

LAPORAN PENELITIAN
PENELITIAN SKIM PEJABAT



**IMPLEMENTASI LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTRONIKA DASAR
BERBASIS PERANGKAT LUNAK APLIKASI *PSPICE***

Disusun oleh :

Dr. Muchlas, M.T.
Nuryono Satya Widodo, S.T., M. Engg.

Program Studi Teknik Elektro
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN
Desember, 2018

PENELITIAN INI DILAKSANAKAN ATAS BIAYA
ANGGARAN PENDAPATAN DAN BELANJA UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN
NOMOR KONTRAK : PJB-030/SP3/LPPM-UAD/VII/2018

PENELITIAN SKIM PEJABAT
TAHUN AKADEMIK 2018/2019

Judul Penelitian : Implementasi Laboratorium Virtual
Elektronika Dasar Berbasis
Perangkat Lunak Aplikasi PSPICE

Rumpun Ilmu : Teknik Elektro
Butir RIP : Perangkat Lunak Untuk Pendidikan
TSE Penelitian : Pengajaran dan Pembelajaran Berbasis
Komputer

Ketua Peneliti :
a. Nama Lengkap dan Gelar : Dr. Muchlas. M.T.
b. NIP : 19620218 198702 1001
c. Fakultas/Program Studi : Fakultas Teknologi Industri/Teknik Elektro
d. Pendidikan Terakhir : S3
e. Jabatan Akademik : Lektor Kepala
f. No. HP/Alamat Email : 08122731451/ muchlas.te@uad.ac.id

Anggota Peneliti :
a. Nama Lengkap dan Gelar : Nuryono Satya Widodo, S.T., M. Eng.
b. Fakultas/Program Studi : Fakultas Teknologi Industri/Teknik Elektro
c. No. HP/Alamat Email : 081392232952/nuryono.te@uad.ac.id

Lokasi Penelitian : Laboratorium Teknik Elektro UAD
Lama Penelitian : 6 bulan

Biaya Keseluruhan Penelitian : Rp. 50.000.000,- (lima puluh juta rupiah)
Tahun Pertama : Rp. 50.000.000,- (lima puluh juta rupiah)
Tahun Kedua : -

Yogyakarta, Desember 2018

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknologi Industri,

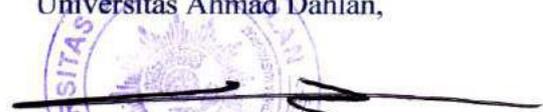
Sunardi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 60010313

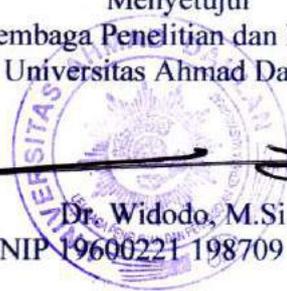


Ketua Peneliti,


Dr. Muchlas, M.T.
NIP 19620218 198702 1001

Menyetujui
Kepala Lembaga Penelitian dan Pengembangan
Universitas Ahmad Dahlan,


Dr. Widodo, M.Si.
NIP 19600221 198709 1001



SURAT PERNYATAAN TELAH REVISI

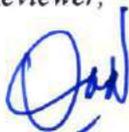
Dengan surat ini kami menyatakan bahwa penelitian :

1. Judul penelitian : Implementasi Laboratorium Virtual Elektronik Dasar Berbasis Perangkat Lunak Aplikasi PSPICE
2. Ketua Peneliti :
 - a. Nama Lengkap dan Gelar : Dr. Muchlas, M.T.
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. Pangkat dan Golongan : Pembina Tingkat I/IV B
 - d. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
 - e. Fakultas/Jurusan : Fakultas Teknologi Industri/Teknik Elektro
 - f. Alamat : Jalan Gedongan Baru II/9, RT 07, Banguntapan Bantul, D.I. Yogyakarta
 - g. Nomor Telepon/HP : 08122731451
 - h. E-mail : muchlas.te@uad.ac.id
3. Jumlah Anggota Peneliti : 1
 - a. Nama Anggota Peneliti 1 : Nuryono Satya Widodo, S.T., M. Eng.
 - b. Nama Anggota Peneliti 2 : -
4. Lama Penelitian : 6 Bulan
5. Biaya yang diperlukan :
 - a. Sumber UAD : Rp 50.000.000,-
 - b. Sumber Lain : Rp -Jumlah : Rp 50.000.000,-

Telah direvisi sesuai dengan masukan dan petunjuk yang disampaikan *reviewer*.

Mengetahui :

Reviewer,



Dr. Abdul Fadlil, M.T.
NIY 60960140

Yogyakarta, Desember 2018

Peneliti,



Dr. Muchlas, M.T.
NIP19620218 198702 1001

KATA PENGANTAR

Kegiatan praktik di laboratorium dapat menumbuhkan keterampilan yang dibutuhkan oleh dunia usaha dan dunia industri di era sekarang ini, seperti keterampilan dalam kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan pengaturan waktu. Keterbatasan peralatan real di laboratorium dan adanya kebutuhan akan perangkat praktik yang fleksibel, efisien dan efektif di lingkungan program studi teknik elektro, telah menginspirasi dilakukannya penelitian ini. Melalui penelitian pengembangan ini telah dihasilkan perangkat pembelajaran yang valid berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah untuk mendukung 8 tema praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual.

Pada kesempatan ini, peneliti mengucapkan terimakasih atas bantuan yang telah diberikan, kepada: (1) Rektor Universitas Ahmad Dahlan (UAD) yang telah menyediakan dana penelitian; (2) Kepala Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM UAD) atas rekomendasi yang diberikan; dan (3) bapak Dr. Abdul Fadlil, M.T. atas kesediannya melakukan *review* terhadap naskah penelitian ini. Semoga Allah Swt memberikan imbalan pahala yang berlipat ganda terhadap bantuan yang telah diberikan.

Disadari sepenuhnya bahwa penelitian ini masih belum sempurna, untuk itu saran dari semua pihak sangat dinanti kedatangannya. Akhirnya peneliti berharap hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam usaha-usaha peningkatan kualitas pendidikan teknik di Indonesia.

Yogyakarta, Desember 2018

Peneliti

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Lembar Identitas dan Pengesahan	ii
Surat Pernyataan Telah Revisi	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vii
Daftar Gambar	viii
Abstrak	xii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Pengembangan	5
D. Spesifikasi Produk yang Diharapkan	5
E. Pentingnya Pengembangan	7
F. Asumsi dan Keterbatasan Pengembangan	7
G. Definisi Istilah	8
BAB II. LANDASAN TEORI	9
A. Kajian Teori	9
1. Pengisian dan Pengosongan Kapasitor	9
2. Rangkaian RC	19
3. Karakteristik Diode	41
4. Rangkaian Pembentuk Gelombang	54
5. Rangkaian Penyearah	64
6. Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan	79
7. Karakteristik Transistor	87
8. Amplifier <i>Common Emitter</i>	100
9. Laboratorium Virtual	111
B. Kajian Penelitian Terdahulu	121
C. Kerangka Berpikir Pengembangan	124
D. Pertanyaan Penelitian	125

BAB III. METODE PENGEMBANGAN	126
A. Model Pengembangan	126
B. Prosedur Pengembangan	127
C. Uji Coba Produk	141
BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	142
A. Produk Penelitian	142
B. Analisis Data	143
1. Uji Kinerja Rangkaian Pengisian dan Pengosongan Kapasitor	143
2. Uji Kinerja Rangkaian RC	146
3. Uji Kinerja Rangkaian Karakterisasi Diode	152
4. Uji Kinerja Rangkaian Pembentuk Gelombang	153
5. Uji Kinerja Rangkaian Penyearah	155
6. Uji Kinerja Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan	166
7. Uji Kinerja Karakterisasi Transistor	169
8. Uji Kinerja Rangkaian Amplifier <i>Common Emitter</i>	171
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	173
1. Kesimpulan	173
2. Saran	173
DAFTAR PUSTAKA	175
LAMPIRAN-LAMPIRAN	178

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 1.	Spesifikasi laboratorium virtual Praktik Elektronik Dasar	6
Tabel 2.	Nilai tegangan dan arus pada pengisian kapasitor untuk $RC=1\text{ms}$	13
Tabel 3.	Nilai tegangan dan arus pada pengosongan kapasitor untuk $RC=1\text{ms}$	17
Tabel 4.	Data karakteristik diode berdasarkan persamaan (37)	42
Tabel 5.	Model diode menggunakan Pendekatan I	50
Tabel 6.	Model diode menggunakan Pendekatan II	51
Tabel 7.	Model diode menggunakan Pendekatan III	52
Tabel 8.	Contoh analisis rangkaian dengan model untuk rangkaian gambar 24	54
Tabel 9.	Polaritas arus dan tegangan transistor <i>common base</i> tipe pnp dan npn	91
Tabel 10.	Polaritas arus dan tegangan transistor <i>common emitter</i> tipe pnp dan npn	94
Tabel 11.	Perbedaan jenis laboratorium dalam mendukung tujuan pendidikan teknik	112
Tabel 12.	Kelebihan dan Kelemahan Jenis-jenis Laboratorium	113
Tabel 13.	Hubungan kemampuan PSPICE dengan kebutuhan praktik Elektronika Dasar	121
Tabel 14.	Nama rangkaian hasil eksplorasi pustaka sebagai bahan modul praktik	129
Tabel 15.	Nama <i>file</i> rangkaian hasil penelitian dalam format PSPICE	142
Tabel 16.	Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah setengah gelombang dengan beban ringan untuk $I_m=9,665\ \mu\text{A}$ dan $V_m=9,665\ \text{V}$	158
Tabel 17.	Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah gelombang penuh dengan beban ringan untuk $I_m=9,665\ \mu\text{A}$ dan $V_m=9,665\ \text{V}$	161
Tabel 18.	Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah jembatan dengan beban ringan ($R_L=10\ \text{M}\Omega$) untuk $I_m=0,9565\ \mu\text{A}$ dan $V_m=9,565\ \text{V}$	163

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 1.	Rangkaian RC pengisian kapasitor	10
Gambar 2.	Kurva tegangan kapasitor versus waktu selama pengisian muatan	14
Gambar 3.	Kurva arus kapasitor versus waktu selama pengisian muatan	14
Gambar 4.	Rangkaian RC Pengosongan Kapasitor	15
Gambar 5.	Kurva tegangan kapasitor versus waktu selama pengosongan muatan	18
Gambar 6.	Kurva arus kapasitor versus waktu selama pengosongan muatan	18
Gambar 7.	Rangkaian integrator RC pasif	19
Gambar 8.	Bentuk gelombang tegangan input dan output rangkaian integrator	21
Gambar 9.	Rangkaian diferensiator RC pasif	23
Gambar 10.	Bentuk gelombang tegangan input dan output rangkaian diferensiator	25
Gambar 11.	Rangkaian filter <i>low pass</i> (kiri) dan ekivalennya (kanan)	27
Gambar 12.	Grafik hubungan $A_V(\omega)$ terhadap ω	29
Gambar 13.	Respons amplitudo rangkaian filter <i>low pass</i> pasif	30
Gambar 14.	Respons fase rangkaian filter <i>low pass</i> pasif	35
Gambar 15.	Rangkaian filter <i>high pass</i> pasif (kiri) dan ekivalennya (kanan)	36
Gambar 16.	Respons amplitudo rangkaian filter <i>high pass</i> pasif	37
Gambar 17.	Respons Fase Rangkaian Filter <i>High Pass</i> Pasif	40
Gambar 18.	Karakteristik teoritik diode pertemuan PN	42
Gambar 19.	Karakteristik V-I diode real	43
Gambar 20.	Rangkaian dan karakteristik V-I diode untuk contoh analisis	45
Gambar 21.	Rangkaian ekivalen untuk asumsi: (a) $V_D=0$, dan (b) $I_D=0$	46
Gambar 22.	Analisis garis beban pada rangkaian diode	47
Gambar 23.	Penentuan resistansi dinamis pada Model Pendekatan III	53
Gambar 24.	Rangkaian untuk contoh analisis diode dengan model	53
Gambar 25.	Rangkaian <i>Clipper Seri</i> Negatif	55
Gambar 26.	Rangkaian <i>Clipper Seri</i> Positif	56
Gambar 27.	Rangkaian <i>Clipper Paralel</i> Negatif	57
Gambar 28.	Rangkaian <i>Clipper Paralel</i> Positif	58
Gambar 29.	Rangkaian <i>Clipper</i> Negatif Berprinsip	59
Gambar 30.	Rangkaian <i>Clipper</i> Positif Berprinsip	60
Gambar 31.	Rangkaian <i>Clipper</i> Kombinasi	61

Gambar 32.	Diode Zener: (a) Rangkaian asli; (b) karakteristik V-I; dan (c) rangkaian ekuivalen	62
Gambar 33.	Rangkaian <i>Clipper</i> Diode Zener	63
Gambar 34.	Rangkaian <i>slicer</i>	64
Gambar 35.	Diagram blok rangkaian catu daya DC (<i>DC power supply</i>)	65
Gambar 36.	Rangkaian penyearah setengah gelombang	66
Gambar 37.	Nilai rata-rata bentuk setengah gelombang	67
Gambar 38.	Penyearah Gelombang Penuh: (a) skema rangkaian; (b) bentuk gelombang input dan output	73
Gambar 39.	Penyearah Jembatan: (a) skema rangkaian; (b) bentuk gelombang input dan output	76
Gambar 40.	Penyearah dengan filter C: (a) rangkaian; (b) bentuk gelombang output	77
Gambar 41.	Rangkaian <i>clamper</i> negatif	80
Gambar 42.	Rangkaian <i>clamper</i> positif	82
Gambar 43.	Rangkaian <i>clamper</i> negatif berprasikap	83
Gambar 44.	<i>Clamper</i> positif berprasikap: (a) rangkaian; (b) bentuk gelombang	84
Gambar 45.	Pengganda tegangan dua kali (<i>voltage doubler</i>)	85
Gambar 46.	Pengganda tegangan empat kali (<i>quadrupler</i>)	86
Gambar 47.	Simbol transistor BJT tipe npn (kiri) dan pnp (kanan)	87
Gambar 48.	Operasi transistor tipe pnp pada konfigurasi <i>common base</i>	88
Gambar 49.	Konfigurasi transistor <i>common base</i> : (a) rangkaian dengan input sumber AC; (b) rangkaian untuk analisis DC	90
Gambar 50.	Karakteristik transistor <i>common base</i> : (a) input; (b) output	91
Gambar 51.	Konfigurasi transistor <i>common emitter</i> tipe npn: (a) rangkaian dengan input sumber AC; (b) rangkaian untuk analisis DC	92
Gambar 52.	Karakteristik V-I transistor <i>common emitter</i> : (a) input; (b) output	94
Gambar 53.	Analisis garis beban pada rangkaian transistor <i>common emitter</i> : (a) rangkaian yang dianalisis; (b) proses analisis	96
Gambar 54.	Analisis garis beban untuk menentukan <i>gain</i> sinyal AC	99
Gambar 55.	Ilustrasi pemilihan titik operasi pada daerah aktif Melalui gambar 55 juga terlihat bahwa pada transistor dengan konfigurasi	100
Gambar 56.	Amplifier <i>common emitter</i>	101
Gambar 57.	Rangkaian untuk analisis perbandingan stabilisasi: (a) prasikap tetap; (b) prasikap pembagi tegangan dan prasikap emitor	101
Gambar 58.	Rangkaian ekuivalen amplifier <i>common emitter</i>	103

Gambar 59.	Hubungan antara β (h_{FE}) dengan I_c berdasarkan <i>datasheet</i> transistor 2N2222	107
Gambar 60.	Rangkaian amplifier hasil rancangan: (a) tanpa kapasitor <i>bypass</i> ; (b) terpasang kapasitor <i>bypass</i> dengan input arus AC sinyal kecil	109
Gambar 61.	Respons amplitudo penguat <i>common emitter</i> dilengkapi kapasitor <i>bypass</i>	111
Gambar 62.	Model konseptual laboratorium virtual Elektronika Dasar: (a) akses dokumen; (b) akses simulator PSPICE	126
Gambar 63.	Rangkaian pengisian dan pengosongan kapasitor dalam PSPICE	130
Gambar 64.	Rangkaian integrator dengan input <i>square</i> (kiri) dan sinus (kanan)	131
Gambar 65.	Parameter VPULSE	132
Gambar 66.	Rangkaian diferensiator dengan input input <i>square</i> (kiri) dan sinus (kanan)	133
Gambar 67.	Rangkaian filter <i>low pass</i> (kiri) dan filter <i>high pass</i> (kanan)	133
Gambar 68.	Rangkaian untuk karakterisasi diode: prasikap maju (kiri) dan prasikap mundur (kanan)	134
Gambar 69.	Rangkaian pembentuk gelombang dengan diode	135
Gambar 70.	Pengaturan pada komponen diode zener DbreakZ	136
Gambar 71.	Rangkaian penyearah yang dikembangkan dalam versi PSPICE	137
Gambar 72.	Rangkaian penjepit (<i>clammer</i>) dan pengganda tegangan (<i>voltage doubler</i> dan <i>voltage quadrupler</i>)	138
Gambar 73.	Rangkaian karakterisasi V-I transistor <i>common emitter</i>	139
Gambar 74.	Rangkaian amplifier <i>common emitter</i> hasil pengembangan	140
Gambar 75.	Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengisian kapasitor hasil eksperimen laboratorium virtual SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)	143
Gambar 76.	Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengosongan kapasitor hasil eksperimen laboratorium virtual SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)	145
Gambar 77.	Watak integrator dengan input gelombang kotak (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)	147
Gambar 78.	Watak integrator dengan masukan gelombang sinus (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)	147
Gambar 79.	Watak diferensiator dengan input gelombang kotak	148
Gambar 80.	Watak diferensiator dengan input gelombang sinus	149
Gambar 81.	Respons frekuensi filter <i>low pass</i> dan filter <i>high pass</i> hasil eksperimen dengan PSPICE	150
Gambar 82.	Hasil pengukuran karakteristik diode 1N4002 menggunakan PSPICE	152

Gambar 83.	Watak rangkaian pembentuk gelombang hasil eksperimen PSPICE	153
Gambar 84.	Rangkaian penyearah setengah gelombang untuk analisis: (a) tegangan dan (b) arus;	155
Gambar 85.	Bentuk gelombang tegangan pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban ringan	156
Gambar 86.	Bentuk gelombang arus output pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban ringan	157
Gambar 87.	Bentuk gelombang arus output pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban penuh	159
Gambar 88.	Bentuk gelombang tegangan pada penyearah gelombang penuh hasil eksperimen dengan PSPICE: (a) beban ringan, dan (b) beban penuh	160
Gambar 89.	Bentuk gelombang penyearah jembatan dengan beban ringan hasil eksperimen menggunakan PSPICE	162
Gambar 90.	Bentuk gelombang penyearah jembatan dengan beban penuh/berat hasil eksperimen menggunakan PSPICE	164
Gambar 91.	Bentuk gelombang tegangan rangkaian penyearah filter C Hasil eksperimen menggunakan PSPICE	165
Gambar 92.	Watak rangkaian penjepit hasil eksperimen menggunakan PSPICE dan hasil komputasi teoritik	166
Gambar 93.	Watak pengganda tegangan dua kali	167
Gambar 94.	Watak pengganda tegangan empat kali	168
Gambar 95.	Karakteristik transistor 2N2222 hasil eksperimen dengan PSPICE	169
Gambar 96.	Respons amplitudo amplifier <i>common emitter</i> untuk $V_i=1\text{mV}$: (a) tanpa kapasitor <i>bypass</i> ; (b) dilengkapi kapasitor <i>bypass</i>	171

ABSTRAK

IMPLEMENTASI LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTRONIKA DASAR BERBASIS PERANGKAT LUNAK APLIKASI *PSPICE*

Muchlas
Nuryono Satya Widodo

Saat ini ketersediaan modul-modul untuk mendukung praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual masih belum dapat memenuhi kebutuhan. Penelitian pengembangan ini ditujukan untuk menghasilkan perangkat pembelajaran yang layak dalam mendukung penyelenggaraan praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis program aplikasi *PSPICE*.

Penelitian ini menggunakan model pengembangan konseptual sebagai acuan untuk mengarahkan proses disain mencapai produk sesuai spesifikasi yang ditentukan. Kinerja produk diuji menggunakan evaluasi formatif *on going*. Untuk memperoleh informasi kinerja rangkaian atau kelayakan produk, dilakukan analisis perbandingan antara karakteristik yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan *PSPICE* terhadap watak teoritiknya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua modul yang dikembangkan dapat menampilkan karakteristik yang sama dengan watak teoritiknya, hal ini menunjukkan bahwa modul-modul tersebut memiliki kinerja yang sangat baik sehingga layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis *PSPICE*. Produk yang dihasilkan berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari *PSPICE* sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar yang meliputi topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan, Karakteristik Transistor, dan Rangkaian Amplifier Transistor. Setiap topik dilengkapi dengan panduan praktik dan panduan pengoperasian *PSPICE*.

Kata kunci: laboratorium virtual, elektronika dasar, PSPICE

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF BASIC ELECTRONICS VIRTUAL LAB BASED ON PSPICE APPLICATION PROGRAM

Muchlas
Nuryono Satya Widodo

The electronic circuit modules for supporting the practical work based on virtual lab are not available sufficiently. This research is aimed to produce the electronic circuits on PSPICE form, which can be used validly, efficiently, and flexible as a tool for practical work of basic electronics based on virtual lab.

This research uses a conceptual development model that is used as a reference to direct the design process to reach the product according to the specifications. The performance of the product is tested by the ongoing formative evaluation. To obtain the circuit performance that reflects product feasibility, a comparative analysis was carried out between the experiment characteristics using PSPICE and its theoretical behavior.

The results of this research showed that all the modules developed can display the same characteristics with the theoretical behavior. The modules have a very good performance so that it is feasible as tools for basic electronics practical work based-on virtual laboratory. The products developed are the electronic circuits in the schematic format of PSPICE as many as 31, to support basic electronics practical work covering the topics: Charging and Discharging Capacitors, RC Circuits, Diode Characteristics, Waveform Circuits, Rectifiers, Clamp and Voltage Multipliers, Transistor Characteristics, and Transistor Amplifiers. Each topic is equipped with a practical work guide and PSPICE user manual.

Keywords: virtual laboratory, basic electronics, PSPICE application program

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) yang sangat pesat saat ini telah mengantarkan teknologi otomatisasi fabrikasi memasuki fase ke-4 yang disebut dengan *Industry 4.0*, sehingga memunculkan pabrik-pabrik cerdas di hampir semua sektor industri dengan dukungan kerja berbasis *cyber physical systems, internet of things, cloud computing* dan *cognitive machine*. Kemajuan industri yang revolusioner ini menjadi faktor utama penyebab meningkatnya secara dramatis tuntutan pasar kerja terhadap kualifikasi lulusan pendidikan tinggi teknik. Keterampilan-keterampilan yang relevan dan adaptif terhadap basis kerja industri terkini, sekarang menjadi tuntutan kebutuhan tenaga kerja pengguna lulusan. Lewis (2018: 1), seorang Manajer Pemasaran *Content* dari *LinkedIn*, mengatakan bahwa selain 10 keterampilan teknis, terdapat empat *soft skills* yakni kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan pengaturan waktu yang sangat dibutuhkan oleh dunia usaha dan dunia industri di era ini.

Guna mengantisipasi kebutuhan ini, perguruan tinggi teknik selama ini telah membekali keterampilan tersebut kepada lulusannya melalui kegiatan praktik di laboratorium. Keempat keterampilan yang dibutuhkan industri tersebut dapat dikembangkan melalui kegiatan praktik karena aktivitas laboratorium ini dapat digunakan sebagai sarana untuk melatih keterampilan sosial dan profesional (Ma & Nickerson, 2006: 8), komunikasi, kerja tim dan etika (Krivickas & Krivickas, 2007: 192). Melalui pengembangan keterampilan sosial dan profesional, mahasiswa

dilatih memiliki keterampilan dalam bekerja sama dan berkomunikasi di dalam kelompok-kelompok praktik (tim), menanamkan kepemimpinan, serta mengatur waktu agar dapat digunakan secara efektif dalam menyelesaikan tugas-tugas praktik yang diberikan instruktur/dosen.

Pada sisi lain perkembangan IPTEK yang sangat pesat saat ini juga memunculkan pergeseran paradigma dalam penyelenggaraan proses belajar dan mengajar. Cheng (2005: 95) menyebutkan sekurang-kurangnya terdapat empat pergeseran paradigma pembelajaran dewasa ini, yakni: (1) dari terpusat pada guru menuju terpusat pada siswa; (2) dari sekedar penyampaian pengetahuan menuju pengembangan kecerdasan multi konteks; (3) dari pengajaran berbasis tempat terbatas menuju belajar berwawasan global, lokal dan individual; dan (4) dari buku teks yang terbatas menuju sumber-sumber belajar yang sangat beragam termasuk pengalaman-pengalaman dari suatu komunitas, belajar berbasis web, ekspos internasional dan materi-materi kelas dunia.

Pembelajaran telah menjadi salah satu bidang dalam dunia pendidikan yang terdampak paling serius atas perkembangan teknologi informasi. Invasi teknologi ini terhadap bidang pembelajaran bersifat luas mencakup berbagai aspek dan masif melibatkan banyak pemangku kepentingan. Begitu masifnya penetrasi teknologi informasi pada bidang pembelajaran, fenomenanya mampu melahirkan berbagai istilah baru yang mengisi wacana keilmuan pedagogi seperti *web-based learning*, *information technology-mediated learning*, *internet-based lab works*, *online-classes*, *remote lab* dan laboratorium virtual. Bahkan dalam bidang pembelajaran praktik, Lustigova & Lustig (2009: 77) secara ekstrim menyatakan bahwa

membanjirnya produk-produk teknologi informasi yang melanda dunia pendidikan telah mengubah tatanan *landscape* laboratorium di lingkungan pendidikan sains dan teknik dari kebiasaan menggunakan laboratorium *hands-on* ke peralatan berbasis teknologi informasi dan komunikasi. Kondisi ini telah mendorong munculnya pengklasifikasian baru terhadap laboratorium dan cara-cara yang digunakan untuk memanfaatkannya. Klasifikasi laboratorium pembelajaran saat ini telah berkembang, selain *hands-on*, dikenal pula laboratorium jarak jauh (*remote lab*) dan laboratorium virtual.

Beberapa hasil penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa laboratorium virtual dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap materi praktik (Colace, Santo, & Pietrosanto, 2004: 22-24), lebih efisien (Saleh, et. al, 2009: 9-17), lebih mudah dan fleksibel dibandingkan *hands-on* (Bailey & Freeman, 2010: 13-25). Selain itu, ternyata praktik dengan pendekatan *online learning* menggunakan laboratorium virtual juga dapat diselenggarakan secara kolaboratif (Muchlas, 2015), hal ini menunjukkan bahwa melalui laboratorium virtual dapat dikembangkan keterampilan *soft skills* seperti kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan manajemen waktu seperti yang dituntut oleh dunia industri modern.

Memperhatikan karakteristiknya sebagai media praktik yang efisien dan fleksibel serta potensinya sebagai sarana efektif pembentukan keterampilan yang dibutuhkan dunia kerja saat ini, laboratorium virtual seharusnya menjadi perangkat yang banyak digunakan oleh kalangan pendidikan tinggi teknik dalam mendukung terselenggaranya pembelajaran praktik secara *online*. Terlebih lagi, saat ini Kemenristekdikti telah meluncurkan kebijakan agar pendekatan *blended learning*

(gabungan pembelajaran tatap muka dan *online*) digunakan secara luas dalam sistem pembelajaran di perguruan tinggi. Namun, kenyataan menunjukkan bahwa ketersediaan perangkat laboratorium virtual ini masih belum memenuhi harapan terutama pada pembelajaran praktik. Khusus praktik elektronika dasar, saat ini memang telah tersedia banyak *tools* yang dapat digunakan untuk membangun laboratorium virtual, namun modul-modul yang sesuai dengan materi praktik masih terlihat kurang. Salah satu *tools* yang dapat digunakan untuk membangun laboratorium virtual bidang elektronika dasar adalah program aplikasi PSPICE. Saat ini ketersediaan modul-modul berbasis PSPICE untuk mendukung praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual masih belum dapat memenuhi kebutuhan. Atas dasar kenyataan ini, perlu dilakukan pengembangan modul-modul laboratorium virtual berbasis program aplikasi PSPICE yang dapat digunakan untuk mendukung penyelenggaraan praktik elektronika dasar.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang masalah yang telah dikemukakan di atas, terlihat bahwa usaha-usaha untuk menyelenggarakan pembelajaran praktik elektronika dasar yang efektif, efisien dan fleksibel melalui laboratorium virtual menghadapi kendala kurangnya dukungan modul-modul eksperimen yang valid. Memperhatikan hal tersebut, dapat dikemukakan masalah-masalah yang ingin diselesaikan melalui penelitian ini sebagai berikut.

1. Seperti apakah bentuk implementasi laboratorium virtual berbasis PSPICE untuk mendukung praktik elektronika dasar?

2. Sejuahmana kinerja modul-modul praktik elektronika dasar berbasis PSPICE yang dikembangkan dalam memenuhi kelayakannya sebagai perangkat pembelajaran berbasis laboratorium virtual ?
3. Sejuahmana persepsi pengguna perangkat pembelajaran yang dikembangkan dari sudut pandang dosen dan mahasiswa?

C. Tujuan Pengembangan

Sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan, tujuan pengembangan pada penelitian ini dapat dikemukakan sebagai berikut.

1. Menghasilkan modul-modul laboratorium virtual berbasis PSPICE untuk praktik elektronika dasar dengan spesifikasi sesuai rancangan.
2. Memperoleh informasi hasil uji kinerja modul-modul laboratorium virtual berbasis PSPICE untuk praktik elektronika dasar.
3. Menghasilkan informasi persepsi pengguna yakni dosen dan mahasiswa terhadap penggunaan perangkat pembelajaran yang dikembangkan.

D. Spesifikasi Produk yang Diharapkan

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan modul-modul laboratorium virtual berbasis PSPICE untuk praktik elektronika dasar sesuai spesifikasi pada Tabel 1. Pencantuman spesifikasi produk di bagian awal ini dimaksudkan agar dapat digunakan sebagai acuan untuk mengarahkan jalannya penelitian. Proses penelitian diarahkan menuju terciptanya produk (perangkat pembelajaran berupa laboratorium virtual berbasis aplikasi PSPICE untuk praktik elektronika dasar) yang dapat memenuhi aspek-aspek pada spesifikasi yang telah ditentukan.

Secara umum, spesifikasi produk yang dirancang meliputi aspek perangkat keras, perangkat lunak, modul yang disediakan, dan aspek pedagogi. Spesifikasi pada aspek perangkat keras mendeskripsikan persyaratan minimum dari piranti-piranti yang digunakan untuk mendukung operasi laboratorium virtual yang dikembangkan, sedangkan aspek perangkat lunak memberikan informasi tentang sistem operasi dan program aplikasi yang harus diinstalasi ke dalam perangkat keras. Spesifikasi produk juga mencantumkan nama dan jumlah modul praktik elektronika dasar berbasis PSPICE yang disediakan, serta mendeskripsikan aspek pedagogi yang mencakup *user*, nama mata kuliah, prasyarat pengoperasian, dan penggunaan.

Tabel 1. Spesifikasi laboratorium virtual Praktik Elektronika Dasar

Perangkat	Spesifikasi
Perangkat Keras	PC/Laptop dengan: frekuensi <i>clock</i> prosesor minimal 90MHz, kapasitas memori internal minimal 32MB, kapasitas <i>free harddisk space</i> minimal 90 MB, menyediakan <i>pointer device (mouse)</i>
Perangkat Lunak	Sistem Operasi: Windows di dalamnya terpasang program aplikasi PSPICE <i>Student Version Release 9.1</i> .
Modul Praktik	Menyediakan modul praktik Elektronika Dasar: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan, Karakteristik Transistor, Rangkaian Penguat Transistor.
Aspek Pedagogi	<ul style="list-style-type: none"> • <i>User</i>: Dosen/mahasiswa jurusan Teknik Elektro dan jurusan sejenis • Mata Kuliah: Elektronika Dasar • Prasyarat: dapat mengoperasikan PSPICE • Penggunaan: Media pembelajaran di kelas, laboratorium virtual untuk praktik di laboratorium • Waktu penggunaan: 90 menit sebagai media di kelas atau 90 menit sebagai piranti laboratorium virtual per modul.

E. Pentingnya Pengembangan

Belum tersedianya perangkat pembelajaran praktik berupa laboratorium virtual yang efisien dan fleksibel serta mudah digunakan oleh mahasiswa dalam mempelajari prinsip-prinsip elektronika dasar melalui kerja *lab*, menjadikan produk ini penting untuk dikembangkan. Selain secara langsung dapat digunakan oleh para mahasiswa untuk melakukan kerja *lab* secara mandiri, produk penelitian ini nantinya dapat digunakan oleh para dosen teknik elektro yang mengampu praktik dasar elektronika, sebagai alternatif pengganti praktik *hands-on* yang lebih efisien dan fleksibel maupun sebagai media pembelajaran di dalam kelas.

F. Asumsi dan Keterbatasan Pengembangan

Pengembangan produk ini didasarkan pada asumsi bahwa para mahasiswa yang mengikuti praktik elektronika dasar telah terbiasa menggunakan program aplikasi PSPICE. Keadaan seperti ini dapat terjadi karena kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa mata kuliah elektronika dasar telah diberikan pada semester-semester awal sebelum praktik menggunakan perangkat pembelajaran ini. Dengan demikian penggunaan PSPICE sebagai basis pengembangan perangkat pembelajaran ini sudah tepat, karena mahasiswa telah memiliki pra syaratnya sehingga dapat dengan mudah mengoperasikannya.

Produk ini memiliki keterbatasan-keterbatasan pada aspek teknis. Perangkat ini hanya dapat bekerja dengan baik jika seluruh pengoperasiannya sesuai dengan spesifikasi sistem seperti disajikan pada Tabel 1 di atas. Produk ini tidak merekomendasikan versi aplikasi PSPICE yang digunakan dengan jenis selain yang tercantum pada spesifikasi produk. Namun, pengguna dapat dengan leluasa

mengubah seluruh parameter yang terdapat pada setiap modul sesuai kebutuhan praktik.

G. Definisi Istilah

Penggunaan istilah dalam penelitian ini sesungguhnya telah diupayakan agar tidak menimbulkan pemaknaan ganda atau multi tafsir. Namun, agar tidak menimbulkan kesalahan dalam penafsiran judul penelitian, perlu dilakukan penjelasan terhadap istilah-istilah yang digunakan. Implementasi yang dimaksud di sini adalah usaha peneliti untuk mewujudkan modul-modul praktik elektronika dasar berbasis program aplikasi PSPICE sebagai komponen dari laboratorium virtual sehingga menghasilkan sebuah produk pendidikan melalui prosedur sistematis yang disarankan oleh para ahli. Laboratorium *Virtual* Elektronika Dasar adalah perangkat lunak yang menyediakan fungsi simulasi rangkaian elektronika sehingga dapat digunakan sebagai alternatif fasilitas praktik yang lebih efisien dan fleksibel dibandingkan laboratorium *hands-on*.

PSPICE (singkatan dari *Personal Computer Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) merupakan perangkat lunak berbentuk simulator untuk analisis rangkaian elektronika analog dan digital yang dikembangkan oleh *University of California at Berkeley* sekitar tahun 1970an. Melalui simulator ini dapat dilakukan analisis rangkaian elektronika menggunakan model piranti yang terkandung di dalamnya. Rancangan rangkaian elektronik dapat diuji dan diperbaiki kinerjanya terlebih dahulu menggunakan simulator ini, sebelum diimplementasikan dalam bentuk perangkat keras di atas *printed circuit board* (PCB).

BAB II LANDASAN TEORI

A. Kajian Teori

Pada bagian pendahuluan telah dikemukakan bahwa salah satu tujuan penelitian ini adalah menghasilkan modul-modul laboratorium virtual untuk praktik elektronika dasar. Agar penelitian ini dapat terarah mencapai tujuannya, perlu dideskripsikan terlebih dahulu teori-teori yang melandasi penyusunan modul-modul berbasis aplikasi PSPICE ini. Teori-teori yang disusun ini nantinya akan digunakan sebagai faktor pembanding pada uji kinerja modul-modul yang dikembangkan.

1. Pengisian dan Pengosongan Kapasitor

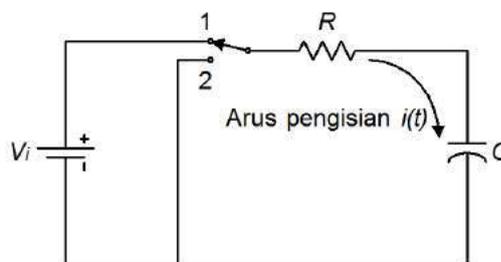
Kapasitor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi menyimpan energi listrik. Mengingat energi listrik merupakan fungsi dari muatan listrik, dapat dinyatakan pula bahwa kapasitor adalah komponen pasif yang dapat menyimpan muatan listrik. Selain itu, komponen ini memiliki sifat-sifat dapat menghambat aliran arus searah dan arus bolak-balik frekuensi rendah, sementara untuk arus bolak-balik frekuensi tinggi, komponen ini dapat mengalirkannya. Oleh karena memiliki watak seperti itu, kapasitor banyak dimanfaatkan sebagai penghubung antara suatu *stage* ke *stage* yang lain dari rangkaian *amplifier*. Sebagai *coupler*, kapasitor berfungsi mengisolasi catu daya searah pada setiap *stage*, pada sisi lain meneruskan arus bolak-balik yang dikuatkan oleh setiap *stage* yang ada.

Penggabungan kapasitor dengan resistor dalam sebuah rangkaian listrik, dapat membentuk rangkaian RC yang aplikasinya sangat luas. Kajian tentang

aplikasi rangkaian RC dapat dilakukan dengan mudah apabila didahului dengan kajian fenomena pengisian dan pengosongan kapasitor. Uraian materi ini merujuk pada konsep-konsep yang dikemukakan oleh Grob (1984: 440-461), Sutrisno (1986: 10-13) dan Smith & Dorf (1992: 110-136).

a. Rangkaian RC Pengisian Kapasitor

Rangkaian RC sederhana terdiri atas satu resistor, satu kapasitor, satu sumber tegangan DC, satu buah saklar seperti gambar di bawah ini.



Gambar 1. Rangkaian RC pengisian kapasitor

Jika saklar diarahkan ke posisi 1 maka akan mengalir arus $i(t)$ mengisi kapasitor C dan dalam keadaan ini dapat ditulis persamaan,

$$V_i = V_R + V_C$$

$$V_i = iR + \frac{Q}{C}$$

$$V_i = \frac{dQ}{dt} R + \frac{Q}{C}$$

$$\frac{dQ}{dt} R = V_i - \frac{Q}{C}$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{R} (V_i - \frac{Q}{C}). \quad \text{persamaan (1)}$$

Persamaan (1) dapat diselesaikan dengan metode pemisahan variabel. Langkah pertama adalah memisahkan notasi-notasi yang berhubungan dengan

variabel muatan listrik (Q dan dQ) terhadap notasi yang berhubungan dengan variabel waktu (dt). Pada kasus ini, notasi Q dan dQ ditempatkan pada ruas kiri, sedangkan dt di ruas kanan persamaan, sehingga persamaan (1) dapat diubah bentuknya menjadi persamaan (2) berikut ini.

$$\frac{dQ}{(V_i - \frac{Q}{C})} = \frac{1}{R} dt \quad \text{persamaan (2)}$$

Jika ruas kiri dan kanan dibagi dengan $-C$, maka persamaan 2 dapat diubah bentuknya menjadi,

$$\frac{dQ}{Q - CV_i} = -\frac{1}{RC} dt \quad \text{persamaan (3)}$$

Pengintegralan ruas kiri dan ruas kanan pada persamaan (3) menghasilkan,

$$\int_0^{Q(t)} \frac{dQ}{Q - CV_i} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt \quad \text{persamaan (4)}$$

Berdasarkan rumus integral, telah diketahui bahwa $\int \frac{1}{ax+b} dx = \frac{1}{a} \ln\{ax + b\}$

sehingga persamaan (4) dapat diubah menjadi,

$$\ln \{Q - CV_i\} \Big|_0^{Q(t)} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln\{Q(t) - CV_i\} - \ln\{Q(0) - CV_i\} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln\{Q(t) - CV_i\} - \ln\{-CV_i\} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln \frac{\{Q(t) - CV_i\}}{-CV_i} = -\frac{t}{RC}$$

Telah diketahui bahwa $e^{\ln(x)} = x$, sehingga apabila ruas kiri dari persamaan di atas dijadikan pangkat dari e, maka akan diperoleh persamaan,

$$e^{\ln \frac{\{Q(t) - CV_i\}}{-CV_i}} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\frac{Q(t) - CV_i}{-CV_i} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$Q(t) = -CV_i e^{-\frac{t}{RC}} + CV_i$$

$$Q(t) = CV_i(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \text{persamaan (5)}$$

Oleh karena muatan listrik yang mengisi komponen kapasitor besarnya $Q(t) = CV_C(t)$, maka tegangan kapasitor dapat diperoleh dengan melakukan substitusi persamaan ini ke dalam persamaan (5) sehingga diperoleh persamaan,

$$CV_C(t) = CV_i(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$V_C(t) = V_i(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \text{persamaan (6)}$$

Persamaan (6) menunjukkan besarnya tegangan kapasitor yang merupakan fungsi waktu t , sedangkan persamaan arus yang mengisi kapasitor dapat diturunkan dari persamaan (5). Oleh karena besarnya arus pada proses pengisian kapasitor didefinisikan sebagai besar muatan per satuan waktu, maka persamaan arus dapat diperoleh dengan menurunkan fungsi $Q(t)$ pada persamaan (5) terhadap waktu t . Dengan demikian persamaan arus pada pengisian kapasitor dapat ditulis sebagai berikut.

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d}{dt} CV_i(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$i(t) = \frac{d}{dt} CV_i - CV_i \frac{d}{dt} e^{-\frac{t}{RC}}$$

Berdasarkan rumus diferensial, telah diketahui bahwa $\frac{d}{dx} e^u = e^u \frac{du}{dx}$,

sehingga persamaan dapat diubah menjadi,

$$i(t) = 0 - (CV_i)e^{-\frac{t}{RC}}(-\frac{1}{RC})$$

$$i(t) = \frac{V_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (7)}$$

Pada persamaan (6) dan persamaan (7), keterangan untuk setiap notasinya adalah sebagai berikut.

$V_c(t)$ = tegangan pada kapasitor (V)

$i(t)$ = arus yang mengalir pada kapasitor setiap saat (A)

V_i = tegangan sumber (V)

e = bilangan natural=2,72

RC = Konstanta Waktu (*time constant*) dalam satuan detik (s)

Konstanta waktu diberi variabel τ (tau), sehingga,

$$\tau = RC \quad \text{persamaan (8)}$$

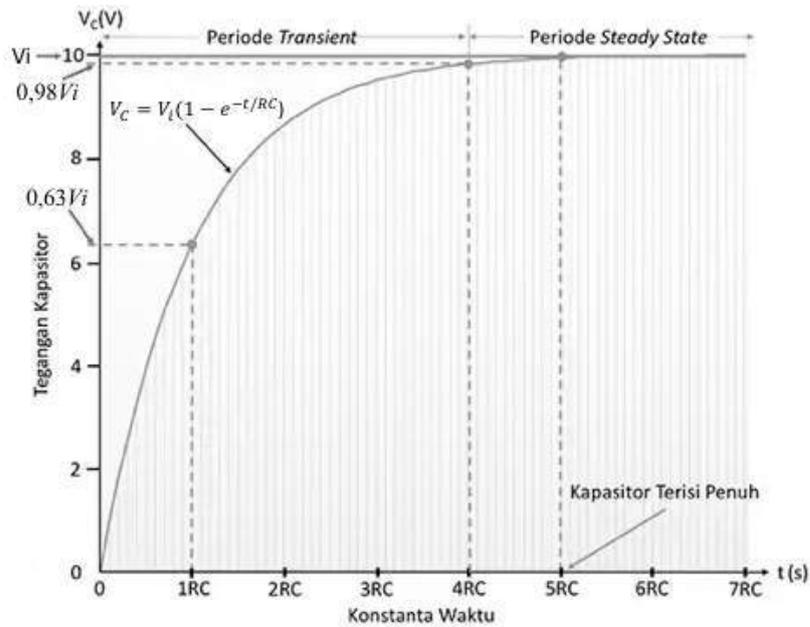
dengan R dalam ohm dan C dalam farad. Contoh, jika $R = 10K\Omega$ dan $C = 0,1 \mu F$ maka $\tau = RC = 10^{-3}$ detik=1ms.

Persamaan (6) dan persamaan (7) menunjukkan besarnya tegangan dan dan arus kapasitor selama komponen tersebut mengalami pengisian muatan. Jika ke dalam kedua persamaan tersebut dimasukkan nilai-nilai variable t untuk nilai $R = 10K\Omega$ dan $C = 0,1 \mu F$ akan menghasilkan nilai-nilai tegangan dan arus kapasitor seperti ditunjukkan pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Nilai tegangan dan arus pada pengisian kapasitor untuk $RC=1ms$

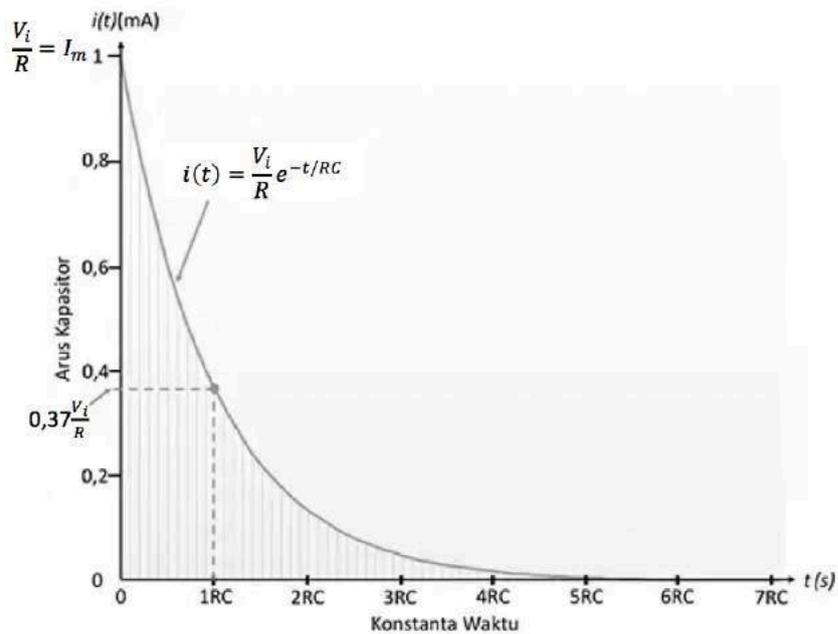
Waktu (s)	Tegangan Kapasitor (V) $V_m=V_i=10V$	Arus Kapasitor (μA) $I_m=1000 \mu A$	%Tegangan Kapasitor Terhadap V_m	%Arus Kapasitor Terhadap I_m
1ms=1RC	6,32	368	63,2% Vs	36,8% Im
2ms=2RC	8,65	135	86,5% Vs	13,5% Im
3ms=3RC	9,5	50	95,0% Vs	5% Im
4ms=4RC	9,82	18	98,2% Vs	1,8% Im
5ms=5RC	9,93	7	99,3% Vs	0,7% Im
6ms=6RC	9,98	2	99,8% Vs	0,2% Im
7ms=7RC	9,99	1	99,9% Vs	0,1% Im

Selanjutnya, jika dilakukan *plotting* antara V_c versus t akan diperoleh kurva pengisian kapasitor seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Kurva tegangan kapasitor versus waktu selama pengisian muatan

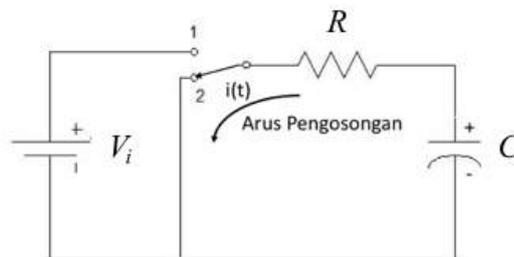
Sedangkan *plotting* antara arus versus waktu selama pengisian kapasitor menghasilkan kurva seperti pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Kurva arus kapasitor versus waktu selama pengisian muatan

b. Rangkaian RC Pengosongan Kapasitor

Merujuk Gambar 1 di atas, pada saat saklar diarahkan ke posisi 1, rangkaian akan membentuk konfigurasi pengisian kapasitor. Andaikata kapasitor telah terisi penuh dengan muatan, saklar kemudian diarahkan ke posisi 2 maka rangkaian akan membentuk konfigurasi pengosongan kapasitor dengan arah arus terbalik menuju ke potensial nol.



Gambar 4. Rangkaian RC Pengosongan Kapasitor

Dalam keadaan seperti ini $V_i=0$ dan persamaan tegangan menjadi,

$$-V_R - V_C(t) = 0$$

$$V_C(t) = -V_R = -i(t)R$$

$$\frac{Q}{C} = -\frac{dQ}{dt}R \quad \text{persamaan (9)}$$

Seperti halnya pada pengisian kapasitor, persamaan (9) yang menunjukkan arus pengosongan kapasitor dapat diselesaikan dengan metode pemisahan variabel. Dalam hal ini, notasi Q dan dQ ditempatkan pada ruas kiri, sedangkan dt di ruas kanan persamaan, sehingga persamaan (9) dapat diubah menjadi,

$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{RC} dt$$

Jika ruas kiri dan ruas kanan diintegrasikan, maka persamaan dapat diubah bentuknya menjadi,

$$\int_{Q(0)}^{Q(t)} \frac{dQ}{Q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

$$\ln(Q) \Big|_{Q(0)}^{Q(t)} = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln Q(t) - \ln Q(0) = -\frac{t}{RC}$$

$$\ln \frac{Q(t)}{Q(0)} = -\frac{t}{RC}$$

$$e^{\frac{\ln Q(t)}{Q(0)}} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

Berdasarkan sifat bilangan natural, telah diketahui bahwa $e^{\ln(x)} = x$, sehingga apabila ruas kiri dan ruas kanan dari persamaan di atas menjadi pangkat dari e, maka akan dihasilkan persamaan,

$$\frac{Q(t)}{Q(0)} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$Q(t) = Q(0)e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (10)}$$

$$CV_C(t) = CV_C(0)e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$V_C(t) = V_C(0)e^{-\frac{t}{RC}}$$

Oleh karena pada saat awal pengosongan kapasitor ($t=0$) nilai tegangan awal pada ujung-ujung kapasitor sama dengan nilai tegangan sumber yakni $V_C(0)=V_i$ maka persamaan dapat ditulis dalam bentuk,

$$V_C(t) = V_i e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (11)}$$

Persamaan (11) menunjukkan tegangan kapasitor selama proses pengosongan muatan (*discharging*) berlangsung. Persamaan arus pengosongan dapat diturunkan dari persamaan (10). Oleh karena pada proses pengosongan kapasitor arusnya berkurang dari waktu ke waktu maka persamaannya dapat ditulis $i(t) = -\frac{dQ(t)}{dt}$ (tanda - menunjukkan arus semakin lama semakin berkurang).

Substitusi persamaan ini ke dalam persamaan (10) menghasilkan persamaan:

$$i(t) = -\frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dQ(0)}{dt} e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$i(t) = -I(0)e^{-\frac{t}{RC}}$$

Pada saat awal ($t=0$), nilai muatan kapasitor maksimum, sehingga arus awalnya juga maksimum yakni sebesar $\frac{V_i}{R}$. Persamaan arus pengosongan dapat ditulis;

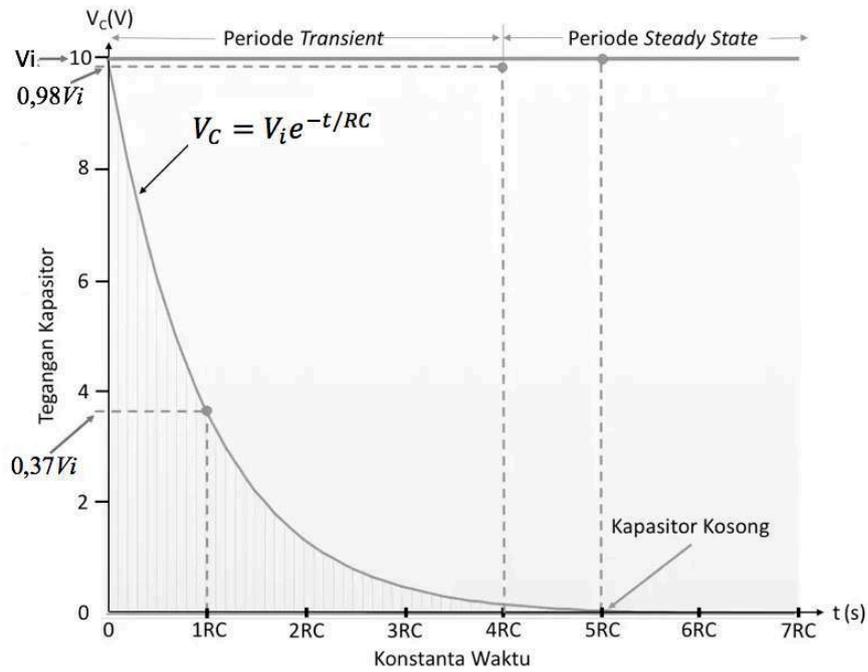
$$i(t) = -\frac{V_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (12)}$$

Persamaan (11) dan persamaan (12) menunjukkan besarnya tegangan dan arus kapasitor selama komponen tersebut mengalami pengosongan muatan (*discharging*). Jika ke dalam kedua persamaan tersebut dimasukkan nilai-nilai variable t untuk nilai $R = 10K\Omega$ dan $C = 0,1 \mu F$ akan menghasilkan nilai-nilai tegangan dan arus kapasitor seperti ditunjukkan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Nilai tegangan dan arus pada pengosongan kapasitor untuk $RC=1ms$

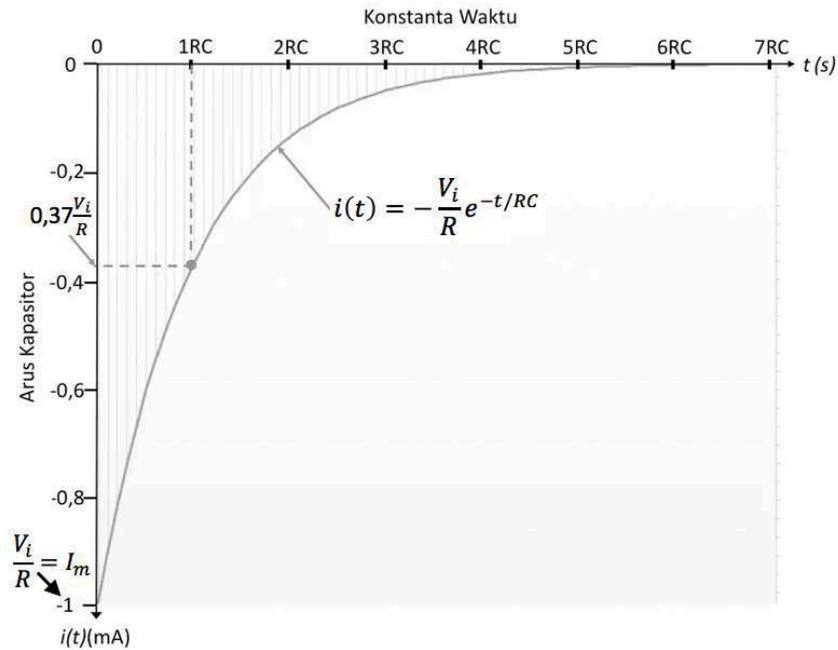
Waktu (s)	Tegangan Kapasitor (V) $V_m=V_i=10V$	Arus Kapasitor (μA) $I_m=1000 \mu A$	%Tegangan Kapasitor Terhadap V_m	%Arus Kapasitor Terhadap I_m
1ms=1RC	3,68	-368	36,8% Vs	36,8% Im
2ms=2RC	1,35	-135	13,5% Vs	13,5% Im
3ms=3RC	0,50	-50	5,0% Vs	5% Im
4ms=4RC	0,18	-18	1,8% Vs	1,8% Im
5ms=5RC	0,07	-7	0,7% Vs	0,7% Im
6ms=6RC	0,02	-2	0,2% Vs	0,2% Im
7ms=7RC	0,01	-1	0,1% Vs	0,1% Im

Merujuk Tabel 3 di atas, jika dilakukan *plotting* antara tegangan kapasitor V_c versus waktu t akan diperoleh kurva pengosongan kapasitor seperti ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Kurva tegangan kapasitor versus waktu selama pengosongan muatan

Sedangkan *plotting* antara arus versus waktu selama pengosongan kapasitor menghasilkan kurva seperti pada gambar 6 berikut ini.



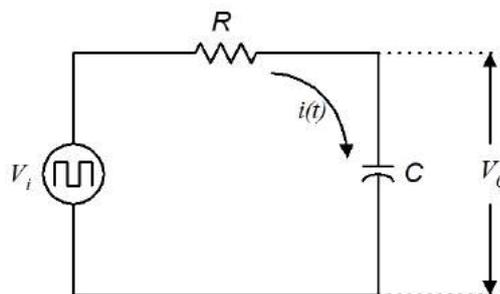
Gambar 6. Kurva arus kapasitor versus waktu selama pengosongan muatan

2. Rangkaian RC

Rangkaian RC merupakan rangkaian elektronika yang tersusun atas komponen resistor, kapasitor dan sumber tegangan/arus. Pada domain waktu, rangkaian RC dapat dimanfaatkan sebagai rangkaian untuk mengintegalkan sinyal (rangkaiannya disebut dengan integrator) dan pendiferensiasi sinyal (rangkaiannya disebut dengan diferensiator). Selain itu, pada domain frekuensi, rangkaian RC dapat diaplikasikan sebagai rangkaian untuk menyeleksi frekuensi dari suatu sinyal. Dengan menggunakan rangkaian RC dapat dibuat filter *low pass* yang digunakan untuk meloloskan sinyal frekuensi rendah, filter *high pass* untuk meloloskan sinyal frekuensi tinggi, filter *band pass* untuk meneruskan sinyal dengan *band* frekuensi tertentu, dan filter *band reject* untuk menahan sinyal dengan band frekuensi tertentu. Materi ini diturunkan dari teori-teori yang telah dikembangkan oleh Grob (1984: 440-461) dan Sutrisno (1986: 13-45).

a. Integrator

Rangkaian integrator adalah rangkaian RC seri yang berfungsi melakukan integrasi terhadap tegangan inputnya. Rangkaiannya ditunjukkan pada gambar 7 berikut ini. Untuk melakukan analisis rangkaian integrator, akan digunakan sumber tegangan berbentuk gelombang kotak (*square*) dan sinusoidal.



