disediakan terbatas dan oleh sebab itu penguatan perlu dimanfaatkan semaksimal mungkin.

Hal ini dihitung dalam satu soal PR.

Hasil :

Kalau terdapat sumber tegangan dengan resistivitas output R_d , maka daya yang diberikan kepada suatu beban R_{beban} menjadi maksimal apabila beban memiliki resistivitas masuk R_{in} yang sama dengan resistivitas output R_d dari sumber tegangan.

Kalau output dari sumber tegangan memiliki impedansi output Z yang kompleks, maka impedansi beban harus memiliki besar impedansi Z^* yang *conjugated complex* dari impedansi sumber. Membuat beban memiliki resistivitas yang sama disebut *impedance matching* atau **penyesuaian impedansi**. Penyesuaian impedansi sangat penting dalam berbagai bidang elektronika, misalnya untuk pemakaian frekuensi tinggi yang mana penyediaan daya listrik sulit dan mahal. (Kalau daya besar, sumber daya menjadi alat yang juga besar dan berat.)

Tetapi perlu juga diperhatikan bahwa daya yang diserap dalam penguat juga menjadi besar ketika beban dioptimalkan terhadap daya output. Sebab itu penguat daya tidak dirancang dengan *impedance matching* untuk daya, tetapi resistivitas outputnya dibuatkan sekecil mungkin sehingga daya yang diserap di dalamnya menjadi kecil.

3.4.3. Beberapa definisi lagi mengenai penguat

Power gain (penguatan daya): Power gain adalah perbandingan antara daya P_2 yang diberikan penguat kepada beban dan daya P_1 yang masuk ke dalam input penguat. Power gain biasanya tergantung frekuensi dan sering dinyatakan dalam satuan dB (desibel). Definisi dari satuan dB adalah sbb.:

$$Power\ gain\ (dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3.37)$$

di mana:

P_2 : daya yang diberikan penguat kepada beban .

P_1 : daya yang masuk ke dalam input penguat.

Kalau daya pada output lebih kecil daripada daya pada input dari suatu rangkaian, *Power gain* dalam dB akan memiliki nilai yang negatif.

Voltage gain (penguatan voltase): Voltage gain adalah perbandingan antara voltase output dan voltase input pada suatu penguat. Voltage gain juga sering dinyatakan dalam satuan dB, tetapi satuan dB secara asli merupakan satuan untuk daya, maka definisi untuk voltase perlu disesuaikan dengan memperhatikan bahwa daya berhubungan dengan kuadrat dari voltase. Definisi untuk *voltage gain* dalam satuan dB sbb.:

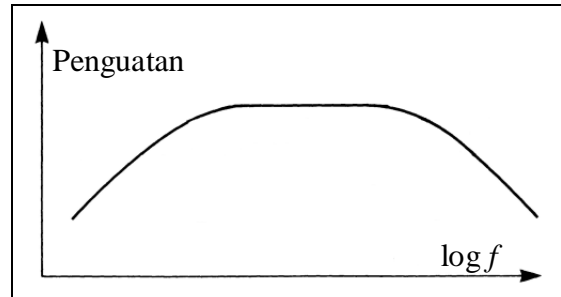
$$Voltage\ gain\ (dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (3.38)$$

di mana:

V_2 : voltase pada keluaran penguat.

V_1 : voltase pada input penguat.

Frequency response (ketergantungan frekuensi): Ketergantungan frekuensi dari penguatan disebut *frequency response* dari suatu penguat. Biasanya terdapat hubungan antara besar penguatan dengan frekuensi seperti dalam gambar 3.21. Disitu dilihat penguatan turun pada frekuensi kecil dan frekuensi besar, sedangkan pada frekuensi sedang penguatan akan lebih besar.



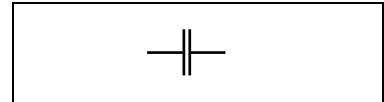
Gambar 3.21.: Hubungan antara penguatan dan frekuensi.

4. Kapasitansi dan Induktivitas

Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu menjelaskan tentang kapasitansi dan Induktansi dan penerapannya dalam rangkaian.

4.1. Kapasitansi

Satu komponen yang sering dipakai dalam elektronika adalah kondensator (Bisman 2003; Muda 2013). Lambang kondensator adalah dua garis yang paralel dan tegak lurus dengan sambungan kabel seperti diperlihatkan dalam gambar 4.1.. Lambang ini menunjukkan bahwa kondensator pada dasarnya dibentuk oleh dua plat logam yang terpisah oleh isolator seperti diperlihatkan dalam



Gambar 4.1.: Lambang kondensator untuk rangkaian elektronik.

gambar 4.2.. Ketika belum ada muatan pada plat logam, di antara plat logam belum ada medan listrik, maka belum ada voltase

$$\left(V = \int_0^s \vec{E} dx \right) \text{ antara kedua plat logam itu.}$$

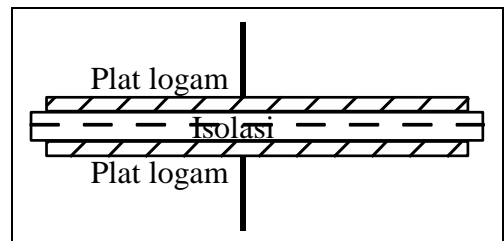
Karena belum ada voltase antara kedua plat logam, maka jelas belum ada voltase antara kedua kaki sambungannya. Kalau kondensator ini dihubungkan dengan suatu rangkaian, maka akan ada arus yang mengalir. Tetapi karena di antara plat logam dipasang sebuah isolator, arus tidak bisa lewat disitu, sehingga muatan yang bergerak (arus) bisa bergerak hanya sampai ke plat logam saja. Di situ muatan berkumpul, berarti pada plat logam akan ada semakin banyak muatan. Karena ada muatan pada plat logam, maka timbul medan listrik di antara plat logam, sehingga akan ada voltase antara dua plat logam. Karena ada voltase antara dua plat logam, berarti ada voltase antara kaki sambungan kondensator. Antara besar voltase dan banyaknya muatan yang ada di plat logam terdapat hubungan linier:

$$Q = C \cdot V \quad (4.1)$$

Besar dari konstanta C tergantung dari luas plat logam, jaraknya dan bahan isolasi yang ada di antara plat logam. Bahan isolasi di antara plat logam disebut dielektrik. Konstanta C adalah ciri dari kondensator dan disebut kapasitas atau kapasitansi.

Penjelasan ini menunjukkan besar voltase yang terdapat pada kondensator dalam rangkaian elektronik tergantung jumlah muatan yang ada di dalam kondensator tersebut. Jumlah muatan berhubungan dengan arus sesuai dengan definisi arus sebagai jumlah muatan per waktu:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (4.2)$$



Gambar 4.2.: Prinsip bangun dari kondensator.

Berarti arus adalah diferensial dari muatan terhadap waktu. Dari definisi arus (4.2) dan definisi kapasitansi (4.1) terdapat hubungan antara arus dan voltase pada kondensator sbb:

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{1}{C} Q \Leftrightarrow \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} \\ I &= \frac{dQ}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = C \frac{dV}{dt} \quad (4.3)$$

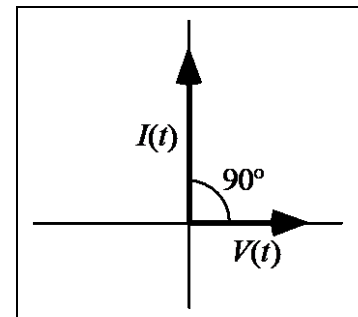
Jadi turunan dari voltase berbanding lurus dengan arus. Hal ini berarti bahwa pada kondensator bukan voltase yang menentukan besar arus, tetapi perubahan voltase menentukan besar arus. Atau dengan kata lain besar arus tidak berhubungan langsung dengan besar voltase, tetapi arus berhubungan dengan besar perubahan voltase. Kalau misalnya tidak ada arus, maka tidak ada perubahan voltase, sedangkan besar voltase bisa memiliki nilai apa saja.

Untuk arus bolak-balik dalam bentuk cosinus terdapat:

$$\left. \begin{aligned} V &= V_0 \cos \omega t \\ I &= C \frac{dV}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = -CV_0 \omega \sin \omega t = I_0 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$I_0 = V_0 C \omega$$

Berarti arus mendahului voltase, atau dengan kata lain arus tergeser 90° ke depan dari voltase, atau terdapat pergeseran fase antara voltase dan arus sebesar 90° . Kalau hasil ini digambarkan dalam diagram panah (fasor) terdapat gambar seperti dalam gambar 4.3..



Hubungan antara amplitude arus dan amplitude voltase terdapat dari (4.4):

$$\frac{V_0}{I_0} = \frac{1}{C\omega} \quad (4.5)$$

Gambar 4.3.: Pada kondensator arus tergeser 90° ke depan dari voltase.

Berarti hubungan antara besar arus dan besar voltase tergantung dari besar frekuensi dan besar kapasitansi. Kalau kapasitansi besar, arus akan besar dan kalau frekuensi besar, arus akan besar juga. Jadi kalau frekuensi semakin besar, kondensator semakin tidak menghambat arus. Untuk frekuensi 0, berarti dalam voltase DC tidak ada arus yang mengalir. Dengan kata lain **kondensator memisahkan voltase DC, tetapi menghubungkan voltase AC** (Riyadi, Warsito, and Facta 2011; Setiyo and others 2017).

Bilangan kompleks bisa dipakai juga untuk menghitung hubungan antara arus dan voltase dalam bentuk cosinus yang disambungkan dengan kondensator. Dengan perhitungan dalam bilangan kompleks terdapat hubungan sbb.:

$$V(t) = V_0 e^{i\omega t} \quad (4.6)$$

$$I(t) = C \frac{dV}{dt} = C \frac{dV_0 e^{i\omega t}}{dt} = V_0 C i \omega e^{i\omega t} \quad (4.7)$$

Dari (4.7) terdapat hasil yang sama dengan hasil (4.4): ada pergeseran fase antara arus dan voltase sebesar 90° di mana arus mendahului voltase. Hal ini dilihat dari faktor i pada $I(t)$ dalam (4.7). Kalau digambarkan dalam bidang bilangan Gauss, terdapat hasil yang telah digambarkan dalam gambar 4.3..

Untuk arus bolak-balik dalam bentuk cosinus besaran impedansi Z didefinisikan hampir sama dengan definisi dari resistivitas R . Impedansi Z tidak hanya menentukan hubungan antara besar arus dan voltase, tetapi juga mengandung arti mengenai pergeseran fase. Informasi tentang pergeseran fase terdapat dalam bagian imajinerinya. Impedansi Z terdefinisi sebagai perbandingan antara voltase dan arus dengan memakai bilangan kompleks:

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0 e^{i(\omega t + \psi_1)}}{I_0 e^{i(\omega t + \psi_2)}} \quad (4.8)$$

Dengan definisi ini terdapat impedansi Z dari kapasitansi sebesar:

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{V_0 e^{i\omega t}}{V_0 C i \omega e^{i\omega t}} = \frac{1}{i\omega C} \quad (4.9)$$

Impedansi dari kondensator tidak memiliki bagian real, tetapi merupakan impedansi yang imajiner secara penuh. Karena impedansi imajiner secara penuh, maka pergeseran fase antara arus dan voltase sebesar 90° . Besar harga mutlak dari impedansi membatasi arus yang bisa mengalir dalam kondensator.

Untuk daya pada kondensator terdapat perhitungan sbb.:

$$\begin{aligned} P(t) &= V(t) \cdot I(t) = V_0 I_0 \cdot \cos \omega t \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = V_0 I_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2} V_0 I_0 \cdot \cos \left(2\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Berarti terdapat daya seperti fungsi cosinus: Pada beberapa waktu daya akan positif dan pada beberapa waktu yang lain daya akan negatif, berarti energi diberikan kepada kondensator dan kemudian kondensator mengeluarkan energi itu kembali. Daya rata-rata nol ($\bar{P} = 0$), berarti semua energi yang dimasukkan ke dalam kondensator akan keluar lagi. Ternyata kondensator bisa menyimpan energi listrik. Energi itu disimpan dalam medan listrik yang terdapat antara plat-plat kondensator.

Karena daya rata-rata pada kondensator nol, maka tidak ada daya yang terdisipasi (yang dikeluarkan) pada kondensator. Bisa dikatakan: kondensator merupakan komponen non-dissipatif. Sebab itu kondensator tidak menjadi panas.

4.2. Induktivitas

Satu komponen lain yang sering dipakai dalam elektronika adalah kumparan. Lambang kumparan seperti diperlihatkan dalam gambar 4.4.. Kumparan adalah suatu lilitan kawat yang bisa memiliki kern, yaitu suatu isi ferromagnetik atau paramagnetik untuk

memperkuat medan magnet B . Ketika kumparan dialiri arus, maka akan ada medan magnet di dalam kumparan. Ketika arus berubah, maka medan magnet dalam kumparan akan berubah. Ketika medan magnet dalam kumparan berubah, maka akan ada induksi voltase di dalam kumparan yang sebanding dengan kecepatan perubahan medan magnet, di mana medan magnet sebanding dengan besar arus dalam kumparan. Sebab itu terdapat voltase induksi yang sebanding dengan kecepatan perubahan arus dalam kumparan. (Semua hal ini dibicarakan lebih detail dalam kuliah fisika dasar II.) Maka secara keseluruhan terdapat persamaan antara perubahan arus dan voltase pada kumparan sbb.:

$$V^*(t) = -L \frac{dI(t)}{dt} \quad (4.11)$$

Tanda minus menunjukkan bahwa voltase berlawanan arah dengan perubahan arus yang menghasilkan voltase induksi ini.

Tetapi untuk mendapatkan perubahan arus $\frac{dI(t)}{dt}$ diperlukan

voltase yang melawan voltase induksi ini, berarti dalam elektronika yang mana kita menghitung voltase $V(t)$ yang dipasang pada kaki komponen terdapat: $V(t) = -V^*(t)$. Sehingga rumus yang dipakai dalam elektronika adalah:

$$V(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \quad (4.12)$$

Konstanta L menunjukkan besarnya voltase induksi yang dihasilkan oleh suatu kumparan tertentu melalui medan magnet dari arus pada kumparan itu sendiri. L disebut induktivitas diri (induktansi diri). Induktivitas diri L tergantung dari jumlah lilitan, besar luas dalam lilitan dan bahan kern yang ada di dalam kumparan.

Kalau ada dua kumparan(kumparan 1 dan kumparan 2), berdekatan atau dililit di atas satu kern, maka perubahan arus dalam kumparan pertama akan menentukan voltase induksi dalam kumparan kedua:

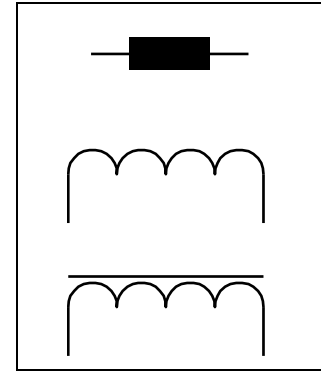
$$V_1(t) = L_{12} \frac{dI(t)}{dt} \quad (4.13)$$

Konstanta L_{12} adalah induktivitas untuk saling menginduksi. Dalam Buku Ajar ini kita hanya akan membicarakan mengenai induksi diri. Dari (4.12) terlihat bahwa turunan dari arus berbanding lurus dengan voltase pada kumparan. Untuk arus bolak-balik dalam bentuk cosinus terdapat:

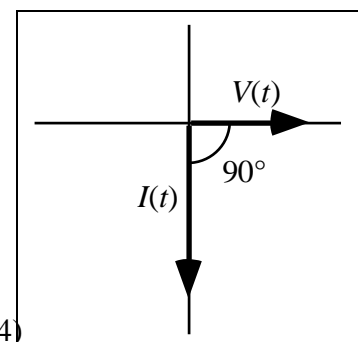
$$\left. \begin{aligned} I &= I_0 \cos \omega t \\ V &= L \frac{dI(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V(t) = -LI_0 \omega \sin \omega t = V_0 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.14)$$

$$V_0 = I_0 L \omega$$

Dari (4.14) terlihat bahwa arus menyusul voltase, atau dengan kata lain arus tergeser 90° ke belakang dari voltase



Gambar 4.4.: Lambang kumparan dalam skema rangkaian. Lambang di bawah adalah kumparan dengan kern.



Gambar 4.5.: Pada kumparan arus tergeser 90° ke belakang dari voltase.

atau terdapat pergeseran fase antara voltase dan arus sebesar 90° . Kalau hasil ini digambarkan dalam diagram panah terdapat gambar seperti dalam gambar 4.5..

hubungan antara amplitude arus dan amplitude voltase terdapat dari (4.14):

$$\frac{V_0}{I_0} = L\omega \quad (4.15)$$

Hubungan antara besar arus dan voltase tergantung dari frekuensi dan besar induktivitas. Kalau induktivitas besar, arus akan kecil dan kalau frekuensi besar, arus akan kecil juga. Jadi kumparan merupakan hambatan untuk frekuensi yang semakin besar. Untuk frekuensi 0, berarti untuk voltase DC, aliran arus tidak terhambat sama sekali oleh kumparan (untuk DC kumparan sama sekali tidak mempengaruhi arus). Dengan kata lain kumparan menghubungkan voltase DC, tetapi menghambat voltase AC.

Dengan memakai bilangan kompleks untuk hubungan antara arus dan voltase dalam bentuk AC terdapat:

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t} \quad (4.16)$$

$$V(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = L \frac{dI_0 e^{i\omega t}}{dt} = I_0 L i \omega e^{i\omega t} \quad (4.17)$$

Hasil dari (4.17) sama dengan hasil dari (4.14): terdapat pergeseran fase antara arus dan voltase sebesar -90° di mana arus menyusul voltase. Hal ini dilihat dari faktor i pada $V(t)$ dalam (4.17). Kalau digambarkan dalam bidang bilangan Gauss, terdapat hasil seperti dalam gambar 4.5..

Dengan memakai impedansi Z hubungan antara arus dan voltase serta pergeseran fase antara keduanya bisa ditentukan dengan mudah. Dengan definisi dari Z dalam (4.8) terdapat besar impedansi untuk kumparan dengan induktivitas diri sebesar L :

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} = \frac{I_0 L i \omega e^{i\omega t}}{I_0 e^{i\omega t}} = i\omega L \quad (4.18)$$

Impedansi dari kumparan tidak memiliki bagian real seperti impedansi dari kondensator, tetapi merupakan impedansi yang imajiner secara penuh. Karena impedansi imajiner secara penuh, maka pergeseran fase antara voltase dan arus sebesar 90° . Harga mutlak dari impedansi membatasi arus yang bisa mengalir dalam kumparan. Untuk frekuensi (atau impedansi) yang semakin besar, besar arus semakin dibatasi.

Untuk daya pada kumparan terdapat perhitungan sbb.:

$$\begin{aligned} P(t) &= V(t) \cdot I(t) = V_0 I_0 \cdot \cos \omega t \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = V_0 I_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2} V_0 I_0 \cdot \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Berarti terdapat daya seperti fungsi cosinus: Pada beberapa waktu daya akan positif dan pada beberapa waktu daya akan negatif, berarti energi diberikan kepada kumparan dan kemudian kumparan mengeluarkan energi itu kembali. Daya rata-rata nol ($\bar{P} = 0$),

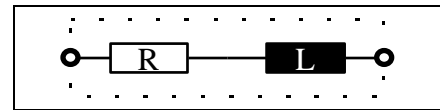
berarti semua energi yang dimasukkan ke dalam kumparan akan keluar lagi. Ternyata kumparan bisa menyimpan energi listrik. Energi itu disimpan dalam medan magnetik yang terdapat di dalam kumparan.

Karena daya rata-rata pada kumparan nol, maka tidak ada daya yang terdissipasi (yang dikeluarkan) pada kumparan. Bisa dikatakan: kumparan merupakan komponen non-dissipatif. Sebab itu kumparan tidak akan menjadi panas.

4.3. L, C dan R dalam Untai Arus Bolak-Balik

4.3.1. Kumparan Real: L dan R dirangkai secara seri

Dalam pasal sebelumnya hanya induktivitas, berarti sifat magnetik dari kumparan dihitung. Tetapi kumparan tidak hanya memiliki induktivitas L yang timbul karena adanya medan magnet di dalam kumparan, tetapi arus yang mengalir dalam kawat kumparan juga mengalami hambatan yang berasal dari resistivitas kawat. Resistivitas ini tidak dikehendaki, maka kumparan tanpa resistivitas disebut kumparan ideal. Tetapi setiap kumparan real selain memiliki induktivitas L juga memiliki resistivitas R . Sifat dari kumparan real dengan resistivitas dan induktivitas bisa dimengerti sebagai satu kumparan ideal tanpa resistivitas yang dirangkai seri dengan satu resistor yang memiliki resistivitas kawat kumparan seperti dalam gambar 4.6.. Kedua komponen pengganti seolah-olah dirangkai seri karena arus dalam resistivitas kawat dan di dalam induktivitas kumparan sama besar, maka rangkaian seri menggambarkan sifat dari kumparan real dengan benar.



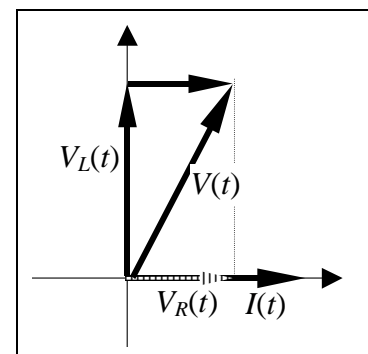
Gambar 4.6.: Kumparan real terdiri atas induktivitas dan resistivitas yang dirangkai secara seri.

Dalam rangkaian seri arus sama pada setiap tempat, dan voltasenya adalah jumlah dari voltase pada R dan L , sehingga impedansi seluruhnya merupakan jumlah impedansi dari masing-masing komponen:

$$V = V_L + V_R = Z_L \cdot I + Z_R \cdot I = Z \cdot I$$

$$\Rightarrow Z = Z_L + Z_R = Z_L + R = i\omega L + R \quad (4.20)$$

Dalam fasor (gambar 4.7.) terdapat panah untuk arus I dan voltase pada resistivitas dengan arah yang sama. Voltase pada induktivitas mendahului arus (dan voltase pada resistivitas) dengan selisih fase sebesar 90° sehingga jumlah dari voltase arus dan voltase induktivitas adalah satu panah yang miring. Besar sudutnya tergantung dari perbandingan antara besar impedansi kumparan dan besar resistivitas.



Gambar 4.7.: Voltase pada induktivitas dan pada resistivitas dari kumparan real dijumlahkan menjadi voltase seluruhnya.

paran real secara keseluruhan pergeseran fase antara voltase dan arus dan harga mutlak dari impedansi akan tergantung dari frekuensi, dari L dan dari besar resistivitas R yang terdapat dalam kumparan. Kalau R kecil dibandingkan dengan ωL , maka pengaruh dari resistivitas R bisa diabaikan. Berarti semakin besar frekuensi, R semakin tidak mempengaruhi, atau dengan kata lain semakin besar frekuensi, kumparan semakin bersifat sebagai kumparan ideal.

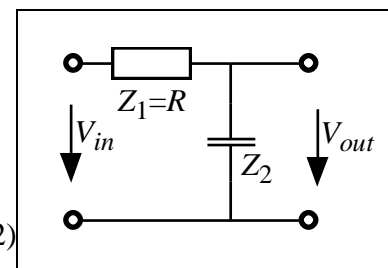
4.3.2. “Pembagi Tegangan” dengan Resistor dan Kondensator

Rangkaian dalam gambar 4.8. merupakan satu rangkaian dengan satu masukan dan satu keluaran, berarti merupakan rangkaian dua gerbang seperti suatu penguat. Cuma disini tidak terjadi penguatan antara input dan output. “Penguatan” voltase atau *voltage gain* A tetap bisa didefinisikan sebagai perbandingan antara output dan input:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.21)$$

Sisi kiri dari rangkaian dalam gambar 4.8 dipakai sebagai input dan sisi kanan dipakai sebagai output. Maka terdapat *voltage gain* dari persamaan untuk pembagi tegangan:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{1}{1 + i\omega RC} \quad (4.22)$$



Gambar 4.8.: *Lowpass filter* yang sederhana.

Dari (4.22) terdapat harga mutlak dan fase dari A sbb.:

$$|A(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}; \quad \varphi = \arctan \omega RC \quad (4.23)$$

Hubungan antara $|A|$ dan frekuensi f dan hubungan antara pergeseran sudut dan frekuensi f yang terdapat dari (4.23) digambarkan seperti dalam gambar 4.9.

Kalau frekuensi rendah, output hampir sama besarnya dengan input. Kalau frekuensi naik, bagian input yang diteruskan ke output akan berkurang. Berarti frekuensi rendah diteruskan dan frekuensi tinggi diserap. Sebab itu rangkaian ini disebut *lowpass filter* atau tapis lolos rendah. Frekuensi di mana hanya $\frac{1}{\sqrt{2}}$ dari input diteruskan ke output disebut *cutoff frequency* f_c atau frekuensi batas 3dB:

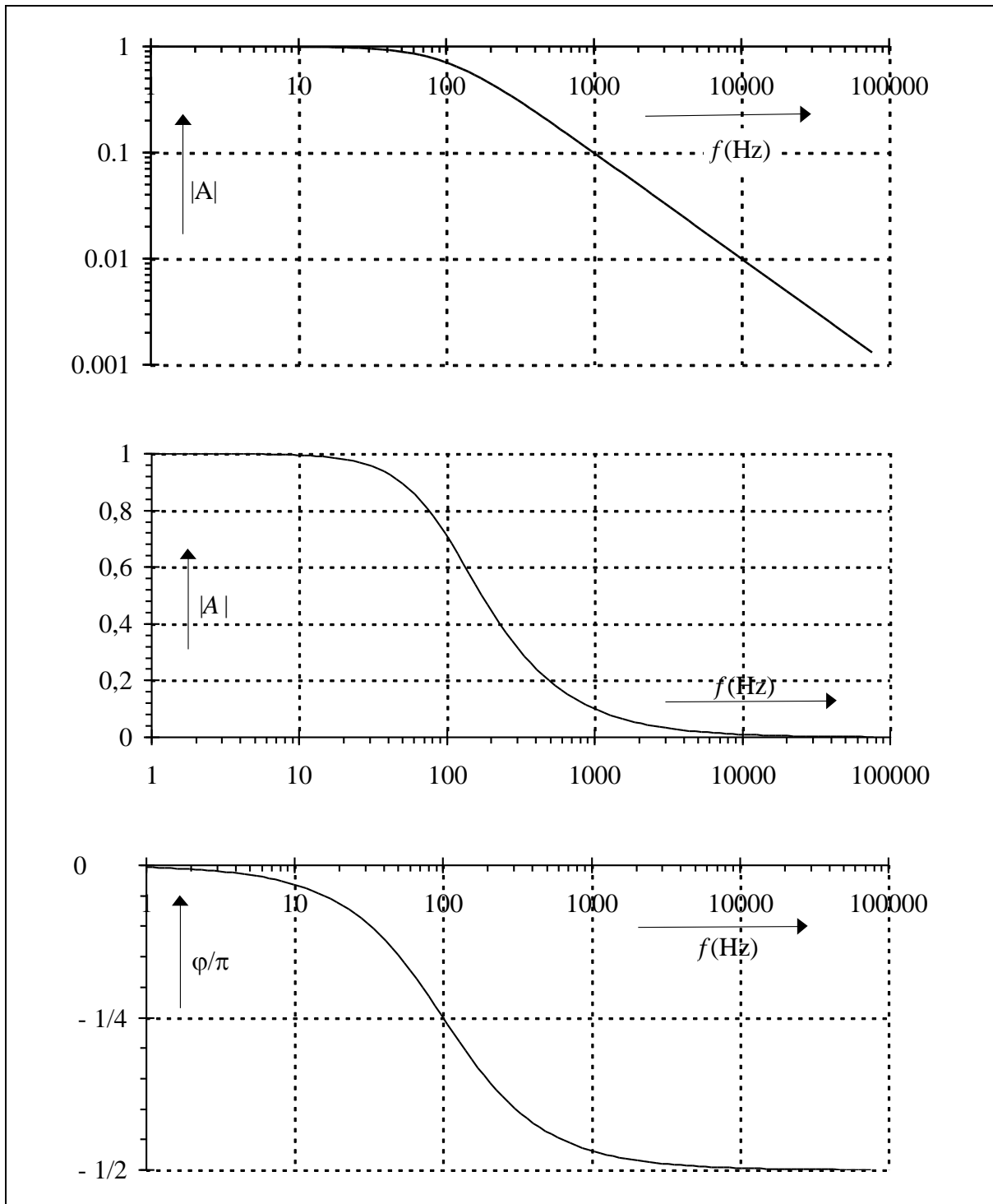
$$|A(f_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.24)$$

Pada *cutoff frequency*, output berkurang 3dB daripada input, berarti:

$$\begin{aligned}
|A(f_c)| &= -3\text{dB} \\
\Leftrightarrow 20\log|A(f_c)| &= 20\log\frac{|V_{out}(f_c)|}{|V_{in}(f_c)|} = -3 \\
\Leftrightarrow \frac{|V_{out}(f_c)|}{|V_{in}(f_c)|} &= 10^{\left(\frac{-3}{20}\right)}
\end{aligned}
\tag{4.25}$$

Dari (4.23) dan definisi (4.24) terdapat besar frekuensi batas 3dB pada *lowpass filter* dalam rangkaian gambar 4.8 sbb.:

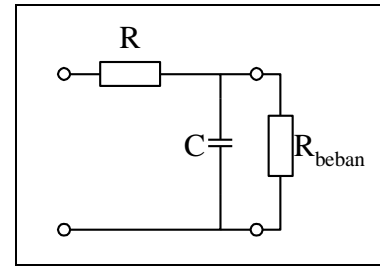
$$\begin{aligned}
|A(\omega_c)| &= \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 R^2 C^2}} \\
\Leftrightarrow 1 + \omega_c^2 R^2 C^2 &= 2 \Leftrightarrow \omega_c = \frac{1}{RC} \\
\Rightarrow f_c &= \frac{1}{2\pi} \omega_c = \frac{1}{2\pi RC}
\end{aligned}
\tag{4.26}$$



Gambar 4.9. Hubungan antara *voltage gain* $|A|$ dan frekuensi dan hubungan antara pergeseran fase ϕ dan frekuensi pada *lowpass filter* dari gambar 4.8.. Untuk hasil seperti ini dipakai rangkaian dengan resistivitas sebesar 1591Ω dan kapasitansi sebesar $1\mu\text{F}$, berarti terdapat cutoff frequency (frekuensi batasan 3dB) sebesar 100Hz. Dalam gambar di atas $|A|$ dan f digambarkan dalam skala logaritmis. Dalam kedua gambar lainnya hanya f yang digambarkan dalam skala logaritmis.

Bahwa output dari rangkaian seperti ini turun terhadap frekuensi bisa dilihat dengan mudah dari voltase dan arus pada resistor dan kondensator dalam fasor. Silahkan pikirkan sendiri, bagaimana situasi dalam fasor berubah kalau frekuensi berubah, dan bagaimana hubungan antara voltase dan arus didapatkan dalam fasor.

Kalau frekuensi dan harga mutlak dari $|A|$ digambarkan dalam skala logaritmis, maka terdapat kemiringan 1.. Yang dimaksud dengan kemiringan 1 berarti bahwa $|A|$ turun satu dekade ketika f naik satu dekade. Dikatakan bahwa filter ini mempunyai orde 1.

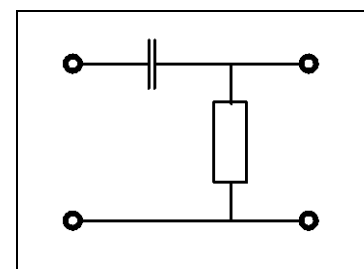


Gambar 4.10.: Rangkaian *lowpass filter* yang dibebani dengan R_{beban} .

Kalau rangkaian ini dibebani, berarti pada output rangkaian ini ada arus keluar (misalnya karena ada resistor yang dirangkai secara paralel dengan kondensator seperti dalam gambar 4.10) maka perhitungan berubah. Kalau resistivitas beban besar dibanding dengan resistivitas rangkaian asli, maka arus yang mengalir dalam beban bisa diabaikan dan sifat rangkaian hampir sama. Tetapi kalau arus dalam beban lebih besar dibanding dengan arus yang mengalir dalam rangkaian asli, maka sifat rangkaian akan berubah jauh. Cara menghitung sifat dari rangkaian ini sama dengan rangkaian seri dan paralel dengan resistor, hanya disini impedansi Z yang kompleks harus dipakai. Berarti terlebih dahulu menghitung impedansi R_{beban} yang dirangkai paralel dengan kondensator menghasilkan Z_{RC} . Kemudian dari rangkaian seri dengan Z_{RC} dan resistor R terdapat sifat rangkaian seluruhnya. Sifat dari rangkaian ini bisa juga dimengerti dengan memakai fasor. Rangkaian bisa juga dipandang dari keluarannya sebagai rangkaian paralel dengan resistor R dan kondensator C sehingga terdapat impedansi keluaran yang mempengaruhi voltase keluaran ketika ada arus keluaran. Semakin besar arus dalam beban, maka sifat dari rangkaian ini akan semakin mendekati sifat dari pembagi tegangan dengan dua resistor, dan bukan lagi pembagi tegangan dengan resistor dan kondensator. Berarti sifat tapis lolos rendah akan semakin hilang. Hal ini harus diperhatikan kalau merancang filter untuk keperluan tertentu. Mengenai sifat dari rangkaian yang dibebani silahkan cari dalam buku-buku elektronika atau hitung sendiri.