Gambar 7. Rangkaian integrator RC pasif

Proses integrasi pada rangkaian ini dapat dijelaskan dengan menggunakan gambar 7 di atas, sehingga dapat diturunkan persamaan tegangan sebagai berikut.

$$V_i = i(t)Z_{TOTAL}$$

$$V_i = i(t)\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Jika ruas kiri dan kanan dikalikan dengan C, maka dihasilkan,

$$V_i = i(t)\sqrt{\frac{(RC)^2 + \left(\frac{1}{\omega}\right)^2}{C^2}} = i(t)\sqrt{\frac{(RC)^2 + \left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C^2}}$$

$$V_i = i(t)\sqrt{\frac{(RC)^2 + \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2}{C^2}} \quad \text{persamaan (13)}$$

Andaikata persyaratan menjadi integrator adalah konstanta waktu harus jauh lebih besar dari periode gelombang tegangan input ($RC \gg T$), maka komponen $\frac{T}{2\pi}$ dapat diabaikan sehingga persamaan dapat diubah menjadi,

$$V_i = i(t)R$$

Oleh karena $i(t) = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV_o}{dt}$, maka persamaan menjadi,

$$V_i = RC \frac{dV_o}{dt}$$

$$dV_o = \frac{1}{RC} V_i dt$$

$$V_o = \frac{1}{RC} \int V_i dt \quad \text{persamaan (14)}$$

Persamaan (14) menjelaskan bahwa tegangan output rangkaian merupakan fungsi dari integral tegangan inputnya. Penyelesaian persamaan (14) untuk V_i konstan, berbentuk persamaan garis lurus dengan V_o dan t masing-masing variabel bebas dan variabel terikat seperti berikut ini,

$$V_o = \frac{V_i}{RC} t + \text{konstanta} \quad \text{persamaan (15)}$$

Formula ini mirip dengan persamaan garis lurus $y = ax + b$ dengan $a = \frac{V_i}{RC}$ dan b suatu konstanta. Jika tegangan inputnya berbentuk kotak (*square wave*) dan $b=0$, maka persamaan tegangan output menjadi,

$$V_o = +\frac{V_m}{RC} t \quad \text{persamaan (16)}$$

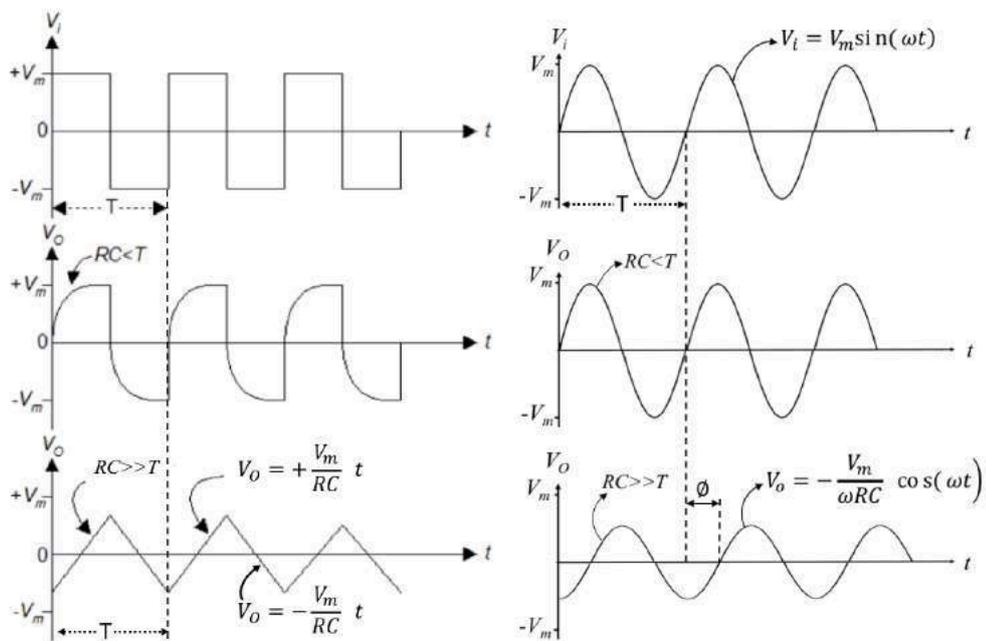
untuk setengah periode pertama, dan

$$V_o = -\frac{V_m}{RC} t \quad \text{persamaan (17)}$$

untuk setengah periode kedua. Jika inputnya berbentuk sinusoidal $V_i = V_m \sin(\omega t)$, maka, outputnya adalah integral dari V_i yakni,

$$V_o = -\frac{V_m}{\omega RC} \cos(\omega t) \quad \text{persamaan (18)}$$

Berdasarkan persamaan (16), (17), dan (18) untuk input gelombang kotak dan sinusoidal, bentuk gelombang outputnya dapat ditunjukkan melalui Gambar 8.



Gambar 8. Bentuk gelombang tegangan input dan output rangkaian integrator

Berdasarkan gambar 8, terlihat bahwa rangkaian integrator berfungsi sebagai pengubah bentuk gelombang kotak menjadi gelombang segitiga dengan syarat $RC \gg T$ (gambar kiri paling bawah). Sedangkan untuk $RC < T$, output integrator berupa gelombang kotak cacat (gambar kiri tengah). Terlihat pula bahwa untuk input sinusoidal, output integrator akan bergeser fasenya sebesar $\phi = -90^\circ$ terlambat terhadap fase tegangan inputnya untuk $RC \gg T$ (gambar kanan paling bawah). Untuk $RC < T$ output integrator memberikan output yang sama bentuknya dengan inputnya (gambar kanan tengah). Dengan demikian fungsi integrator selain dapat mengubah bentuk gelombang kotak menjadi gelombang segitiga juga dapat menggeser fase gelombang sinusoidal.

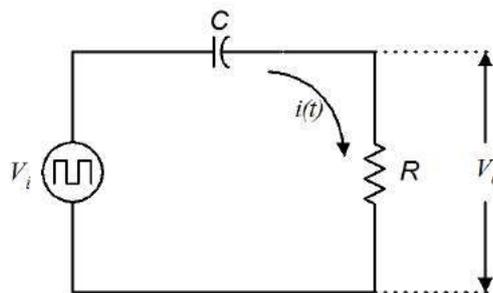
Selain dilakukan dengan pendekatan matematis, penjelasan cara kerja integrator juga dapat diberikan secara kualitatif. Merujuk gambar 8, jika konstanta waktu $RC \ll T$, maka untuk setengah periode pertama ($V_i = +V_m$) kapasitor C akan terisi muatan positif secara penuh dengan cepat ($V_o = +V_m$) sebelum waktu $T/2$ tercapai. Pada setengah periode kedua, tegangan input berubah negatif ($V_i = -V_m$) yang menyebabkan kapasitor dikosongkan dan diisi muatan negatif dengan cepat pula sehingga $V_o = -V_m$, dengan cara tersebut terlihat output integrator berbentuk gelombang kotak yang cacat.

Tetapi jika konstanta waktu diubah menjadi $RC \gg T$, maka sebelum kapasitor terisi penuh, tegangan input sudah berubah menjadi negatif $V_i = -V_m$, akibatnya kapasitor segera dikosongkan dan diisi muatan negatif menuju ke nilai $-V_m$. Proses pengisian muatan negatif ini juga mengalami hal yang sama dengan pengisian muatan positif, yakni sebelum kapasitor terisi penuh ($-V_m$), input kembali

berubah menjadi $+V_m$ sehingga kapasitor segera dikosongkan muatan negatifnya dan diisi dengan muatan positif menuju ke nilai $+V_m$. Mekanisme seperti ini telah mengakibatkan output integrator berbentuk gelombang segitiga.

b. Diferensiator

Diferensiator adalah rangkaian RC seri yang berfungsi mendiferensialkan tegangan input yang diberikan. Rangkaianannya berupa *loop* RC seri, dengan output diambil pada ujung-ujung resistor seperti pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Rangkaian diferensiator RC pasif

Untuk memahami fenomena diferensiasi yang terjadi, dapat dilakukan dengan analisis sebagai berikut. Oleh karena rangkaianannya mengandung komponen yang sama dengan integrator, maka persamaan untuk V_i sama dengan persamaan (13) di atas. Jika persyaratan menjadi diferensiator adalah konstanta waktu harus jauh lebih kecil dari periode gelombang tegangan input ($RC \ll T$), maka komponen RC pada persamaan (13) dapat dabaikan sehingga persamaan menjadi,

$$V_i = i(t) \sqrt{\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2} = i(t) \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2} = i(t) \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = i(t) \cdot X_C$$

Telah diketahui bahwa X_C adalah reaktansi kapasitif, dengan demikian persamaan di atas memperlihatkan bahwa untuk kondisi $RC \ll T$, tegangan pada ujung-ujung kapasitor nilainya sama dengan tegangan input, jadi $V_C = V_i$.

Berdasarkan definisi telah diketahui bahwa pada komponen kapasitor, arus listrik yang mengalir melewatinya sama dengan besarnya muatan per satuan waktu ($\frac{dQ}{dt}$), dan besarnya muatan listrik $Q = CV_C$ sehingga,

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV_C}{dt} = C \frac{d(V_i)}{dt}$$

Jika ruas kiri dan kanan dikalikan dengan R maka persamaan menjadi,

$$i(t)R = RC \frac{d(V_i)}{dt}$$

$$V_o = RC \frac{d(V_i)}{dt} \quad \text{persamaan (19)}$$

Persamaan (19) menunjukkan bahwa rangkaian diferensiator akan melakukan pendiferensialan terhadap tegangan inputnya dengan konstanta pengali sebesar RC. Untuk tegangan input berupa gelombang kotak ($V_i = +V_m$ untuk periode pertama dan $V_i = -V_m$ untuk periode kedua), penyelesaian persamaan (19) menjadi,

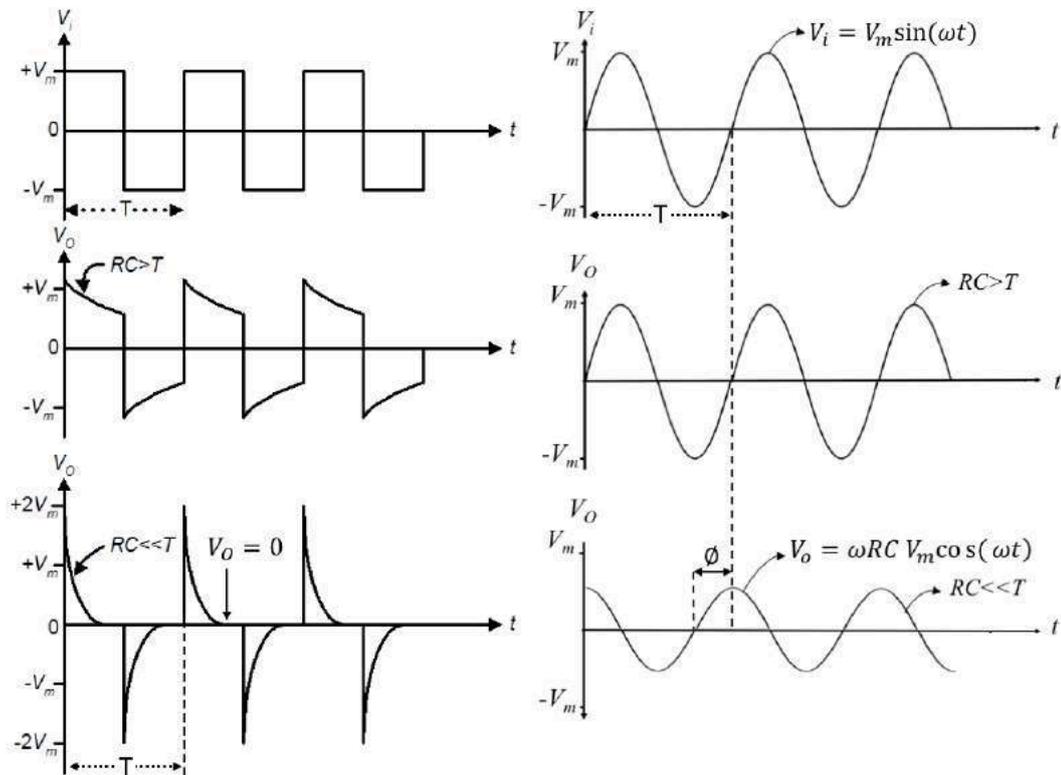
$$V_o = RC \frac{d(V_i)}{dt} \cong 0. \quad \text{persamaan (20)}$$

Persamaan (19) menunjukkan bahwa untuk $RC \ll T$, dengan input konstan, tegangan output diferensiator dengan cepat menuju nilai 0.

Sementara itu, jika inputnya diberi tegangan berbentuk sinusoidal $V_i = V_m \sin(\omega t)$, dan dengan mengingat formula diferensial $\frac{d \sin(ax)}{dx} = a \cos(ax)$, maka penyelesaian persamaan (19) menjadi,

$$V_o = \omega RC V_m \cos(\omega t) \quad \text{persamaan (21)}$$

Berdasarkan persamaan (20) dan (21), dapat digambarkan bentuk gelombang output rangkaian diferensiator untuk input berbentuk gelombang kotak dan sinusoidal seperti pada gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Bentuk gelombang tegangan input dan output rangkaian diferensiator

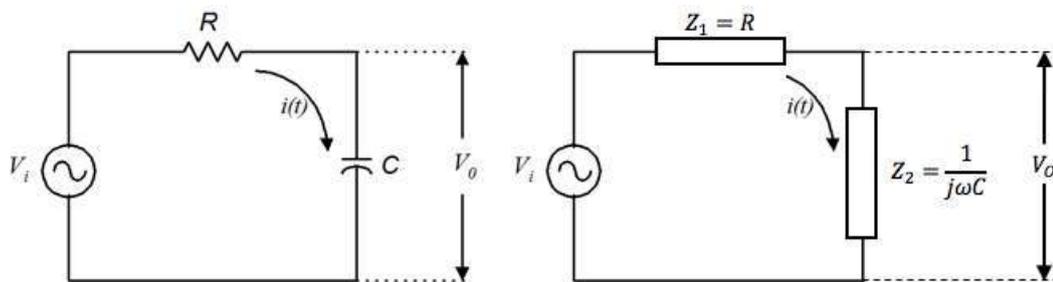
Gambar 10 (kiri paling bawah) memperlihatkan bahwa rangkaian diferensiator berfungsi mengubah gelombang kotak pada inputnya menjadi pulsa sempit pada outputnya untuk $RC \ll T$. Namun, untuk kondisi $RC > T$, output diferensiator berupa gelombang kotak cacat (gambar kiri tengah). Melalui gambar 10 dapat terlihat pula bahwa untuk $RC \ll T$ dan input berbentuk sinusoidal, output diferensiator bergeser fasenya sebesar $\phi = 90^\circ$ mendahului tegangan inputnya (gambar kanan paling bawah). Untuk $RC > T$ output diferensiator memberikan output yang sama bentuknya dengan inputnya (gambar kanan tengah). Dengan demikian fungsi diferensiator selain dapat mengubah bentuk gelombang kotak menjadi pulsa sempit juga dapat menggeser fase gelombang sinusoidal sehingga fasenya mendahului gelombang inputnya.

Penjelasan cara kerja rangkaian diferensiator secara kualitatif dapat dilakukan melalui uraian berikut ini. Berdasarkan gambar 10 dapat dijelaskan bahwa pada setengah periode pertama, tegangan input sebesar $V_i = +V_m$ akan mengisi kapasitor C dengan sangat lambat ($RC > T$), akibatnya V_C naik secara lambat pula. Naiknya V_C menyebabkan V_o turun ($V_o = V_i - V_C$), dan sebelum kapasitor terisi penuh, tegangan input telah berubah tanda menjadi $V_i = -V_m$. Perubahan tegangan input menjadi negatif menyebabkan kapasitor mengosongkan muatannya dan diisi dengan muatan negatif sehingga V_C menuju ke nilai $-V_m$, pada saat yang bersamaan V_o menuju ke nilai 0. Seperti halnya pada pengisian muatan positif, pada pengisian muatan negatif juga berlangsung lambat, sehingga sebelum kapasitor terisi penuh oleh muatan negatif, tegangan input berubah lagi tandanya menjadi positif. Dengan cara seperti ini, maka output diferensiator berbentuk gelombang kotak cacat.

Namun, jika nilai konstanta waktu diubah menjadi $RC \ll T$, maka kapasitor C akan terisi muatan listrik dengan cepat sehingga $V_C = +V_m$ bersamaan dengan $V_o = 0$ (karena $V_o = V_i - V_C = +V_m - V_m = 0$) tercapai sebelum input mencapai setengah periode kedua. Pada saat tegangan input berubah menjadi $V_i = -V_m$, tegangan output menjadi bernilai $V_o = V_i - V_C = -V_m - V_m = -2V_m$. Selanjutnya kapasitor mengalami pengosongan muatan secara cepat dan diisi oleh muatan negatif sehingga $V_C = -V_m$ dan $V_o = 0$ tercapai sebelum V_i berubah tanda. Ketika V_i berubah tanda menjadi $V_i = +V_m$, tegangan output menjadi $V_o = +2V_m$, kapasitor diisi muatan positif dengan cepat sehingga V_o kembali bernilai 0 sebelum V_i berubah tanda negatif. Mekanisme ini menghasilkan fenomena diferensiasi sinyal, yakni terbentuknya pulsa sempit pada output diferensiator.

c. Filter *Low Pass*

Filter *low pass* adalah rangkaian yang berfungsi meloloskan sinyal input frekuensi rendah. Berdasarkan jenis komponen penyusunnya terdapat filter aktif dan filter pasif. Rangkaian filter *low pass* pasif tersusun atas komponen pasif R dan C membentuk rangkaian seperti rangkaian integrator, namun dengan masukan sinusoidal dan bekerja pada domain frekuensi.



Gambar 11. Rangkaian filter *low pass* (kiri) dan ekivalennya (kanan)

Berdasarkan gambar 11, dan memperhatikan bahwa j adalah operator besaran kompleks, maka tegangan output rangkaian dalam fungsi $j\omega$ dapat dinyatakan dengan,

$$V_O(j\omega) = V_i(j\omega) \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

dan persamaan dapat diubah bentuknya menjadi,

$$\frac{V_O(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

Perbandingan tegangan output terhadap tegangan input didefinisikan sebagai *gain* atau penguatan tegangan. Besaran ini dalam fungsi $j\omega$ diberi notasi $A_V(j\omega)$ dan persamaannya disebut sebagai fungsi transfer kompleks sehingga,

$$A_V(j\omega) = \frac{V_O(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Jika diberikan $\omega_c = \frac{1}{RC}$, persamaan dapat disederhanakan lagi menjadi,

$$A_V(j\omega) = \frac{\frac{1}{RC}}{\frac{1}{RC} + j\omega} = \frac{\omega_c}{\omega_c + j\omega} \quad \text{persamaan (22)}$$

Pada persamaan (22), ω_c disebut *pole* (kutub) dan oleh karena $\omega_c = 2\pi f_c$, maka,

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{persamaan (23)}$$

dengan f_c adalah frekuensi kutub atau sering disebut juga dengan frekuensi *cut-off* yang menunjukkan batas frekuensi maksimum dari tegangan input yang diloloskan.

Gain tegangan $A_V(j\omega)$ pada persamaan (22) adalah besaran kompleks karena mengandung operator j . Untuk memperoleh besar atau magnitudo dari $A_V(j\omega)$, dapat dilakukan dengan memberikan operasi akar terhadap perkalian bilangan kompleks dengan konjugasinya seperti berikut ini,

$$|A_V(j\omega)| = A_V(\omega) = \frac{\omega_c}{\sqrt{(\omega_c + j\omega)(\omega_c - j\omega)}}$$

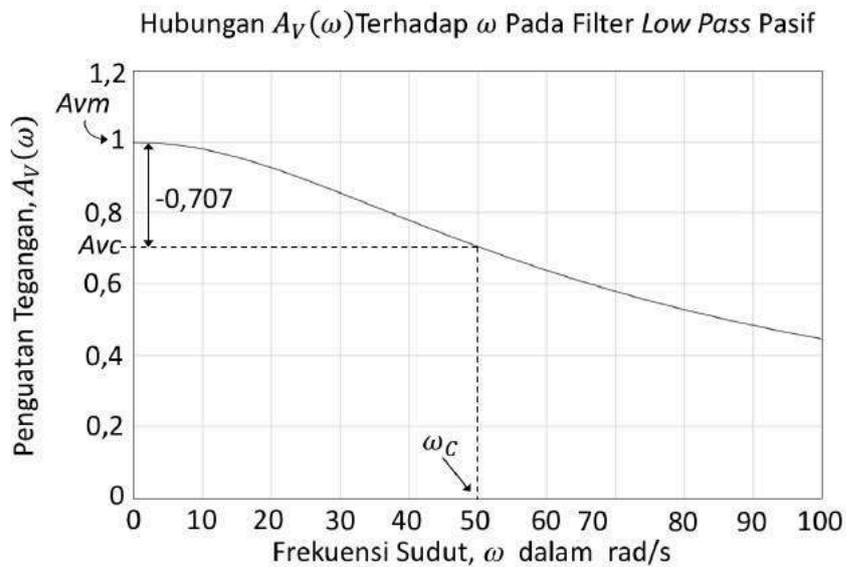
Konjugasi kompleks diperoleh dengan mengganti $+j$ pada bilangan kompleks menjadi $-j$, dalam hal ini $(\omega_c - j\omega)$ adalah konjugasi kompleks dari $(\omega_c + j\omega)$.

Mengingat bahwa operator $j = \sqrt{-1}$ atau $j^2 = -1$, maka persamaan di atas dapat diubah lagi menjadi,

$$A_V(\omega) = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 - j^2\omega^2}}$$

$$A_V(\omega) = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \quad \text{persamaan (24)}$$

Apabila diberikan nilai $R=10K\Omega$ dan $C=2\mu F$, berdasarkan persamaan (24), dapat dibuat grafik hubungan antara magnitudo *gain* tegangan $A_V(\omega)$ dengan frekuensi sudut dari tegangan input (ω), seperti ditunjukkan melalui gambar 12 berikut ini.



Gambar 12. Grafik hubungan $A_V(\omega)$ terhadap ω

Untuk kondisi $\omega \ll \omega_c$, maka nilai $A_V(\omega)$ pada persamaan (24) mencapai nilai maksimum (A_{Vm}) sesuai persamaan berikut ini,

$$A_V(\omega) \Big|_{(\omega \ll \omega_c)} = A_{Vm} = \frac{\omega_c}{\sqrt{(\omega_c)^2 + (0)^2}} = 1,$$

sedangkan untuk kondisi $\omega = \omega_c$, nilai $A_V(\omega)$ menjadi:

$$A_V(\omega) \Big|_{(\omega = \omega_c)} = A_{Vc} = \frac{\omega_c}{\sqrt{(\omega_c)^2 + (\omega_c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

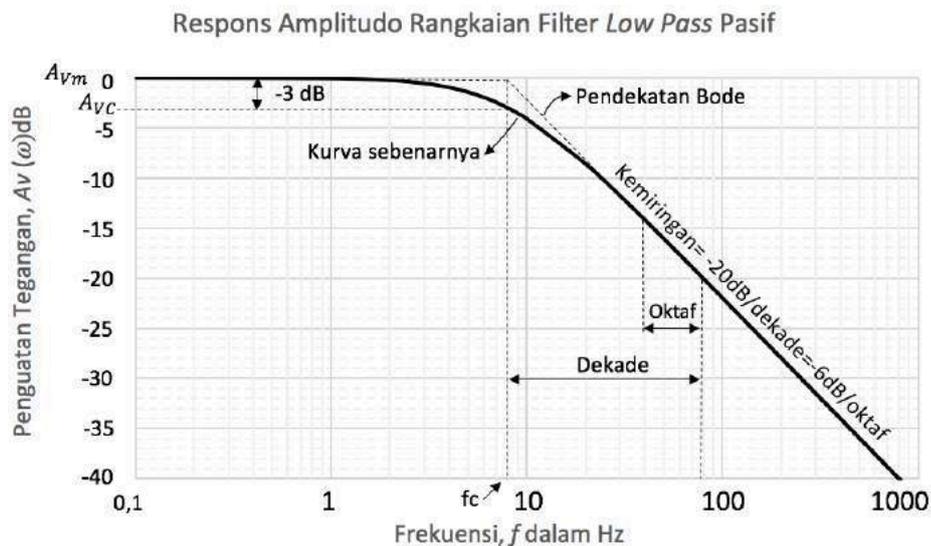
Gambar 12 memberikan makna untuk frekuensi yang sangat rendah, $A_V(\omega)$ bernilai maksimum ($A_{Vm} = 1$), sehingga tegangan input diloloskan sampai batas frekuensi *cut-off* ($\omega_c = 50$ rad/s) yang bersesuaian dengan $A_{Vc} = 0,707 A_{Vm}$ atau $A_{Vc} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_{Vm}$, sedangkan tegangan input dengan $\omega > \omega_c$ akan ditahan/dilemahkan.

Pada umumnya, untuk menunjukkan hubungan antara gain tegangan dan frekuensi tegangan input, digunakan grafik skala *semilog* dengan absis frekuensi (f) berskala logaritmik dalam satuan Hz dan ordinatnya gain tegangan $A_V(\omega)$ berskala

linear dalam satuan *deciBell* (dB). Definisi nilai $A_V(\omega)$ dalam satuan dB diekspresikan melalui persamaan (25) berikut ini.

$$A_V(\omega)_{dB} = 20 \log A_V(\omega) = 20 \log \left(\frac{\omega_c}{\sqrt{(\omega_c)^2 + (\omega)^2}} \right) \quad \text{persamaan (25)}$$

Berdasarkan persamaan (25) dengan $f = \frac{\omega}{2\pi}$, untuk nilai $R=10K\Omega$ dan $C=2\mu F$, dapat digambarkan kurva hubungan antara gain tegangan $A_V(\omega)_{dB}$ versus frekuensi tegangan input f seperti pada gambar 13.



Gambar 13. Respons amplitudo rangkaian filter *low pass* pasif

Grafik hubungan antara $A_V(\omega)_{dB}$ dan f pada gambar 13 disebut dengan Respons Frekuensi atau sering dinamakan juga dengan istilah *Bode Plot*. Respons Frekuensi terdiri atas Respons Amplitudo yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara amplitudo gain tegangan terhadap frekuensi, dan Respons Fase untuk menunjukkan respons frekuensi terhadap perbedaan beda fase antara tegangan output dan tegangan input. Untuk frekuensi tegangan input yang sangat rendah ($\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$), maka persamaan (25) dapat ditulis dalam bentuk,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{\omega \ll \omega_c} = Avm_{dB} = 20 \log\left(\frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + 0^2}}\right)$$

$$Avm_{dB} = 20 \log\left(\frac{\omega_c}{\omega_c}\right) = 20 \log(1)$$

$$Avm_{dB} = 0 \text{ dB}, \quad \text{persamaan (26)}$$

sedangkan nilai $A_V(\omega)_{dB}$ untuk $\omega = \omega_c$ atau $f=f_c$ adalah,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{\omega = \omega_c} = Avc_{dB} = 20 \log\left(\frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega_c^2}}\right)$$

$$Avc_{dB} = 20 \log\frac{\omega_c}{\omega_c\sqrt{2}} = 20 \log\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$Avc_{dB} = -3 \text{ dB}. \quad \text{persamaan (27)}$$

Kurva sesungguhnya pada gambar 13, menjelaskan bahwa untuk kondisi $\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$, gain tegangan bernilai maksimum yakni $Avm_{dB} = 0 \text{ dB}$ yang berarti tegangan input diloloskan sampai batas $\omega = \omega_c$ atau $f = f_c$ dan bersesuaian dengan $Avc_{dB} = -3 \text{ dB}$, sedangkan tegangan input dengan kondisi $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$ akan ditahan atau dilemahkan. Pada sisi lain, jika digunakan pendekatan Bode, terlihat bahwa *gain* tegangan di bawah $\omega_c = 50 \text{ rad/s}$ atau $f_c = 8 \text{ Hz}$ bernilai maksimum yakni $Avm_{dB} = 0 \text{ dB}$, sehingga rangkaian filter *low pass* akan meloloskan tegangan yang dimasukkan ke inputnya. Nilai $f_c = 8 \text{ Hz}$ berasal dari,

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(10^4)(2 \times 10^{-6})} = 7,96 \text{ Hz} \cong 8 \text{ Hz}.$$

Selanjutnya, tegangan input dengan frekuensi di atas f_c akan ditahan atau dilemahkan, sehingga mengalami penurunan *gain* (*roll off*) dengan kelajuan sebesar -20 dB/dekade atau -6 dB/oktaf . Definisi dekade adalah 10 kali lipat, sehingga -20 dB/dekade berarti $A_V(\omega)_{dB}$ berubah -20 dB jika frekuensi naik menjadi 10 kali lipatnya. Sedangkan oktaf didefinisikan sebagai dua kali lipat, sehingga

-6 dB/oktaf berarti $A_V(\omega)_{dB}$ berubah -6 dB jika frekuensi tegangan input naik menjadi dua kalinya.

Kemiringan *roll off* sebesar -20 dB/dekade atau -6 dB/oktaf adalah ciri khas dari rangkaian filter RC pasif atau rangkaian filter orde satu. Nilai kemiringan *roll off* pada filter *low pass* pasif ini terjadi untuk frekuensi tegangan input yang nilainya lebih besar dari frekuensi *cut-off* ($\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$), sehingga persamaan (25) dapat ditulis dalam bentuk,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega \gg \omega_c)} = 20 \log \left(\frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \right) = 20 \log \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega \gg \omega_c)} = 20 \log(\omega_c) - 20 \log(\omega) \quad \text{persamaan (28)}$$

Pada kondisi $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$, andaikata ω_2 adalah frekuensi tegangan input yang nilainya 10 kali ω_1 , merujuk persamaan (28) dapat diperoleh,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} = 20 \log(\omega_c) - 20 \log(10\omega_1)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = 20 \log(\omega_c) - 20 \log(\omega_1)$$

Pengurangan kedua persamaan di atas adalah jarak frekuensi satu dekade sehingga,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = -20 \log(10\omega_1) + 20 \log(\omega_1)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = -\{20 \log(10\omega_1) - 20 \log(\omega_1)\}$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = -\left\{20 \log \left(\frac{10\omega_1}{\omega_1} \right)\right\} = -20 \log(10)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = -20 \text{ dB}$$

Penjelasan ini telah menunjukkan bahwa jika frekuensi tegangan input naik 10 kalinya (1 dekade) maka *gain* tegangan akan turun sebesar -20 dB, hal ini

dikatakan bahwa *gain* tegangan mengalami penurunan dengan kemiringan -20 dB/dekade. Nilai kemiringan sebesar -20 dB/dekade sama dengan -6 dB/oktaf seperti ditunjukkan pada pembuktian berikut ini.

Untuk $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$, jika $\omega_2 = 2\omega_1$ atau ω_2 berjarak satu oktaf terhadap ω_1 , maka berdasarkan persamaan (28), pengurangan *gain* tegangan pada frekuensi yang berjarak satu oktaf dapat ditulis sebagai berikut,

$$\begin{aligned} A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_2=2\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_1)} &= -20 \log(2\omega_1) + 20 \log(\omega_1) \\ A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_2=2\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_1)} &= -\{20 \log(2\omega_1) - 20 \log(\omega_1)\} \\ A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_2=2\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_1)} &= -\left\{20 \log\left(\frac{2\omega_1}{\omega_1}\right)\right\} = -20 \log(2) \\ A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_2=2\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega=\omega_1)} &= -6 \text{ dB} \end{aligned}$$

Bukti tersebut mengindikasikan bahwa setiap frekuensi tegangan input naik dua kalinya, menyebabkan *gain* tegangan turun sebesar -6 dB, kondisi seperti ini dikatakan bahwa *gain* tegangan mengalami penurunan dengan kemiringan -6 dB/oktaf.

Selain mempengaruhi *gain* tegangan, frekuensi tegangan input pada filter *low pass* juga mempengaruhi beda fase tegangan output terhadap inputnya. Untuk menggambarkan pengaruh frekuensi terhadap beda fase ini digunakan grafik respons fase. Beda fase $\Delta\phi(\omega)$ dari tegangan output terhadap inputnya dapat diperoleh melalui persamaan (22) yang diubah bentuknya ke dalam kompleks eksponensial. Tegangan input dan output dalam bentuk kompleks eksponensial dapat dinyatakan dengan,

$$\begin{aligned} V_i(j\omega) &= |V_i(j\omega)|e^{j\phi_i} = V_i(\omega)e^{j\phi_i} \\ V_o(j\omega) &= |V_o(j\omega)|e^{j\phi_o} = V_o(\omega)e^{j\phi_o} \end{aligned}$$

sehingga *gain* tegangan dalam kompleks eksponensial adalah,

$$A_V(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} e^{j(\phi_o - \phi_i)} = A_V(\omega) e^{j\Delta\phi} \quad \text{persamaan (29)}$$

Perlu dikemukakan terlebih dahulu bahwa dalam hitung bilangan kompleks, sembarang bilangan kompleks dapat ditulis dalam bentuk,

$$z = a + jb = |z| (\cos \theta + j \sin \theta) = r e^{j\theta}$$

dengan a adalah bagian real, b bagian imajiner, r magnitudo dari z yang nilainya sebesar $r = |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$, dan θ merupakan perbedaan sudut fase yang besarnya,

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad \text{persamaan (30)}$$

Jadi, agar beda fase $\Delta\phi$ pada persamaan (29) yang berbentuk kompleks eksponensial yakni $A_V(j\omega) = A_V(\omega) e^{j\Delta\phi} = \frac{\omega_c}{\omega_c + j\omega}$ dapat ditentukan nilainya maka bentuknya harus diubah ke dalam format $z = a + jb$ sebagai berikut,

$$A_V(j\omega) = \left(\frac{\omega_c}{\omega_c + j\omega} \right) \left(\frac{\omega_c - j\omega}{\omega_c - j\omega} \right) = \left\{ \frac{\omega_c(\omega_c - j\omega)}{\omega_c^2 + \omega^2} \right\}$$

$$A_V(j\omega) = \frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 + \omega^2} - j \frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}$$

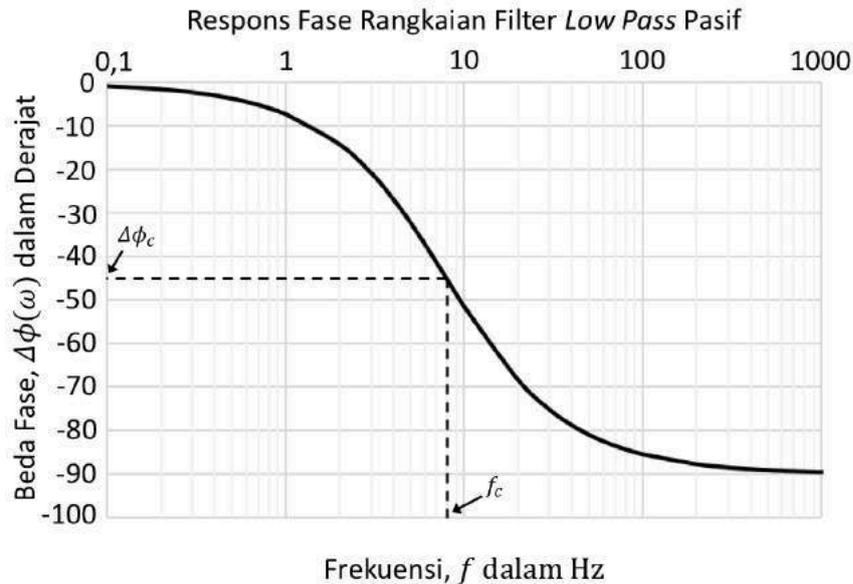
Berdasarkan persamaan tersebut maka dapat ditentukan bagian real $a = \frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 + \omega^2}$ dan bagian imajiner $b = \frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}$, sehingga,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}}{-\frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 + \omega^2}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(-\frac{\omega}{\omega_c} \right)$$

Oleh karena telah diketahui bahwa $\omega_c = \frac{1}{RC}$, maka beda fase tegangan output dan tegangan input dalam fungsi ω dapat ditulis dalam bentuk,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}\left(-\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \text{tg}^{-1}(-\omega RC) \quad \text{persamaan (31)}$$

Merujuk persamaan (31), dapat digambarkan respons fase rangkaian filter *low pass* pasif seperti disajikan pada gambar 14.



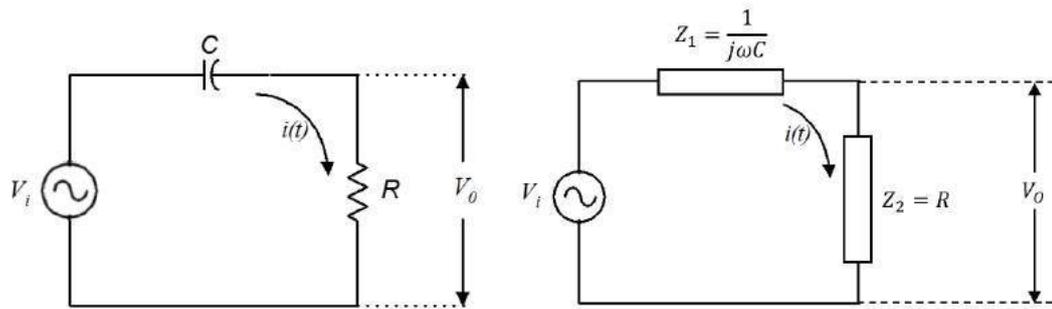
Gambar 14. Respons fase rangkaian filter *low pass* pasif

Gambar 14 menjelaskan bahwa pada frekuensi yang sangat rendah ($\omega \ll \omega_c$) atau $f \ll f_c$, fase tegangan input dan tegangan output bernilai sama atau beda fasenya sebesar $\Delta\phi(\omega) \approx 0$. Semakin tinggi frekuensi tegangan inputnya, beda fase $\Delta\phi(\omega)$ semakin besar, dan pada saat $\omega = \omega_c$ beda fasenya mencapai -45° , sedangkan untuk kondisi $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$, beda fasenya $\Delta\phi(\omega) \approx -90^\circ$. Dalam hal ini tanda negatif menunjukkan bahwa fase tegangan output terlambat terhadap inputnya.

d. Filter *High Pass*

Filter *high pass* adalah rangkaian yang berfungsi meloloskan sinyal input frekuensi tinggi. Rangkaianannya ditunjukkan pada gambar 15, tersusun atas

komponen pasif R dan C membentuk rangkaian seperti diferensiator yakni outputnya diambil dari ujung-ujung resistor, dengan input tegangan berbentuk sinusoidal dan bekerja pada domain frekuensi.



Gambar 15. Rangkaian filter *high pass* pasif (kiri) dan ekivalennya (kanan)

Merujuk gambar 15, tegangan output sebagai fungsi $j\omega$ dapat dinyatakan dalam bentuk,

$$V_o(j\omega) = V_i(j\omega) \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

sehingga *gain* tegangan dapat ditulis sebagai,

$$A_V(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Jika diberikan nilai $\omega_c = \frac{1}{RC}$, maka persamaan dapat disederhanakan lagi menjadi,

$$A_V(j\omega) = \frac{j\omega}{\omega_c + j\omega} \quad \text{persamaan (32)}$$

Seperti halnya pada filter *low pass*, ω_c di sini juga disebut *pole* (kutub), sehingga frekuensi *cut-off* besarnya sama dengan persamaan (23) yakni $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$, dalam hal ini f_c menunjukkan batas frekuensi minimum tegangan input yang diloloskan.

Magnitudo *gain* tegangan $A_V(j\omega)$ pada persamaan (32) dapat ditentukan dengan cara yang sama seperti pada filter *low pass* sebagai berikut,

$$|A_V(j\omega)| = A_V(\omega) = \frac{\sqrt{(j\omega)(-j\omega)}}{\sqrt{(\omega_c + j\omega)(\omega_c - j\omega)}}$$

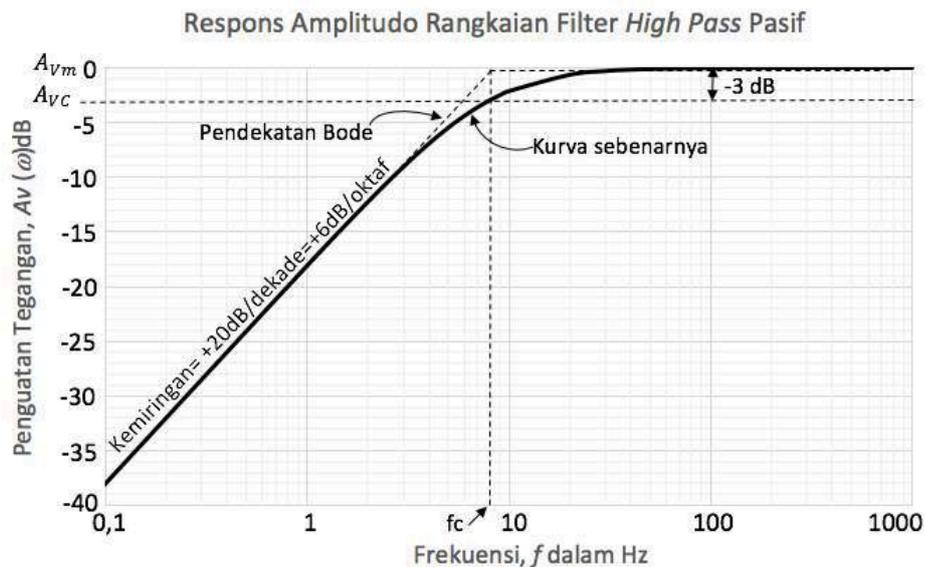
$$A_V(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{\omega_c^2 - j^2\omega^2}}$$

$$A_V(\omega) = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \quad \text{persamaan (33)}$$

Agar dapat diperoleh grafik respons amplitudo, persamaan (33) perlu diubah ke dalam satuan dB sebagai berikut.

$$A_V(\omega)_{dB} = 20 \log A_V(\omega) = 20 \log \left(\frac{\omega}{\sqrt{(\omega_c)^2 + (\omega)^2}} \right) \quad \text{persamaan (34)}$$

Merujuk persamaan (34), untuk nilai $R=10K\Omega$ dan $C=2\mu F$, dapat digambarkan respons amplitudo filter *high pass* dengan menggunakan skala semilog seperti pada gambar 16.



Gambar 16. Respons amplitudo rangkaian filter *high pass* pasif

Berdasarkan respons amplitudo pada gambar 16, untuk frekuensi yang sangat rendah ($\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$), tegangan input mengalami pelemahan. Seiring dengan naiknya frekuensi, *gain* tegangan $A_V(\omega)_{dB}$ juga naik dengan kelajuan

+20 db/dekade atau +6 dB/oktaf. Pada kondisi $\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$, persamaan (34)

dapat ditulis dalam bentuk,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega \ll \omega_c)} = 20 \log \left(\frac{\omega}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \right)$$

dalam hal ini nilai ω dalam pembagi $\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}$ dapat diabaikan terhadap ω_c ,

sehingga persamaan dapat diubah menjadi,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega \ll \omega_c)} = 20 \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega \ll \omega_c)} = 20 \log(\omega) - 20 \log(\omega_c) \quad \text{persamaan (35)}$$

Pada kondisi $\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$, andaikata ω_2 adalah frekuensi tegangan input yang nilainya 10 kali ω_1 , merujuk persamaan (35) dapat diperoleh,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} = 20 \log(10\omega_1) - 20 \log(\omega_c)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = 20 \log(\omega_1) - 20 \log(\omega_c)$$

Jarak satu dekade adalah pengurangan kedua persamaan di atas sehingga,

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = 20 \log(10\omega_1) - 20 \log(\omega_1)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = 20 \log(10\omega_1) - 20 \log(\omega_1)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = 20 \log \left(\frac{10\omega_1}{\omega_1} \right) = +20 \log(10)$$

$$A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_2 = 10\omega_1)} - A_V(\omega)_{dB} \Big|_{(\omega = \omega_1)} = +20 \text{ dB}$$

Hasil ini memberikan bukti bahwa untuk kondisi $\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$ pada filter *high pass* orde satu, jika frekuensi tegangan input naik 10 kalinya (1 dekade) maka *gain* tegangan naik dengan kelajuan sebesar +20 dB/dekade. Langkah yang

sama dapat ditempuh untuk menunjukkan bahwa kelajuan kenaikan gain juga sama dengan +6 dB/oktaf.

Pada kondisi $\omega = \omega_c$ atau $f = f_c$, persamaan (34) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (27) yakni $A_V(\omega)_{dB} \Big|_{\omega = \omega_c} = Av_{c_{dB}} = -3dB$, sedangkan untuk kondisi $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$ juga dapat ditulis seperti pada persamaan (26) yakni $Av_{m_{dB}} = 0$ dB.

Respons fase filter *high pass* dapat digambarkan dengan menurunkan terlebih dahulu persamaan beda fase $\Delta\phi(\omega)$ antara tegangan output terhadap inputnya. Sama seperti pada penentuan beda fase filter *low pass*, beda fase pada filter *high pass* ditentukan dengan mengubah terlebih dahulu fungsi transfer kompleks pada persamaan (32) yakni $A_V(j\omega) = \frac{j\omega}{\omega_c + j\omega}$ ke dalam bentuk $z = a + jb$ sebagai berikut,

$$A_V(j\omega) = \left(\frac{j\omega}{\omega_c + j\omega} \right) \left(\frac{\omega_c - j\omega}{\omega_c - j\omega} \right) = \frac{\omega^2 + j\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}$$

$$A_V(j\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_c^2 + \omega^2} + j \frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}$$

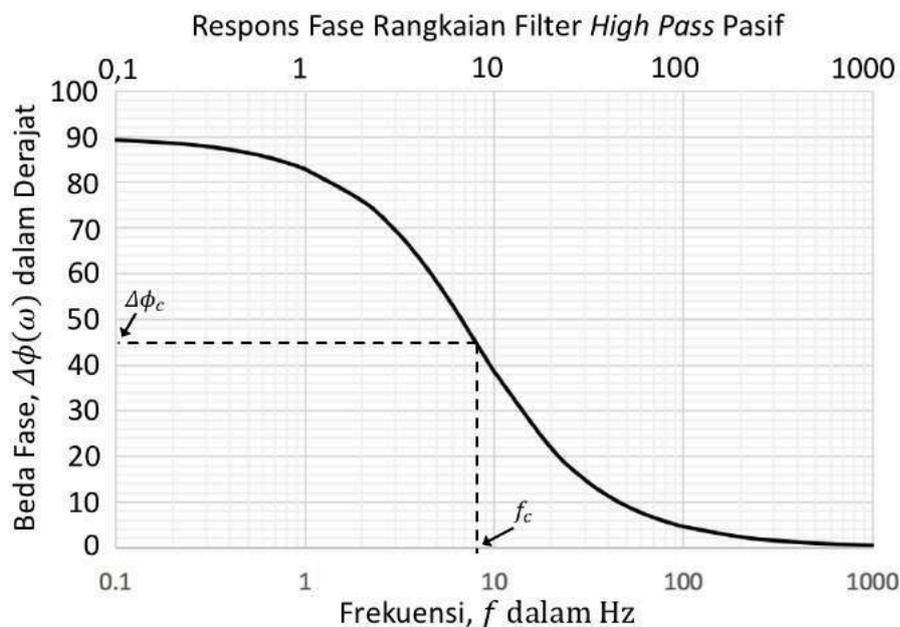
Merujuk fungsi transfer kompleks tersebut, dapat ditentukan bagian real dari fungsi itu yakni $a = \frac{\omega^2}{\omega_c^2 + \omega^2}$ dan bagian imajineranya $b = \frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}$, sehingga beda fase dalam fungsi ω dapat ditulis,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\frac{\omega\omega_c}{\omega_c^2 + \omega^2}}{\frac{\omega^2}{\omega_c^2 + \omega^2}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)$$

Telah diketahui bahwa $\omega_c = \frac{1}{RC}$, maka beda fase tegangan output dan input dalam fungsi ω untuk filter *high pass* orde satu, dapat ditulis dalam bentuk,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\omega RC}\right) \quad \text{persamaan (36)}$$

Merujuk persamaan (36), dapat digambarkan respons fase rangkaian filter *high pass* pasif, yakni $\Delta\phi(\omega)$ dalam satuan derajat versus frekuensi dalam satuan Hz menggunakan skala semilog seperti disajikan pada gambar 17.



Gambar 17. Respons Fase Rangkaian Filter *High Pass* Pasif

Respons fase pada gambar 17 memberikan makna bahwa pada frekuensi yang sangat rendah ($\omega \ll \omega_c$ atau $f \ll f_c$), fase tegangan input dan tegangan output bernilai $\Delta\phi(\omega) \approx 90^\circ$, karena bernilai positif maka dapat dikatakan fase tegangan output mendahului input. Semakin tinggi frekuensi tegangan inputnya, beda fase $\Delta\phi(\omega)$ semakin kecil, dan pada saat $\omega = \omega_c$ beda fasenya mencapai 45° , sedangkan untuk kondisi $\omega \gg \omega_c$ atau $f \gg f_c$, beda fasenya $\Delta\phi(\omega) \approx 0^\circ$ atau fase tegangan output sama dengan fase tegangan inputnya.

3. Karakteristik Diode

Diode yang dimaksud di sini adalah diode semikonduktor yakni piranti elektronika dengan dua elektrode terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat berfungsi sebagai penyearah arus/tegangan bolak-balik. Pada naskah ini, kajiannya disarikan dari konsep-konsep yang telah dikembangkan oleh Millman & Halkias (1972: 1-85) dan Smith & Dorf (1992: 328-358).

a. Karakteristik V-I Diode Secara Teoritik

Karakteristik diode umumnya dinyatakan dengan grafik hubungan antara tegangan pada diode versus arus yang melewatinya sehingga disebut karakteristik tegangan-arus (V-I). Secara teoritis, hubungan antara tegangan dan arus diode dinyatakan oleh persamaan berikut ini,

$$I_D = I_s (e^{V_D / \eta V_T} - 1) \quad \text{persamaan (37)}$$

Keterangan untuk persamaan di atas: (1) I_D adalah arus diode, bernilai positif jika di dalam diode arahnya dari anode ke katode; (2) V_D tegangan diode, bernilai positif jika tegangan anode lebih tinggi (lebih positif) dibandingkan tegangan katode, dan sebaliknya; (3) I_s arus mundur jenuh yang besarnya 10^{-8} s.d. 10^{-14} A; (4) V_T tegangan kesetaraan suhu yang besarnya $V_T = \frac{T}{11.600}$ sehingga pada $T=300^\circ$ K, $V_T=26$ mV dan pada $T=273^\circ$ K, $V_T=25$ mV; (5) η merupakan koefisien emisi, nilainya antara 1 sampai dengan 2 dan untuk silikon pada arus normal nilainya mendekati 2; serta (6) e adalah bilangan natural nilainya 2,72.

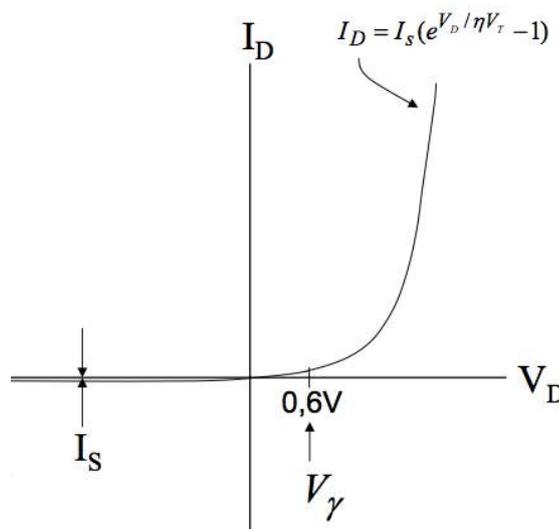
Secara teoritik, berdasarkan persamaan (37) dapat diperoleh nilai I_D untuk berbagai nilai V_D seperti pada tabel 4 dengan asumsi $I_s=10$ nA, $\eta=2$, dan $V_T=26$ mA.

Dari tabel 4 di bawah ini, terlihat bahwa pada $V_D=0,6V$ nilai I_D kira-kira 100.000 kali I_s atau $I_D \approx 1mA$. Jika pada diode silikon ini arus sebesar 100 mA dianggap sedang, maka pada tegangan 0,6V arus sebesar 1mA adalah 1% terhadap arus 100mA tersebut.

Tabel 4. Data karakteristik diode berdasarkan persamaan (37)

Tegangan Mundur		Tegangan Maju	
$V_D(V)$	$I_D(nA)$	$V_D(V)$	$I_D(nA)$
0	0	0	0
-0,02	-3,19	0,01	0,212
-0,05	-6,18	0,02	4,69
-0,1	-8,54	0,1	58,5
-0,2	-9,79	0,2	459
-0,3	-9,97	0,3	3.205
-0,4	-9,99	0,4	22.011
-0,5	-10	0,5	150.841
-0,6	-10	0,6	1.033.362
-0,7	-10	0,7	7.078.894
-0,8	-10	0,8	48.492.587

Berdasarkan tabel 4 juga dapat digambarkan karakteristik V-I diode seperti gambar 18 di bawah ini.

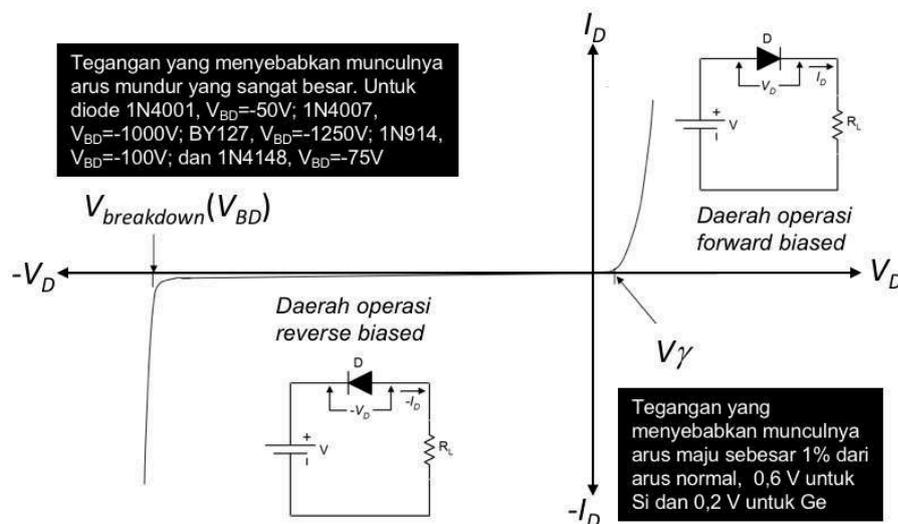


Gambar 18. Karakteristik teoritik diode pertemuan PN

Pada tegangan di bawah 0,6V arus I_D kurang dari 1% sehingga $V_D = 0,6V$ disebut tegangan *ambang (threshold)* atau *cut-in* atau *offset* atau *break point* yang diberi lambang V_γ . Definisi letak V_γ tidak pasti karena di sekitar V_γ kurvanya berupa garis lengkung dan tidak ada titik patah. Biasanya V_γ untuk diode silikon sekitar 0,6V dan untuk diode germanium kira-kira 0,2V.

b. Karakteristik Diode Real Dalam Praktek

Jika gambar 18 di atas diperhatikan, terlihat bahwa pada daerah prasikap maju, arus diode akan naik secara tajam setelah tegangan diode mencapai V_γ . Terlihat pula pada daerah prasikap mundur, arus bernilai konstan terus menerus untuk tegangan mundur yang semakin tinggi dalam arah negatif. Berbeda dengan karakteristik V-I teoriritk, pada karakterisik V-I diode real atau diode dalam praktek, walaupun memberikan kondisi yang sama pada daerah pra sikap maju, yakni arus meningkat setelah V_D mencapai V_γ , namun untuk daerah prasikap mundur memberikan kondisi yang berbeda. Pada suatu tegangan tertentu, arus mundur dalam diode real akan memberikan nilai yang tiba-tiba sangat besar.

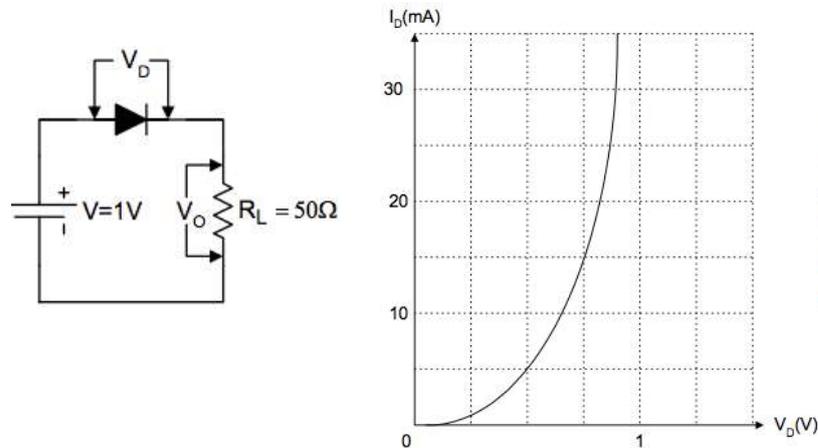


Gambar 19. Karakteristik V-I diode real

Gambar 19 menjelaskan bahwa pada karakteristik V-I diode real terdapat tegangan mundur yang menyebabkan arus mundur berubah membesar secara drastis, yang disebut sebagai tegangan dadal (*breakdown voltage*). Pada saat terjadinya tegangan dadal, daerah pengosongan dalam keadaan lebar, dan terjadi dua peristiwa yang menyebabkan arus bertambah secara cepat yakni *zener breakdown* dan *avalanche breakdown*. Peristiwa *zener breakdown* terjadi karena adanya tegangan mundur yang relatif tinggi, sehingga medan listriknya dapat menarik keluar elektron dari ikatan kovalen yang menyebabkan terbentuknya pasangan elektron dan *hole* sebagai pengangkut muatan, yang memungkinkan terjadinya arus mundur. *Avalanche breakdown* disebut juga peristiwa tabrakan beruntun. Pada peristiwa ini, elektron dan *hole* yang telah dibangkitkan dipercepat oleh medan listrik tinggi, karena kecepatannya tinggi pembawa muatan tersebut menabrak ikatan kovalen sehingga menambah pembangkitan beruntun pasangan elektron-*hole* yang pada akhirnya mempercepat pertambahan arus mundur.

c. Analisis Garis Beban Pada Rangkaian Diode

Diode adalah komponen non linear, sehingga hukum-hukum arus dan tegangan untuk komponen linear seperti Hukum *Kirchhoff* tidak dapat secara langsung diberlakukan pada analisis rangkaian yang mengandung komponen ini. Untuk itu diperlukan analisis grafis atau disebut juga dengan analisis garis beban (*load line analysis*) terhadap rangkaian yang mengandung komponen non linear seperti diode. Pada deskripsi teori ini diberikan contoh rangkaian dan karakteristik diode yang akan dianalisis seperti gambar 20. Uraian materi berikut ini diturunkan dari konsep-konsep yang telah dikembangkan oleh Mottershead (2013).



Gambar 20. Rangkaian dan karakteristik V-I diode untuk contoh analisis

Analisis untuk menentukan besarnya arus, tegangan diode, dan tegangan output dari rangkaian pada gambar 20 menggunakan analisis garis beban dapat dilakukan melalui prosedur seperti berikut ini.

1) Menyusun Persamaan Arus

Merujuk gambar 20 sebelah kiri, dapat dituliskan persamaan tegangan pada rangkaian diode sebagai berikut,

$$V = V_D + V_o = V_D + I_D R_L$$

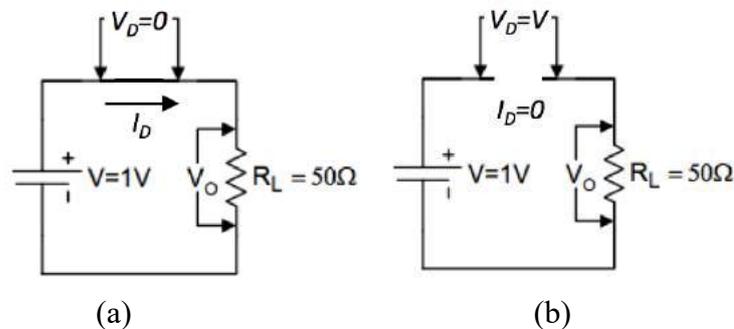
sehingga dapat diperoleh persamaan arus,

$$I_D = \frac{-V_D + V}{R_L} = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L} \tag{persamaan (38)}$$

Jika diperhatikan, persamaan arus pada rangkaian diode tersebut identik dengan persamaan garis lurus $y = ax + b$ dengan $y = I_D$, $x = V_D$, $a = -\frac{1}{R_L}$ dan $b = \frac{V}{R_L}$. Dalam visualisasi grafis, persamaan (38) dapat digambarkan sebagai garis lurus pada koordinat kartesian yang memiliki sumbu V_D dan sumbu I_D dengan gradien atau kemiringan $-\frac{1}{R_L}$.

2) Menetapkan Titik Potong Garis Pada Sumbu I_D dan Sumbu V_D

Penentuan titik potong garis $I_D = -\frac{1}{R_L}V_D + \frac{V}{R_L}$ pada sumbu I_D sesungguhnya adalah mencari nilai arus maksimum yang mengalir pada rangkaian sehingga diasumsikan $V_D=0$. Hal itu berarti rangkaian ekuivalennya disusun dengan menghubungkan ujung-ujung diode sehingga menjadi rangkaian tertutup (*close circuit*) seperti pada gambar 21 (a).



Gambar 21. Rangkaian ekuivalen untuk asumsi: (a) $V_D=0$, dan (b) $I_D=0$

Sementara itu, penentuan titik potong garis $I_D = -\frac{1}{R_L}V_D + \frac{V}{R_L}$ pada sumbu V_D esensinya adalah menghitung tegangan maksimum pada ujung-ujung diode sehingga digunakan asumsi $I_D = 0$. Hal ini berarti rangkaian ekuivalennya menjadi bersifat terbuka (*open circuit*) yang diperoleh dengan melepas diode dari rangkaian seperti diilustrasikan pada gambar 21 (b).

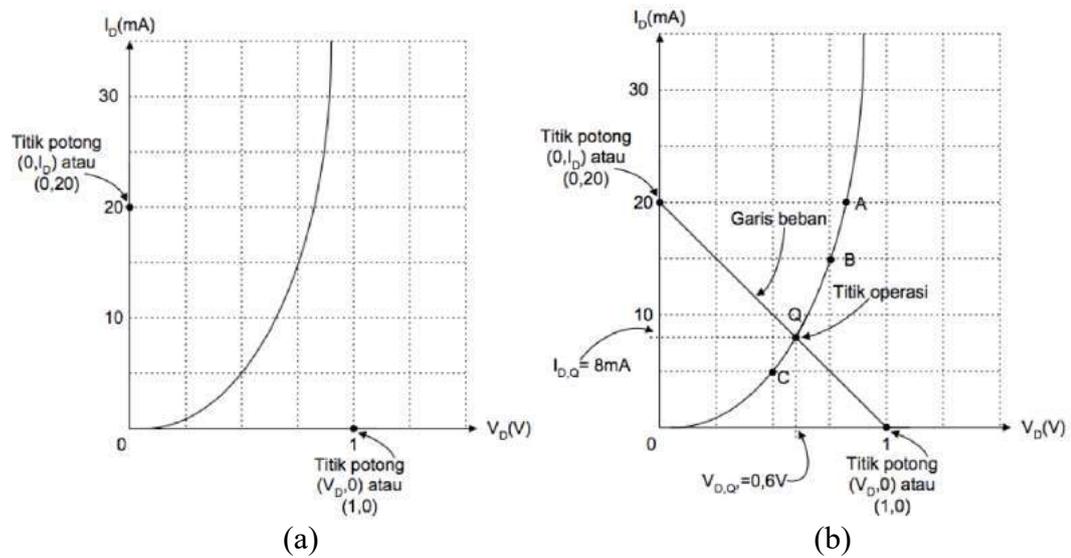
Mengacu persamaan (38) dan gambar 21 (a), dengan asumsi $V_D=0$ maka untuk contoh rangkaian diode pada gambar 20, titik potong garis pada sumbu I_D diperoleh melalui cara,

$$I_D = -\frac{1}{R_L}V_D + \frac{V}{R_L}$$

$$I_D = -\frac{1}{R_L} 0 + \frac{V}{R_L}$$

$$I_D = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ A} = 20 \text{ mA.}$$

Jadi, dengan $I_D = 20 \text{ mA}$ dapat ditetapkan titik potong garis pada sumbu I_D yakni di koordinat $(V_D, I_D) = (0, 20)$ seperti pada gambar 22 (a).



Gambar 22. Analisis garis beban pada rangkaian diode

Untuk titik potong garis $I_D = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L}$ pada sumbu V_D , oleh karena digunakan asumsi $I_D=0$, maka berdasarkan persamaan (38) dan rangkaian ekivalen pada gambar 21 (b), dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut,

$$I_D = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L}$$

$$0 = -\frac{1}{R_L} V_D + \frac{V}{R_L}$$

$$V_D = V = 1 \text{ volt}$$

Jadi, dengan $V_D = 1$ volt dapat ditetapkan titik potong garis pada sumbu V_D yakni di koordinat $(V_D, I_D) = (1, 0)$ seperti pada gambar 22 (a).

3) Membuat Garis Beban

Setelah dapat ditetapkan titik potong garis $I_D = -\frac{1}{R_L}V_D + \frac{V}{R_L}$ pada sumbu I_D dan sumbu V_D berturut-turut di koordinat $(V_D, I_D) = (0, 20)$, dan $(V_D, I_D) = (1, 0)$ seperti divisualisasikan pada gambar 22 (a), selanjutnya dapat ditarik garis dari titik $(0,20)$ ke titik $(1,0)$ seperti pada gambar 22 (b). Garis tersebut disebut garis beban (*load line*) karena gradien atau kemiringannya ditentukan oleh nilai resistansi beban yakni $-\frac{1}{R_L}$, dan oleh karenanya pula analisisnya dinamakan analisis garis beban.

4) Menentukan Titik Operasi Diode

Tujuan analisis garis beban adalah untuk menentukan tegangan dan arus diode secara grafis. Tegangan dan arus diode ini dapat ditentukan dengan membuat titik operasi diode terlebih dahulu. Berdasarkan garis beban yang telah diperoleh, titik operasi Q dapat ditentukan dengan membuat titik pada perpotongan antara garis beban dengan kurva statis (kurva karakteristik V-I pada daerah prasikap maju maupun prasikap mundur) seperti pada gambar 22 (b).

5) Menentukan Arus dan Tegangan Diode

Tegangan dan arus diode ditentukan dengan menarik garis dari titik operasi Q ke arah horisontal dan vertikal. Jika ditarik garis horisontal dari titik operasi Q ke arah sumbu I_D (ordinat) maka akan ditemukan arus $I_{DQ}=8$ mA, dan penarikan garis vertikal dari titik operasi ke arah sumbu V_D (absis) akan dapat diperoleh tegangan diode $V_{DQ}=0,6$ V, seperti divisualisasikan pada gambar 22 (b). Tegangan V_{DQ} dan arus I_{DQ} juga menunjukkan spesifikasi titik operasi Q dari diode yang

dioperasikan dengan sumber tegangan seperti ditunjukkan pada gambar 20. Dari analisis ini juga dapat ditentukan tegangan output rangkaian yakni sebesar,

$$V = V_D + V_o$$

dan oleh karena $V_D = V_{DQ}$ maka,

$$V_o = V - V_{DQ} = 1 - 0,6 = 0,4 \text{ volt}$$

6) Resistansi DC Diode

Berdasarkan analisis grafik telah dapat ditemukan tegangan dan arus diode pada titik tertentu. Resistansi DC atau resistansi statis (R_F) suatu titik pada kurva statis dari diode didefinisikan sebagai,

$$R_F = \frac{V_D}{I_D}$$

dan untuk titik operasi Q, resistansi statis diode sebesar,

$$R_F = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}} = \frac{0,6 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = \frac{0,6 \text{ V}}{8 \times 10^{-3} \text{ A}} = 75 \Omega$$

Besarnya resistansi statis diode tergantung pada titik operasi atau garis beban sehingga jika titik operasi bergeser dari titik Q ke titik A atau ke titik B atau ke titik C seperti ditunjukkan pada gambar 22 (b), nilai resistansi statis R_F juga berubah.

d. Analisis Rangkaian Diode Menggunakan Model

Cara lain yang lazim digunakan untuk melakukan analisis rangkaian diode adalah dengan memodelkan komponen ini sebagai komponen linear, sehingga modelnya sering disebut sebagai *piece wise linear model* (model linear sepotong-sepotong). Pada pemodelan ini, terdapat tiga jenis model diode yakni model pendekatan I, pendekatan II dan model pendekatan III.

Pada model pendekatan I, dalam keadaan *forward biased*, diode dianggap sebagai saklar tertutup sedangkan dalam keadaan *reverse biased* dianggap seperti saklar terbuka. Tabel 5 berikut ini menunjukkan perbandingan rangkaian dan karakteristik diode asli dan diode dengan model Pendekatan I untuk konfigurasi prasikap maju dan prasikap mundur.

Tabel 5. Model diode menggunakan Pendekatan I

Prasikap/ Karakteristik	Rangkaian Asli	Rangkaian Dengan Model
<i>Forward Biased</i>		
<i>Reverse Biased</i>		
Karakteristik V-I		

Pada model Pendekatan I terlihat bahwa untuk *forward biased* diodenya diganti dengan kabel sehingga rangkaiannya menjadi bersifat tertutup dan mengandung komponen linear saja, sedangkan pada *reverse biased* rangkaiannya menjadi terbuka karena diode dilepas dari rangkaian.

Pada model pendekatan II, diode tidak bersifat diskrit lagi (hanya ON dan OFF saja), namun untuk keadaan *forward biased*, diode dapat dianggap sebagai

sumber tegangan sebesar V_γ (untuk silikon $V_\gamma=0,6V$ dan untuk germanium $V_\gamma=0,2V$), sedangkan dalam keadaan *reverse biased* masih sama seperti pada Pendekatan I dianggap seperti saklar terbuka. Tabel 6 menunjukkan perbedaan rangkaian dan karakteristik diode asli dan diode dengan model Pendekatan II.

Tabel 6. Model diode menggunakan Pendekatan II

Prasikap/ Karakteristik	Rangkaian Asli	Rangkaian Dengan Model
<i>Forward Biased</i>		
<i>Reverse Biased</i>		
Karakteristik V-I		

Tabel 6 memperlihatkan bahwa pada model dengan Pendekatan II, untuk keadaan *forward biased* diode diganti dengan tegangan *cut-in* V_γ , sehingga komponen-komponen penyusun rangkaian menjadi linear semua. Sementara itu, untuk keadaan *reverse biased*, rangkaian dengan model tetap bersifat terbuka.

Model pendekatan III untuk diode merupakan model yang paling kompleks, namun dapat merepresentasikan diode mendekati karakter yang sesungguhnya. Pada model ini, dalam keadaan *forward biased*, diode dapat dianggap sebagai

sumber tegangan sebesar V_γ dengan resistansi dinamis *forward* r_F yang terpasang secara seri, sedangkan dalam keadaan *reverse biased* dapat dianggap sebagai resistansi dinamis *reverse* r_R . Perbandingan rangkaian/karakteristik diode asli dan diode dengan model Pendekatan III ditunjukkan pada Tabel 7.

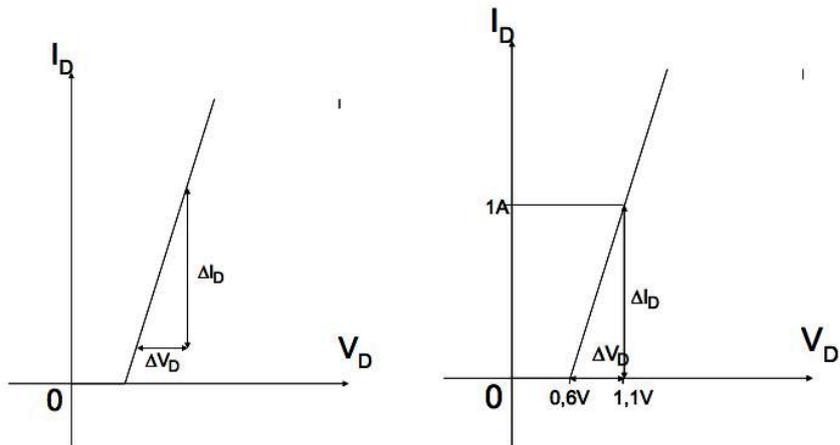
Tabel 7. Model diode menggunakan Pendekatan III

Prasikap/ Karakteristik	Rangkaian Asli	Rangkaian Dengan Model
<i>Forward Biased</i>		
<i>Reverse Biased</i>		
Karakteristik V-I		

Nilai resistansi dinamis *forward* r_F pada pendekatan III dapat ditentukan dengan rumus,

$$r_F = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \quad \text{persamaan (39)}$$

dalam hal ini ΔI_D merupakan kenaikan arus yang disebabkan oleh kenaikan tegangan diode ΔV_D seperti ditunjukkan oleh gambar 23 berikut ini.

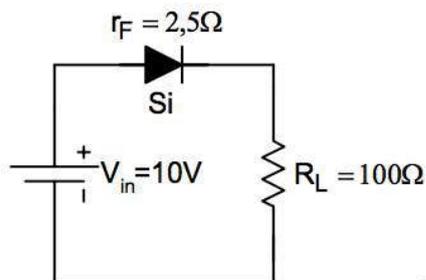


Gambar 23. Penentuan resistansi dinamis pada Model Pendekatan III

Sebagai contoh, jika tegangan diode silikon dalam keadaan *forward biased* sebesar 1,1 V menghasilkan arus yang mengalir sebesar 1A, maka besarnya r_F dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut. Dalam hal ini dianggap arus diode $I_D=0$ ketika tegangan diode $V_D=0,6V$, sehingga dengan menggunakan persamaan (39) di atas dapat diperoleh:

$$r_F = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} = \frac{1,1V - 0,6V}{1 A - 0 A} = 0,5\Omega$$

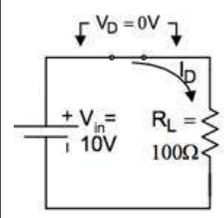
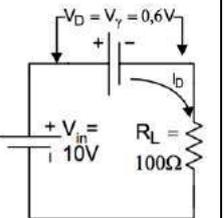
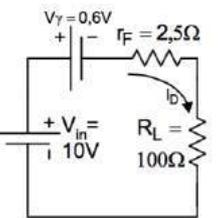
Berikut ini adalah contoh penyelesaian masalah rangkaian diode dengan berbagai model. Andaikata diketahui rangkaian diode yang akan dianalisis seperti ditunjukkan pada gambar 24 berikut ini.



Gambar 24. Rangkaian untuk contoh analisis diode dengan model

Analisis untuk menentukan besarnya arus dan tegangan diode menggunakan model dapat dilakukan seperti pada tabel berikut ini. Berdasarkan hasil analisis pada tabel 8 di bawah ini, terlihat bahwa pendekatan I menghasilkan tegangan diode 0 volt, sehingga kurang mencerminkan keadaan diode yang sesungguhnya. Jika digunakan pendekatan II dan pendekatan III, akan menghasilkan tegangan diode masing-masing sebesar 0,6 volt dan 0,8 volt yang lebih mencerminkan keadaan real dari watak diode.

Tabel 8. Contoh analisis rangkaian dengan model untuk rangkaian gambar 24

Penyelesaian	Pendekatan I	Pendekatan II	Pendekatan III
Rangkaian Ekuivalen			
Arus	$I_D = \frac{V_{in}}{R_L}$ $I_D = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega}$ $I_D = 0,1 \text{ A}$	$I_D = \frac{V_{in} - V_\gamma}{R_L}$ $I_D = \frac{10 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{100 \Omega}$ $I_D = 0,094 \text{ A}$	$I_D = \frac{V_{in} - V_\gamma}{R_L + r_F}$ $I_D = \frac{10 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{100 \Omega + 2,5 \Omega}$ $I_D = 0,092 \text{ A}$
Tegangan	$V_D = 0$	$V_D = 0,6 \text{ V}$	$V_D = V_{in} - I_D R_L$ $V_D = 10 \text{ V} - 0,092 \text{ A} \times 100 \Omega$ $V_D = 0,8 \text{ V}$

4. Rangkaian Pembentuk Gelombang

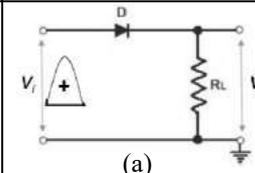
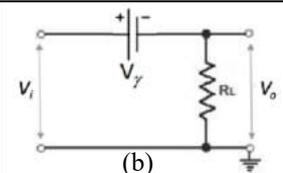
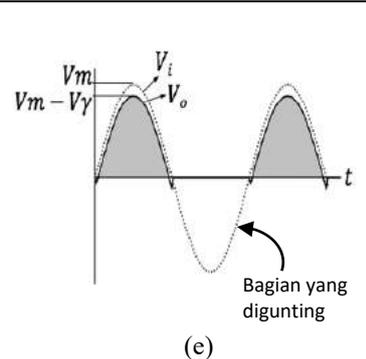
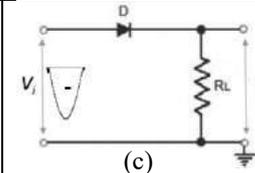
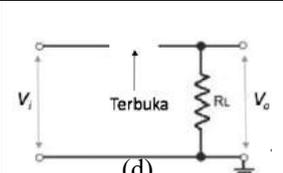
Salah satu fungsi diode adalah sebagai rangkaian pemroses sinyal yang menghasilkan bentuk-bentuk gelombang tertentu. Rangkaian pembentuk

gelombang ini menjalankan fungsinya dengan melakukan pengguntingan menggunakan *clipper* atau pengirisan menggunakan *slicer*.

Rangkaian *clipper* atau penggunting berfungsi memotong bagian positif dan/atau negatif dari suatu sinyal yang diberikan ke inputnya. Terdapat beberapa jenis rangkaian *clipper* menggunakan diode antara lain *clipper* seri negatif, *clipper* seri positif, *clipper* paralel negatif, *clipper* paralel positif, *clipper* negatif berprasikap, *clipper* positif berprasikap, *clipper* kombinasi, dan *clipper* diode Zener. Selain itu, terdapat pula rangkaian sejenis *clipper* yakni *slicer* atau pengiris.

a. *Clipper* Seri Negatif

Rangkaian ini disebut dengan *clipper* seri negatif karena outputnya diambil dari beban resistansi R_L yang dirangkai secara seri dengan diode dan berfungsi memotong bagian negatif dari gelombang input. Rangkaiannya ditunjukkan pada gambar 25 berikut ini.

Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekuivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>			
<i>Reverse Biased</i>			

Gambar 25. Rangkaian *Clipper* Seri Negatif

Cara kerja rangkaian ini dapat dijelaskan dengan berbagai model pendekatan yang ada. Jika digunakan pendekatan II dari model diode, maka

rangkaiannya pada gambar 25 (a) dan 25 (c) dapat diubah menjadi rangkaian ekuivalen pada gambar 25 (b) dan 25 (d). Pada saat input berfase positif menyebabkan diode ON (*forward biased*), sehingga $V_o = V_i - V_\gamma$. Untuk $V_i = V_m$, tegangan output berkurang sebesar V_γ menjadi $V_o = V_m - V_\gamma$. Selanjutnya, ketika input berfase negatif, diode OFF (*reverse biased*) sehingga $V_o = 0$. Terlihat bahwa rangkaian *clipper* ini melakukan pengguntingan fase negatif dari gelombang berbentuk sinus. Kelemahan *clipper* ini adalah bentuk gelombang yang tidak digunting, tegangan maksimumnya mengalami penurunan sebesar V_γ .

b. *Clipper* Seri Positif

Jika rangkaian pada gambar 25 di atas, diode penyusunnya dibalik polaritasnya maka akan diperoleh rangkaian *clipper* seri positif. Sama dengan *clipper* seri negatif, output rangkaian ini diambil dari ujung-ujung beban resistansi R_L yang dirangkai secara seri dengan diode, namun fungsinya memotong bagian positif dari sinyal input.

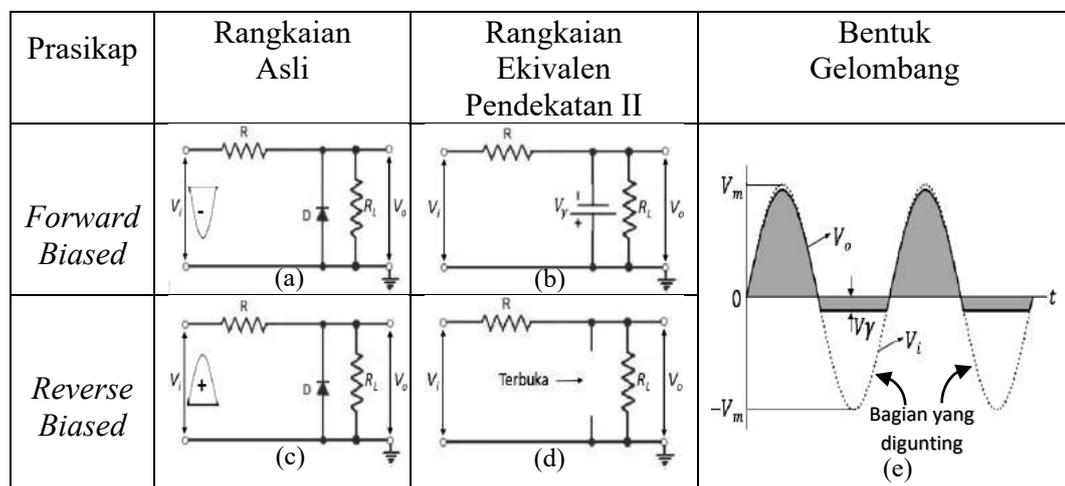
Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekuivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>			
<i>Reverse Biased</i>			

Gambar 26. Rangkaian *Clipper* Seri Positif

Ketika input berfase positif, diode dalam keadaan *reverse biased* atau OFF, rangkaian menjadi seperti pada gambar 26 (d), sehingga tegangan outputnya $V_o=0$. Namun, pada saat input berfase negatif, diode menjadi ON (*forward biased*), rangkaian menjadi seperti pada gambar 26 (b), sehingga tegangan output bernilai $V_o = V_i + V_\gamma$, dan ketika $V_i = -V_m$, tegangan output bernilai $V_o = -V_m + V_\gamma$. Rangkaian *clipper* ini melakukan pengguntingan fase positif dari gelombang sinus, sehingga outputnya berbentuk setengah gelombang berfase negatif.

c. *Clipper* Paralel Negatif

Sesuai dengan namanya, rangkaian *clipper* ini berfungsi menggunting bagian negatif dari sinyal yang dimasukkan ke inputnya dan outputnya diambil dari ujung-ujung diode atau paralel dengan diode. Rangkaiannya dengan model pendekatan II ditunjukkan pada gambar 27.



Gambar 27. Rangkaian *Clipper* Paralel Negatif

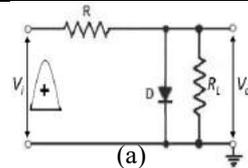
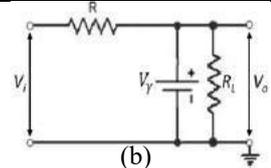
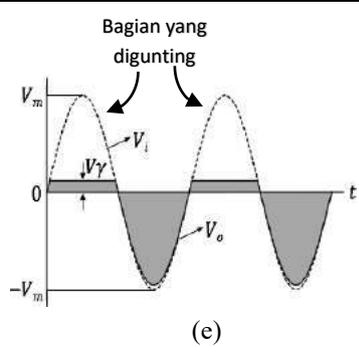
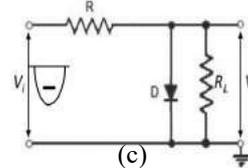
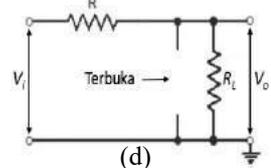
Pada saat input berfase positif, diode OFF dan dapat dianggap lepas dari rangkaian seperti pada gambar 27 (d), sehingga dapat diperoleh,

$$V_o = \frac{R_L}{R+R_L} V_i \quad \text{persamaan (40)}$$

Jika $R_L \gg R$, maka nilai tegangan output dapat dianggap sama dengan nilai tegangan inputnya yakni $V_o \approx V_i$. Ketika input berfase negatif, diode ON sehingga berdasarkan rangkaian ekivalen pada gambar 27 (b) tegangan outputnya menjadi $V_o = -V_\gamma$. Rangkaian *clipper* ini melakukan pengguntingan fase negatif gelombang sinus dan memiliki kelemahan pengguntingan tidak pada *base line* (sumbu absis t).

d. *Clipper* Paralel Positif

Jika rangkaian pada gambar 27 (a), polaritas diodenya dibalik maka akan diperoleh rangkaian *clipper* paralel positif yang berfungsi melakukan pengguntingan terhadap bagian positif dari sinyal inputnya. Rangkaian ini dengan model diode pendekatan II ditunjukkan pada gambar 28.

Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>			
<i>Reverse Biased</i>			

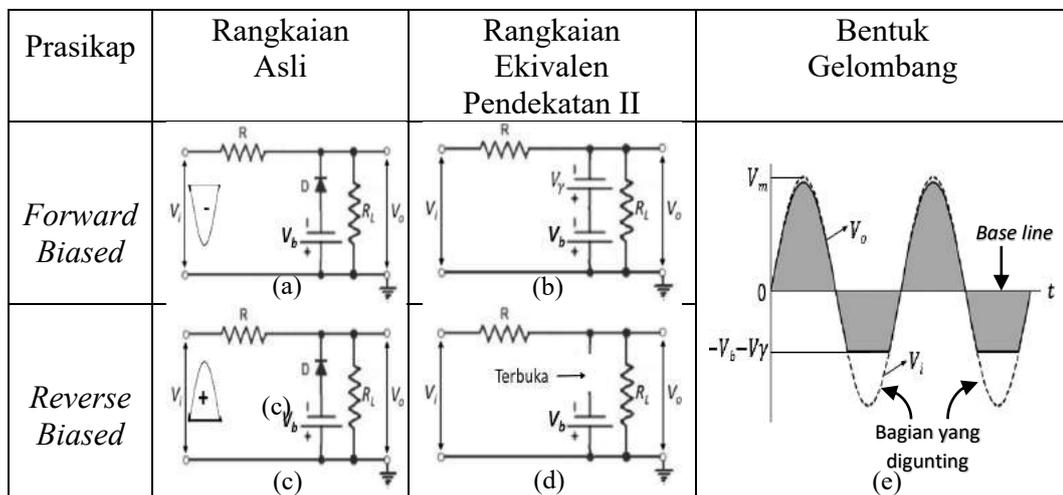
Gambar 28. Rangkaian *Clipper* Paralel Positif

Dari gambar 28 (a) terlihat bahwa pada saat input berfase positif, diode dalam keadaan ON (*forward biased*), dan oleh karena digunakan model diode pendekatan II, ujung-ujung diode dapat diganti dengan tegangan *cut-in* seperti pada gambar 28 (b), sehingga $V_o = +V_\gamma$. Sebaliknya, ketika input berfase negatif, diode menjadi OFF (*reverse biased*), rangkaian ini menjadi seperti gambar 28 (d), dan

jika $R_L \gg R$, maka nilai tegangan output dapat dianggap sama dengan nilai tegangan inputnya yakni $V_o \approx V_i$ dalam arah negatif. Jadi, rangkaian *clipper* ini melakukan pengguntingan fase positif gelombang sinus yang dimasukkan ke inputnya dan memiliki kelemahan pengguntingan tidak pada *base line*.

e. *Clipper* Negatif Berprasikap (*Biased Negative Clipper*)

Rangkaian *clipper* positif dan negatif yang telah dibahas di muka melakukan pemotongan bagian dari bentuk gelombang tegangan inputnya pada posisi *base line*. Selain itu, terdapat pula rangkaian *clipper* yang melakukan pemotongan bentuk gelombang di atas atau di bawah *base line*. *Clipper* negatif berprasikap adalah rangkaian yang memotong bagian negatif dari bentuk gelombang yang posisi pemotongannya dapat diatur dengan tegangan prasikap yang nilainya di bawah *base line*. Rangkaianannya ditunjukkan pada gambar 29.



Gambar 29. Rangkaian *Clipper* Negatif Berprasikap

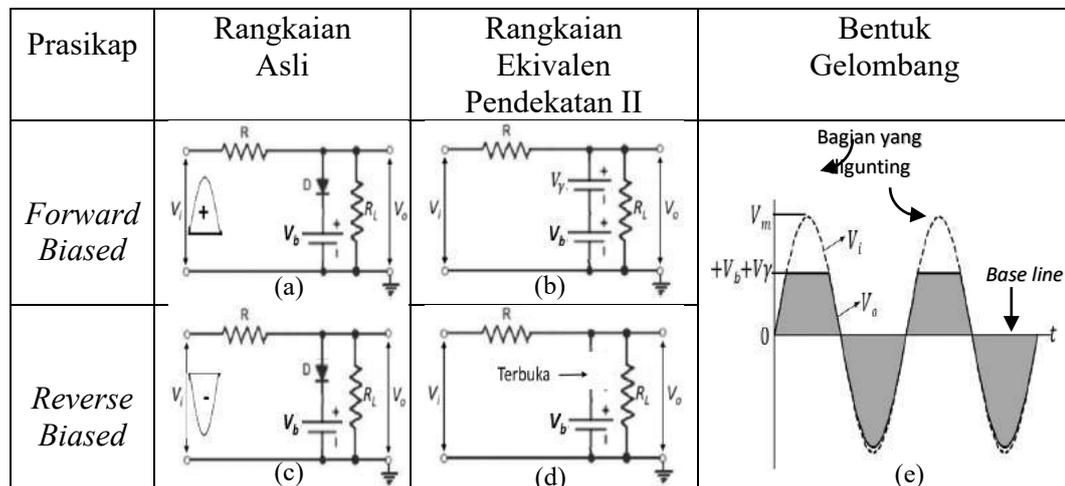
Jika digunakan model diode pendekatan II, pada saat input berfase positif seperti pada gambar 29 (c), diode menjadi OFF seolah-olah dilepas dari rangkaian

seperti pada gambar 29 (d), sehingga $V_o=V_i$. Penjelasan keadaan ini sama seperti penjelasan pada rangkaian *clipper* paralel negatif di muka.

Pada rangkaian ini, V_b menunjukkan sumber tegangan prasikap (*bias*) yang nilainya lebih kecil dari pada tegangan maksimum ($V_b < V_m$). Jika input berfase negatif seperti pada gambar 29 (a), diode menjadi ON dan dapat diganti dengan V_f seperti pada gambar 29(b), sehingga $V_o=V_i$ sampai dengan batas $(-V_b - V_f)$. Terlihat bahwa rangkaian *clipper* ini memotong fase negatif pada level tegangan prasikap $-V_b$.

f. *Clipper* Positif Berprasikap (*Biased Positive Clipper*)

Untuk memperoleh pemotongan pada bagian positif sampai batas tegangan prasikap $+V_b$, dilakukan dengan membalik polaritas diode dari rangkaian pada gambar 29 di atas, sehingga rangkaianannya menjadi seperti pada gambar 30.



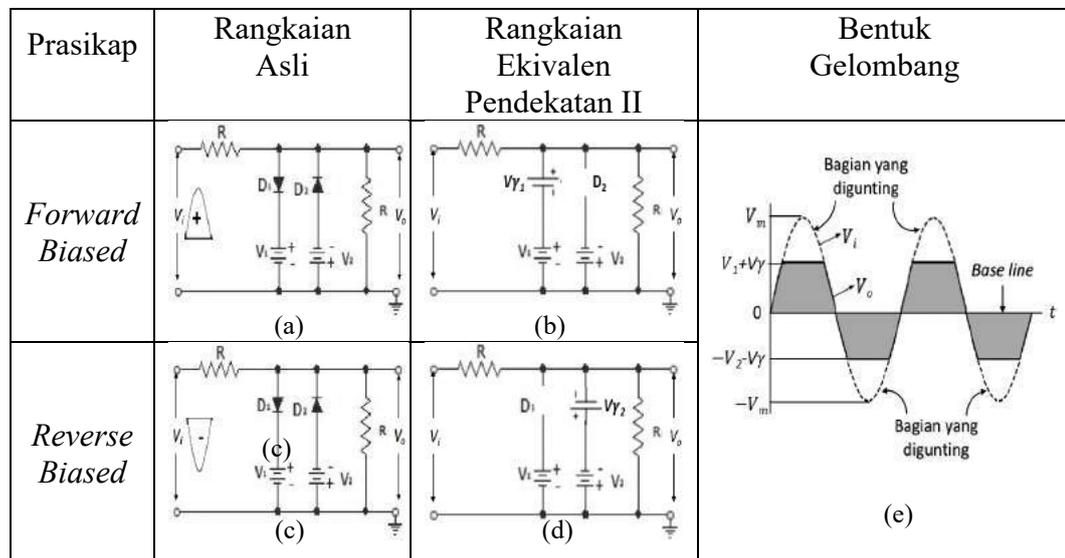
Gambar 30. Rangkaian *Clipper* Positif Berprasikap

Gambar 30 (a) memperlihatkan bahwa saat input berfase positif, diode menjadi ON dan menurut pendekatan II diode dapat diganti dengan V_f seperti pada

gambar 30 (b), sehingga $V_o = V_i$ sampai batas $(+V_b + V_\gamma)$. Sebaliknya, pada saat V_i berfase negatif seperti pada gambar 30 (c), diode berubah keadaannya menjadi OFF dan rangkaiannya menjadi seperti pada gambar 30(d). Keadaan ini mengakibatkan tegangan output bernilai $V_o = \frac{R_L}{R+R_L} V_i$, dan untuk $R_L \gg R$ akan memberikan tegangan output sebesar $V_o = V_i$. Tampak bahwa rangkaian *clipper ini* memotong fase positif dari gelombang sinusoidal yang dimasukkan ke inputnya pada batas tegangan prasikap $+V_b$.

g. *Clipper Kombinasi*

Rangkaian *clipper* ini merupakan gabungan antara rangkaian *clipper* positif dan negatif yang berfungsi melakukan pemotongan pada sisi positif dan sisi negatif dari bentuk gelombang inputnya.



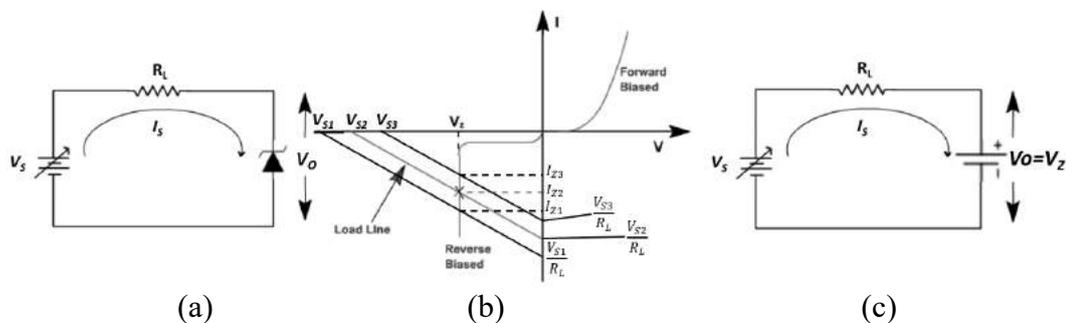
Gambar 31. Rangkaian *Clipper* Kombinasi

Jika digunakan model diode pendekatan II, untuk kondisi tegangan input berfase positif D_1 akan ON dan D_2 OFF seperti ditunjukkan pada gambar 31 (a) dan

31 (b), akibatnya rangkaian menjadi seperti *clipper* positif berprinsip yang memotong bagian positif sinyal pada tegangan $+V_1 + V_\gamma$. Sebaliknya, apabila tegangan input berfase negatif, D_1 menjadi OFF dan D_2 ON, mengakibatkan rangkaian berfungsi sebagai *clipper* negatif berprinsip yang memotong bagian negatif dari bentuk gelombang input pada batas $-V_1 - V_\gamma$.

h. *Clipper* Diode Zener

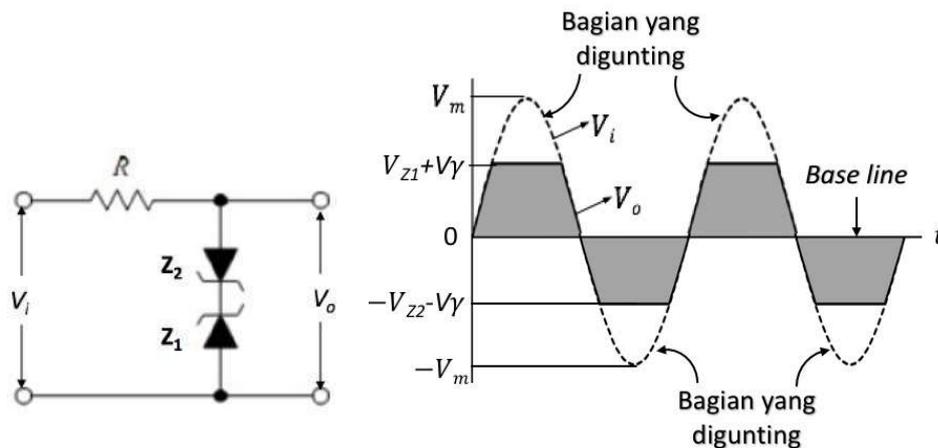
Rangkaian *clipper* kombinasi pada gambar 31 di atas, jika komponen diodenya diganti dengan menggunakan diode Zener, maka akan diperoleh rangkaian *clipper* diode Zener. Sesuai dengan tujuan pengembangannya, diode Zener dioperasikan pada daerah *reverse biased* seperti pada gambar 32 (a), sedangkan karakteristiknya ditunjukkan pada gambar 32 (b).



Gambar 32. Diode Zener: (a) Rangkaian asli; (b) karakteristik V-I; dan (c) rangkaian ekivalen (Agarwal, 2009)

Mengacu gambar 32 (b), terlihat bahwa pemasangan tegangan mundur V_s yang bervariasi, menyebabkan tegangan output rangkaian bernilai konstan di sekitar tegangan dadal (*breakdown*) V_Z , sehingga diode dapat dimodelkan sebagai tegangan dadal seperti ditunjukkan pada gambar 32 (c). Dengan menggunakan

model ini maka rangkaian *clipper* kombinasi dapat disusun dengan menggunakan diode Zener seperti pada gambar 33.



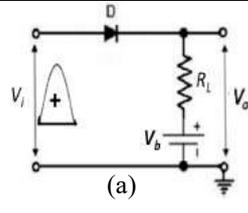
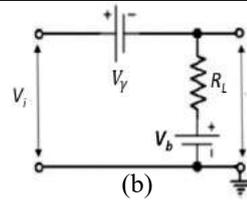
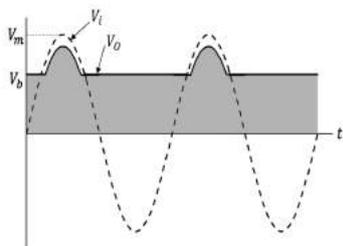
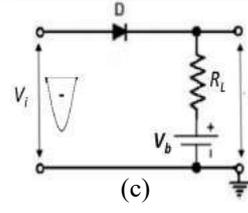
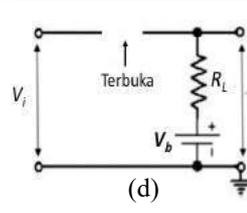
Gambar 33. Rangkaian *Clipper* Diode Zener

Jika tegangan input berfase positif, diode Zener Z_2 dalam keadaan *forward biased* dan dapat diganti dengan tegangan *cut-in* V_γ , sedangkan Z_1 *reverse biased* dan dapat diganti dengan tegangan dadal V_{Z1} , dengan demikian rangkaiannya menjadi seperti *clipper* positif berprinsip dengan rangkaian ekuivalen seperti pada gambar 31 (b), yang berfungsi memotong bagian positif sinyal pada level tegangan $+V_{Z1} + V_\gamma$.

Sebaliknya, jika tegangan input berfase negatif, Z_1 dalam keadaan *reverse biased* dan diode Z_2 *forward biased* sehingga rangkaiannya menjadi *clipper* negatif berprinsip dengan rangkaian ekuivalen seperti pada gambar 31 (d), yang berfungsi memotong bagian negatif sinyal pada level tegangan $-V_{Z1} - V_\gamma$.

i. *Slicer* (Pengiris)

Rangkaian *slicer* berfungsi memotong bagian ujung terluar dari bentuk gelombang yang dimasukkan ke inputnya. Skema rangkaian asli dan ekuivalen serta bentuk gelombang outputnya ditunjukkan pada gambar 34 berikut ini.

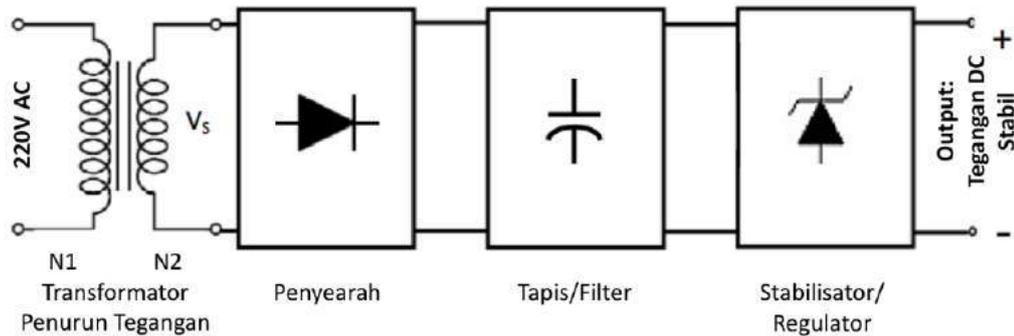
Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>			
<i>Reverse Biased</i>			

Gambar 34. Rangkaian *slicer*

Jika V_i berfase positif, diode dalam keadaan *forward biased* seperti pada gambar 34 (a) dan gambar 34 (b), namun untuk $V_i < V_b$ diode masih OFF sehingga outputnya $V_o = V_b$, sedangkan untuk $V_i \geq V_b$ outputnya sebesar $V_o = V_i - V_\gamma$. Untuk kondisi V_i berfase negatif, diode OFF seperti pada gambar 34 (c) dan gambar 34 (d) sehingga $V_o = V_b$.

5. Rangkaian Penyearah

Rangkaian penyearah (*rectifier*) berfungsi menyearahkan arus/tegangan AC (*alternating current*)/bolak-balik menjadi arus/tegangan DC (*direct current*) dan merupakan bagian dari rangkaian catu daya DC (*DC power supply*) seperti ditunjukkan pada Gambar 35. Rangkaian catu daya dalam aplikasinya banyak digunakan sebagai penyedia daya dengan tegangan yang stabil dan dapat diatur nilainya (*regulated*) untuk peralatan-peralatan elektronik seperti *charger* telepon cerdas dan laptop.

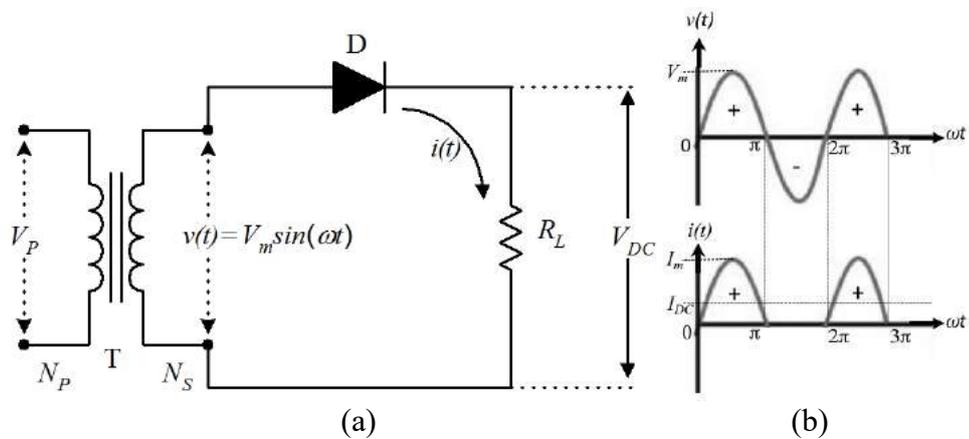


Gambar 35. Diagram blok rangkaian catu daya DC (*DC power supply*)

Transformator penurun tegangan berfungsi menurunkan tegangan dari sumber tegangan tinggi seperti jala-jala PLN dengan tegangan 220V menjadi tegangan AC yang lebih rendah misalnya 6V pada output sekundernya. Tegangan AC yang sudah diturunkan tersebut oleh bagian penyearah disearahkan menjadi tegangan DC namun masih mengandung komponen AC (*ripple*). Rangkaian penapis atau filter berfungsi mengurangi *ripple* sehingga bentuk gelombangnya mendekati bentuk DC ideal, namun tegangan DC yang dihasilkan masih belum stabil. Selanjutnya, tegangan yang belum stabil ini distabilkan oleh rangkaian stabilisator, dan jika diinginkan tegangan DC yang stabil ini dapat diatur nilainya maka catu daya dapat dilengkapi dengan rangkaian regulator.

a. Penyearah Setengah Gelombang (*Half Wave Rectifier*)

Penyearah Setengah Gelombang berfungsi menyearah arus/tegangan AC hanya setengah periodenya sehingga menghasilkan sinyal DC dengan bentuk setengah gelombang. Rangkaianannya terdiri atas sebuah trafo *step down*, diode dan resistor beban seperti pada Gambar 36 berikut ini.



Gambar 36. Rangkaian penyearah setengah gelombang

Jika digunakan analisis rangkaian diode pendekatan I, maka untuk setengah periode tegangan input $v(t)$ (0 s.d. π), tegangan $v(t)$ fasenya positif, sehingga diode D mengalami *forward bias* (seperti saklar ON), akibatnya arus $i(t)$ akan mengalir melewati resistor beban R_L . Selanjutnya pada setengah periode kedua dari tegangan input $v(t)$ (π s.d. 2π), tegangan $v(t)$ fasenya negatif menyebabkan diode mengalami *reverse bias* (seperti saklar OFF) yang berakibat tidak ada arus yang melewati resistor beban R_L , dengan demikian arus output $i(t)$ akan terlihat berbentuk setengah gelombang.

1) Arus Rata-rata Penyearah Setengah Gelombang

Merujuk Gambar 36 di atas, persamaan arus maksimum yang mengalir lewat beban R_L dapat ditulis sebagai,

$$I_m = \frac{V_m}{R_s + R_f + R_L} \quad \text{persamaan (41)}$$

dengan

- I_m : arus maksimum rangkaian penyearah yang melewati beban R_L
- V_m : tegangan maksimum trafo sekunder
- R_s : resistansi belitan sekunder trafo penurun tegangan
- R_f : resistansi *forward* dari diode
- R_L : resistansi beban

Berdasarkan gambar 36 (a) di atas, tegangan sumber rangkaian penyearah setengah gelombang adalah,

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad \text{persamaan (42)}$$

Jika V_D adalah tegangan pada ujung-ujung diode dan V_0 tegangan output, persamaan tegangan dapat ditulis dalam bentuk:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_D(t) + V_0(t) \\ v(t) &= i(t)R_f + i(t)R_L \\ v(t) &= i(t)(R_f + R_L) \end{aligned} \quad \text{persamaan (43)}$$

Arus output yang melalui beban R_L dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan (42) dan persamaan (43) sebagai berikut,

$$\begin{aligned} V_m \sin(\omega t) &= i(t)(R_f + R_L) \\ i(t) &= \frac{V_m \sin(\omega t)}{R_f + R_L} \\ i(t) &= \frac{V_m}{R_f + R_L} \sin(\omega t) \end{aligned}$$

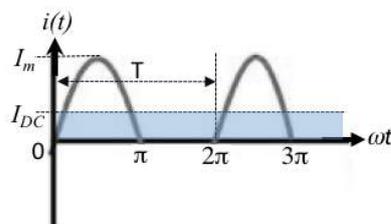
Hasil substitusi persamaan (41) ke dalam persamaan tersebut adalah:

$$\begin{aligned} i(t) &= \left(\frac{R_s + R_f + R_L}{R_f + R_L} \right) I_m \sin(\omega t) \\ i(t) &= \left(1 + \frac{R_s}{R_f + R_L} \right) I_m \sin(\omega t) \end{aligned} \quad \text{persamaan (44)}$$

Jika dianggap $(R_f + R_L) \gg R_s$, maka $\frac{R_s}{R_f + R_L} \approx 0$, dengan demikian persamaan arus output dapat ditulis:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad \text{persamaan (45)}$$

Untuk menentukan arus-rata-rata, akan digunakan gambar berikut ini.



Gambar 37. Nilai rata-rata bentuk setengah gelombang

Arus rata-rata didefinisikan sebagai luasan satu periode gelombang $i(t)$ dibagi dengan periode gelombang itu sendiri, sehingga dapat ditulis dalam bentuk,

$$I_{rata-rata} = I_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin(\omega t) dt = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right\}$$

$$I_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin(\omega t) dt + 0$$

Oleh karena $\int a \sin(bx) dx = -\frac{a}{b} \cos(bx) + \text{konstanta}$, maka:

$$I_{DC} = -\frac{I_m}{\omega T} \cos(\omega t) \Big|_0^{T/2}$$

$$I_{DC} = -\frac{I_m}{\omega T} \left\{ \cos\left(\omega \frac{T}{2}\right) - \cos(\omega \cdot 0) \right\}, \text{ dengan } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \text{ maka}$$

$$I_{DC} = -\frac{I_m}{2\pi} \{ \cos(\pi) - \cos(0) \}$$

$$I_{DC} = -\frac{I_m}{2\pi} (-2)$$

Jadi $I_{DC} = \frac{I_m}{\pi}$ persamaan (46)

2) Arus Efektif (*Root Mean Square*) Penyearah setengah Gelombang

Selain arus rata-rata, hasil penyearahan juga memiliki nilai efektif (*root mean square*) disingkat dengan rms. Arus efektif didefinisikan sebagai akar dari rata-rata kuadrat satu periode gelombang $i(t)$, sehingga dapat ditulis,

$$I_{efektif} = I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2(\omega t) dt + \int_{T/2}^T 0 dt \right\}}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2(\omega t) dt + 0 \right\}} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\int_0^{T/2} \sin^2(\omega t) dt}$$

Mengingat $\int \sin^2(ax) dx = \int \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2ax) \right\} dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4} \sin(2ax)$, maka,

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{2}t - \frac{1}{4} \sin(2\omega t) \right\} \Big|_0^{T/2}}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} \frac{T}{2} - \frac{1}{4} \sin\left(2\omega \frac{T}{2}\right) \right\} - \left\{ \frac{1}{2} \cdot 0 - \frac{1}{4} \sin(2\omega \cdot 0) \right\}}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\left\{ \frac{T}{4} - \frac{1}{4} \sin \left(2 \frac{2\pi T}{T} \right) \right\} - 0} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\left\{ \frac{T}{4} - \frac{1}{4} \sin (2\pi) \right\} - 0}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{T}{4}}$$

Jadi pada penyearah setengah gelombang, nilai rms dari arus outputnya adalah:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} \quad \text{atau untuk tegangan } V_{rms} = \frac{V_m}{2} \quad \text{persamaan (47)}$$

3) Tegangan Output Penyearah Setengah Gelombang

Berdasarkan gambar 36 (a) di atas, tegangan searah output rangkaian penyearah dapat dituliskan sebagai berikut.

$$V_0 = V_{DC} = I_{DC} \cdot R_L$$

Dengan mengingat persamaan (41) dan persamaan (46), maka tegangan output DC dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$V_{DC} = \frac{I_m}{\pi} \cdot R_L = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{R_L}{R_s + R_f + R_L}$$

$$I_{DC} \cdot R_L = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{R_L}{R_s + R_f + R_L}$$

$$I_{DC} = \frac{V_m}{\pi} \cdot \frac{1}{R_s + R_f + R_L}$$

$$I_{DC} (R_s + R_f + R_L) = \frac{V_m}{\pi}$$

$$I_{DC} \cdot R_L + I_{DC} (R_s + R_f) = \frac{V_m}{\pi}$$

$$I_{DC} \cdot R_L = \frac{V_m}{\pi} - I_{DC} (R_s + R_f)$$

Jadi:

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi} - I_{DC} (R_s + R_f) \quad \text{persamaan (48)}$$

Tegangan output DC pada persamaan (48) menunjukkan rangkaian penyearah setengah gelombang dalam kondisi beban penuh (*full load* disingkat FL)

dengan R_L terpasang pada outputnya. Jika beban R_L dilepas rangkaian menjadi tanpa beban (*open circuit* atau *No load* disingkat NL), hal itu berarti arus menjadi nol ($I_{DC}=0$), sehingga tegangan outputnya menjadi

$$V_{DC} = \frac{V_m}{\pi} \quad \text{persamaan (49)}$$

Kondisi ini juga berlaku jika trafo dan diode keduanya dianggap ideal dengan $R_s=0$ dan $R_f=0$.

4) *Ripple Factor* Penyearah Setengah Gelombang

Hasil penyearahan arus/tegangan oleh rangkaian penyearah tidak benar-benar menghasilkan arus/tegangan DC yang ideal. Arus/tegangan pada output penyearah selain mengandung komponen DC juga masih mengandung komponen AC atau *ripple*. Untuk menilai kinerja rangkaian penyearah dapat digunakan ukuran-ukuran seperti *ripple factor* (r), efisiensi penyearah (η) dan faktor guna transformator (*transformer utilization factor*/TUF).

Ripple factor digunakan untuk menunjukkan efektivitas rangkaian penyearah dalam mengubah arus/tegangan AC menjadi arus/tegangan DC. Ukuran efektivitas penyearahan (*ripple factor*) ini, didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai efektif (rms) dari komponen *ripple* terhadap komponen DC dari bentuk gelombang hasil penyearahan.

$$r = \frac{\text{Nilai rms komponen ripple dari bentuk gelombang hasil penyearahan}}{\text{Komponen DC dari bentuk gelombang hasil penyearahan}}$$

$$r = \frac{I_{rrms}}{I_{DC}}$$

Telah diketahui bahwa gelombang arus/tegangan output penyearah terdiri atas komponen *ripple* dan komponen DC. Penjumlahan secara vektor kedua

komponen tersebut merupakan komponen efektif total yang dihasilkan oleh penyearah pada outputnya. Jika I_{rms} menunjukkan arus efektif total, I_{DC} tegangan rata-rata, dan I_{rrms} arus *ripple* efektif yang dihasilkan penyearah maka dapat ditulis,

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rrms}^2 + I_{DC}^2}$$

$$I_{rrms} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{DC}^2}$$

$$r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{DC}^2}}{I_{DC}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{DC}^2}{I_{DC}^2}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{I_{DC}^2} - 1} \quad \text{persamaan (50)}$$

$$r = \sqrt{\frac{\left(\frac{I_m}{2}\right)^2}{\left(\frac{I_m}{\pi}\right)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} = 1,21$$

Jadi $r = 1,21$ untuk penyearah setengah gelombang.

Ripple factor sebesar $r=1,21$ pada penyearah setengah gelombang menunjukkan bahwa penyerahan ini tidak efektif dalam melakukan penyearahan karena komponen *ripple* yang dibangkitkan pada outputnya masih jauh lebih besar dari komponen DC, dalam hal ini komponen *ripple* nilainya 121% komponen DC.

5) Efisiensi Penyearahan

Ukuran ini digunakan untuk menunjuk seberapa besar tingkat efisiensi daya dari penyearah. Efisiensi penyearahan (η) didefinisikan sebagai perbandingan antara daya DC pada beban terhadap daya AC yang digunakan.

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{AC}}$$

$$P_{DC} = I_{DC}^2 \cdot R_L$$

$$P_{AC} = I_{rms}^2 \cdot (R_f + R_L)$$

$$\eta = \frac{I_{DC}^2 \cdot R_L}{I_{rms}^2 \cdot (R_f + R_L)} \quad \text{persamaan (51)}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{I_m}{\pi}\right)^2 \cdot R_L}{\left(\frac{I_m}{2}\right)^2 \cdot (R_f + R_L)} = \frac{4}{\pi^2} \frac{R_L}{R_f + R_L} = 0,406 \frac{R_L}{R_f + R_L}$$

Efisiensi maksimum terjadi jika nilai R_f dapat diabaikan terhadap R_L sehingga,

$$\eta = 0,406$$

Nilai efisiensi ini menunjukkan bahwa pada penyearah setengah gelombang, daya DC yang dapat dibangkitkan kurang dari setengah daya AC nya yakni sebesar 40,6% P_{AC} .

6) *Transformer Utilization Factor* (TUF)

TUF digunakan untuk mengukur faktor guna transformator, oleh sebab itu daya DC yang disalurkan ke beban dibandingkan dengan kapasitas daya transformator seperti persamaan berikut ini.

$$TUF = \frac{\text{Daya DC pada beban}}{\text{Kapasitas daya tranformator (VA Rated)}}$$

$$TUF = \frac{P_{DC}}{P_{rated}} = \frac{I_{DC} \cdot V_{DC}}{I_{rms} V_{rated}} = \frac{\frac{I_m}{\pi} \frac{V_m}{\pi}}{\frac{I_m}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{DC}}{\pi \cdot V_m} \quad \text{persamaan (52)}$$

Tegangan nominal di sini besarnya adalah $V_{rated} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$, tetapi arusnya bernilai $I_{rms} = \frac{I_m}{2}$ (bukan $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$), karena arus ini mengalir dalam rangkaian penyearah setengah gelombang. Selanjutnya, TUF dapat ditulis:

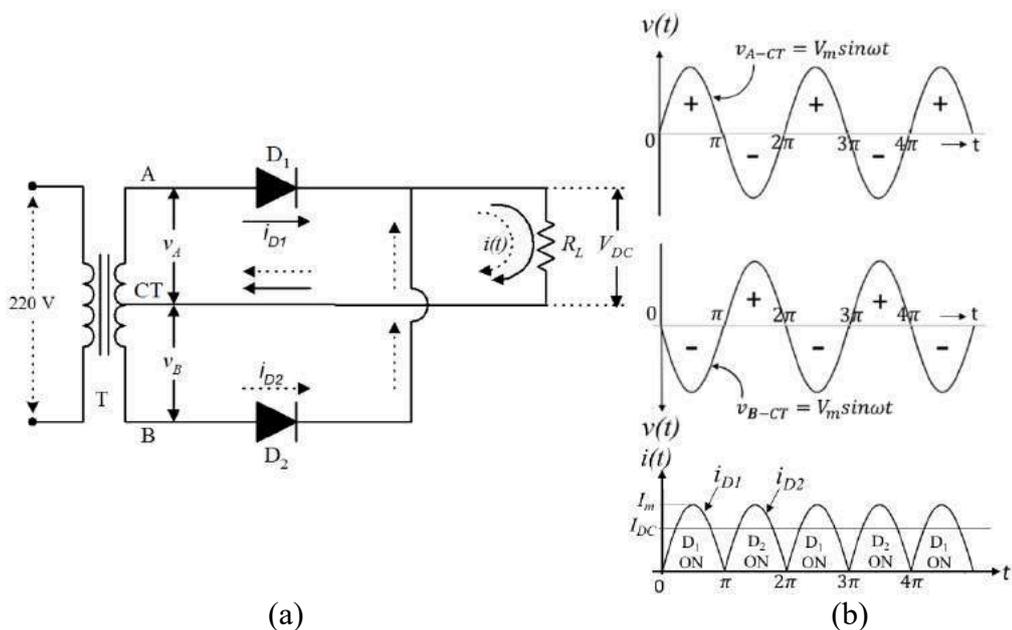
$$TUF = \frac{\frac{I_m}{\pi} \frac{V_m}{\pi}}{\frac{I_m}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} = 0,287$$

Nilai TUF=0,287 untuk penyearah setengah gelombang menunjukkan bahwa penyearah ini hanya mampu memanfaatkan 28,7% saja dari daya nominal yang disediakan oleh transformator.

b. Penyearah Gelombang Penuh (*Full Wave Rectifier*)

Rangkaian penyearah gelombang penuh terdiri atas dua jenis, yakni penyearah menggunakan trafo *center tap* dan penyearah jembatan. Trafo *center tap* (CT) adalah trafo yang memiliki output ganda dengan setiap terminal memiliki tegangan yang sama namun terbalik fasenya terhadap terminal lainnya.

Rangkaian penyearah gelombang penuh menggunakan trafo CT ditunjukkan pada gambar 38 berikut ini. Merujuk gambar tersebut, terlihat bahwa untuk setengah periode tegangan input (0 s.d. π), tegangan v_A fasenya positif dan v_B negatif (karena menggunakan trafo CT), sehingga diode D_1 mengalami *forward biased* (ON) sementara itu D_2 *reversed biased* (OFF), akibatnya arus i_{D1} mengalir dari titik A melewati D_1 menuju R_L dan CT.



Gambar 38. Penyearah Gelombang Penuh: (a) skema rangkaian; (b) bentuk gelombang input dan output

Selanjutnya pada setengah periode kedua dari tegangan input (π s.d. 2π), tegangan v_A fasenya berubah menjadi negatif dan v_B positif, sehingga diode D_1 OFF

bersamaan dengan D_2 ON yang mengakibatkan arus i_{D2} mengalir dari titik B melewati D_2 menuju R_L dan CT. Melalui mekanisme demikian, terlihat bahwa penyearah gelombang penuh dengan trafo *center tap* sesungguhnya merupakan susunan dua buah rangkaian penyearah setengah gelombang yang bekerja secara bergantian pada beban R_L yang sama, sehingga arus output $i(t)$ rangkaian berbentuk gelombang penuh.