Kalau resistor dan kondensator dibalikkan seperti dalam gambar 4.11. akan terdapat suatu rangkaian *highpass filter* atau tapis lolos tinggi.

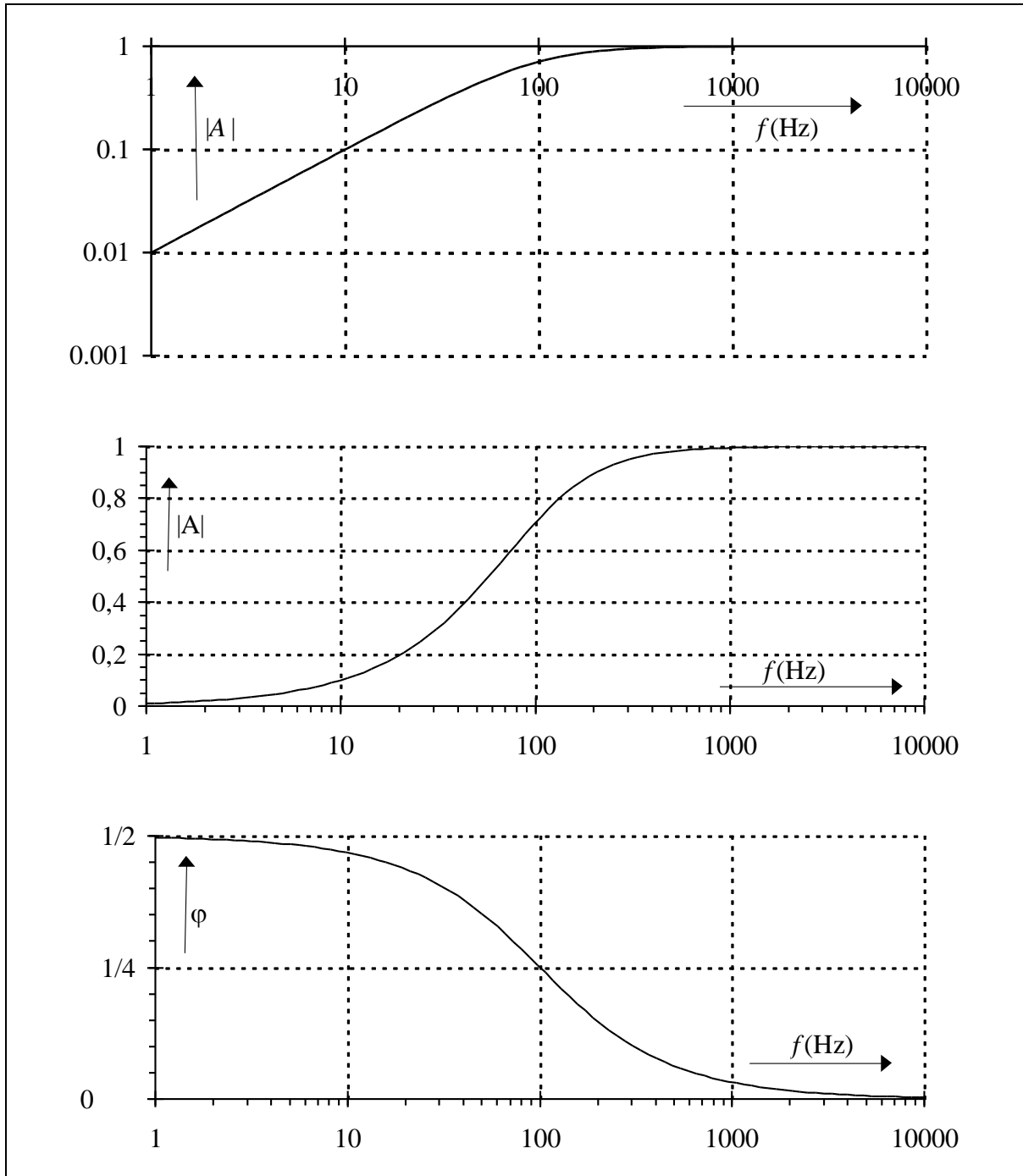
Mengapa rangkaian ini merupakan *highpass filter* (tapis lolos tinggi) ? Silahkan hitung sendiri persamaan untuk A , $|A|$ dan ϕ .



Gambar 4.11.: *Highpass filter* yang sederhana.

Definisi dari frekuensi batas 3dB sama dengan definisi pada *lowpass filter*.

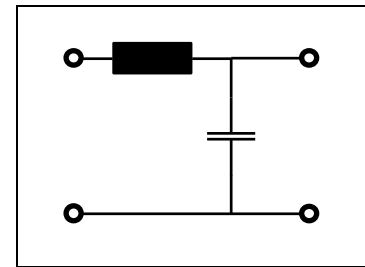
Grafik untuk *voltage gain A* dan pergeseren fase dari rangkaian *highpass filter* diperlihatkan dalam gambar 4.12..



Gambar 4.12.: *Voltage gain* dan pergeseran fase pada *highpass filter* dengan rangkaian seperti dalam gambar 4.11.. Arti dari ketiga gambar dan data dari R dan C sama seperti dalam gambar 4.9.. Filter ini juga merupakan filter orde 1 seperti *lowpass filter* dalam gambar 4.8..

4.3.3. “Pembagi Tegangan” dengan Kondensator dan Kumparan

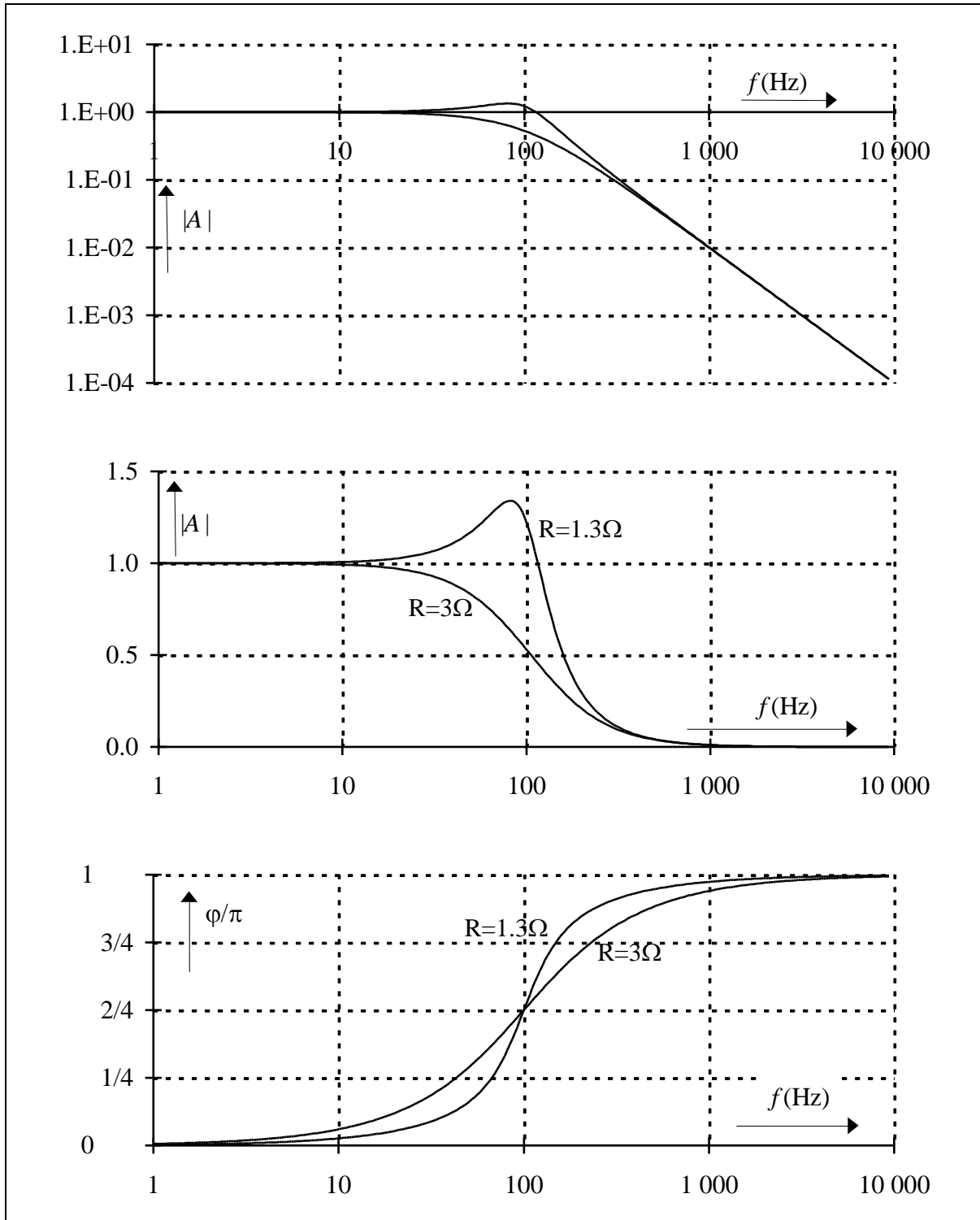
Kalau *lowpass filter* dengan resistor dan kondensator diubah, dan resistor digantikan dengan suatu kumparan, maka perubahan dari voltage gain $|A|$ terhadap frekuensi akan semakin besar. (Mengapa ?) Skema rangkaian dari *lowpass filter* ini digambarkan dalam gambar 4.13.. Terdapat hubungan antara frekuensi dan voltage gain $|A|$ seperti dalam gambar 4.14.. Pada grafik dalam gambar 4.14. sudah diperhatikan bahwa kumparan bukan kumparan ideal, tetapi kumparan real yang memiliki resistivitas R yang dirangkai secara seri dengan induktivitas dirinya (induktivitas L). Kalau resistivitas R kecil, pada frekuensi resonansi rangkaian LC akan terdapat voltase yang sangat tinggi. Semakin besar resistivitas R , Amplitude dari voltase semakin tidak memiliki puncak (puncaknya rendah) pada frekuensi resonansi. dan juga pengalihan dari pergeseran fase tidak lagi tajam pada frekuensi resonansi, tetapi menjadi pengalihan yang berlahan-lahan. Filter ini merupakan filter orde 2: Kalau harga mutlak dari voltage gain $|A|$ digambar secara logaritmis terhadap frekuensi yang juga digambar secara logaritmis, maka terdapat kemiringan 2. Sebab itu pengalihan antara frekuensi yang bisa lewat dan yang tidak bisa lewat lebih tajam daripada yang terdapat pada filter orde 1.



Gambar 4.13.: *Lowpass filter* dengan kumparan dan kondensator.

Silahkan jelaskan sendiri perubahan fase dari filter ini dengan memakai diagram panah (fasor).

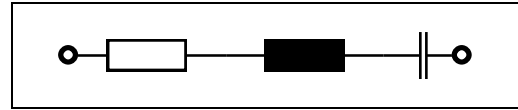
Kalau letak kumparan dan kondensator ditukarkan akan terdapat *highpass filter* dengan orde 2.



Gambar 4.14.: Hubungan antara harga mutlak dan fase dari *voltage gain* terhadap frekuensi pada *lowpass filter* dari gambar 4.13.. Data dari komponen yang dipakai: $C = 1\text{mF}$, $L = 2.53\text{mH}$, $R = 3\Omega$ dan 1.3Ω (R adalah resistivitas dari kumparan). Kalau $R = 1.3\Omega$, dekat dengan frekuensi resonansi, *voltage gain* $|A|$ menjadi lebih besar dari 1. Filter ini adalah filter orde 2. (Mengapa ?)

4.3.4. L, C dan R dalam Untai Seri

Kalau resistor, kumparan dan kondensator dirangkai secara seri terdapat skema rangkaian seperti dalam gambar 4.15.



Gambar 4.15.: Rangkaian seri dengan resistor dan kumparan (kumparan real) dan kondensator.

Silahkan jelaskan sendiri, bagaimana sifat dari rangkaian ini. Bagaimana hubungan antara impedansi dan frekuensi dan dimana terdapat impedansi yang paling kecil / besar.

Impedansi dari rangkaian ini terdapat dari jumlah impedansi dari komponen masing-masing:

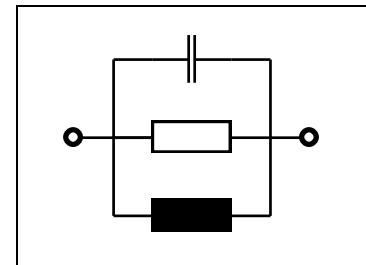
$$Z = R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$
$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad \varphi = \arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (4.27)$$

Kalau (4.27) digambarkan dalam satu grafik $|Z|$ terhadap frekuensi dan φ terhadap frekuensi terdapat grafik seperti dalam gambar 4.17..

Filter ini disebut *bandpass filter* (tapis lolos pita). Mengapa ?

4.3.5. L, C dan R dalam Untai Paralel

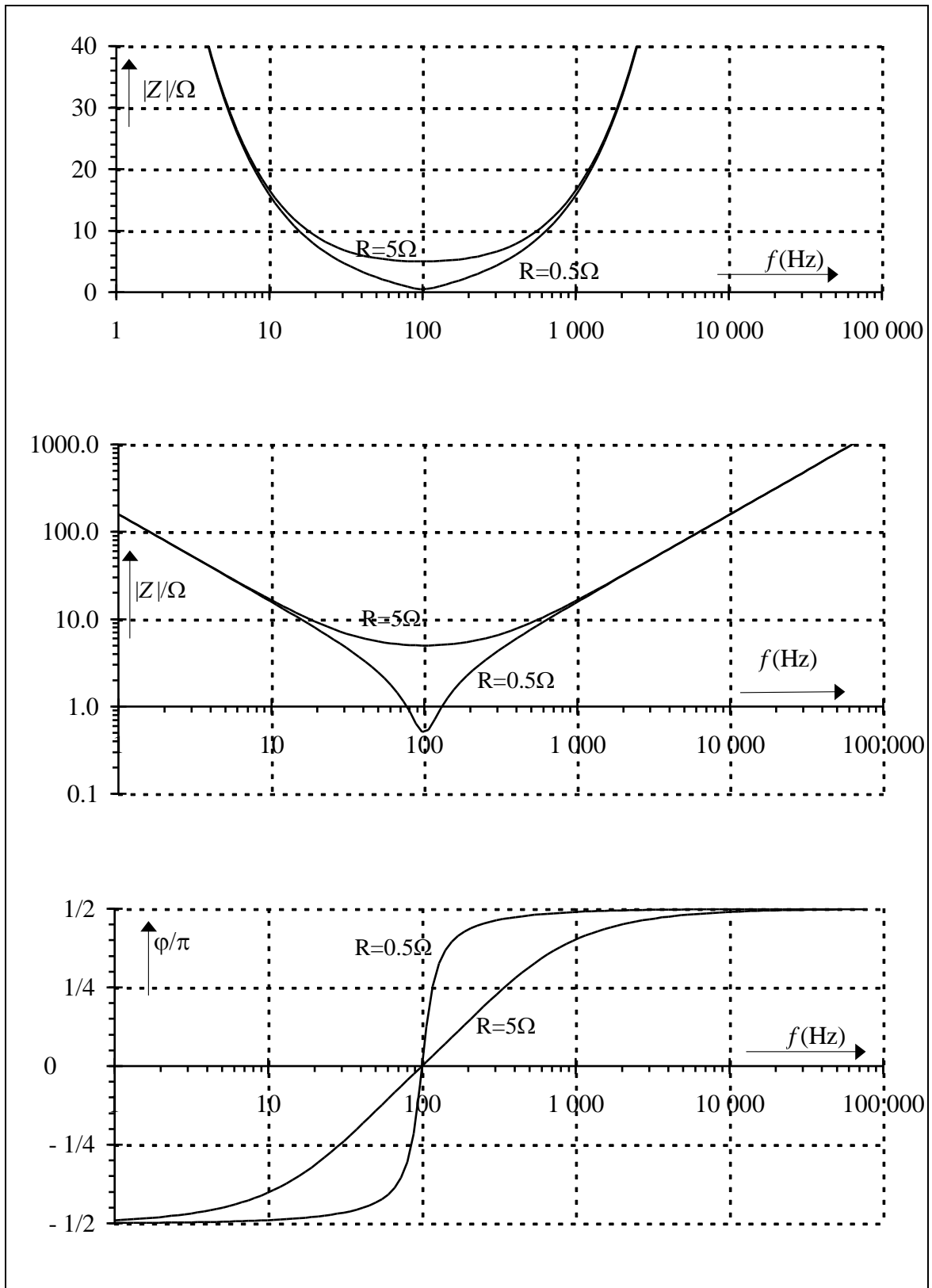
Pada untai RLC yang paralel seperti dalam gambar 4.16. terdapat sifat untuk $|Z|$ dan φ seperti dalam grafik gambar 4.18. Silahkan hitung dan jelaskan sendiri bagaimana sifat ini didapatkan.



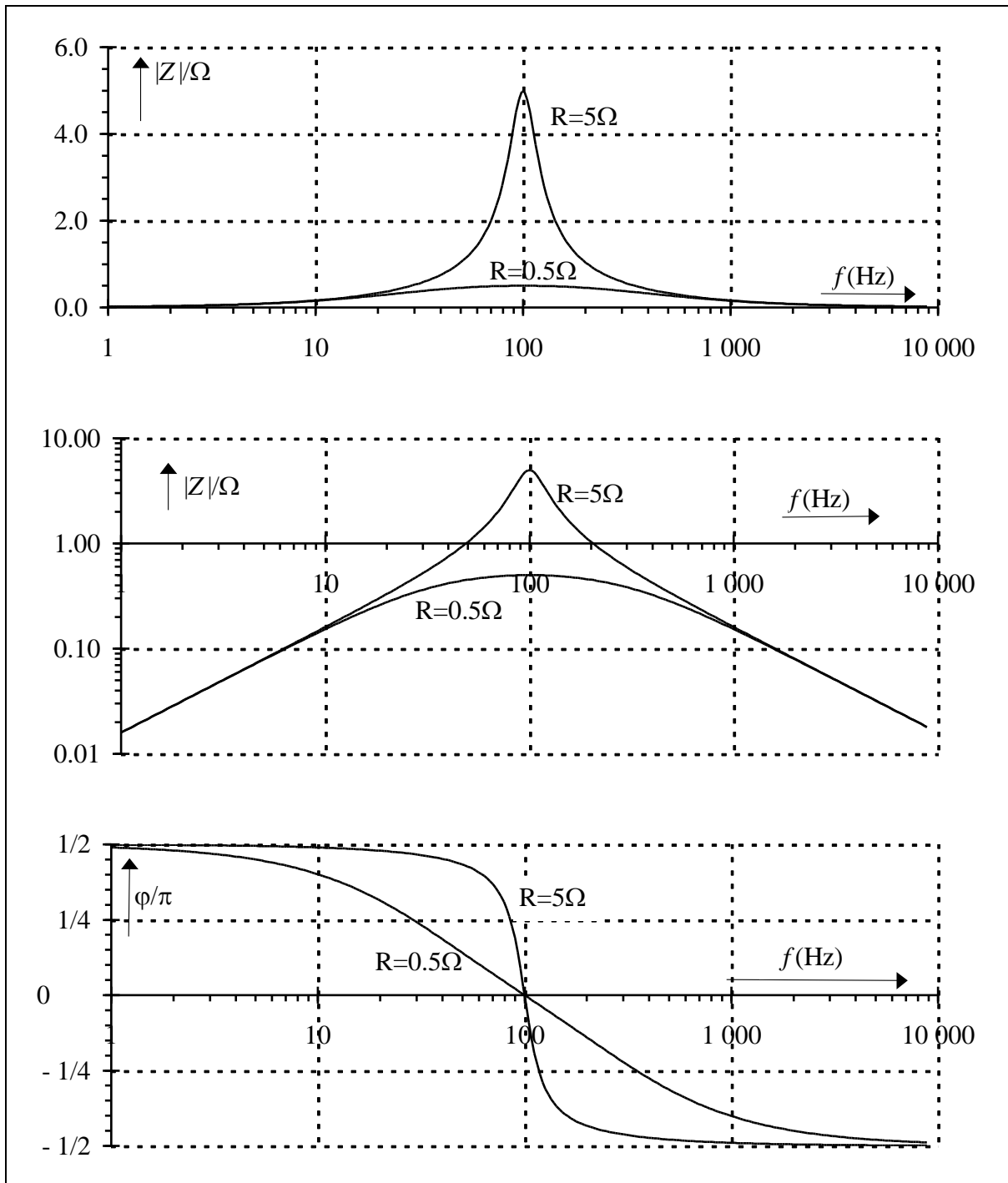
Gambar 4.16.: Rangkaian RLC paralel.

4.3.6. Filter dengan Orde yang lebih tinggi

Dengan menggabungkan beberapa filter, orde dari filter bisa dibuat lebih tinggi dan sifatnya menjadi lebih tajam, berarti voltage gain berubah lebih cepat dengan daerah frekuensi di mana filter mulai “tutup”. Tetapi kehilangan energi juga akan bertambah kalau jumlah komponen ditambahkan. Satu solusi untuk mengatasi kehilangan energi yang semakin besar adalah filter aktif (*active filters*) yang tersusun dari kondensator, kumparan dan Op-Amp.



Gambar 4.17.: Impedansi dari rangkaian seri dengan R, L dan C terhadap frekuensi. Data dari komponen yang dipakai: $C = 1\text{mF}$, $L = 2.53\text{mH}$, $R = 5\Omega$ dan 0.5Ω . Pada $R = 0.5\Omega$ resonansi lebih tajam. Orde dari filter ini berapa ?



Gambar 4.18.: Impedansi dari rangkaian paralel dengan R, L dan C terhadap frekuensi. Data dari komponen yang dipakai: $C = 1\text{mF}$, $L = 2.53\text{mH}$, $R = 5\Omega$ dan 0.5Ω . Pada $R = 5\Omega$ resonansi lebih tajam. Orde dari filter ini berapa ?

5. Teori Semikonduktor

Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu menjelaskan bahan penyusun semikonduktor dan mahasiswa mampu menjelaskan dioda yang terbuat dari semikonduktor.

5.1. Arus Listrik dalam Bahan

Dalam logam dan dalam semikonduktor ada muatan yang bisa bergerak sehingga bisa didapatkan arus listrik karena gerakan muatan itu (Setiyo and others 2017). Dalam logam kira-kira setiap atom memberikan satu elektron yang bisa bergerak, berarti jumlah muatan yang bisa bergerak sama dengan jumlah atom yang ada. Kerapatan elektron bebas n yang terdefinisi sebagai jumlah elektron bebas N per volume V sama dengan jumlah atom per volume ($n = \frac{N}{V}$). Jumlah atom per volume sebesar pecahan dari konstanta Avogadro (jumlah atom per mol) dan volume dari satu mol.

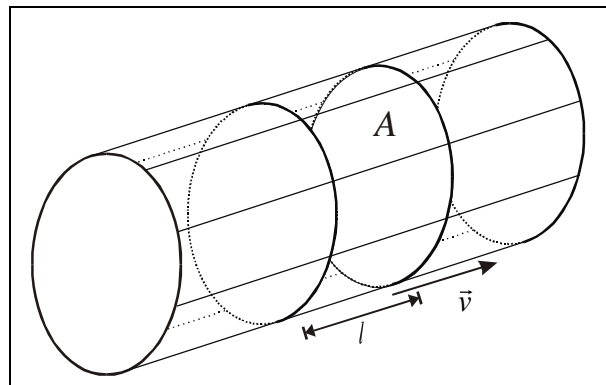
$$\frac{\text{konstanta Avogadro } A}{\text{Volume per mol}} = \frac{\frac{\text{Jumlah atom } N}{\text{mol}}}{\frac{\text{volume } V}{\text{mol}}} = \frac{N}{V} = n \quad (5.1)$$

Sebagai contoh, pada tembaga terdapat kerapatan elektron bebas sebesar $n = 8.43 \cdot 10^{22} \text{ cm}^3$.

Hubungan antara besar arus, jumlah elektron dan sifat-sifat elektron bisa dimengerti sbb.. Arus I yang lewat satu bidang terdefinisi sebagai jumlah muatan Q yang lewat per detik. Kerapatan arus j adalah besar dari arus I per luas bidang yang dilewati:

$$j = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{A} = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} \quad (5.2)$$

Kita anggap terdapat satu kawat, berarti satu silinder logam yang mana elektron bergerak ke satu arah (dalam contoh ke kanan). Kecepatan elektron rata-rata sama sehingga kita bisa menganggap terdapat satu volume V dengan luas A yang sebesar luas kawat dan panjang l (antara titik **A** dan titik **B**), dan volume ini berisi elektron dengan kerapatan n . Situasi seperti diperlihatkan dalam gambar 5.1.. Seluruh volume V bergerak ke kanan. Untuk bergerak dari posisi awal yang mana ujung kanannya pada posisi **A** sampai ke posisi akhir yang mana ujung kirinya pada posisi **A** dibutuhkan waktu t . Untuk mengetahui besar kerapatan arus dari persamaan (5.2), besaran Q , t dan A perlu diketahui.



Gambar 5.1.: Elektron-elektron bergerak dengan kecepatan rata-rata \vec{v} ke kanan.

Besar muatan Q dalam Volume V terdapat dari kerapatan pembawa muatan, besar volume dan besar muatan per pembawa muatan:

$$Q = n \cdot V \cdot e \quad (5.3)$$

Panjang l yang dilewati dalam waktu t terdapat dari kecepatan gerak v dan dari waktu t :

$$l = v \cdot t \quad (5.4)$$

Maka terdapat besar volume V :

$$V = A \cdot v \cdot t \quad (5.5)$$

Dalam volume V tersebut terdapat besar muatan sesuai dengan (5.3), maka jumlah muatan yang melewati posisi A akan sebesar:

$$Q = n \cdot A \cdot v \cdot t \cdot e \quad (5.6)$$

Maka dari (5.2) dan (5.6) terdapat kerapatan arus sebesar:

$$j = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{A} = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} = \frac{n \cdot A \cdot v \cdot t \cdot e}{t} \cdot \frac{1}{A} = n \cdot v \cdot e \quad (5.7)$$

Elektron dalam bahan tidak bisa bergerak dengan bebas, tetapi mengalami suatu hambatan sehingga kecepatannya tidak naik dengan waktu, tetapi kecepatannya sebanding dengan medan listrik yang menggerakkan elektron:

$$v = \mu \cdot E \quad (5.8)$$

Konstanta μ dalam (5.8) disebut *mobility* atau mobilitas atau kemudahan bergerak. Besar konstanta μ tergantung dari jumlah tumbukan yang dialami oleh elektron yang bergerak. Jumlah tumbukan termasuk tumbukan dengan fonon (gelombang suara atau gelombang gerakan termis). Sebab itu mobilitas akan turun ketika suhu naik.

Dari (5.7) dan (5.8) terdapat konduktivitas jenis σ untuk suatu bahan:

$$G = \sigma \cdot \frac{A}{l} \Rightarrow \sigma = G \cdot \frac{l}{A} = \frac{I}{V} \cdot \frac{l}{A} = \frac{j}{E} = \frac{n \cdot v \cdot e}{E} = \frac{n \cdot \mu \cdot e \cdot E}{E} = n \cdot \mu \cdot e \Rightarrow \sigma = n \cdot \mu \cdot e \quad (5.9)$$

Dalam bahan yang lain yang mana bukan hanya elektron, tetapi juga muatan jenis lain membawa arus, konduktivitas seluruh σ terdapat sebagai jumlah dari konduktivitas elektron σ_{elektron} yang dihasilkan elektron seperti dalam (5.9) dan konduktivitas σ_{lain} yang dihasilkan oleh muatan yang lain. Konduktivitas σ_{lain} dari muatan yang lain dihitung dengan cara yang sama dengan σ_{elektron} .

Yang harus dicatat sebagai hasil penting dari (5.9) adalah ketergantungan konduktivitas / resistivitas jenis dari mobilitas muatan dan jumlah muatan yang bisa bergerak. Dalam logam, jumlah muatan yang bisa bergerak besar dan hampir tidak tergantung suhu. Sebab itu resistivitas logam kecil. Kalau suhu naik, jumlah elektron yang bisa bergerak (jumlah muatan bebas) tidak berubah, tetapi mobilitas berkurang. Maka konduktivitas jenis dari logam turun ketika suhu naik, berarti resistivitas jenis dari logam naik terhadap suhu. Dalam semikonduktor akan kita lihat, bahwa jumlah muatan yang bisa bergerak sangat tergantung dari suhu. Bertambahnya jumlah muatan dengan suhu yang naik jauh lebih besar daripada turunnya mobilitas muatan, maka kalau suhu naik, konduktivitas semikonduktor akan naik juga.

5.2. Struktur Kristal dari Semikonduktor

Untuk mengerti struktur kristal, kita harus ingat, apakah atom itu. Atom terdiri atas inti dan elektron yang terikat pada inti itu (Elyakim Nova Supriyedi Patty, Liefson Jacobus, Agustina Purnami Setiawi, Bhujangga Ayu Putu Priyudahari, Muhammad Lintang cahyo Buono, Melkianus Sulus 2023; Fiqry, Ariswan, and Kuswanto 2017). Dalam model atom Bohr elektron bergerak di atas lintasan tertentu dan memiliki energi-energi tertentu. Energi dari elektron tidak bebas, tetapi hanya bisa memiliki nilai-nilai tertentu. Hal ini dikatakan energi terkuantisasi dan dijelaskan lebih detil dalam mekanika kuantum. Elektron yang terikat pada atom memiliki energi negatif dibandingkan dengan energi dari elektron bebas. Harga mutlak dari energi negatif itu disebut sebagai energi ikatan elektron. Karena adanya energi ikatan itu yang membuat energi elektron lebih rendah daripada elektron bebas, maka elektron tetap pada inti masing-masing dan tidak melepaskan diri dari inti, karena setiap sistem fisik selalu masuk ke dalam keadaan energi yang paling rendah. Hanya kalau elektron tersebut diberikan energi yang lebih tinggi daripada energi ikatan, elektron bisa lepas dari intinya.

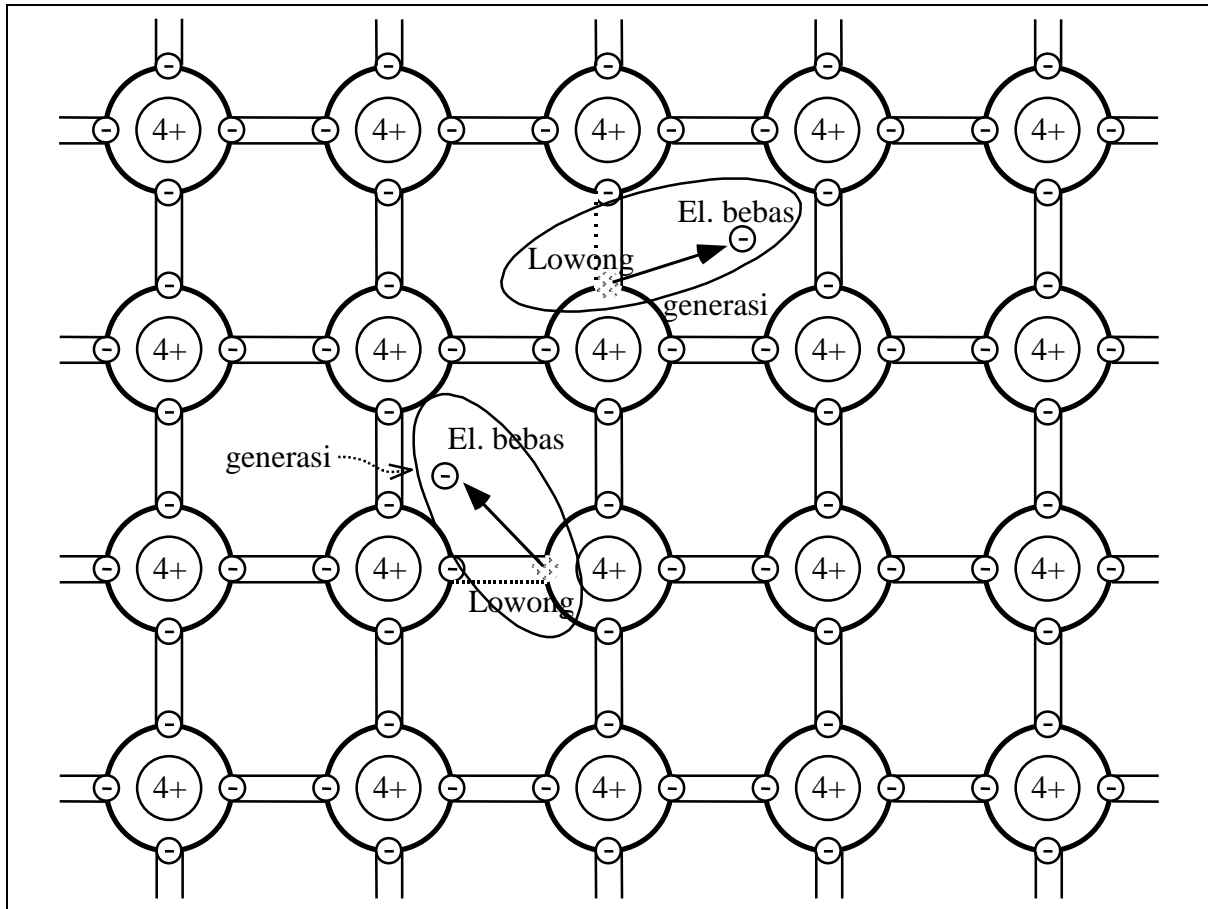
Dalam suatu kristal atau molekul, elektron-elektron luar dari atom-atom dipakai sebagai elektron ikatan. Terdapat beberapa jenis ikatan, yang pertama adalah jenis ikatan seperti yang didapatkan didalam logam dimana satu elektron dari setiap atom dipakai untuk mengikat kristal secara keseluruhan. Elektron yang dipakai dalam ikatan ini tidak terikat kepada satu atom tertentu, tetapi bisa bergerak secara bebas dalam seluruh kristal. Sebab itu dalam logam terdapat banyak elektron bebas dan arus listrik bisa mengalir dengan mudah.