Besarnya arus rata-rata dan arus efektif pada penyearah gelombang penuh dapat diperoleh melalui cara seperti pada penyearah setengah gelombang. Melalui cara tersebut dapat diperoleh nilai arus searah yakni,

$$I_{DC} = \frac{2I_m}{\pi} \quad \text{persamaan (53)}$$

dan nilai arus efektif sebesar,

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ atau untuk tegangan } V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{persamaan (54)}$$

Pada penyearah gelombang penuh, tegangan DC beban penuh sebesar,

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} - I_{DC}(R_s + R_f) \quad \text{persamaan (55)}$$

dengan tegangan tanpa beban sebesar,

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}. \quad \text{persamaan (55a)}$$

Berdasarkan persamaan (50), nilai *ripple factor* penyearah gelombang penuh adalah,

$$r = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{I_{DC}^2} - 1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left(\frac{2I_m}{\pi}\right)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} = 0,482 \quad \text{persamaan (55b)}$$

Hal ini menunjukkan bahwa pada penyearah gelombang penuh, komponen *ripple* yang muncul nilainya 48,2% dari komponen DC, merupakan nilai r yang jauh lebih baik dibandingkan nilai r penyearah setengah gelombang.

Efisiensi penyearahan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (51), yakni

$$\eta = \frac{I_{DC}^2 \cdot R_L}{I_{rms}^2 \cdot (R_f + R_L)}$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{2I_m}{\pi}\right)^2 \cdot R_L}{\left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot (R_f + R_L)} = \frac{8}{\pi^2} \frac{R_L}{R_f + R_L} = 0,811 \frac{R_L}{R_f + R_L} \quad \text{persamaan (55c)}$$

Efisiensi maksimum terjadi jika nilai R_f dapat diabaikan terhadap R_L sehingga,

$$\eta = 0,811$$

Nilai efisiensi ini menunjukkan bahwa pada penyearah gelombang penuh, daya DC yang dapat dibangkitkan jauh lebih besar dari daya AC nya yakni sebesar 81,1% terhadap P_{AC} .

Faktor guna transformator (TUF) untuk penyearah gelombang penuh dapat ditemukan dalam berbagai versi. Menurut perhitungan Chattopadhyay & Rakshit (2006: 97) TUF untuk penyearah gelombang penuh bernilai 0,693, sementara menurut Lee & Chow (2007: 149) nilainya dapat ditentukan berdasarkan persamaan (52) yakni sebesar,

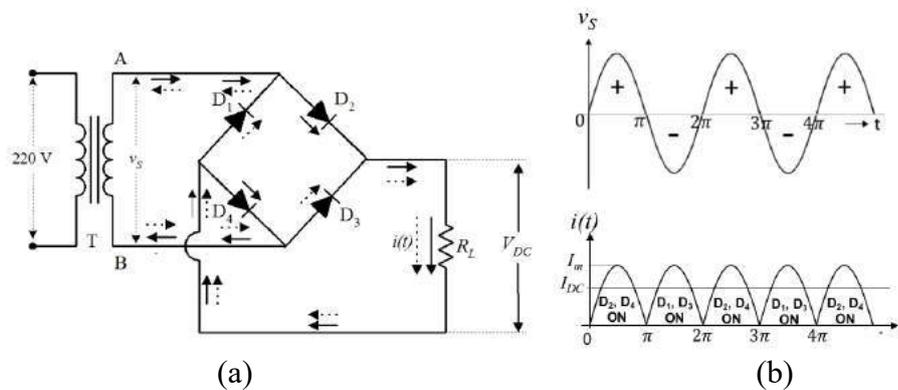
$$TUF = \frac{P_{DC}}{P_{rated}} = \frac{I_{DC} \cdot V_{DC}}{I_{rms} V_{rated}} = \frac{\frac{2I_m}{\pi} \frac{2V_m}{\pi}}{2 \frac{I_m}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \frac{8\sqrt{2}}{2\pi^2} = 0,573 \quad \text{persamaan (55d)}$$

Nilai $P_{rated} = 2\left(\frac{I_m}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2}}\right)$ karena penyearah gelombang penuh ini pada dasarnya tersusun atas dua penyearah setengah gelombang dengan masing-masing P_{rated} sebesar $\left(\frac{I_m}{2} \frac{V_m}{\sqrt{2}}\right)$.

Nilai TUF=0,573 untuk penyearah gelombang penuh menunjukkan bahwa penyearah ini telah mampu memanfaatkan separoh lebih yakni 57,3% dari daya nominal yang disediakan oleh transformator menjadi daya DC pada bebannya.

c. Penyearah Jembatan (*Bridge Rectifier*)

Penyearah jembatan termasuk jenis penyearah gelombang penuh yang tersusun atas empat diode membentuk konfigurasi jembatan (*bridge*). Rangkaiannya ditunjukkan seperti pada gambar 39.



Gambar 39. Penyearah Jembatan: (a) skema rangkaian; (b) bentuk gelombang input dan output

Merujuk gambar 39(a), ketika tegangan input berfase positif yakni interval waktu 0 sampai dengan π , diode D_2 dan D_4 ON sementara D_1 dan D_3 OFF, sehingga arus mengalir dari A melewati D_2 , R_L dan D_4 menuju ke titik B. Pada setengah periode kedua dari tegangan input yakni pada interval waktu π sampai dengan 2π , tegangan input berfase negatif, diode D_1 dan D_3 ON sementara D_2 dan D_4 OFF, sehingga arus mengalir dari titik B melewati D_3 , R_L dan D_1 menuju ke titik A. terlihat bahwa output penyearah ini berbentuk gelombang penuh.

Persamaan arus dan tegangan DC tanpa beban pada penyearah jembatan sama dengan persamaan-persamaan pada penyearah gelombang penuh dengan trafo

center tap. Oleh karena setiap arus DC yang mengalir melalui R_L berasal dari arus yang melewati dua buah diode, maka tegangan output DC beban penuh mengikuti persamaan,

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} - I_{DC}(R_s + 2R_f) \quad \text{persamaan (56)}$$

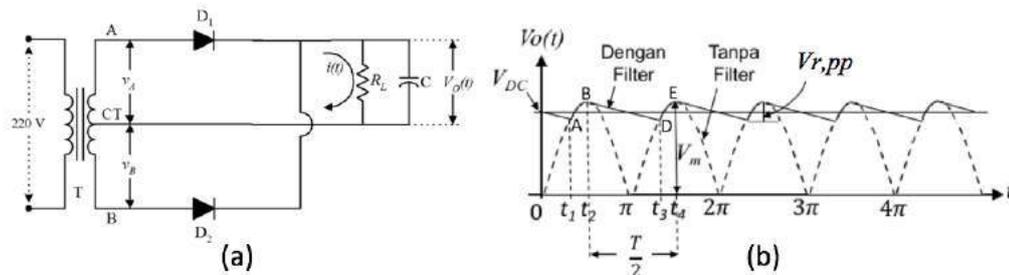
Nilai *ripple factor* dan efisiensi penyearahnya juga sama dengan nilai-nilai besaran tersebut pada penyearah menggunakan trafo *center tap* yakni $r=0,482$ dan $\eta=0,811$. Oleh karena pada penyearah ini, belitan sekunder trafo dilalui oleh arus berbentuk gelombang penuh maka kapasitas daya AC yang tersedia pada belitan sekunder trafo sebesar $P_{rated} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \frac{V_m}{\sqrt{2}}$. Berdasarkan persamaan (52), faktor guna transformator dapat ditentukan sebesar,

$$TUF = \frac{P_{DC}}{P_{rated}} = \frac{I_{DC} V_{DC}}{I_{rms} V_{rated}} = \frac{\frac{2I_m}{\pi} \frac{2V_m}{\pi}}{\frac{I_m}{\sqrt{2}} \frac{V_m}{\sqrt{2}}} = \frac{8}{\pi^2} \quad \text{persamaan (56a)}$$

$$TUF=0,811$$

d. Penyearah Dengan Filter

Untuk mereduksi komponen-komponen *ripple* pada outputnya, rangkaian penyearah perlu diberi filter. Salah satu komponen yang dapat digunakan sebagai filter pada penyearah adalah kapasitor, yang dipasang secara paralel dengan output rangkaian seperti ditunjukkan pada gambar 40 berikut ini.



Gambar 40. Penyearah dengan filter C: (a) rangkaian; (b) bentuk gelombang output

Kurva garis terpotong-potong pada gambar 40 (b) menunjukkan kapasitor C belum terpasang pada output rangkaian. Jika filter kapasitor C dengan kapasitansi yang besar dipasang paralel terhadap beban, maka komponen tersebut akan terisi muatan listrik selama t_1 sampai dengan t_2 ketika diode D_1 menghantar (ON), dan membentuk kurva garis utuh AB. Setelah waktu melampaui t_2 , tegangan input berkurang dari nilai puncaknya hingga mencapai keadaan yang menyebabkan D_1 OFF dan D_2 ON. Pada keadaan ini, kapasitor C mengalami pengosongan muatan dengan konstanta waktu yang sangat besar (pengosongan dengan kecepatan yang sangat lambat) sehingga membentuk kurva garis utuh BD. Saat waktu mencapai t_3 diode D_2 yang sudah menghantar (ON) menyebabkan munculnya arus yang mengisi kapasitor sehingga tegangan pada ujung-ujungnya yang merupakan tegangan output, naik kembali mencapai nilai maksimum membentuk kurva DE.

Untuk menentukan besarnya *ripple factor* pada penyearah dengan filter C dapat dilakukan dengan menganggap kapasitansi C sangat besar sehingga waktu pengosongan kapasitor sangat lama, sementara itu waktu pengisian muatan menjadi sangat cepat. Dengan asumsi tersebut, dapat diperoleh kondisi t_1 mendekati t_2 dan t_3 mendekati t_4 , akibatnya dapat dianggap waktu pengosongan kapasitor nilainya mendekati $\frac{T}{2}$, dengan T periode gelombang input. Oleh karena muatan yang dikosongkan merupakan besarnya arus rata-rata pada beban dan $V_{r,pp}$ merupakan tegangan pada ujung-ujung kapasitor, maka,

$$I_{DC} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{2V_{r,pp}C}{T}$$

$$V_{r,pp} = I_{DC} \frac{T}{2C} = \frac{I_{DC}}{2fC} \quad \text{persamaan (57)}$$

Jika dianggap gelombang *ripple* pada penyearah gelombang penuh dengan filter C ini berbentuk segitiga dan dengan memperhatikan persamaan (57), dapat diperoleh,

$$V_{r,rms} = \frac{V_{r,m}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{r,pp}}{2\sqrt{3}} = \frac{I_{DC}}{4\sqrt{3}fC} \quad \text{persamaan (58)}$$

Berdasarkan definisi, dapat ditulis persamaan *ripple factor* dalam bentuk rasio tegangan seperti berikut ini,

$$r = \frac{V_{r,rms}}{V_{DC}} \quad \text{persamaan (59)}$$

Substitusi persamaan (58) ke dalam persamaan (59) menghasilkan,

$$r = \frac{I_{DC}}{V_{DC} \cdot 4\sqrt{3}fC}$$

dan dengan mengingat bahwa $V_{DC} = I_{DC} \cdot R_L$, maka dapat diperoleh nilai r:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L} \quad \text{persamaan (60)}$$

Merujuk gambar 40(b) terlihat bahwa besarnya tegangan rata-rata pada beban adalah,

$$V_{DC} = V_m - \frac{V_{r,pp}}{2} \quad \text{persamaan (61)}$$

Substitusi persamaan (57) ke dalam persamaan (58) menghasilkan,

$$V_{DC} = V_m - \frac{I_{DC}}{4fC} \quad \text{persamaan (62)}$$

6. Rangkaian Penjepit dan Pegganda Tegangan

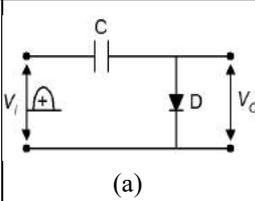
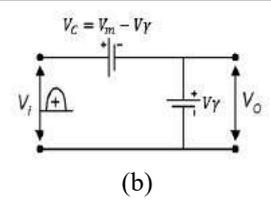
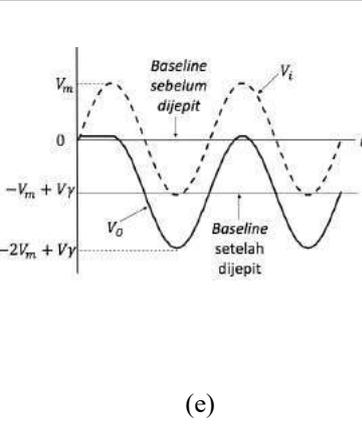
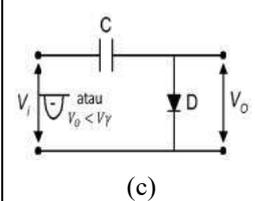
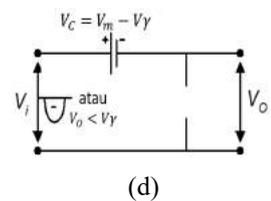
Selain sebagai pembentuk gelombang dan penyearah, diode juga dapat diaplikasikan sebagai komponen rangkaian penjepit (*clamper*) dan pengganda tegangan (*voltage doubler*).

a. Penjepit (*Clamper*)

Rangkaian *clamper* berfungsi menjepit tegangan pada bagian positif atau negatif sehingga *baseline* suatu gelombang bergeser ke bawah atau ke atas dari sumbu nol atau tegangan referensi DC.

1) *Clamper* Negatif

Rangkaian *clamper* negatif berfungsi menjepit bagian positif dari bentuk gelombang sehingga *baseline* bergeser ke nilai negatif di bawah sumbu nol, seperti ditunjukkan pada gambar 41 berikut ini.

Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	
<i>Reverse Biased</i>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>	

Gambar 41. Rangkaian *clamper* negatif

Pada saat input berfase positif sesuai Gambar 41(a), diode dalam keadaan ON (*forward biased*), kapasitor C terisi muatan listrik dengan cepat karena konstanta waktu RC sangat kecil (resistansi *forward* diode sangat kecil), sehingga saat V_i mencapai nilai maksimum tegangan kapasitor menjadi $V_C = V_i - V_\gamma = V_m - V_\gamma$ dan tegangan outputnya sebesar $V_o = V_\gamma$ seperti ditunjukkan pada Gambar 41(b). Setelah mencapai nilai maksimumnya, V_i turun sehingga diode dalam keadaan OFF

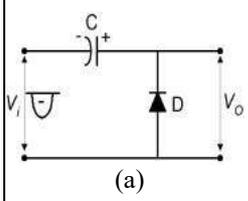
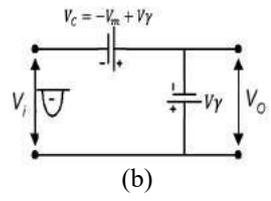
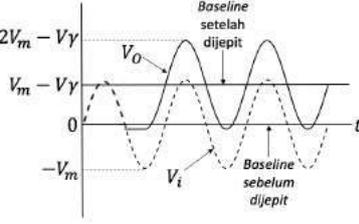
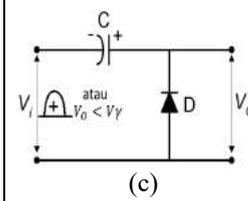
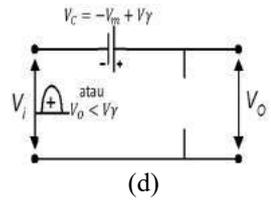
(tegangan diode di bawah V_γ), dan rangkaian menjadi terbuka seperti pada Gambar 41(d). Pada kondisi seperti ini, tegangan outputnya mengikuti persamaan $V_o = V_i - V_c = V_i - (V_m - V_\gamma) = V_i - V_m + V_\gamma$, sehingga pada saat tegangan inputnya bernilai 0, tegangan outputnya sebesar $V_o = -V_m + V_\gamma$. Keadaan ini menggambarkan bahwa rangkaian *clamper* negatif telah menggeser *baseline* tegangan input dari semula pada posisi 0 volt ke posisi $-V_m + V_\gamma$. Jika V_γ diabaikan, maka *baseline* tegangan output berada pada posisi $-V_m$.

Ketika V_i berubah fasenya menjadi negatif, diode tetap dalam kondisi OFF, dan dalam keadaan ini tegangan kapasitor sedikit berkurang karena proses pengosongan (*discharging*) dengan sangat lambat (konstanta waktu RC sangat besar) karena melewati resistansi *reverse* diode yang nilainya sangat tinggi. Jika tegangan kapasitor dianggap tidak berubah, maka tegangan output nilainya tetap mengikuti persamaan $V_o = V_i - V_m + V_\gamma$ dan untuk $V_i = -V_m$ tegangan outputnya sebesar $V_o = -V_m - V_m + V_\gamma = -2V_m + V_\gamma$. Jika dianggap V_γ dapat diabaikan, tegangan output maksimumnya menjadi $V_o = -2V_m$.

2) *Clamper* Positif

Rangkaian *clamper* positif berfungsi menjepit fase negatif tegangan yang dimasukan ke inputnya sehingga *baseline* gelombang yang diproses bergeser ke nilai positif. Melalui gambar 42 ditunjukkan bahwa pada saat input berfase negatif, diode menjadi ON akibatnya kapasitor C terisi muatan negatif dengan sangat cepat. Saat tegangan V_i mencapai nilai maksimumnya dalam arah negatif, tegangan kapasitor bernilai $V_c = -V_m + V_\gamma$ dan tegangan output sebesar $V_o = -V_\gamma$. Setelah mencapai nilai maksimum negatif, tegangan input naik ke arah positif sehingga

tegangan pada ujung-ujung diode menjadi kurang dari V_γ . Akibatnya, diode menjadi OFF dan rangkaian menjadi terbuka seperti ditunjukkan Gambar 42(d).

Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(e)</p>
<i>Reverse Biased</i>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>	

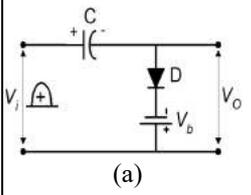
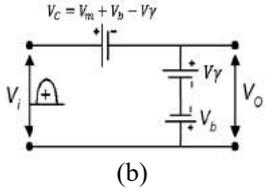
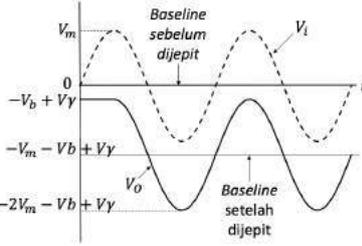
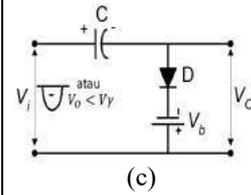
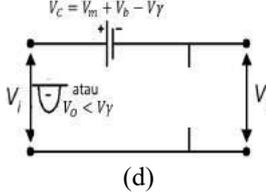
Gambar 42. Rangkaian *clamper* positif

Untuk keadaan rangkaian terbuka seperti pada Gambar 42(d), tegangan output mengikuti persamaan $V_o = V_r - V_c = V_r - (-V_m + V_\gamma) = V_i + V_m - V_\gamma$, sehingga pada saat tegangan inputnya bernilai 0, tegangan outputnya sebesar $V_o = V_m - V_\gamma$. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian *clamper* positif berfungsi menggeser *baseline* tegangan input dari semula pada posisi 0 volt ke arah positif pada posisi $V_m - V_\gamma$. Jika V_γ diabaikan maka *baseline* bergeser ke posisi V_m .

Selanjutnya, saat V_i berubah fase menjadi positif, diode tetap dalam kondisi *reverse biased* (OFF), oleh karena tegangan kapasitor dianggap tidak berubah, maka tegangan output nilainya tetap mengikuti persamaan $V_o = V_i + V_m - V_\gamma$ dan untuk $V_i = V_m$ tegangan outputnya sebesar $V_o = V_m + V_m - V_\gamma = 2V_m - V_\gamma$ atau $V_o = 2V_m$ jika V_γ diabaikan.

3) Clamper Berprasikap (*Biased Clamper*)

Rangkaian *clamper* positif dan negatif yang telah dibahas di muka hanya dapat menggeser *baseline* ke arah positif atau negatif pada jarak di sekitar nilai $+V_m$ atau $-V_m$ saja. Jika diinginkan jarak penggeseran *baseline* di atas atau di bawah nilai-nilai maksimum tersebut dapat digunakan rangkaian *clamper* berprasikap. Gambar 43 berikut ini menunjukkan rangkaian *clamper* negatif berprasikap.

Prasikap	Rangkaian Asli	Rangkaian Ekuivalen Pendekatan II	Bentuk Gelombang
<i>Forward Biased</i>	 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	 <p>(e)</p>
<i>Reverse Biased</i>	 <p>(c)</p>	 <p>(d)</p>	

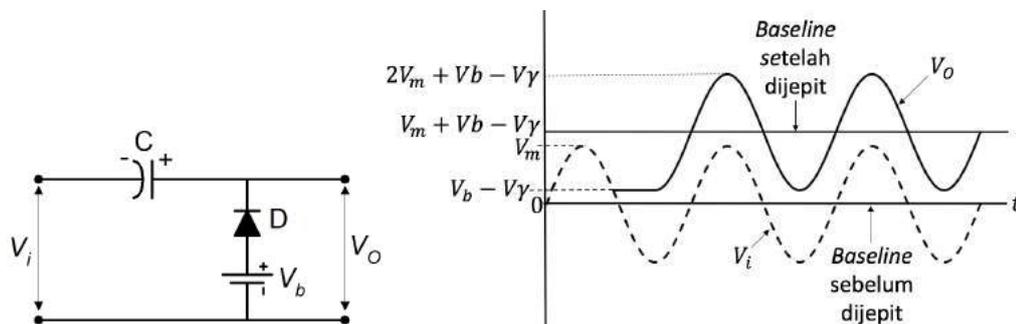
Gambar 43. Rangkaian *clamper* negatif berprasikap

Saat diode mengalami *forward bias*, rangkaian ekivalennya dapat dibuat seperti pada gambar 43(b). Oleh karena diode dalam keadaan ON, maka kapasitor terisi muatan listrik dengan cepat dan untuk setengah periode pertama dari gelombang input, tegangan kapasitor menjadi $V_C = V_m + V_b - V_\gamma$. Pada waktu yang bersamaan, tegangan output merupakan penjumlahan tegangan *cut-in* dengan tegangan prasikap yakni $V_O = -V_b + V_\gamma$. Setelah melampaui nilai maksimumnya, V_i turun dan diode OFF (karena tegangannya di bawah V_γ) sehingga berlaku $V_O = V_i - V_C = V_i - V_m - V_b + V_\gamma$. Ketika tegangan inputnya bernilai 0 (menempati

baseline sebelum dijepit), tegangan outputnya sebesar $V_o = -V_m - V_b + V_\gamma$ (baseline setelah dijepit) atau untuk V_γ diabaikan baseline pada posisi $-V_m - V_b$.

Saat tegangan input berfase negatif, diode tetap dalam keadaan OFF, dan jika dianggap tegangan kapasitor tidak berubah, tegangan output tetap bernilai $V_o = V_i - V_m - V_b + V_\gamma$. Untuk $V_i = -V_m$ output menjadi $V_o = -2V_m - V_b + V_\gamma$ atau $V_o = -2V_m$ jika V_γ diabaikan.

Kebalikan dari *clamper* negatif berprinsip, rangkaian *clamper* positif berprinsip akan menjepit tegangan negatif sehingga menggeser *baseline* ke arah positif menempati posisi *baseline* baru di sekitar nilai maksimum ditambah tegangan prasikapnya.



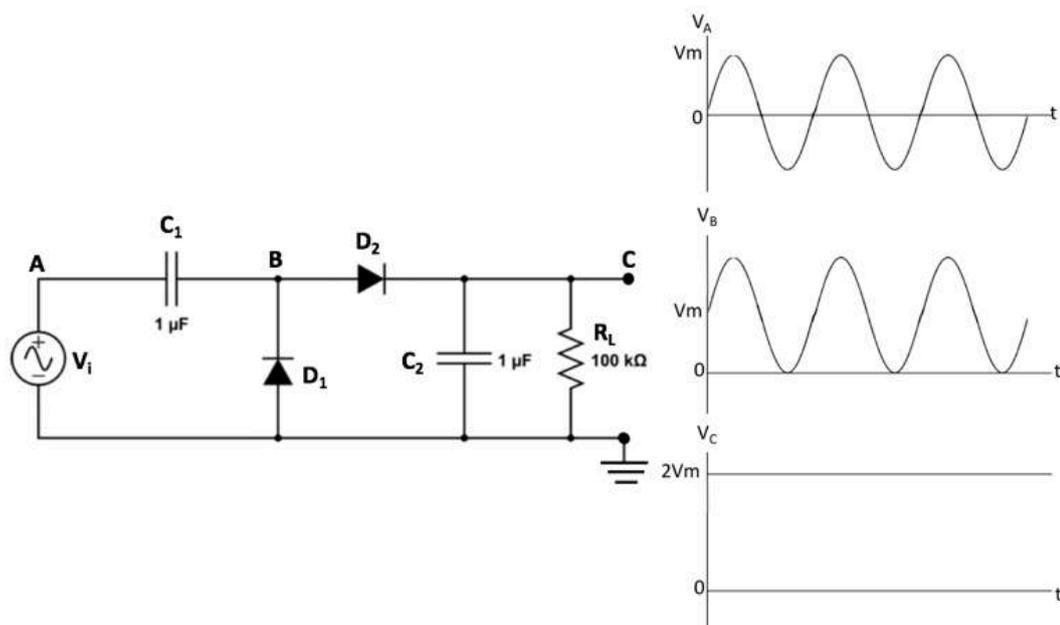
Gambar 44. *Clamper* positif berprinsip: (a) rangkaian; (b) bentuk gelombang

Melalui penjelasan yang sama dengan rangkaian *clamper* negatif berprinsip, dapat diperoleh output rangkaian *clamper* positif berprinsip seperti pada gambar 44(b) di atas.

b. Penguat Tegangan (*Voltage Doubler*)

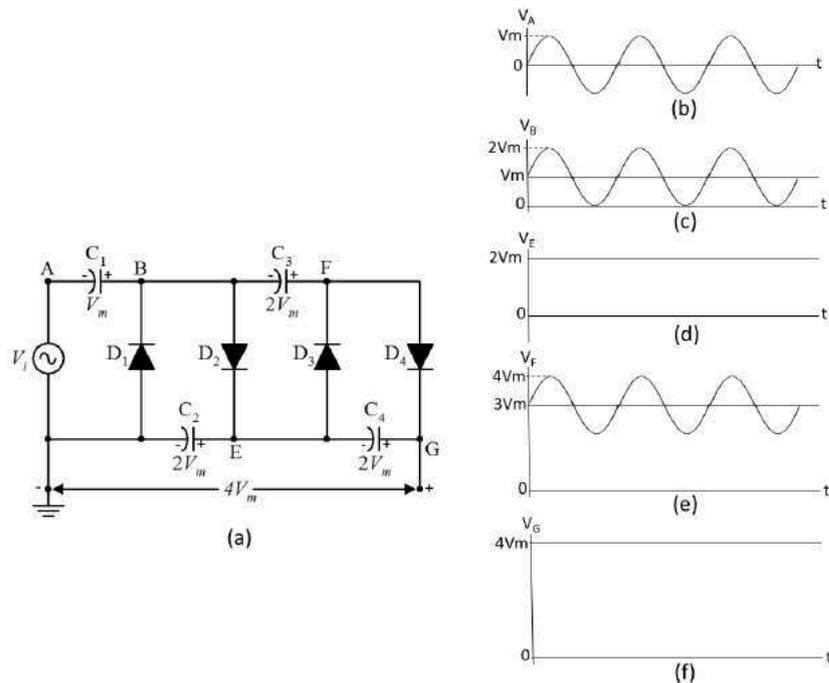
Rangkaian penguat tegangan berfungsi melipatkan gandakan tegangan yang dimasukkan ke inputnya. Rangkaian penguat tegangan dua kali ditunjukkan pada gambar 45. Rangkaian penguat tegangan pada gambar 45(a)

pada dasarnya terdiri atas rangkaian *clammer* positif yang dibentuk oleh D_1 dan C_1 serta rangkaian penyearah setengah gelombang filter kapasitor yang dibentuk oleh D_2 dan C_2 . Penjelasan cara kerja rangkaian pengganda tegangan berikut ini menggunakan pendekatan I dari model diode. Gambar 45(b) paling atas menunjukkan bentuk tegangan input pada titik A berupa fungsi sinusoidal dengan *baseline* 0 volt. Tegangan input tersebut oleh rangkaian *clammer* positif dijepit sehingga *baseline* tegangan pada titik B naik ke level V_m seperti pada gambar 45(b) tengah. Selanjutnya, tegangan pada titik B disearahkan oleh D_2 dengan filter C_2 , hasilnya pada titik C berupa tegangan searah yang nilainya $2V_m$.



Gambar 45. Pengganda tegangan dua kali (*voltage doubler*)

Rangkaian pengganda empat kali (*voltage quadrupler*) tersusun atas empat buah diode dan empat buah kapasitor. Rangkaianannya ditunjukkan pada gambar 46 berikut ini.

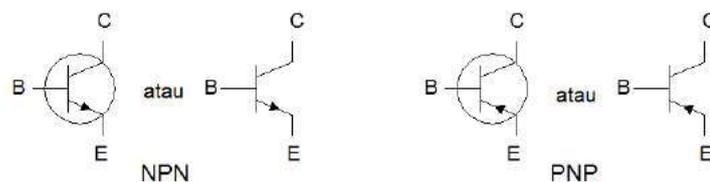


Gambar 46. Pengganda tegangan empat kali (*quadrupler*)

Tegangan input sinusoidal di titik A (*baseline* 0 volt) pada gambar 46(b), dijepit oleh rangkaian *clamper* positif (diode D_1 dan kapasitor C_1), sehingga *baseline* bergeser menjadi V_m di titik B seperti pada gambar 46 (c). Tegangan di titik B tersebut oleh D_2 dan C_2 disearahkan dan disaring menjadi tegangan DC sebesar $2V_m$ di titik E seperti ditunjukkan gambar 46 (d). Tegangan di titik E ini bersama dengan D_3 dan C_3 membentuk rangkaian *clamper* positif berprasikap dengan tegangan prasikap sebesar $2V_m$ di titik E. Selanjutnya, rangkaian *clamper* berprasikap ini menjepit tegangan sinusoidal titik B (*baseline* V_m) menjadi tegangan sinusoidal di titik F dengan *baseline* $3V_m$ seperti pada gambar 49(e). Selanjutnya, tegangan di titik F disearahkan oleh D_4 dan difilter oleh C_4 menjadi tegangan searah sebesar $4V_m$ di titik G seperti ditunjukkan gambar 49(f). Dengan mekanisme seperti itu maka diperoleh tegangan output DC yang nilainya empat kali tegangan maksimum inputnya.

7. Karakteristik Transistor

Transistor merupakan piranti elektronika dengan tiga elektrode yang berfungsi sebagai saklar (*switch*) atau penguat (*amplifier*). Keluarga transistor terdiri atas transistor bipolar (*bipolar junction transistor* disingkat BJT), dan transistor efek medan (*field effect transistor* disingkat FET). Pada penelitian ini hanya dibahas teori-teori yang terkait dengan transistor BJT. Simbol BJT ditunjukkan pada gambar 47.



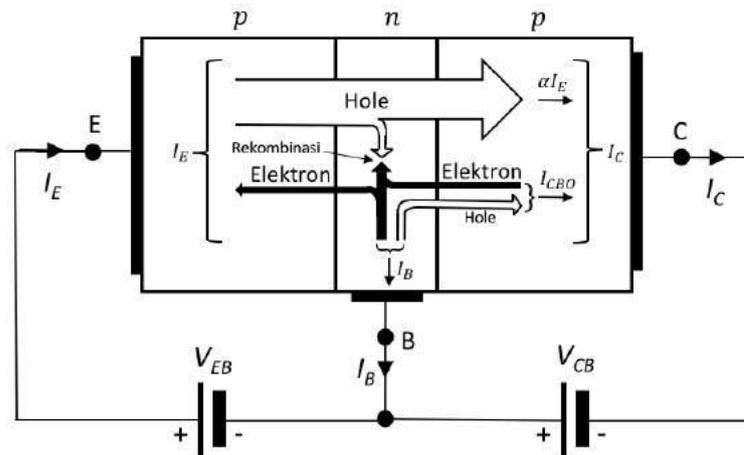
Gambar 47. Simbol transistor BJT tipe npn (kiri) dan pnp (kanan)

a. Konfigurasi Transistor

Elektrode *emitter* atau emitor (E) berfungsi sebagai sumber muatan yang akan dialirkan ke *collector* atau kolektor (C), dengan kata lain kolektor berfungsi sebagai penampung muatan yang dipancarkan oleh emitor, sedangkan elektrode *base* atau basis (B) berfungsi sebagai pengendali muatan yang mengalir dari E ke C dalam suatu kristal semikonduktor dengan susunan npn atau pnp. Oleh karena transistor memiliki tiga elektrode, memungkinkan dari piranti ini dapat dibentuk tiga konfigurasi yakni *common base*, *common emitter* dan *common collector*.

Agar transistor dapat menjalankan fungsinya sebagai penguat maupun saklar, sebelum dioperasikan perlu diberi tegangan prasikap terlebih dahulu. Prasikap (*bias*) transistor diberikan dengan memasang tegangan prasikap maju pada pertemuan (*junction*) emitor ke basis dan tegangan prasikap mundur pada

pertemuan kolektor ke basis. Gambar 48 menunjukkan transistor tipe pnp dalam konfigurasi *common base*, yakni konfigurasi yang menempatkan basis sebagai bagian bersama (*common*) antara *loop* input dan *loop* output dengan emitor sebagai input dan kolektor sebagai output.



Gambar 48. Operasi transistor tipe pnp pada konfigurasi *common base*

Pemasangan sumber tegangan V_{EB} menyebabkan pertemuan E-B berprinsip maju, sementara keberadaan tegangan V_{CB} mengakibatkan pertemuan C-B berprinsip mundur. Akibat pemasangan kedua tegangan tersebut, *hole* dalam jumlah besar di bagian p sisi kiri (E) berdifusi menembus bagian n menuju bagian p di sisi kanan (C), dan pada saat yang bersamaan elektron-elektron di sisi n (B) juga melakukan difusi menembus pertemuan E-B. Pada bagian p sisi kiri, mobilitas kedua partikel bermuatan tersebut menimbulkan arus emitor (I_E). Sebagian besar *hole* yang bergerak ke kanan dari bagian p di sisi kiri menuju ke bagian p sisi kanan menjadi arus yang nilainya sebesar αI_E . Saat melintasi pertemuan E-B, sebagian kecil dari *hole* tersebut bergabung (rekombinasi) dengan sebagian kecil elektron dari basis. Pada pertemuan C-B, karena diberi prinsip

mundur, muncul arus jenuh balik sebesar I_{CBO} (arus kolektor pada *common base* disebabkan input dalam keadaan *open*). Arus I_{CBO} muncul akibat bangkitnya pasangan elektron dan *hole* yang mengalami agitasi termal di daerah pertemuan C-B yang memperoleh prasikap mundur.

Berdasarkan operasi transistor pada gambar 48, terlihat bahwa hubungan antara arus emitor, kolektor dan basis adalah,

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{persamaan (63)}$$

dan arus kolektor dapat dinyatakan dalam,

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad \text{persamaan (64)}$$

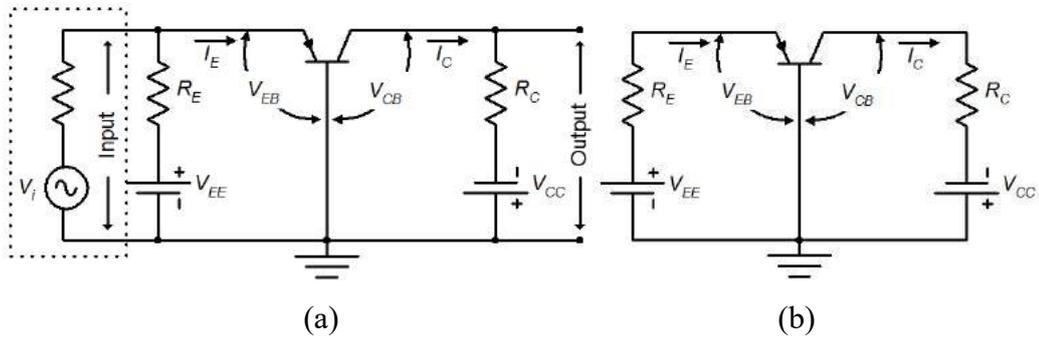
Jika I_{CBO} dianggap sangat kecil dibandingkan I_E , maka dapat ditulis persamaan,

$$I_C = \alpha I_E$$

atau $\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{persamaan (65)}$

Parameter α adalah *gain* arus pada konfigurasi *common base* atau disebut juga dengan istilah *forward current-transfer ratio* dengan notasi h_{FE} , nilainya antara 0,900 sampai dengan 0,999, dan nilai α yang umum biasanya sebesar 0,98. Terlihat bahwa nilai maksimum α pada *common base* kurang dari 1, hal itu berarti konfigurasi ini tidak dapat memberikan *gain* arus.

Pemberian tegangan prasikap pada umumnya dilakukan dengan memberi tegangan yang dirangkai secara seri dengan hambatan seperti ditunjukkan pada gambar 49 berikut ini.



Gambar 49. Konfigurasi transistor *common base*: (a) rangkaian dengan input sumber AC; (b) rangkaian untuk analisis DC

Merujuk gambar 49, terlihat bahwa pada konfigurasi *common base* tegangan dan arus input transistor ditunjukkan oleh notasi V_{EB} dan I_E , sedangkan tegangan dan arus output diberikan oleh V_{CB} dan I_C . Notasi V_{EE} dan V_{CC} masing-masing adalah tegangan catu emitor dan tegangan catu kolektor. Berdasarkan gambar 49 juga, dengan memberlakukan hukum *Kirchhoff* dapat diperoleh persamaan tegangan dan arus untuk *loop* input sebagai berikut,

$$V_{EE} = I_E R_E + V_{EB} \quad \text{persamaan (66)}$$

atau
$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{EB}}{R_E} \quad \text{persamaan (67)}$$

Selain itu, dapat pula diperoleh persamaan tegangan dan arus untuk *loop* output sebagai berikut,

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CB} \quad \text{persamaan (68)}$$

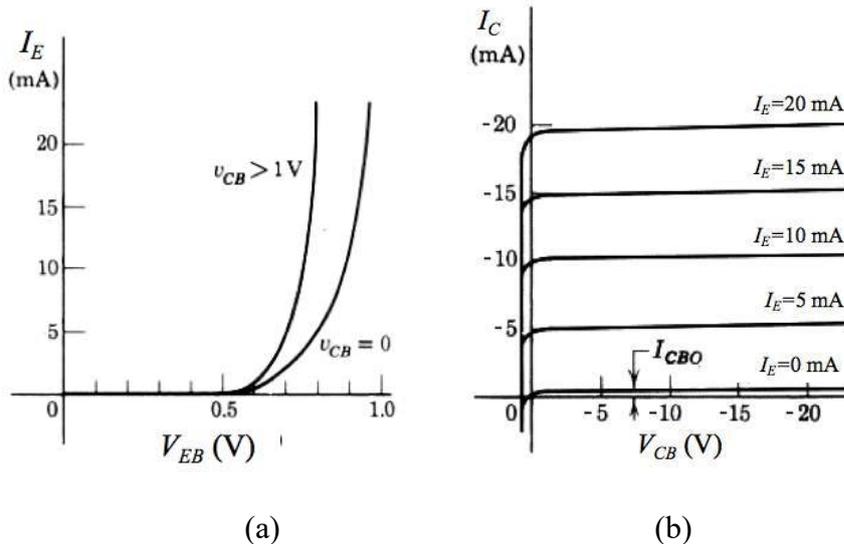
atau
$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CB} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad \text{persamaan (69)}$$

Polaritas arus dan tegangan pada persamaan (67) dan persamaan (69) untuk transistor *common base* tipe pnp dan npn ditunjukkan oleh tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Polaritas arus dan tegangan transistor *common base* tipe pnp dan npn

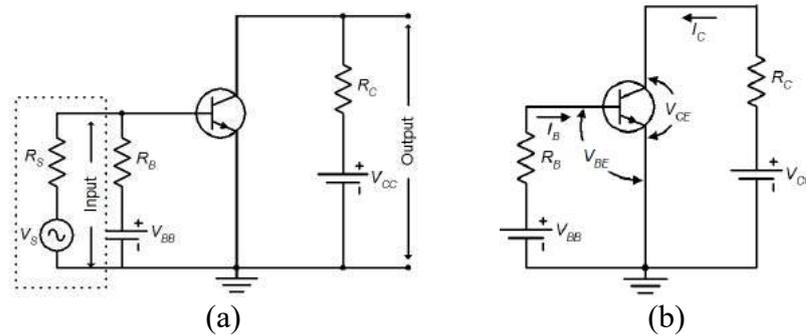
Tipe Transistor	Loop Input			Loop Output		
	I_E	V_{EB}	V_{BB}	I_C	V_{CB}	V_{CC}
pnp	+	+	+	-	-	-
npn	-	-	-	+	+	+

Sesuai dengan tegangan yang terpasang dan arus yang mengalir pada *loop* input dan *loop* output, karakteristik V-I transistor dalam konfigurasi *common base* dapat divisualisasikan seperti ditunjukkan pada gambar 50.



Gambar 50. Karakteristik transistor *common base*: (a) input; (b) output

Selain *common base*, terdapat konfigurasi lain yang memungkinkan dapat melakukan penguatan arus yakni konfigurasi *common emitter*. Konfigurasi ini menempatkan emitor (E) sebagai bagian bersama antara *loop* input dan *loop* output dengan sinyal input dimasukkan melalui kaki B dan output diambil dari kaki C.



Gambar 51. Konfigurasi transistor *common emitter* tipe npn: (a) rangkaian dengan input sumber AC; (b) rangkaian untuk analisis DC

Seperti halnya pada *common base*, pada konfigurasi transistor *common emitter* juga terdapat arus jenuh balik ketika inputnya terbuka (saat $I_B=0$) yang diberi notasi I_{CEO} , sehingga arus outputnya dapat ditulis,

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \quad \text{persamaan (70)}$$

Jika dianggap nilai arus jenuh balik I_{CEO} jauh lebih kecil dibandingkan nilai βI_B maka dapat diperoleh persamaan,

$$I_C = \beta I_B$$

atau
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{persamaan (71)}$$

Parameter β disebut *gain* arus transistor pada konfigurasi *common emitter*.

Jika dilakukan substitusi persamaan (63) dan persamaan (65) ke dalam persamaan (71), maka dapat diperoleh hubungan antara α dan β sebagai berikut,

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\frac{I_C}{I_E}}{\frac{I_E - I_C}{I_E}}$$

jadi
$$\beta = \frac{a}{1-a} \quad \text{persamaan (72)}$$

dan
$$a = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_C + I_B} = \frac{\frac{I_C}{I_B}}{\frac{I_C + I_B}{I_B}}$$

atau
$$a = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{persamaan (73)}$$

Merujuk persamaan (72), terlihat bahwa nilai β selalu lebih besar dari satu sehingga memungkinkan konfigurasi *common emitter* menyediakan *gain* arus yang besar. Selain *gain* arus α dan β , dapat juga dituliskan arus kolektor yang mengekspresikan hubungan konfigurasi *common emitter* dan *common base* sebagai berikut,

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

$$I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO}$$

$$I_C - \alpha I_C = \alpha I_B + I_{CBO}$$

$$I_C(1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CBO}$$

jadi
$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \quad \text{persamaan (74)}$$

Persamaan (74) identik dengan persamaan (70) yakni $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$, dengan $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ dan arus jenuh balik sebesar,

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \quad \text{persamaan (75)}$$

Substitusi persamaan (73) ke dalam persamaan (75) menghasilkan,

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} = (\beta + 1) I_{CBO} \quad \text{persamaan (76)}$$

Gambar 51 (b) memperlihatkan bahwa tegangan dan arus pada *loop* input dinyatakan dalam notasi V_{BE} dan I_B , sedangkan tegangan dan arus *loop* output dalam V_{CE} dan I_C . Notasi V_{BB} dan V_{CC} masing-masing menunjukkan tegangan catu untuk basis dan tegangan catu kolektor. Berdasarkan hukum *Kirchhoff* dapat ditulis persamaan tegangan/arus *loop* input untuk konfigurasi *common emitter*,

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} \quad \text{persamaan (77)}$$

atau
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad \text{persamaan (78)}$$

dan persamaan tegangan/arus output,

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \quad \text{persamaan (79)}$$

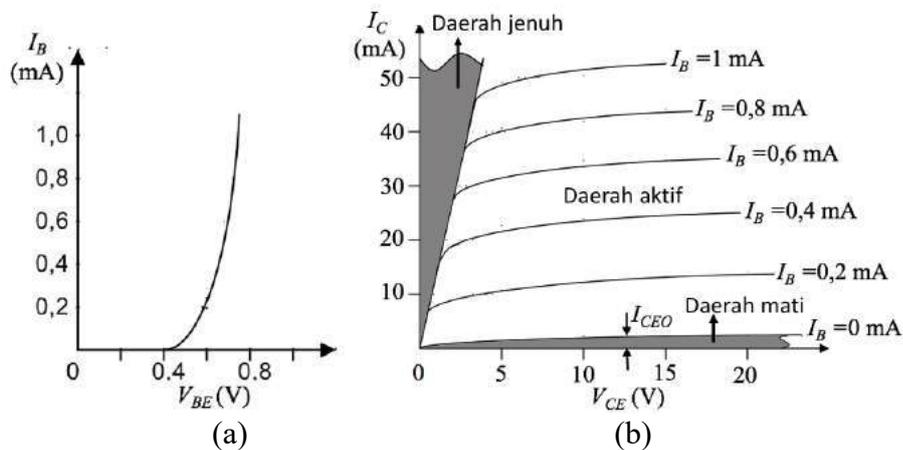
atau
$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad \text{persamaan (80)}$$

Polaritas arus dan tegangan pada persamaan (77) dan persamaan (79) untuk transistor *common emitter* tipe pnp dan npn ditunjukkan oleh tabel 10 berikut ini.

Tabel 10. Polaritas arus dan tegangan transistor *common emitter* tipe pnp dan npn

Tipe Transistor	Loop Input			Loop Output		
	I_B	V_{BE}	V_{BB}	I_C	V_{CE}	V_{CC}
pnp	-	-	-	-	-	-
npn	+	+	+	+	+	+

Sesuai dengan tegangan yang terpasang dan arus yang mengalir pada *loop* input dan *loop* output, karakteristik V-I transistor dalam konfigurasi *common emitter* dapat divisualisasikan seperti pada gambar 52.



Gambar 52. Karakteristik V-I transistor *common emitter*: (a) input; (b) output

b. Analisis Garis Beban Rangkaian Transistor

Pemasangan tegangan prasikap dapat menyebabkan transistor beroperasi pada satu di antara tiga daerah operasi yakni aktif, jenuh (saturasi) atau mati (*cut-off*). Daerah operasi transistor dapat ditentukan dengan mengetahui terlebih dahulu

tegangan dan arus operasi melalui analisis garis beban. Sebagai contoh, jika disediakan rangkaian seperti pada gambar 51(b) dengan $V_{BB}=6$ V, $V_{CC}=16$ V, $R_B=13,5$ K Ω , $R_C=320$ Ω , transistor terbuat dari bahan silikon (Si) dan karakteristik input serta outputnya seperti pada gambar 52, maka analisis garis dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.

1) Menyusun Persamaan Arus *Loop* Output

Telah diketahui di muka bahwa pada *loop* output untuk konfigurasi *common emitter* berlaku persamaan (79) yakni $I_C = -\frac{1}{R_C}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$. Oleh karena V_{CC} dan R_C berupa konstanta serta I_C dan V_{CE} merupakan variabel, maka persamaan tersebut sesungguhnya berupa sebuah persamaan garis lurus $y=ax+b$ dengan $a = -\frac{1}{R_C}$, $b = \frac{V_{CC}}{R_C}$, $y = I_C$ dan $x = V_{CE}$. Jika disajikan dalam bentuk grafik, persamaan (79) dapat dilukiskan sebagai garis lurus yang menempati koordinat kartesian dengan sumbu V_{CE} dan sumbu I_C serta memiliki gradien atau kemiringan $-\frac{1}{R_C}$.

2) Menetapkan Titik Potong Garis Pada Sumbu I_C dan Sumbu V_{CE}

Titik potong garis $I_C = -\frac{1}{R_C}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$ pada sumbu I_C ditentukan dengan mencari nilai arus saturasi (maksimum) yang mengalir pada *loop* output, sehingga diasumsikan $V_{CE}=0$. Sementara itu, titik potong garis pada sumbu V_{CE} diperoleh dengan menghitung tegangan *cut-off* (maksimum) pada ujung-ujung C-E transistor sehingga digunakan asumsi $I_C=0$.

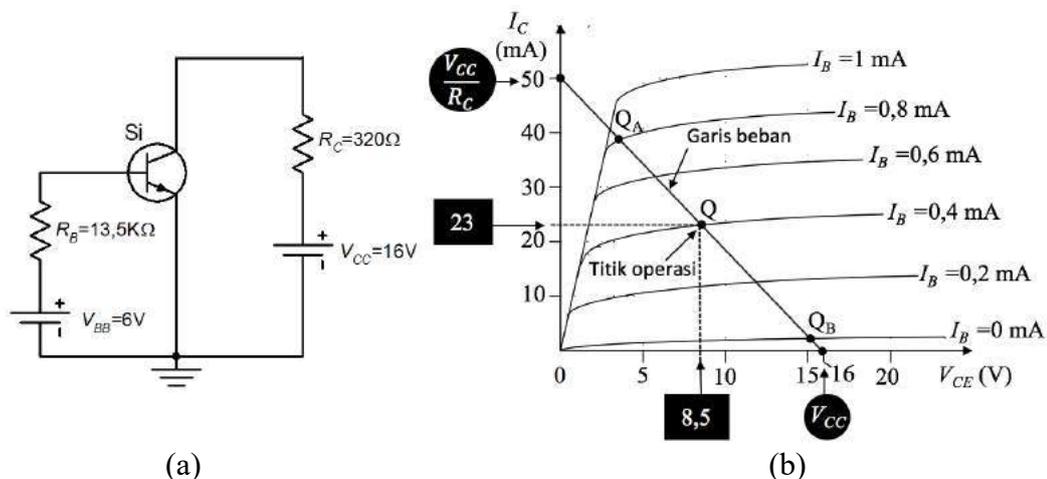
Merujuk pada persamaan (79), gambar 51(b) dan gambar 53 (a), dengan asumsi $V_{CE}=0$ maka dapat diperoleh,

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} 0 + \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{16}{320}$$

$$I_C = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

Jadi, dengan $I_C = 50 \text{ mA}$ dapat ditetapkan titik potong garis pada sumbu I_C yakni di koordinat $(V_{CE}, I_C) = (0, 50)$ seperti pada gambar 53 (b).



Gambar 53. Analisis garis beban pada rangkaian transistor *common emitter*:
 (a) rangkaian yang dianalisis; (b) proses analisis

Berdasarkan persamaan (79) dan dengan asumsi $I_C = 0$, titik potong garis pada sumbu V_{CE} dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut,

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$0 = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$V_{CE} = V_{CC} = 16 \text{ V}$$

Jadi, dengan $V_{CE} = 16 \text{ volt}$ dapat ditetapkan titik potong garis pada sumbu V_{CE} yakni di koordinat $(V_{CE}, I_C) = (16, 0)$.

3) Membuat Garis Beban

Garis beban dapat dibuat dengan menarik garis dari titik $(0,50)$ ke titik $(16,0)$ pada grafik karakteristik output seperti pada gambar 53 (b). Garis dengan

persamaan $I_C = -\frac{1}{R_C}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$ tersebut merupakan garis beban dengan kemiringan $-\frac{1}{R_C}$.

4) Menentukan Titik Operasi Transistor

Titik operasi Q merupakan titik perpotongan antara garis beban dengan kurva parameter arus basis yang sesuai, oleh sebab itu perlu ditentukan terlebih dahulu besarnya arus basis. Berdasarkan persamaan (77) dan dengan mengingat transistor terbuat dari bahan silikon ($V_{BE}=0,6$ V), maka arus basis dapat dihitung sebagai berikut,

$$I_B = \frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_B} = \frac{6-0,6}{13,5 \times 10^3} = 0,4 \text{ mA.}$$

Berdasarkan nilai arus basis yang telah dihitung tersebut, titik operasi diperoleh dengan memotongkan garis beban $I_C = -\frac{1}{R_C}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$ dengan kurva parameter arus basis $I_B = 0,4$ mA.

5) Menentukan Spesifikasi Titik Operasi Transistor

Spesifikasi titik operasi transistor ditunjukkan oleh besarnya nilai tegangan dan arus pada titik tersebut yang diperoleh dengan cara menarik garis dari titik Q ke arah horisontal dan vertikal. Penentuan tegangan dan arus ini dilakukan dengan perkiraan, sehingga akurasi tergantung pada skala terkecil dari sumbu I_C dan V_{CE} yang disediakan. Dengan cara tersebut dapat diperoleh besarnya tegangan dan arus output transistor yang menunjukkan spesifikasi titik operasi sebagai berikut.

$$V_{CEQ}=8,5 \text{ V}$$

$$I_{CQ}=23 \text{ mA}$$

Spesifikasi titik operasi akan menentukan daerah operasi transistor untuk suatu tegangan prasikap tertentu. Pemilihan titik operasi yang tepat akan memberikan kinerja transistor yang baik dalam menguatkan arus dan tegangan karena tidak menimbulkan distorsi pada sinyal output yang dikuatkan. Untuk memperoleh kondisi tersebut, titik operasi berada kira-kira di tengah-tengah arus saturasi dan tegangan maksimum (Garg, Dixit & Yadav, 2008: 201-203).

Memperhatikan kriteria penempatan titik operasi tersebut, terlihat bahwa spesifikasi titik operasi yang diperoleh, menunjukkan transistor yang dianalisis bekerja pada daerah aktif sebagai penguat karena $I_{CQ} = 23 \text{ mA}$ bernilai di sekitar setengah dari arus saturasi $\frac{V_{CC}}{R_C} = 50 \text{ mA}$, dan $V_{CEQ} = 8,5 \text{ V}$ nilainya juga di sekitar setengah tegangan maksimumnya ($V_{CC}=16 \text{ V}$). Pada gambar 53 (b) diperlihatkan pula bahwa jika tegangan prasikap diubah yang menyebabkan titik operasi bergeser ke titik Q_A maka transistor menjadi bekerja pada daerah jenuh (ON), dan jika titik operasinya bergeser ke titik Q_B transistor bekerja di daerah mati (OFF).

6) Menentukan *Gain* Transistor

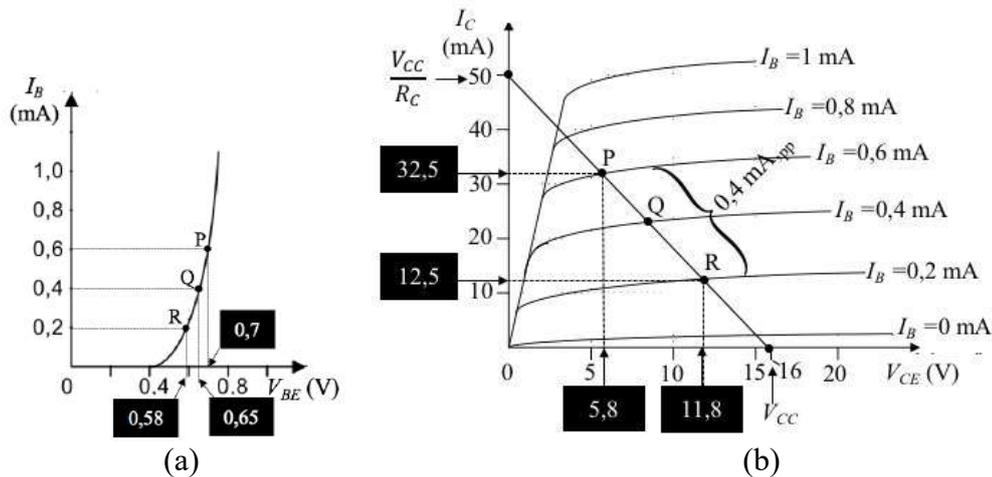
Sesuai dengan persamaan (71), *gain* arus pada titik operasi merupakan perbandingan antara arus kolektor terhadap arus basis di titik operasi yakni sebesar,

$$\beta = \frac{I_{CEQ}}{I_{BQ}} = \frac{23 \text{ mA}}{0,4 \text{ mA}} = 57,5$$

Nilai β tersebut disebut *gain* arus DC karena merupakan perbandingan arus searah di titik operasi.

Gain arus AC dapat dihitung jika rangkaian tersebut diberi input arus bolak-balik. Sebagai contoh, jika sinyal sinusoidal sebesar 0,4 mA puncak ke puncak

(*peak-to-peak*) dimasukkan ke rangkaian dengan cara seperti pada gambar 51(a) di atas, maka puncak maksimumnya akan berada pada titik P dan puncak minimumnya di titik R seperti ditunjukkan pada gambar 54 (b) di bawah ini.



Gambar 54. Analisis garis beban untuk menentukan *gain* sinyal AC

Merujuk persamaan (71) dan dengan memperhatikan titik P dan titik R pada gambar 54 (b), dapat diperoleh nilai *gain* arus untuk sinyal AC sebagai berikut,

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{32,5 - 12,5}{0,6 - 0,2}$$

$$\beta_{AC} = 50.$$

Selain *gain* arus, melalui analisis garis beban juga dapat diperoleh *gain* tegangan. Untuk menghitung *gain* tegangan, perlu dilakukan terlebih dahulu pemindahan titik operasi dari grafik karakteristik output ke input seperti ditunjukkan pada gambar 54 (a). *Gain* tegangan merupakan perbandingan tegangan output dan input, dan untuk *gain* tegangan AC nilainya dapat ditulis,

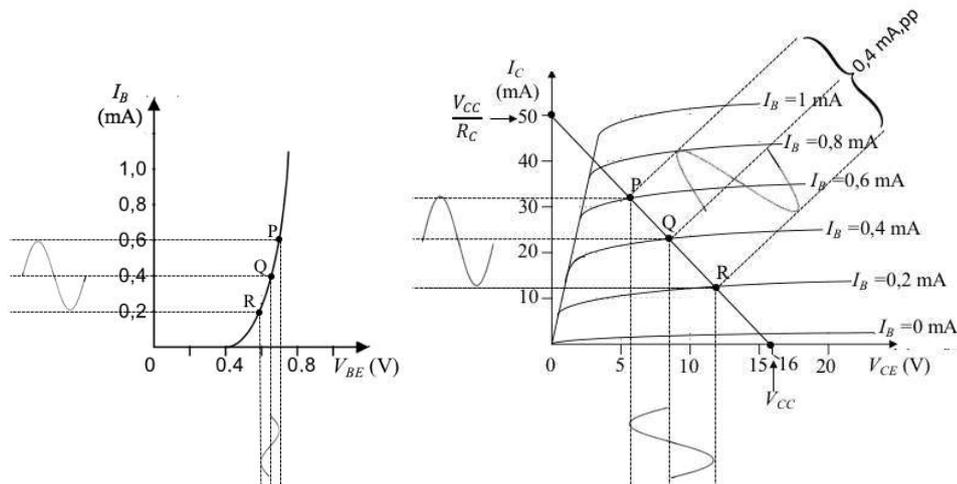
$$A_v = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} \quad \text{persamaan (81)}$$

Berdasarkan gambar 54 (a) dan gambar 54 (b) serta dengan menggunakan persamaan (80), dapat diperoleh *gain* tegangan sebagai berikut,

$$A_v = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} = \frac{11,8 - 5,8}{0,7 - 0,58}$$

$$A_v = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} = 50.$$

Pemilihan titik operasi Q yang tepat yakni berada di tengah-tengah daerah aktif, akan memberikan kinerja yang baik pada transistor, dalam hal ini tegangan dan arus yang dikuatkan pada outputnya tidak mengalami distorsi/cacat karena nilai maksimum sinyalnya jauh dari daerah saturasi dan daerah mati, seperti ditunjukkan pada gambar 55.



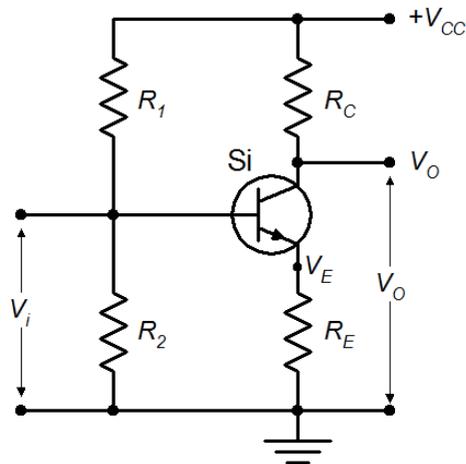
Gambar 55. Ilustrasi pemilihan titik operasi pada daerah aktif
Melalui gambar 55 juga terlihat bahwa pada transistor dengan konfigurasi

common emitter fase tegangan outputnya terbalik 180° terhadap fase tegangan inputnya. Keadaan ini menjadi ciri khas dari transistor yang disusun dalam konfigurasi *common emitter*.

8. Amplifier *Common Emitter*

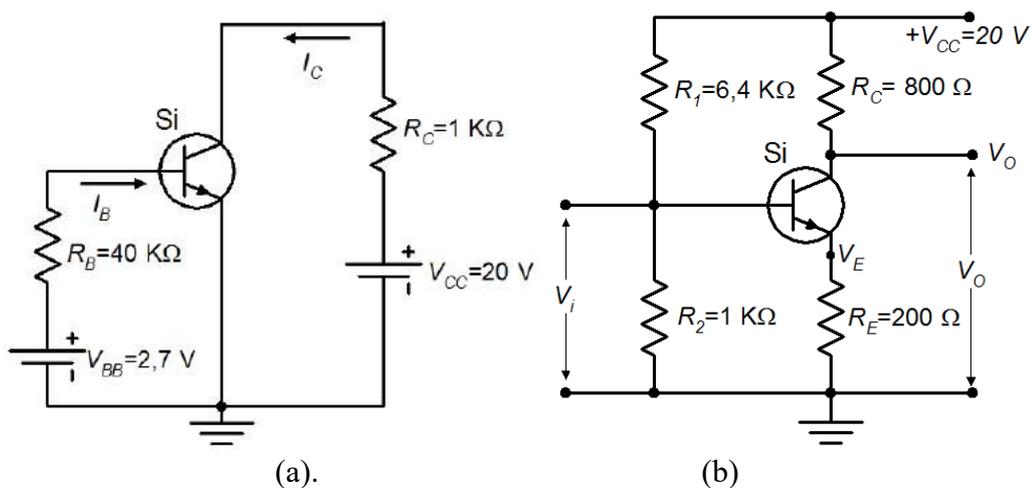
Salah satu aplikasi transistor adalah sebagai *amplifier* atau penguat yang berfungsi menguatkan arus/tegangan yang dimasukkan ke inputnya. Konfigurasi *amplifier* yang umum digunakan adalah *common emitter* menggunakan prasikap

pembagi tegangan (*voltage divider bias*) yang dilengkapi dengan prasikap emitor (*emitter bias*) seperti ditunjukkan pada gambar 56.



Gambar 56. Amplifier *common emitter*

Pemasangan resistor R_E , sebagai prasikap emitor dapat memberikan tingkat kestabilan yang baik terhadap pengaruh perubahan suhu dibandingkan rangkaian menggunakan prasikap tetap (*fixed bias*). Gambar 57(a) berikut ini adalah contoh rangkaian yang disusun menggunakan prasikap tetap, sedangkan gambar 57(b) rangkaian transistor dengan prasikap pembagi tegangan dilengkapi prasikap emitor.



Gambar 57. Rangkaian untuk analisis perbandingan stabilisasi:
(a) prasikap tetap; (b) prasikap pembagi tegangan dan prasikap emitor

a. Analisis Stabilitas Amplifier *Common Emitter*

Parameter β , V_{BE} dan I_{CBO} adalah besaran-besaran yang sensitif terhadap perubahan suhu. Jika transistor naik suhunya, nilai β dapat naik hingga 6 kali dan I_{CBO} dapat naik sampai 10 kali dari nilai semula, namun V_{BE} berkurang dengan kelajuan $-25 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Untuk menunjukkan kinerja rangkaian dengan prasikap pembagi tegangan yang dilengkapi prasikap emitor dalam menjaga stabilitas outputnya akan dibuat pemisalan dua kondisi suhu yang ekstrim. Kondisi ekstrim pertama, β memiliki nilai yang bervariasi dari 50 sampai dengan 300, V_{BE} berubah dari 0,9 ke 0,5 V, dan I_{CBO} berubah dari 1 ke 10 nA. Sesuai persamaan (70) dan persamaan (76), rangkaian menggunakan prasikap tetap pada gambar 57 (a) akan memberikan nilai arus I_C untuk kondisi ekstrim pertama dengan $\beta_1=50$, $V_{BE1}=0,9\text{V}$ dan $I_{CBO1}= 1\text{nA}$ sebesar,

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} + (\beta_1 + 1) I_{CBO1}$$

Sebelum I_C dihitung, ditentukan nilai I_B terlebih dahulu sebagai berikut,

$$I_{B1} = \frac{V_{BB} - V_{BE1}}{R_B} = \frac{2,7 - 0,9}{40 \times 10^3} \approx 0,045 \text{ mA}$$

sehingga nilai I_{C1} menjadi,

$$I_{C1} = 50 \times 0,045 \times 10^{-3} + (50 + 1) \times 10^{-9} \approx 0,00225 \text{ A} \approx 2,25 \text{ mA}$$

Selanjutnya, untuk kondisi ekstrim kedua dengan $\beta_2=300$, $V_{BE2}=0,5\text{V}$ dan $I_{CBO2}= 10 \text{ nA}$, rangkian dengan prasikap tetap memberikan nilai arus I_C sebesar,

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} + (\beta_2 + 1) I_{CBO2}$$

dan dengan nilai arus basis,

$$I_{B2} = \frac{V_{BB} - V_{BE2}}{R_B} = \frac{2,7 - 0,5}{40 \times 10^3} \approx 0,055 \text{ mA}$$

maka nilai I_{C2} menjadi,

$$I_{C2} = 300 \times 0,055 \times 10^{-3} + (300 + 1) \times 10 \times 10^{-9}$$

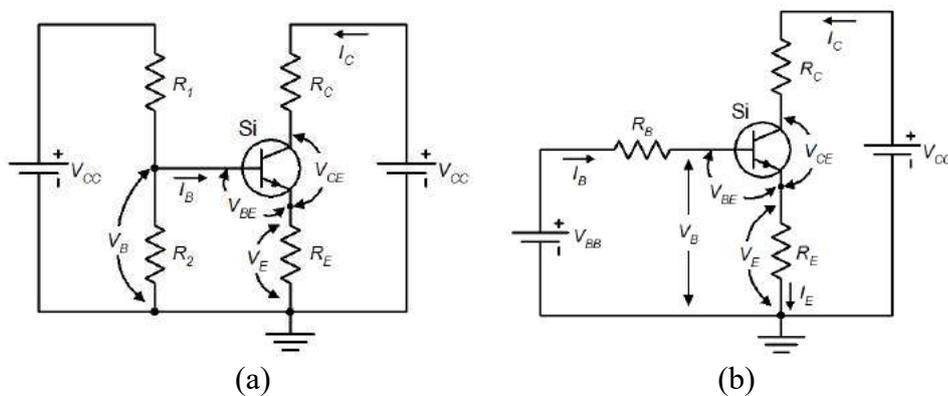
$$I_{C2} \approx 0,0165 \text{ A} \approx 16,5 \text{ mA}$$

Jadi, untuk dua kondisi ekstrim tersebut, transistor dengan prasikap tetap memberikan perbedaan output yang besar yakni,

$$I_{C2} - I_{C1} = (16,5 - 2,25) \times 10^{-3} = 14,25 \text{ mA},$$

sehingga dapat dikatakan bahwa amplifier transistor dengan prasikap tetap tidak mampu menjaga kestabilan outputnya terhadap pengaruh perubahan suhu.

Untuk keperluan analisis kinerja transistor dengan prasikap pembagi tegangan dan prasikap emitor pada kedua keadaan ekstrim tersebut, rangkaian amplifier *common emitter* pada gambar 57(b) diubah bentuknya menjadi rangkaian seperti pada gambar 58.



Gambar 58. Rangkaian ekivalen amplifier *common emitter*

Merujuk gambar 58 (b) dan dengan memperhatikan hukum *Kirchhoff*, pada *loop* input berlaku persamaan,

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + V_E$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E \quad \text{persamaan (82)}$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} - I_B (R_B + R_E)}{R_E} \quad \text{persamaan (83)}$$

Sementara itu dari persamaan (70) dan persamaan (76) telah diketahui bahwa $I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO}$, sehingga dapat diperoleh persamaan untuk I_B ,

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} - \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) I_{CBO} \quad \text{persamaan (84)}$$

Substitusi persamaan (84) ke dalam persamaan (83) menghasilkan,

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} - \left(\frac{I_C}{\beta} - \frac{\beta+1}{\beta} I_{CBO}\right)(R_B + R_E)}{R_E}$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} - I_C \frac{R_B + R_E}{\beta} + \frac{\beta+1}{\beta} I_{CBO}(R_B + R_E)}{R_E}$$

$$I_C R_E + I_C \frac{R_B + R_E}{\beta} = V_{BB} - V_{BE} + \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) I_{CBO}(R_B + R_E)$$

$$I_C \left(R_E + \frac{R_B + R_E}{\beta}\right) = V_{BB} - V_{BE} + \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) I_{CBO}(R_B + R_E)$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} + \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) I_{CBO}(R_B + R_E)}{R_E + \frac{R_B + R_E}{\beta}} \quad \text{persamaan (85)}$$

Resistor R_1 dan R_2 membentuk konfigurasi pembagi tegangan, sehingga tegangan V_{BB} dan resistansi R_B dapat ditentukan dengan formula,

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad \text{persamaan (86)}$$

dan $R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{persamaan (87)}$

Berdasarkan persamaan (86) dan persamaan (87), dapat dihitung V_{BB} dan R_B yakni sebesar,

$$V_{BB} = \frac{1K}{6,4K + 1K} 20 = 2,7 \text{ V} \quad \text{dan} \quad R_B = \frac{6,4K \times 1K}{6,4K + 1K} = 865 \Omega.$$

Untuk kondisi ekstrim pertama dengan $\beta_1=50$, $V_{BE1}=0,9\text{V}$ dan $I_{CBO1}= 1\text{nA}$, sesuai dengan persamaan (85), rangkaian amplifier *common emitter* dengan prasikap pembagi tegangan dan prasikap emitor akan memberikan I_C sebesar,

$$I_{C1} = \frac{V_{BB} - V_{BE1} + \left(\frac{\beta_1 + 1}{\beta_1}\right)I_{CBO1}(R_B + R_E)}{R_E + \frac{R_B + R_E}{\beta_1}}$$

$$I_{C1} = \frac{2,7 - 0,9 + \left(\frac{50 + 1}{50}\right)10^{-9}(865 + 200)}{200 + \frac{865 + 200}{50}}$$

$$I_{C1} = 8,13 \text{ mA.}$$

Sedangkan untuk kondisi ekstrim kedua dengan $\beta_2=300$, $V_{BE2}=0,5\text{V}$ dan $I_{CBO1}= 10 \text{ nA}$, arus kolektornya sebesar,

$$I_{C2} = \frac{V_{BB} - V_{BE2} + \left(\frac{\beta_2 + 1}{\beta_2}\right)I_{CBO2}(R_B + R_E)}{R_E + \frac{R_B + R_E}{\beta_2}}$$

$$I_{C2} = \frac{2,7 - 0,5 + \left(\frac{300 + 1}{300}\right)10 \times 10^{-9}(865 + 200)}{200 + \frac{865 + 200}{300}}$$

$$I_{C2} = 10,81 \text{ mA.}$$

Selisih arus kolektor antar kedua keadaan ekstrim itu cukup kecil dibandingkan pada prasikap tetap yakni,

$$I_{C2} - I_{C1} = (10,81 - 8,13) \times 10^{-3} = 2,68 \text{ mA,}$$

hal ini menunjukkan bahwa amplifier dengan prasikap pembagi tegangan yang dilengkapi prasikap emitor memberikan tingkat stabilitas yang baik terhadap pengaruh perubahan suhu.

b. Perancangan Amplifier *Common Emitter*

Agar diperoleh stabilitas yang baik, *gain* yang optimal dan jangkauan (*swing*) output yang menjamin bentuk tegangan/arus output tidak cacat, perancangan rangkaian amplifier *common emitter* perlu menggunakan prinsip-prinsip sebagai berikut: (1) nilai tegangan emitor terhadap *ground* (V_E) harus

mendekati satu per sepuluh tegangan catu V_{CC} ; dan (2) βR_E nilainya sepuluh kali lebih besar dari resistansi R_B (Kal, 2002: 103; Smith & Dorf, 1992: 565), sehingga,

$$V_E \approx 0,1V_{CC} \quad \text{dan} \quad R_B \approx \frac{\beta R_E}{10} \quad \text{persamaan (88)}$$

Penjelasan lebih lanjut dari kedua prinsip tersebut dapat dilakukan dengan memperhatikan persamaan (85) yakni $I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE} + (\frac{\beta+1}{\beta}) I_{CBO} (R_B + R_E)}{R_E + \frac{R_B + R_E}{\beta}}$. Persamaan

ini menunjukkan bahwa arus IC dipengaruhi oleh tiga variabel yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu yakni I_{CBO} , β dan V_{BE} . Merujuk persamaan ini, agar I_C independen terhadap I_{CBO} maka perlu diatur,

$$\frac{\beta+1}{\beta} I_{CBO} (R_B + R_E) \ll V_{BB} - V_{BE} \quad \text{persamaan (89)}$$

Oleh karena dengan pendekatan kasar, untuk $\beta > 50$ menyebabkan nilai $\frac{\beta+1}{\beta} \approx 1$ dan untuk $R_B > 5R_E$ dapat dianggap $(R_B + R_E) \approx R_B$, maka persamaan (89) menjadi $I_{CBO} (R_B + R_E) \approx I_{CBO} R_B \ll V_{BB} - V_{BE}$.

Pengaturan lain yang perlu dilakukan adalah membuat I_C agar independen terhadap β yakni dengan menetapkan,

$$\frac{R_B + R_E}{\beta} \approx \frac{R_B}{\beta} \ll R_E$$

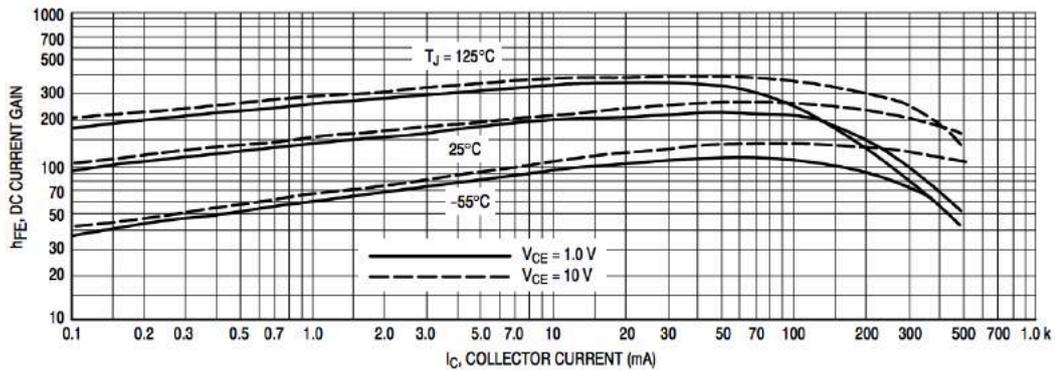
atau $R_B \ll \beta R_E$ persamaan (90)

Sedangkan agar I_C independen terhadap V_{BE} , maka perlu diatur $V_{BE} \ll V_{BB}$.

Jika dilakukan pengaturan agar nilai βR_E sepuluh kali nilai R_B , maka persamaan (90) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (88) di muka yakni $10 R_B \approx \beta R_E$ atau $R_B \approx \frac{\beta R_E}{10}$.

Langkah awal untuk merancang amplifier *common emitter* adalah menetapkan V_{CC} , I_C dan β terlebih dahulu berdasarkan *datasheet* transistor.

Misalnya untuk transistor 2N2222 dalam *datasheet* yang diterbitkan oleh *Semiconductor Components Industries* tercantum data seperti pada gambar 59 berikut ini.



Gambar 59. Hubungan antara β (h_{FE}) dengan I_C berdasarkan *datasheet* transistor 2N2222 (On-Semiconductor, 2013: 3)

Untuk $V_{CE}=10$ V dan $I_C=1$ mA, dari *datasheet* pada gambar 59 dapat diperoleh nilai *gain* arus DC sebesar $\beta=160$. Merujuk persamaan (88), nilai tegangan emitor, resistansi emitor dan resistansi basis dapat ditemukan berturut-turut sebesar,

$$V_E = 0,1V_{CC} = 0,1 \cdot 20 = 2V,$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_C} = \frac{2}{1 \times 10^{-3}} = 2 \text{ K}\Omega,$$

dan
$$R_B = \frac{\beta R_E}{10} = \frac{160 \times 2 \times 10^3}{10} = 32 \text{ K}\Omega.$$

Karena nilai tegangan emitor sudah dapat dihitung yakni sebesar $V_E = 2V$, maka resistansi kolektor dapat ditentukan dengan persamaan (91),

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} \quad \text{persamaan (91)}$$

sehingga,

$$R_C = \frac{20 - 10 - 2}{1 \times 10^{-3}} = 8 \text{ K}\Omega.$$

Sesuai persamaan (87), formula untuk resistansi R_1 dapat diperoleh melalui penurunan sebagai berikut,

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{atau} \quad R_1 = \frac{R_B (R_1 + R_2)}{R_2}$$

menurut persamaan (86), $V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$ atau $\frac{V_{CC}}{V_{BB}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$, sehingga persamaan R_1 dapat ditulis dalam bentuk,

$$R_1 = R_B \frac{V_{CC}}{V_{BB}} \quad \text{persamaan (92)}$$

Untuk menentukan R_1 perlu dihitung terlebih V_{BB} menggunakan persamaan (82), yakni $V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + (I_C + I_B) R_E$. Jika digunakan nilai $I_B = \frac{I_C}{\beta}$ dan dianggap transistornya dari bahan silikon dengan $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$, maka,

$$V_{BB} = \frac{I_C}{\beta} R_B + V_{BE} + (I_C + \frac{I_C}{\beta}) R_E \quad \text{persamaan (93)}$$

$$V_{BB} = \frac{1 \times 10^{-3}}{160} \times 32 \times 10^3 + 0,7 + \left(1 \times 10^{-3} + \frac{1 \times 10^{-3}}{160} \right) \times 2 \times 10^3$$

$$V_{BB} = 2,91 \text{ V.}$$

$$\text{Jadi, } R_1 = 32 \times 10^3 \frac{20}{2,91} = 220 \text{ K}\Omega.$$

Merujuk persamaan (87), rumus resistansi R_2 dapat diperoleh melalui penurunan sebagai berikut,

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{atau} \quad R_1 R_2 = R_B (R_1 + R_2) = R_B R_1 + R_B R_2$$

$$R_1 R_2 - R_B R_2 = R_B R_1 \quad \text{atau} \quad R_2 (R_1 - R_B) = R_B R_1,$$

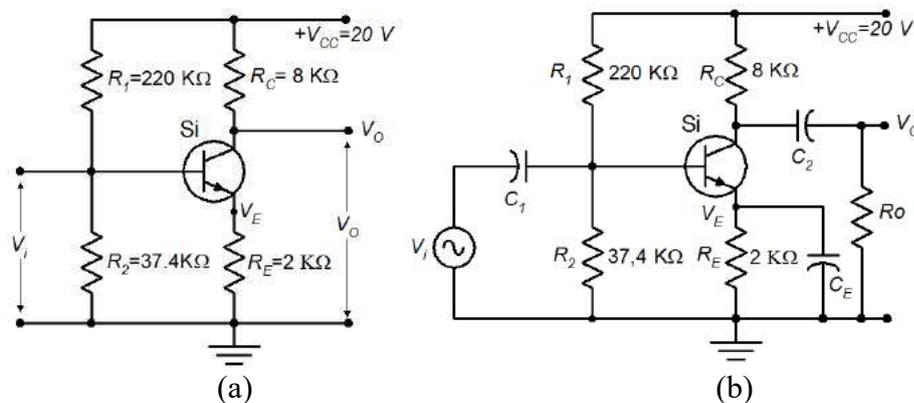
sehingga dapat ditulis dalam bentuk,

$$R_2 = \frac{R_B R_1}{R_1 - R_B} \quad \text{persamaan (94)}$$

Jika nilai-nilai R_I dan R_B dimasukkan, hasilnya adalah,

$$R_2 = \frac{32 \times 10^3 \times 220 \times 10^3}{220 \times 10^3 - 32 \times 10^3} = 37,4 \text{ K}\Omega.$$

Berdasarkan hasil perhitungan pada perancangan tersebut, dapat disusun amplifier *common emitter* secara lengkap seperti ditunjukkan pada gambar 60 (a), sedangkan rangkaian amplifier yang dilengkapi kapasitor *by pass* paralel dengan resistor emitor untuk input berupa sinyal AC, ditunjukkan pada gambar 60(b).



Gambar 60. Rangkaian amplifier hasil rancangan: (a) tanpa kapasitor *bypass*; (b) terpasang kapasitor *bypass* dengan input arus AC sinyal kecil

Untuk gambar 60(a), *gain* tegangan DC yang dapat diberikan oleh rangkaian menurut Scherz & Monk (2013) adalah,

$$A_V = \frac{R_C}{r_{tr} + R_E} \quad \text{persamaan (95)}$$

Notasi r_{tr} adalah *transresistance* yakni resistansi internal dalam transistor untuk pertemuan basis-emitor. Besarnya r_{tr} merupakan perbandingan antara tegangan kesetaraan suhu pada pertemuan basis-emitor (0,026 V) terhadap arus emitor yang diformulasikan dalam bentuk,

$$r_{tr} = \frac{0,026}{I_E} = \frac{0,026}{I_C + I_B}$$

dan dengan anggapan arus basis dapat diabaikan terhadap arus kolektor ($I_C \gg I_B$), maka nilai *transresistance* dapat ditulis,

$$r_{tr} = \frac{0,026}{I_C} \quad \text{persamaan (96)}$$

Telah diketahui bahwa $I_C = 1 \text{ mA}$, sehingga

$$r_{tr} = \frac{0,026}{1 \times 10^{-3}} = 26 \Omega$$

dan berdasarkan persamaan (95), gain tegangan pada gambar 60(a) menjadi,

$$A_V = \frac{R_C}{r_{tr} + R_E} = \frac{8 \times 10^3}{26 + 2 \times 10^3} = 3,95$$

Untuk memperoleh *gain* tegangan yang besar, rangkaian perlu dilengkapi dengan kapasitor *bypass* yang dipasang secara paralel terhadap resistor R_E . Pemasangan kapasitor C_E membentuk konfigurasi filter *high pass* terhadap *transresistance* r_{tr} dengan frekuensi *cut-off* sebesar,

$$f_c = \frac{1}{2\pi r_{tr} C_E} \quad \text{persamaan (97)}$$

Jika diinginkan frekuensi *cut-off* sebesar 300 Hz, maka nilai C_E sebesar,

$$C_E = \frac{1}{2\pi r_{tr} f_c} = \frac{1}{2\pi \times 26 \times 300} = 20,4 \mu\text{F}.$$

Untuk masukan sinyal sinusoidal, saat frekuensinya mencapai nilai *cut-off*, tegangan input mulai mengalami penguatan dan pada frekuensi yang tinggi penguatannya mencapai nilai maksimum. Hal ini terjadi karena pada frekuensi yang tinggi, reaktansi kapasitif kapasitor *bypass* sangat kecil, ujung-ujung kapasitor *bypass* seolah-olah terhubung singkat sehingga *gain* tegangannya sebesar,

$$A_{Vm} = \frac{R_C}{r_{tr}} \quad \text{persamaan (98)}$$

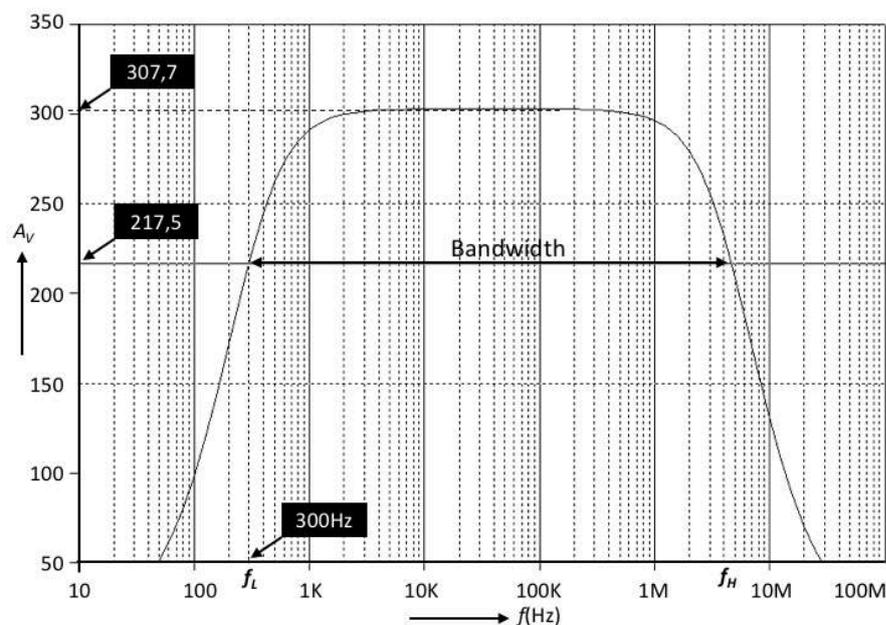
$$A_{Vm} = \frac{8 \times 10^3}{26} = 307,7$$

dan pada frekuensi *cut-off gain* mencapai,

$$A_{VC} = 0,707 \cdot \frac{R_C}{r_{tr}} = 0,707 \cdot A_{Vm} \quad \text{persamaan (99)}$$

$$A_V = 0,707 \times 307,7 = 217,5$$

Pada gambar 61 di bawah ini ditunjukkan respons amplitudo penguat *common emitter* dengan kapasitor *bypass*. Jarak antara frekuensi *cut-off* bawah (f_L) dan atas (f_H) merupakan lebar pita (*bandwidth*) dari amplifier, yang menunjukkan daerah kerja rangkaian dalam domain frekuensi.



Gambar 61. Respons amplitudo penguat *common emitter* dilengkapi kapasitor *bypass*

9. Laboratorium Virtual

Pada masa-masa sebelum teknologi informasi berkembang pesat seperti sekarang ini, pembelajaran praktik di lingkungan pendidikan sains dan teknik dilakukan dengan menggunakan laboratorium real yang bersifat *hands-on*. Sesuai dengan namanya, penggunaan laboratorium ini melibatkan secara penuh aktivitas

tangan sehingga pengguna dapat merasakan, menyentuh dan mengoperasikan peralatan-peralatan praktik secara langsung. Namun, perkembangan teknologi yang sangat pesat telah mengubah secara dramatis pandangan tentang laboratorium.

a. Kelayakan Laboratorium Virtual

Ma & Nickerson (2006: 3), Krivickas & Krivickas (2006: 191), dan Lustigova & Lustig (2009: 77) menyebutkan bahwa saat ini, selain laboratorium *hands-on* terdapat pula jenis laboratorium lain yakni laboratorium virtual dan *remote lab*. Jenis laboratorium yang terakhir, implementasinya memerlukan dukungan berbagai aplikasi teknologi informasi. Tabel 11 menunjukkan perbedaan jenis laboratorium dalam mendukung tercapainya tujuan pendidikan sarjana teknik.

Tabel 11.
Perbedaan jenis laboratorium dalam mendukung tujuan pendidikan teknik
Ma & Nickerson (2006: 8)

Tujuan Pendidikan Teknik	Dukungan Laboratorium Terhadap Pencapaian Tujuan Pendidikan		
	<i>Hands-on</i>	Virtual	<i>Remote</i>
Memberikan pemahaman konseptual (<i>conceptual understanding</i>)	Besar	Besar	Besar
Melatih keterampilan disain (<i>design skills</i>)	Besar	Besar	Kecil
Melatih keterampilan sosial (<i>social skills</i>)	Besar	Kecil	Kecil
Melatih keterampilan profesional (<i>professional skills</i>)	Besar	Besar	Besar

Selain itu, perbedaan jenis laboratorium juga dapat ditinjau dari aspek kelebihan dan kelemahan masing-masing seperti disajikan pada tabel 12 di bawah ini (Elawady & Tolba, 2009: 92).

Tabel 12.
Kelebihan dan Kelemahan Jenis-jenis Laboratorium

Aspek	<i>Hands-on</i>	<i>Virtual</i>	<i>Remote</i>
Mode Akses	Akses fisik ke laboratorium	Akses virtual ke eksperimen menggunakan program simulasi	Menggunakan internet dan <i>software</i> untuk mengakses laboratorium dari jarak jauh
	Kelebihan	Kelebihan	Kelebihan
	<ul style="list-style-type: none"> • Data realistik • Interaksi dengan alat real • Memungkinkan <i>open-ended</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Bagus untuk validasi konsep • Tidak ada batasan waktu dan fisik 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak ada batasan waktu dan ruang • Data realistik • Terasa real
	Kelemahan	Kelemahan	Kelemahan
	<ul style="list-style-type: none"> • Terbatas dalam penyediaan lingkungan fisik • Ruangan laboratorium tidak fleksibel 	<ul style="list-style-type: none"> • Data ideal (simulatif) • Tidak ada interaksi dengan peralatan real 	<ul style="list-style-type: none"> • Kehadiran di laboratorium bersifat <i>virtual</i>
Infrastruktur	Komponen-komponen <i>hardware</i> dan komputer jika diperlukan	<i>Software</i> program simulasi	Komponen-komponen <i>hardwar</i> , komputer dan media komunikasi
	Kelebihan	Kelebihan	Kelebihan
	<ul style="list-style-type: none"> • Menawarkan pemahaman realitas • Eksperimen di bawah supervisi dosen/instruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Bagus untuk pemahaman konseptual • Terjamin keamanannya, jika tindakan pencegahan dilakukan terhadap <i>account</i> pengguna 	<ul style="list-style-type: none"> • Menawarkan eksperimen dengan banyak waktu • Berguna jika hasil yang lebih real diperlukan
	Kelemahan	Kelemahan	Kelemahan
	<ul style="list-style-type: none"> • Komponen <i>hardware</i> memiliki <i>lifetime</i> tertentu • Membutuhkan perawatan komponen <i>hardware</i> • Mudah mengalami kerusakan 	<ul style="list-style-type: none"> • Membutuhkan <i>update</i> pada <i>software</i> simulasi yang digunakan 	<ul style="list-style-type: none"> • Komponen <i>hardware</i> memiliki <i>lifetime</i> tertentu • Membutuhkan perawatan komponen <i>hardware</i> • Menimbulkan masalah komunikasi
Pedagogis	Kelebihan	Kelebihan	Kelebihan
	<ul style="list-style-type: none"> • Menawarkan eksperimen secara real • Menyediakan interaksi dengan supervisor • Menawarkan mahasiswa untuk berkolaborasi • Menawarkan mahasiswa untuk belajar dengan cara <i>trial and error</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspek pedagogis lebih baik daripada jenis lainnya • Menyediakan lingkungan yang aman untuk percobaan yang berbahaya • Fleksibel dan sederhana dalam menggunakan <i>software</i> • Penguatan lewat <i>software</i> animasi dan <i>virtual reality</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mahasiswa merasa bekerja dengan data real • Layak untuk pembelajaran jarak jauh • Fokus pada pemahaman konseptual dan keterampilan profesional

Merujuk pada tabel 11 di atas, dapat dikemukakan bahwa laboratorium virtual memiliki kemampuan dalam mendukung tercapainya pemahaman konseptual, penumbuhan keterampilan disain dan profesional (Ma & Nickerson, 2006: 8). Sementara dari tabel 12 dapat diperoleh informasi bahwa laboratorium virtual memiliki kelebihan yakni cocok untuk validasi konsep, tidak ada batasan waktu dan fisik, aspek pedagogis lebih baik daripada jenis lainnya, menyediakan lingkungan yang aman untuk percobaan yang berbahaya, fleksibel dan sederhana

dalam penggunaan *software*, penguatan cukup dilakukan melalui penggunaan *software* animasi dan *virtual reality* (Elawady & Tolba, 2009: 92).

Selain itu, laboratorium virtual juga dapat memberikan tingkat efisiensi yang lebih tinggi dalam pendanaan dibandingkan laboratorium *hands-on*. Mengutip dari berbagai referensi, Ma & Nickerson (2006) menyatakan bahwa pengadaan dan biaya operasi pada laboratorium *hands-on* lebih mahal dibandingkan pada laboratorium virtual karena sifatnya yang real sehingga memerlukan ruangan yang luas, bahan-bahan laboratorium dan alokasi waktu yang cukup besar bagi dosen atau instruktur (Philippatos & Moscato, 1971; Hessami & Sillitoe, 1992; Farrington, et al., 1994), mahasiswa kurang merasa nyaman bekerja di laboratorium *hands-on* (Cruickshank, 1983; Magin & Reizes, 1990; Dobson, et al., 1995), laboratorium *hands-on* tidak mampu menyediakan kebutuhan-kebutuhan khusus mahasiswa (Colwell, et al., 2002), dan tidak bisa melayani kebutuhan dalam penyelenggaraan *distance learning* (Shen, et al., 1999; Watt, et al., 2002).

Pada tabel 11 telah ditunjukkan bahwa laboratorium virtual mampu memberikan dukungan yang efektif terhadap pencapaian hampir semua tujuan pendidikan teknik, kecuali tujuan melatih keterampilan sosial. Namun, situasi seperti ini dapat diperbaiki dengan mendisain kegiatan praktik berbasis pada kerja kolaboratif menggunakan laboratorium virtual untuk melatih keterampilan sosial tersebut. Selain itu, kajian lain juga menunjukkan bahwa laboratorium virtual memiliki keunggulan, yakni lebih murah pengadaannya dibandingkan laboratorium *hands-on*. Atas dasar hal tersebut laboratorium virtual menjadi memiliki kelayakan yang baik untuk dipertimbangkan sebagai sarana pendukung kegiatan praktik.

b. Implementasi Laboratorium Virtual

Salah satu implementasi laboratorium virtual adalah dengan menggunakan simulator. Budhu (2002: 2) menyatakan bahwa simulator adalah salah satu bentuk dari objek multimedia interaktif. Sedangkan objek multimedia interaktif didefinisikan sebagai objek-objek kompleks dalam bentuk digital yang tersusun dari format heterogen, terdiri atas teks, *hypertext*, suara, gambar, animasi, video dan grafik yang mengandung tujuan pembelajaran eksplisit maupun implisit. Selanjutnya Budhu menyebutkan bahwa simulator dapat mencakup program untuk simulasi dua dimensi dan tiga dimensi. Sementara itu, Babich & Mavrommatis (2004: 1044) menyatakan bahwa pengertian simulator merujuk pada perangkat lunak simulasi dari peralatan-peralatan fisis seperti instrumen pengukuran atau sistem real lainnya.

Definisi simulator juga dikaitkan dengan istilah yang merujuk pada penggunaan antarmuka grafis bagi pengguna yang berhubungan dengan teknik simulasi khususnya animasi grafis tiga dimensi yang realistis dan tidak menyediakan fasilitas telekomunikasi untuk mengakses sistem real dari jarak jauh, namun hanya menyediakan simulasi dari sistem fisis saja (Tzafestas, Palaiologou, & Alifragis, 2006: 361). Mengutip Sahebnaskh (2004), (Shokri & Faraahi, 2010: 1357) mendefinisikan simulator sebagai lingkungan simulasi yang menyediakan bagi mahasiswa dan kalangan profesional fasilitas untuk melakukan latihan dan eksperimen di kelas atau untuk mengerjakan penelitian eksperimen secara virtual.

Memperhatikan berbagai definisi tersebut dapat dikemukakan pengertian laboratorium virtual yang dikaitkan dengan simulator yakni seperangkat alat berupa

objek multimedia interaktif berbentuk objek-objek digital berupa teks, *hypertext*, suara, gambar, animasi, maupun video yang dapat melakukan simulasi terhadap berbagai gejala fisis dua dimensi atau tiga dimensi dan dapat digunakan untuk melaksanakan eksperimen maupun penelitian dengan data-data *virtual*, serta mengandung tujuan pembelajaran secara eksplisit maupun implisit.

Simulasi dalam laboratorium virtual dapat dibagi dalam dua kelompok dan masing-masing kelompok terdiri atas dua kategori. Berdasarkan jenis gejala atau objek yang disimulasikan terdapat jenis simulasi fisik dan simulasi iteratif. Sedangkan atas dasar jenis proses yang dikerjakan oleh simulator, terdapat simulasi prosedural dan simulasi situasional (Alessi & Trollip, 2001: 214).

Pada simulasi fisik, objek-objek atau gejala-gejala fisik digambarkan pada layar sehingga memberikan peluang pada pengguna untuk mempelajarinya. Simulasi iteratif disebut juga simulasi proses yang memungkinkan penggunanya melakukan simulasi suatu gejala fisik dengan parameter yang berbeda-beda. Setiap parameter yang diberikan, simulator melakukan simulasi terhadap suatu gejala fisik, dan simulasi akan diulang untuk parameter yang lain. Simulasi prosedural digunakan untuk menampilkan urutan-urutan aksi dalam mencapai suatu tujuan. Dalam simulasi prosedural dibutuhkan juga objek-objek atau gejala-gejala yang bersifat fisik, seperti pada simulasi fisik, yang akan menampilkan urutan-urutan aksi yang berlangsung di dalamnya. Simulasi situasional merupakan bentuk khusus dari simulasi prosedural. Simulasi ini digunakan untuk merepresentasikan perilaku dan sikap orang atau organisasi dalam situasi-situasi yang berbeda.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan laboratorium virtual berbasis simulator meliputi: (1) atribut, (2) ketepatan, (3) mode penyampaian, (4) strategi pembelajaran, (5) model dan komponen, (6) penyediaan tujuan belajar dan petunjuk penggunaan (Alessi & Trollip, 2001: 260).

Rancangan simulasi perlu memperhatikan atribut pengetahuan yang meliputi jenis pengetahuan yang akan disimulasikan, organisasi maupun kompleksitasnya. Dari sisi penggunanya, rancangan simulator juga perlu memperhatikan atribut-atribut siswa seperti umur, jenis kelamin, pengetahuan atau keterampilan pra syarat, kemampuan penyelesaian masalah terhadap materi yang dipelajarinya, gaya belajar, maupun minat dan motivasi dalam mempelajari materi yang disimulasikan. Atribut-atribut simulator seperti skenario dan tingkat realitas simulasi juga perlu diperhatikan dalam merealisasikan simulator. Ketiga atribut tersebut, yakni atribut pengetahuan, pengguna dan simulator secara bersama-sama akan mempengaruhi tingkat efektivitas pencapaian hasil belajar dalam menggunakan laboratorium virtual berbasis simulator.

Faktor ketepatan sangat penting diperhatikan dalam mengimplementasikan sebuah simulator, mengingat kegiatan simulasi akan berhasil jika simulator yang dibangun mampu menggambarkan setepat-tepatnya objek atau gejala real yang akan disimulasikan. Simulator yang mampu menggambarkan secara tepat keadaan dunia real akan membangkitkan rasa senang, minat dan motivasi penggunanya dalam mempelajari objek atau gejala yang disimulasikan dan pada akhirnya akan memberikan efektivitas dalam transfer pengetahuan.

Keberhasilan kegiatan belajar dengan cara simulasi juga dipengaruhi oleh mode penyampaian yang digunakan. Dari aspek mode penyampaian yang digunakan, simulasi dapat diimplementasikan dengan: (1) mode *stand-alone* dengan dukungan PC (*personal computer*) tanpa periferal khusus, (2) mode *online* dengan dukungan PC dalam jaringan komputer tanpa periferal khusus, (3) lingkungan *virtual reality* berbasis PC, (4) lingkungan *virtual reality* berbasis jaringan komputer, (5) lingkungan *virtual reality* menggunakan superkomputer, atau (6) simulator fisik skala besar.

Strategi pembelajaran simulasi dapat mencakup (1) *microworlds* yang banyak digunakan untuk simulasi fisik seperti penyediaan objek-objek yang akan dibangun, dimanipulasi dan diukur oleh pengguna, (2) *scientific discovery learning* melalui simulasi iteratif, (3) *virtual reality*, (4) simulasi laboratorium, (5) bermain peran, (6) *operator-in-the-loop* seperti pada simulator berskala besar peralatan-peralatan militer, (7) skenario berbasis kasus, dan (8) permainan.

Perancangan simulator juga perlu memperhatikan model dan komponen-komponen yang digunakan. Model simulator merepresentasikan sistem dari gejala-gejala yang akan disimulasikan mencakup model kontinyu, diskrit dan logika. Model simulasi kontinyu merepresentasikan gejala-gejala yang mengandung data kontinyu tak terbatas seperti simulasi gerak jatuh bebas pada bidang fisika, pertumbuhan populasi hewan pada bidang biologi, dan simulasi rangkaian elektronika analog pada bidang teknik dengan program PSPICE. Model simulasi diskrit digunakan untuk menampilkan gejala-gejala yang mengandung data diskrit seperti simulasi lalu lintas darat maupun udara dengan data diskrit sepi dan ramai.

Simulasi logika merepresentasikan gejala-gejala yang bersifat logis seperti simulasi operasi mesin, keputusan menjalankan bisnis. Termasuk dalam simulator logika adalah program-program yang digunakan untuk menjalankan simulasi rangkaian digital seperti simulator DSCH2 dan simulator *breadboard*.

Selain sistem, pengembangan simulator perlu memperhatikan pula komponen-komponen yang terlibat seperti objek (berupa entitas fisik yang akan disimulasikan), ketepatan (menunjukkan kesesuaian antara proses real dengan hasil simulasi), jenis realitas (mencakup tiga jenis: fenomena yang terjadi seperti pada simulasi, fenomena yang terjadi tidak persis seperti simulasi, fenomena yang disimulasikan adalah imajiner), urutan simulasi (linear, siklis atau kompleks), jumlah penyelesaian masalah yang disediakan simulator, waktu berlangsungnya peristiwa yang disimulasikan, dan peran pengguna.

Faktor lain yang perlu diperhatikan dalam pengembangan laboratorium virtual berbasis simulator adalah penyediaan tujuan belajar dan petunjuk penggunaan. Seperti halnya dengan perangkat lunak pembelajaran lainnya, panduan simulator umumnya menyediakan bagian pengantar yang mengandung judul, deskripsi, tujuan pembelajaran, petunjuk penggunaan dan lainnya agar proses belajar pengguna dapat terarah mencapai tujuan yang diinginkan.

c. Simulator Rangkaian Elektronika PSPICE

Seperti telah dikemukakan dalam batasan Definisi Istilah di muka, PSPICE merupakan perangkat lunak aplikasi yang menyediakan fasilitas analisis rangkaian elektronika analog maupun digital. Uraian tentang program PSPICE berikut merujuk sepenuhnya pada panduan pengoperasian yang diterbitkan oleh Cadence

Design Systems (2016), sebuah perusahaan yang sekarang menguasai aplikasi ini. PSPICE (*Personal Computer SPICE*) adalah versi dari SPICE yang paling terkenal, pertama kali dikembangkan oleh *MicroSim* pada 1984 dan sekarang telah menjadi milik perusahaan *Cadence Design System*. PSPICE saat ini telah menjadi anggota keluarga produk OrCAD termasuk di dalamnya *Capture CIS*, *PCB Editor*, dan *Layout Plus*. Untuk keperluan pembelajaran elektronika, dapat digunakan PSPICE *Student Version* berbasis sistem operasi *Windows* yang dapat diunduh secara gratis melalui situs milik *Cadence Design System, Inc*.

Berdasarkan panduan pengoperasiannya, disebutkan bahwa PSPICE dapat melakukan/menyediakan: (1) analisis DC, AC, dan transien, sehingga dapat digunakan untuk menguji respons rangkaian dengan input yang bervariasi; (2) analisis parametrik, Monte carlo, dan sensitivitas/*worst-case* untuk keperluan melihat perilaku rangkaian jika nilai komponen dan parameternya diubah-ubah; (3) analisis *digital worst-case* timing; (4) model saluran transmisi, termasuk penundaan, refleksi, *loss*, dispersi, dan *crosstalk*; (5) model inti magnetik nonlinear, termasuk fenomena saturasi dan histerisis; (6) model MOSFET; (7) model GaAsFET; (8) model IGBTs; dan (9) model komponen digital dengan I/O analog.

Program PSPICE dapat beroperasi dengan baik jika digunakan perangkat keras dengan spesifikasi minimum: komputer dengan prosesor 2,66GHz, memiliki RAM dengan kapasitas 8GB, *harddisk* 500 GB dan *display unit* dengan resolusi 1280 x 1024, serta di dalam komputer terpasang sistem operasi *Microsoft® Windows® 7 Professional, Enterprise, Ultimate* atau *Home Premium (64-bit)* atau

sistem operasi lainnya seperti *Windows 8 (64-bit-All Service Packs)*; *Windows 10 (64-bit)*; *Windows 2008 R2 Server*; atau *Windows 2012 Server (All Service Packs)*.

Program PSPICE termasuk jenis simulator fisik iteratif yang dapat menyimulasikan gejala fisik perilaku besaran-besaran listrik pada suatu rangkaian elektronika dengan parameter yang dapat diubah-ubah. Memperhatikan kemampuan PSPICE yang dapat menyediakan analisis yang diperlukan dalam suatu praktik elektronika dasar, maka dapat dinyatakan bahwa perangkat lunak ini dapat digunakan sebagai basis pengembangan laboratorium virtual untuk praktik elektronika dasar. Tabel 13 menunjukkan hubungan antara kebutuhan praktik Elektronika Dasar dengan kemampuan yang disediakan oleh PSPICE.

Tabel 13. Hubungan kemampuan PSPICE dengan kebutuhan praktik Elektronika Dasar

No.	Topik Praktik	Kebutuhan Analisis	Fitur Analisis PSPICE
1	Pengisian dan Pengosongan Kapasitor	Transien	AC, DC, Transien
2	Rangkaian RC	Transien dan AC	
3	Karakteristik Diode	DC	
4	Rangkaian Pembentuk Gelombang	Transien	
5	Rangkaian Penyearah	Transien	
6	Penjepit dan Pembagi Tegangan	Transien	
7	Karakteristik Transistor	DC	
8	Penguat <i>Common Emitter</i>	DC, AC, Transien	

B. Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu tentang penggunaan perangkat lunak PSPICE dalam pembelajaran elektronika pernah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu. Seorang peneliti dari Irlandia, Tobin (2007), menemukan bahwa tren yang mengkhawatirkan dalam pendidikan teknik adalah kurangnya waktu yang diberikan

untuk mengajarkan prinsip-prinsip dasar keteknikan. Situasi seperti ini dapat menjadikan siswa tidak memperoleh pemahaman yang baik tentang praktik rekayasa dan teknik desain. PSPICE dapat membantu siswa memahami konsep dasar tentang teknik elektronika, dan mempraktikannya dengan sangat baik. Melalui penelitian tersebut, ditemukan pula bahwa dengan menggunakan PSPICE, siswa dapat menguji dan mensimulasikan masing-masing sub sistem dan juga dapat memperkirakan masalah-masalah yang timbul ketika beberapa sub sistem disambung satu dengan lainnya.

Selanjutnya, melalui penelitian tersebut ditemukan juga bahwa dalam sistem nyata siswa sering mengalami kesulitan dalam mengukur impedansi input dan output suatu rangkaian elektronik. Padahal, informasi besarnya nilai impedansi diperlukan untuk memahami efek pembebanan suatu sub sistem oleh sub sistem lainnya. Melalui penggunaan PSPICE, siswa menjadi mudah dalam mengukur impedansi input dan output rangkaian. Secara umum penelitian ini telah menemukan bahwa PSPICE dapat memberikan pengalaman berharga bagi siswa, hal yang tidak mudah diperoleh dalam praktek menggunakan laboratorium real.

Kashif & Saqib (2008) dalam penelitiannya menemukan bahwa siswa merasa puas terhadap penggunaan perangkat lunak PSPICE sebagai media praktik elektronika daya. Simulasi menggunakan PSPICE juga dapat meningkatkan kemampuan siswa dalam mempelajari dan memahami konsep elektronika, yang ditunjukkan oleh meningkatnya terampil analisis dan disain.

Penelitian tentang penggunaan laboratorium virtual untuk mendukung pembelajaran praktik elektronika pernah dilakukan oleh peneliti dari *LaGuardia*

Community College Amerika Serikat. Rahman (2014) menemukan bahwa meskipun percobaan hanya dilakukan dengan sampel kecil yakni 17 siswa, tetapi hasilnya telah dapat menunjukkan bahwa siswa memang memperoleh manfaat dari penggunaan Multisim sebagai perangkat lunak simulator pendukung laboratorium virtual. Penelitian tersebut menemukan pula bahwa dalam refleksi singkat di akhir proyek, siswa merasakan dapat memperoleh banyak manfaat dari penggunaan laboratorium virtual seperti dapat memverifikasi jawaban dan memperbaikinya dengan cepat, dan menggunakan Multisim untuk menyelesaikan masalah rangkaian elektronik.

Aguilar-Peña, dkk. (2016) dalam risetnya tentang pengembangan perangkat *blended learning*, menemukan bahwa dengan menggunakan PSPICE, siswa memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang sel fotovoltaik, modul atau generator. Melalui penggunaan PSPICE, kurva karakteristik sistem fotovoltaik dan parameter dasar seperti tegangan, arus, daya dan energi dapat diperoleh siswa dengan mudah untuk keperluan analisis dan representasi lebih lanjut. Penelitian ini juga mendapatkan sebuah kenyataan bahwa lingkungan simulasi berbasis aplikasi PSPICE dapat membentuk sebuah laboratorium virtual untuk praktik elektronika.

Dak, Khoje & Pardeshi (2017) dalam pengantar risetnya menyatakan bahwa laboratorium dalam pendidikan adalah tempat yang ideal bagi siswa untuk mempraktikkan konsep melalui kegiatan eksperimen. Riset tersebut telah menemukan bahwa penggunaan perangkat lunak yang berbeda-beda termasuk PSPICE dalam sebuah praktik menggunakan laboratorium virtual,

dapat membantu siswa meningkatkan efektivitas dalam mempelajari konsep-konsep elektronika dan penerapannya di dunia nyata.

C. Kerangka Berpikir Pengembangan

Melalui kajian pustaka, telah dapat diperoleh informasi bahwa penggunaan laboratorium virtual sebagai sarana praktik cocok untuk validasi konsep, lebih efisien dalam pendanaan, mudah dan fleksibel dari sisi waktu maupun tempat praktik, dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap materi praktik, sederhana dalam penggunaan *software*, dan dapat meningkatkan keterampilan dalam kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan manajemen waktu seperti yang dituntut oleh dunia industri modern. Berbagai informasi tersebut telah menguatkan pandangan bahwa laboratorium virtual layak digunakan sebagai sarana praktik yang dapat membekali mahasiswa dengan pengetahuan, keterampilan dan sikap sesuai dengan tuntutan dunia kerja saat ini.

Merujuk kajian pustaka juga telah dapat ditunjukkan bahwa perangkat lunak PSPICE memiliki fitur analisis yang sesuai dengan kebutuhan praktik elektronika dasar untuk semua topik. Selain itu, hasil riset terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan PSPICE untuk mendukung implementasi laboratorium virtual dapat: (1) meningkatkan pemahaman siswa terhadap konsep-konsep elektronika dan penerapannya dalam dunia nyata; (2) memberikan pengalaman berharga yang tidak mudah diperoleh dalam praktek real; (3) menjadikan siswa merasa puas dalam melaksanakan pembelajaran praktik; (4) meningkatkan keterampilan analisis dan disain sistem elektronika; (5) menjadikan siswa mudah memperoleh data; (6) membentuk lingkungan yang sesuai untuk laboratorium virtual; serta (7)

meningkatkan efektivitas pembelajaran praktik elektronika dasar. Berbagai informasi yang diperoleh melalui kajian pustaka tersebut, telah mengukuhkan pandangan bahwa simulator PSPICE dapat digunakan sebagai basis pengembangan laboratorium virtual untuk praktik elektronika dasar, sehingga diperoleh penyelenggaraan praktik yang efisien, fleksibel dan efektif.

Untuk memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan, implementasi laboratorium virtual berbasis PSPICE dapat diwujudkan dalam bentuk modul rangkaian virtual setiap topik praktik. Sesuai dengan rekomendasi teoritik pada kajian pustaka, untuk setiap topik: (1) kegiatan praktik dijalankan menggunakan mode operasi perangkat secara *stand-alone* dengan dukungan PC (*personal computer*) tanpa periferal khusus; (2) menggunakan pendekatan *scientific discovery learning* melalui simulasi iteratif; (3) menggunakan model komponen yang sesuai dengan keadaan real; (4) dilengkapi dengan informasi tentang pengguna, pra syarat yang diperlukan, dan tujuan pembelajaran; serta (5) disediakan panduan pengoperasian dan panduan pelaksanaan praktik.

D. Pertanyaan Penelitian

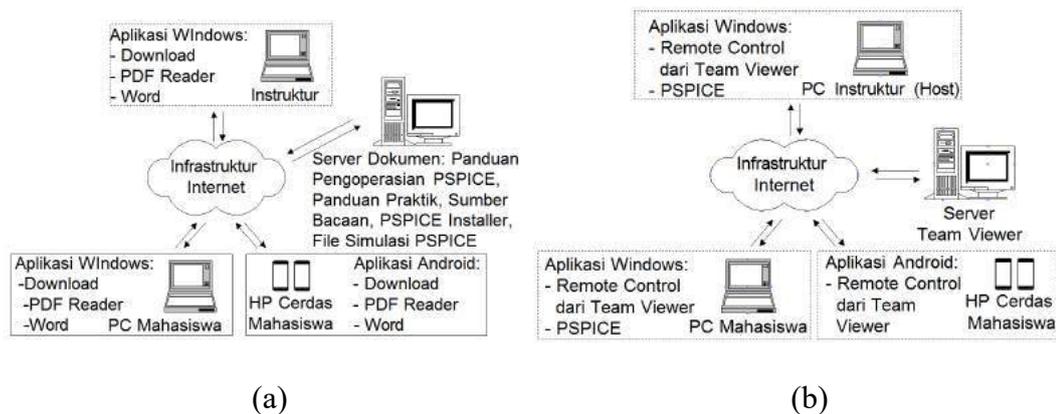
Berdasarkan kerangka berpikir pengembangan yang telah dikemukakan di atas, dapat disusun pertanyaan penelitian sebagai berikut.

1. Seperti apakah bentuk implementasi laboratorium virtual elektro dasar berbasis perangkat lunak PSPICE?
2. Sejauhmana kinerja modul-modul praktik elektronika dasar berbasis PSPICE yang dikembangkan dalam memenuhi kelayakannya sebagai perangkat pembelajaran berbasis laboratorium virtual ?

BAB III METODE PENGEMBANGAN

A. Model Pengembangan

Penelitian ini menggunakan model pengembangan konseptual sebagai pemandu proses menuju terciptanya laboratorium virtual elektronika dasar berbasis PSPICE, sesuai spesifikasi yang diharapkan. Merujuk pada uraian kerangka berpikir pengembangan yang telah dikemukakan di muka, model konseptual produk yang dikembangkan untuk akses dokumen yang diperlukan oleh mahasiswa dan instruktur dapat divisualisasikan melalui Gambar 62.



Gambar 62. Model konseptual laboratorium virtual Elektronika Dasar:
(a) akses dokumen; (b) akses simulator PSPICE

Model konseptual pada gambar 62 (a) menjelaskan bahwa sebelum praktik dilaksanakan, mahasiswa dan instruktur/dosen memperoleh dokumen melalui akses *online* ke server dokumen yang disediakan oleh pengelola laboratorium. Akses dokumen meliputi: (1) pengambilan panduan pengoperasian PSPICE, panduan praktik Elektronika Dasar, sumber bacaan, PSPICE *installer* dan *file* simulasi; serta (2) pengiriman laporan praktik.

Sementara itu, gambar 62 (b) menggambarkan model konseptual untuk akses simulator. Operasi laboratorium virtual sebenarnya dalam mode *stand alone* oleh karena perangkat lunak PSPICE *Student Version* merupakan program yang hanya dapat berjalan pada komputer *stand alone*. Namun, disain laboratorium virtual ini dapat lebih fleksibel lagi maka modelnya dibuat agar dapat diakses secara *online* dengan bantuan aplikasi *remote control* dari *Team Viewer*.

Model konseptual yang dideskripsikan pada gambar 62 bersifat komprehensif yang belum akan diselesaikan keseluruhannya melalui penelitian ini. Pada penelitian ini baru mengembangkan salah satu komponen dari model yakni modul praktik elektronika dasar berbasis PSPICE.

B. Prosedur Pengembangan

Prosedur pengembangan yang dijalankan pada penelitian mengikuti urutan kegiatan sesuai dengan langkah-langkah *ADDIE* seperti uraian berikut ini.

1. Analisis

Pada tahap ini dilakukan identifikasi media yang diperlukan pada pembelajaran Elektronika Dasar di lingkungan program studi Teknik Elektro. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa media *hands-on* seperti modul praktik berbasis papan rangkaian *breadboard* dengan alat ukur multimeter dan osiloskop yang tersedia masih sedikit, bahkan modul-modul yang bersifat virtual masih belum tersedia. Melalui tahap ini dilakukan pula analisis dari media/modul yang telah digunakan untuk menentukan tujuan pembelajaran pada aspek kognitif, psikomotorik dan afektif. Setelah dilakukan analisis terhadap media-media yang digunakan baik sebagai pendukung pembelajaran di kelas maupun sebagai modul

praktik di laboratorium, dapat dirumuskan tujuan pembelajaran Elektronika Dasar yakni mahasiswa dapat memahami karakteristik piranti elektronika dan aplikasinya serta dapat menganalisis dan merancang rangkaian elektronika analog sederhana.

Selanjutnya dilakukan pula analisis untuk menentukan keterampilan-keterampilan teknis yang dapat diharapkan sebagai dampak penggunaan media yang akan dikembangkan. Atas dasar analisis yang telah dilakukan, keterampilan teknis yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media yang akan dibangun ini adalah mahasiswa terampil dalam: (1) menggambar rangkaian elektronika sederhana menggunakan simbol-simbol baku; (2) merangkai rangkaian elektronik sederhana; (3) melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik piranti elektronik; (4) melakukan eksperimen untuk menguji dan menganalisis watak rangkaian elektronik dengan berbagai parameter yang diberikan; dan (5) melakukan perancangan rangkaian elektronik sederhana serta mengujinya melalui eksperimen laboratorium.

Analisis diakhiri dengan menentukan waktu yang sesuai dari penggunaan simulator yang dikembangkan untuk media pembelajaran maupun praktik di laboratorium. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, penggunaan produk yang dikembangkan baik sebagai media pembelajaran di dalam kelas, perangkat praktik di laboratorium, maupun untuk keperluan belajar mandiri mahasiswa, memerlukan waktu 90 menit.

2. Desain

Langkah desain diawali dengan menentukan jenis media yang akan digunakan dalam hal ini perangkat lunak PSPICE. Selanjutnya dirumuskan

spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak pendukung yang terlibat dalam penggunaan PSPICE. Untuk mendukung proses desain, pada tahap ini dilakukan pula eksplorasi berbagai pustaka sebagai dasar untuk memilih bentuk rancangan modul praktik elektronika dasar yang sesuai. Melalui eksplorasi pustaka telah berhasil dikumpulkan rancangan rangkaian elektronik untuk pengembangan modul praktik semua topik. Tabel berikut ini menunjukkan nama rangkaian elektronik yang telah berhasil dikumpulkan dari berbagai sumber pustaka, untuk semua topik praktik Elektronika Dasar.