Jenis ikatan yang lain adalah ikatan kovalen atau ikatan elektron atau ikatan pasangan yang terjadi dalam molekul, dalam kristal isolator dan dalam semikonduktor. Dalam ikatan kovalen dua elektron luar (elektron valensi) dari dua atom yang berbeda membentuk satu pasangan elektron yang terikat pada kedua atom. Melalui pasangan elektron ini kedua atom menjadi terikat satu sama yang lain.

Dalam semikonduktor semua elektron valensi dipakai untuk ikatan pasangan dengan atom lain dari kristal. Semikonduktor adalah atom dari golongan IVA dalam sistem periodik unsur, berarti atom semikonduktor memiliki 4 elektron valensi, dengan kata lain ada 4 elektron luar yang bisa dipakai untuk ikatan kimia dalam molekul atau dalam kristal. Semikonduktor yang paling sering dipakai dalam elektronika adalah Silisium (Si), Germanium (Ge) dan Galliumarsenide (GaAs), dimana Galliumarsenide bukan satu zat, tetapi campuran dari Gallium (dengan tiga elektron valensi) dan Arsen (dengan 5 elektron valensi). Sifat dari GaAs mirip dengan sifat dari semikonduktor lain (Si dan Ge).

Struktur Kristal dari semikonduktor tersebut adalah struktur Tetraeder atau struktur intan. Dalam struktur ini setiap atom memiliki 4 atom tetangga. Dalam kristal semikonduktor antara setiap tetangga terdapat satu ikatan elektron dengan dua elektron yang berasal dari masing-masing atom. Struktur ini bisa digambarkan dalam dua dimensi (berarti dalam bidang) seperti dalam gambar 5.2..

Berarti dalam semikonduktor semua elektron terikat pada atom tertentu dan tidak ada elektron yang bisa bergerak secara bebas. Situasi ini sama seperti dalam isolator. Tetapi ada perbedaan antara Semikonduktor dan isolator yaitu dalam semikonduktor elektron yang dipakai untuk ikatan hanya terikat dengan lemah. Kalau elektron terikat secara



Gambar 5.2.: Prinsip struktur kristal dari semikonduktor.

lemah, berarti elektron itu bisa dilepaskan dari ikatannya dengan mudah. Kalau elektron sudah dilepaskan dari ikatannya, elektron itu bisa bergerak dalam kisi dan membawa arus listrik.

Suatu elektron baru dilepaskan kalau diberikan energi setinggi energi ikatan dari elektron itu. Pada suhu nol Kelvin (absolut nol) tidak ada gerakan termis dalam kisi dan elektron tidak bisa dilepaskan, maka semikonduktor merupakan isolator yang baik pada suhu absolut nol. Kalau suhu lebih tinggi, terjadi gerakan termis dalam kisi dan terdapat kemungkinan bahwa elektron diberikan energi yang cukup tinggi untuk keluar dari ikatannya. Semakin tinggi suhu, semakin banyak elektron dilepaskan dari ikatannya. Elektron yang dilepaskan dari ikatannya bisa bergerak dengan bebas. Elektron itu disebut **elektron konduksi**. Elektron konduksi memberikan konduktivitas kepada kristal. Konduktivitas yang dihasilkan oleh elektron disebut **konduktivitas elektron**. Energi yang diperlukan untuk melepaskan satu elektron dari ikatan menjadi elektron konduksi disebut **energi aktivasi** (*activation energy*) dan kita akan memakai lambang ΔW untuk energi aktivasi itu.

Kalau satu elektron dilepaskan dari ikatannya, maka tempat elektron itu akan menjadi kosong. Tempat kosong seperti itu disebut **lowong** atau *hole*. Kalau terdapat satu tempat lowong, maka elektron ikatan yang ada di sebelah tempat lowong itu bisa pindah tempat dengan mudah dan masuk ke dalam tempat lowong tersebut. Dengan cara ini tempat yang lowong telah pindah ke sebelahnya. Kalau proses ini terjadi terus menerus, tempat yang lowong itu bergerak terus dalam atom. Karena satu tempat lowong merupakan satu

tempat dimana jumlah elektron lebih sedikit daripada jumlah muatan inti, maka satu tempat lowong seperti satu partikel yang bermuatan positif. Kalau tempat lowong sebagai muatan yang positif bergerak di dalam kristal, maka terdapat arus listrik dari tempat lowong yang bergerak. Jadi tempat lowong itu bersifat seperti satu partikel yang bergerak. Partikel ini disebut secara singkat sebagai “lowong”. Hal ini berarti bahwa lowong juga menghasilkan konduktivitas dalam kristal. Konduktivitas ini disebut **konduktivitas lowong** atau *hole conductivity*.

Kalau satu elektron dilepaskan dari tempatnya, selalu terdapat satu **elektron bebas** dan satu **lowong** bersama-sama. Sebab itu melepaskan satu elektron dari tempatnya disebut **ciptaan pasangan** atau **generasi** (dari *generation*). Setelah terjadi ciptaan pasangan, terdapat dua partikel bermuatan yang bisa bergerak dan membawa arus listrik, berarti terdapat konduktivitas dalam kristal ini. Konduktivitas yang terjadi oleh ciptaan pasangan disebut **konduktivitas diri** (*self conductivity*) dari semikonduktor. Kalau satu elektron bebas tiba di satu lowong, elektron dan lowong bisa bergabung kembali, berarti elektron masuk ke dalam lowong dan menjadi elektron terikat lagi. Proses ini disebut **rekombinasi** (dari *recombination*). Dengan terjadinya proses rekombinasi muatan yang bisa bergerak dan membawa arus berkurang satu elektron dan satu lowong. Dalam keadaan keseimbangan termis, jumlah ciptaan pasangan per waktu dan jumlah rekombinasi per waktu sama.

Dalam keseimbangan termis, jumlah generasi dan jumlah rekombinasi sama, berarti kerapatan elektron konduktivitas dan lowong konstan. Tetapi kalau suhu lebih tinggi, jumlah elektron yang mendapatkan energi tinggi dan bisa menjadi elektron bebas lebih banyak. Sebab itu konsentrasi elektron konduksi n dan konsentrasi lowong p tergantung dari suhu T dan dari energi aktivasi ΔW , di mana perkalian dari kedua konsentrasi tersebut, $n \cdot p$, akan merupakan satu konstanta yang tergantung suhu dan energi aktivasi:

$$n \cdot p = N_L N_V e^{-\frac{\Delta W}{kT}} = n_i^2 \quad (5.10)$$

Di mana:

- ΔW : energi aktivasi yang diperlukan untuk melepaskan satu elektron dari ikatan elektron menjadi elektron bebas.
- $N_{L,V}$: Satu konstanta yang tergantung suhu dan massa efektif dari elektron / lowong yang disebut kerapatan keadaan efektif.

Dalam semikonduktor murni (semikonduktor murni juga disebut semikonduktor intrinsik dari bahasa Inggris: *intrinsic semiconductor*) jumlah lowong dan jumlah elektron bebas selalu sama, maka konsentrasi elektron n sama dengan konsentrasi lowong p , maka $n = p = n_i$. Dalam semikonduktor dengan atom tambahan dari unsur lain, seperti yang akan dibicarakan dalam pasal berikut, jumlah elektron bebas dan jumlah lowong tidak akan sama, tetapi perkalian dari kedua konsentrasi ini akan tetap ikut persamaan (5.10).

Persamaan (5.10) terdapat dari perhitungan termodinamika dengan memperhatikan situasi dalam keadaan termis dan distribusi energi yang terdapat dalam situasi tersebut. Dari situ dilihat bahwa jumlah partikel yang mempunyai muatan dan bisa bergerak tergantung suhu

Bahan	ΔW	n_i
Ge	0.67 eV	$2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Si	1.1 eV	$1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	1.43 eV	$9.2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$

Tabel 5.1.: Data dari beberapa bahan semikonduktor.

secara eksponensial. Dengan sifat ini dan (5.9) yang menunjukkan ketergantungan konduktivitas jenis σ dari jumlah muatan yang bisa bergerak, terdapat bahwa konduktivitas jenis σ akan tergantung suhu secara eksponensial:

$$\sigma = A(T)e^{-\beta \frac{\Delta W}{kT}} \quad (5.11)$$

Di mana:

$A(T)$: Satu konstanta yang tergantung dari mobilitas dari elektron dan lowong

β : Satu konstanta tanpa dimensi

k : Konstanta Boltzmann

Jadi konduktivitas naik terhadap suhu karena dengan bertambahnya suhu, jumlah muatan ikut bertambah. Ketergantungan mobilitas dari suhu jauh lebih kecil daripada ketergantungan jumlah muatan dari suhu.

5.3. Konduktivitas dari Atom Asing

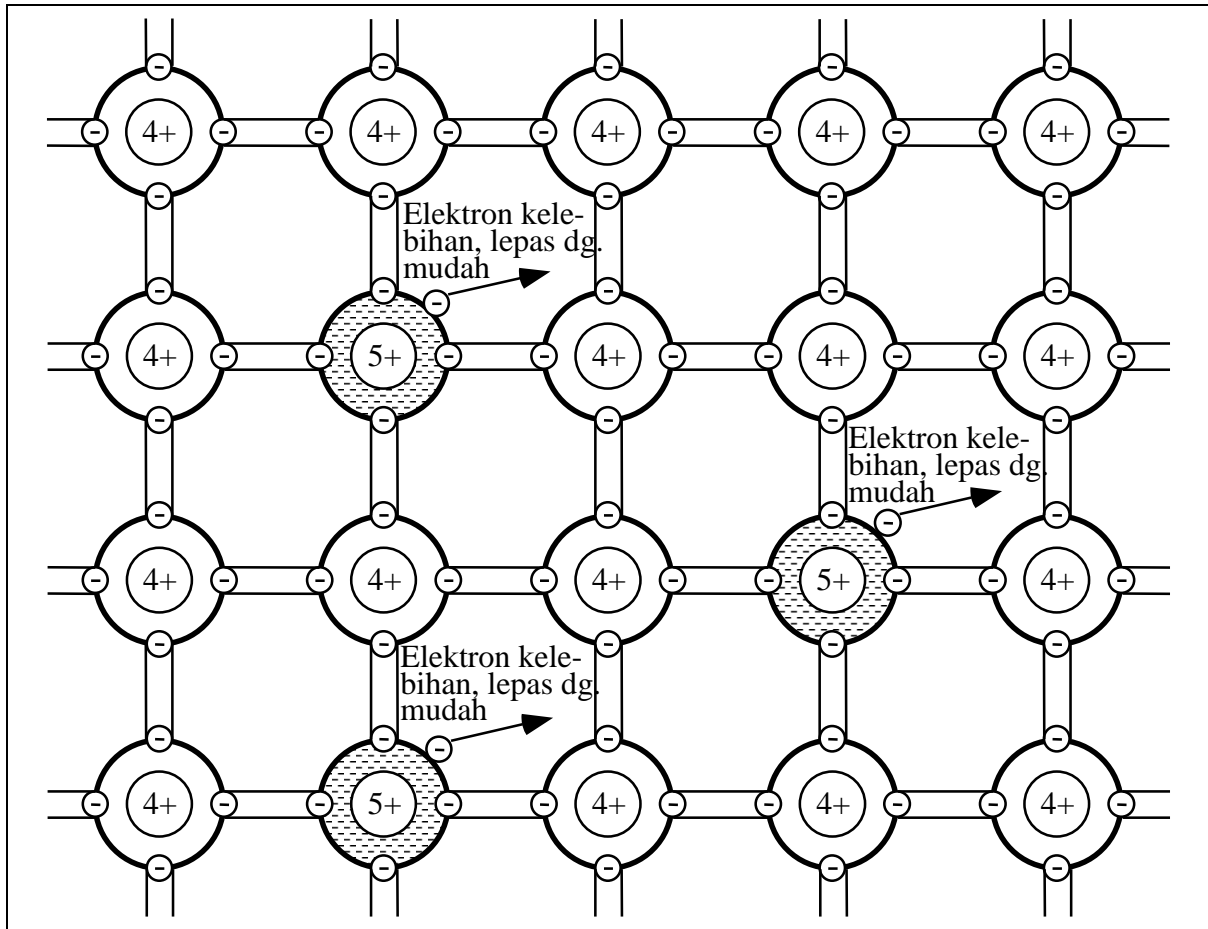
5.3.1. Doping dari Semikonduktor

Kalau atom lain dimasukkan ke dalam kristal, situasi dalam kristal akan terganggu, berarti keadaannya akan berbeda dengan situasi dalam kristal murni. Untuk mempengaruhi sifat semikonduktor dalam komponen semikonduktor, dengan sengaja atom lain dimasukkan ke dalam semikonduktor dalam jumlah yang diatur. Masukkan atom gangguan secara terkontrol disebut *doping*. Atom yang biasa dipakai untuk doping adalah atom dari golongan IIIA dan dari golongan VA dari sistem periodik unsur seperti Fosfor, Arsen atau Antimon dari golongan VA atau gallium dari golongan IIIA.

5.3.2. Semikonduktor n

Atom asing tersebut menggantikan posisi dari atom bahan asli. Kalau atom asing yang dimasukkan berasal dari golongan VA dalam sistem periodik unsur, maka atom tersebut memiliki 5 elektron valensi. Empat dari lima elektron tersebut akan dipakai dalam ikatan kimia seperti empat elektron dari atom asli. Elektron ke 5 merupakan satu elektron kelebihan. Situasi seperti diperlihatkan dalam gambar 5.3.

Elektron kelebihan itu terikat dengan atomnya hanya secara lemah sekali dan sangat mudah dilepaskan dari atomnya. Berarti dengan memberikan energi yang kecil (misalnya dari energi termis), elektron itu bisa lepas dan menjadi elektron bebas yang membawa arus dan menghasilkan konduktivitas elektron dalam semikonduktor. Kalau elektron dari atom asing itu dilepaskan, tidak akan terdapat lowong yang bergerak. Kebolehjadian bahwa satu elektron kelebihan dari atom asing dilepaskan terdapat dari statistika Fermi-Dirac dalam termodinamika. Karena energi untuk melepaskan elektron tersebut kecil, maka pada suhu biasa (0°C - 40°C), biasanya semua elektron dari atom asing lepas, maka jumlah atom asing itu menentukan jumlah elektron bebas. Dengan memasukkan banyak atom asing ke dalam semikonduktor terdapat jauh lebih banyak elektron yang berasal dari atom asing daripada jumlah elektron dan lowong dari

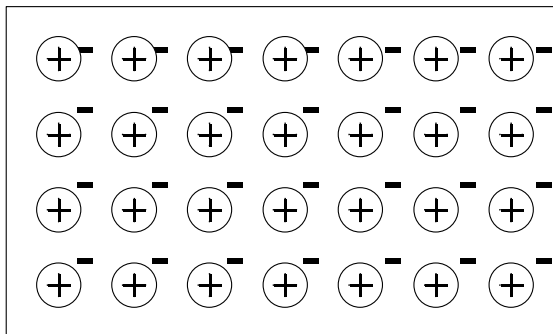


Gambar 5.3.: Semikonduktor dengan donator (atom asing dari golongan VA dalam sistem periodik unsur) atau semikonduktor n.

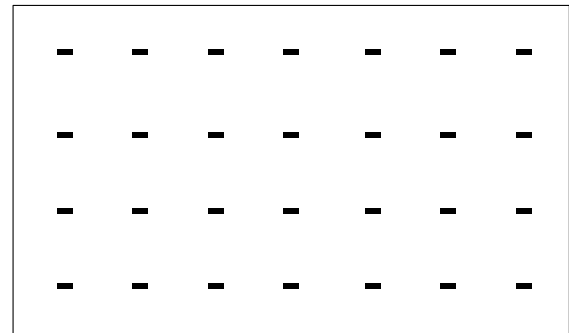
konduktivitas diri. Karena persamaan (5.10) mengenai hubungan antara konsentrasi elektron dan konsentrasi lowong tetap berlaku, maka dengan menambahkan jumlah elektron bebas yang berasal dari atom asing, jumlah lowong akan berkurang. Memang jelas: kalau terdapat banyak elektron bebas, maka untuk semua lowong terdapat kebolehjadian yang besar untuk bertemu dengan satu elektron bebas dan berekombinasi sehingga jumlah lowong akan sedikit. Dalam semikonduktor dengan banyak atom yang memiliki kelebihan elektron terdapat jauh lebih banyak elektron bebas daripada jumlah lowong. Dikatakan elektron adalah pembawa muatan mayoritas dan lowong adalah pembawa muatan minoritas. Atom asing memberikan elektron bebas kepada semikonduktor. Sebab itu atom asing dengan lima elektron valensi disebut **donator** (pemberi elektron). Konduktivitas yang dihasilkan oleh kelebihan elektron ini disebut **konduktivitas kelebihan** atau **konduktivitas n**. Semikonduktor seperti ini biasanya disebut semikonduktor n.

Dalam semikonduktor n terdapat atom asing yang bermuatan positif dan elektron bebas yang bisa bergerak dalam bahan. Atom asing yang merupakan muatan positif tidak bisa bergerak, tetapi tetap pada tempatnya. Elektron yang merupakan muatan negatif bisa bergerak. Karena jumlah elektron bebas yang bermuatan negatif sama dengan jumlah atom asing yang bermuatan positif, maka terdapat keseimbangan muatan dan semikonduktor n secara keseluruhan akan netral. Biasanya sifat dari semikonduktor n dalam situasi tertentu bisa dimengerti dengan memperhatikan kedua jenis muatan ini

saja. Dalam situasi seperti ini, semikonduktor n bisa digambarkan dengan sederhana seperti dalam gambar 5.4.. Pengertian bahwa hanya muatan yang bisa bergerak dengan bebas biasanya penting untuk mengerti suatu sifat tertentu. Dalam situasi ini semikonduktor n bisa digambarkan lebih sederhana lagi seperti dalam gambar 5.5..



Gambar 5.4.: Semikonduktor n dengan atom asing yang bermuatan positif dan tetap pada tempatnya dan elektron yang bermuatan negatif dan bisa bergerak dengan bebas.

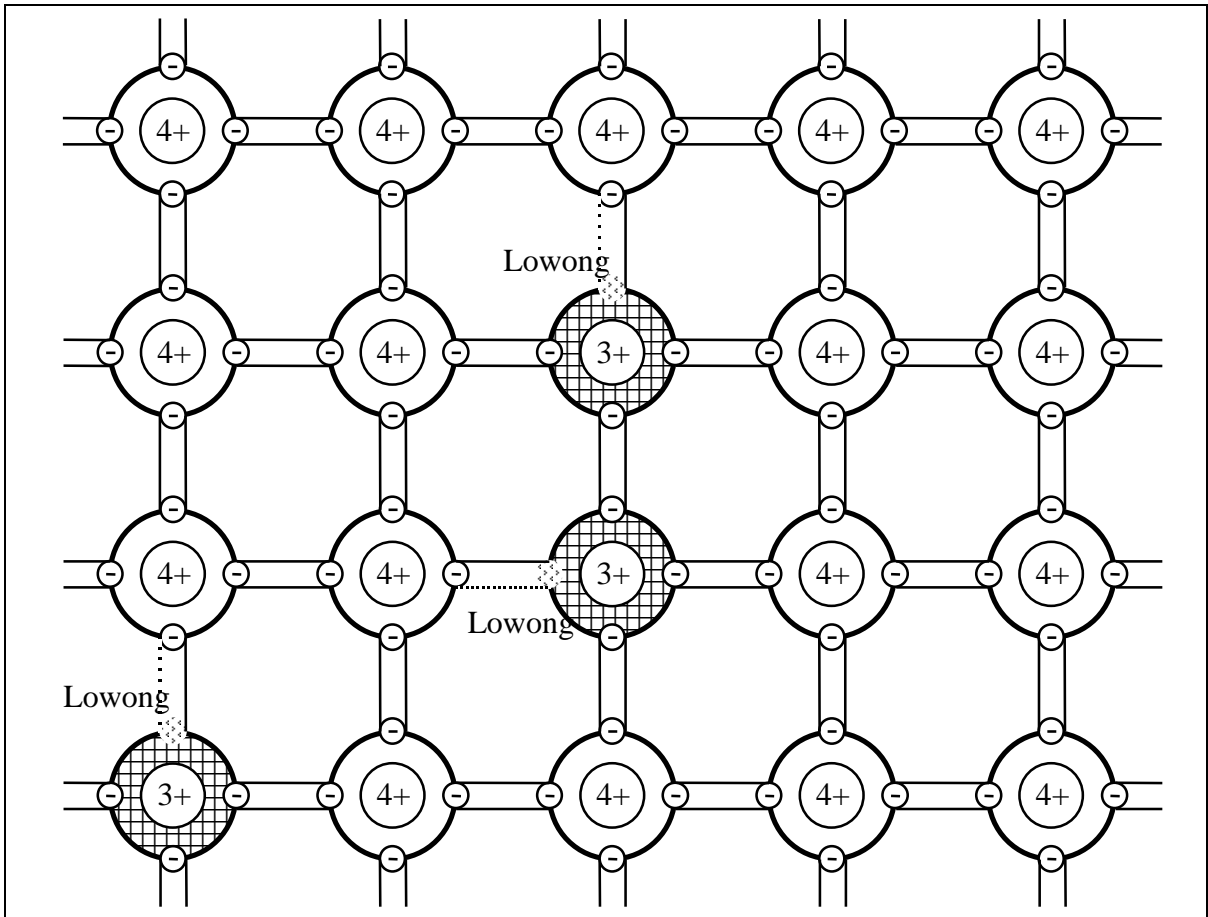


Gambar 5.5.: Semikonduktor n sebagai bahan dengan muatan negatif sebagai pembawa muatan mayoritas.

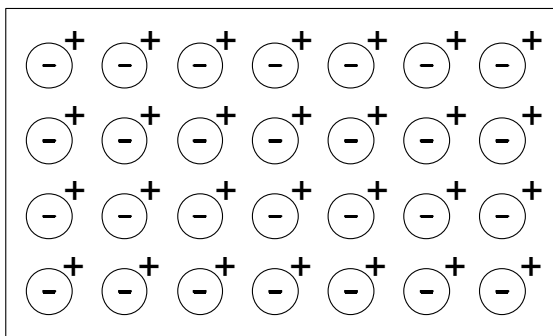
5.3.3. Semikonduktor p

Kalau satu atom dari golongan IIIA dalam sistem periodik unsur dimasukkan ke dalam semikonduktor, maka atom tersebut memiliki hanya 3 elektron valensi. Sebenarnya diperlukan 4 elektron untuk ikatan dengan 4 atom tetangganya, berarti terdapat kekurangan satu elektron atau terdapat satu lowong pada posisi itu. Lowong itu diikat dengan atomnya hanya secara lemah sekali sehingga dengan sangat mudah bisa lepas dari atomnya, berarti dengan memberikan energi yang kecil (misalnya dari energi termis) lowong itu bisa dilepaskan dan menjadi lowong bebas yang membuat konduktivitas lowong dalam semikonduktor. Melepaskan lowong dari atomnya berarti elektron dari ikatan asli pindah dari tempat asli dan masuk ke dalam lowong tersebut. Situasi dalam semikonduktor ini diperlihatkan dalam gambar 5.6..

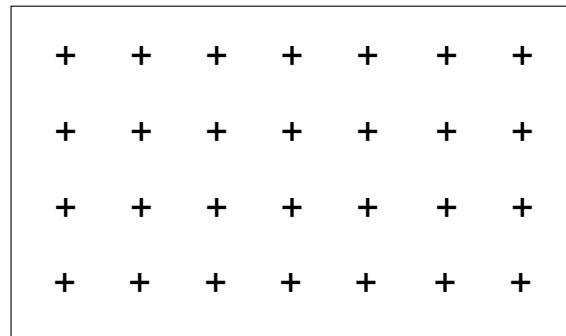
Dengan mendapatkan lowong dari elektron asing itu tidak akan timbul elektron bebas, tetapi adanya hanya lowong saja sebagai partikel bermuatan yang bisa membawa arus listrik. Pada suhu biasa, biasanya semua lowong dari atom asing akan dilepaskan, maka jumlah atom asing itu menentukan jumlah lowong yang bisa bergerak dalam semikonduktor. Dengan memasukkan banyak atom asing ke dalam semikonduktor, akan terdapat jauh lebih banyak lowong dari atom asing daripada jumlah lowong dan elektron dari konduktivitas diri. Persamaan (5.10) mengenai hubungan antara konsentrasi elektron dan konsentrasi lowong tetap berlaku, maka dengan menambahkan lowong, jumlah elektron akan turun. Dalam semikonduktor itu terdapat jauh lebih banyak lowong dari pada elektron bebas. Sebab itu lowong disini merupakan pembawa muatan mayoritas dan elektron adalah pembawa muatan minoritas. Atom asing memberikan lowong kepada semikonduktor, berarti memberikan satu tempat kosong yang bisa diisi oleh elektron dari bahan asli. Sebab itu atom asing dengan tiga elektron valensi disebut **akseptor** (Penyerap elektron). Konduktivitas seperti ini yang dihasilkan oleh lowong disebut **konduktivitas kekurangan elektron** atau **konduktivitas p**. Semikonduktor seperti ini biasa disebut semikonduktor p.



Gambar 5.6.: Semikonduktor dengan akseptor (atom dari golongan IIIA dalam sistem periodik unsur) sebagai atom asing. Semikonduktor ini merupakan semikonduktor p.



Gambar 5.7.: Semikonduktor p dengan atom asing yang bermuatan negatif dan tetap pada tempatnya dan lowong yang bermuatan positif dan bisa bergerak dengan bebas.



Gambar 5.8.: Semikonduktor p sebagai bahan dengan muatan positif sebagai pembawa muatan mayoritas.

Dalam semikonduktor p terdapat atom asing yang bermuatan negatif dan lowong yang bisa bergerak dalam bahan. Atom asing yang merupakan muatan negatif tidak bisa bergerak, tetapi tetap pada tempatnya. Lowong yang merupakan muatan positif bisa bergerak. Karena jumlah lowong yang bermuatan positif sama dengan jumlah atom asing yang bermuatan negatif, terdapat keseimbangan muatan dan semikonduktor p secara keseluruhan akan netral. Biasanya sifat dari semikonduktor p dalam situasi tertentu bisa dimengerti dengan memperhatikan kedua jenis muatan ini saja. Dalam

situasi seperti ini, semikonduktor p bisa digambarkan dengan sederhana seperti dalam gambar 5.7. Pengertian bahwa hanya muatan yang bisa bergerak dengan bebas biasanya penting untuk mengerti suatu sifat tertentu. Dalam situasi ini semikonduktor p bisa digambarkan lebih sederhana lagi seperti dalam gambar 5.8..

5.3.4. Kesimpulan mengenai Semikonduktor dengan Atom Asing

Untuk mendapatkan partikel bermuatan yang bisa bergerak diperlukan energi aktivasi ΔW . Energi aktivasi ΔW yang diperlukan untuk menghasilkan elektron bebas dalam semikonduktor n atau untuk menghasilkan lowong bebas dalam semikonduktor p, jauh lebih kecil daripada energi aktivasi ΔW yang diperlukan untuk mendapatkan ciptaan pasangan dalam semikonduktor murni. Sebab itu semikonduktor dengan atom asing memiliki konduktivitas yang jauh lebih besar daripada semikonduktor murni. Jenis atom asing yang dimasukkan ke dalam bahan semikonduktor menentukan apakah semikonduktor menjadi semikonduktor n dengan elektron sebagai pembawa muatan mayoritas (berarti sebagai pembawa arus listrik), atau semikonduktor menjadi semikonduktor p dengan lowong sebagai pembawa muatan mayoritas (berarti dengan lowong sebagai pembawa arus listrik).

5.4. Arus Listrik dalam Semikonduktor

5.4.1. Arus Medan

Dalam semikonduktor terdapat elektron dan terdapat lowong sebagai partikel yang membawa arus. Partikel tersebut bisa masing-masing bergerak kalau ada medan listrik di dalam bahan, sehingga terdapat arus dari masing-masing partikel seperti dijelaskan dalam pasal 5.1.. Karena arus dibawakan oleh dua jenis partikel, maka arus yang dihasilkan oleh masing-masing jenis partikel berjumlah. Kerapatan arus medan \vec{s}_{mn} yang timbul oleh kerapatan elektron n akan sebesar:

$$\vec{s}_{mn} = ne\vec{v}_n \quad (5.12)$$

dengan kecepatan elektron \vec{v}_n sesuai dengan pasal 5.1.:

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \quad (5.13)$$

Perlu diperhatikan bahwa arus listrik secara teknis berlawanan arah dengan arus elektron \vec{s}_{mn} sehingga terdapat kerapatan arus listrik \vec{i}_{mn} dari arus medan elektron sebesar:

$$\vec{i}_{mn} = -\vec{s}_{mn} = -ne\vec{v}_n = (-ne) \cdot (-\mu_n \vec{E}) = ne\mu_n \vec{E} \quad (5.14)$$

Maka terdapat konduktivitas yang dihasilkan oleh elektron:

$$\sigma_n = \frac{\vec{i}_{mn}}{\vec{E}} = n\mu_n e \quad (5.15)$$

Situasi untuk lowong sama. Untuk menyatakan lowong akan kita pakai indeks p dan untuk kerapatan lowong akan kita pakai huruf p . Maka untuk kerapatan arus medan yang dihasilkan oleh lowong terdapat persamaan-persamaan sbb.:

$$\vec{s}_{mp} = pe\vec{v}_p; \quad \vec{i}_{mp} = \vec{s}_{mp} = pe\vec{v}_p; \quad \vec{v}_p = \mu_p \vec{E}; \quad \sigma_p = p\mu_p e \quad (5.16)$$

Karena arus seluruhnya terdapat sebagai jumlah dari arus lowong dan arus elektron dan konduktivitas jenis adalah kerapatan arus per medan, maka terdapat konduktivitas jenis seluruhnya:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (5.17)$$

Baik kerapatan muatan maupun kemudahan bergerak (mobilitas), akan berbeda untuk elektron dan lowong. Sedangkan muatan per partikel bersama-sama sebesar muatan elementer e .

5.4.2. Arus Difusi

Kalau jumlah dari satu jenis partikel lebih besar di satu tempat daripada tempat di sekitarnya, maka oleh gerakan termis terdapat arus difusi yang membuat muatan merata. Arus difusi mengalir dari tempat dengan kerapatan tinggi mengarah ke tempat dengan kerapatan rendah. Besar dari kerapatan arus difusi untuk arus difusi lowong (s_{dp}) dan arus difusi elektron (s_{dn}) tergantung dari berapa besar perbedaan kerapatan partikel dari satu tempat ke tempat di sebelahnya dan dari satu konstanta yang disebut konstanta difusi D . Dalam arah x terdapat besar kerapatan arus difusi:

$$s_{dp} = -eD_p \frac{dp}{dx}; \quad s_{dn} = -eD_n \frac{dn}{dx} \quad (5.18)$$

Di mana:

D_p : Konstanta difusi untuk lowong

D_n : Konstanta difusi untuk elektron

e : muatan elektron; faktor ini dibutuhkan sehingga terdapat besar muatan yang bergerak, bukan jumlah pembawa muatan yang bergerak.

Besar arus dalam (5.18) merupakan arus gerakan muatan, bukan arus teknis. Tanda minus dalam persamaan terdapat karena arus menuju dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah, sedangkan $\frac{dp}{dx}$ dan $\frac{dn}{dx}$ menuju dari konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi.

Konstanta difusi D tergantung massa efektif partikel, jarak yang bisa dilewati sampai tumbukan dengan partikel yang lain, suhu dll.. Karena besaran-besaran tersebut juga mempengaruhi kemudahan bergerak, akhirnya terdapat Relasi Einstein untuk konstanta difusi D :

$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p; \quad D_n = \frac{kT}{e} \mu_n \quad (5.19)$$

Dalam tiga dimensi terdapat kerapatan arus difusi:

$$\vec{s}_{dp} = -eD_p \text{ grad } p; \quad \vec{s}_{dn} = -eD_n \text{ grad } n; \quad i_{dn} = -s_{dn}; \quad i_{dp} = s_{dp} \quad (5.20)$$

Dari kerapatan arus difusi elektron dan lowong dalam (5.18) terdapat kerapatan arus teknis sebagai akibat dari arus difusi elektron dan lowong i_{dn} dan i_{dp} :

$$i_{dn} = -s_{dn}; \quad i_{dp} = s_{dp} \quad (5.21)$$

Dalam logam tidak terjadi arus difusi karena disitu jumlah elektron tidak pernah berubah pada satu tempat, tetapi dalam semikonduktor bisa terjadi proses penciptaan pasangan dan proses yang lain, sehingga terdapat sumber elektron dan / atau sumber lowong pada satu tempat. Kalaupun tidak ada medan listrik, elektron / lowong akan mengalir menjauh dari tempat penciptaannya dan akan menyebar di dalam bahan sehingga akhirnya terdapat situasi keseimbangan termis. Kalau ada satu tempat yang mana terus menerus timbul elektron atau lowong baru, maka akan ada arus elektron atau lowong yang keluar dari tempat itu ke sekitarnya.

5.4.3. Arus Seluruhnya

Dalam situasi nyata sering terdapat arus oleh medan listrik dan arus oleh difusi. Arus difusi dan arus medan akan berjumlah menjadi arus listrik seluruhnya:

$$\vec{i} = +\vec{s}_{mp} - \vec{s}_{mn} + \vec{s}_{dp} - \vec{s}_{dn} \quad (5.22)$$

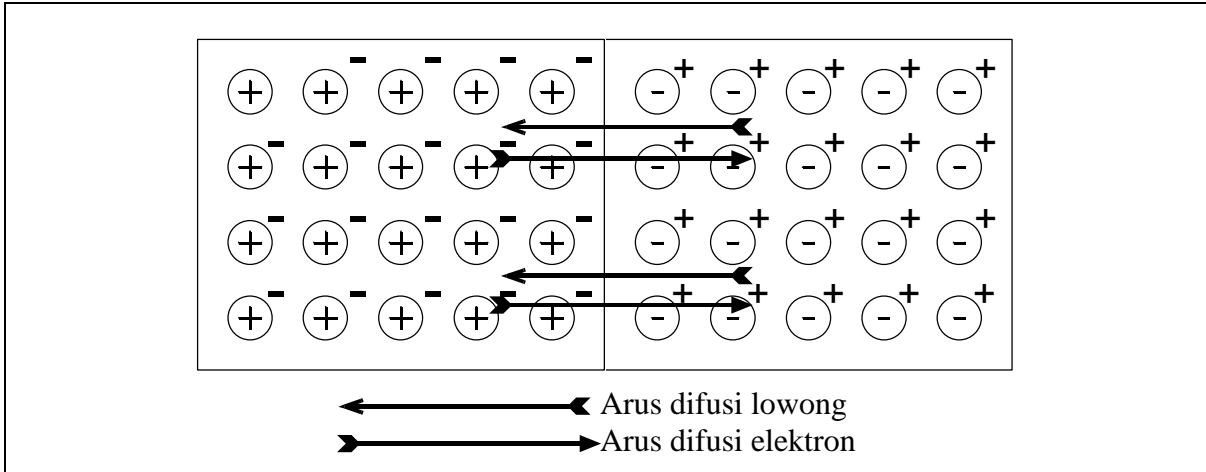
Dalam (5.22) arus elektron dihitung negatif karena arus teknis searah dengan arus muatan positif (lowong), tetapi berlawanan arah dengan arus muatan negatif (elektron).

5.5. Sambungan pn dalam Gambaran Kristal

5.5.1. Sambungan pn tanpa Voltase

Kalau satu semikonduktor n disambungkan langsung dengan satu semikonduktor p, terdapat sambungan pn. Sambungan pn yang baik harus dibuat dalam satu kristal. Pertama kita anggap muatan dekat dengan sambungan pn tetap pada tempatnya, berarti situasi pertama sepertinya semikonduktor n dan semikonduktor p masing-masing tidak ada hubungan. Dengan anggapan seperti ini terdapat situasi seperti dalam gambar 5.9.. Di satu sisi (sebelah kiri dalam gambar) terdapat semikonduktor n dengan elektron sebagai pembawa muatan mayoritas dan di sisi lain (sebelah kanan dalam gambar) terdapat semikonduktor p dengan lowong sebagai pembawa muatan mayoritas. Konsentrasi elektron bebas akan tinggi di sebelah kiri dan (hampir) nol di sebelah kanan, berarti terdapat perubahan konsentrasi terhadap tempat yang tajam. Kalau konsentrasi berubah terhadap tempat, maka sesuai dengan persamaan (5.18) dalam pasal 5.4.2. terdapat arus difusi dari tempat konsentrasi tinggi ke tempat konsentrasi rendah. Maka elektron dari sebelah kiri akan mengalir ke sebelah kanan. Konsentrasi lowong tinggi di sebelah kanan dan (hampir) nol di sebelah kiri, maka lowong akan mengalir dari sebelah kanan ke sebelah kiri.

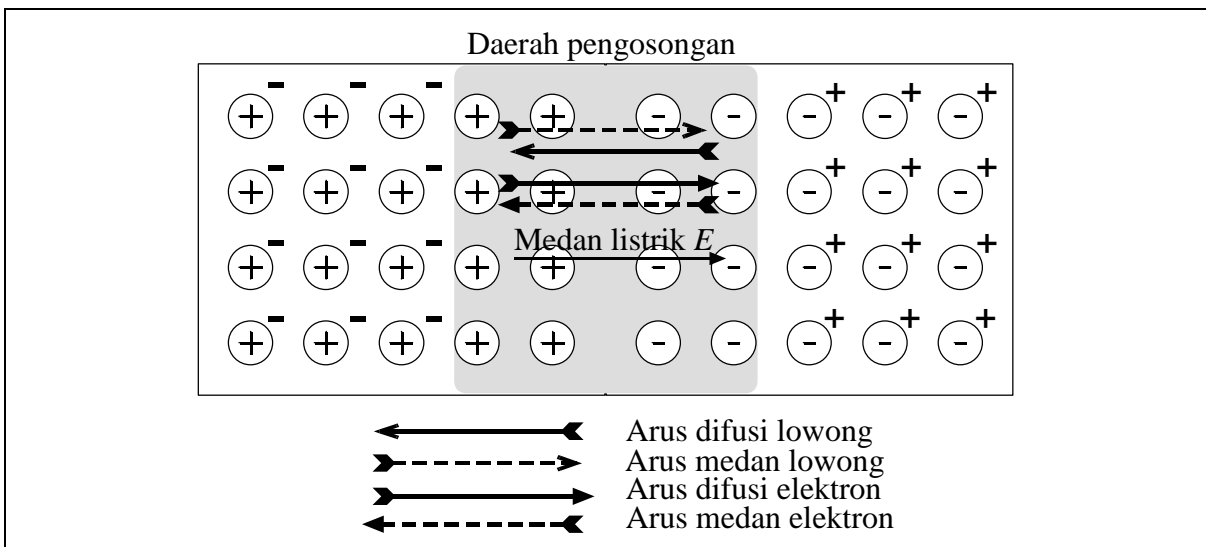
Elektron yang masuk ke dalam daerah p akan berekombinasi dengan lowong yang ada disitu dan lowong yang masuk ke dalam daerah n akan berekombinasi dengan elektron disitu. Kalau seandainya ada hanya arus difusi, maka arus difusi ini akan berlangsung



Gambar 5.9.: Sambungan pn dengan anggapan bahwa pada sambungan posisi muatan belum berubah dari posisinya ketika kedua semikonduktor tidak tersambung.

sampai konsentrasi elektron dan konsentrasi lowong sama dalam seluruh semikonduktor, berarti konsentrasi elektron akan sama dalam semikonduktor n dan dalam semikonduktor p. Sama juga dengan lowong. Jumlah muatan pembawa arus akan berkurang karena elektron dari daerah n akan berekombinasi di daerah p dan lowong dari daerah p akan berekombinasi di daerah n sehingga elektron dan lowong dalam seluruh kristal saling menghapus.

Tetapi ketika elektron dari semikonduktor n mengalir ke dalam daerah semikonduktor p, atom bermuatan positif tetap tinggal dalam semikonduktor n sehingga dalam semikonduktor n terdapat muatan seluruhnya yang positif. Dan juga ketika lowong dari semikonduktor p pindah ke dalam daerah semikonduktor n, atom bermuatan negatif tinggal dalam semikonduktor p. Karena terdapat muatan positif di sebelah kiri dan



Gambar 5.10.: Sambungan pn dalam keadaan seimbang di mana elektron dari daerah n telah masuk ke dalam daerah p dan lowong dari daerah p telah masuk ke dalam daerah n sehingga lapisan pengosongan terbentuk. Arus difusi elektron sama besar dengan arus medan elektron dan arus difusi lowong sama besar dengan arus medan lowong.

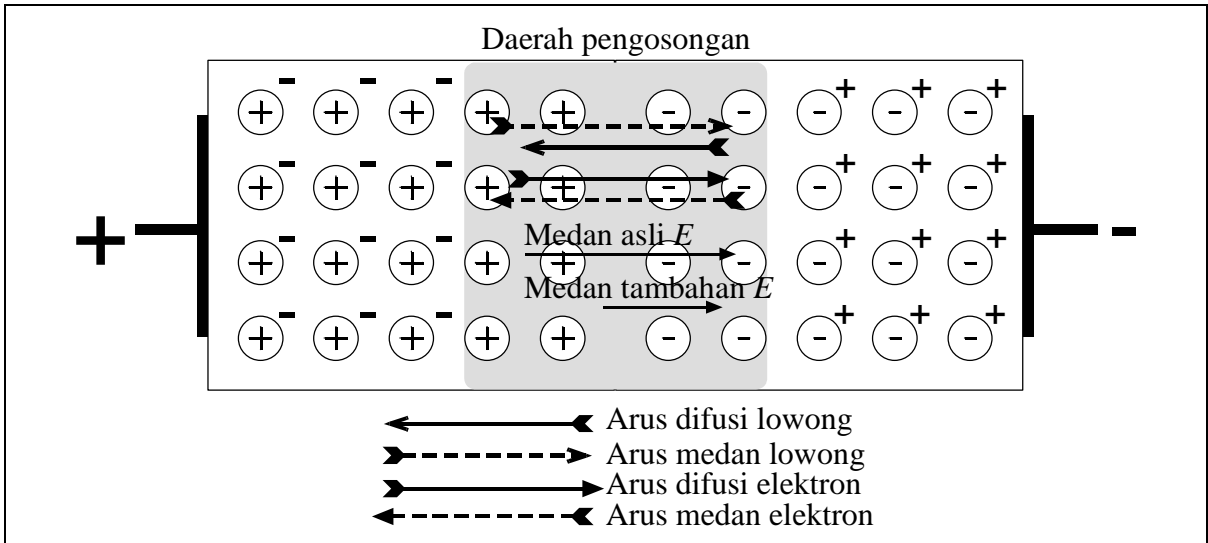
muatan negatif di sebelah kanan, maka terdapat medan listrik pada sambungan kedua semikonduktor. Medan listrik ini menarik elektron kembali ke arah semikonduktor n dan lowong ditarik kembali ke arah semikonduktor p. Dengan kata lain, medan listrik ini menghasilkan arus medan yang berlawanan arah dengan arus difusi. Kalau sudah semakin banyak elektron bergerak ke dalam semikonduktor p dan semakin banyak lowong pindah ke dalam semikonduktor n, maka medan listrik tersebut akan semakin kuat dan arus medan yang melawan arus difusi semakin besar. Sebab itu tidak semua elektron dan lowong akan merata dalam seluruh semikonduktor, tetapi proses akan berakhir dalam situasi keseimbangan di mana arus difusi sama dengan arus medan. Kesamaan ini akan berlaku untuk elektron dan lowong masing-masing dan untuk setiap tempat. Dari persamaan (5.20) untuk kuat arus difusi dan persamaan (5.15) dan (5.16) untuk kuat arus medan konsentrasi elektron dan konsentrasi lowong terhadap tempat bisa dihitung. Dari hasil perhitungan ini terdapat bahwa konsentrasi elektron dan konsentrasi lowong dekat dengan persambungan pn akan hampir nol. Akan terdapat situasi seperti yang diperlihatkan dalam gambar 5.10.. Daerah yang mana konsentrasi pembawa muatan hampir nol disebut **daerah pengosongan**. Dalam daerah pengosongan konsentrasi muatan sangat kecil, maka konduktivitas disitu hampir nol. Dalam daerah semikonduktor n dan semikonduktor p di luar daerah pengosongan terdapat konsentrasi pembawa muatan seperti dalam semikonduktor dengan atom asing, berarti jumlah pembawa muatan mayoritas sesuai dengan konsentrasi atom asing. Konduktivitas disitu tinggi. Sebab itu daerah ini disebut **daerah konduktivitas**.

5.5.2. Sambungan pn dengan Voltase bias balik

Kalau semikonduktor seperti dalam gambar 5.10. dipasang dalam rangkaian elektronik dan diberikan voltase sehingga sambungan positif berada pada semikonduktor n di sebelah kiri dan sambungan negatif berada pada semikonduktor p di sebelah kanan, maka akan timbul satu medan listrik di dalam sambungan pn. Situasi ini diperlihatkan dalam gambar 5.11.. Dalam daerah konduktivitas medan listrik hampir nol karena konduktivitas tinggi, maka voltase pada daerah itu akan kecil walaupun ada arus yang mengalir. Oleh sebab itu hampir seluruh voltase akan terdapat pada sambungan pn, berarti pada daerah pengosongan dan akan menghasilkan medan listrik di daerah⁴ itu. Medan listrik ini akan berjumlah dengan medan listrik yang telah terdapat dari muatan efektif oleh atom asing. Karena arah medan listrik tambahan ini sama dengan arah medan asli, maka arus medan yang telah mengalir akan semakin kuat. Tetapi dalam daerah pengosongan sudah hampir tidak ada muatan, maka arus yang dihasilkan oleh medan listrik sangat kecil. Arus tambahan ini akan semakin menarik elektron dari daerah pengosongan ke dalam daerah n dan lowong dari daerah pengosongan ditarik ke dalam daerah p sehingga jumlah muatan dalam daerah pengosongan semakin kecil. Arus yang mengalir akan sangat kecil.

Kalau seandainya ada elektron dalam daerah p yang masuk ke dalam daerah pengosongan, maka medan listrik yang kuat dalam daerah pengosongan akan langsung menarik elektron tersebut dengan kuat untuk masuk ke dalam daerah n. Tetapi karena jumlah elektron dalam daerah p sangat kecil, maka hanya sedikit sekali elektron yang akan masuk dari daerah p ke dalam daerah pengosongan dan menghasilkan arus listrik yang sangat kecil. Situasi akan sama untuk lowong yang masuk dari daerah n ke dalam

⁴ Lebar dari daerah pengosongan kecil, maka medan listrik yang dihasilkan akan kuat.



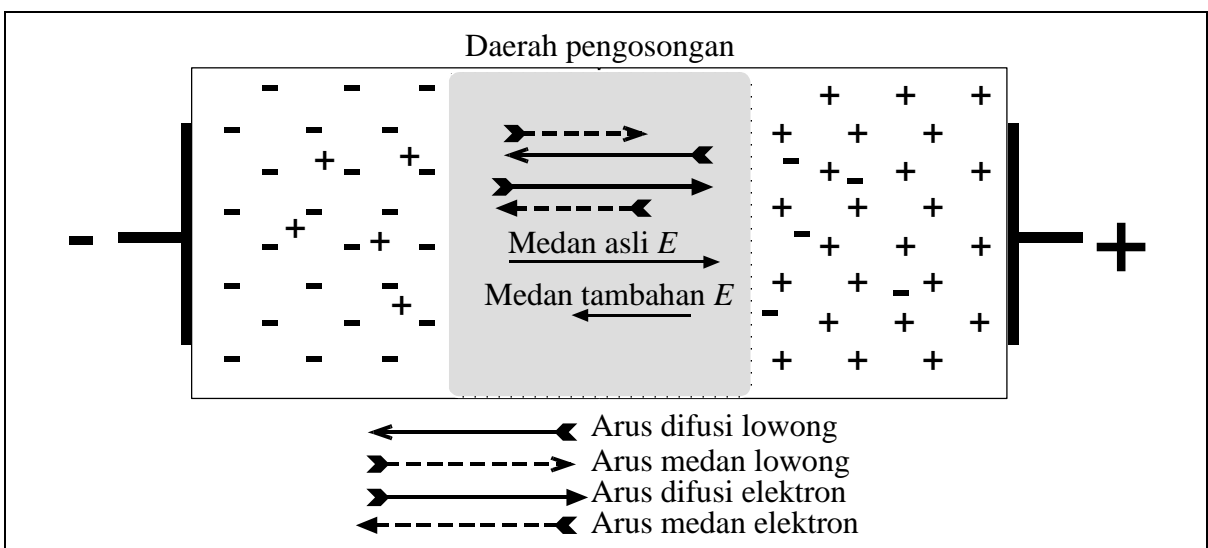
Gambar 5.11.: Sambungan pn dengan voltase bias balik.

daerah pengosongan. Kalau ada lowong yang masuk dari daerah n ke dalam daerah pengosongan, maka akan ditarik dengan kuat dan cepat dari daerah pengosongan ke dalam daerah p. Tetapi jumlah lowong dalam daerah n sangat kecil, maka arus yang dihasilkan dengan cara ini sangat kecil.

Kalau sambungan pn diberi voltase seperti ini, maka dikatakan sambungan pn **dibias balik**.

5.5.3. Sambungan pn dengan Voltase bias maju

Kalau voltase pada sambungan pn positif pada semikonduktor n dan negatif pada semikonduktor p, maka medan listrik yang dihasilkan voltase luar ini akan berlawanan arah dengan medan asli dalam sambungan pn dan medan seluruhnya pada sambungan pn akan berkurang daripada situasi tanpa medan luar. Karena medan listrik berkurang,



Gambar 5.12.: Sambungan pn dengan voltase bias maju.

maka arus medan akan berkurang pula. Arus difusi tetap sama besar karena arus difusi tidak terpengaruh oleh adanya medan listrik. Sebab itu arus difusi lebih besar daripada arus medan. Situasi seperti yang diperlihatkan dalam gambar 5.12..

Jadi elektron akan berdifusi dari daerah n ke dalam daerah pengosongan dan akan melewati daerah pengosongan masuk ke dalam daerah p. Dalam daerah p konsentrasi elektron sangat kecil, maka elektron tersebut akan terus berdifusi dalam daerah aliran pada semikonduktor p semakin masuk ke dalam daerah p. Sambil elektron-elektron masuk ke dalam daerah p akan terjadi rekombinasi dengan lowong-lowong dalam daerah p sehingga jumlah elektron akan berkurang dengan jarak dari daerah pengosongan. Tetapi arus listrik yang dihasilkan oleh elektron tersebut tidak berkurang, tetapi diteruskan oleh lowong sebagai pembawa muatan. Maka terdapat arus elektron dari daerah n ke dalam daerah p, berarti terdapat arus listrik teknis dari p ke n.

Situasi dengan lowong sama dengan situasi elektron. Lowong berdifusi masuk dari daerah p ke dalam daerah pengosongan dan terus ke dalam daerah n. Dalam daerah n lowong berekombinasi dengan elektron dan arusnya diteruskan oleh elektron. Maka terdapat arus lowong dari daerah p ke daerah n, berarti terdapat arus teknis pula dari p ke n.

Arus yang dibawa oleh elektron dan arus yang dibawa oleh lowong berjumlah menjadi arus seluruhnya yang mengalir dalam sambungan pn ini. Besar dari arus elektron dan arus lowong masing-masing tergantung dari konsentrasi atom asing dalam semikonduktor n dan dalam semikonduktor p. Arus yang mengalir dalam dioda ketika dibias maju sebenarnya ditentukan oleh proses difusi. Proses difusi digambarkan dengan fungsi eksponensial. Sebab itu hubungan antara arus dan voltase dalam dioda pula akan digambarkan oleh fungsi eksponensial. Dari perhitungan secara detil akan didapatkan hubungan sbb.:

$$I = I_t \left(\exp \left(\frac{V_{dioda}}{mV_T} \right) - 1 \right) \quad (5.23)$$

Di mana:

I_t : Arus tutup teoretis yang juga mengalir ketika dioda dibias balik.

V_T : Satu konstanta dengan satuan voltase yang tergantung suhu.

$$V_T = \frac{kT}{e_0} ; \text{ pada suhu } 23^\circ\text{C terdapat } V_T = 25.5\text{mV} \approx \frac{1}{40} \text{ V} .$$

V_{dioda} : Voltase pada dioda.

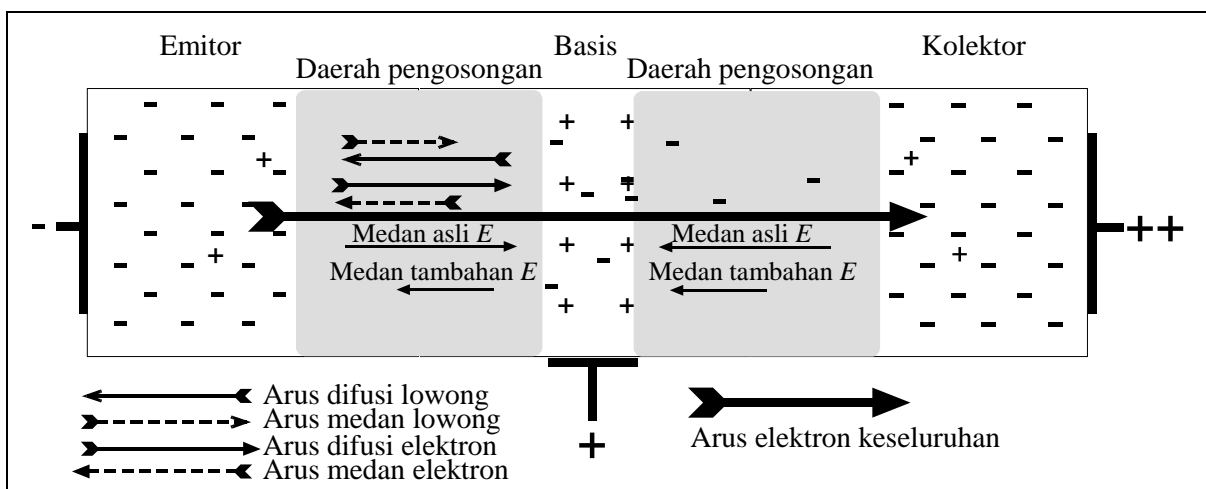
m : Faktor koreksi dengan nilai antara 1 dan 2.

5.6. Injection Transistor dalam Gambaran Kristal

Transistor dibentuk dengan tiga lapisan semikonduktor. Terdapat dua jenis injection transistor, transistor npn dan transistor pnp. Pada transistor npn lapisan pertama terdiri dari bahan semikonduktor n, lapisan kedua adalah semikonduktor p, lapisan ketiga semikonduktor n. Dalam transistor pnp mulai dari semikonduktor p, kemudian semikonduktor n dan terakhir semikonduktor p. Lapisan pertama disebut emitor, lapisan

ditengah adalah basis dan lapisan pada ujung kedua adalah kolektor. Dalam pasal ini transistor npn dibicarakan dulu.

Dalam transistor terdapat dua sambungan pn, yaitu sambungan pn antara basis dan emitor dan sambungan pn antara basis dan kolektor. Dalam transistor npn sambungan pn tersebut dibias maju ketika basis positif terhadap emitor / kolektor dan dibias balik ketika basis negatif terhadap sambungan pada ujung. Dalam pemakaian transistor yang biasa sambungan antara basis dan emitor dibias maju, berarti basis mempunyai potensial yang positif terhadap emitor. Sambungan pn antara basis dan kolektor biasanya dibias balik, berarti kolektor positif terhadap basis dan emitor. Dalam situasi seperti ini terdapat arus sesuai dengan pasal 5.5.2. dan 5.5.3.. Karena sambungan pn dari basis ke emitor dibias maju, maka akan ada arus yang mengalir dalam sambungan tersebut, berarti elektron dari semikonduktor n yang merupakan emitor akan mengalir ke dalam basis yang dibentuk oleh semikonduktor p. Elektron tersebut masuk ke dalam basis dan bergerak terus disitu menuju ke kolektor. Basis dibuat sempit sehingga elektron tersebut akan berdifusi sampai ke daerah pengosongan antara basis dan kolektor sebelum bisa berekombinasi dengan lowong dalam basis. Konsentrasi lowong dalam basis dibuat agak kecil sehingga tidak terlalu banyak lowong yang akan berekombinasi dengan elektron yang datang dari emitor. Maka sebagian besar dari elektron yang datang dari emitor akan sampai ke dalam daerah pengosongan pada sisi kolektor. Sambungan pn antara basis dan kolektor dibias balik, berarti disitu terdapat medan listrik yang kuat dan ketika ada elektron yang berdifusi masuk ke dalam daerah pengosongan tersebut, maka elektron itu akan langsung ditarik ke dalam kolektor. Jadi arus elektron dari emitor hampir seluruhnya berakhir pada kolektor dan hanya sebagian kecil berakhir pada basis. Mengenai arus teknis berarti arus dari kolektor ke emitor besar, sedangkan arus dari basis ke emitor kecil. Karena konsentrasi lowong dalam basis jauh lebih kecil daripada konsentrasi elektron dalam emitor, maka arus lowong dari basis ke emitor akan kecil juga. Jadi dalam konstruksi ini arus dari basis ke emitor kecil, tetapi arus dari kolektor ke emitor akan besar. Semua elektron yang tiba pada daerah pengosongan di sisi kolektor akan ditarik ke dalam kolektor dan menghasilkan arus kolektor. Maka besar dari arus kolektor tergantung hanya dari jumlah elektron yang berdifusi dari emitor ke dalam basis. Jumlah itu tidak tergantung voltase antara kolektor dan basis, tetapi hanya tergantung dari voltase antara basis dan emitor. Jadi arus antara



Gambar 5.13.: Injection Transistor terdiri dari tiga lapisan semikonduktor. Disini transistor npn digambarkan.

kolektor dan emitor dikendalikan oleh voltase antara basis dan emitor dan hubungan antara arus tersebut dengan voltase basis emitor seperti hubungan antara arus dan voltase pada dioda seperti dalam (5.23). Untuk hubungan antara besar dari voltase basis – emitor V_{BE} dengan besar dari arus kolektor I_C yang masuk ke dalam kolektor terdapat:

$$I_C = I_{Ct}(T, V_{CE}) \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (5.24)$$

Di mana:

I_{Ct} : Arus kolektor bocor yang juga mengalir ketika voltase basis-emitor nol.

V_T : Satu konstanta dengan satuan voltase yang tergantung suhu. (Sama dengan V_T pada dioda.)

V_{BE} : Voltase antara basis dan emitor.

Perbandingan antara arus dari kolektor ke emitor dan arus dari basis ke emitor pada satu transistor tertentu hampir konstan, berarti baik pada arus besar maupun pada arus kecil, persentase arus dari basis sama besar. Dalam persamaan terdapat:

$$I_C = B \cdot I_B \quad (5.25)$$

Jadi transistor berfungsi sebagai komponen yang menguatkan arus: Arus basis yang kecil mengendalikan arus kolektor yang besar.

6. Transistor

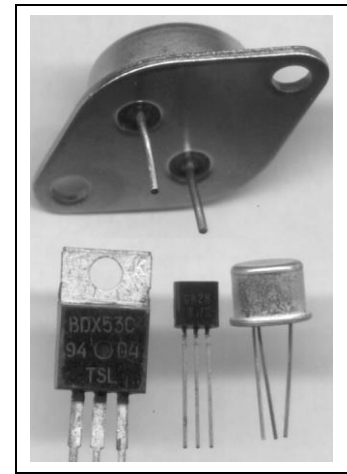
Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu menjelaskan bahan penyusun transistor, karakteristik transistor dan menganalisa rangkaian transistor sebagai penguat.

6.1. Sifat Transistor

6.1.1. Definisi Istilah yang dipakai

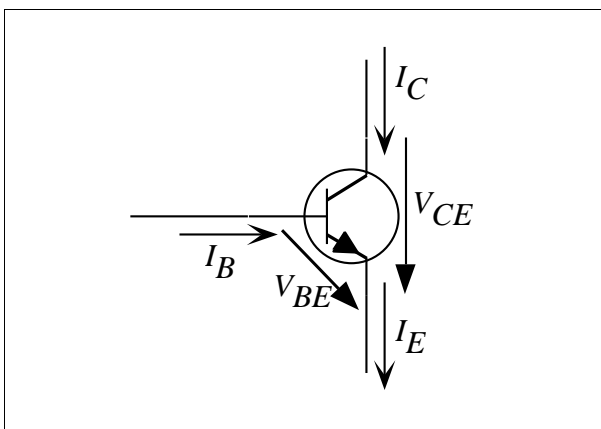
Satu transistor adalah satu komponen elektronik yang memiliki tiga sambungan (Priyono n.d.). Beberapa contoh komponen diperlihatkan dalam gambar 6.1.. Ketiga sambungan tersebut memiliki nama kolektor, basis dan emitor. Supaya selalu jelas, arus atau voltase mana yang sedang dibicarakan, beberapa istilah perlu didefinisikan. Untuk transistor npn dipakai definisi sbb. (lihat juga pada gambar 6.2):

- **Arus kolektor I_C** adalah arus yang masuk ke dalam kolektor.
- **Arus basis I_B** adalah arus yang masuk ke dalam basis.
- **Arus emitor I_E** adalah arus yang keluar dari emitor.
- **Voltase kolektor** atau **voltase kolektor emitor, V_{CE}** adalah voltase antara kolektor dan emitor.
- **Voltase basis** atau **voltase basis emitor, V_{BE}** adalah voltase antara basis dan emitor.

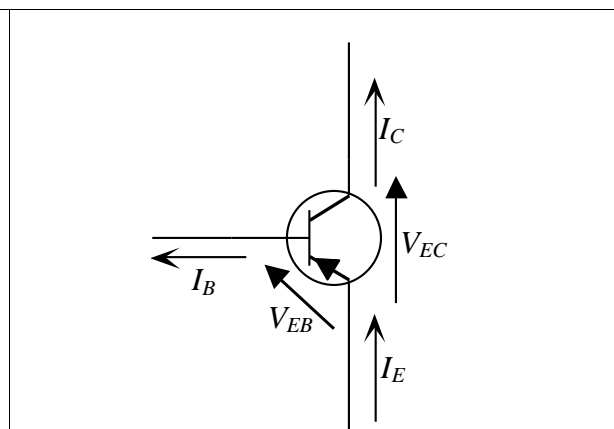


Gambar 6.1.: Beberapa contoh transistor.

Untuk transistor pnp semua arus dihitung terbalik dan voltase-voltase harus menjadi



Gambar 6.2.: Definisi nama-nama voltase dan arus pada transistor npn.



Gambar 6.3.: Definisi nama-nama voltase dan arus pada transistor pnp.

terbalik, berarti V_{BE} dan V_{CE} menjadi negatif atau menjadi V_{EB} (voltase emitor-basis) dan V_{EC} (voltase emitor-kolektor) seperti terlihat dalam gambar 6.3..

6.1.2. Sifat input (Sambungan antara Basis dan Emitor)

Antara basis dan emitor terdapat satu sambungan pn. Maka jelas, sifat pada sambungan ini sama dengan sifat dioda. Biasanya dalam rangkaian transistor dipakai dengan sambungan pn dalam keadaan dibias maju, maka antara arus dan voltase basis emitor terdapat hubungan seperti pada dioda:

$$I_B(V_{BE}) = I_S \left(\exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right) \Leftrightarrow I_B(V_{BE}) = I_S \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (6.1)$$

Di mana:

I_S : Satu arus yang kecil yang merupakan arus bocor teoretis dari dioda (berarti arus yang mengalir ketika dioda dibias balik).

V_T : Satu konstanta alam yang terdapat dari perhitungan teori dioda;

konstanta ini sebesar: $V_T = \frac{kT}{e} \approx 25.5 \text{ mV}$ (pada $T = 296\text{K} \approx 25^\circ\text{C}$)

Rumus (6.1) ini merupakan suatu rumus pendekatan. Persamaan yang lebih teliti akan diperoleh kalau satu faktor koreksi m dipakai dalam rumus (6.1) sehingga terdapat:

$$I_B(V_{BE}) = I_S \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{mV_T}\right) - 1 \right) \quad (6.2)$$

Faktor koreksi m mempunyai nilai antara 1 dan 2.