Tabel 14. Nama rangkaian hasil eksplorasi pustaka sebagai bahan modul praktik

No.	Topik Praktik	Nama Rangkaian
1	Pengisian dan Pengosongan Kapasitor	a. RC Pengisian kapasitor b. RC Pengosongan Kapasitor
2	Rangkaian RC	a. Integrator b. Diferensiator c. Filter <i>Low Pass</i> d. Filter <i>High Pass</i>
3	Karakteristik Diode	a. Prinsip Maju b. Prinsip Mundur
4	Rangkaian Pembentuk Gelombang	a. <i>Clipper</i> Seri Negatif b. <i>Clipper</i> Seri Positif c. <i>Clipper</i> Paralel Negatif d. <i>Clipper</i> Paralel Positif e. <i>Clipper</i> Negatif Berprinsip f. <i>Clipper</i> Positif Berprinsip g. <i>Clipper</i> Kombinasi h. <i>Clipper</i> Diode Zener i. <i>Slicer</i>
5	Rangkaian Penyearah	a. Penyearah Setengah Gelombang b. Penyearah Gelombang Penuh c. Penyearah Jembatan d. Penyearah Dengan Filter
6	Penjepit dan Pembagi Tegangan	a. <i>Clamper</i> Negatif b. <i>Clamper</i> Positif c. <i>Clamper</i> Berprinsip d. Penguat Tegangan Dua Kali e. Penguat tegangan Empat Kali
7	Karakteristik Transistor	Transistor <i>Common Emitter</i>
8	Rangkaian Amplifier <i>Common Emitter</i>	Amplifier <i>Common Emitter</i>

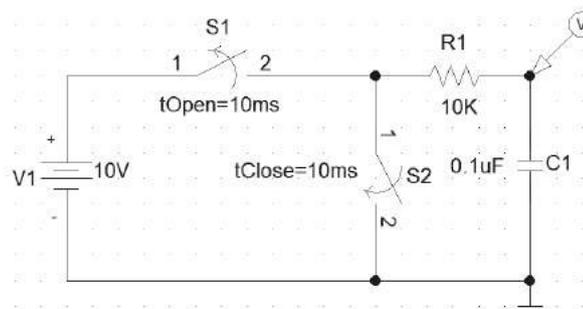
3. Pengembangan

Kegiatan pada tahap ini diawali dengan menentukan jenis perangkat keras dan perangkat lunak serta basis pengembangan yang akan digunakan untuk membangun simulator. Telah disebutkan di muka bahwa pengembangan perangkat pembelajaran ini lebih banyak mempertimbangkan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas penggunaan dan kemenarikan penggunaan, oleh sebab itu dipilih media berbentuk simulator.

Melalui tahap ini, selanjutnya dilakukan penyusunan unsur-unsur media dan mengintegrasikannya ke dalam satu kesatuan modul praktik berdasar pada basis perangkat lunak yang dipilih yakni PSPICE. Pada tahap pengembangan ini dilakukan penentuan nilai-nilai dari komponen yang digunakan untuk membangun rangkaian dan sekaligus parameter simulasinya. Uraian berikut ini mendeskripsikan hasil penentuan nilai-nilai komponen rangkaian untuk setiap topik berikut *setting-up* parameter simulasi/analisisnya pada PSPICE.

a. Pengisian dan Pengosongan Kapasitor

Rangkaian pengisian dan pengosongan kapasitor dalam format PSPICE ditunjukkan pada gambar 63. Rangkaiannya menggunakan komponen saklar t_{Open} dan t_{Close} dengan nilai parameter masing-masing 10 ms.



Gambar 63. Rangkaian pengisian dan pengosongan kapasitor dalam PSPICE

Sifat saklar t_{Open} selalu tertutup, dan akan terbuka jika diberi nilai parameter tertentu misalnya 10 ms, dalam hal ini saklar akan terbuka setelah mencapai waktu 10 ms. Sementara itu, saklar t_{Close} memiliki sifat selalu terbuka, dan jika nilai parameternya diberi 10 ms, kondisinya akan tertutup setelah waktu mencapai 10 ms.

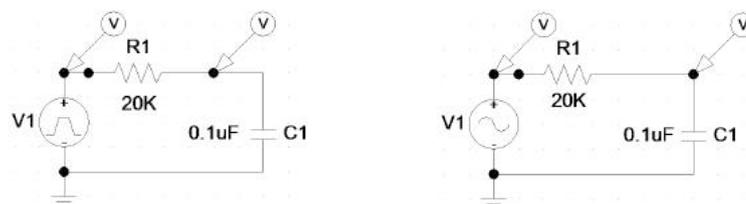
Pada fase pengembangan ini dilakukan pula *setting-up* parameter analisis agar tampilan grafik outputnya proporsional. Pengaturan parameter analisis disesuaikan dengan jenis analisisnya yakni transien dengan cara: (1) menghitung terlebih dahulu *RC time constant* dalam hal ini $RC=1\text{ms}$; (2) oleh karena kapasitor akan terisi penuh pada $t=5RC$, maka untuk pengisian kapasitor dapat diberikan waktu simulasi pengisian kapasitor misalnya dua kali $5RC$ yakni 10ms dan waktu pengosongan juga 10ms sehingga total waktu simulasi sebesar 20ms. Jadi, dengan menggunakan komponen-komponen seperti pada gambar 63, nilai parameter analisis transien yang baik adalah *Print Step*=0ms dan *Final Time*=20 ms.

b. Rangkaian RC

Sesuai tabel 14, rangkaian RC pada penelitian terdiri atas empat jenis yakni integrator, diferensiator, filter *low pass*, dan filter *high pass*.

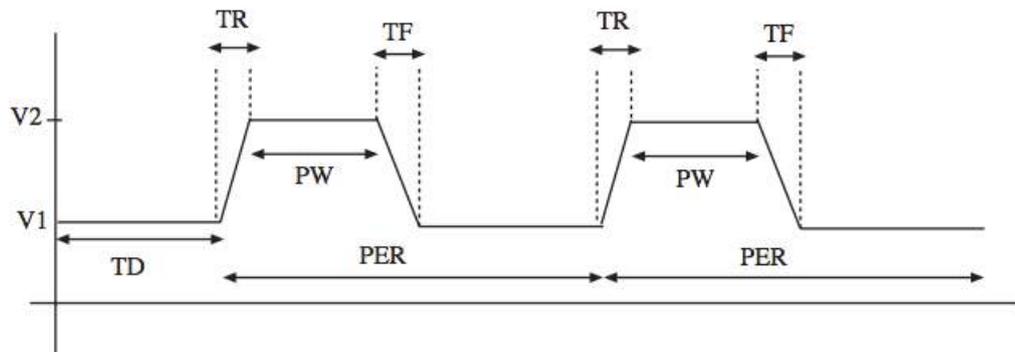
1) Integrator dan Diferensiator

Gambar 64 menunjukkan rangkaian integrator hasil pengembangan dengan input gelombang kotak dan sinusoidal.



Gambar 64. Rangkaian integrator dengan input *square* (kiri) dan sinus (kanan)

Untuk membangkitkan tegangan berbentuk kotak digunakan komponen VPULSE dengan seperti ditunjukkan pada gambar 65.



Gambar 65. Parameter VPULSE

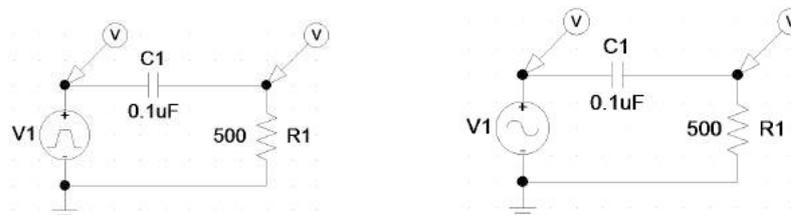
Makna notasi-notasi yang terdapat pada gambar 65 adalah TD=*time delay*, TR=*rise time*, TF=*fall time*, PW=*pulse width*, PER=*period*, V1=tegangan minimum, dan V2=tegangan maksimum. Pada penelitian ini ditetapkan gelombang kotak dengan periode 2ms, tegangan minimum -2V dan tegangan maksimum +2V. Untuk memenuhi spesifikasi tegangan yang diinginkan dilakukan pengaturan parameter VPULSE: V1=-2, V2=+2, TD=1ms, TR=1ns, TF=1ns, PW=1ms, PER=2ms. Parameter TR dan TF seharusnya bernilai 0, namun jika diisi dengan nilai 0 gelombangnya menjadi cacat, sehingga diisi dengan nilai yang sangat kecil yakni sebesar 1ns.

Untuk pembangkit gelombang sinusoidal, digunakan komponen VSIN. Gelombang sinusoidal yang ingin dibangkitkan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi: tegangan maksimum $V_m=2$ V dan periode $T=2$ ms ($f=500$ Hz), sehingga pengaturan parameternya adalah: DC=0, AC=0, VOFF=0, VAMPL=2V, FREQ=500Hz, TD=0, DF=0, dan PHASE=0. Untuk menciptakan kondisi

rangkaian dengan $RC > T$ maka dilakukan pengaturan $R3 = 20K$ ohm, dan untuk $RC < T$ nilai resistansinya diatur menjadi $R3 = 500$ ohm.

Integrator merupakan rangkaian RC yang bekerja pada domain waktu sehingga analisis yang digunakan adalah transien. Agar grafik hasil analisis dapat ditampilkan secara proporsional, perlu dilakukan pengaturan parameter analisis transien yakni: *Print Step=0*, *Final Time=10 ms*, *Step Ceiling=0,00001*, dan dipilih mode *Skip initial transien solution*.

Rangkaian diferensiator hasil pengembangan dalam versi PSPICE ditunjukkan pada gambar 66 untuk masukan gelombang kotak dan sinusoidal.

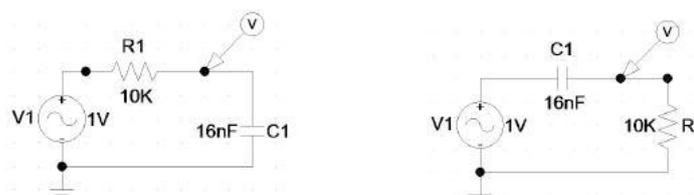


Gambar 66. Rangkaian diferensiator dengan input input *square* (kiri) dan sinus (kanan)

Pengaturan nilai semua parameter, baik untuk komponen maupun analisis pada rangkaian diferensiator sama dengan pengaturan pada rangkaian integrator. Hal itu dapat dilakukan karena nilai resistansi R dan kapasitansi C pada kedua rangkaian tersebut dipilih dengan nilai yang sama.

2) Filter *Low Pass* dan Filter *High Pass*

Gambar 67 menunjukkan rangkaian filter *low pass* dan filter *high pass* hasil pengembangan pada penelitian ini.



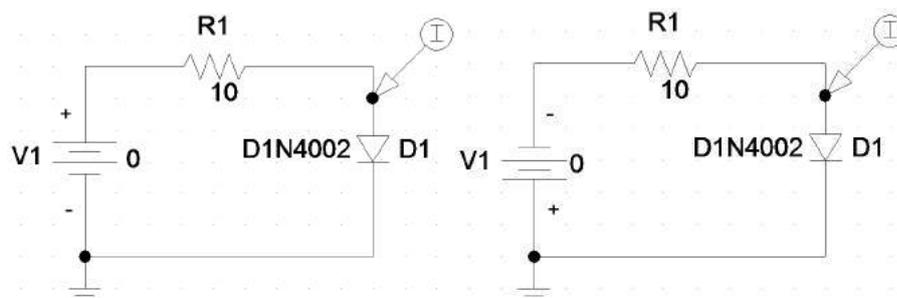
Gambar 67. Rangkaian filter *low pass* (kiri) dan filter *high pass* (kanan)

Rangkaian filter bekerja pada ranah frekuensi, sehingga wataknya yang berupa respons frekuensi dapat diselidiki jika disediakan sumber tegangan AC yang frekuensinya dapat diubah-ubah. Rancangan rangkaian filter pada penelitian ini menggunakan komponen VAC dari *library* PSPICE. Oleh karena diinginkan sumber tegangan ini dapat membangkitkan sinyal dengan magnitudo 1V, maka pengaturan parameternya adalah: DC=0, ACMAG=1V. Nilai R dan C telah diatur agar frekuensi *cut-off* dari kedua filter sebesar 1 KHz.

Analisis yang digunakan untuk menyelidiki watak filter adalah analisis AC, sehingga parameter *AC Sweep* diatur menjadi: *Pts/Dekade*=10, *Start Freq.*=10Hz, dan *End Freq.*=1000KHz.

3) Karakteristik Diode

Hasil pengembangan rangkaian untuk karakterisasi diode dalam prasikap maju dan prasikap mundur ditunjukkan pada gambar 68.



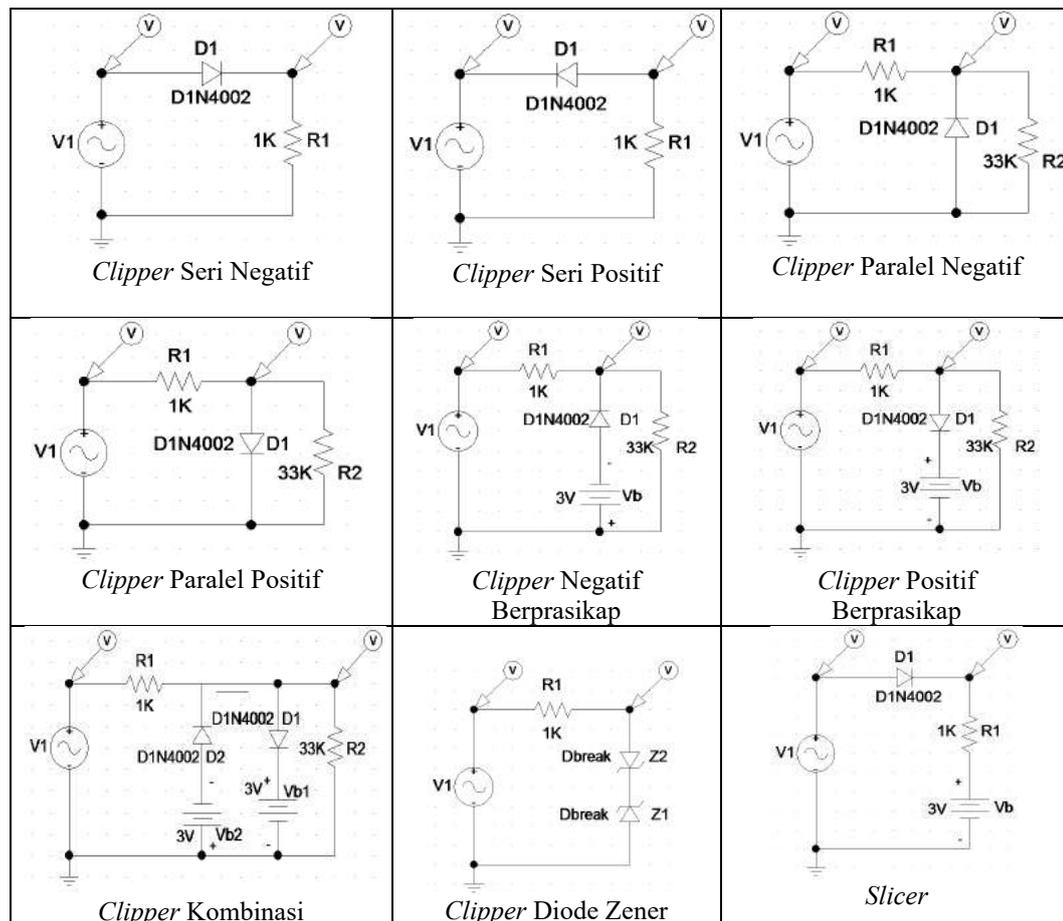
Gambar 68. Rangkaian untuk karakterisasi diode: prasikap maju (kiri) dan prasikap mundur (kanan)

Pada rangkaian ini semua parameter komponen tidak perlu dilakukan pengaturan hanya penetapan nilai-nilai komponen resistor dan kapasitor saja. Analisis yang digunakan pada karakterisasi diode adalah analisis DC, untuk diode dengan prasikap maju, parameter *DC Sweep* diatur sehingga *Swept Var.*

Type=Voltage Source, Sweep Type=Linear, Name=V1, Start Value=0, End Value=20V, dan Increment=0,01. Sementara itu, untuk karakterisasi diode dalam prasikap mundur, parameter DC Sweep diatur sehingga Swept Var. Type=Voltage Source, Sweep Type=Linear, Name=V1, Start Value=0, End Value=150V, dan Increment=0,01.

4) Rangkaian Pembentuk Gelombang

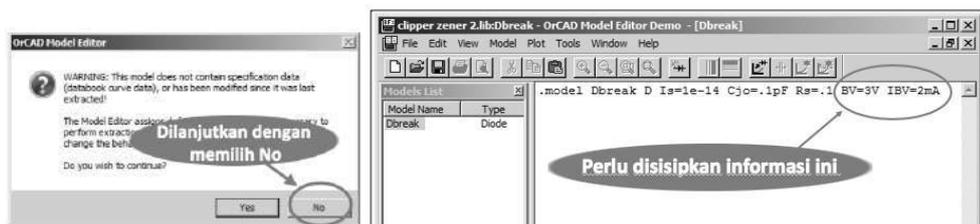
Rangkaian pembentuk gelombang hasil pengembangan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 69 berikut ini.



Gambar 69. Rangkaian pembentuk gelombang dengan diode

Tegangan V_1 yang digunakan diatur pada $V_m=10V$ dan frekuensi 500Hz atau periode 2ms, sehingga parameter untuk komponen VAC adalah DC=0, AC=0, VOFF=0, VAMPL=10V, FREQ=500Hz, TD=0, DF=0, dan PHASE=0.

Pada rangkaian *clipper* diode Zener terdapat komponen yang perlu diatur parameternya secara khusus. Untuk rangkaian tersebut, penelitian ini menggunakan komponen *DbreakZ*. Pengaturan parameternya dilakukan dengan cara menandai terlebih dahulu komponen tersebut dengan klik pada *DbreakZ*, diteruskan dengan memilih menu *Edit-Model-Edit Instance Model (Model Editor)*. Setelah memilih *No* pada peringatan yang muncul seperti pada gambar 70 (a), proses dilanjutkan dengan menambahkan informasi BV=3V (menunjukkan tegangan dadal) dan IBV=2mA seperti pada gambar 70(b).



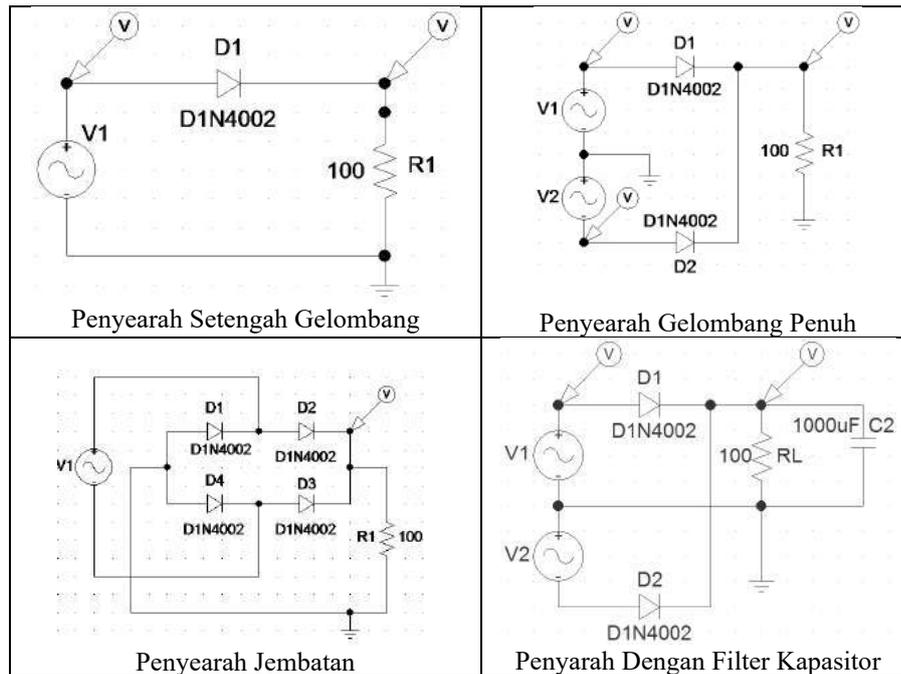
Gambar 70. Pengaturan pada komponen diode zener *DbreakZ*

Periode sinyal input telah ditentukan sebesar 2ms, sehingga untuk memperoleh tampilan yang proporsional perlu diatur parameter analisis transien dengan *Print Step=0*, *Final Step=20ms* dan *Step Ceiling=0.00001*.

5) Rangkaian Penyearah

Rangkaian penyearah untuk praktik yang dikembangkan pada penelitian ini terdiri atas rangkaian penyearah setengah gelombang, gelombang penuh, jembatan dan penyearah dengan filter kapasitor seperti ditunjukkan pada gambar 71. Sumber

tegangan trafo sekunder untuk semua rangkaian pada penelitian ini diganti dengan komponen VSIN dengan parameter: DC=0, AC=0, VOFF=0, VAMPL=10V, FREQ=50Hz, TD=0, DF=0, dan PHASE=0, agar menghasilkan tegangan maksimum $V_m=10V$ dan frekuensi sumber $f=50Hz$.



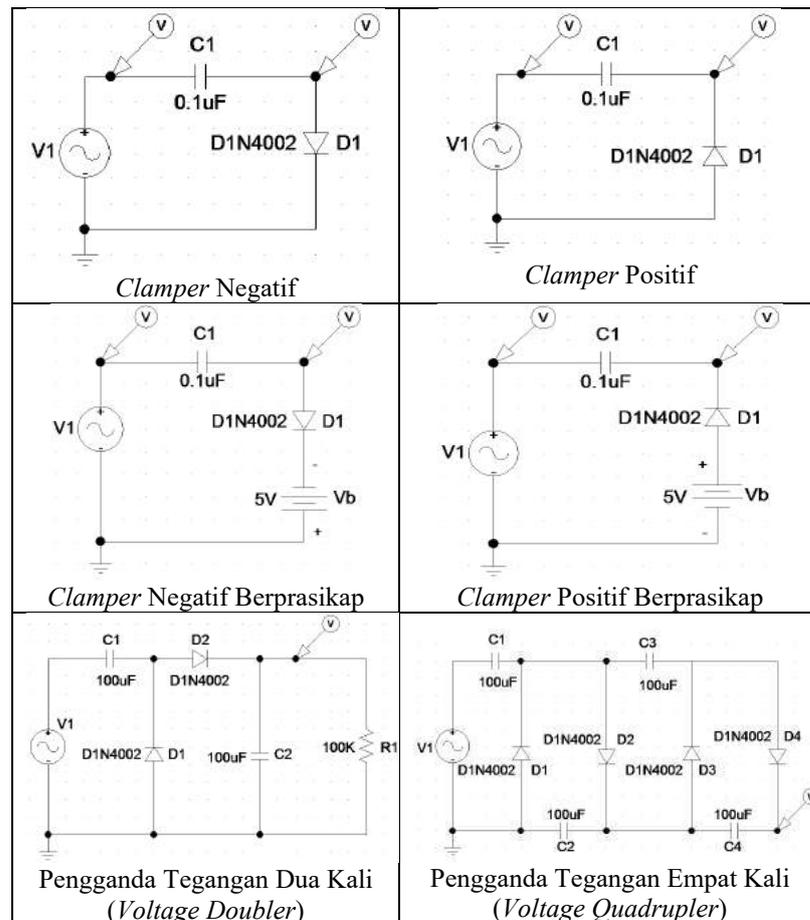
Gambar 71. Rangkaian penyearah yang dikembangkan dalam versi PSPICE

Merujuk analisis yang digunakan yakni transien, dan mengingat gelombang yang akan ditampilkan memiliki frekuensi 50 Hz atau periode 20ms, parameter analisis diatur menjadi: *Print Step=0*, *Final Step=100ms* dan *Step Ceiling=0.00001*, sehingga dapat diperoleh tampilan hasil yang proporsional.

6) Penjepit dan Penguat Tegangan

Rangkaian penjepit (*clamper*) dan penguat tegangan (*voltage doubler*) hasil pengembangan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 72. Semua sumber sinyal input menggunakan komponen VSIN dengan pengaturan parameter:

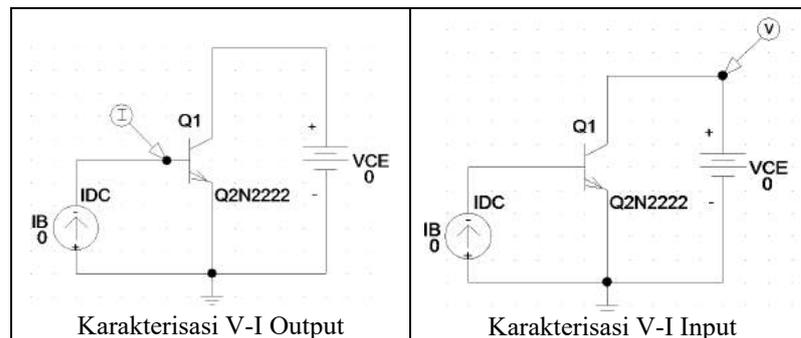
DC=0, AC=0, VOFF=0, VAMPL=10V, FREQ=50Hz, TD=0, DF=0, dan PHASE=0, sedang pengaturan parameter yang tepat untuk analisis transien, menghasilkan nilai-nilai: *Print Step=0, Final Step=100ms, Step Ceiling=0.00001*, dan dipilih *Skip initial transient solution*, sehingga dapat diperoleh tampilan output hasil analisis yang proporsional.



Gambar 72. Rangkaian penjepit (*clamper*) dan pengganda tegangan (*voltage doubler* dan *voltage quadrupler*)

7) Karakteristik Transistor

Rangkaian karakterisasi V-I transistor *common emitter* untuk *loop* input dan output hasil pengembangan disajikan pada gambar 73.



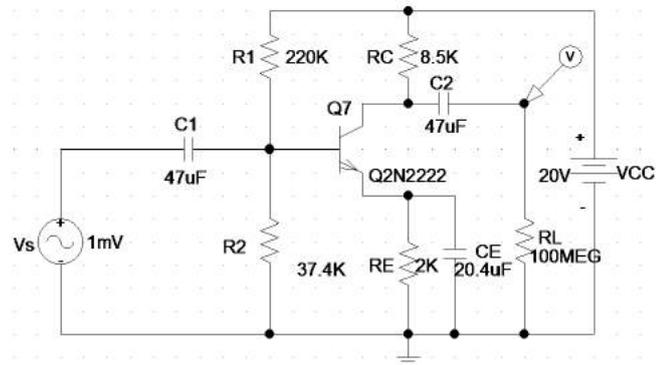
Gambar 73. Rangkaian karakterisasi V-I transistor *common emitter*

Rangkaian karakterisasi ini menggunakan sumber tegangan VDC dan sumber arus IDC yang tidak perlu datur parameternya, sehingga pengaturan hanya dilakukan terhadap parameter analisis DC saja. Agar simulasi dapat berjalan dengan baik, parameter analisis DC *Sweep* diatur yakni, untuk karakterisasi input *Main Sweep: Swept Var. Type=Current Source, Sweep Type=Linear, Name:IB, Start Value=0, End Value=0,01mA, Increment=0.0001mA*, dan untuk *Nested Sweep: Swept Var. Type=Voltage Source, Sweep Type=Linear, Name:VCE, Start Value=0, End Value=20V, Increment=10V*, dan *Nested Sweep=Enable*.

Sementara itu, pengaturan parameter DC *Sweep* untuk karakterisasi output *Main Sweep: Swept Var. Type=Voltage Source, Sweep Type=Linear, Name:VCE, Start Value=0, End Value=20V, Increment=0,01V*, dan untuk *Nested Sweep: Swept Var. Type=Current Source, Sweep Type=Linear, Name:IB, Start Value=0, End Value=0,01mA, Increment=0,001mA*, dan *Nested Sweep=Enable*.

8) Amplifier *Common Emitter*

Rangkaian amplifier *common emitter* yang dihasilkan dari proses pengembangan pada penelitian ditunjukkan pada gambar 74.



Gambar 74. Rangkaian amplifier *common emitter* hasil pengembangan

Rangkaian ini menggunakan sumber VAC dengan pengaturan parameter: DC=0, ACMAG=1mV. Analisis yang digunakan untuk menyelidiki watak amplifier *common emitter* adalah analisis AC, sehingga parameter *AC Sweep* diatur menjadi: *Pts/Dekade*=10, *Start Freq.*=10Hz, dan *End Freq.*=100MHz.

4. Implementasi

Kegiatan pada tahap implementasi yang terpenting adalah melakukan sosialisasi seluas-luasnya dalam berbagai bentuk tentang laboratorium virtual berbasis PSPIICE yang telah dikembangkan agar dapat digunakan oleh dosen/guru serta mahasiswa/siswa dalam mendukung proses pembelajaran elektronika dasar. Selain itu, pada fase implementasi ini pengembang/peneliti juga menyediakan bantuan dan dukungan yang diperlukan. Sosialisasi ini baru dilakukan dengan menggunakan *website* melalui *link*: <http://muchlas.ee.uad.ac.id/v2/tutorial-pspice-bagian-2-rangkaian-rc-time-constant/>.

5. Evaluasi

Pada fase ini dilakukan evaluasi terhadap mahasiswa/siswa dan program pembelajaran yang melibatkan penggunaan laboratorium virtual berbasis PSPICE yang dikembangkan, perawatan produk dan revisi produk. Semua proses dari

analisis sampai dengan evaluasi membentuk sebuah siklus yang progresif untuk menjamin tersedianya media yang semakin baik kinerjanya.

C. Uji Coba Produk

Ujicoba produk dilakukan untuk memperoleh kualitas produk yang layak digunakan sebagai media pembelajaran melalui evaluasi terus-menerus dari saat produk mulai dikembangkan sampai dengan produk siap digunakan. Secara umum, uji coba produk meliputi jenis evaluasi formatif dan evaluasi sumatif. Menurut Surjono (2017: 92), evaluasi formatif dilakukan melalui tahap: (1) *on going evaluation* oleh pengembang/peneliti ketika proses pengembangan sedang berlangsung, untuk memastikan semua komponen dalam produk yang dibangun dapat berfungsi dengan baik; dan (2) *alpha testing* oleh para ahli serta *beta testing* oleh calon pengguna, untuk memberikan masukan-masukan perbaikan/revisi produk agar media yang diperoleh berkualitas, sedangkan evaluasi sumatif digunakan untuk mengetahui efektivitas atau dampak pembelajaran dari produk media yang dikembangkan.

Pada penelitian ini hanya dilakukan uji *on going evaluation* untuk memastikan semua rangkaian yang telah dikembangkan dapat memberikan kinerja yang baik. Ukuran atau kriteria pengujiannya menggunakan pembandingan teori yang telah disampaikan pada kajian pustaka. Kinerja rangkaian yang telah dikembangkan dapat diberikan status berkinerja baik sehingga layak digunakan sebagai komponen laboratorium virtual elektronika dasar, jika watak yang ditampilkan sama atau tidak berbeda secara signifikan dari watak teoritiknya.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Produk Penelitian

Penelitian ini menghasilkan produk perangkat pembelajaran berupa rangkaian elektronik virtual dalam bentuk *file* berformat .SCH dari SPICE untuk mendukung praktik Elektronika Dasar di lingkungan program studi Teknik Elektro seperti disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Nama *file* rangkaian hasil penelitian dalam format PSPICE

No.	Topik Praktik	Sub Topik Praktik	Nama <i>File</i> Rangkaian
1	Pengisian dan Pengosongan Kapasitor	Pengisian Kapasitor	charging-discharging.sch
		Pengosongan Kapasitor	
2	Rangkaian RC	Integrator	integrator-kotak.sch integrator-sinus.sch
		Diferensiator	diferensiator-kotak.sch diferensiator-sinus.sch
		Filter <i>Low Pass</i>	low-pass-filter.sch
		Filter <i>High Pass</i>	high-pass-filter.sch
3	Karakteristik Diode	Prasikap Maju	diode-forward.sch
		Prasikap Mundur	diode-reverse.sch
4	Rangkaian Pembentuk Gelombang	<i>Clipper</i> Seri Negatif	clipper-seri-negatif.sch
		<i>Clipper</i> Seri Positif	clipper-seri-positif.sch
		<i>Clipper</i> Paralel Negatif	clipper-paralel-negatif.sch
		<i>Clipper</i> Paralel Positif	clipper-paralel-positif.sch
		<i>Clipper</i> Negatif Berprasikap	clipper-negatif-prasikap.sch
		<i>Clipper</i> Positif Berprasikap	clipper-positif-prasikap.sch
		<i>Clipper</i> Kombinasi	clipper-kombinasi.sch
		<i>Clipper</i> Diode Zener	clipper-zener.sch
5	Rangkaian Penyearah	<i>Slicer</i>	slicer-circuit.sch
		Setengah Gelombang	half-wave-rectifier.sch
		Gelombang Penuh	full-wave-rectifier.sch
		Jembatan	bridge-rectifier.sch
6	Rangkaian Penjepit dan Pembagi Tegangan	Filter Kapasitor	C-filter-rectifier.sch
		<i>Clamper</i> Negatif	clamper-negatif.sch
		<i>Clamper</i> Positif	clamper-positif.sch
		<i>Clamper</i> Negatif Berprasikap	clamper-negatif-prasikap.sch
		<i>Clamper</i> Positif Berprasikap	clamper-positif-prasikap.sch
		<i>Voltage Doubler</i>	voltage-doubler.sch
7	Karakteristik Transistor	<i>Quadrupler</i>	quadrupler.sch
		Karakteristik Input	ce-characteristic-input.sch
8	Rangkaian Amplifier <i>Common Emitter</i>	Karakteristik Output	ce-characteristic-output.sch
		Tanpa Kapasitor <i>bypass</i>	ce-amplifier.sch
Dengan Kapasitor <i>bypass</i>			

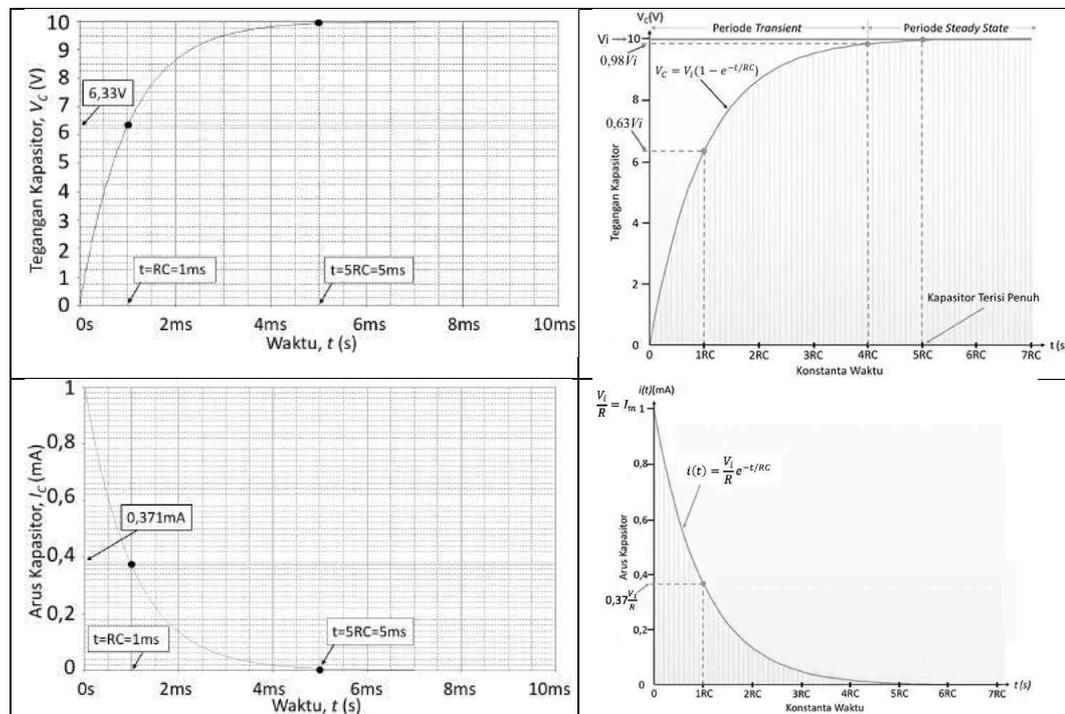
Rangkaian-rangkaian elektronika tersebut merupakan komponen utama dari laboratorium virtual elektronika dasar berbasis perangkat PSPICE. Kelengkapan lain yang berupa panduan penggunaan dan panduan praktik belum disusun pada penelitian ini.

B. Analisis Data

Penelitian ini hanya melakukan uji produk yang bersifat *on going* dari beberapa uji yang seharusnya dilakukan. Uji *on going* ditujukan untuk memastikan semua rangkaian elektronika yang dikembangkan dapat bekerja dengan baik.

1. Uji Kinerja Rangkaian Pengisian dan Pengosongan Kapasitor

Eksperimen dengan rangkaian Gambar 63 di muka, untuk pengisian kapasitor, menghasilkan grafik output seperti ditunjukkan pada Gambar 75.



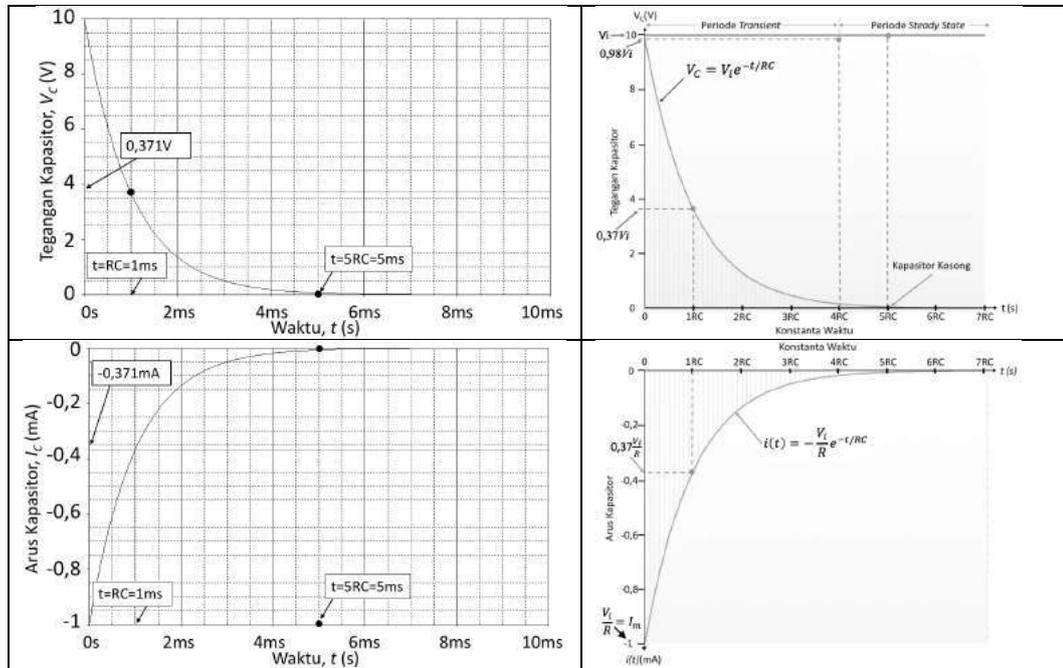
Gambar 75. Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengisian kapasitor hasil eksperimen laboratorium virtual SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)

Berdasarkan gambar 75 bagian atas, terlihat bahwa untuk tegangan pengisian kapasitor, hasil eksperimen menunjukkan bentuk yang sama berupa fungsi eksponensial naik terhadap grafik yang diperoleh secara teoritik. Nilai RC rangkaian yang diuji adalah 1ms, terlihat bahwa pada $t=RC=1\text{ms}$ nilai tegangan pengisian kapasitor sebesar 6,33 V dari 10V, nilai ini sesuai dengan komputasi teoritik yakni pada saat $t=RC$ nilainya sebesar 63% dari tegangan sumber pengisian kapasitor. Grafik perbandingan hasil memperlihatkan pula bahwa saat $t=5RC=5\text{ms}$, kapasitor mulai terisi penuh dan hal ini sesuai dengan model teoritik nilai tegangan pada pengisian kapasitor.

Gambar 75 bagian bawah memperlihatkan bahwa kurva arus pengisian kapasitor yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan laboratorium virtual PSPICE bentuknya eksponensial turun, sama dengan bentuk kurva teoritiknya. Selain itu, gambar tersebut menunjukkan pula pada saat $t=RC=1\text{ms}$, nilai arus kapasitor hasil eksperimen PSPICE sebesar 0,371mA dari 1 mA, kondisi ini sesuai dengan perhitungan teoritik yakni saat $t=RC$ arus kapasitor bernilai 37% dari arus maksimumnya. Melalui gambar 75 bagian bawah ditunjukkan pula ketika $t=5RC=5\text{ms}$, arus yang kapasitor mulai bernilai 0 yang menunjukkan kapasitor telah terisi penuh.

Hasil uji perbandingan tersebut mengindikasikan bahwa rangkaian pengisian kapasitor yang dirancang pada penelitian ini dengan menggunakan komponen-komponen seperti pada gambar 68, telah bekerja dengan baik sehingga dapat digunakan sebagai media pembelajaran praktik elektronika dasar untuk topik pengisian kapasitor.

Eksperimen menggunakan PSPICE untuk rangkaian pengosongan kapasitor, menghasilkan kurva tegangan seperti ditunjukkan pada Gambar 76.



Gambar 76. Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengosongan kapasitor hasil eksperimen laboratorium virtual SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)

Gambar 76 kiri-atas menunjukkan bahwa kurva tegangan pengosongan kapasitor hasil eksperimen menggunakan PSPICE merupakan fungsi eksponensial turun sesuai dengan watak teoritiknya seperti pada gambar kanan-atas. Saat $t=RC=1\text{ms}$ nampak tegangan kapasitor menjadi 0,371 V dari 10V, hal ini menunjukkan watak yang sama dengan watak teoritiknya yakni tegangan menjadi sebesar $0,37 V_i$ atau 37% dari tegangan kondisi awal.

Watak arus pengosongan juga menunjukkan keadaan yang sama antara hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan watak teoritiknya yakni keduanya merupakan fungsi eksponensial naik. Selain itu, pada kurva arus pengosongan kapasitor, terlihat bahwa ketika $t=RC=1\text{ms}$ arusnya bernilai -0,371mA dari -1mA,

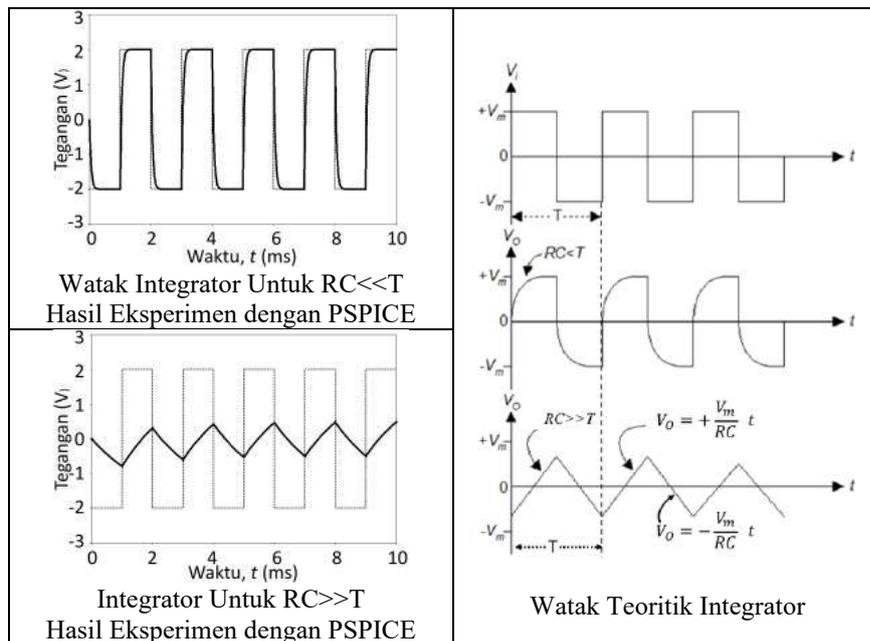
hal ini menunjukkan watak yang sama dengan watak teoritiknya yakni bernilai 37% arus maksimumnya. Gambar 76 juga menunjukkan bahwa untuk watak tegangan dan arus hasil eksperimen dengan PSPICE, saat $t=5RC=5ms$ tegangan mulai benar-benar kosong dan arus mulai menuju nilai nol, suatu keadaan yang juga terjadi pada watak teoritik dari tegangan dan arus pengosongan kapasitor.

Atas dasar perbandingan hasil eksperimen menggunakan PSPICE dan watak teoritiknya, yang menunjukkan karakteristik yang sama untuk keduanya, maka dapat dinyatakan bahwa rangkaian pengosongan kapasitor yang dikembangkan melalui penelitian ini, layak digunakan sebagai modul pendukung laboratorium virtual untuk praktik elektronika dasar.

2. Uji Kinerja Rangkaian RC

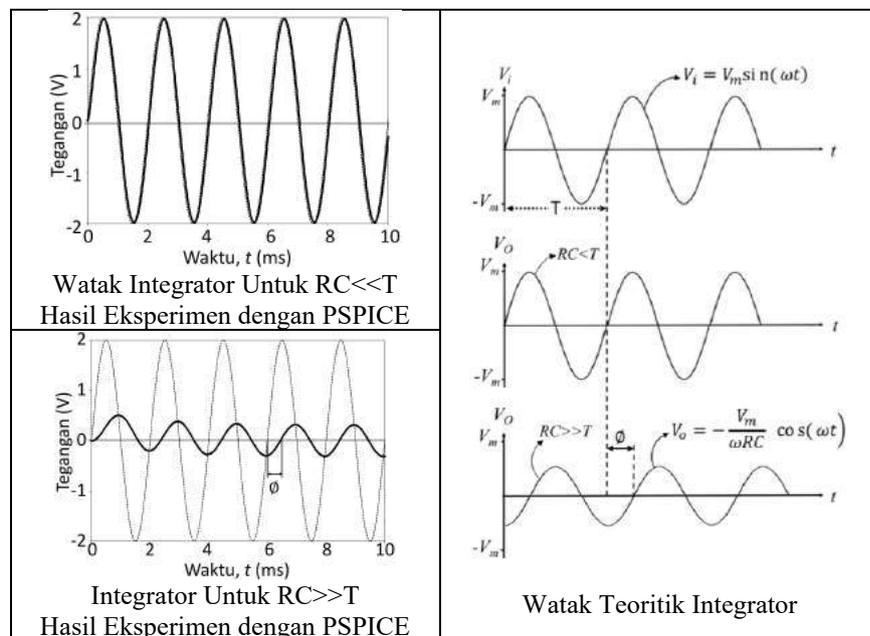
Rangkaian RC yang dikembangkan dalam penelitian ini terdiri atas integrator, diferensiator, filter *low pass* dan filter *high pass*. Gambar 77 berikut ini menyajikan watak integrator yang diberi input tegangan berbentuk kotak hasil eksperimen dengan PSPICE dan hasil komputasi teoritik.

Terlihat pada gambar 77 (kiri bawah) untuk kondisi $RC \gg T$, hasil eksperimen dengan PSPICE menunjukkan gelombang kotak yang dimasukkan ke integrator diubah menjadi gelombang segitiga, dan untuk kondisi $RC \ll T$ diubah menjadi gelombang kotak cacat (gambar kiri atas). Hasil ini sesuai dengan watak teoritik integrator pada gambar 77 sebelah kanan. Gelombang kotak cacat (gambar kiri atas) hasil eksperimen PSPICE, bentuknya sama dengan watak teoritik pada gambar kanan tengah, demikian pula gelombang segitiga di kiri bawah sama dengan bentuk teoritiknya pada gambar kanan bawah.



Gambar 77. Watak integrator dengan input gelombang kotak (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)

Sementara itu, untuk masukan gelombang sinus, eksperimen dengan PSPICE menghasilkan watak integrator seperti ditunjukkan pada gambar 78.

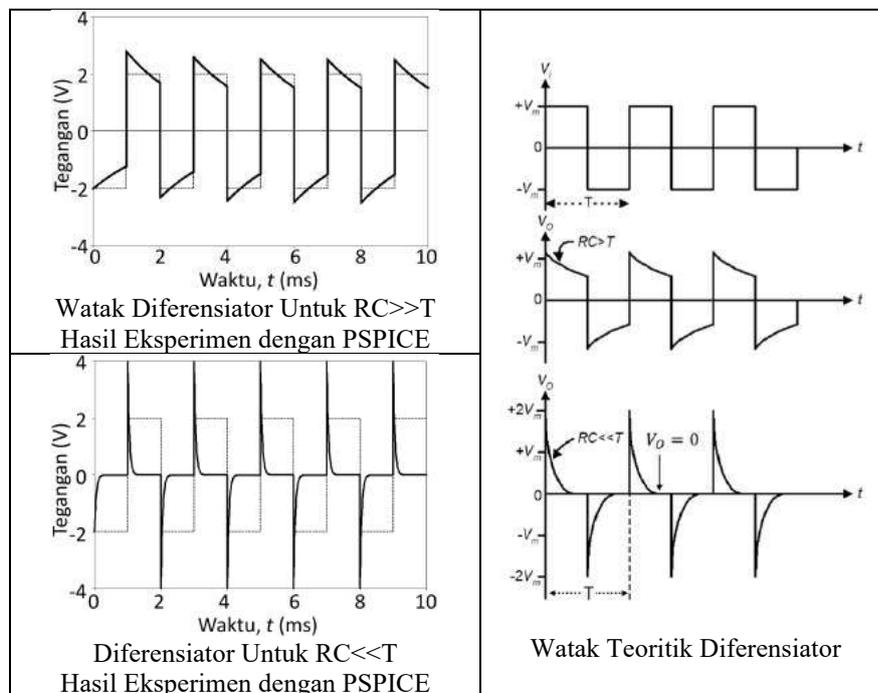


Gambar 78. Watak integrator dengan masukan gelombang sinus (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)

Pada gambar 78 (kiri bawah) ditunjukkan watak integrator hasil eksperimen dengan PSPICE jika diberi input berbentuk sinus, untuk $RC \gg T$ outputnya akan terlambat sebesar 90° terhadap fase tegangan inputnya, namun jika $RC \ll T$ seperti pada gambar kiri atas, fase tegangan output hampir sama dengan fase inputnya. Keadaan seperti ini diberikan pula oleh watak teoritik integrator seperti ditunjukkan oleh gambar kanan bawah untuk $RC \gg T$ dan kanan tengah untuk $RC \ll T$.

Memperhatikan kesesuaian yang tinggi antara watak integrator hasil eksperimen dengan PSPICE dan watak teoritiknya dengan input gelombang kotak maupun sinus, untuk $RC \gg T$ maupun $RC \ll T$, dapat dinyatakan bahwa rangkaian integrator hasil pengembangan pada penelitian ini layak digunakan sebagai modul pendukung laboratorium virtual untuk praktik elektronika.

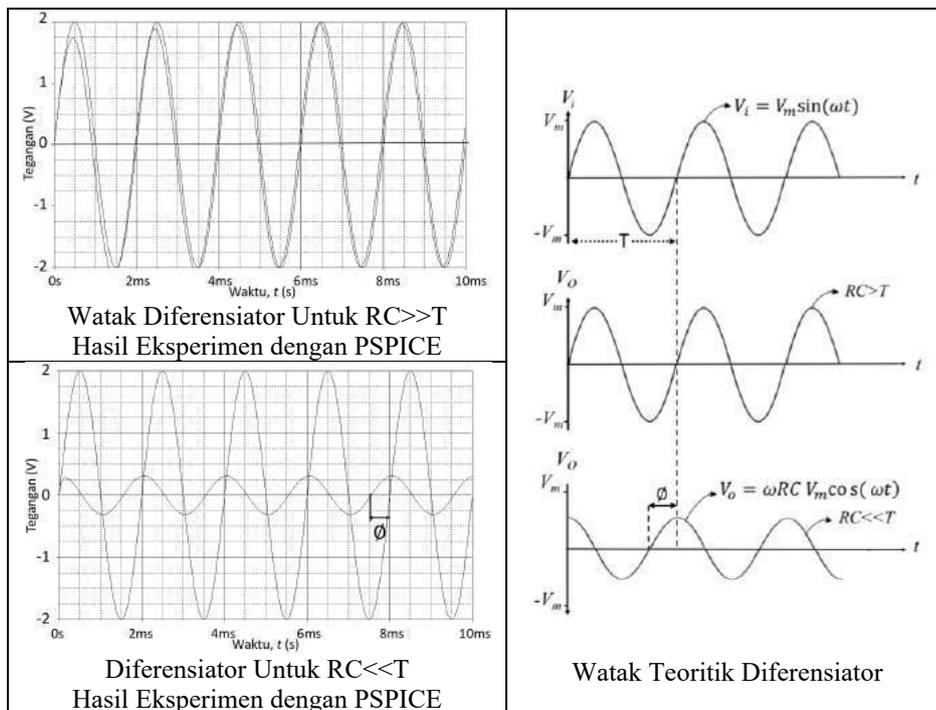
Watak rangkaian diferensiator hasil eksperimen dengan PSPICE ditunjukkan pada gambar 79 berikut ini.



Gambar 79. Watak diferensiator dengan input gelombang kotak

Hasil eksperimen dengan PSPICE pada gambar 79 memperlihatkan bahwa untuk $RC \ll T$ watak diferensiator mengubah gelombang kotak menjadi pulsa diferensiasi dengan ketinggian dua kali tegangan inputnya, sementara untuk keadaan $RC \gg T$, output diferensiator berupa gelombang kotak cacat. Watak ini terlihat sesuai atau sama dengan watak secara teoritik yang ditunjukkan pada gambar 79 kanan bawah untuk $RC \ll T$ dan kanan tengah untuk $RC \gg T$.

Watak rangkaian diferensiator untuk input berupa gelombang sinus hasil eksperimen dengan PSPICE ditunjukkan pada gambar 80.



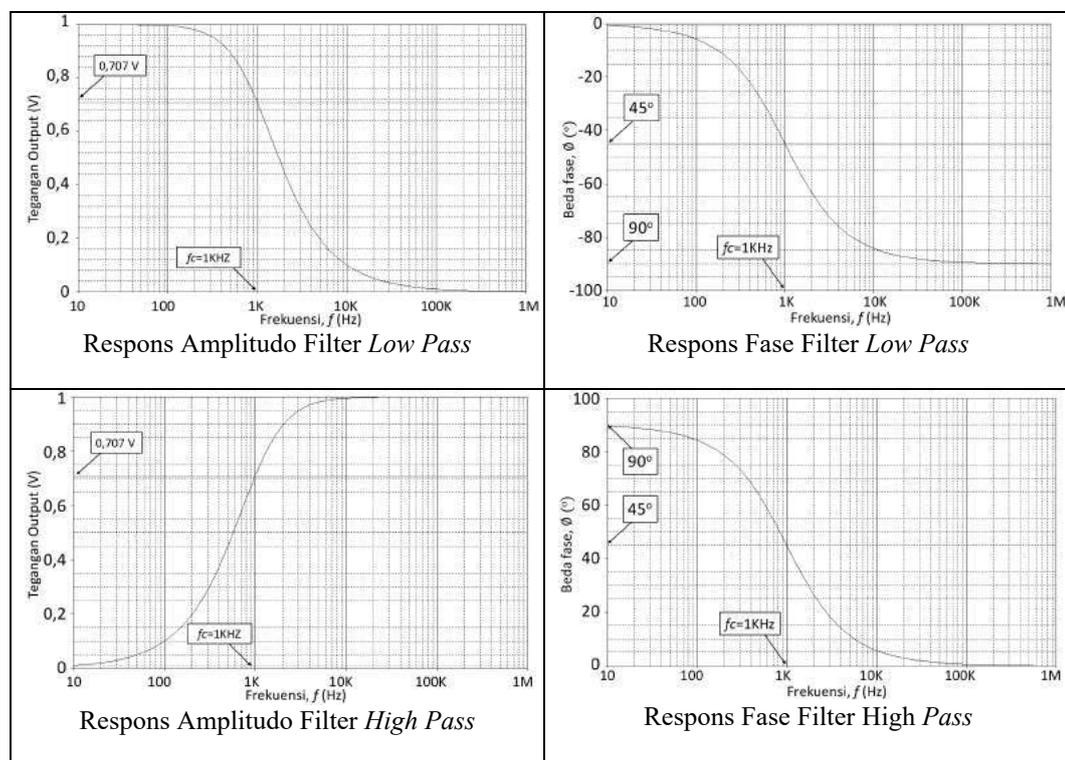
Gambar 80. Watak diferensiator dengan input gelombang sinus

Gambar 80 (kiri bawah) menunjukkan watak diferensiator yang diperoleh melalui eksperimen PSPICE untuk input gelombang sinus ketika $RC \ll T$, yakni tegangan outputnya mendahului 90° terhadap fase tegangan inputnya, sementara jika $RC \gg T$ (gambar kiri atas) fase tegangan output hampir sama dengan fase

tegangan inputnya. Hal ini mengindikasikan rangkaian diferensiator telah bekerja dengan baik, memberikan penampilan watak yang sesuai dengan watak teorinya seperti ditunjukkan pada gambar kanan bawah untuk $RC \ll T$ dan gambar kanan tengah untuk kondisi $RC \gg T$.

Berdasarkan perbandingan antara watak hasil eksperimen dengan PSPICE dan watak teoritik, yang menunjukkan bahwa keduanya memberikan tingkat kesamaan yang tinggi, maka dapat dinyatakan bahwa rangkaian diferensiator hasil pengembangan layak digunakan sebagai modul praktik pendukung laboratorium virtual elektronika dasar.

Hasil eksperimen dengan PSPICE untuk watak filter *low pass* dan filter *high pass* ditunjukkan pada gambar 81.



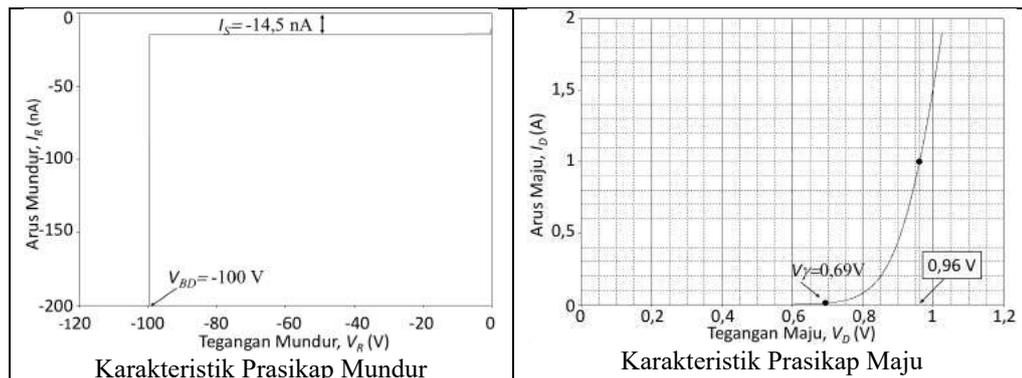
Gambar 81. Respons frekuensi filter *low pass* dan filter *high pass* hasil eksperimen dengan PSPICE

Berdasarkan respons amplitudo filter *low pass* yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE, pada frekuensi *cut-off* yakni sebesar 1KHz, terlihat tegangan output rangkaian bernilai 0,707 V dari 1 V (gambar kiri atas). Sementara itu dari respons fase terlihat beda fase tegangan output terhadap inputnya pada frekuensi yang sangat rendah sebesar 0° , pada frekuensi *cut-off* sebesar -45° , dan pada frekuensi yang sangat tinggi, beda fasenya sebesar -90° (gambar kanan atas). Kondisi ini menunjukkan keadaan yang sama dengan watak teoritik filter *low pass* seperti telah dibahas pada kajian teori di muka. Eksperimen menggunakan PSPICE memperlihatkan bahwa rangkaian filter *low pass* yang dirancang telah dapat bekerja dengan baik, watak yang diperoleh sama dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai perangkat percobaan praktik dasar elektronika.