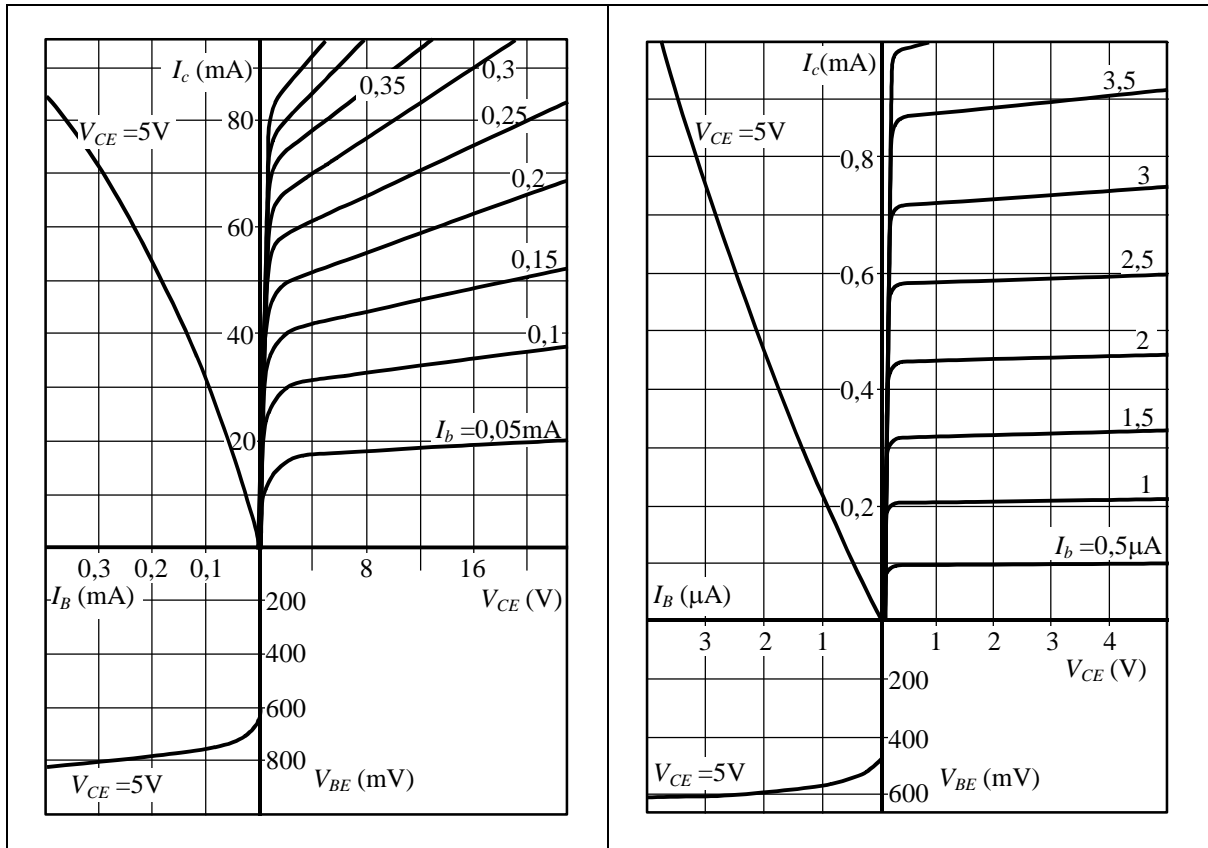
Resistivitas input transistor r_{BE} terdefinisi sebagai resistivitas diferensial antara basis dan emitor. Dari rumus (6.2) r_{BE} bisa dihitung sesuai dengan definisi resistivitas diferensial:

$$r_{BE} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} \quad (6.3)$$

Tetapi konstanta m biasanya tidak diketahui. Sebab itu resistivitas diferensial dari input sebaiknya dihitung dengan memakai penguatan transistor seperti yang akan dijelaskan dalam pasal 6.1.4..

6.1.3. Sifat Output (Sifat Kolektor)

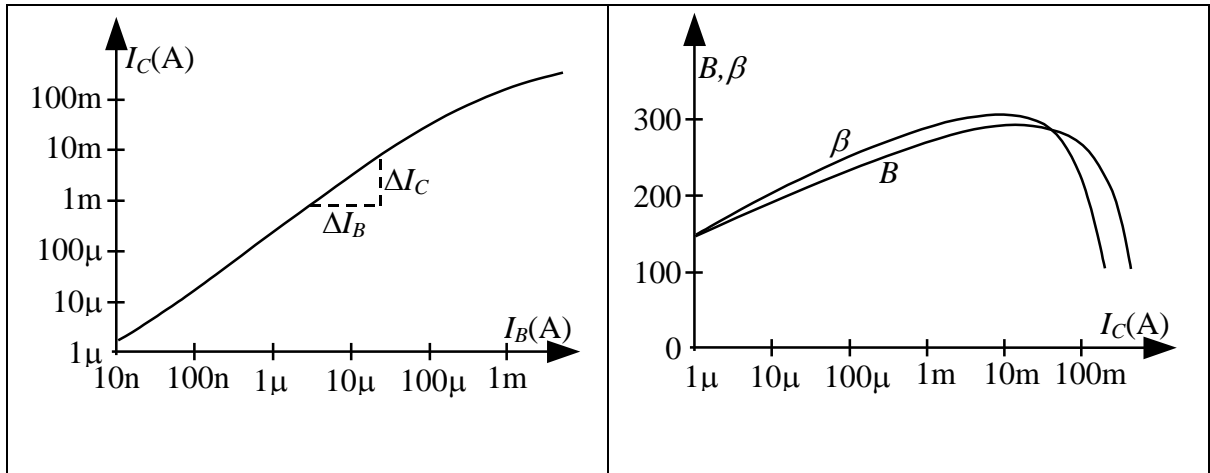
Hubungan antara arus kolektor, I_C , dengan voltase kolektor-emitor, V_{CE} , disebut grafik output dari transistor. Contoh untuk grafik output dari satu contoh transistor diperlihatkan dalam gambar 6.4. di bagian kanan atas pada masing-masing grafik. Grafik tersebut menunjukkan sifat dari sebuah transistor sebagai contoh sbb.. Ketika voltase kolektor-emitor naik dari nol, arus kolektor mula-mula naik dengan cepat, grafik hampir tegak lurus ke atas. Pada arus kolektor tertentu grafik belok dan menjadi hampir mendatar, berarti pada arus kolektor tertentu, arus kolektor hampir tidak naik lagi walaupun voltase kolektor-emitor naik terus. Arus kolektor hampir tidak tergantung dari



Gambar 6.4.: Dalam kedua gambar ini, di sebelah kanan atas grafik output transistor, sebelah kiri atas hubungan antara arus basis dengan arus kolektor dan disebelah kiri bawah grafik input transistor diperlihatkan. Grafik input merupakan hubungan antara voltase basis-emitor dan arus basis. Dalam gambar di sebelah kiri grafik sifat transistor untuk arus dan voltase yang lebih besar daripada arus dan voltase dalam gambar di sebelah kanan. Grafik ini menunjukkan satu contoh transistor.

voltase kolektor-emitor. Dalam kedua gambar tersebut terdapat berbagai garis grafik untuk hubungan antara arus kolektor dan voltase kolektor-emitor dengan nilai arus kolektor yang berbeda-beda untuk voltase kolektor-emitor yang sama. Yang membedakan berbagai garis grafik adalah besarnya arus basis. Jadi kalau besarnya voltase kolektor-emitor sudah di atas ≈ 0.2 Volt atau ≈ 0.3 Volt arus kolektor hampir tidak tergantung dari voltase kolektor-emitor, tetapi tergantung dari arus basis. Apa yang terjadi pada arus kolektor ketika voltase kolektor-emitor menjadi lebih tinggi lagi dan melampaui kemampuan transistor, tidak diperlihatkan dalam kedua gambar tersebut. Dalam situasi dimana voltase kolektor-emitor sudah mencapai nilai maksimal, arus akan naik dengan sangat cepat. Voltase ini disebut sebagai voltase *breakthrough*. Transistor akan rusak kalau *breakthrough* terjadi, sehingga voltase *breakthrough* harus dihindari. *Breakthrough* pada transistor sama dengan *breakthrough* pada dioda yang dibias balik. Besar dari voltase *breakthrough* bisa didapatkan dari buku data transistor. Daerah di mana grafik arus kolektor terhadap voltase kolektor hampir mendatar disebut daerah aktif dari transistor. Dalam daerah ini transistor bisa dikendalikan dengan mengatur besar dari voltase / arus basis.

Dalam daerah aktif perbandingan antara arus basis dan arus kolektor hampir konstan. Kalau dalam suatu rangkaian perbandingan tersebut dibutuhkan dengan teliti sekali,



Gambar 6.5.: Arus kolektor terhadap arus basis seperti yang biasa didapatkan pada transistor.

Gambar 6.6.: Penguatan arus DC dan penguatan arus AC terhadap arus kolektor yang biasa didapatkan.

maka ketergantungan dari arus basis / kolektor dalam perbandingan tersebut perlu diperhatikan. Namun untuk kebanyakan rangkaian hasil cukup teliti jika perbandingan ini dianggap konstan. Perbandingan antara arus kolektor I_C dan arus basis I_B disebut penguatan arus searah (*DC amplification*) dari transistor dan biasanya dinyatakan dengan “ B ” atau dengan “ h_{FE} ”:

$$B = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (6.4)$$

Untuk perubahan arus basis ΔI_B dan perubahan arus kolektor ΔI_C yang kecil terdapat kemiringan dari grafik I_C terhadap I_B . Kemiringan itu disebut penguatan arus AC dan biasanya ditulis sebagai β atau h_{fe} :

$$\beta = h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (6.5)$$

Dalam gambar 6.4. di bagian kiri atas dari masing-masing grafik diperlihatkan hubungan antara arus kolektor I_C dan arus basis I_B dengan menggunakan satu contoh dari transistor tertentu. Hubungan antara arus kolektor dan arus basis seperti dalam gambar 6.5. dan penguatan AC dan penguatan DC terhadap arus kolektor dalam gambar 6.6. diperlihatkan seperti yang biasanya didapatkan pada transistor. Karena hubungan antara arus basis dan arus kolektor hampir berbanding lurus, maka dalam kebanyakan pemakaian praktis penguatan DC dan penguatan AC bisa dianggap sama dan konstan. Dari gambar-gambar tersebut terlihat seberapa teliti pendekatan hubungan linear antara arus kolektor dan arus basis. Kapan pendekatan ini bisa dipakai dan kapan harus menghitung lebih teliti tergantung rangkaian yang dirancang.

Telah dibicarakan⁵ bahwa pada daerah aktif transistor, voltase pada sambungan pn antara basis dan emitor, V_{BE} , menentukan besar arus kolektor, I_C , yang mengalir dari

⁵ Lihat grafik output transistor dan pasal mengenai teori semikonduktor.

kolektor ke emitor. Hubungan antara voltase basis V_{BE} dengan arus kolektor I_C bisa dirumuskan sbb.:

$$I_C = I_{CS}(T, V_{CE}) \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (6.6)$$

Di mana:

I_{CS} : Arus tutup dari transistor yang akan tergantung dari suhu dan voltase kolektor-emitor, walaupun ketergantungannya dari V_{CE} kecil.

V_T : Konstanta alam seperti dalam persamaan (6.1).

Disini faktor koreksi m yang terdapat dalam rumus (6.2) untuk dioda tidak perlu dipakai karena selalu dekat dengan 1.

Dari rumus (6.6) terdapat hubungan antara arus kolektor dan voltase basis-emitor sebagai fungsi eksponensial seperti hubungan antara arus dan voltase pada dioda. Mengenai sifat ini perlu dicatat bahwa arus kolektor baru akan berpengaruh dalam rangkaian ketika besar voltase basis-emitor mencapai $\approx 0.6V$ atau $\approx 0.7V$. Kalau voltase basis-emitor naik lagi di atas besar voltase tersebut, maka arus kolektor akan naik dengan cepat bahkan dengan perubahan voltase basis-emitor yang kecil. Dalam gambar 6.4. di bagian kiri bawah dari masing-masing grafik diperlihatkan hubungan antara arus basis dengan voltase basis-emitor. Karena arus kolektor hampir sebanding dengan arus basis, maka grafik mengenai hubungan antara arus kolektor dan voltase basis-emitor sama, hanya skala untuk arus akan berbeda.

Persamaan (6.6) menunjukkan hubungan antara voltase basis-emitor V_{BE} dan arus kolektor I_C . Dari situ hubungan antara perubahan voltase basis-emitor ΔV_{BE} dan perubahan arus kolektor ΔI_C didapatkan dengan menghitung diferensial arus kolektor I_C terhadap voltase basis-emitor V_{BE} . Hubungan itu merupakan kemiringan dari grafik I_C terhadap V_{BE} dan disebut *transconductance* g_f .

$$g_f = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_{V_{CE} = \text{konst.}} \quad (6.7)$$

Dari (6.6) dan (6.7) besar dari g_f didapatkan:

$$g_f = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_{V_{CE}} = \frac{I_{CS}}{V_T} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \Leftrightarrow g_f = \frac{I_C}{V_T} \approx 40 \frac{1}{V} \cdot I_C \quad (6.8)$$

Error!

Dari persamaan (6.8) terdapat perubahan arus kolektor ΔI_C pada perubahan voltase basis-emitor ΔV_{BE} yang kecil:

$$\Delta I_C = g_f \cdot \Delta V_{BE} \quad (6.9)$$

g_f adalah satu besaran dengan satuan seperti konduktivitas, karena g_f menunjukkan hubungan antara arus dan voltase seperti konduktivitas (*conductance*) dari suatu komponen. Tetapi konduktivitas ini tidak memberikan hubungan antara arus dan voltase pada tempat yang sama, tetapi pada dua sambungan transistor yang berbeda. Sebab itu

tidak disebut konduktivitas atau *conductance*, tetapi **trans-conductance**. Atau bisa disebut juga sebagai **konduktivitas berpindah**.

Satu sifat lagi yang bisa dibaca dari grafik output transistor (hubungan antara arus kolektor dengan voltase kolektor-emitor) yaitu ketika voltase kolektor naik, arus kolektor awalnya naik dengan cepat dibanding kenaikan voltase kolektor, kemudian grafik belok dan menjadi hampir mendatar, berarti arus kolektor hampir tidak lagi tergantung dari voltase kolektor. Daerah grafik di mana grafik membentuk garis lurus yang hampir mendatar disebut sebagai daerah aktif transistor. Kemiringan ini disebut resistivitas kolektor r_{CE} dan merupakan resistivitas diferensial antara kolektor dan emitor. Resistivitas kolektor r_{CE} ini juga disebut resistivitas output transistor dan sebagai rumus terdefinisi sbb.:

$$r_{CE} = \left. \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} \right|_{V_{BE} = \text{konst.}} \quad (6.10)$$

Untuk menentukan besar dari resistivitas kolektor emitor r_{CE} terdapat satu rumus pendekatan yang cukup baik:

$$r_{CE} = \frac{V_Y}{I_C} \quad (6.11)$$

Di mana:

V_Y : Satu konstanta yang disebut **voltase Early**. Biasanya voltase Early besarnya antara 80 dan 200V untuk transistor npn dan antara 40 dan 150V untuk transistor pnp.

Dari (6.11) dilihat bahwa resistivitas kolektor emitor ini berbanding terbalik dengan arus kolektor, berarti kalau arus kolektor naik, resistivitas kolektor emitor turun. Jadi pada I_C yang lebih besar, ketergantungan I_C dari V_{CE} lebih besar.

Persamaan (6.11) bisa didapatkan dari grafik output transistor: Grafik dengan satu voltase basis-emitor tertentu membentuk garis lurus pada daerah aktif transistor. Garis itu bisa diperpanjang lurus ke kiri dan akan memotong sumbu voltase pada nilai negatif dengan harga mutlak sebesar voltase Early. Hal ini bisa dilakukan untuk semua voltase basis-emitor dengan hasil voltase Early yang sama.

Dari (6.9) dan (6.10) dilihat bahwa arus kolektor tergantung dari voltase basis-emitor V_{BE} dan dari voltase kolektor-emitor V_{CE} . Untuk memperhatikan kedua ketergantungan ini pada sinyal kecil, keduanya bisa dilinierkan dan pengaruh masing-masing bisa dijumlahkan, maka terdapat perubahan arus kolektor ΔI_C sbb.:

$$\Delta I_C = g_f \cdot \Delta V_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot \Delta V_{CE} \quad (6.12)$$

6.1.4. Resistivitas Input dari Transistor

Resistivitas diferensial antara basis dan emitor disebut resistivitas input transistor. Resistivitas input itu bisa dihitung dengan memakai definisi dari penguatan β , persamaan (6.5), dan persamaan untuk *transconductance* g_f persamaan (6.8):

$$r_{BE} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\partial V_{BE}}{\frac{\partial I_C}{\beta}} = \frac{\beta}{g_f} = \frac{\beta V_T}{I_C} \quad (6.13)$$

6.1.5. Nilai-nilai Maksimal untuk Transistor

Terdapat beberapa voltase dan arus maksimal yang tidak boleh dilewati supaya transistor tidak rusak. Besar voltase dan arus maksimal tersebut tergantung dari bentuk transistor (tebal layar-layar), konsentrasi atom asing dan kemasan yang dipakai. Nilai-nilai maksimal disebutkan dalam lembaran data transistor. Terdapat beberapa nilai batas sbb. (Angka dalam kurung adalah besar voltase / arus untuk transistor BC161 / BC141 / CS9013 sebagai contoh. Ketiga transistor ini dipakai dalam praktikum):

Voltase kolektor-basis maksimal, $V_{CB \text{ maks}}$, (60V / 100V / -) adalah voltase maksimal yang boleh dipasang antara kolektor dan basis.

Voltase kolektor-emitor maksimal, $V_{CE \text{ maks}}$, (60V / 60V / 25V) adalah voltase maksimal yang boleh dipasang antara kolektor dan emitor.

Voltase emitor-basis maksimal, $V_{EB \text{ maks}}$, (5V / 7V / 3V) adalah voltase maksimal yang boleh dipasang antara emitor dan basis, berarti voltase maksimal untuk sambungan pn antara basis dan emitor dalam keadaan bias balik, dimana belum terjadi breakthrough.

Arus kolektor maksimal, $I_C \text{ maks}$, (1A / 1A / 1A) adalah arus kolektor maksimal yang boleh mengalir dalam kolektor.

Suhu persambungan pn maksimal (*maximum junction temperature*), $T_J \text{ maks}$, (175°C / 175°C / 150°C) adalah suhu maksimal yang boleh didapatkan pada sambungan pn dalam transistor.

Daya disipasi maksimal, P_{TOT} , adalah daya maksimal yang bisa diserap oleh transistor pada situasi tertentu. Daya ini membatasi perkalian antara arus dan voltase kolektor. Daya ini dinyatakan dalam situasi tertentu, berarti pada suhu dan pendingin tertentu, karena daya ini tergantung suhu lingkungan dan pendingin yang dipakai. Misalnya untuk BC161 dan BC141 terdapat daya maksimal sebesar 3200mW / 3700mW pada suhu lingkungan 25°C dan dengan memakai pendingin standard. Untuk CS9013 daya maksimal dalam udara dengan suhu 25°C sebesar 600mW. Untuk jenis pendingin lain dan suhu lingkungan yang berbeda daya maksimal bisa dihitung dengan data ini dan suhu persambungan pn maksimal.

6.2. Rangkaian Penguat Sederhana dengan satu Transistor

6.2.1. Penjelasan Rangkaian

Supaya semakin mengerti sifat transistor, akan diselidiki sifat dari satu rangkaian penguat yang sederhana dalam pasal ini. Rangkaian yang dipakai ditunjukkan dalam gambar 6.7.. Masukan untuk rangkaian penguat didapatkan dari sumber voltase di sebelah kiri dalam skema rangkaian. Sumber voltase ini merupakan voltase DC yang konstan sebesar $\approx 0.7V$ yang dijumlahkan dengan satu sinyal voltase AC, V_s , dengan amplitude kecil. Input dari penguat adalah sambungan antara basis dan emitor. R_s adalah resistor yang menunjukkan resistivitas dalam dari sumber voltase masukan tersebut. Kolektor disambungkan dengan sumber voltase DC sebesar V_b (voltase baterai / voltase sumber) melalui resistor R_C . Bagian negatif dari sumber voltase ini merupakan GND dan disambungkan dengan emitor. Output dari rangkaian adalah sambungan antara kolektor dengan GND (*ground* / bumi). Rangkaian seperti ini disebut *common emitter amplifier* karena emitor dipakai sebagai sambungan bersama untuk input dan output.

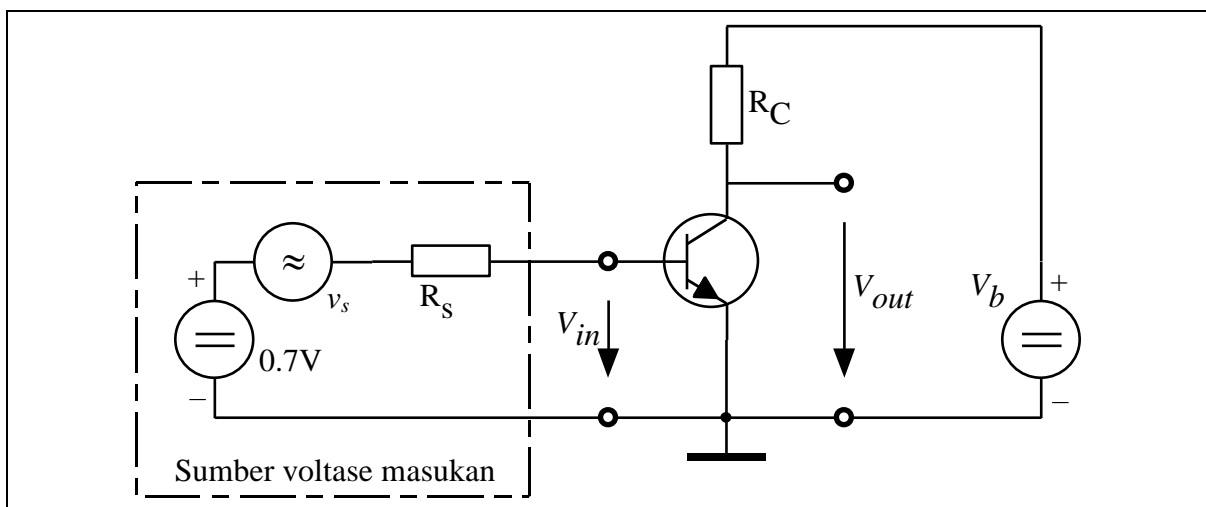
Besar dari voltase DC pada input diatur sehingga terdapat arus DC sebesar I_{C0} pada kolektor ketika sinyal AC nol. Dengan adanya arus DC sebesar I_{C0} pada kolektor, maka terdapat voltase $V_{RC0} = R_C \cdot I_C$ pada resistor kolektor R_C , maka terdapat voltase antara kolektor dan emitor sebesar $V_{CE0} = V_b - V_{RC0}$. Misalnya sumber voltase DC pada input diatur sehingga arus kolektor sebesar 40mA, resistivitas dari resistor kolektor sebesar $R_C = 300\Omega$, voltase supply dari sumber voltase V_b sebesar 24V. Voltase pada resistor kolektor akan sebesar $V_{RC0} = 40mA \cdot 300\Omega = 12V$, voltase output akan sebesar $V_{CE0} = V_b - V_{RC0} = 24V - 12V$. Voltase-voltase ini terdapat sebagai voltase DC. Ketika ada voltase AC pada input yang ditambahkan pada voltase DC (berarti voltase pada input akan naik dan turun sejauh ΔV_{in}), maka arus pada input, berarti arus basis juga akan naik dan turun sejauh ΔI_B . Besar ΔI_B sesuai dengan perubahan voltase input dan besar dari resisitivitas diferensial pada input (basis – emitor) transistor:

$$\Delta I_B = \frac{\Delta V_{BE}}{r_{BE}} \quad (6.14)$$

Ketika arus basis berubah sejauh ΔI_B , arus kolektor akan berubah sejauh $\Delta I_C = h_{fe} \cdot \Delta I_B$. Dengan arus kolektor yang naik dan turun, maka voltase pada resistor kolektor akan juga ikut naik dan turun sesuai dengan hukum Ohm. Ketika voltase pada resistor kolektor naik, maka voltase antara kolektor dan emitor akan turun sesuai dengan hukum Kirchhoff mengenai voltase, dan sebaliknya. Berarti voltase output akan ikut turun dan naik sejauh ΔV_{out} ketika voltase pada input naik dan turun sejauh ΔV_{in} . Voltase input beresilasi terhadap voltase DC yang sebesar 0.7V dan voltase output akan beresilasi terhadap voltase DC yang sebesar V_{CE0} . Situasi yang terdapat tanpa sinyal AC disebut titik kerja. Berarti titik kerja adalah voltase dan arus kolektor DC ketika sinyal AC nol. Titik ini (merupakan satu titik dalam grafik I_C terhadap V_{CE}) disebut titik kerja, karena rangkaian yang menguatkan sinyal AC bekerja dengan bervariasi terhadap titik ini. Dengan kata lain titik kerja ini merupakan standard yang disetel ketika tidak ada sinyal input.

Apa yang terjadi bisa dimengerti dari grafik dalam gambar 6.8.. Pada bagian kiri bawah dalam grafik ini terlihat hubungan antara voltase basis-emitor dan arus basis. Dengan voltase DC sebesar $\approx 770\text{mV}$ terdapat arus basis sebesar $\approx 0.14\text{mA}$. (Perhatikanlah garis dalam bentuk $\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet\bullet$ pada gambar) Pada bagian kiri atas dilihat hubungan antara arus basis dan arus kolektor. Pada arus basis sebesar $\approx 0.14\text{mA}$ terdapat arus kolektor sebesar $\approx 40\text{mA}$. Pada bagian output, rangkaian seri dengan resistor kolektor dan sambungan dari kolektor ke emitor menentukan sifat rangkaian. Untuk mencari titik kerja dari rangkaian seri ini, dalam gambar 6.8 sebelah kanan atas grafik output dari transistor digambarkan bersama dengan garis beban dari resistor kolektor dengan resistivitas sebesar $R_C = 300\Omega$. Garis beban digambar seperti dalam pasal 3 dimana rangkaian seri dengan dua komponen dibicarakan. Garis karakteristik dari transistor adalah grafik output dari transistor yang berubah dengan arus / voltase basis. Garis beban terdapat dari sifat resistor dengan persamaan:

$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_b - V_{R_C} \\ &= V_b - I_C \cdot R_C \end{aligned} \quad (6.15)$$



Gambar 6.7.: Rangkaian penguat sederhana dengan satu transistor.

Titik perpotongan antara garis karakteristik dan garis beban menunjukkan arus yang mengalir dalam rangkaian ini dan voltase kolektor-emitor yang didapatkan. Tetapi dalam rangkaian ini perlu diperhatikan bahwa garis karakteristik dari transistor berubah menurut perubahan voltase basis-emitor. Besar dari arus kolektor ditentukan oleh voltase basis-emitor seperti yang didapatkan dari bagian kiri dalam grafik mengenai sifat transistor (gambar 6.8). Dalam contoh ini telah dijelaskan bahwa terdapat arus kolektor sebesar 40mA sesuai dengan voltase basis-emitor DC yang dipakai. Dengan arus kolektor I_C sebesar 40mA voltase kolektor-emitor V_{CE} bisa didapatkan dari garis beban sebesar 12V. Dengan arus kolektor sebesar $I_C = 40\text{mA}$, voltase kolektor-emitor bisa langsung dibaca dari grafik garis beban sebesar $V_{CE} = 12\text{V}$.

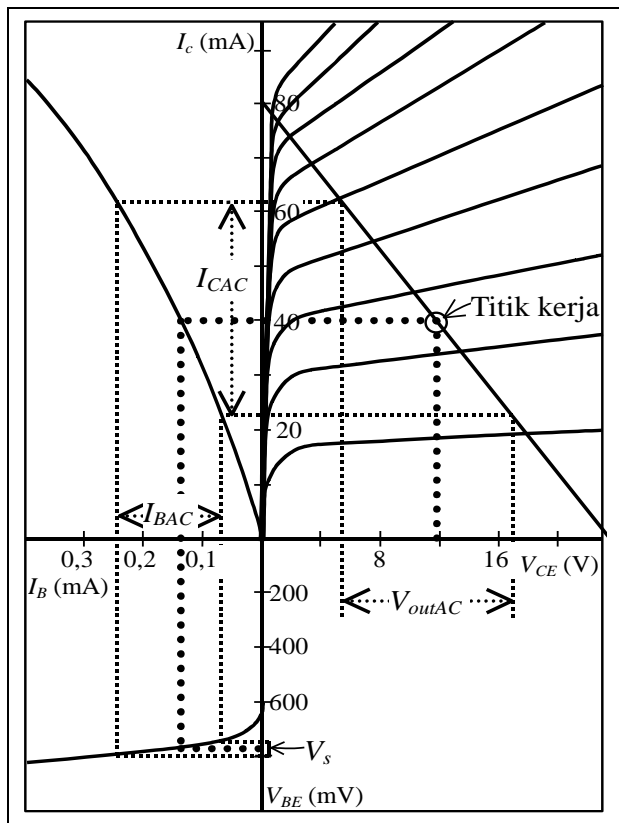
Kalau voltase pada input beresilasi terhadap voltase DC-nya, berarti terdapat bagian AC sebesar V_s yang ditambahkan pada voltase $V_{BE} = 770\text{mV}$ dalam contoh ini, maka voltase basis-emitor berubah-ubah sebesar V_s . Perubahan AC pada voltase basis-emitor akan menghasilkan perubahan pada arus basis I_{BAC} sesuai dengan garis yang menggambarkan hubungan antara arus basis dengan voltase basis-emitor. (Perhatikanlah garis dalam bentukpada gambar) Dalam gambar 6.8 perubahan voltase input digambar sebagai V_s , perubahan pada arus basis digambar sebagai I_{BAC} , perubahan arus kolektor yang dihasilkan oleh perubahan arus basis ini dinyatakan sebagai I_{CAC} dan perubahan arus kolektor ini akan menghasilkan perubahan pada voltase kolektor emitor yang didapatkan dari garis beban dan dalam gambar dinyatakan sebagai V_{outAC} .

Dari gambar dan dari penjelasan di atas langsung bisa dilihat bahwa voltase keluaran naik ketika voltase masukan turun dan sebaliknya. Ini berarti bahwa fase antara masukan dan keluaran terbalik atau tergeser sejauh 180° .

Dalam pasal ini situasi kualitatif dari rangkaian ini telah dibicarakan, berarti prinsip yang terjadi telah dijelaskan. Dalam pasal berikut resistivitas input, resistivitas output dan penguatan dari penguat ini akan dihitung secara persis berdasarkan persamaan-persamaan transistor.

6.2.2. Penguatan dari rangkaian ini

Dalam rangkaian ini terdapat voltase DC pada input dan besar voltase DC ini menentukan titik kerja dari rangkaian, berarti dengan voltase DC ini ditentukan arus basis DC, arus kolektor DC dan voltase kolektor-emitor DC tertentu. Voltase DC ini disebut sebagai titik kerja. Selain



Gambar 6.8.: Sifat transistor pada rangkaian penguat common emitter dengan garis beban pada karakteristik output, titik kerja dan besar sinyal AC pada input, arus basis, arus kolektor dan output rangkaian.

voltase dan arus DC juga terdapat sinyal AC pada input rangkaian. Voltase AC ini merupakan perubahan pada voltase DC dan akan kita nyatakan sebagai ΔV . Voltase AC pada input akan kita sebutkan sebagai ΔV_{in} . Seperti dijelaskan di atas bahwa ΔV_{in} ini menghasilkan arus basis dan arus kolektor AC yang akan kita sebutkan sebagai ΔI_B dan ΔI_C . Perubahan arus kolektor akan menghasilkan perubahan voltase kolektor-emitor, di mana voltase kolektor-emitor merupakan keluaran dari rangkaian dan akan dinyatakan sebagai ΔV_{out} .

Besar perubahan dari voltase output ΔV_{out} pada rangkaian dalam gambar 6.7., ketika terdapat sinyal voltase AC ΔV_{in} pada input, bisa dihitung dengan memakai rumus-rumus dari “6.1. Sifat Transistor”:

Dari (6.7) dan (6.8) terdapat hubungan antara perubahan voltase basis dengan perubahan arus kolektor secara langsung tanpa menghitung besar dari arus basis:

$$\Delta I_C = g_f \cdot \Delta V_{BE} = g_f \cdot \Delta V_{in} \quad (6.16)$$

Karena arus kolektor berubah, maka voltase pada resistor kolektor akan berubah juga sehingga voltase kolektor-emitor (= voltase output rangkaian) akan berubah sesuai dengan persamaan (6.15):

$$V_{CE} = V_b - I_C \cdot R_C \Rightarrow \Delta V_{CE} = \Delta V_{out} = -\Delta I_C \cdot R_C \quad (6.17)$$

(6.16) dimasukkan ke dalam (6.17):

$$\Delta V_{out} = -R_C \cdot \Delta I_C = -g_f \cdot R_C \cdot \Delta V_{in} \quad (6.18)$$

Hubungan antara perubahan voltase input dan voltase output sudah jelas dari (6.18). Tanda minus menunjukkan bahwa voltase output turun ketika voltase input naik, berarti fase output terbalik dengan fase input. Penguatan dari penguat ini terdapat dari (6.18):

$$|A| = \frac{|\Delta V_{out}|}{|\Delta V_{in}|} = g_f \cdot R_C \quad (6.19)$$

Dengan masukkan besarnya *transconductance* g_f dari (6.8) terdapat penguatan sebesar:

$$|A| = g_f \cdot R_C = \frac{I_C}{V_T} \cdot R_C = \frac{1}{V_T} \cdot V_{RC} \approx 40 \frac{1}{V} \cdot V_{RC} \quad (6.20)$$

Di mana:

I_C : Besar DC dari arus kolektor.

V_{RC} : Voltase DC pada resistor kolektor.

Jadi penguatan tergantung hanya dari voltase DC pada resistor kolektor pada titik kerja.

Kalau voltase kolektor-emitor berubah, arus kolektor berubah sesuai dengan kemiringan garis dalam grafik output transistor. Dalam perhitungan di atas perubahan arus kolektor ini belum diperhatikan. Karena resistivitas diferensial antara kolektor dan emitor, r_{CE} , besar, maka perubahan arus menjadi kecil dan sering bisa diabaikan. Namun dalam situasi-situasi tertentu perubahan itu harus diperhatikan dengan baik-baik. Untuk mengerti lebih teliti apa yang terjadi, model untuk transistor pada “sinyal kecil” bisa dipakai. Dalam model untuk sinyal kecil penyetalan titik kerja dianggap sudah tetap dan konstan dan yang diperhatikan hanya perubahan kecil dari arus dan voltase terhadap titik kerja. Sesuai dengan kebiasaan dalam buku-buku teknik elektro dan banyak buku

elektronika kita akan memakai huruf kecil untuk sinyal yang berubah, berarti untuk sinyal yang merupakan voltase AC. Jadi untuk selanjutnya perubahan voltase input ΔV_{in} akan disebutkan v_{in} , perubahan arus input ΔI_{in} akan disebutkan i_{in} , perubahan arus kolektor ΔI_C akan disebutkan i_C , perubahan voltase output ΔI_{out} akan disebutkan i_{out} dst..

Satu model sinyal kecil yang menggambarkan sifat transistor (untuk frekuensi yang tidak terlalu besar) terdapat seperti dalam gambar 6.9.. Dalam gambar 6.9. kotak yang digambarkan dengan garis berbentuk titik-garis menunjukkan model untuk transistor dan komponen di luar kotak tersebut adalah komponen selain transistor. Input antara basis dan emitor memiliki resistivitas input r_{BE} . Output antara kolektor dan emitor dilihat sebagai sumber daya listrik dan digambarkan dengan rangkaian ekuivalen Norton. Berarti, pada output terdapat satu sumber arus di mana besar dari arus output ini terdapat dari definisi *transconductance* dalam persamaan (6.7):

$$\Delta I_C = -g_f \cdot \Delta V_{BE} \Leftrightarrow i_C = -g_f \cdot v_{BE} \quad (6.21)$$

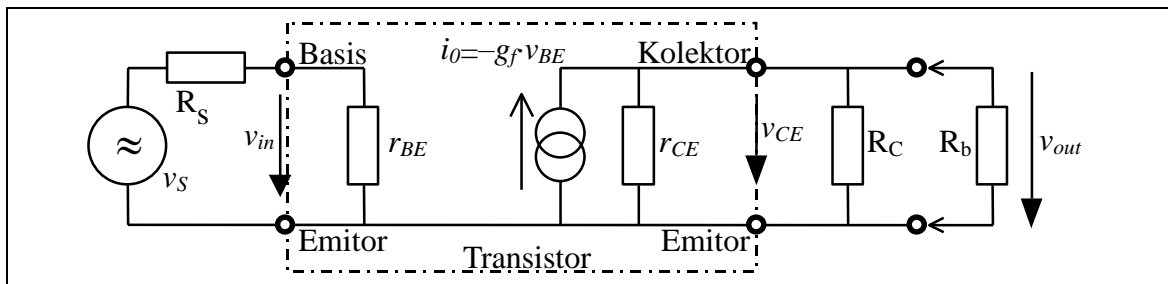
Tanda “-“ dalam (6.21) menunjukkan bahwa arus dalam transistor yang mengalir dari kolektor ke emitor bertambah ketika voltase basis-emitor bertambah. Tambahan arus ini masuk dari keluaran rangkaian sehingga arus tersebut harus dihitung negatif.

Karena rangkaian yang digunakan adalah rangkaian ekuivalen Norton, maka resistivitas dalam dirangkai paralel dengan sumber arus ideal. Resisitivitas dalam dari sumber daya listrik adalah hubungan antara voltase keluaran dan arus keluaran. Untuk transistor dalam rangkaian common emitor, voltase keluaran adalah voltase kolektor-emitor dan arus keluaran adalah arus kolektor. Maka resistivitas dalam

$$r_d = \frac{v_{out}}{i_{out}} = \frac{v_{CE}}{i_C} = r_{CE} \quad (6.22)$$

adalah resistivitas kolektor-emitor. Sebab itu dalam rangkaian ekuivalen untuk transistor pada sinyal kecil (sinyal AC) satu resistor dengan resistivitas r_{CE} dirangkai paralel dengan sumber arus. Sumber voltase V_b memiliki resistivitas diferensial nol. Sebab itu resistor kolektor R_C tersambung langsung dengan emitor dan nampak seperti dirangkai paralel dengan resistivitas kolektor-emitor r_{CE} dalam rangkaian ekuivalen untuk AC. Kalau terdapat suatu beban R_b , beban itu dirangkai antara kolektor dan emitor, maka beban itu juga dirangkai paralel dengan resistivitas r_{CE} . Dari rangkaian ekuivalen ini dilihat resistivitas output dari penguat ini terdapat dari rangkaian paralel dengan r_{CE} dan resistivitas R_C dari resistor kolektor.

Dengan rangkaian ini voltase output bisa dihitung, dari besar arus pada sumber arus



Gambar 6.9.: Model sinyal kecil untuk penguat sederhana seperti dalam gambar 6.7..

konstan dan resistivitas yang terdapat yang dirangkai paralel dengan sumber arus tersebut. Resistivitas yang dirangkai paralel dengan sumber arus kita sebutkan sebagai r_{total} . Maka terdapat voltase keluaran sebesar:

$$\left. \begin{array}{l} v_{out} = i_c \cdot r_{total} \\ i_c = -g_f \cdot v_{in} \end{array} \right\} \Rightarrow v_{out} = -g_f \cdot v_{in} \cdot r_{total}; \quad \frac{1}{r_{total}} = \frac{1}{r_{CE}} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_b} \quad (6.23)$$

Dari voltase output ini dan definisi untuk penguatan $|A|$ terdapat:

$$|A| = \frac{v_{out}}{v_{in}} = g_f \cdot r_{total} \quad (6.24)$$

Penguatan dari rangkaian ini akan menjadi yang paling besar kalau tidak ada beban R_b dan besar resistivitas dari resistor kolektor R_C menjadi tak berhingga. Kalau besar R_C dijadikan tak berhingga atau mendekati tak berhingga, maka diperlukan voltase baterai V_b yang tak berhingga, dan hal ini jelas tidak mungkin. Tetapi dengan memakai suatu sumber arus sebagai resistivitas kolektor, resistivitas diferensial yang besar bisa diterapkan untuk resistor kolektor. Penguatan yang paling besar yang bisa didapatkan disebut *maximum voltage gain* (penguatan voltase maksimal) μ sebesar:

$$\mu = \lim_{R_C \rightarrow \infty} |A| = \lim_{R_C \rightarrow \infty} g_f \cdot r_{total} = g_f \cdot r_{CE} = \frac{I_C}{V_T} \cdot \frac{V_Y}{I_C} = \frac{V_Y}{V_T} \quad (6.25)$$

Untuk mendapatkan bagian kedua dalam perhitungan (6.25), persamaan (6.8) untuk besar g_f dan (6.11) untuk besar r_{CE} telah dipakai.

Penguatan voltase maksimal μ yang biasa terdapat sebesar 3000...7500 untuk transistor npn dan 1500...5500 untuk transistor pnp.

6.2.3. Input dari rangkaian ini

Input dari rangkaian ini adalah sambungan transistor dari basis ke emitor, maka jelas di tempat itu terdapat resistivitas input sebesar resistivitas antara basis dan emitor, r_{BE} . Besar dari resistivitas itu telah ditentukan dalam (6.13). Disini resistivitas diferensial harus dihitung karena yang dibutuhkan adalah sifat untuk sinyal AC, berarti perubahan voltase antara basis dan emitor dan arus basis.

6.2.4. Daerah Kerja dari Rangkaian Penguat

Dalam grafik output transistor dilihat bahwa sinyal voltase AC akan membuat voltase dan arus kolektor naik dan turun sesuai dengan sinyal pada input. Dari gambar 6.8. dilihat bahwa voltase kolektor-emitor terbatas. Terdapat voltase supply V_b sebagai batas maksimal untuk voltase keluaran. Batas minimalnya terdapat di mana garis beban memotong garis karakteristik transistor yang paling atas, berarti berada di mana arus kolektor sudah tidak bisa naik lagi walaupun arus / voltase basis ditambahkan lagi. Voltase ini biasanya sekitar 0.3V atau 0.4V. Supaya sinyal memang dikuatkan dan bentuknya tidak berubah jauh, voltase maksimal dan voltase minimal dari output penguat tidak boleh melampaui batas-batas ini. Sebab itu titik kerja (voltase DC pada output) harus diatur sehingga jumlah dari voltase DC pada titik kerja ditambah dengan sinyal voltase AC tidak melewati batas voltase maksimal atau batas voltase minimal.

Dalam gambar 6.10. diperlihatkan beberapa contoh untuk mengatur voltase output titik kerja dan akibatnya pada sinyal voltase AC pada output. Amplitude output AC bisa menjadi maksimal kalau titik kerja berada di tengah batas-batas voltase output.

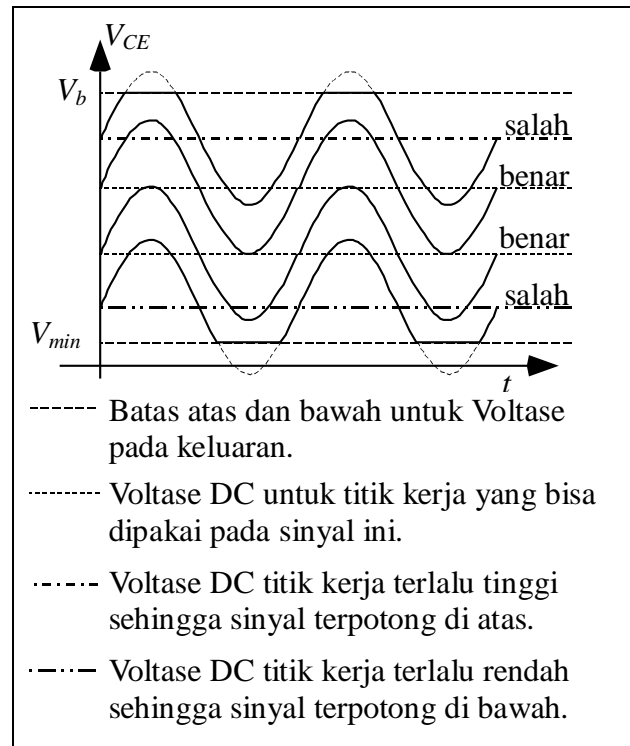
Titik di mana arus kolektor sudah mencapai nilai maksimal dan tidak bisa naik lagi walaupun arus basis ditambahkan, disebut titik jenuh atau titik saturasi (*saturation point*). Sifat transistor pada titik itu disebut kejenuhan atau saturasi (*saturation*).

6.2.5. Mengatur Titik Kerja

6.2.5.1. Mengatur Titik Kerja dengan mengatur Voltase Basis-Emitor

Dari pasal “6.2.4. Daerah Kerja dari Rangkaian Penguat” sudah jelas bahwa titik kerja harus diatur sehingga voltase output DC pada titik kerja memungkinkan rangkaian menghasilkan output AC dengan amplitude yang cukup besar. Berarti kalau mengatur titik kerja, voltase V_{RC} pada resistor kolektor harus diatur, berarti arus kolektor harus diatur sehingga memiliki besar arus tertentu. Pada rangkaian dalam gambar 6.7. yang sudah dibicarakan di atas, titik kerja diatur dengan mengatur voltase DC tambahan antara basis dan emitor. Rangkaian seperti ini tidak bisa dipakai dalam rangkaian praktis. Pada bagian kiri dari masing-masing grafik dalam gambar 6.4. di sebelah bawah terdapat hubungan antara voltase basis-emitor dan di sebelah atas terdapat hubungan antara arus basis dan arus kolektor sehingga secara keseluruhan terdapat hubungan antara voltase basis-emitor dan arus kolektor. Hubungan ini bisa juga dimasukkan ke dalam satu grafik seperti dalam gambar 6.11. yang menunjukkan grafik tersebut untuk satu transistor tertentu sebagai contoh. Dari grafik ini terlihat bahwa pada arus kolektor yang dipakai untuk titik kerja terdapat kemiringan yang besar. Karena kemiringan dari grafik antara I_C dan V_{BE} besar, maka ketika V_{BE} berubah sedikit, arus kolektor I_C langsung berubah jauh. Sebab itu V_{BE} harus diatur dengan sangat teliti dan dalam praktek biasanya tidak dapat diatur cukup teliti.

Terdapat satu alasan lagi, mengapa rangkaian ini tidak bisa dipakai, yaitu karena hubungan antara arus kolektor dan voltase basis-emitor berubah agak jauh saat suhu berubah. Kalau suhu transistor berubah sedikit (karena daya yang diserap di dalamnya atau karena suhu lingkungan berubah), grafik I_C terhadap V_{BE} akan bergeser sehingga untuk arus kolektor yang sama dibutuhkan voltase basis-emitor yang lain, atau dengan



Gambar 6.10.: Pengaturan titik kerja yang benar dan akibatnya kepada output sinyal voltase AC.

voltase basis-emitor yang sama, arus kolektor akan berubah jauh. Ini berarti titik kerja akan langsung berubah jauh ketika suhu berubah. Pada arus kolektor yang konstan, voltase basis-emitor turun kira-kira 2mV per derajat kenaikan suhu. Akibatnya, sepertinya pada basis terdapat satu voltase tambahan ΔV_{in} akibat perubahan suhu sebesar $\Delta V_{in} = 2 \frac{mV}{K} \cdot \Delta T$. Perubahan voltase input ini akan dikuatkan dengan penguatan rangkaian dan menghasilkan perubahan voltase titik kerja pada keluaran rangkaian. Kalau seandainya penguat mempunyai penguatan sebesar 100 dan suhu berubah 10K, maka terdapat perubahan voltase titik kerja pada keluaran sebesar

$$\Delta V_{out} = 2 \frac{mV}{K} \cdot 10 K \cdot 100 = 2 V .$$

Perubahan sebesar ini akan sangat mengganggu kerja rangkaian. Tetapi dalam rangkaian biasa suhu transistor sering bertambah jauh lebih besar daripada hanya 10K sebagai akibat pemanasan oleh daya yang diserap dalam transistor, maka perubahan titik kerja akan lebih besar lagi.

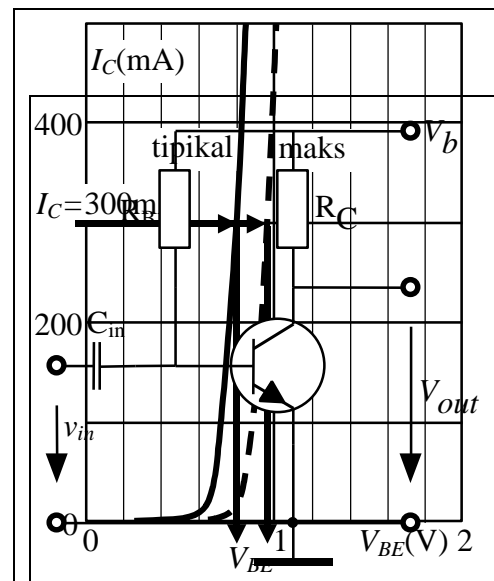
Alasan ketiga mengapa rangkaian ini tidak dapat dipakai karena toleransi antara beberapa transistor dari jenis yang sama. Sifat dari masing-masing transistor berbeda sehingga voltase basis-emitor untuk arus kolektor yang sama akan berbeda-beda dan perlu diatur untuk tiap transistor. Dalam gambar 6.11. contoh toleransi untuk satu transistor diperlihatkan. Dalam produksi seri dikehendaki rangkaian yang tidak perlu diatur secara manual setelah dipasang dengan komponen standard. Kalau titik kerja diatur dengan voltase basis-emitor tertentu, pasti voltase basis-emitor itu perlu diatur untuk setiap rangkaian sendiri-sendiri, karena setiap transistor membutuhkan voltase basis-emitor yang berbeda untuk menghasilkan titik kerja yang sama.

6.2.5.2. Mengatur Titik Kerja dengan mengatur Arus Basis

Satu cara yang lebih baik untuk mengatur titik kerja transistor adalah dengan memakai arus konstan pada basis transistor. Arus konstan bisa didapatkan dari sumber voltase rangkaian dengan satu resistor antara basis dan sumber voltase rangkaian V_b seperti diperlihatkan dalam gambar 6.12.. Penguatan arus h_{FE} adalah suatu konstanta, maka dengan mengatur arus basis, arus kolektor akan ikut diatur sesuai dengan besar dari penguatan arus ini. Kalau penguatan arus h_{FE} dari transistor diketahui, besar dari resistivitas resistor R_B bisa dihitung. Misalnya terdapat h_{FE} sebesar 200, voltase supply $V_b = 10V$ dan titik kerja mau diatur pada $I_C = 2mA$, maka $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 10\mu A$, dan resistivitas dari R_B diperlukan sebesar:

$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} = \frac{10V - 0.7V}{10\mu A} = 930k\Omega$$

Voltase pada resistor R_B sejauh 0.7V di bawah voltase supply karena voltase basis-emitor kira-



Gambar 6.12. Mengatur titik kerja dengan voltase basis yang konstan

kira 0.7V. Karena voltase basis tidak berubah jauh dan resistivitas dari resistor basis besar, maka perubahan arus dari resistor basis kecil dan bisa diabaikan. Kekurangan dari rangkaian seperti ini adalah karena adanya penguatan arus yang berbeda-beda untuk setiap transistor, maka resistivitas dari resistor basis harus diatur untuk setiap masing-masing rangkaian. Penguatan arus h_{FE} naik kira-kira 1% per derajat kenaikan suhu.

Kalau titik kerja diatur dengan voltase pada basis (regulasi voltase), arus kolektor tidak tergantung dari penguatan arus h_{FE} , tetapi tergantung secara peka dari V_{BE} yang tergantung suhu dan dari g_f . Kalau titik kerja diatur dengan cara mengatur arus basis, arus kolektor tidak tergantung dari V_{BE} dan dari g_f , tetapi tergantung dari faktor penguatan arus h_{FE} , yang berubah untuk setiap transistor. Yang diperlukan sebenarnya adalah satu cara yang tidak lagi tergantung dari suhu transistor dan dari variasi antara transistor-transistor dengan jenis yang sama. Salah satu cara yang memenuhi dua syarat ini untuk mengatur titik kerja akan dibicarakan dalam pasal berikut.

6.2.5.3. Mengatur Titik Kerja dengan memakai Umpan Balik dari Resistor Emitor

Rangkaian yang dipakai seperti terlihat dalam gambar 6.13. dimana potensial pada basis diatur dengan pembagi tegangan R1 dan R2, berarti terdapat potensial ϕ_{Basis} tertentu pada basis transistor. Karena ini merupakan regulasi voltase, maka arus kolektor tidak akan tergantung dari penguatan arus h_{FE} . Supaya arus kolektor juga tidak tergantung dari V_{BE} dan g_f satu resistor R_E dipasang pada emitor. Resistivitas dari resistor R_E dipilih sehingga voltase V_{RE} pada resistor ini jauh lebih besar daripada perubahan voltase basis-emitor ketika suhu berubah dan dengan transistor yang berbeda-beda. Maka voltase basis-emitor V_{BE} bisa dianggap konstan dibanding dengan V_{RE} . Dengan V_{BE} sebesar kira-kira 0.7V terdapat voltase pada resistor emitor sebesar $\phi_{Basis} - V_{BE}$ dan besarnya hampir konstan, maka arus yang mengalir dalam resistor emitor akan hampir konstan juga. Arus emitor yang kira-kira sama besar dengan arus kolektor akan sebesar:

$$I_C \approx I_E = \frac{V_{RE}}{R_E} = \frac{\phi_{Basis} - 0.7V}{R_E} \quad (6.26)$$

Fungsi dari rangkaian ini bisa dimengerti sbb.: Kalau seandainya arus kolektor naik, maka arus emitor akan ikut naik dan voltase pada resistor emitor R_E akan naik juga sehingga potensial pada emitor naik. Dan karena potensial pada basis tetap konstan, maka voltase basis-emitor akan turun. Turunnya voltase basis-emitor akan mengakibatkan arus kolektor turun. Jadi kalau arus kolektor naik, terdapat satu mekanisme yang akan menyebabkan arus kolektor turun kembali. Mekanisme seperti ini disebut *feedback* negatif⁶. Karena adanya *feedback* negatif ini, maka perubahan dalam rangkaian, misalnya potensial basis bertambah, hampir tidak menghasilkan perubahan pada arus kolektor. *Feedback* negatif ini semakin kuat kalau resistivitas dari resistor emitor semakin tinggi. Dengan resistivitas tinggi, perubahan arus kecilpun sudah menghasilkan perubahan voltase yang besar ($\Delta V_{RE} = \Delta I_E \cdot R_E$).

⁶ *feedback*: maknakan kembali, berarti output dikembalikan kepada input

Untuk mengerti rangkaian ini lebih jelas, kita bisa memandang rangkaian dari jalur basis – emitor–resistor emitor. Rangkaian ini merupakan rangkaian seri seperti yang diperlihatkan dalam gambar 6.14.. Untuk perubahan voltase yang kecil sambungan antara basis dan emitor transistor bisa digantikan oleh resistor dengan resistivitas sebesar resistivitas diferensial antara basis dan emitor. Tetapi resistivitas diferensial yang harus dipakai disini bukan resistivitas basis emitor r_{BE} , karena resistivitas r_{BE} merupakan hubungan antara voltase basis-emitor dengan arus basis. Tetapi dalam rangkaian ini kita ingin mengerti hubungan antara voltase basis-emitor dengan arus emitor yang mengalir dalam resistor emitor. Sebab itu sambungan basis-emitor disini digantikan dengan resistivitas diferensial emitor r_E yang menunjukkan hubungan antara arus emitor, i_E , dengan voltase basis-emitor v_{BE} . Perlu diperhatikan bahwa rangkaian pengganti ini tidak benar kalau menghitung sifat inputnya yang dilihat dari basis, tetapi benar untuk sifat transistor jika dilihat dari sisi emitor. r_E terdapat sbb.:

$$r_E = \frac{\partial V_{BE}}{\partial I_C} = \frac{1}{g_f} = \frac{V_T}{I_C} \approx \frac{1V}{40 \cdot I_C} \quad (6.27)$$

Kalau misalnya terdapat arus kolektor sebesar 1mA, maka terdapat resistivitas emitor sebesar:

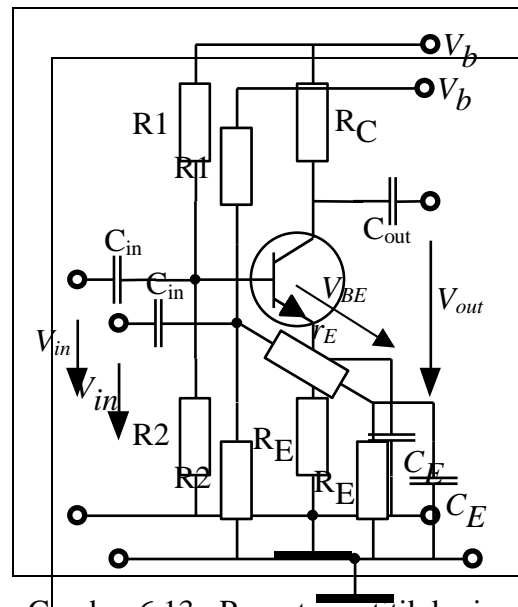
$$r_E = \frac{1}{g_f} = \frac{1}{40 \cdot \frac{1}{V} \cdot 1mA} = 25\Omega$$

Dengan arus kolektor (\approx arus emitor) sebesar 1mA dan voltase pada resistor emitor sebesar 0.7V, berarti resistivitas dari resistor emitor sebesar 700 Ω , dari sini terdapat perbandingan antara resistivitas dari resistor emitor dan resistivitas r_E sebesar 28. Ini berarti perubahan voltase antara basis dan GND sebesar ΔV_{in} akan menghasilkan perubahan voltase basis-emitor hanya sebesar $1/29 \cdot \Delta V_{in}$.

Jadi resistivitas dari resistor emitor bisa disebut besar, kalau menjadi besar dibandingkan dengan resistivitas r_E .

Biasanya resistor emitor cukup besar kalau voltase pada resistor emitor kira-kira sebesar voltase basis-emitor. Contoh: Arus basis sebesar 1mA, voltase basis emitor biasanya sekitar 0.7V, maka dengan resistivitas sebesar 700 Ω terdapat voltase pada resistor emitor yang sama besar dengan voltase basis-emitor dan resistivitas dari resistor emitor ini jauh lebih besar daripada resistivitas emitor (25 Ω).

Besar dari voltase basis-emitor pada daerah kerja transistor hampir konstan sebesar 0.7V. Dan voltase ini hanya berubah sedikit kalau arus kolektor berubah, juga hanya berubah sedikit kalau suhu transistor berubah. Maka besar resistivitas-resistivitas dari resistor R1, R2 dan R_E akan menentukan arus basis. Supaya pengaruh dari arus yang mengalir ke



Gambar 6.13.: Pengaturan titik kerja dengan Gambar 6.14 pada bagian ini transistor basis dan pengaruh perubahan voltase input sambungan dari basis ke emitor diganti dengan r_E .

dalam basis transistor kepada potensial pada basis bisa diabaikan, resistivitas dalam dari sumber voltase yang dibentuk oleh pembagi tegangan R1 dan R2 harus cukup kecil. Biasanya resistivitas dalam tersebut cukup kecil kalau arus yang mengalir dalam pembagi tegangan kira-kira 10 kali lipat lebih besar daripada arus basis.

Sebagai contoh kita hitung besarnya resistivitas yang diperlukan kalau terdapat satu transistor dengan penguatan arus kira-kira sebesar 100 dan diinginkan arus kolektor pada titik kerja sebesar 20mA. Voltase supply V_b sebesar 20V:

Supaya voltase pada resistor emitor kira-kira sebesar voltase basis-emitor, maka voltase V_{RE} pada resistor emitor R_E harus kira-kira sebesar 0.7V, maka terdapat resistivitas dari

resistor sebesar $R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{0.7V}{20mA} = 35\Omega$. Kalau arus kolektor sebesar 20mA, maka

dengan $h_{FE}=100$ terdapat arus basis sebesar 0.2mA, berarti arus dalam pembagi tegangan basis dibuat sebesar 2mA. Potensial pada basis, berarti voltase V_{R2} pada resistor R2 harus sebesar jumlah voltase basis dan voltase pada resistor emitor:

$V_{R2} = V_{RE} + V_{BE} = 0.7V + 0.7V = 1.4V$. Dengan data ini terdapat voltase pada R2

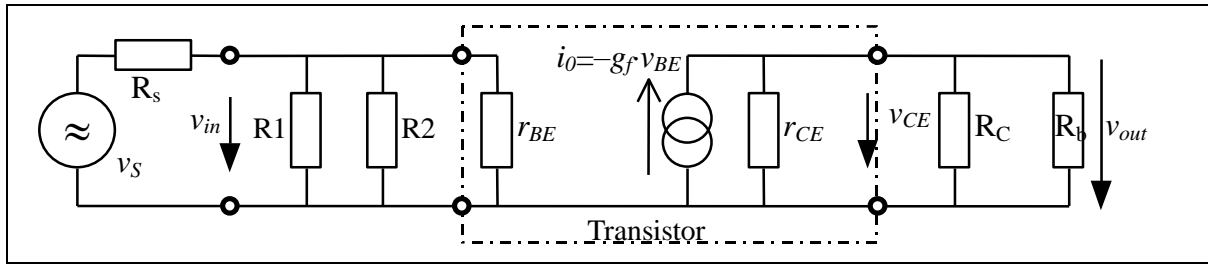
sebesar 1.4V dengan arus sebesar 2mA, maka terdapat resistivitas $R_2 = \frac{1.4V}{2mA} = 700\Omega$.

Dalam resistor R1 terdapat arus 2.2mA pada voltase $20V - 1.4V = 18.6V$, maka terdapat resistivitas sebesar $R_1 = \frac{18.6V}{2.2mA} = 8.45k\Omega$. Dalam penerapan rangkaian, dipakai nilai resistivitas dari deret norma⁷ yang paling dekat dengan nilai yang dihitung.

6.2.5.4. Kondensator untuk menyambungkan Isyarat AC

Di atas telah dijelaskan bahwa pada rangkaian pengaturan titik kerja yang memakai resistor emitor untuk menetapkan arus emitor, perubahan voltase pada basis hampir tidak menghasilkan perubahan arus kolektor. Tetapi kalau rangkaian ini memang mau dipakai sebagai penguat, maka justru perubahan arus kolektor oleh perubahan voltase basis menghasilkan penguatan yang dikehendaki. Sebab itu resistor emitor harus dihubungkan singkat untuk sinyal yang akan dikuatkan. Kalau sinyal yang akan dikuatkan merupakan sinyal AC, maka dengan memakai satu kondensator C_E pada emitor, paralel dengan resistor emitor, voltase bolak-balik dihubungkan singkat dari emitor langsung ke GND. Dalam gambar 6.13. dan gambar 6.14. kondensator tersebut telah digambarkan dalam skema rangkaian. Voltase DC yang mengatur titik kerja tidak akan dipengaruhi oleh kondensator C_E ini sehingga tetap terdapat titik kerja yang stabil sesuai dengan penjelasan di atas. Besar dari kapasitansi C_E yang diperlukan tergantung dari frekuensi yang akan dikuatkan. Kondensator C_E bersama dengan resistivitas emitor r_E dari transistor merupakan satu tapis lolos tinggi. Maka besar dari kapasitansi bisa dihitung dengan menggunakan frekuensi yang masih harus dikuatkan dan besar dari resistivitas emitor. (Perhitungan dengan persamaan untuk tapis lolos tinggi dan dengan memperhatikan faktor penguatan $|A|$ dan pergeseran fase yang dikehendaki pada

⁷ Resistor yang biasa dijual hanya mempunyai nilai resistivitas tertentu. Nilai resistivitas itu diatur dalam deret-deret norma E.



Gambar 6.15.: Rangkaian ekuivalen AC untuk penguat gambar 6.13..

frekuensi minimal.) Sebagai pedoman praktis untuk sinyal NF (batas rendah sekitar 30Hz) C_E bisa dipasang dengan kapasitansi sebesar

$$C_E \approx \frac{1}{200 \cdot r_e / \Omega} F = \frac{g_f}{200} F. \quad (6.28)$$

Kondensator pada input dalam rangkaian pada gambar 6.13. diperlukan untuk memisahkan voltase DC yang dipakai untuk mengatur titik kerja transistor dari sumber sinyal. Kalau kondensator ini tidak dipasang, maka resistivitas output dari sumber tegangan yang sinyalnya mau dikuatkan akan dirangkai paralel dengan R_2 sehingga voltase titik kerja akan berubah tergantung besar resistivitas pada output sumber sinyal. Mungkin juga sumber sinyal akan terganggu oleh voltase DC pada titik kerja dari rangkaian penguat. Sebab itu voltase DC pada titik kerja harus dipisahkan dari voltase DC pada output dari sumber sinyal. Dengan memakai kondensator C_{in} pada input rangkaian, voltase DC tidak bisa lewat, tetapi voltase AC bisa lewat. Kondensator C_{in} dengan resistivitas input r_{in} dari rangkaian penguat merupakan satu tapis lolos tinggi, maka dengan menggunakan frekuensi minimal yang harus bisa dikuatkan dan besar resistivitas input rangkaian, besar kapasitansi dari kondensator C_{in} bisa dihitung. Perhitungan resistivitas input dibicarakan dalam pasal berikut. Disini juga terdapat satu pedoman untuk pemakaian NF dengan rumus:

$$C_{in} \approx \frac{1}{200 \cdot r_{input} / \Omega} F \quad (6.29)$$

6.2.6. Impedansi Masukan dan Impedansi Keluaran

Dalam rangkaian ini input transistor (berarti hubungan basis emitor dari transistor) disambungkan dengan resistor-resistor pembagi tegangan R_1 dan R_2 . Untuk sinyal AC resistivitas-resistivitas diferensial dari semua komponen harus dihitung. Karena resistivitas diferensial dari sumber voltase V_b nol dan impedansi dari kondensator juga bisa dihitung nol untuk AC, maka terdapat rangkaian ekuivalen untuk sinyal kecil (rangkaiannya ekuivalen AC) seperti dalam gambar 6.15., di mana R_1 , R_2 dan resistivitas diferensial basis-emitor r_{BE} dari transistor dirangkai paralel. Sebagai contoh kita menghitung resistivitas input untuk rangkaian yang telah dibicarakan di atas dengan $R_1 = 8.45k\Omega$ dan $R_2 = 700\Omega$ pada arus kolektor sebesar 20mA. Penguatan arus dari transistor sebesar $h_{fe} = 200$, maka terdapat resistivitas basis-emitor dari persamaan (6.13):

$$r_{BE} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{200 \cdot 25\text{mV}}{20\text{mA}} = 250\Omega$$

Maka dari rangkaian paralel antara R1, R2 dan r_{BE} terdapat resistivitas input sebesar 180Ω .