Filter *high pass* juga menunjukkan kinerja yang baik, hal itu ditunjukkan oleh nilai tegangan output yang dihasilkan rangkaian pada frekuensi *cut-off* yakni sebesar 0,707 V, nilai yang sama dengan nilai yang diberikan oleh watak teoritiknya. Berdasarkan respons fase terlihat pada frekuensi yang sangat rendah rangkaian memberikan beda fase sebesar 90° , pada frekuensi *cut-off* sebesar 45° dan pada frekuensi tinggi beda fasenya sebesar 0° . Hasil eksperimen ini telah menggambarkan bahwa rangkaian filter *high pass* yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kinerja yang sangat baik, wataknya sesuai dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai media praktik laboratorium virtual elektronika dasar.

3. Uji Kinerja Rangkaian Karakteristik Diode

Rangkaian karakterisasi diode terdiri atas karakteristik prasikap maju dan prasikap mundur. Hasil eksperimen karakterisasi untuk kedua rangkaian rangkaian tersebut menggunakan PSPICE ditunjukkan pada gambar 82.



Gambar 82. Hasil pengukuran karakteristik diode 1N4002 menggunakan PSPICE

Secara umum kurva karakteristik diode 1N4002 yang diperoleh menunjukkan kemiripan dengan kurva teoritiknya, pada daerah prasikap maju, arus diode berupa fungsi eksponensial naik terhadap tegangannya dengan V_γ tertentu, dan pada daerah prasikap mundur, arusnya sangat kecil hingga mencapai tegangan dadal tertentu.

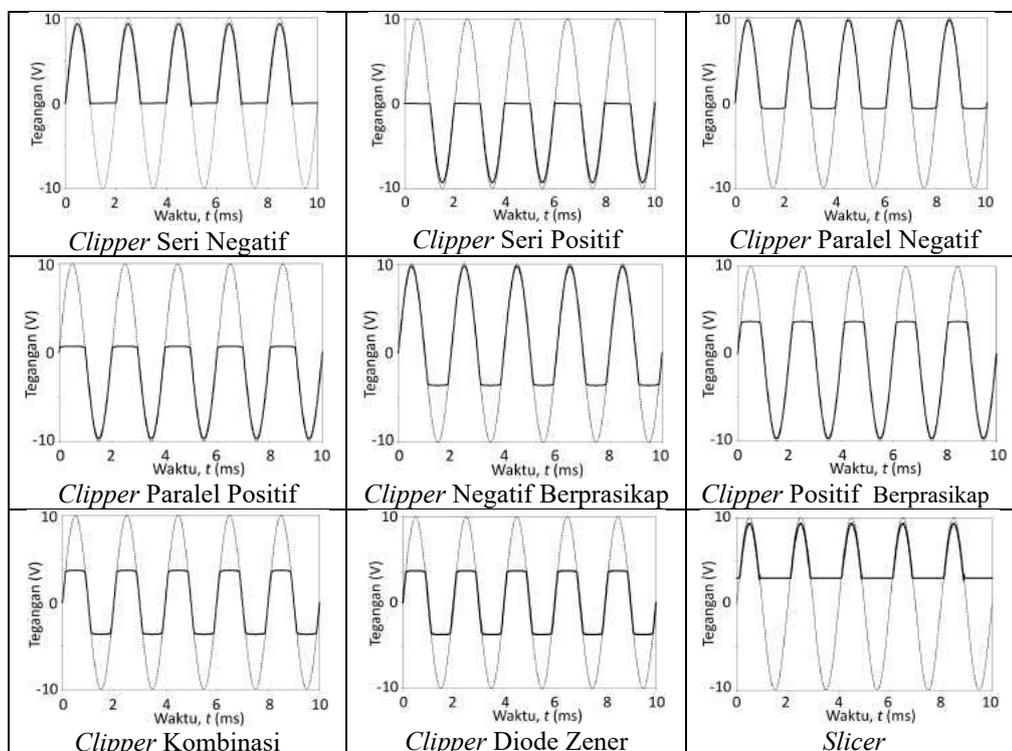
Hasil yang lebih detail menunjukkan pada kurva prasikap maju diperoleh tegangan *cut-in* sebesar 0,69 V hampir sama dengan nilai teoritiknya yang berkisar antara 0,6 sampai dengan 0,7 volt untuk diode silikon. Melalui kurva prasikap maju ditemukan pula nilai tegangan maju sebesar 0,96 volt untuk arus maju sebesar 1A, nilai ini hampir sama besarnya dengan nilai tersebut menurut *datasheet* yakni pada arus maju 1 A di lingkungan suhu 25°C, tegangan maju diode 1N4002 sebesar 0,93 sampai dengan 1,1 volt.

Berdasarkan kurva karakteristik prasikap mundur yang diperoleh, ditemukan nilai tegangan saturasi balik dalam orde nano ampere, dan tegangan dadal sebesar -100V. Keadaan tersebut sesuai dengan data tegangan dadal yang tercantum dalam *datasheet* 1N4002 yang diterbitkan oleh pabriknya.

Hasil eksperimen karakterisasi diode 1N4002 menggunakan PSPICE untuk kedua rangkaian prasikap tersebut telah menghasilkan kurva dan parameter yang sama dengan karakteristik teoritiknya maupun watak yang ditetapkan oleh pabriknya, sehingga dapat dikatakan rangkaian hasil pengembangan layak digunakan sebagai perangkat praktik laboratorium virtual elektronika dasar.

4. Uji Kinerja Rangkaian Pembentuk Gelombang

Eksperimen menggunakan PSPICE untuk kinerja rangkaian pembentuk gelombang menghasilkan watak rangkaian seperti ditunjukkan pada gambar 83.



Gambar 83. Watak rangkaian pembentuk gelombang hasil eksperimen PSPICE

Untuk *clipper* seri negatif maupun positif wataknya memotong gelombang input pada *baseline* 0 volt sesuai dengan karakteristik teoritiknya, sedangkan *clipper* paralel negatif memotong gelombang pada nilai -0,68 V dan *clipper* paralel positif pada +0,68 V. Nilai batas tegangan pemotong -0,68 V dan +0,68 V tersebut sesungguhnya adalah nilai tegangan *cut-in* diode 1N4002 yang sesuai dengan *datasheet*, sehingga watak rangkaian-rangkaian tersebut sama dengan watak teoritiknya.

Untuk *clipper* berprasikap, baik negatif maupun positif dengan tegangan prasikap sebesar 3 V, diperoleh nilai level pemotongan pada 3,66 V, hal itu berarti level tegangan pemotongannya merupakan gabungan dari tegangan prasikap dan tegangan *cut-in* diode yakni $V_b + V_\gamma = 3 + 0,66 = 3,66\text{V}$ untuk *clipper* positif atau $-V_b - V_\gamma = -3 - 0,66 = -3,66\text{V}$ untuk *clipper* negatif. Keadaan ini sama dengan keadaan yang ditampilkan oleh watak teoritik *clipper* berprasikap ini.

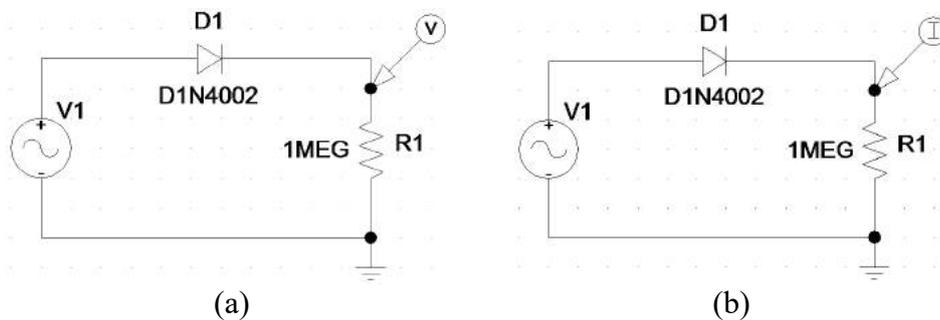
Pada *clipper* kombinasi dan *clipper* zener masing-masing memotong tegangan pada level 3,66 V dan 3,73V. Secara teoritik nilai-nilai ini berkisar antara 3,6 sampai dengan 3,7 V, oleh karena selisih nilai level tegangan pemotong hasil eksperimen terhadap teori sangat kecil yakni 3% untuk *clipper* kombinasi dan 2,2% untuk *clipper* zener, maka kedua jenis *clipper* ini wataknya dapat dikatakan hampir sama dengan watak teoritiknya.

Untuk rangkaian *slicer*, hasil eksperimen menggunakan PSPICE memberikan kondisi pemotongan gelombang pada level 3V sesuai dengan tegangan prasikap yang diberikan. Jika dibandingkan dengan watak teoritiknya pada gambar 34 (e) di muka, watak *slicer* pada hasil ini terlihat sama.

Memperhatikan hasil analisis perbandingan tersebut yang menunjukkan bahwa watak semua rangkaian *clipper* dan *slicer* hasil eksperimen menggunakan PSPICE sama dengan watak teoritiknya, maka dapat dinyatakan bahwa rangkaian-rangkaian *clipper* dan *slicer* yang dikembangkan pada penelitian ini layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar untuk topik rangkaian pembentuk gelombang.

5. Uji Kinerja Rangkaian Penyearah

Melalui penelitian pengembangan ini telah dirancang rangkaian penyearah setengah gelombang, gelombang penuh, jembatan dan penyearah dengan filter kapasitor. Gambar 84 menunjukkan rangkaian yang diuji untuk menampilkan bentuk gelombang tegangan dan arus dengan beban ringan.

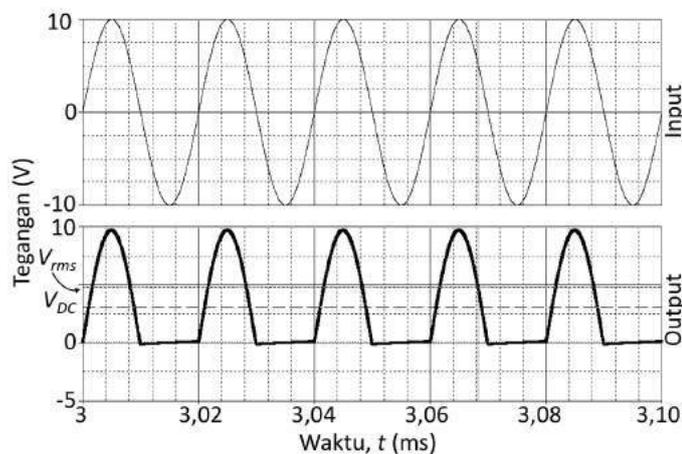


Gambar 84. Rangkaian penyearah setengah gelombang untuk analisis: (a) tegangan dan (b) arus;

Uji kinerja dilakukan dengan membandingkan watak rangkaian pada gambar 84 hasil eksperimen PSPICE dengan watak teoritiknya dalam keadaan mendekati tanpa beban. Hal itu dilakukan agar kondisi eksperimen sesuai dengan asumsi yang digunakan pada penentuan karakteristik teoritiknya. Untuk menciptakan kondisi rangkaian mendekati keadaan tanpa beban, resistansi beban diberi nilai yang sangat besar yakni $R_L = 1\text{M}\Omega$, sehingga arus yang mengalir sangat

kecil, dapat dikatakan rangkaian mengalami pembebanan yang sangat ringan, atau dapat dianggap dalam keadaan tanpa beban. Selanjutnya dengan menggunakan rangkaian pada gambar 84 (a) dilakukan pengaturan parameter analisis transien dengan nilai: *Print Step*=0, *Final Time*=3.1s, dan *Step Ceiling*=0.00001. Setelah simulasi dijalankan, skala sumbu X dan Y diatur dengan menggunakan tombol Alt-P-S diteruskan memilih *X Axis* dan *User Defined* diisi dengan 3.0s sampai dengan 3.10s.

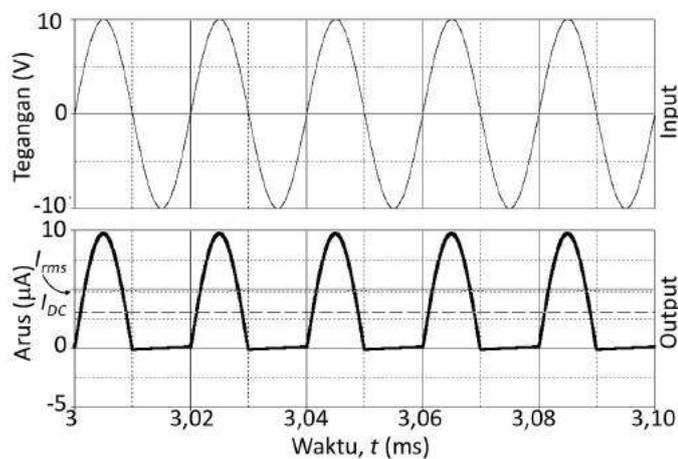
Tegangan DC ditampilkan dengan menambah *Trace* menggunakan tombol Alt-T-A diteruskan mengisi *Trace Expression* dengan formula $AVG(V(R1:1))$, demikian pula tegangan RMS ditayangkan dengan cara yang sama tetapi dengan *Trace Expression* $RMS(V(R1:1))$. Sementara itu, untuk menempatkan tampilan tegangan input dengan window baru, dilakukan dengan tombol Alt-P-P diteruskan dengan menambah *Trace* melalui tombol Alt-T-A dan dilanjutkan dengan mengisi *Trace Expression* dengan $V(D1:1)$. Melalui proses tersebut dihasilkan tampilan grafik seperti pada gambar 85.



Gambar 85. Bentuk gelombang tegangan pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban ringan

Untuk menampilkan bentuk gelombang arus, simulasi diulang dengan menggunakan rangkaian pada gambar 84 (b) dan setelah *running*, skala sumbu X dan Y diatur dengan menggunakan tombol Alt-P-S diteruskan memilih *X Axis* dan *User Defined* diisi dengan 3.0s sampai dengan 3.10s.

Bentuk gelombang arus DC output ditampilkan dengan menekan tombol Alt-T-A diteruskan mengisi *Trace Expression* dengan formula $AVG(I(D1:1))$. Arus RMS output ditampilkan dengan cara yang sama dengan arus DC namun dengan *Trace Expression* berisi $RMS(I(D1:1))$. Untuk melengkapi analisis, pada *window* yang berbeda ditampilkan bentuk gelombang input dengan cara yang sama seperti pada pengaturan tampilan tegangan di atas. Hasil eksperimen menggunakan PSPICE untuk arus output penyearah ditunjukkan pada gambar 86.



Gambar 86. Bentuk gelombang arus output pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban ringan

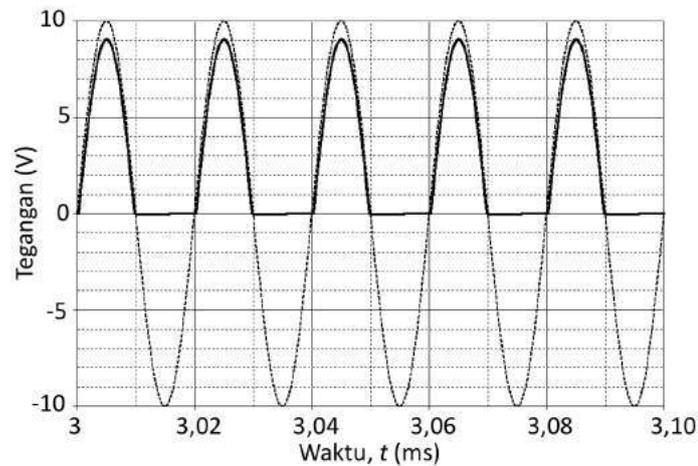
Berdasarkan hasil eksperimen PSPICE pada gambar 85 dan gambar 86, dapat diperoleh besaran-besaran dan parameter kinerja penyearah setengah gelombang yang diperlukan untuk analisis uji banding hasil terhadap karakteristik teoritiknya seperti tersaji pada tabel 16.

Tabel 16. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah setengah gelombang dengan beban ringan untuk $I_m=9,665 \mu\text{A}$ dan $V_m=9,665 \text{ V}$

Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	3,04 μA	3,08 μA (Persamaan 46)	1,3%
Arus RMS (I_{rms})	4,80 μA	4,83 μA (Persamaan 47)	0,6%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	3,04 V	3,08 V (Persamaan 49)	1,3%
Tegangan RMS (V_{rms})	4,80 V	4,83 V (Persamaan 47)	0,6%
Ripple Factor (r)	122%	121% (Persamaan 50)	0,8%
Efisiensi Penyearahan (η)	40,1%	40,6% (Persamaan 51)	1,2%
Faktor Guna Transformator (TUF)	28,3%	28,7% (Persamaan 52)	1,4%

Memperhatikan tabel 16, dapat dikemukakan bahwa penyearah setengah gelombang dengan beban ringan hasil eksperimen dapat menampilkan arus dan tegangan serta parameter kinerja yang sesuai atau sama dengan watak teoritiknya. Persentase perbedaan semua besaran dan parameter yang digunakan sebagai pembanding nilainya di bawah 5%, suatu kondisi yang menggambarkan bahwa watak rangkaian dengan PSPICE sama dengan watak hasil komputasi teoritik.

Gambar 87 berikut ini adalah watak rangkaian dengan PSPICE menggunakan beban penuh (*full load*). Untuk membuat kondisi seperti ini, resistansi beban diubah menjadi bernilai sangat kecil yakni $R_L = 10 \Omega$, sehingga arus maksimum mendekati arus nominal diode 1N4002 yakni 1 A.



Gambar 87. Bentuk gelombang arus output pada penyearah setengah gelombang hasil eksperimen menggunakan PSPICE dengan beban penuh

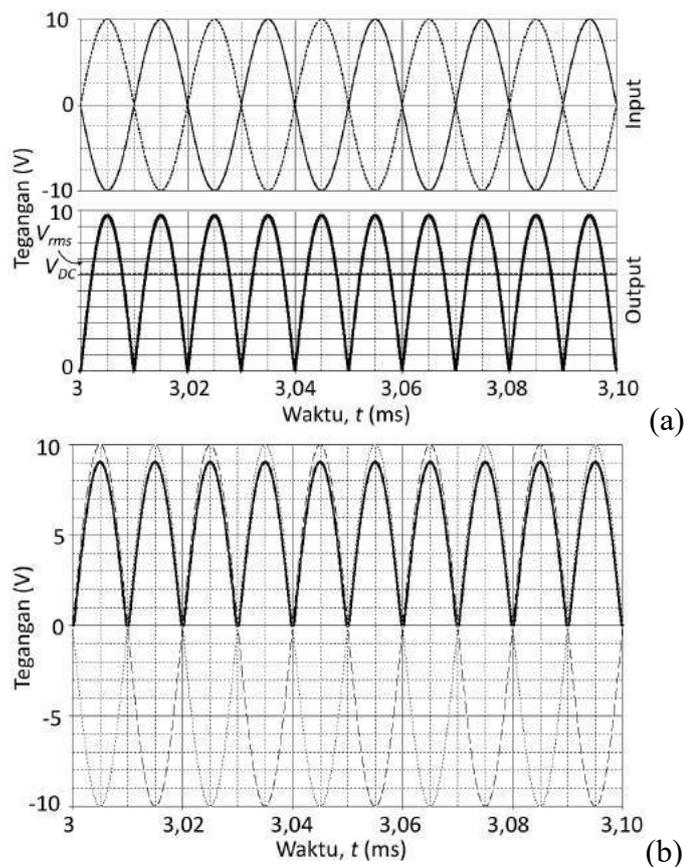
Merujuk gambar 87, pada rangkaian yang diberi beban penuh, terlihat bahwa tegangan output turun menjadi sebesar 9,05 V terhadap tegangan maksimumnya. Hal itu terjadi karena untuk beban penuh dengan nilai resistansi beban yang kecil menjadikan resistansi parasikap maju diode berpengaruh atau tidak dapat diabaikan lagi seperti saat penyearah diberi beban ringan. Dari *datasheet* diperoleh informasi bahwa untuk arus maju sebesar 1 A, nilai tegangan maju diode 1N4002 dapat bernilai antara 0,93 sampai dengan 1,1 volt. Jika diambil nilai rata-ratanya, tegangan majunya untuk arus 1 A menjadi 1,015 V, sehingga $R_F=1,015:1 \approx 1\Omega$. Secara teoritik, tegangan maksimum output rangkaian penyearah setengah gelombang dengan beban penuh akan bernilai:

$$V_{m,FL} = \frac{R_L}{R_L + R_F} V_{m,NL} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{m,NL} = \frac{10}{10 + 1} 10 = 9,09 V$$

Jadi, nilai tegangan maksimum beban penuh hasil eksperimen PSPICE sebesar 9,05 V sesuai dengan perhitungan teoritik sebesar 9,09 V atau berbeda hanya 0,4%.

Atas dasar pembahasan yang telah dilakukan tersebut, terlihat bahwa penyearah setengah gelombang yang disusun menggunakan PSPICE dapat menampilkan karakteristik yang sama dengan watak teoritiknya baik untuk keadaan beban ringan maupun beban penuh. Memperhatikan hal tersebut, dapat dikemukakan bahwa penyearah setengah gelombang yang diuji pada penelitian ini dapat digunakan sebagai perangkat praktik laboratorium virtual berbasis PSPICE untuk topik penyearah setengah gelombang.

Gambar berikut ini merupakan visualisasi tegangan dan arus penyearah gelombang penuh hasil eksperimen menggunakan PSPICE. Karena bentuknya sama dengan tegangan, maka visualisasi arus tidak ditampilkan.



Gambar 88. Bentuk gelombang tegangan pada penyearah gelombang penuh hasil eksperimen dengan PSPICE: (a) beban ringan, dan (b) beban penuh

Berdasarkan gambar 88 terlihat bahwa secara visual, penyearah gelombang penuh yang diuji coba telah memberikan tampilan yang sama dengan karakteristik teoritikny. Selain itu, dari eksperimen juga diperoleh data tegangan dan arus penyearah yang selanjutnya diolah menjadi nilai-nilai parameter kinerja rangkaian secara eksperimen seperti disajikan pada tabel 17.

Tabel 17. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah gelombang penuh dengan beban ringan untuk $I_m=9,665 \mu\text{A}$ dan $V_m=9,665 \text{ V}$

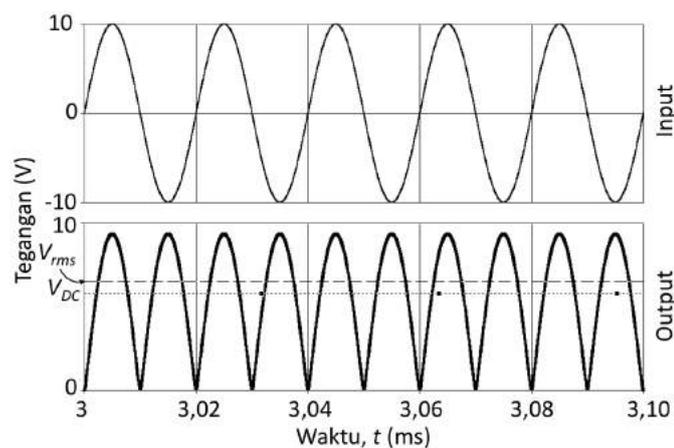
Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	6,07 μA	6,16 μA (Persamaan 53)	1,4%
Arus RMS (I_{rms})	6,79 μA	6,83 μA (Persamaan 54)	0,6%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	6,07 V	6,16 V (Persamaan 55a)	1,4%
Tegangan RMS (V_{rms})	6,79 V	6,83 V (Persamaan 54)	0,6%
Ripple Factor (r)	50,1%	48,2% (Persamaan 55b)	4%
Efisiensi Penyearahan (η)	79,9%	81,1% (Persamaan 55c)	1,5%
Faktor Guna Transformator (TUF)	56,6%	57,3% (Persamaan 55d)	1,2%

Berdasarkan tabel 17 terlihat bahwa nilai tegangan, arus dan parameter kinerja rangkaian yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan PSPICE hampir sama dengan nilai-nilai tersebut yang diperoleh melalui komputasi teoritik, dengan persentase perbedaan kurang dari 5%. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian penyearah gelombang penuh beban ringan yang diuji dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar laboratorium virtual berbasis perangkat lunak PSPICE.

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan tampilan seperti pada gambar 88 (b), ketika penyearah diberi beban penuh, menghasilkan nilai tegangan maksimum output sebesar 9,05 V. Secara teoritik dengan mengacu pada pembahasan penyearah setengah gelombang tentang rangkaian dengan beban penuh, dapat dihitung tegangan output penyearah yakni sebesar 9,09 V. Perbedaan antara hasil eksperimen dengan perhitungan teoritik sangat kecil hanya 0,4%, hal ini menunjukkan bahwa penyearah gelombang penuh dengan beban berat ini dapat menampilkan karakteristik yang sama dengan watak teoritiknya.

Memperhatikan hasil pembahasan tersebut, dapat dinyatakan bahwa rangkaian penyearah gelombang penuh yang dikembangkan baik dipasang beban berat maupun beban ringan, keduanya dapat digunakan secara layak sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

Hasil eksperimen untuk rangkaian penyearah jembatan ditunjukkan pada gambar 89 berikut ini.



Gambar 89. Bentuk gelombang penyearah jembatan dengan beban ringan hasil eksperimen menggunakan PSPICE

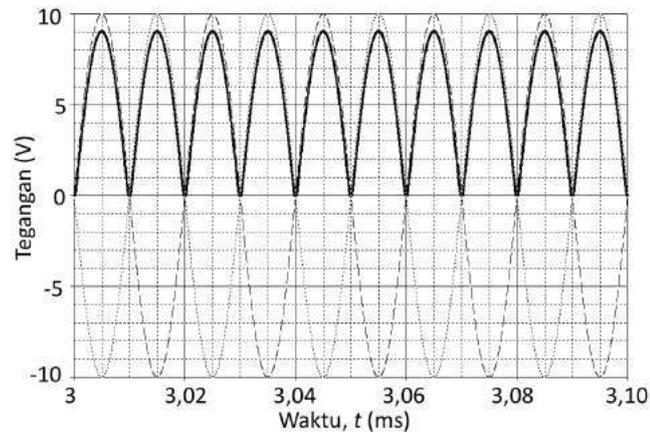
Hasil tersebut menunjukkan bahwa bentuk gelombang output yang dihasilkan oleh penyearah jembatan sama dengan karakteristik teoritiknya, hal ini menunjukkan bahwa secara visual rangkaian yang diuji telah menampilkan karakteristik yang sama dengan hasil komputasi teoritik. Untuk mendukung kesimpulan ini, dilakukan pula pengukuran tegangan, arus dan analisis penentuan parameter kinerja rangkaian yang hasilnya ditunjukkan pada tabel 18.

Tabel 18. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah jembatan dengan beban ringan ($R_L=10\text{ M}\Omega$) untuk $I_m=0,9565\text{ }\mu\text{A}$ dan $V_m=9,565\text{ V}$

Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	0,60 μA	0,61 μA (Persamaan 53)	1,6%
Arus RMS (I_{rms})	0,67 μA	0,68 μA (Persamaan 54)	1,5%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	6,0 V	6,1 V (Persamaan 55a)	1,6%
Tegangan RMS (V_{rms})	6,71 V	6,80 V (Persamaan 54)	1,5%
Ripple Factor (r)	49,7%	48,2% (Persamaan 55b)	3,1%
Efisiensi Penyearahan (η)	80,2%	81,1% (Persamaan 55c)	1,1%
Faktor Guna Transformator (TUF)	80,0%	81,1% (Persamaan 56a)	1,4%

Tabel 18 telah menunjukkan bahwa nilai tegangan, arus dan parameter kinerja penyearah jembatan yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE sama dengan nilai hasil perhitungan teoritik, persentase perbedaannya kurang dari 5%. Kondisi ini memantapkan pandangan bahwa rangkaian penyearah jembatan dengan beban ringan yang diuji dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

Gambar 90 berikut ini menunjukkan hasil eksperimen menggunakan PSPICE untuk rangkaian penyearah jembatan dengan beban berat.



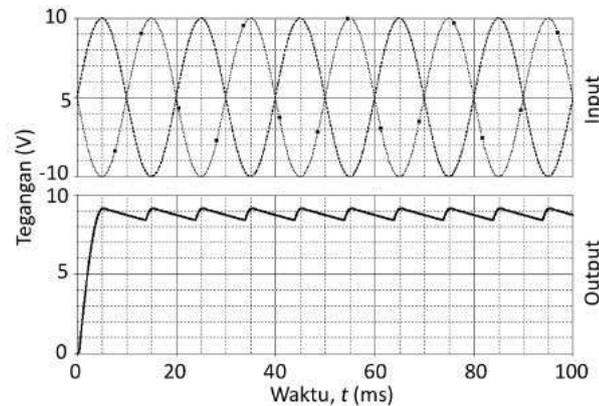
Gambar 90. Bentuk gelombang penyearah jembatan dengan beban penuh/berat hasil eksperimen menggunakan PSPICE

Jika penyearah diberi beban penuh, terlihat tegangan outputnya turun menjadi 8,1 V dari 10 V. Hal ini disebabkan munculnya tegangan *drop* pada ujung-ujung diode, selain tegangan *drop* pada belitan trafo sekunder. Telah dikemukakan di muka bahwa pada penyearah jembatan, setiap setengah periode dari gelombang input terdapat dua buah diode yang menghantar (ON), dan dengan asumsi tegangan *drop* hanya berasal dari diode, maka secara teoritik, tegangan outputnya sebesar,

$$V_{m,FL} = \frac{R_L}{R_L + 2R_F} V_{m,NL} = \frac{R_1}{R_1 + 2R_F} V_{m,NL} = \frac{10}{10 + 2} 10 = 8,33 \text{ V}$$

Perhitungan tersebut telah menunjukkan bahwa, tegangan output penyearah hasil eksperimen nilainya hampir sama terhadap hasil komputasi secara teoritik dengan persentase perbedaan hanya 2,8% saja, sehingga untuk beban penuh penyearah ini juga sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

Melalui eksperimen menggunakan PSPICE, telah dapat diperoleh grafik bentuk gelombang tegangan output penyearah dengan filter C dari rangkaian pada gambar 71 di muka, seperti ditunjukkan pada gambar 91.



Gambar 91. Bentuk gelombang tegangan rangkaian penyearah filter C Hasil eksperimen menggunakan PSPICE

Rangkaian ini menggunakan penyearah gelombang penuh dengan trafo *center-tap* yang telah teruji kinerjanya di muka, sehingga tidak diperlukan lagi uji parameter kinerja selain *ripple factor* yang memiliki formula berbeda dengan penyearah tanpa filter. Untuk rangkaian yang diuji, nilai kapasitansi filter, resistansi beban dan frekuensi sumber tegangan berturut-turut adalah $C=1000\mu\text{F}$, $R_L=220\ \Omega$, dan $f=50\text{Hz}$, sehingga berdasarkan persamaan (60) dapat dihitung *ripple factor* teoritiknya yakni sebesar,

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L} = \frac{1}{4\sqrt{3} \times 50 \times 1000 \times 10^{-6} \times 220} = 0,013 = 1,3\%$$

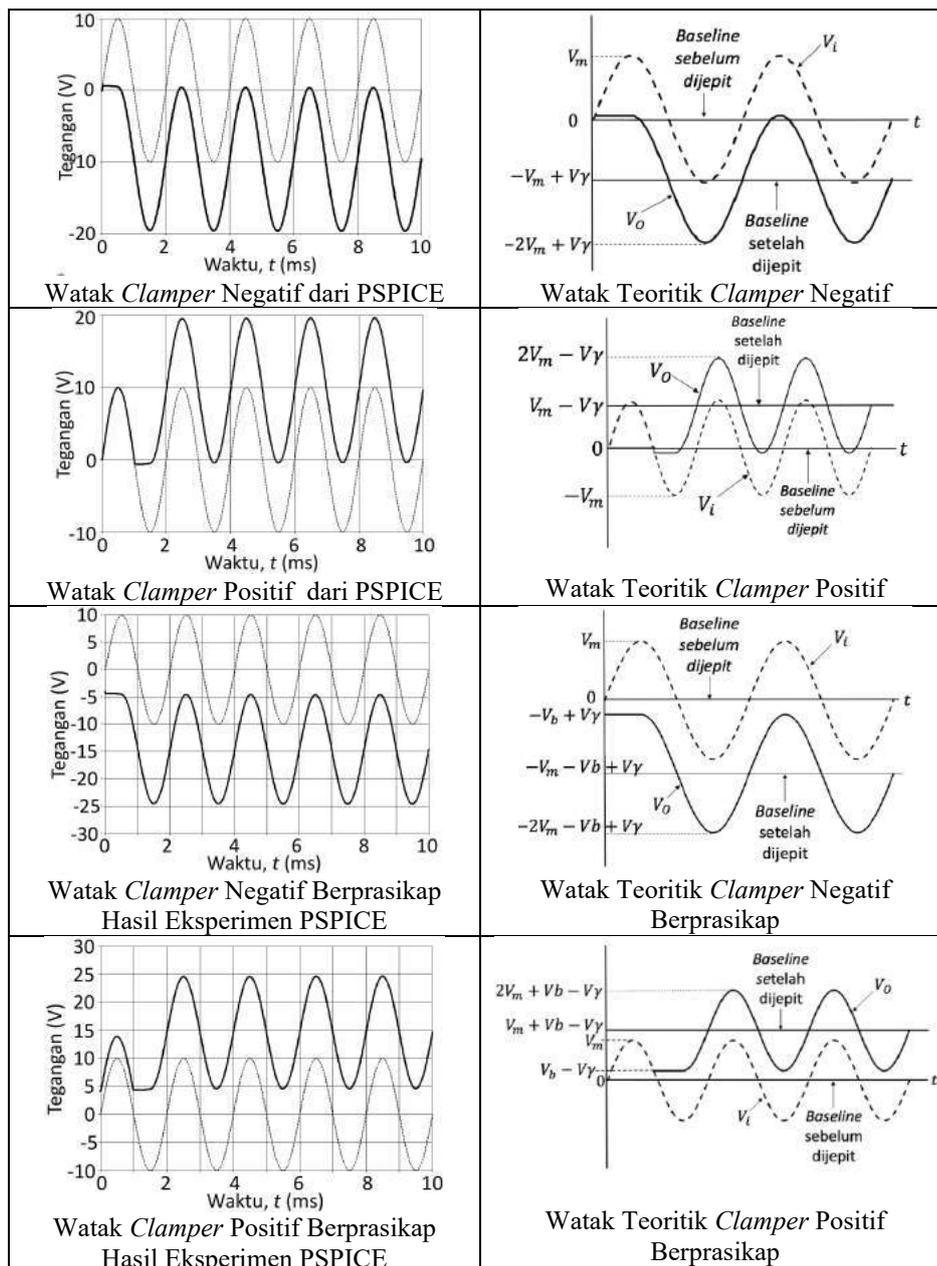
Berdasarkan eksperimen ditemukan nilai $V_{r,rms}=0,1074\ \text{V}$, dan $V_{DC}=8,9839\ \text{V}$, sehingga nilai *ripple factor* hasil pengukuran adalah,

$$r = \frac{V_{r,rms}}{V_{DC}} = \frac{0,1074}{8,9839} = 0,012 = 1,2\%$$

Terlihat bahwa nilai *ripple factor* hasil eksperimen menggunakan PSPICE hampir sama dengan nilai hasil perhitungan teoritik, sehingga rangkaian penyearah gelombang dengan filter kapasitor yang diuji dapat digunakan untuk mendukung praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

6. Uji Kinerja Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan

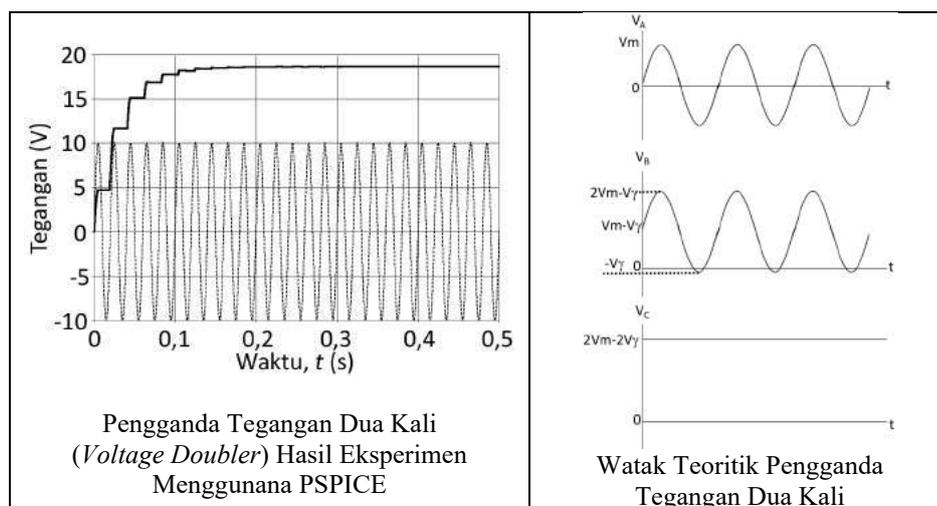
Hasil eksperimen menggunakan PSPICE untuk rangkaian penjepit ditunjukkan pada gambar 92.



Gambar 92. Watak rangkaian penjepit hasil eksperimen menggunakan PSPICE dan hasil komputasi teoritik

Gambar 92 menunjukkan bahwa semua rangkaian *clamper* yang diuji menunjukkan kurva watak yang sama terhadap watak teoritiknya. Pada *clamper* negatif, keduanya (eksperimen dan teoritik) sama-sama menunjukkan tegangan yang dijepit menempati *baseline* baru pada level di sekitar $-V_m$, demikian pula pada *clamper* positif, menempati level dekat dengan $+V_m$. Kondisi sama juga terlihat pada *clamper* berprinsip, baik positif maupun negatif, yang memberikan tampilan watak sama dengan watak teoritiknya, ditunjukkan oleh *baseline* baru hasil penjepitan menempati di sekitar nilai $-V_m - V_b$ untuk *clamper* negatif berprinsip dan di sekitar $+V_m + V_b$ untuk *clamper* positif berprinsip. Mengacu pada hasil analisis tersebut, dapat dinyatakan bahwa semua rangkaian *clamper* yang diuji pada penelitian ini memberikan kinerja yang sangat baik dan wataknya sesuai atau sama dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

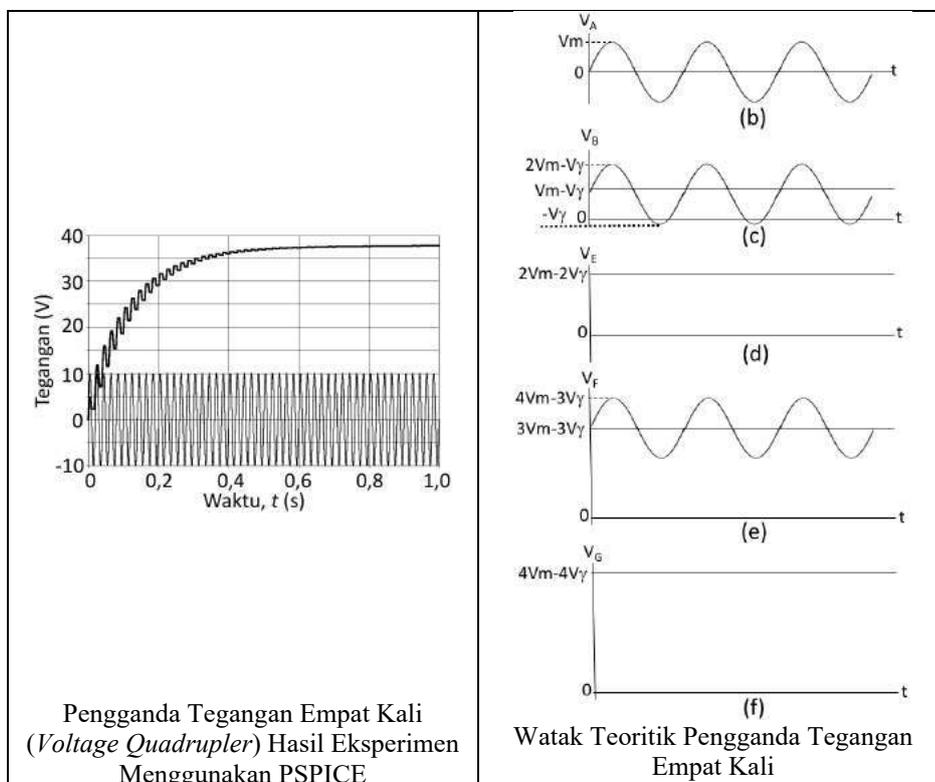
Hasil eksperimen dengan PSPICE untuk karakterisasi rangkaian pengganda tegangan dua kali ditunjukkan pada gambar 93.



Gambar 93. Watak pengganda tegangan dua kali

Pada gambar 93 (kiri) ditunjukkan setelah melalui keadaan transien, kira-kira $t > 0,2s$, rangkaian pengganda tegangan memberikan output tegangan searah hampir dua kali tegangan maksimum inputnya. Tegangan yang digandakan sedikit kurang dari $2V_m$. Drop tegangan sebesar kira-kira $2V_\gamma$ yang terjadi diakibatkan tegangan mengalami penjepitan oleh diode D1 dan penyearahan oleh D2, masing-masing diode memberikan pengurangan sebesar V_γ . Berdasarkan hasil analisis ini, terlihat bahwa rangkaian pengganda tegangan dua kali memberikan kinerja yang sangat baik dan wataknya sama dengan watak terotiknya, sehingga sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar berbasis PSPICE.

Gambar 94 berikut ini menyajikan hasil karakterisasi rangkaian pengganda tegangan empat kali (*quadrupler*) menggunakan *PSPICE*.

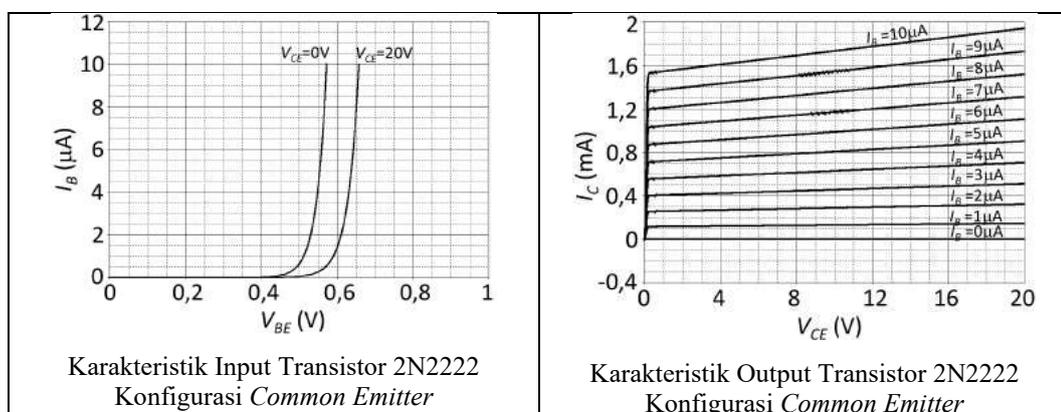


Gambar 93. Watak pengganda tegangan empat kali

Setelah melalui waktu transien, kira-kira $t > 0,8$ s, rangkaian pengganda tegangan memberikan output berupa tegangan searah yang nilainya hampir empat kali tegangan maksimum inputnya. Pada *quadrupler* ini tegangan outputnya mengalami penurunan hampir $4V\gamma$ dari keadaan ideal $4V_m$ yang diakibatkan tegangan input yang digandakan mengalami penjepitan dua kali oleh diode D1 dan D3 (menurunkan tegangan $-2V\gamma$) dan penyearahan oleh diode D2 dan D4 (menurunkan tegangan $-2V\gamma$ lagi), sehingga untuk keseluruhan operasi penggandaan tegangan empat kali, output rangkaian turun sebesar $4V\gamma$. Berdasarkan analisis ini nampak bahwa rangkaian pengganda tegangan empat kali telah dapat bekerja dengan sangat baik dan watak yang dihasilkan melalui eksperimen sama dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan PSPICE.

7. Uji Kinerja Rangkaian Karakterisasi Transistor

Hasil karakterisasi transistor 2N2222 menggunakan PSPICE ditunjukkan pada gambar 94 berikut ini.



Gambar 94. Karakteristik transistor 2N2222 hasil eksperimen dengan PSPICE

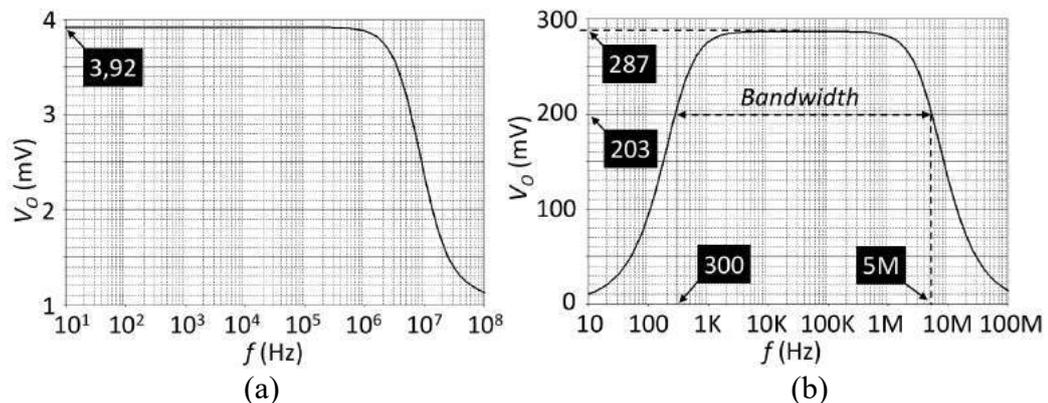
Secara visual, gambar 94 menunjukkan bahwa karakteristik transistor *common emitter* yang diperoleh secara eksperimen dengan PSPICE sama dengan karakteristik teoritiknya. Berdasarkan *datasheet* yang diterbitkan oleh pabriknya, seperti disajikan pada gambar 59 di muka, transistor 2N2222 akan memberikan *gain* DC sebesar $\beta=160$ untuk $V_{CE}=10$ V dan $I_C=1$ mA. Jika karakteristik output transistor 2N2222 hasil eksperimen PSPICE diperhatikan, terlihat di sana bahwa penarikan garis dari $V_{CE}=10$ V dan $I_C=1$ mA akan memotong keduanya di titik yang terletak pada kurva $I_B=6 \mu\text{A}$, sehingga menghasilkan nilai $\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1\text{mA}}{6 \mu\text{A}} = 167$. Nilai *gain* arus DC yang dihasilkan ini dapat dikatakan sama dengan nilai menurut *datasheet*, sehingga parameter karakteristik transistor yang diperoleh nilainya sesuai dengan parameter teoritiknya.

Karakteristik input transistor yang diperoleh juga menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik teoritiknya. Kurvanya membentuk fungsi eksponensial naik seperti kurva watak diode, karena pertemuan basis-emitor memiliki sifat seperti diode. Pemasangan tegangan V_{CE} yang semakin tinggi telah memberikan tampilan kurva bergeser ke kanan, sesuai dengan hasil komputasi teoritik. Melalui kurva watak input juga terlihat bahwa tegangan *cut-in* yang muncul besarnya di sekitar nilai tegangan *cut-in* diode pertemuan pn seperti watak teoritiknya.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat dinyatakan bahwa disain rangkaian untuk karakterisasi diode yang diuji pada penelitian ini telah dapat menunjukkan kinerja yang sangat baik. Kurva karakteristik input dan output transistor yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE menunjukkan hasil yang valid sehingga rangkiannya dapat digunakan sebagai media praktik.

8. Uji Kinerja Rangkaian Amplifier *Common Emitter*

Melalui eksperimen dengan PSPICE, dapat dihasilkan respons amplitudo dari rangkaian amplifier yang diuji seperti pada gambar 95.



Gambar 95. Respons amplitudo amplifier *common emitter* untuk $V_i=1\text{mV}$:
(a) tanpa kapasitor *bypass*; (b) dilengkapi kapasitor *bypass*

Merujuk respons amplitudo pada gambar 95(a), terlihat bahwa amplifier tanpa kapasitor *bypass* memberikan *gain* tegangan AC sebesar $A_v=3,92$. Secara teoritik, dengan $r_{tr}=26\ \Omega$, berdasarkan persamaan (95) dan persamaan (96), nilai *gain* tegangan rangkaian yang diuji (gambar 74) sebesar,

$$A_v = \frac{R_C}{r_{tr}+R_E} = \frac{8 \times 10^3}{26+2 \times 10^3} = 3,9$$

Memperhatikan *gain* tegangan hasil eksperimen dengan PSPICE dan *gain* tegangan hasil komputasi teoritik yang menunjukkan nilai hampir sama, dapat dinyatakan bahwa rancangan amplifier *common emitter* yang diuji telah memberikan kinerja yang baik, dapat memberikan *gain* tegangan sesuai rancangan.

Berdasarkan respons amplitudo pada gambar 95 (b), nampak *gain* tegangan melonjak sangat tinggi hingga mencapai $A_v=287$, setelah rangkaian dipasangi kapasitor *bypass*. Secara teoritik, jika rangkaian dipasangi kapasitor *bypass*, pada

frekuensi tinggi resistor R_E yang dipasang secara paralel terhadap kapasitor seperti terhubung singkat, sehingga *gain* tegangan menjadi,

$$A_v = \frac{R_C}{r_{tr}} = \frac{8 \times 10^3}{26} = 307,7$$

Terlihat bahwa nilai *gain* tegangan hasil eksperimen hampir mendekati nilai perhitungan teoritiknya dengan persentase perbedaan 6,7%. Sedikit perbedaan yang muncul dapat disebabkan nilai r_{tr} diasumsikan konstan, sedangkan dalam kenyataannya nilainya berubah terhadap suhu. Melalui uji ini juga ditentukan *gain* efektif yang besarnya 0,707 dari *gain* maksimum yakni bernilai $A_v=203$ yang bersesuaian dengan frekuensi *cut-in fc*=300 Hz, nilai ini sama dengan perhitungan teoritik saat amplifier ini dirancang. Merujuk respons amplitudo pada gambar 95 (b), terlihat daerah kerja (*bandwidth*) rangkaian sangat lebar yakni antara 300 Hz sampai dengan 5 MHz sesuai dengan *datasheet* transisotr 2N2222.

Atas dasar pembahasan yang telah dilakukan, dapat dikemukakan bahwa rangkaian amplifier yang dirancang telah dapat memberikan tampilan kinerja yang sangat baik. Karakteristik yang diperoleh mencerminkan kesesuaian yang tinggi terhadap watak teoritiknya, sehingga produk rangkaian ini dapat digunakan sebagai media yang valid untuk praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dikemukakan di muka, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Telah dapat dihasilkan sebuah produk perangkat pembelajaran berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual. Perangkat pembelajaran yang dihasilkan menyediakan modul praktik untuk topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pegganda Tegangan, Karakteristik Transistor, Rangkaian Penguat Transistor. Setiap topik dilengkapi dengan panduan praktik dan panduan pengoperasian PSPICE.
2. Semua rangkaian elektronika yang dikembangkan sebagai produk perangkat pembelajaran pada penelitian ini telah dapat bekerja dengan baik, dan karakteristik yang ditampilkan memberikan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap karakteristik teoritiknya, sehingga setiap rangkaian sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual yang diimplementasikan dengan perangkat lunak PSPICE.

B. Saran

Walaupun melalui penelitian ini telah dapat diperoleh sebuah produk yang layak digunakan sebagai perangkat pembelajaran praktik menggunakan

laboratorium virtual berbasis PSPICE, namun masih terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperbaiki untuk pengembangan selanjutnya. Oleh sebab itu perlu diberikan saran-saran sebagai berikut.

1. Praktik menggunakan laboratorium virtual berbasis perangkat lunak PSPICE hasil dari penelitian ini memerlukan pra syarat yakni mahasiswa harus terampil terlebih dahulu menggunakan perangkat lunak PSPICE. Untuk itu, penyelenggara praktik elektronika dasar perlu memberikan bekal keterampilan yang cukup terlebih dahulu kepada peserta praktik, agar saat praktik dilaksanakan peserta telah terampil mengoperasikan perangkat lunak PSPICE.
2. Perangkat yang telah dikembangkan ini terbukti memiliki validitas yang tinggi dalam menampilkan karakteristik rangkaian elektronika, oleh sebab itu disarankan agar dosen/guru tidak hanya memanfaatkan produk ini sebagai media praktik saja, melainkan juga menggunakannya sebagai perangkat pembelajaran di kelas menjadi media demonstrasi ataupun perangkat untuk mendukung tugas-tugas mandiri mahasiswa.
3. Oleh karena pada penelitian ini baru dilakukan evaluasi *on going* saja, penelitian berikutnya disarankan melakukan evaluasi yang lain agar dapat diketahui validitas menurut versi para ahli media, ahli materi dan ahli pedagogi, serta dapat digali dampak pembelajaran dari penggunaan produk yang dihasilkan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, P. (2009). Zener Diode. Retrieved from <https://nptel.ac.in/courses/117107095/8>
- Aguilar-Peña, J. D., Muñoz-Rodríguez, F. J., Rus-Casas, C., & Fernández-Carrasco, J. I. (2016). Blended learning for photovoltaic systems: Virtual laboratory with PSPICE. In *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEET)* (pp. 1–6). IEEE.
- Alessi, S. M., & Trollip, S. R. (2001). *Multimedia for learning: Methods and development*. Boston: Allyn and Bacon.
- Babich, A., & Mavrommatis, K. (2004). Virtual laboratory concept for engineering education. In *International Conference on Engineering Education and Research "Progress Through Partnership"* (pp. 1043–1050). Ostrava, Czech Republic.: Technical University of Ostrava.
- Bailey, C., & Freeman, M. J. (2010). A java bread-board simulator: Digital circuit simulation with an open-source toolset. *IADIS International Journal on Computer Science and Information System*, 55(1), 13–25.
- Budhu, M. (2002). Virtual laboratories for engineering education. In *International Conference on Engineering Education*. Manchester, UK.
- Cadence Design Systems, I. (2016). *PSPICE User Guide* (Product Re). San Jose, CA: Cadence Design Systems, Inc.
- Chattopadhyay, D., & Rakshit, P. C. (2006). *Electronics: Fundamental and Applications* (Seventh Ed). New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Cheng, Y. C. (2005). *New paradigm for re-engineering education: Globalization, localization and individualization*. Dordrecht: Springer.
- Colace, F., Santo, M. De, & Pietrosanto, A. (2004). Work in progress - virtual lab for electronic engineering curricula. *34th Annual Frontiers in Education, 2004. FIE 2004.*, 22–24. <https://doi.org/10.1109/FIE.2004.1408524>
- Dak, R., Khoje, S., & Pardeshi, P. J. (2017). A review on cost-efficient virtual laboratory: A teaching aid. In *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)* (pp. 663–667). Erode, India: IEEE.
- Elawady, Y. H., & Tolba, A. S. (2009). Educational objectives of different laboratory types: a comparative study. *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, 6(2), 89–96.
- Garg, R. K., Dixit, A., & Yadav, P. (2008). *Basic Electronics*. New Delhi: Laxmi Publications (P) Ltd.

- Grob, B. (1984). *Basic Electronics* (Fifth Edit). New York: McGraw-Hill Book Company.
- Kal, S. (2002). *Basic Electronics: Devices, Circuits and IT Fundamentals*. New Delhi: Prentice-Hall Of India Private Limited.
- Kashif, S. A. R., & Saqib, M. A. (2008). The use of Simulink and PSpice as educational tools in the teaching of power electronics. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1), 55–61. <https://doi.org/10.1080/1448837X.2008.11464172>
- Krivickas, R. V., & Krivickas, J. (2006). Laboratory instruction in engineering education. *Global Journal of Engineering Education*, 11(2), 191–196.
- Lee, Y. S., & Chow, M. H. L. (2007). Diode Rectifiers. In M. H. Rashid (Ed.), *Power Electronics Handbook* (2nd Edition, pp. 145–178). San Diego: Elsevier, Inc.
- Lustigova, Z., & Lustig, F. (2009). A new virtual and remote experimental and environment for teaching and learning science. In A. Tatnal & A. Jones (Eds.), *Education and Technology for a Better World, 9th IFIP TC 3 World Conference on Computers in Education* (pp. 75–82). New York: Springe.
- Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*, 38(3), 1–24.
- Millman, J., & Halkias, C. C. (1972). *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems* (Internatio). Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- Mottershead, A. (2013). *Electronic Devices & Circuits An Introduction*. New Delhi: Prentice Hall Of India.
- Muchlas. (2015). Developing a teaching model using an online collaboration approach for a digital technique practical work. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 14(3), 63–69.
- On-Semiconductor. (2013, January). Amplifier Transistors NPN Silicon. P2N2222A/D, 1–6.
- Prakash, G. V. (2013). Semiconductor as a device. Retrieved from <https://nptel.ac.in/courses/115102025/16>
- Rahman, M. Z. (2014). Teaching electrical circuits using a virtual lab. *In Transit: The LaGuardia Journal on Teaching and Learning*, (6), 85–92.
- Saleh, K. F., Mohamed, A. M., & Madkour, H. (2009). Developing virtual laboratories environments for engineering education. *International Journal of Arts and Sciences*, 3(1), 9–17.
- Scherz, P., & Monk, S. (2013). *Practical Electronics for Inventors* (Third Edit). New York: The McGraw-Hill, Companies.
- Shokri, A., & Faraahi, A. (2010). Designing of virtual laboratories based on extended event driving simulation method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 68, 1357–1359.

- Smith, R. J., & Dorf, R. C. (1992). *Circuits, Devices and Systems: A First Course in Electrical Engineering* (Fifth Edit). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Surjono, H. D. (2017). *Multimedia Pembelajaran Interaktif Konsep dan Pengembangan* (Edisi Pert). Yogyakarta: UNY Press.
- Sutrisno. (1986). *Elektronika 1 Teori dan Penerapannya*. Bandung: Penerbit ITB.
- Tobin, P. (2007). The role of PSpice in the engineering teaching environment. In *International Conference on Engineering Education–ICEE 2007*. Coimbra, Portugal.
- Tzafestas, C. S., Palaiologou, N., & Alifragis, M. (2006). Virtual and remote robotic laboratory: Comparative experimental evaluation. *IEEE Transactions on Education*, 49(3), 360–369.

P2N2222A

Amplifier Transistors

NPN Silicon

Features

- These are Pb-Free Devices*

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	V _{CEO}	40	Vdc
Collector - Base Voltage	V _{CBO}	75	Vdc
Emitter - Base Voltage	V _{EB0}	6.0	Vdc
Collector Current - Continuous	I _C	600	mAdc
Total Device Dissipation @ T _A = 25°C Derate above 25°C	P _D	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ T _C = 25°C Derate above 25°C	P _D	1.5 12	W mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T _J , T _{stg}	-55 to +150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	R _{θJC}	83.3	°C/W

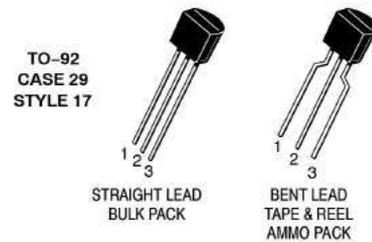
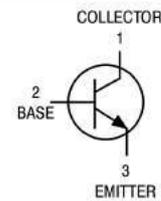
Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



MARKING DIAGRAM



- A = Assembly Location
- Y = Year
- WW = Work Week
- = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
P2N2222AG	TO-92 (Pb-Free)	5000 Units/Bulk
P2N2222ARL1G	TO-92 (Pb-Free)	2000/Tape & Ammo

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specification Brochure, BRD8011/D.