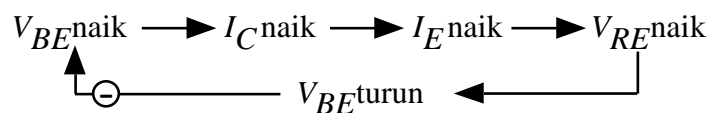
Keluaran dari rangkaian ini untuk sinyal AC sama dengan keluaran untuk rangkaian dalam gambar 6.7.. Resistivitas output terdapat dari rangkaian paralel antara r_{CE} dan R_C seperti telah dibicarakan dalam pasal 6.2.2.

Penguatan dari rangkaian ini juga sama dengan penguatan dari rangkaian dalam gambar 6.7. yang telah dibicarakan dalam pasal 6.2.2., hanya harus diperhatikan bahwa resistivitas input pada rangkaian dalam pasal ini berbeda.

6.3. Rangkaian-Rangkaian Penguat Transistor yang lain

6.3.1. *Rangkaian Penguat dengan Feedback Arus oleh Resistor Emitor

Kalau resistor emitor yang telah kita kenal untuk mengatur titik kerja tidak dihubung singkat untuk sinyal AC dengan memakai kondensator, maka *feedback* negatif dari resistor emitor itu juga berlaku untuk isyarat AC. Rangkaian yang terdapat seperti dalam gambar 6.16.. *Feedback* negatif berarti output dari rangkaian dibalikkan ke input sehingga input diperkecil. *Feedback* yang terjadi dalam rangkaian ini bisa diuraikan sbb.: Ketika voltase input V_{in} naik, berarti voltase basis-emitor naik, arus kolektor I_C naik dan dengan arus kolektor yang naik arus emitor I_E juga naik. Karena I_E naik, maka voltase pada resistor emitor V_{RE} naik juga. Karena V_{RE} naik, maka voltase basis-emitor V_{BE} turun. Karena V_{BE} turun, maka arus kolektor kembali turun. Jadi seluruhnya terdapat suatu hubungan lingkaran sebab-akibat yang mengurangi gerakan asli seperti diperlihatkan dalam gambar ini:



Penguatan yang didapatkan dari rangkaian ini bisa dihitung sbb.: Dari skema rangkaian gambar 6.16. dengan memakai hukum Kirchhoff mengenai voltase dilihat voltase input, v_{in} , adalah jumlah dari voltase pada resistor emitor, v_{RE} , dan voltase basis-emitor, v_{BE} :

$$v_{in} = v_{BE} + v_{RE} \tag{6.30}$$

Ketika v_{in} naik, baik v_{RE} maupun v_{BE} akan naik. Mengenai perbandingan voltase pada komponen-komponen sambungan basis-emitor, bisa digantikan dengan resistivitas diferensial antara basis dan emitor seperti yang telah dijelaskan dalam pasal “6.2.5.3. Mengatur Titik Kerja dengan memakai Umpan Balik dari Resistor Emitor” sehingga

terdapat skema rangkaian ekuivalen seperti dalam gambar 6.14.. Perbandingan antara voltase-voltase dalam rangkaian seri sama dengan perbandingan antara resistivitas-resistivitas, maka untuk hubungan antara v_{in} dan v_{RE} terdapat:

$$\frac{v_{in}}{v_{RE}} = \frac{r_E + R_E}{R_E} \underbrace{\approx}_{r_E \ll R_E} 1 \quad (6.31)$$

Di mana r_E adalah resistivitas emitor⁸ dalam transistor seperti yang dijelaskan dalam pasal “6.2.5.3. Mengatur Titik Kerja dengan memakai Umpan Balik dari Resistor Emitor”. Kalau resistivitas resistor emitor R_E jauh lebih besar dibanding resistivitas emitor dalam transistor r_E , maka r_E dalam (6.31) bisa diabaikan dan perubahan voltase input hampir sama dengan perubahan voltase pada resistor emitor:

$$v_{in} \approx v_{RE} \quad (v = \Delta V) \quad (6.32)$$

Dengan (6.32) ini, arus emitor yang besarnya hampir sama dengan arus kolektor akan terdapat dari perubahan voltase input:

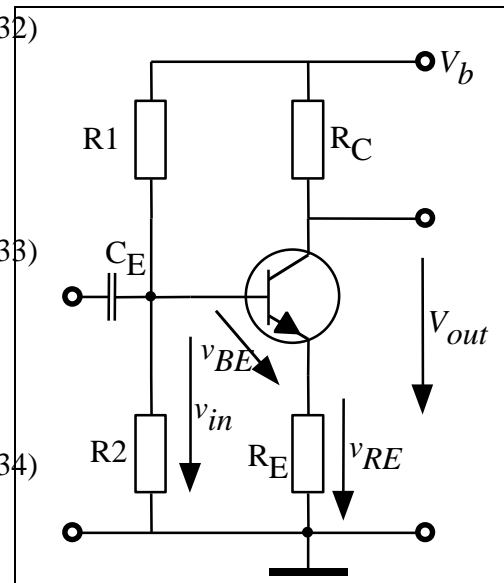
$$i_E = \frac{v_{RE}}{R_E} = \frac{v_{in}}{R_E} \Leftrightarrow v_{in} = R_E \cdot i_E = R_E \cdot i_C \quad (6.33)$$

Voltase output akan terdapat dari arus kolektor seperti yang biasanya terdapat pada rangkaian seperti ini:

$$v_{out} = -v_{RC} = -R_C \cdot i_C \quad (6.34)$$

Maka penguatan didapatkan sebesar:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-R_C \cdot i_C}{R_E \cdot i_C} = -\frac{R_C}{R_E} \quad (6.35)$$



Gambar 6.16.: Resistor emitor menghasilkan *feedback* negatif.

Pada persamaan (6.35) dilihat bahwa sifat transistor sama sekali tidak mempengaruhi penguatan dari rangkaian ini, tetapi yang menentukan penguatan rangkaian ini hanya perbandingan resistivitas dari dua resistor. Sebab itu linearitas dari penguatan rangkaian ini tidak lagi terganggu oleh ketidaklinieran dari sifat-sifat transistor. Tetapi penguatan yang bisa dicapai jauh lebih kecil daripada penguatan tanpa resistor emitor. Dalam rangkaian praktis perlu dicarikan suatu kompromi sesuai dengan tujuan rangkaian.

Kalau kita menghitung situasi ini dengan lebih rinci, akan terdapat suatu rumus untuk penguatan, yang mana baik resistivitas kolektor maupun resistivitas emitor dan *transconductance* rangkaian mempengaruhi hasil, di mana *transconductance* tidak linear. (*Transconductance* berubah dengan arus kolektor.)

Dalam perhitungan yang lebih teliti, baik perubahan voltase pada resistor emitor, v_{RE} , maupun perubahan voltase basis-emitor, v_{BE} , harus dihitung sesuai dengan (6.30).

⁸ Di sini resistivitas emitor dan bukan resistivitas basis-emitor yang menentukan sifat rangkaian, karena yang dibicarakan adalah arus emitor, bukan arus basis.

Perubahan voltase pada resistor emitor sesuai dengan hukum Ohm (arus kolektor dihitung sama dengan arus emitor):

$$v_{R_E} = R_E \cdot i_C \quad (6.36)$$

Hubungan antara arus kolektor dan voltase basis-emitor terdapat dari persamaan transistor:

$$i_C = g_f \cdot v_{BE} \Leftrightarrow v_{BE} = \frac{1}{g_f} \cdot i_C \quad (6.37)$$

Dengan mensubstitusikan (6.36) dan (6.37) dalam (6.30) terdapat hubungan antara perubahan arus kolektor i_C dan perubahan voltase input v_{in} :

$$\begin{aligned} v_{in} &= R_E \cdot i_C + \frac{1}{g_f} \cdot i_C = \left(R_E + \frac{1}{g_f} \right) \cdot i_C \\ \Leftrightarrow i_C &= \frac{v_{in}}{R_E + \frac{1}{g_f}} \end{aligned} \quad (6.38)$$

Perubahan voltase output terdapat dari perubahan voltase pada resistor emitor oleh perubahan arus kolektor, dan dari (6.38):

$$v_{out} = -v_{R_C} = -R_C \cdot i_C = -\frac{R_C}{R_E + \frac{1}{g_f}} \cdot v_{in} \quad (6.39)$$

Maka terdapat penguatan dari rangkaian ini:

$$|A| = \frac{|v_{out}|}{|v_{in}|} = \frac{R_C}{R_E + \frac{1}{g_f}} \quad (6.40)$$

Untuk resistivitas resistor emitor $R_E = 0$ terdapat hasil seperti yang telah dihitung tanpa resistor emitor. Untuk pendekatan resistivitas emitor yang jauh lebih besar daripada $\frac{1}{g_f}$ ($= r_E$) terdapat rumus pendekatan (6.35). Hasil (6.40) bisa juga diperoleh dari

(6.31) kalau tidak memakai pendekatan $r_E \ll R_E$ dan dengan memakai pengertian bahwa arus dalam resistor emitor bisa dihitung sama dengan arus dalam resistor kolektor sehingga perbandingan resistivitas dalam kedua resistor tersebut sama dengan perbandingan voltase:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_{in}}{v_{R_E}} &= \frac{r_E + R_E}{R_E} \\ \frac{v_{R_E}}{v_{R_C}} &= \frac{R_E}{R_C} \\ v_{R_C} &= -v_{out} \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{v_{R_C}}{v_{R_E}} \cdot \frac{v_{R_E}}{v_{in}} = \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{R_E}{r_E + R_E} = \frac{R_C}{r_E + R_E} \quad (6.41)$$

Dengan memasukkan besar dari $r_E \left(r_E = \frac{1}{g_f} \right)$ ke dalam (6.41) terdapat (6.40).

Pada input terdapat tiga cabang yang dirangkai paralel untuk rangkaian ekuivalen AC, yaitu resistor R1, resistor R2 dan rangkaian seri dari basis-emitor dengan resistor emitor. Rangkaian seri ini akan disebutkan r_{inB} , dimana indeks “inB” menunjukkan pada input yang masuk basis. Maka resistivitas input penguat ini terdapat dari rangkaian paralel ketiga resistivitas tsb. Untuk mendapatkan resistivitas r_{inB} pada input basis, hubungan antara v_{in} , yaitu voltase antara basis dan GND, dan arus i_B yang masuk ke dalam basis perlu dihitung.

Voltase v_{in} terdapat dari (6.30), di mana voltase basis-emitor terdapat dari resistivitas basis-emitor dan arus basis. Karena voltase resistor emitor terdapat dari arus emitor yang sama dengan arus kolektor dan resistivitas resistor emitor. Maka terdapat v_{in} :

$$\left. \begin{aligned} v_{BE} &= r_{BE} \cdot i_B \\ v_{R_E} &= R_E \cdot i_C = R_E \cdot h_{fe} \cdot i_B \\ v_{in} &= v_{BE} + v_{R_E} \end{aligned} \right\} \quad (6.42)$$

$$\Rightarrow v_{in} = (r_{BE} + R_E \cdot h_{fe}) \cdot i_B$$

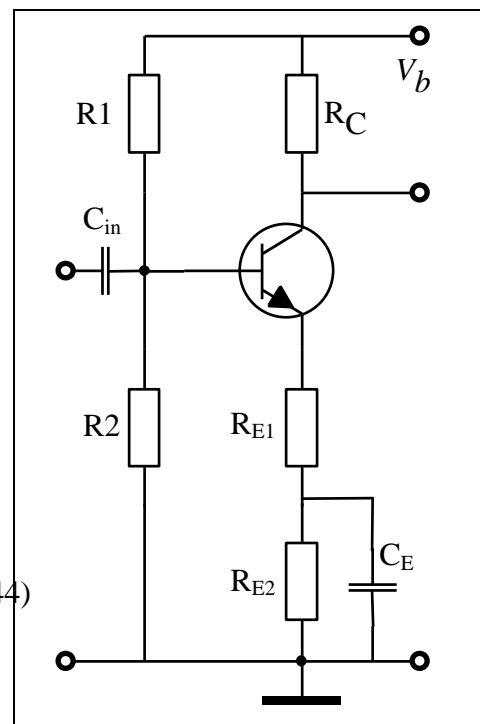
Dari (6.42) terdapat resistivitas input pada basis, r_{inB} , sebesar:

$$r_{inB} = \frac{v_{in}}{i_B} = r_{BE} + R_E \cdot h_{fe} \quad (6.43)$$

Sering kali $R_E \cdot h_{fe}$ jauh lebih besar daripada r_{BE} sehingga hanya resistivitas dari resistor emitor dan penguatan arus yang menentukan resistivitas input dari rangkaian ini. Dengan menambahkan resistor emitor untuk umpan balik, resistivitas input dari rangkaian bertambah besar. Tetapi juga perlu diperhatikan bahwa resistivitas r_{inB} yang terdapat dari (6.43) masih dirangkai secara paralel dengan kedua resistor pembagi tegangan pada basis sehingga terdapat resistivitas input dari seluruh rangkaian sebesar:

$$\begin{aligned} r_{in} &= (r_{inB} \parallel R_1 \parallel R_2) \\ \Rightarrow \frac{1}{r_{in}} &= \frac{1}{r_{BE} + R_E \cdot h_{fe}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{aligned} \quad (6.44)$$

Fungsi dari resistor emitor dalam rangkaian umpan balik ini berbeda jauh dengan fungsi dari resistor emitor dalam rangkaian pengatur titik kerja. Kalau resistor emitor untuk mengatur titik kerja dipakai dengan satu kondensator yang dirangkai paralel dengan resistor emitor sehingga sinyal AC tidak lewat resistor emitor. Disini



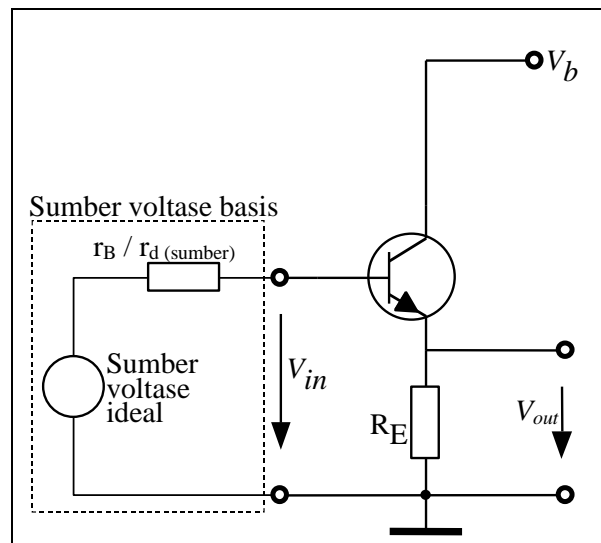
Gambar 6.17.: Resistor emitor untuk mengatur titik kerja dan resistor emitor yang dipakai untuk umpan balik sinyal AC bisa memiliki resistivitas yang berbeda.

kondensator tersebut tidak dipakai sehingga resistor emitor juga berfungsi untuk sinyal AC. Tetapi resistor emitor untuk umpan balik disini sekaligus juga merupakan resistor emitor untuk sinyal DC, berarti sekaligus menolong dalam mengatur titik kerja. Sering resistivitas resistor emitor yang dibutuhkan untuk mengatur titik kerja lebih besar daripada resistivitas resistor emitor yang mau dipakai untuk umpan balik pada sinyal AC. Dalam situasi seperti ini dua resistor, R_{E1} dan R_{E2} , bisa dirangkai secara seri dan salah satu resistivitas, misalnya R_{E2} dirangkai paralel dengan satu kondensator, maka untuk DC, kedua resistor dirangkai seri dan resistivitasnya berjumlah, sedangkan untuk AC hanya resistor yang tidak dirangkai paralel dengan kondensator yang akan berfungsi sebagai resistor emitor. Rangkaian yang didapatkan seperti dalam gambar 6.17.

6.3.2. Rangkaian pengikut emitor

Kalau dalam rangkaian pada gambar 6.16. resistor kolektor tidak dipakai, dan emitor dari transistor dipakai sebagai output, maka akan terdapat rangkaian pengikut emitor seperti dalam gambar 6.18.. Dalam rangkaian pengikut emitor sering pengaturan titik kerja bisa dilakukan secara otomatis oleh rangkaian input sehingga tidak perlu pembagi tegangan pada input rangkaian.

Dalam rangkaian ini output terdapat langsung pada resistor emitor, maka voltase output terdapat sebagai arus kolektor dikalikan dengan resistivitas resistor emitor. Fungsi dari rangkaian ini sama dengan rangkaian dengan resistor emitor untuk menghasilkan umpan balik seperti telah dibicarakan dalam pasal “6.3.1. *Rangkaian Penguat dengan *Feedback* Arus oleh Resistor Emitor”. Semua persamaan dari pasal tersebut tetap berlaku dalam rangkaian ini, hanya R_C harus diganti dengan R_E untuk menghitung voltase output dari arus kolektor. Disini voltase pada resistor emitor V_{RE} merupakan voltase output.



Gambar 6.18.: Pengikut emitor.

Kalau resistivitas dari resistor emitor jauh lebih besar daripada resistivitas emitor, maka perubahan voltase basis-emitor bisa diabaikan dibanding dengan perubahan voltase pada resistor emitor sehingga (6.32) berlaku dan penguatan dari rangkaian ini menjadi:

$$A = \frac{v_{R_E}}{v_{in}} \approx 1 \quad (6.45)$$

Dengan kata lain, hasil (6.45) terdapat dengan pendekatan bahwa voltase basis-emitor konstan sebesar $\approx 0.7V$, maka terdapat selisih antara V_{in} dan V_{out} yang konstan, berarti perubahan pada masukan akan sama dengan perubahan pada keluaran:

$$v_{in} = v_{out} \quad (6.46)$$

Jadi rangkaian ini menghasilkan penguatan voltase yang kira-kira sebesar 1. Kalau dihitung lebih teliti, penguatan sedikit di bawah 1 karena arus kolektor akan naik ketika V_{RE} naik, maka V_{BE} akan naik juga sehingga selisih antara V_{in} dan V_{RE} akan lebih besar. Hasil secara teliti terdapat dari (6.40), dan kalau R_C diganti dengan R_E maka akan terdapat:

$$|A| = \frac{|v_{out}|}{|v_{in}|} = \frac{R_E}{R_E + \frac{1}{g_f}} = \frac{R_E}{R_E + r_E} \quad (6.47)$$

Dalam (6.47) telah dipakai $\frac{1}{g_f} = r_E$. Dengan pendekatan $R_E \gg r_E$ terdapat (6.45).

Resistivitas input dari rangkaian ini sama dengan yang telah dihitung dalam (6.43). Disini r_{inB} sekaligus merupakan resistivitas input r_{in} dari rangkaian keseluruhan karena tidak ada resistor pembagi tegangan pada basis.

Untuk resistivitas output dari rangkaian ini, rangkaian dilihat dari keluarannya. Jika dilihat dari keluaran, resistor emitor dirangkai paralel dengan sambungan emitor. Yang berlaku pada sambungan emitor adalah resistivitas input dari emitor, r_{Ein} , yaitu hubungan antara perubahan arus emitor dengan perubahan voltase antara emitor dan GND. Resistivitas r_{Ein} ini berbeda dengan resistivitas emitor r_E dari transistor yang dipakai dalam pasal-pasal sebelumnya.

Definisi dari r_{Ein} adalah perubahan voltase antara emitor dan GND (misalnya voltase pada resistor emitor R_E), berarti ΔV dibagi dengan perubahan arus emitor ΔI_E :

$$r_{Ein} = \frac{\Delta V}{-\Delta I_E} \quad (6.48)$$

Voltase ΔV disini merupakan selisih antara perubahan voltase input pada basis ΔV_{in} dan perubahan voltase basis emitor ΔV_{BE} :

$$\Delta V = \Delta V_{in} - \Delta V_{BE} = -\Delta I_B r_B - \Delta V_{BE} \quad (6.49)$$

Di mana r_B adalah resistivitas untuk arus yang masuk ke dalam basis seperti misalnya resistivitas sumber tegangan dan resistor lain yang berhubungan dengan basis. Dalam gambar 6.18. sumber voltase yang menghasilkan V_{in} pada basis digambar dengan rangkaian ekuivalen Thévenin. Resistivitas pada basis r_B terdapat sebagai resistivitas dalam dari sumber tegangan pada basis.

Dengan persamaan untuk arus kolektor dan pendekatan bahwa arus kolektor hampir sama dengan arus emitor:

$$\Delta I_C = g_f \cdot \Delta V_{BE} \Leftrightarrow \Delta V_{BE} = \frac{\Delta I_C}{g_f} \approx \frac{\Delta I_E}{g_f} = r_E \cdot \Delta I_E \quad (6.50)$$

dan dengan definisi dari penguatan arus:

$$\Delta I_B = \frac{\Delta I_C}{h_{fe}} \approx \frac{\Delta I_E}{h_{fe}} \quad (6.51)$$

persamaan (6.49) menjadi

$$\Delta V = -\frac{\Delta I_E}{h_{fe}} r_B - \frac{\Delta I_E}{g_f} = -\Delta I_E \left(\frac{r_B}{h_{fe}} + \frac{1}{g_f} \right) \Leftrightarrow \frac{\Delta V}{-\Delta I_E} = \frac{r_B}{h_{fe}} + \frac{1}{g_f} \quad (6.52)$$

Kalau (6.52) dipakai dalam definisi (6.48) terdapat resistivitas input emitor:

$$r_{E_{in}} = \frac{r_B}{h_{fe}} + \frac{1}{g_f} = \frac{r_B}{h_{fe}} + r_E \quad (6.53)$$

Kalau $\frac{r_B}{h_{fe}}$ kecil dibandingkan dengan $\frac{1}{g_f}$, resistivitas emitor ini sebesar $\frac{1}{g_f} = r_E$ seperti telah didapatkan dalam persamaan (6.27) sebagai resistivitas emitor untuk transistor saja.

Contoh: Dalam rangkaian dengan arus kolektor sebesar 2mA terdapat

$$g_f = 40 \cdot I_C = 80 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \Rightarrow r_E \approx \frac{1}{g_f} \approx 12.5\Omega$$

Kalau resistivitas basis kecil (berarti kecil dibanding dengan $h_{fe} \cdot 12.5\Omega \approx 1.25\text{k}\Omega \dots 3.75\text{k}\Omega$), maka resistivitas emitor akan kecil sekali (dibandingkan dengan resistivitas lain yang biasanya dipakai dalam penguat) dan resistivitas emitor juga tidak banyak terpengaruh oleh resistivitas yang lain yang ada pada penguat. (Resistivitas pada basis memang akan mempengaruhi, tetapi akan dibagi dengan penguatan arus, berarti dibagi dengan $\approx 100 \dots 300$.)

Resistivitas output keseluruhan dari rangkaian pengikut emitor terdapat dari rangkaian paralel resistivitas input emitor $r_{E_{in}}$ dan resistivitas resistor emitor. Karena resistivitas input emitor kecil, maka resistivitas output dari rangkaian ini kecil juga.

$$r_{out} = \left(\frac{1}{g_f} + \frac{r_B}{h_{fe}} \right) \parallel R_E \quad (6.54)$$

Pada rangkaian ini resistivitas input (persamaan (6.43)) besar dan resistivitas output kecil. Sebab itu rangkaian ini juga disebut pengalih impedansi. Dengan rangkaian ini sebagai pengantara, satu beban yang memiliki resistivitas input yang kecil bisa disambungkan dengan satu sumber yang memiliki resistivitas output yang besar tanpa voltase berkurang.

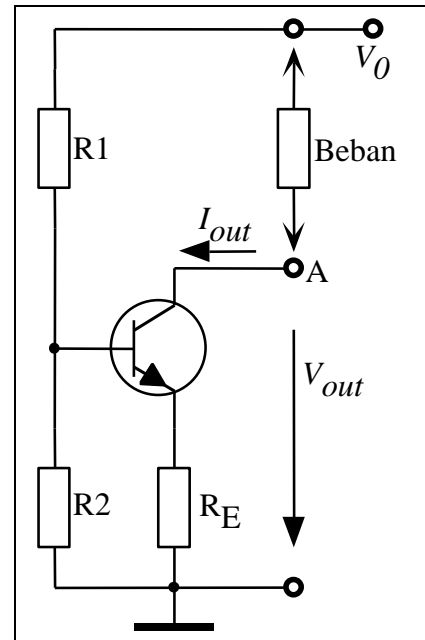
Atau dengan kata lain: Pada rangkaian ini diperlukan hanya arus input yang kecil (karena resistivitas input besar), tetapi arus output bisa menjadi besar (karena resistivitas output kecil). Memang tidak ada penguatan voltase, tetapi penguatan arus pada rangkaian ini besar.

Besar dari resistivitas input sangat tergantung dari besar penguatan arus h_{fe} seperti dilihat pada rumus (6.43). Kalau dibutuhkan resistivitas input yang besar, maka penguatan arus dari transistor harus besar. Untuk mendapatkan penguatan arus yang sangat besar rangkaian Darlington (pasal 6.3.4.) bisa dipakai.

Satu **contoh**: $I_C = 2\text{mA}$, $h_{fe} = 300$, $R_E = 3\text{k}\Omega$, dan resistivitas pada basis sebesar $40\text{k}\Omega$ terdapat resistivitas output sebesar 140Ω dan resistivitas input sebesar $904\text{k}\Omega$.

6.3.3. Rangkaian Sumber Arus Konstan

Rangkaian dalam gambar 6.19. merupakan satu sumber arus konstan. Dalam rangkaian ini kolektor dari transistor merupakan output rangkaian. Dilihat dari titik "A" terdapat rangkaian seri dengan sambungan kolektor-emitor dan resistor R_E . Kita telah belajar bahwa resistivitas transistor antara kolektor dan emitor, yaitu r_{CE} , besar. Resistivitas kolektor-emitor ini dirangkai seri dengan resistor emitor, tetapi dalam rangkaian ini resistivitas emitor tidak hanya merupakan tambahan yang berjumlah dengan resistivitas tersebut, tetapi dalam rangkaian ini terdapat umpan balik melalui resistor emitor R_E yang akan memperbesar resistivitas efektif yang terdapat sebagai hasil dari resistor emitor. Ketika potensial pada kolektor naik, arus kolektor naik sesuai dengan hukum Ohm pada resistivitas kolektor-emitor r_{CE} , maka arus emitor ikut naik dan voltase pada resistor emitor akan naik juga sehingga voltase basis-emitor turun dan menghasilkan penurunan arus kolektor. Berarti gangguan terhadap satu keadaan stabil (arus kolektor tertentu diganggu sehingga naik) menghasilkan satu proses yang mengurangi gangguan tersebut (arus kolektor dikurangi). Hal seperti ini disebut sebagai *feedback* (umpan balik) negatif. Karena *feedback* ini, perubahan arus kolektor akan berkurang jauh. Perubahan arus akan berkurang pada perubahan voltase yang sama, berarti resistivitas output dari rangkaian menjadi lebih besar. Resistivitas output akan jauh lebih besar daripada jumlah dari resistivitas kolektor-emitor r_{CE} dan resistivitas resistor emitor R_E saja.



Gambar 6.19.: Rangkaian sumber arus untuk arus yang mengalir **ke dalam** suatu titik (A) yang bisa memiliki potensial yang berbeda-beda.

Besar resistivitas output dari rangkaian ini bisa dihitung dengan persamaan dasar untuk transistor dan hukum-hukum Kirchhoff. Dari hukum-hukum Kirchhoff terdapat persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{(a): } dI_{out} &= dI_C; & \text{(b): } dV_{CE} &\approx -dV_{out}; \\
 \text{(c): } dI_E &= dI_C + dI_B; \\
 \text{(d): } dV_{BE} &= -dI_B(R_1 \parallel R_2) - dI_E R_E
 \end{aligned}
 \tag{6.55}$$

Dengan (6.55) dan kedua persamaan dasar untuk transistor (6.3) dan (6.12) resistivitas output dari rangkaian ini bisa dihitung sbb.:

Dari (6.55) (d) perubahan voltase basis emitor yang didapatkan sebagai akibat dari perubahan arus emitor dan arus basis diketahui. Perubahan arus emitor menghasilkan perubahan voltase pada resistor emitor. Kalau arus basis berubah, maka voltase keluaran dari pembagi tegangan yang dibentuk oleh resistor R_1 dan R_2 berubah sesuai dengan

resistivitas dalam dari sumber tegangan ini. Resistivitas dalam dari rangkaian seri ini telah dihitung sebagai resistivitas dari rangkaian paralel kedua resistor ini. Voltase keluaran dari pembagi tegangan tersebut adalah jumlah dari voltase basis-emitor dan voltase pada resistor emitor:

$$dV_{out \text{ pembagi tegangan}} = dI_B \cdot (R_1 \parallel R_2) = dV_{BE} + dV_{R_E} \quad (6.56)$$

Jadi dari (6.56) terdapat (6.55) (d).

Untuk mendapatkan hubungan antara perubahan voltase basis-emitor dV_{BE} terhadap perubahan arus kolektor dI_C , pertama (6.55) (c) dimasukkan ke dalam (6.55) (d), sehingga:

$$dV_{BE} = -dI_B(R_1 \parallel R_2) - (dI_C + dI_B)R_E \quad (6.57)$$

Pada sisi kanan dalam (6.57) selain dI_C masih terdapat perubahan dari arus basis dI_B . Perubahan ini berhubungan dengan perubahan dari voltase basis-emitor melalui persamaan dasar transistor (6.3):

$$r_{BE} = \frac{dV_{BE}}{dI_B} \Leftrightarrow dI_B = \frac{dV_{BE}}{r_{BE}} \quad (6.58)$$

(6.58) dalam (6.57) menghasilkan:

$$dV_{BE} = -\frac{dV_{BE}}{r_{BE}}(R_1 \parallel R_2) - \left(dI_C + \frac{dV_{BE}}{r_{BE}}\right)R_E \Leftrightarrow dV_{BE} = \frac{R_E}{1 + \frac{(R_1 \parallel R_2)}{r_{BE}} + \frac{R_E}{r_{BE}}} dI_C \quad (6.59)$$

Persamaan dasar untuk transistor (6.12):

$$\Delta I_C = g_f \cdot \Delta V_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot \Delta V_{CE}$$

bisa ditulis dengan besaran diferensial:

$$dI_C = g_f \cdot dV_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \cdot dV_{CE} \quad (6.60)$$

Kemudian (6.59) dimasukkan ke dalam (6.60):

$$dI_C = g_f \cdot \frac{R_E}{1 + \frac{(R_1 \parallel R_2)}{r_{BE}} + \frac{R_E}{r_{BE}}} dI_C + \frac{1}{r_{CE}} \cdot dV_{CE} \quad (6.61)$$

Dengan $g_f = \frac{\beta}{r_{BE}}$ dalam (6.61) dan dengan (6.55) (a) dan (b) terdapat:

$$r_{out} = -\frac{dV_{out}}{dI_{out}} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} = r_{CE} \left[1 + \frac{\beta R_E}{(R_1 \parallel R_2) + r_{BE} + R_E} \right] \quad (6.62)$$

Kalau resistivitas dari $(R_1 \parallel R_2)$ kecil dibandingkan dengan r_{BE} , maka terdapat:

Untuk $R_E = 0$:

$r_{out} = r_{CE}$, yaitu resistivitas output dari transistor saja.

Untuk $R_E \ll r_{BE}$:

$r_{out} = r_{CE} + r_{CE} \cdot g_f \cdot R_E = r_{CE} + \mu R_E$, berarti resistivitas output naik linear dengan resistivitas emitor ketika resistivitas emitor masih jauh lebih kecil dibanding dengan resistivitas basis-emitor dari transistor.

Untuk $R_E \gg r_{BE}$:

$r_{out} = r_{CE}(1 + \beta) \approx \beta \cdot r_{CE}$, berarti terdapat batas maksimal untuk resistivitas output yang mana resistivitas output tidak lagi naik ketika resistivitas emitor naik.

Supaya resistivitas pada basis ($R_1 \parallel R_2$) kecil, resistor R2 bisa digantikan dengan dioda atau dioda Zener. Memakai dioda atau dioda Zener juga mengurangi ketergantungan potensial basis dari perubahan voltase supply. Karena potensial basis lebih stabil, maka arus output akan lebih stabil juga..

Contoh untuk memilih besar resistivitas dari resistor-resistor:

Terdapat voltase supply sebesar $V^+ = 15V$, arus yang diperlukan sebesar 2mA. Voltase pada resistor emitor bisa dipilih sebesar 5V, maka terdapat resistivitas untuk resistor emitor sebesar $R_E = 2.5k\Omega$. Pembagi tegangan pada basis dipilih sehingga jangan terlalu mengurangi resistivitas output. Sebab itu diminta $(R_1 \parallel R_2) \approx r_{BE}$. Dengan transistor yang memiliki voltase Early sebesar 100V dan penguatan arus sebesar $\beta=300$ terdapat:

$$R_1 \parallel R_2 \approx r_{BE} = \frac{\beta}{g_f} = \beta \frac{V_T}{I_C} = 300 \cdot \frac{25mV}{2mA} = 3.75k\Omega$$

Dengan arus emitor $I_C = 2mA$ dan Voltase Early tersebut terdapat $r_{CE} = 50k\Omega$, maka terdapat resistivitas output sesuai dengan (6.62) sebesar:

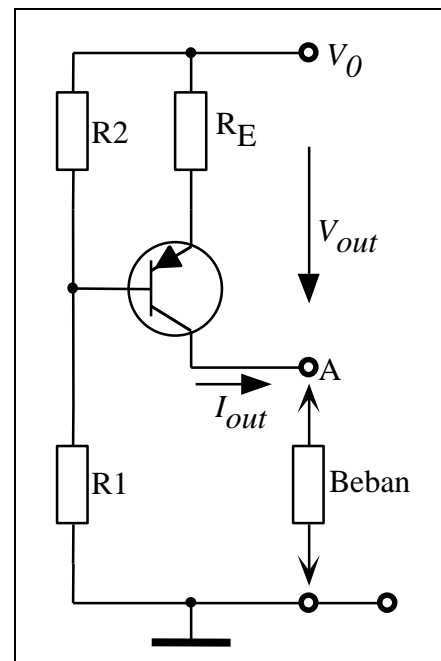
$$r_{out} = 50k\Omega \left[1 + \frac{300 \cdot 2.5k\Omega}{3750\Omega + 3750\Omega + 2.5k\Omega} \right] = 3.8M\Omega$$

Berarti ketika voltase output berubah sejauh 5V, arus hanya berubah sejauh $1.3\mu A$.

Besar resistivitas untuk resistor-resistor pembagi tegangan basis (R_1 dan R_2) terdapat dari jumlah voltase pada resistor emitor sebesar 5V dan voltase basis emitor sebesar 0.7V, maka voltase pada R_2 harus sebesar $V_{R2} = 5.7V$ dan voltase pada R_1 sebesar $V_{R1} = 15V - 5.7V = 9.3V$. Resistivitas kedua resistor dirangkai paralel sebesar 3750Ω , maka terdapat:

$$R_1 = 9868.4\Omega; \quad R_2 = 6048.4\Omega$$

Jelas, rangkaian ini bisa berfungsi hanya dalam daerah aktif transistor, berarti ketika arus kolektor dan voltase kolektor-emitor tidak mencapai titik jenuh. Jadi rangkaian ini bisa berfungsi dari voltase output sebesar voltase pada resistor emitor ditambah



Gambar 6.20.: Rangkaian sumber arus untuk arus yang mengalir **ke luar** dari titik (A) yang bisa memiliki potensial yang berbeda-beda.

≈0.4V sampai voltase supply.

Sumber arus yang sesuai dengan rangkaian dalam gambar 6.19. merupakan satu sumber arus yang mana arus konstan mengalir **ke dalam** suatu titik rangkaian (titik A) yang bisa memiliki potensial yang berbeda-beda. Kalau suatu sumber arus dibutuhkan dengan arus yang mengalir **ke luar** dari suatu titik rangkaian yang bisa memiliki potensial yang berbeda-beda, rangkaian yang sama bisa dipakai, hanya transistor npn perlu diganti dengan transistor pnp dan semua voltase dibalikkan. Terdapat rangkaian seperti dalam gambar 6.20..

6.3.4. Rangkaian Darlington

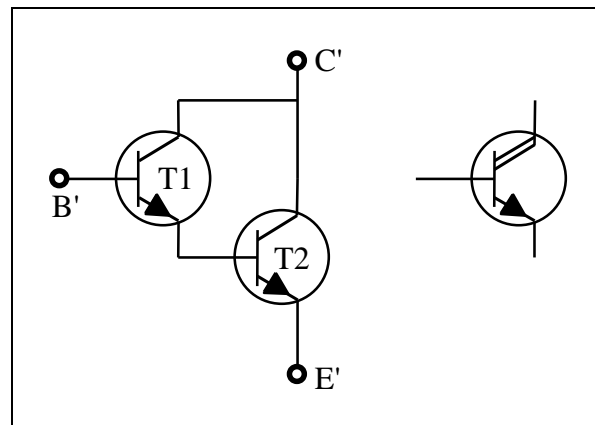
Dalam rangkaian Darlington dua transistor disambungkan seperti sebelah kiri dalam gambar 6.21.. Emitor dari satu transistor T1 disambungkan dengan basis dari transistor kedua (T2). Kolektor dari kedua transistor disambungkan. Secara keseluruhan terdapat rangkaian yang berfungsi seperti satu transistor pengganti. Kolektor dari kedua transistor merupakan kolektor C' dari transistor pengganti, basis dari transistor T1 menjadi basis B' dari transistor pengganti dan emitor dari T2 menjadi emitor E' dari transistor pengganti. Lambang untuk rangkaian Darlington bisa digambarkan seperti sebelah kanan dalam gambar 6.21.. Terdapat juga transistor Darlington yang sudah dimasukkan ke dalam satu kemasan dan yang mempunyai hanya tiga sambungan. Transistor itu bisa dipakai seperti satu transistor biasa dengan beberapa sifat khusus sbb. Dalam rangkaian Darlington seluruh arus emitor dari T1 masuk ke dalam basis dari T2. Sebab itu penguatan arus seluruhnya terdapat dari penguatan arus transistor pertama dikalikan penguatan arus transistor kedua:

$$\begin{aligned} I_{C1} &= h_{fe1} \cdot I_{B1} \\ I_{C2} &= h_{fe2} \cdot I_{B2} = h_{fe2} \cdot I_{C1} = h_{fe2} \cdot h_{fe1} \cdot I_{B1} \\ \Rightarrow I_{C'} &= h_{fe2} \cdot h_{fe1} \cdot I_{B'} \end{aligned} \tag{6.63}$$

Dalam perhitungan penguatan arus seluruhnya $h_{fe} = h_{fe1} \cdot h_{fe2}$, harus diperhatikan bahwa untuk arus yang kecil sekali (di bawah 0.5mA) penguatan arus dari kebanyakan transistor menjadi kecil. Arus dalam transistor pertama dalam rangkaian Darlington bisa menjadi kecil sekali.

Data lain dari transistor pengganti (transistor Darlington) bisa dihitung dari data transistor masing-masing. Sebagai hasil dari perhitungan ini, terdapat:

$$\text{Penguatan arus} : h_{fe} = h_{fe2} \cdot h_{fe1}$$



Gambar 6.21.: Rangkaian Darlington dengan transistor npn dan lambangnya dalam skema rangkaian.

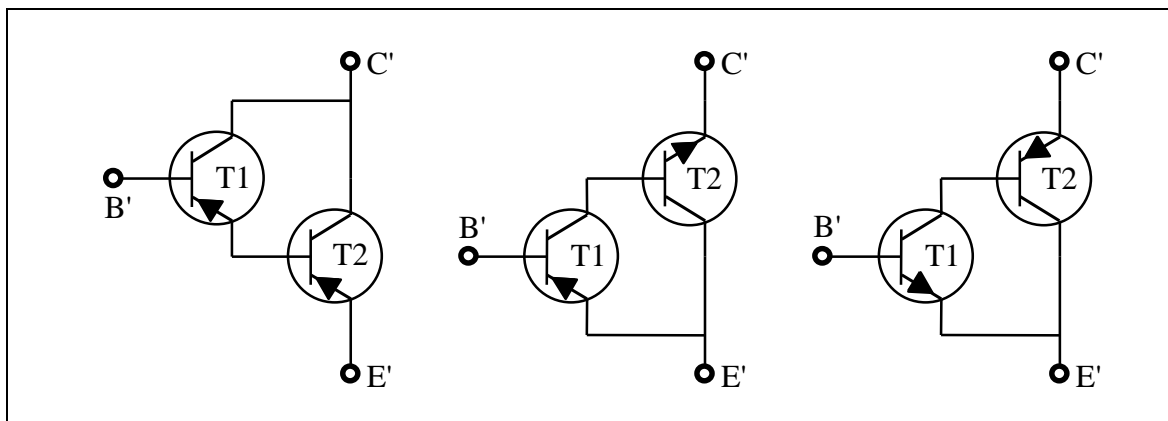
$$\text{Resistivitas masuk} : r_{B'E'} = 2r_{BE1} = 2h_{fe} \frac{V_T}{I_{C'}}$$

$$\text{kemiringan} : g_f = \frac{I_{C'}}{2V_T}$$

$$\text{resistivitas keluaran} : r_{C'E'} = \frac{2}{3}r_{CE2}$$

Dari data ini dilihat bahwa kelebihan dari rangkaian transistor Darlington adalah pada penguatan arus yang bisa menjadi sangat besar. Data lain tidak jauh berbeda daripada data yang didapatkan dari satu transistor, tetapi ada juga data yang sedikit lebih buruk pada transistor Darlington. (Resistivitas kolektor-emitor dan kemiringan lebih kecil.)

Rangkaian Darlington bisa dirangkai dengan transistor npn maupun dengan transistor pnp. Dengan transistor pnp terdapat rangkaian seperti sebelah kiri dalam gambar 6.22.. Sedangkan rangkaian seperti di tengah dan di sebelah kanan dalam gambar 6.22. disebut rangkaian Darlington komplementer. Yang di tengah mempunyai sifat seperti transistor pnp, yang di sebelah kanan seperti transistor npn. Penguatan arus sama dengan rangkaian Darlington, tetapi data yang lainnya berbeda. Perbedaan yang paling menonjol adalah voltase basis-emitor yang $\approx 1.4V$ pada rangkaian Darlington, tetapi hanya $\approx 0.7V$ pada rangkaian Darlington komplementer.



Gambar 6.22.: Rangkaian Darlington dengan transistor pnp (kiri) dan rangkaian Darlington komplementer dengan transistor pnp (tengah) dan transistor npn (kanan) sebagai transistor pertama.

7. Transistor sebagai sakelar

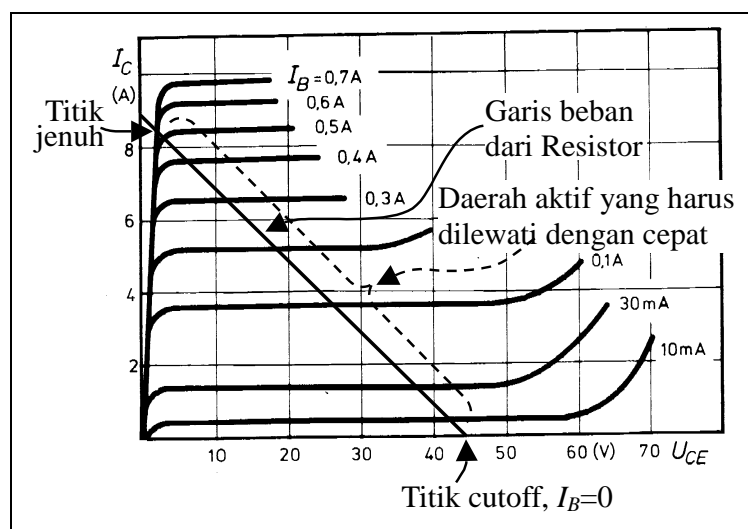
Setelah menempuh materi ini mahasiswa mampu menjelaskan dan menganalisa transistor pada rangkaian transistor sebagai saklar.

7.1. Fungsi sebagai Sakelar

Satu sakelar adalah suatu alat dengan dua sambungan dan bisa memiliki dua keadaan, yaitu keadaan on dan keadaan off. Keadaan off / tutup merupakan suatu keadaan di mana tidak ada arus yang mengalir. Keadaan on / buka merupakan satu keadaan yang mana arus bisa mengalir dengan bebas atau dengan kata lain (secara ideal) tidak ada resistivitas dan besar voltase pada sakelar sama dengan nol.

Dari grafik rangkaian seri transistor dengan resistor, yaitu grafik output transistor (grafik I_C terhadap V_{CE}) dengan grafik resistor beban seperti diperlihatkan dalam gambar 7.1. dilihat bahwa transistor bisa memiliki sifat sakelar tersebut. Ketika arus basis nol, tidak ada arus kolektor, berarti transistor tutup. Titik itu juga disebut transistor dalam keadaan putus atau “*cutoff*” dan merupakan sakelar terbuka. Kalau arus basis bertambah besar, arus kolektor bertambah besar sampai garis beban memotong garis output (I_C terhadap V_{CE}) terakhir. Pada titik itu arus kolektor tidak bisa bertambah lagi walaupun arus basis naik terus. Titik itu disebut titik kejenuhan atau titik jenuh (*saturation point*). Kalau arus basis lebih besar daripada yang diperlukan untuk mencapai titik jenuh atau saturasi, dikatakan transistor dalam keadaan “*over saturation*” atau saturasi berlebihan. Dalam keadaan saturasi dan *over saturation* voltase kolektor-emitor kecil ($\approx 0.2-0.3V$), berarti dalam situasi ini transistor merupakan (sedikitnya mendekati) sakelar tertutup.

Kalau transistor dipakai hanya pada dua titik tersebut (titik putus dan titik saturasi atau saturasi berlebihan), berarti transistor dipakai sebagai sakelar. Daya yang diserap oleh transistor pada dua titik ini kecil (bahkan nol pada titik putus), tetapi dalam keadaan aktif daya yang diserap transistor lebih besar. Sebab itu dalam banyak pemakaian yang mana arus besar, harus diusahakan supaya daerah aktif dilewati dalam waktu yang singkat supaya transistor tidak menjadi terlalu panas. Agar transistor dalam keadaan jenuh atau jenuh berlebihan, arus basis harus minimal sebesar arus



Gambar 7.1.: Grafik output dari transistor, keadaan cutoff dan keadaan jenuh.

kolektor maksimal dibagi dengan penguatan arus h_{FE} dari transistor.

$$I_B \geq \frac{I_{C_{maks}}}{h_{FE}} \quad (7.1)$$

Arus kolektor maksimal terdapat dari voltase supply dibagi dengan resistivitas dari resistor kolektor ini, berarti arus kolektor maksimal adalah arus yang paling besar yang bisa mengalir ketika voltase kolektor-emitor nol.

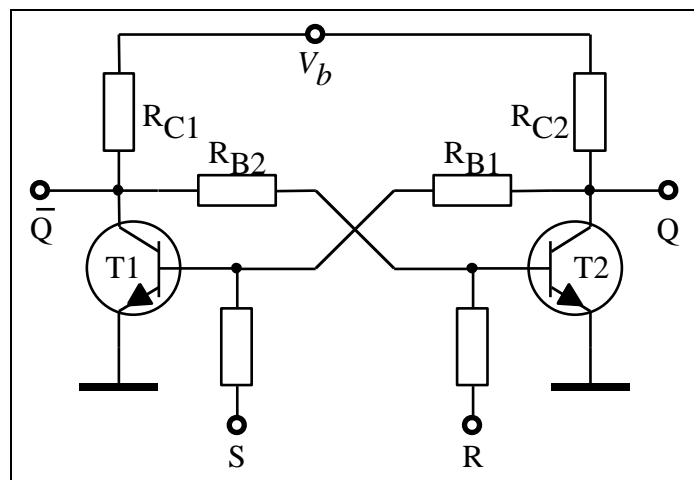
$$I_{C_{maks}} = \frac{V_b}{R_C}$$

Satu contoh di mana transistor dipakai sebagai sakelar adalah dalam rangkaian elektronika digital. Dalam elektronika digital biasanya hanya terdapat dua keadaan, yaitu voltase ada dan voltase nol atau dengan kata lain hanya terdapat keadaan **on** dan keadaan **off**.

7.2. Contoh Rangkaian Digital

7.2.1. Flip-Flop RS

Satu contoh untuk rangkaian digital di mana transistor dipakai sebagai sakelar adalah satu flip-flop RS. flip-flop ini memiliki dua masukan dan dua keluaran. Kedua keluaran selalu memiliki keadaan yang terbalik: Jika pada keluaran pertama terdapat voltase kira-kira sebesar voltase supply V_b maka pada keluaran kedua terdapat voltase sebesar nol atau keadaan sebaliknya, berarti nol pada keluaran pertama dan V_b pada keluaran kedua. Keadaan flip-flop ini bisa dialihkan dari satu keadaan ke



Gambar 7.2.: Flip-flop RS

keadaan yang lain dengan memberikan voltase kepada salah satu masukan selama waktu yang singkat. Kalau masukan yang lain tidak diberi voltase, keluaran tidak akan berubah keadaannya. Skema rangkaian seperti dalam gambar 7. Penjelasan fungsi sbb..

Misalnya T2 sedang dalam keadaan terbuka, maka voltase pada kolektornya (hampir) nol, berarti voltase basis-emitor dari T1 nol juga (karena basis dari T1 berhubungan dengan kolektor T2 dengan resistor R_{B1}), maka T1 tutup dan voltase kolektor-emitornya sebesar V_b sehingga transistor T2 yang basisnya tersambung dengan kolektor T1 melalui R_{B2} mendapatkan voltase dan arus pada basis sehingga T2 terus buka. Dalam keadaan ini output Q nol dan output \bar{Q} mempunyai voltase sebesar voltase supply.

Kalau ada satu sinyal positif (voltase supply misalnya) yang disambungkan pada input S, maka basis dari transistor T1 mendapatkan voltase positif sehingga keadaan beralih dari tertutup menjadi terbuka sehingga potensial pada kolektornya menjadi nol. Kalau potensial pada kolektor T1 nol, potensial pada basis T2 akan nol juga dan T2 akan langsung berubah dari terbuka menjadi tertutup, maka potensial pada kolektor T2 menjadi besar dan basis dari T1 mendapatkan voltase. Q menjadi positif dan \bar{Q} menjadi nol. Kalau voltase pada input S tidak lagi ada, keadaan ini tidak akan berubah, karena basis T1 sudah mendapatkan arus masuk dari potensial tinggi pada kolektor T2 yang tertutup. Baru ketika terdapat voltase positif pada input R, keadaan dari flip-flop ini akan beralih lagi sehingga Q menjadi nol dan \bar{Q} menjadi positif. Jadi dengan satu sinyal pada masukan S atau R keadaan flip-flop ini bisa dialihkan dari satu keadaan ke dalam keadaan yang lain. Sinyal tersebut tidak dibutuhkan untuk waktu yang lama, tetapi cukup terdapat sinyal selama waktu yang singkat saja. Masukan S adalah masukan “Set” dan masukan R adalah masukan “Reset”. Dengan sinyal pada “Set”, Q menjadi positif dan \bar{Q} akan menjadi nol. Dengan satu sinyal pada “Reset” keluaran akan terbalik.

Rangkaian ini juga disebut flip-flop bistabil (*bistable flip-flop*) karena rangkaian ini bisa memiliki dua keadaan stabil.

Supaya rangkaian ini berfungsi dengan baik, resistivitas dari resistor R_C dan R_B harus memiliki nilai tertentu sehingga arus basis pada masing-masing transistor bisa cukup besar sehingga transistor yang sedang buka berada dalam keadaan jenuh. Untuk membatasi arus kolektor, resistivitas dari R_C harus cukup supaya transistor yang sedang dalam keadaan buka tidak rusak.

Misalnya kita tahu dari data Transistor bahwa penguatan arus transistor sebesar 100 ... 200, arus kolektor mau diatur pada 1mA dan voltase supply sebesar $V_b = 5V$. Maka resistivitas kolektor akan dipilih sebesar $R_C = \frac{5V}{1mA} = 5k\Omega$. Arus basis harus minimal

sebesar $I_B = \frac{I_C}{h_{FE \min}} = \frac{1mA}{100} = 10\mu A$. Jadi resistivitas dari resistor basis didapatkan

sbb: $R_B + R_C = \frac{V_b}{I_B} = \frac{5V}{10\mu A} = 500k\Omega \Rightarrow R_B \leq 500k\Omega - 5k\Omega = 495k\Omega \approx 470k\Omega$. Nilai

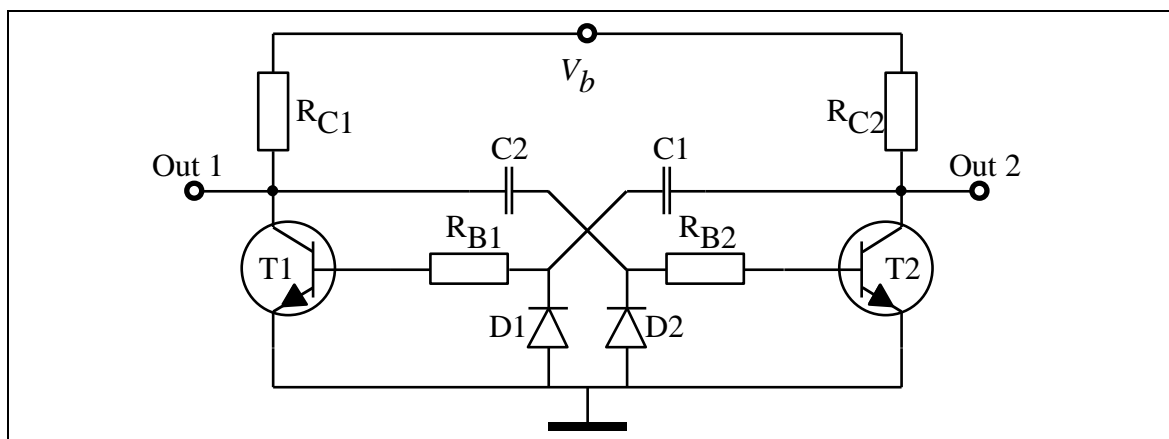
resistivitas yang akan dipasang dipilih dari deret standar, maka akan dipasang $R_C = 4.7k\Omega$ dan $R_B = 470k\Omega$. Kalau rangkaian ini mau dibebani dengan arus beban pada keluaran, maka perlu diperhatikan bahwa potensial pada keluaran akan turun, maka resistivitas dari resistor kolektor, R_C , atau / dan resistivitas dari resistor basis, R_B , perlu diperkecil.

7.2.2. Multivibrator

Satu contoh lain untuk rangkaian digital adalah flip-flop astabil atau flip-flop takstabil atau Multivibrator. Salah satu contoh rangkaian untuk membuat flip-flop ini diperlihatkan dalam gambar 7.3.. Ketika T2 sedang tertutup dan kondensator C1 masih kosong, basis dari T1 dapat arus dari kolektor T2 melalui R_{B1} dan C1 sehingga T1 buka. Karena T1 buka, maka potensial pada kolektor T1 (hampir) nol dan basis T2 yang tersambung dengan kolektor T1 melalui C2 dan R_{B2} akan nol juga, maka T2 akan tetap tutup. Dioda D1 dibias balik sehingga tidak mempengaruhi rangkaian. Tetapi arus basis yang masuk T1 harus melalui kondensator C1 sehingga kondensator ini akan terisi dan menimbulkan voltase positif di sebelah kanan, negatif di sebelah kiri, maka arus yang masuk basis T1 akan semakin berkurang dan setelah beberapa selang waktu T1 akan mulai tutup. Ketika T1 mulai tutup, arusnya berkurang sehingga voltase pada resistor kolektornya berkurang dan voltase kolektor-emitor dari T1 mulai naik, maka basis T2 akan mendapatkan arus basis dari kolektor T1 melalui C2 dan R_{B2} , maka T2 akan mulai buka, potensial pada kolektornya turun membuat T1 semakin tutup. Berarti terdapat feedback (umpan balik) positif. Karena feedback positif ini, proses T1 tutup dan T2 buka akan berlangsung dengan cepat. Ketika T1 tutup dan T2 buka, arus mengalir dari kolektor T1 melalui C2 dan R_{B2} ke basis T2, maka kondensator C2 akan terisi dan ketika voltase pada C2 cukup besar, arus tersebut tidak lagi bisa mengalir sehingga T2 akan buka dan T1 tutup.

C1 telah diisi ketika T2 tertutup sehingga terdapat voltase positif di sebelah kanan. Kalau C1 masih penuh ketika T1 seharusnya mulai membuka, berarti masih terdapat voltase pada C1 yang menghindari aliran arus dari kolektor T2 ke basis T1. Sebab itu dipasang kedua dioda D1 dan D2. Selama T1 tutup dan T2 buka, voltase pada C1 akan menghasilkan arus dari sisi kanan dari C1 melalui T2 dan D1 ke sisi kiri dari C1 sehingga C1 akan kosong dan kemudian, ketika T2 mulai tutup lagi, arus bisa mengalir dari kolektor T2 ke basis T1 dan proses tadi bisa mulai dari awal. Dioda D2 mempunyai fungsi yang sama untuk kondensator C2. Proses pengalihan ini akan berlangsung terus menerus sehingga pada kedua output terdapat voltase persegi.

Berapa lama T1 buka ditentukan oleh besarnya R_{B1} dan C1, dan berapa lama T2 buka ditentukan oleh besarnya R_{B2} dan C2. Perhatikan juga pentingnya dua dioda dalam rangkaian tersebut.



Gambar 7.3.: Multivibrator

DAFTAR PUSTAKA

- Arizal, Y d. 2016. "Elektronika Dasar I." *Jakarta: Kencana.*
- Basri, Irma Yulia, and Dedy Irfan. 2018. "Komponen Elektronika."
- Bisman, P. 2003. "Rancangan Kapasitansi Meter Digital."
- Dewantara, Dewi. "TEORI DASAR AMPLIFIER."
- Elyakim Nova Supriyedi Patty, Liefson Jacobus, Agustina Purnami Setiawi, Bhujangga Ayu Putu Priyudahari, Muhammad Lintang cahyo Buono, Melkianus Sulus, Lalu Busyairi Muhsin. 2023. *PENGANTAR SAINS DAN TEKNOLOGI*. Pertama. ed. M.Si. Surjawirawan Dwiputranto, S.Si. Mataram: PT. Rajawali Media Utama.
- Fiqry, Rizalul, Ariswan Ariswan, and Heru Kuswanto. 2017. "Struktur Kristal Dan Komposisi Kimia Semikonduktor Cd (Se0, 6Te0, 4) Hasil Preparasi Dengan Metode Bridgman." *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 2(1): 75–82.
- Husain, Saddang, Rizal Ahdiyati Duyo, and Zahir Zainuddin. 2023. "ANALISIS PEMANFAATAN WIRELESS ENERGY TRANSFER TERHADAP TRANSMISI DAYA LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN PRINSIP RESONANSI ELEKTRO MAGNETIK." *VERTEX ELEKTRO* 15(1): 1–8.
- Jacobus, Liefson, Emerita Setyowati, Elyakim Nova Supriyedi Patty, and Febrianto Bokol. 2023. "Desain Sistem Pompa Air Tenaga Surya." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13(01): 1–8.
- Kuswanto, Hery. 2010. "Alat Ukur Listrik Ac (Arus, Tegangan, Daya) Dengan Port Paralel."
- Laksono, Jeremi Dwiiki Fajar, Erwan Eko Prasetyo, and Gaguk Marausna. 2022. "ANALISIS EFEKTIVITAS KINERJA PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK DENGAN PHOTOVOLTAIC 200 WP." *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine* 8(1): 17–28.
- Listiyarini, Ratih. 2018. *Dasar Listrik Dan Elektronika*. Deepublish.
- Mismail, Budiono. 2011a. 1 *Dasar Teknik Elektro Jilid 1: Rangkaian Listrik*. Universitas Brawijaya Press.
- . 2011b. *Dasar Teknik Elektro Jilid 2: Elektronika*. Universitas Brawijaya Press.
- Muda, Imam. 2013. *Elektronika Dasar*. Gunung Samudera [PT Book Mart Indonesia].
- Musyahar, Ghoni, and Isnan Lutfi Mubarak. 2017. "MODIFIKASI SEPEDA LISTRIK MENJADI SEPEDA LISTRIK HYBRID PADA SUPLAI ENERGI LISTRIK." *Cahaya Bagaskara: Jurnal Ilmiah Teknik Elektronika* 1(1): 1–10.
- Pertiwi, Sinta, Debora Natalia Sudjito, and Ferdy Samuel Rondonuwu. 2019. "Perancangan Pembelajaran Fisika Tentang Rangkaian Seri Dan Paralel Untuk

Resistor Menggunakan Understanding by Design (UbD).” *Jurnal Sains dan Edukasi Sains* 2(1): 1–7.

Ponto, Hantje. 2018. *Dasar Teknik Listrik*. Deepublish.

Priyono, Tri Ongko Priyono. “Matakuliah Elektronika Daya.”

Purba, Arlina, Samaria Situmorang, Eva Simatupang, and Angelia Purba. 2023. “PENGUNAAN MODUL MULTISIM DALAM MENINGKATKAN KETERAMPILAN LISTRIK KEPADA SISWA SMP DI KOMPLEK BEKALA ASRI MEDAN.” *PASSA: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat dan Desa*: 6–10.

Riyadi, Ellam, Agung Warsito, and Mochammad Facta. 2011. “Pembuatan Soft Starting Dan Dynamic Braking Pada Motor Induksi 1 Fasa $\frac{1}{2}$ Hp Dengan Kapasitor Berbasis Mikrokontroler AT89S51.” Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip.

Rosman, Andi, Risdiana Risdiana, Eva Yuliani, and Vovi Vovi. 2020. “KARAKTERISTIK ARUS DAN TEGANGAN PADA RANGKAIAN SERI DAN RANGKAIAN PARALEL DENGAN MENGGUNAKAN RESISTOR.” *d’ComPutarE: Jurnal Ilmiah Information Technology* 9(2): 40–43.

Savitri, Astrid. 2019. *Revolusi Industri 4.0: Mengubah Tantangan Menjadi Peluang Di Era Disrupsi 4.0*. Penerbit Genesis.

Setiyo, Muji, and others. 2017. *Listrik & Elektronika Dasar Otomotif: Basic Automotive Electricity & Electronics*. Unimma Press.

Sudirham, Sudaryatno. 2002. “Analisis Rangkaian Listrik.” *Bandung: Penerbit ITB*.

Sujana, Atep. 2014. *Dasar-Dasar IPA: Konsep Dan Aplikasinya*. UPI Press.

Surjono, Herman Dwi. 2011. *Elektronika: Teori Dan Penerapan*. Cerdas Ulet Kreatif Publisher.

Susanta, Gatut, and Sasi Agustoni. 2007. *Kiat Hemat Bayar Listrik*. Niaga Swadaya.

Syafriani, Syafriani. 1999. “Energi Elektrostatis Dari Sistem Muatan Dan Dielektrik.”

Tasiam, F J. 2017. “Proteksi Sistem Tenaga Listrik.”

Traska Permana, Sentha, Wahoje Rahardjo, Ir Suprapdi, and others. 2014. “PERANCANGAN LISTRIK TANPA KABEL MENGGUNAKAN METODE RESONANT COUPLING MAGNETIC.” Universitas Muhammadiyah Surabaya.

Wahyudi, Udik. 2018. *Mahir Dan Terampil Belajar Elektronika Untuk Pemula*. Deepublish.

Zuhal, Prof. 2004. *Prinsip Dasar Elektroteknik*. Gramedia Pustaka Utama.

PROFIL PENULIS



Liefson Jacobus, S.Si., M.Sc. lahir di Dame, 25 Desember 1973. Menyelesaikan studi S1 dan mendapatkan gelar S.Si di Universitas Kristen Imanuel (UKRIM) Yogyakarta pada tahun 2001 dan mendapatkan gelar M.Sc. pada tahun 2013 di Universitas Gajah Mada Yogyakarta. Bekerja di UKRIM Yogyakarta sebagai dosen Fisika. Pernah menjabat sebagai kepala Laboratorium Fisika Dasar, Kepala Laboratorium Elektronika Dasar, Wakil Dekan III Fakultas MIPA UKRIM. Saat ini menjabat sebagai Warek Bidang Kemahasiswaan dan Alumni UKRIM Yogyakarta. E-mail liefson@ukrimuniversity.ac.id



Elyakim Nova Supriyedi Patty, S.Si., M.Pd. lahir di Mataram 5 November 1985. Menyelesaikan studi S1 dan mendapatkan gelar S.Si di Universitas Kristen Imanuel (UKRIM) Yogyakarta pada tahun 2009 dan mendapatkan gelar M.Pd. pada tahun 2011 di Universitas Sarjanawiyata Taman Siswa Yogyakarta. Bekerja di STKIP Weetebula sebagai dosen Fisika ber-NIDN dan memegang jabatan Sekertaris LPM Hingga tahun 2020. Saat ini aktif sebagai Peneliti dan Dosen tetap di program studi Pendidikan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Bumigora Mataram. E-mail elyakim@universitasbumigora.ac.id

ELEKTRONIKA DASAR



Liefson Jacobus, S.Si., M.Sc. lahir di Dame, 25 Desember 1973. Menyelesaikan studi S1 dan mendapatkan gelar S.Si di Universitas Kristen Imanuel (UKRIM) Yogyakarta pada tahun 2001 dan mendapatkan gelar M.Sc. pada tahun 2013 di Universitas Gajah Mada Yogyakarta. Bekerja di UKRIM Yogyakarta sebagai dosen Fisika. Pernah menjabat sebagai kepala Laboratorium Fisika Dasar, Kepala Laboratorium Elektronika Dasar, Wakil Dekan III Fakultas MIPA UKRIM. Saat ini menjabat sebagai Warek Bidang Kemahasiswaan dan Alumni UKRIM Yogyakarta. E-mail liefson@ukrimuniversity.ac.id



Elyakim Nova Supriyedi Patty, S.Si., M.Pd. lahir di Mataram 5 November 1985. Menyelesaikan studi S1 dan mendapatkan gelar S.Si di Universitas Kristen Imanuel (UKRIM) Yogyakarta pada tahun 2009 dan mendapatkan gelar M.Pd. pada tahun 2011 di Universitas Sarjanawiyata Taman Siswa Yogyakarta. Bekerja di STKIP Weetebula sebagai dosen Fisika ber-NIDN dan memegang jabatan Sekertaris LPM Hingga tahun 2020. Saat ini aktif sebagai Peneliti dan Dosen tetap di program studi Pendidikan Teknologi Informasi, Fakultas Tehnik Universitas Bumigora Mataram. E-mail elyakim@universitasbumigora.ac.id