P2N2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector - Emitter Breakdown Voltage (I _C = 10 mAdc, I _B = 0)	V _{(BR)CEO}	40	-	Vdc
Collector - Base Breakdown Voltage (I _C = 10 μAdc, I _E = 0)	V _{(BR)CBO}	75	-	Vdc
Emitter - Base Breakdown Voltage (I _E = 10 μAdc, I _C = 0)	V _{(BR)EBO}	6.0	-	Vdc
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 60 Vdc, V _{EB(off)} = 3.0 Vdc)	I _{CEX}	-	10	nAdc
Collector Cutoff Current (V _{CB} = 60 Vdc, I _E = 0) (V _{CB} = 60 Vdc, I _E = 0, T _A = 150°C)	I _{CBO}	-	0.01 10	μAdc
Emitter Cutoff Current (V _{EB} = 3.0 Vdc, I _C = 0)	I _{EBO}	-	10	nAdc
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 10 V)	I _{CEO}	-	10	nAdc
Base Cutoff Current (V _{CE} = 60 Vdc, V _{EB(off)} = 3.0 Vdc)	I _{BEX}	-	20	nAdc
ON CHARACTERISTICS				
DC Current Gain (I _C = 0.1 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc) (I _C = 1.0 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, T _A = -55°C) (I _C = 150 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc) (Note 1) (I _C = 150 mAdc, V _{CE} = 1.0 Vdc) (Note 1) (I _C = 500 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc) (Note 1)	h _{FE}	35 50 75 35 100 50 40	- - - - 300 - -	-
Collector - Emitter Saturation Voltage (Note 1) (I _C = 150 mAdc, I _B = 15 mAdc) (I _C = 500 mAdc, I _B = 50 mAdc)	V _{CE(sat)}	-	0.3 1.0	Vdc
Base - Emitter Saturation Voltage (Note 1) (I _C = 150 mAdc, I _B = 15 mAdc) (I _C = 500 mAdc, I _B = 50 mAdc)	V _{BE(sat)}	0.6	1.2 2.0	Vdc
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS				
Current - Gain - Bandwidth Product (Note 2) (I _C = 20 mAdc, V _{CE} = 20 Vdc, f = 100 MHz)C	f _T	300	-	MHz
Output Capacitance (V _{CB} = 10 Vdc, I _E = 0, f = 1.0 MHz)	C _{obo}	-	8.0	pF
Input Capacitance (V _{EB} = 0.5 Vdc, I _C = 0, f = 1.0 MHz)	C _{ibo}	-	25	pF
Input Impedance (I _C = 1.0 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h _{ie}	2.0 0.25	8.0 1.25	kΩ
Voltage Feedback Ratio (I _C = 1.0 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h _{re}	-	8.0 4.0	X 10 ⁻⁴
Small-Signal Current Gain (I _C = 1.0 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h _{fe}	50 75	300 375	-
Output Admittance (I _C = 1.0 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz) (I _C = 10 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h _{oe}	5.0 25	35 200	μMhos
Collector Base Time Constant (I _E = 20 mAdc, V _{CB} = 20 Vdc, f = 31.8 MHz)	rb'C _c	-	150	ps
Noise Figure (I _C = 100 μAdc, V _{CE} = 10 Vdc, R _S = 1.0 kΩ, f = 1.0 kHz)	N _F	-	4.0	dB

1. Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs, Duty Cycle ≤ 2.0%.

2. f_T is defined as the frequency at which |h_{fe}| extrapolates to unity.

P2N2222A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit	
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Delay Time	$(V_{CC} = 30\text{ Vdc}, V_{BE(\text{off})} = -2.0\text{ Vdc}, I_C = 150\text{ mA}, I_{B1} = 15\text{ mA})$ (Figure 1)	t_{d1}	-	10	ns
Rise Time		t_r	-	25	ns
Storage Time	$(V_{CC} = 30\text{ Vdc}, I_C = 150\text{ mA}, I_{B1} = I_{B2} = 15\text{ mA})$ (Figure 2)	t_s	-	225	ns
Fall Time		t_f	-	60	ns

SWITCHING TIME EQUIVALENT TEST CIRCUITS

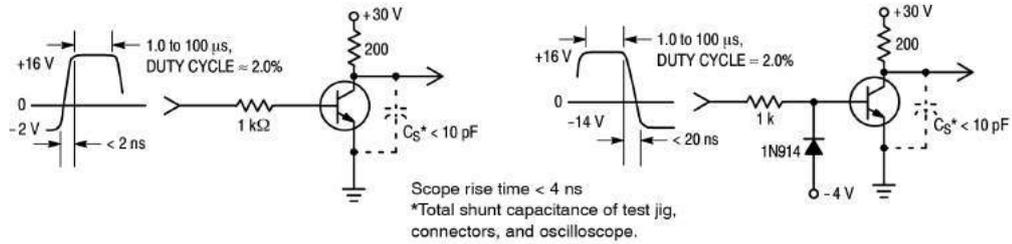


Figure 1. Turn-On Time

Figure 2. Turn-Off Time

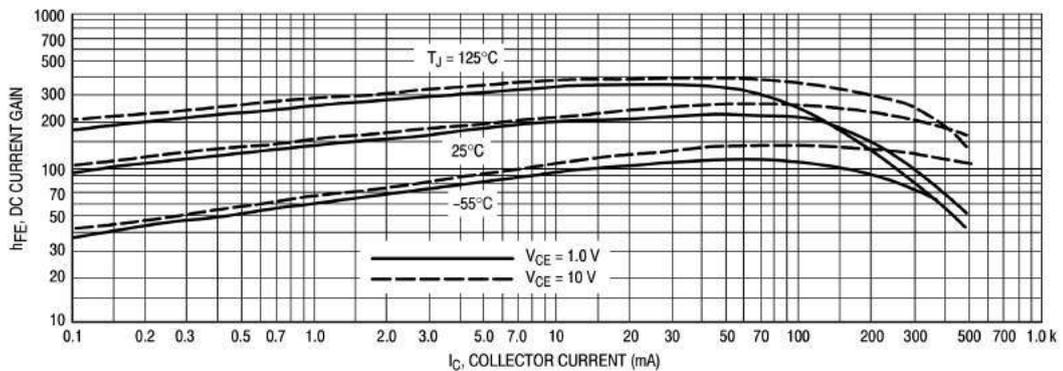


Figure 3. DC Current Gain

P2N2222A

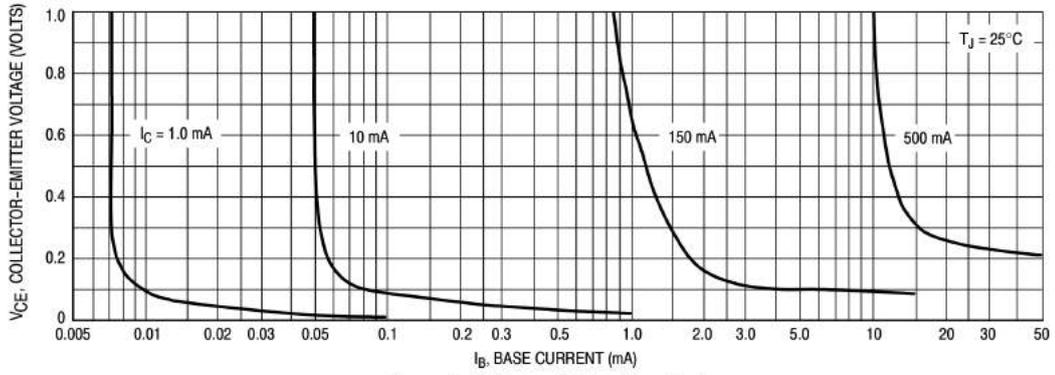


Figure 4. Collector Saturation Region

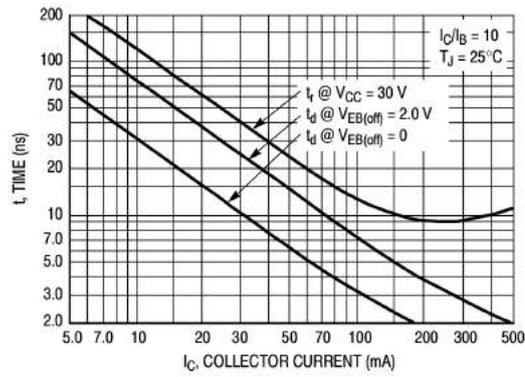


Figure 5. Turn-On Time

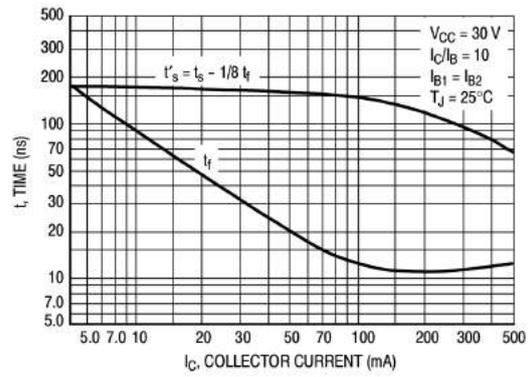


Figure 6. Turn-Off Time

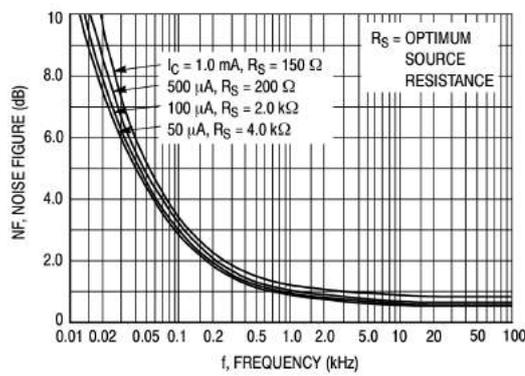


Figure 7. Frequency Effects

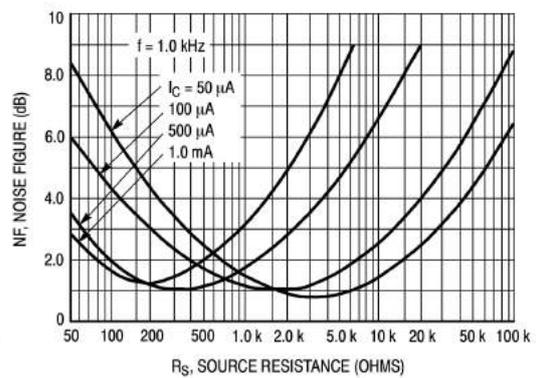


Figure 8. Source Resistance Effects

P2N2222A

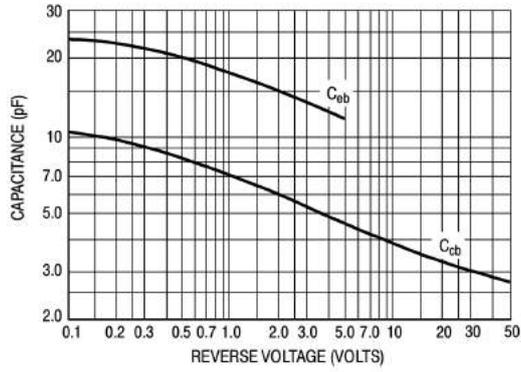


Figure 9. Capacitances

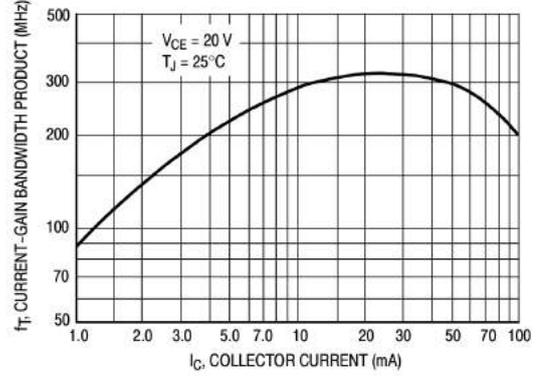


Figure 10. Current-Gain Bandwidth Product

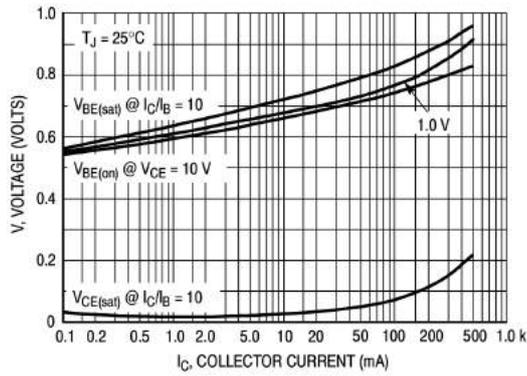


Figure 11. "On" Voltages

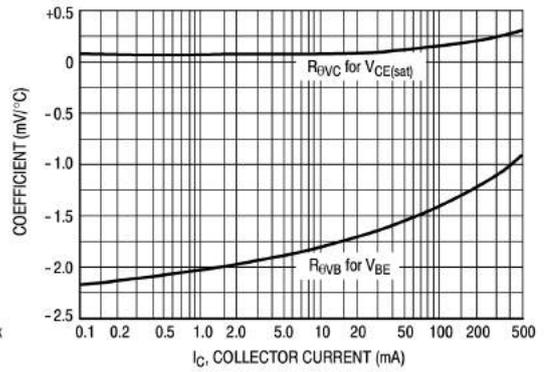


Figure 12. Temperature Coefficients

**1N4001, 1N4002, 1N4003,
1N4004, 1N4005, 1N4006,
1N4007**

**Axial-Lead Glass
Passivated Standard
Recovery Rectifiers**

This data sheet provides information on subminiature size, axial lead mounted rectifiers for general-purpose low-power applications.

Features

- Shipped in Plastic Bags, 1000 per bag
- Available Tape and Reeled, 5000 per reel, by adding a “RL” suffix to the part number
- Available in Fan-Fold Packaging, 3000 per box, by adding a “FF” suffix to the part number
- Pb-Free Packages are Available

Mechanical Characteristics

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 0.4 gram (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds, 1/16 in. from case
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

www.onsemi.com

**LEAD MOUNTED RECTIFIERS
50–1000 VOLTS
DIFFUSED JUNCTION**



**CASE 59-10
AXIAL LEAD
PLASTIC**

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
 1N400x = Device Number
 x = 1, 2, 3, 4, 5, 6 or 7
 YY = Year
 WW = Work Week
 ■ = Pb-Free Package
 (Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 5 of this data sheet.

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
†Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
†Non-Replicative Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	V_{RSM}	60	120	240	480	720	1000	1200	V
†RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
†Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, $T_A = 75^\circ\text{C}$)	I_O	1.0							A
†Non-Replicative Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions)	I_{FSM}	30 (for 1 cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	-65 to +175							$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

†Indicates JEDEC Registered Data

THERMAL CHARACTERISTICS

Rating	Symbol	Max	Unit
Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	Note 1	$^\circ\text{C}/\text{W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS†

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop, ($I_F = 1.0$ Amp, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	v_F	0.93	1.1	V
Maximum Full-Cycle Average Forward Voltage Drop, ($I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$, 1 inch leads)	$V_{F(AV)}$	—	0.8	V
Maximum Reverse Current (rated DC voltage) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J = 100^\circ\text{C}$)	I_R	0.05 1.0	10 50	μA
Maximum Full-Cycle Average Reverse Current, ($I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$, 1 inch leads)	$I_{R(AV)}$	—	30	μA

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

†Indicates JEDEC Registered Data

1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007

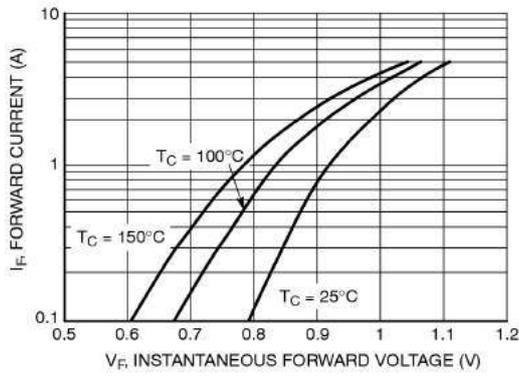


Figure 1. Typical Forward Voltage

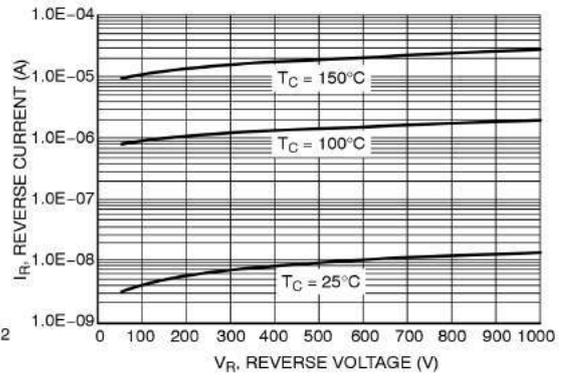


Figure 2. Typical Reverse Current

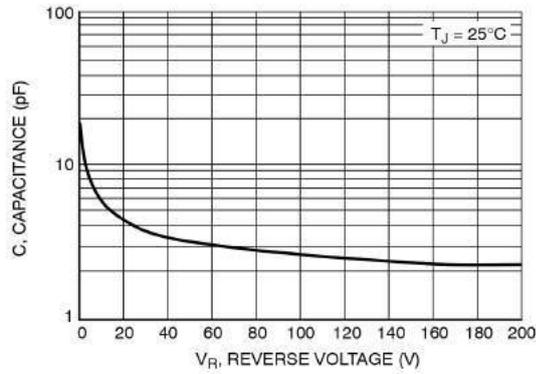


Figure 3. Typical Capacitance

IMPLEMENTASI LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTRONIKA DASAR BERBASIS PERANGKAT LUNAK PSPICE

Muchlas^{*)} dan Nuryono Satya Widodo^{**)}

^{*)}Anggota IEEE, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan, Indonesia, Email: muchlas.te@uad.ac.id

^{**)}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan, Indonesia, E-mail: nuryono.te@uad.ac.id

Abstrak—Saat ini ketersediaan modul-modul untuk mendukung praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual masih belum dapat memenuhi kebutuhan. Penelitian pengembangan ini ditujukan untuk menghasilkan perangkat pembelajaran yang layak digunakan sebagai pendukung praktik elektronika dasar berbasis program aplikasi PSPICE. Prosedur pengembangan yang digunakan adalah *ADDIE (analysis, design, develop, implementation, evaluation)* sebagai acuan untuk mengarahkan proses disain mencapai produk sesuai spesifikasi yang ditentukan. Kinerja produk diuji menggunakan evaluasi formatif *on going*. Untuk memperoleh informasi kinerja rangkaian atau kelayakan produk, dilakukan analisis perbandingan antara karakteristik yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan PSPICE terhadap watak teoritiknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua modul yang dikembangkan dapat menampilkan karakteristik yang sama dengan watak teoritiknya, hal ini menunjukkan bahwa modul-modul tersebut memiliki kinerja yang sangat baik sehingga layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE. Produk yang dihasilkan berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar yang meliputi topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan, Karakteristik Transistor, dan Rangkaian Amplifier Transistor.

Kata kunci— *laboratorium virtual, elektronika dasar, perangkat lunak PSPICE*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) yang sangat pesat saat ini telah mengantarkan teknologi otomatisasi fabrikasi memasuki fase ke-4 yang disebut dengan *Industry 4.0*, sehingga memunculkan pabrik-pabrik cerdas di hampir semua sektor industri dengan dukungan kerja berbasis *cyber physical systems, internet of things, cloud computing* dan *cognitive machine*. Kemajuan industri yang revolusioner ini menjadi faktor utama penyebab meningkatnya secara dramatis tuntutan pasar kerja terhadap kualifikasi lulusan pendidikan tinggi teknik. Keterampilan-keterampilan yang relevan dan adaptif terhadap basis kerja industri terkini, sekarang menjadi

tuntutan kebutuhan tenaga kerja pengguna lulusan. Lewis (2018: 1), seorang Manajer Pemasaran *Content* dari *LinkedIn*, mengatakan bahwa selain 10 keterampilan teknis, terdapat empat *soft skills* yakni kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan pengaturan waktu yang sangat dibutuhkan oleh dunia usaha dan dunia industri di era ini.

Beberapa hasil penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa laboratorium virtual dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap materi praktik (Colace, Santo, & Pietrosanto, 2004: 22-24), lebih efisien (Saleh, et. al, 2009: 9-17), lebih mudah dan fleksibel dibandingkan *hands-on* (Bailey & Freeman, 2010: 13-25). Selain itu, ternyata praktik dengan pendekatan *online learning* menggunakan laboratorium virtual juga dapat diselenggarakan secara kolaboratif [5], hal ini menunjukkan bahwa melalui laboratorium virtual dapat dikembangkan keterampilan *soft skills* seperti kepemimpinan, komunikasi, kolaborasi dan manajemen waktu seperti yang dituntut oleh dunia industri modern.

Memperhatikan karakteristiknya sebagai media praktik yang efisien dan fleksibel serta potensinya sebagai sarana efektif pembentukan keterampilan yang dibutuhkan dunia kerja saat ini, laboratorium virtual seharusnya menjadi perangkat yang banyak digunakan oleh kalangan pendidikan tinggi teknik dalam mendukung terselenggaranya pembelajaran praktik secara *online*. Terlebih lagi, saat ini Kemenristekdikti telah meluncurkan kebijakan agar pendekatan *blended learning* (gabungan pembelajaran tatap muka dan *online*) digunakan secara luas dalam sistem pembelajaran di perguruan tinggi. Namun, kenyataan menunjukkan bahwa ketersediaan perangkat laboratorium virtual ini masih belum memenuhi harapan terutama pada pembelajaran praktik.

Khusus praktik elektronika dasar, saat ini memang telah tersedia banyak *tools* yang dapat digunakan untuk membangun laboratorium virtual, dan salah satunya adalah program aplikasi PSPICE. Namun, ketersediaan modul-modul berbasis perangkat lunak tersebut untuk mendukung praktik elektronika dasar masih kurang. Atas dasar kenyataan ini, perlu dilakukan pengembangan modul-modul laboratorium virtual berbasis program aplikasi PSPICE yang dapat digunakan untuk mendukung penyelenggaraan praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual.

II. LANDASAN TEORI

A. Pengisian dan Pengosongan Kapasitor

Uraian teori ini merujuk pada konsep-konsep yang dikemukakan oleh Grob (1984: 440-461), Sutrisno (1986: 10-13) dan Smith & Dorf (1992: 110-136). Melalui mekanisme penurunan rumus, persamaan tegangan pengisian kapasitor dinyatakan dalam:

$$V_C(t) = V_i(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \text{persamaan (1)}$$

dan arus pengisian muatan kapasitor dalam:

$$i(t) = \frac{V_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (2)}$$

dengan V_i tegangan pengisi muatan, R nilai resistansi, C kapasitansi, RC konstanta waktu, t waktu dan e bilangan natural.

Untuk pengosongan kapasitor, persamaan tegangannya dinyatakan dengan,

$$V_C(t) = V_i e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (3)}$$

dan arusnya dalam,

$$i(t) = -\frac{V_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{persamaan (4)}$$

B. Rangkaian RC

Rangkaian RC yang dibahas terdiri atas integrator, diferensiator, filter *low pass* dan filter *high pass*. Teori berikut ini diturunkan dari konsep yang telah dikembangkan oleh Grob (1984: 440-461) dan Sutrisno (1986: 13-45). Melalui penurunan rumus, persamaan output integrator dapat dinyatakan dalam,

$$V_o = \frac{V_i}{RC} t + \text{konstanta} \quad \text{persamaan (5)}$$

Untuk input gelombang kotak, pada setengah periode pertama outputnya,

$$V_o = +\frac{V_m}{RC} t \quad \text{persamaan (6)}$$

untuk setengah periode pertama, dan

$$V_o = -\frac{V_m}{RC} t \quad \text{persamaan (7)}$$

untuk setengah periode kedua. Jika inputnya berbentuk sinusoidal $V_i = V_m \sin(\omega t)$, maka, outputnya adalah integral dari V_i yakni,

$$V_o = -\frac{V_m}{\omega RC} \cos(\omega t) \quad \text{persamaan (8)}$$

Persamaan yang merepresentasikan output diferensiator dapat diekspresikan dalam bentuk,

$$V_o = RC \frac{d(V_i)}{dt} \quad \text{persamaan (9)}$$

Untuk input gelombang kotak persamaan (9) menjadi,

$$V_o = RC \frac{d(V_i)}{dt} \cong 0 \quad \text{persamaan (10)}$$

dan untuk input sinusoidal $V_i = V_m \sin(\omega t)$, output diferensiator menjadi,

$$V_o = \omega RC V_m \cos(\omega t) \quad \text{persamaan (11)}$$

Rangkaian filter *low pass* memiliki watak respons amplitudo sesuai dengan persamaan,

$$A_v(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \quad \text{persamaan (12)}$$

dengan ω_c frekuensi sudut *cut-off* ($\omega_c = 2\pi f_c$), sedangkan watak respons fase diekspresikan dalam persamaan,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}\left(-\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \text{tg}^{-1}(-\omega RC) \quad \text{persamaan (13)}$$

Respons amplitudo filter *high pass* dinyatakan dalam persamaan,

$$A_v(\omega) = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}} \quad \text{persamaan (14)}$$

sedangkan respons fasenya dalam bentuk,

$$\Delta\phi(\omega) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\omega RC}\right) \quad \text{persamaan (15)}$$

C. Karakteristik Diode

Kajian teori ini disarikan dari konsep-konsep yang telah dikembangkan oleh Millman & Halkias (1972: 1-85), Smith & Dorf (1992: 328-358), dan Mottershead (2013).

Watak diode pertemuan PN pada keadaan prasikap maju dinyatakan dalam persamaan:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad \text{persamaan (16)}$$

dengan (1) I_D adalah arus diode, bernilai positif jika di dalam diode arahnya dari anode ke katode; (2) V_D tegangan diode, bernilai positif jika tegangan anode lebih tinggi (lebih positif) dibandingkan tegangan katode, dan sebaliknya; (3) I_s arus mundur jenuh yang besarnya 10^{-8} s.d. 10^{-14} A; (4) V_T tegangan kesetaraan suhu yang besarnya $V_T = \frac{T}{11.600}$ sehingga pada $T=300^\circ$ K, $V_T=26$ mV dan pada $T=273^\circ$ K, $V_T=25$ mV; (5) η merupakan koefisien emisi, nilainya antara 1 sampai dengan 2 dan untuk silikon pada arus normal nilainya mendekati 2; serta (6) e adalah bilangan natural nilainya 2,72.

Pada tegangan di bawah 0,6V arus I_D kurang dari 1% sehingga $V_D=0,6$ V disebut tegangan *ambang* (*threshold*) atau *cut-in* atau *offset* atau *break point* yang diberi lambang V_γ . Definisi letak V_γ tidak pasti karena di sekitar V_γ kurvanya berupa garis lengkung dan tidak ada titik patah. Biasanya V_γ untuk diode silikon sekitar 0,6V dan untuk diode germanium kira-kira 0,2V.

Pada catu prasikap mundur, untuk diode real terdapat tegangan mundur yang menyebabkan arus mundur berubah membesar secara drastis, yang disebut sebagai tegangan dadal (*breakdown voltage*).

D. Rangkaian Pembentuk Gelombang

Watak rangkaian pembentuk gelombang menggunakan model diode pendekatan II, ditunjukkan pada tabel berikut ini. Konsep diode Zener diambil dari [11].

Tabel 1. Watak rangkaian pembentuk gelombang

Nama Rangkaian	Prasikap Maju		Prasikap Mundur	
	V_i	Persamaan	V_i	Persamaan
Clipper Seri Negatif	+	$V_o = V_i - V_\gamma$	-	$V_o = 0$
Clipper Seri Positif	-	$V_o = V_i - V_\gamma$	+	$V_o = 0$
Clipper Paralel Negatif	-	$V_o = -V_\gamma$	+	$V_o = \frac{R_L + R}{R_L} V_i$
Clipper Paralel Positif	+	$V_o = +V_\gamma$	-	
Clipper Neg. Biased	-	$V_o = -V_b - V_\gamma$	+	$V_o = -V_2 - V_{\gamma 2}$
Clipper Pos. Biased	+	$V_o = +V_b + V_\gamma$	-	
Clipper Kombinasi	+	$V_o = V_1 + V_{\gamma 1}$	-	$V_o = V_{Z2} + V_\gamma$
Clipper Diode Zener	+	$V_o = V_{Z1} + V_\gamma$	-	$V_o = V_b$
Slicer	+	<ul style="list-style-type: none"> • Untuk $V_i \leq V_b$: $V_o = V_b$ • Untuk $V_i > V_b$: $V_o = V_i - V_\gamma$ 	-	$V_o = V_b$

E. Rangkaian Penyearah

Watak rangkaian penyearah setengah gelombang, gelombang penuh, jembatan dan penyearah dengan filter kapasitor ditunjukkan pada tabel 2 berikut ini. Untuk nilai TUF penyearah gelombang penuh diambil dari perhitungannya Lee & Chow (2007: 149).

Tabel 2. Watak rangkaian penyearah

Besaran dan Parameter Kinerja	Half Wave	Full Wave	Bridge	Filter C
Arus Rata-rata (I_{DC})	$\frac{I_m}{\pi}$	$\frac{2I_m}{\pi}$	$\frac{2I_m}{\pi}$	X
Arus RMS (I_{rms})	$\frac{I_m}{2}$	$\frac{I_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{I_m}{\sqrt{2}}$	X
Tegangan Rata-rata (V_{DC}) tanpa beban	$\frac{V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	X
Tegangan RMS (V_{rms})	$\frac{V_m}{2}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	X
Ripple Factor (r)	121%	48,2%	48,2%	$r = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L} = 1,3\%$ $C=1000\mu F, R_L=220\Omega, f=50\text{ Hz}$
Efisiensi Penyearahan (η)	40,6%	81,1%	81,1%	X
Faktor Guna Transformator (TUF)	28,7%	57,3%	57,3%	X

F. Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan

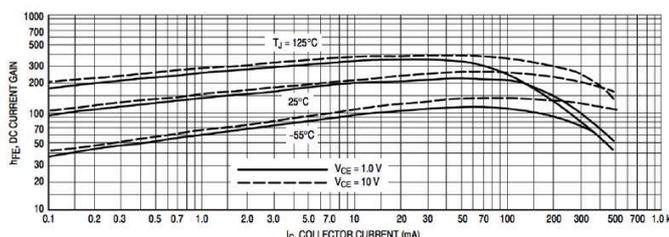
Watak rangkaian penjepit dan pengganda tegangan menggunakan model diode pendekatan II, ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 3. Watak penjepit dan pengganda tegangan

Nama Rangkaian	Prasikap Maju		Prasikap Mundur	
	V_i	Persamaan	V_i	Persamaan
Clamper Negatif	+	$V_o = V_i - V_m + V_\gamma$	-	$V_o = V_i - V_m + V_\gamma$
Clamper Positif	-	$V_o = V_i + V_m - V_\gamma$	+	$V_o = V_i + V_m - V_\gamma$
Clamper Negatif Berprasikap	+	$V_o = V_i - V_b - V_m + V_\gamma$	-	$V_o = V_i - V_b - V_m + V_\gamma$
Clamper Positif Berprasikap	-	$V_o = V_i + V_b + V_m - V_\gamma$	+	$V_o = V_i + V_b + V_m - V_\gamma$
Voltage Doubler	$V_o = 2V_m - 2V_\gamma$			
Quadrupler	$V_o = 4V_m - 4V_\gamma$			

G. Karakteristik Transistor

Berdasarkan *datasheet* yang diterbitkan oleh pabriknya, watak transistor 2N2222 ditunjukkan pada gambar 1.

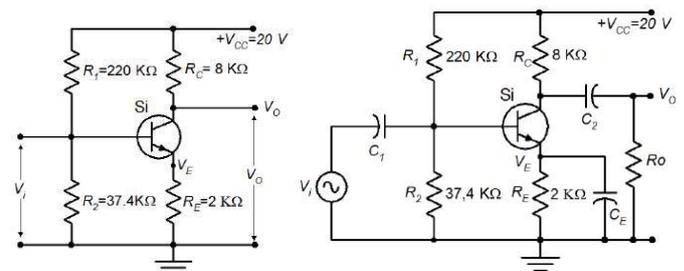


Gambar 1. Hubungan antara β (h_{FE}) dengan I_C berdasarkan *datasheet* transistor 2N2222 (On-Semiconductor, 2013: 3)

Merujuk gambar 1, untuk $V_{CE}=10\text{ V}$ dan $I_C=1\text{ mA}$, dapat diperoleh nilai *gain* arus DC sebesar $\beta=160$. Kurva karakteristik V-I input transistor merupakan fungsi eksponensial naik seperti pada karakteristik diode persamaan (16), dengan tegangan *cut-in* di sekitar nilai 0,6 V untuk transistor 2N2222. Karakteristik outputnya berupa kurva I_C versus V_{CE} dengan parameter I_B dan menurut *datasheet* dari pabriknya, untuk transistor 2N2222 pada daerah aktifnya akan memberikan *gain* arus DC sebesar 160.

H. Amplifier Common Emitter

Rangkaian amplifier *common emitter* pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Rangkaian amplifier *common emitter*: tanpa kapasitor *bypass* (kiri), dengan kapasitor *bypass* (kanan)

Perancangan rangkaian berdasarkan saran-saran dari Smith & Dorf (1992: 565), Kal (2002: 103), dan Garg, Dixit & Yadav (2008: 201-203). *Gain* tegangan untuk rangkaian amplifier tanpa kapasitor *bypass* sebesar:

$$A_V = \frac{R_C}{r_{tr} + R_E} \quad \text{persamaan (17)}$$

dengan r_{tr} adalah *transresistance* yakni resistansi internal dalam transistor untuk pertemuan basis-emitor. Pada suhu kamar, nilai $r_{tr}=26\ \Omega$ untuk $I_C = 1\text{ mA}$ (Scherz & Monk, 2013). Jika rangkaian dipasangi kapasitor *bypass*, maka *gain* tegangan naik drastis menjadi,

$$A_V = \frac{R_C}{r_{tr}} \quad \text{persamaan (18)}$$

Transresistance r_{tr} dan resistansi R_E untuk sinyal AC membentuk rangkaian filter *highpass* dengan frekuensi *cut-off* sebesar,

$$f_c = \frac{1}{2\pi r_{tr} C_E} \quad \text{persamaan (19)}$$

I. Kelayakan Laboratorium Virtual

Ma & Nickerson (2006: 3), Krivickas & Krivickas (2006: 191), dan Lustigova & Lustig (2009: 77) menyebutkan bahwa saat ini, selain laboratorium *hands-on* terdapat pula jenis laboratorium lain yakni laboratorium virtual dan *remote lab*. Jenis laboratorium yang terakhir, implementasinya memerlukan dukungan berbagai aplikasi teknologi informasi.

Laboratorium virtual memiliki kemampuan dalam mendukung tercapainya pemahaman konseptual, penumbuhan keterampilan disain dan profesional (Ma & Nickerson, 2006: 8), memiliki kelebihan cocok untuk validasi konsep, tidak ada batasan waktu dan fisik, aspek pedagogis lebih baik daripada jenis lainnya, menyediakan lingkungan yang aman untuk percobaan yang berbahaya, fleksibel dan sederhana dalam

penggunaan *software*, penguatan cukup dilakukan melalui penggunaan *software* animasi dan *virtual reality* (Elawady & Tolba, 2009: 92).

Mengutip berbagai referensi, Ma & Nickerson (2006) menyatakan bahwa pengadaan dan biaya operasi pada laboratorium *hands-on* lebih mahal dibandingkan pada laboratorium virtual karena sifatnya yang real sehingga memerlukan ruangan yang luas, bahan-bahan laboratorium dan alokasi waktu yang cukup besar bagi dosen atau instruktur (Philippatos & Moscato, 1971; Hessami & Sillitoe, 1992; Farrington, et al., 1994), mahasiswa kurang merasa nyaman bekerja di laboratorium *hands-on* (Cruickshank, 1983; Magin & Reizes, 1990; Dobson, et al., 1995), laboratorium *hands-on* tidak mampu menyediakan kebutuhan-kebutuhan khusus mahasiswa (Colwell, et al., 2002), dan tidak bisa melayani kebutuhan dalam penyelenggaraan *distance learning* (Shen, et al., 1999; Watt, et al., 2002). Atas dasar hal tersebut laboratorium virtual menjadi memiliki kelayakan yang baik untuk dipertimbangkan sebagai sarana pendukung kegiatan praktik.

J. Implementasi Laboratorium Virtual Berbasis PSPICE

Salah satu implementasi laboratorium virtual adalah dengan menggunakan simulator. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan laboratorium virtual berbasis simulator meliputi: (1) atribut, (2) ketepatan, (3) mode penyampaian, (4) strategi pembelajaran, (5) model dan komponen, (6) penyediaan tujuan belajar dan petunjuk penggunaan (Alessi & Trollip, 2001: 260).

PSPICE merupakan perangkat lunak aplikasi simulator yang menyediakan fasilitas analisis rangkaian elektronika analog maupun digital (Cadence Design Systems, 2016). Tobin (2007), menemukan bahwa tren yang mengkhawatirkan dalam pendidikan teknik adalah kurangnya waktu yang diberikan untuk mengajarkan prinsip-prinsip dasar keteknikan. Situasi seperti ini dapat menjadikan siswa tidak memperoleh pemahaman yang baik tentang praktik rekayasa dan teknik desain. PSPICE dapat membantu siswa memahami konsep dasar tentang teknik elektronika, dan mempraktikannya dengan sangat baik. Melalui penelitian tersebut, ditemukan pula bahwa dengan menggunakan PSPICE, siswa dapat menguji dan mensimulasikan masing-masing sub sistem dan juga dapat memperkirakan masalah-masalah yang timbul ketika beberapa sub sistem disambung satu dengan lainnya.

Selanjutnya, melalui penelitian tersebut ditemukan juga bahwa dalam sistem nyata siswa sering mengalami kesulitan dalam mengukur impedansi input dan output suatu rangkaian elektronik. Padahal, informasi besarnya nilai impedansi diperlukan untuk memahami efek pembebanan suatu sub sistem oleh sub sistem lainnya. Melalui penggunaan PSPICE, siswa menjadi mudah dalam mengukur impedansi input dan output rangkaian. Secara umum penelitian ini telah menemukan bahwa PSPICE dapat memberikan pengalaman berharga bagi siswa, hal yang tidak mudah diperoleh dalam praktek menggunakan laboratorium real.

Kashif & Saqib (2008) dalam penelitiannya menemukan bahwa siswa merasa puas terhadap penggunaan perangkat lunak PSPICE sebagai media praktik elektronika daya.

Simulasi menggunakan PSPICE juga dapat meningkatkan kemampuan siswa dalam mempelajari dan memahami konsep elektronika, yang ditunjukkan oleh meningkatnya terampilannya analisis dan disain.

Penelitian tentang penggunaan laboratorium virtual untuk mendukung pembelajaran praktik elektronika pernah dilakukan oleh peneliti dari *LaGuardia Community College* Amerika Serikat. Rahman (2014) menemukan bahwa meskipun percobaan hanya dilakukan dengan sampel kecil yakni 17 siswa, tetapi hasilnya telah dapat menunjukkan bahwa siswa memang memperoleh manfaat dari penggunaan Multisim sebagai perangkat lunak simulator pendukung laboratorium virtual. Penelitian tersebut menemukan pula bahwa dalam refleksi singkat di akhir proyek, siswa merasakan dapat memperoleh banyak manfaat dari penggunaan laboratorium virtual seperti dapat memverifikasi jawaban dan memperbaikinya dengan cepat, dan menggunakan Multisim untuk menyelesaikan masalah rangkaian elektronik.

Aguilar-Peña, dkk. (2016) dalam risetnya tentang pengembangan perangkat *blended learning*, menemukan bahwa dengan menggunakan PSPICE, siswa memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang sel fotovoltaik, modul atau generator. Melalui penggunaan PSPICE, kurva karakteristik sistem fotovoltaik dan parameter dasar seperti tegangan, arus, daya dan energi dapat diperoleh siswa dengan mudah untuk keperluan analisis dan representasi lebih lanjut. Penelitian ini juga mendapatkan sebuah kenyataan bahwa lingkungan simulasi berbasis aplikasi PSPICE dapat membentuk sebuah laboratorium virtual untuk praktik elektronika.

Dak, Khoje & Pardeshi (2017) dalam pengantar risetnya menyatakan bahwa laboratorium dalam pendidikan adalah tempat yang ideal bagi siswa untuk mempraktikkan konsep melalui kegiatan eksperimen. Riset tersebut telah menemukan bahwa penggunaan perangkat lunak yang berbeda-beda termasuk PSPICE dalam sebuah praktik menggunakan laboratorium virtual, dapat membantu siswa meningkatkan efektivitas dalam mempelajari konsep-konsep elektronika dan penerapannya di dunia nyata.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan prosedur pengembangan ADDIE (*analysis, design, develop, implementation, evaluation*) dalam mengarahkan proses penciptaan produk agar sesuai spesifikasi yang diharapkan.

A. Prosedur Pengembangan

1. Analisis

Pada tahap ini dilakukan identifikasi media yang diperlukan pada pembelajaran Elektronika Dasar di lingkungan program studi Teknik Elektro. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa media *hands-on* seperti modul praktik berbasis papan rangkaian *breadboard* dengan alat ukur multimeter dan osiloskop yang tersedia masih sedikit, bahkan modul-modul yang bersifat virtual masih belum tersedia. Melalui tahap ini dilakukan pula analisis dari media/modul yang telah digunakan untuk menentukan tujuan pembelajaran pada aspek kognitif, psikomotorik dan afektif. Setelah dilakukan analisis terhadap media-media yang digunakan baik sebagai pendukung

pembelajaran di kelas maupun sebagai modul praktik di laboratorium, dapat dirumuskan tujuan pembelajaran Elektronika Dasar yakni mahasiswa dapat memahami karakteristik piranti elektronika dan aplikasinya serta dapat menganalisis dan merancang rangkaian elektronika analog sederhana.

Selanjutnya dilakukan pula analisis untuk menentukan keterampilan-keterampilan teknis yang dapat diharapkan sebagai dampak penggunaan media yang akan dikembangkan. Atas dasar analisis yang telah dilakukan, keterampilan teknis yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media yang akan dibangun ini adalah mahasiswa terampil dalam: (1) menggambarkan rangkaian elektronika sederhana menggunakan simbol-simbol baku; (2) merangkai rangkaian elektronik sederhana; (3) melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik piranti elektronik; (4) melakukan eksperimen untuk menguji dan menganalisis watak rangkaian elektronik dengan berbagai parameter yang diberikan; dan (5) melakukan perancangan rangkaian elektronik sederhana serta mengujinya melalui eksperimen laboratorium.

Analisis diakhiri dengan menentukan waktu yang sesuai dari penggunaan simulator untuk media pembelajaran maupun praktik di laboratorium. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, penggunaan produk yang dikembangkan baik sebagai media pembelajaran di dalam kelas, perangkat praktik di laboratorium, maupun untuk keperluan belajar mandiri mahasiswa, memerlukan waktu 90 menit.

2. Desain

Langkah desain diawali dengan menentukan jenis media yang akan digunakan dalam hal ini perangkat lunak PSPICE. Selanjutnya dirumuskan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak pendukung yang terlibat dalam penggunaan PSPICE. Untuk mendukung proses desain, pada tahap ini dilakukan pula eksplorasi berbagai pustaka sebagai dasar untuk memilih bentuk rancangan modul praktik elektronika dasar yang sesuai. Melalui eksplorasi pustaka telah berhasil dikumpulkan rancangan rangkaian elektronik untuk pengembangan modul praktik semua topik.

3. Pengembangan

Kegiatan pada tahap ini diawali dengan menentukan jenis perangkat keras dan perangkat lunak serta basis pengembangan yang akan digunakan untuk membangun simulator. Telah disebutkan di muka bahwa pengembangan perangkat pembelajaran ini lebih banyak mempertimbangkan aspek efisiensi biaya, fleksibilitas penggunaan dan kemenarikan penggunaan, oleh sebab itu dipilih media berbentuk simulator. Melalui tahap ini, selanjutnya dilakukan penyusunan unsur-unsur media dan mengintegrasikannya ke dalam satu kesatuan modul praktik berdasar pada basis perangkat lunak yang dipilih yakni PSPICE. Pada tahap pengembangan ini dilakukan penentuan nilai-nilai dari komponen yang digunakan untuk membangun rangkaian dan sekaligus parameter simulasinya.

4. Implementasi

Kegiatan pada tahap implementasi yang terpenting adalah melakukan sosialisasi seluas-luasnya dalam berbagai bentuk tentang laboratorium virtual berbasis PSPICE yang telah

dikembangkan agar dapat digunakan oleh dosen/guru serta mahasiswa/siswa dalam mendukung proses pembelajaran elektronika dasar. Selain itu, pada fase implementasi ini pengembang/peneliti juga menyediakan bantuan dan dukungan yang diperlukan.

5. Evaluasi

Pada fase ini dilakukan evaluasi terhadap mahasiswa/siswa dan program pembelajaran yang melibatkan penggunaan laboratorium virtual berbasis PSPICE yang dikembangkan, perawatan produk dan revisi produk. Semua proses dari analisis sampai dengan evaluasi membentuk sebuah siklus yang progresif untuk menjamin tersedianya media yang semakin baik kinerjanya.

B. Uji Coba Produk

Produk yang telah dirancang disarankan Surjono (2017: 92), agar diuji melalui evaluasi formatif dengan tahap: (1) *on going evaluation* oleh pengembang/peneliti ketika proses pengembangan sedang berlangsung, untuk memastikan semua komponen dalam produk yang dibangun dapat berfungsi dengan baik; dan (2) *alpha testing* oleh para ahli serta *beta testing* oleh calon pengguna, untuk memberikan masukan-masukan perbaikan/revisi produk agar media yang diperoleh berkualitas, sedangkan evaluasi sumatif digunakan untuk mengetahui efektivitas atau dampak pembelajaran dari produk media yang dikembangkan.

Pada penelitian ini hanya dilakukan uji *on going evaluation* untuk memastikan semua rangkaian yang telah dikembangkan dapat memberikan kinerja yang baik. Ukuran atau kriteria pengujiannya menggunakan pembandingan teori yang telah disampaikan pada kajian pustaka. Kinerja rangkaian yang telah dikembangkan dapat diberikan status berkinerja baik sehingga layak digunakan sebagai komponen laboratorium virtual elektronika dasar, jika watak yang ditampilkan sama atau tidak berbeda secara signifikan dari watak teoritiknya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Produk Pengembangan

Penelitian ini menghasilkan produk perangkat pembelajaran berupa rangkaian elektronik virtual dalam bentuk *file* berformat .SCH dari SPICE untuk mendukung praktik Elektronika Dasar di lingkungan program studi Teknik Elektro, beserta panduannya.

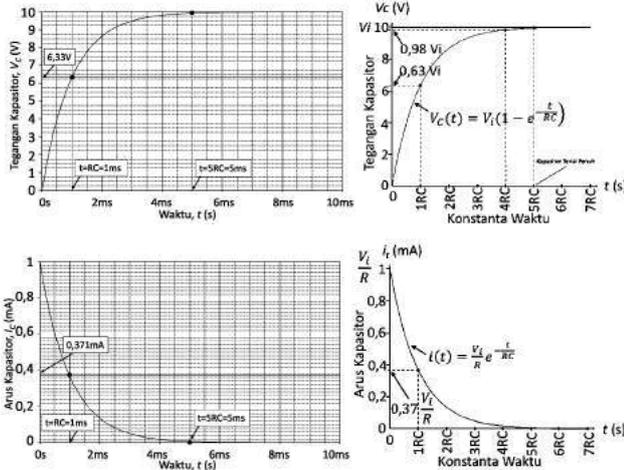
B. Kinerja Produk

Penelitian ini hanya melakukan uji produk yang bersifat *on going* dari beberapa uji yang seharusnya dilakukan. Uji *on going* ditujukan untuk memastikan semua rangkaian elektronik yang dikembangkan dapat bekerja dengan baik.

1. Uji Kinerja Rangkaian Pengisian dan Pengosongan Kapasitor

Eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan PSPICE untuk pengisian kapasitor, menghasilkan grafik output seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan gambar 3 bagian atas, terlihat bahwa untuk tegangan pengisian kapasitor, hasil eksperimen menunjukkan bentuk yang sama berupa fungsi eksponensial naik terhadap grafik yang diperoleh secara teoritik menggunakan persamaan (1). Nilai RC rangkaian yang diuji

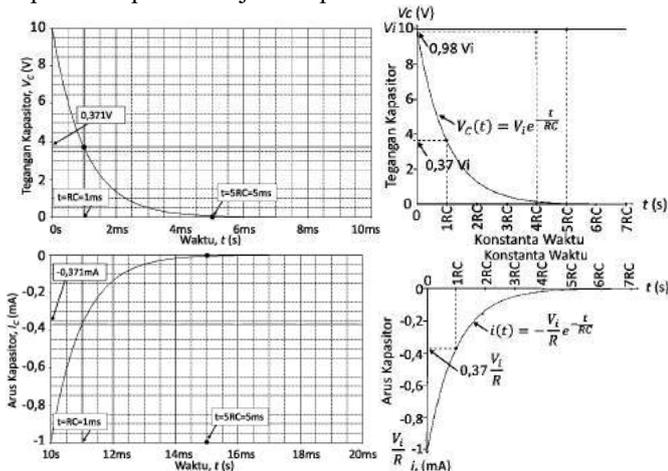
adalah 1ms, terlihat bahwa pada $t=RC=1\text{ms}$ nilai tegangan pengisian kapasitor sebesar 6,33 V dari 10V, nilai ini sesuai dengan komputasi teoritik yakni pada saat $t=RC$ nilainya sebesar 63% dari tegangan sumber pengisian kapasitor. Grafik perbandingan hasil memperlihatkan pula bahwa saat $t=5RC=5\text{ms}$, kapasitor mulai terisi penuh dan hal ini sesuai dengan model teoritik nilai tegangan pada pengisian kapasitor.



Gambar 3. Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengisian kapasitor hasil eksperimen SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)

Gambar 3 bagian bawah memperlihatkan bahwa kurva arus pengisian kapasitor yang diperoleh melalui eksperimen PSPICE bentuknya eksponensial turun, sama dengan bentuk kurva teoritiknya berdasarkan persamaan (2). Selain itu, pada saat $t=RC=1\text{ms}$, nilai arus kapasitor hasil eksperimen PSPICE sebesar 0,371mA dari 1 mA, kondisi ini sesuai dengan perhitungan teoritik yakni saat $t=RC$ arus kapasitor bernilai 37% dari arus maksimumnya. Melalui gambar 3 bagian bawah ditunjukkan pula ketika $t=5RC=5\text{ms}$, arus yang kapasitor mulai bernilai 0 yang menunjukkan kapasitor telah terisi penuh.

Eksperimen menggunakan PSPICE untuk rangkaian pengosongan kapasitor, menghasilkan kurva tegangan dan arus kapasitor seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan kurva tegangan (atas) dan arus (bawah) pengosongan kapasitor hasil eksperimen laboratorium virtual SPICE (kiri) dan teoritik (kanan)

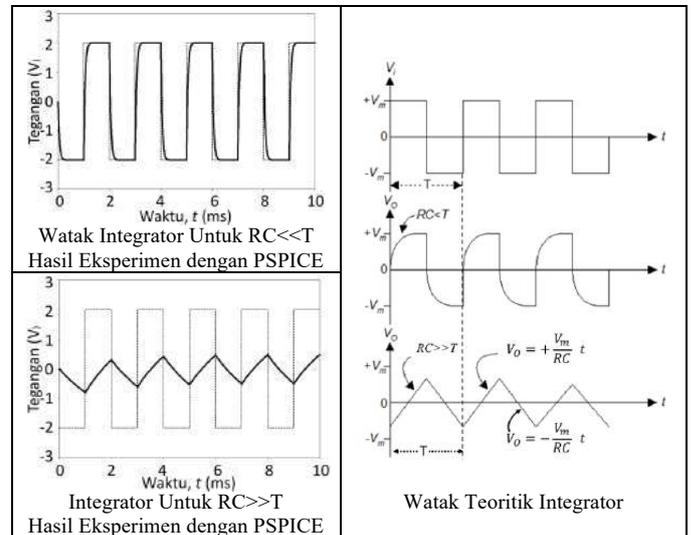
Gambar 4 kiri-atas menunjukkan bahwa kurva tegangan pengosongan kapasitor hasil eksperimen PSPICE merupakan fungsi eksponensial turun sesuai dengan watak teoritiknya seperti pada gambar kanan-atas yang diperoleh dari persamaan (3). Saat $t=RC=1\text{ms}$ nampak tegangan kapasitor menjadi 0,371 V dari 10V, hal ini menunjukkan watak yang sama dengan watak teoritiknya yakni tegangan menjadi sebesar 0,37 V_i atau 37% dari tegangan kondisi awal.

Watak arus pengosongan juga menunjukkan keadaan yang sama antara hasil eksperimen PSPICE dengan watak teoritiknya (persamaan 4) yakni keduanya merupakan fungsi eksponensial naik. Selain itu, pada kurva arus pengosongan kapasitor, terlihat bahwa ketika $t=RC=1\text{ms}$ arusnya bernilai -0,371mA dari -1mA, hal ini menunjukkan watak yang sama dengan watak teoritiknya yakni bernilai 37% arus maksimumnya. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa untuk watak tegangan dan arus hasil eksperimen dengan PSPICE, saat $t=5RC=5\text{ms}$ tegangan mulai benar-benar kosong dan arus mulai menuju nilai nol, suatu keadaan yang juga terjadi pada watak teoritik dari tegangan dan arus pengosongan kapasitor.

Atas dasar perbandingan hasil eksperimen menggunakan PSPICE dan watak teoritiknya, yang menunjukkan karakteristik yang sama untuk keduanya, maka dapat dinyatakan bahwa rangkaian pengisian dan pengosongan kapasitor yang dikembangkan melalui penelitian ini, layak digunakan sebagai modul pendukung laboratorium virtual untuk praktik elektronika dasar.

2. Uji Kinerja Rangkaian RC

Gambar 5 berikut ini menyajikan watak integrator yang diberi input tegangan berbentuk kotak hasil eksperimen dengan PSPICE dan hasil komputasi teoritik.

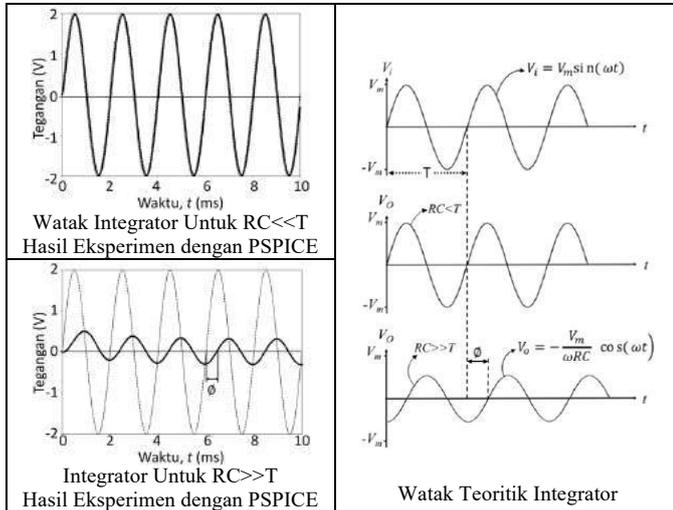


Gambar 5. Watak integrator dengan input gelombang kotak (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)

Terlihat pada gambar 5 (kiri bawah) untuk kondisi $RC \gg T$, hasil eksperimen dengan PSPICE menunjukkan gelombang kotak yang dimasukkan ke integrator diubah menjadi gelombang segitiga, dan untuk kondisi $RC \ll T$ diubah menjadi gelombang kotak cacat (gambar kiri atas). Hasil ini sesuai

dengan watak teoritik integrator pada gambar 5 sebelah kanan yang diperoleh dari persamaan (5), (6) dan (7). Gelombang kotak cacat (gambar kiri atas) hasil eksperimen PSPICE, bentuknya sama dengan watak teoritik pada gambar kanan tengah, demikian pula gelombang segitiga di kiri bawah sama dengan bentuk teoritiknya pada gambar kanan bawah.

Sementara itu, untuk masukan gelombang sinus, eksperimen dengan PSPICE menghasilkan watak integrator seperti ditunjukkan pada gambar 6.

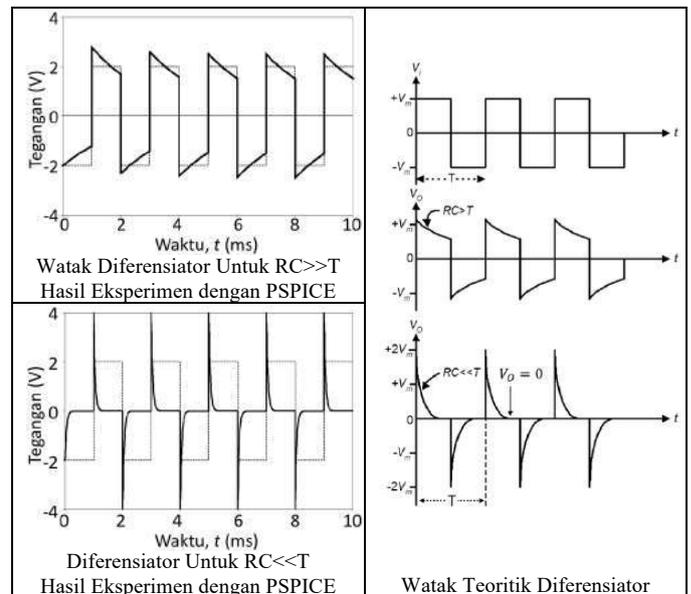


Gambar 6. Watak integrator dengan masukan gelombang sinus (garis tebal: tegangan output; garis tipis: tegangan input)

Pada gambar 6 (kiri bawah) ditunjukkan watak integrator hasil eksperimen dengan PSPICE jika diberi input berbentuk sinus, untuk $RC \gg T$ outputnya akan terlambat sebesar 90° terhadap fase tegangan inputnya, namun jika $RC \ll T$ seperti pada gambar kiri atas, fase tegangan output hampir sama dengan fase inputnya. Keadaan seperti ini diberikan pula oleh watak teoritik integrator seperti ditunjukkan oleh gambar kanan bawah untuk $RC \gg T$ dan kanan tengah untuk $RC \ll T$ yang dihasilkan dari persamaan (8).

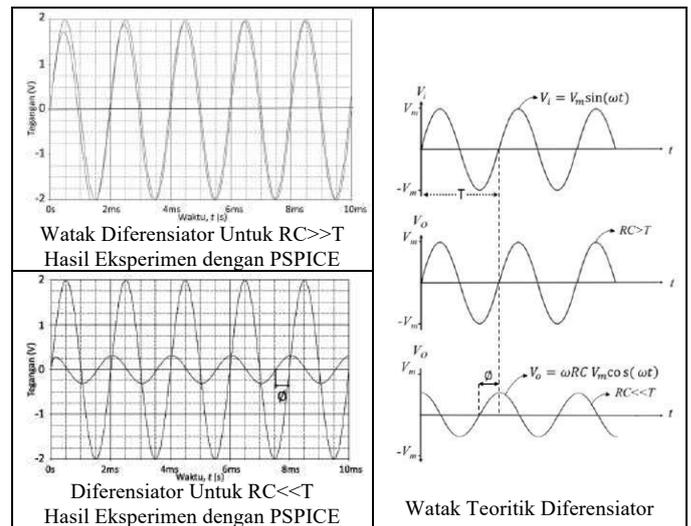
Memperhatikan kesesuaian yang tinggi antara watak integrator hasil eksperimen dengan PSPICE dan watak teoritiknya dengan input gelombang kotak maupun sinus, untuk $RC \gg T$ maupun $RC \ll T$, dapat dinyatakan bahwa rangkaian integrator hasil pengembangan pada penelitian ini layak digunakan sebagai modul pendukung laboratorium virtual untuk praktik elektronika.

Selanjutnya, perbandingan watak rangkaian diferensiator hasil eksperimen dengan PSPICE ditunjukkan pada gambar 7. Hasil eksperimen dengan PSPICE pada gambar 7 memperlihatkan bahwa untuk $RC \ll T$ watak diferensiator mengubah gelombang kotak menjadi pulsa diferensiasi dengan ketinggian dua kali tegangan inputnya, sementara untuk keadaan $RC \gg T$, output diferensiator berupa gelombang kotak cacat. Watak ini terlihat sesuai atau sama dengan watak secara teoritik yang diperoleh dari persamaan (9) dan (10) yang ditunjukkan pada gambar 7 kanan bawah untuk $RC \ll T$ dan kanan tengah untuk $RC \gg T$.



Gambar 7. Watak diferensiator dengan input gelombang kotak

Watak rangkaian diferensiator untuk input berupa gelombang sinus hasil eksperimen dengan PSPICE ditunjukkan pada gambar 8.



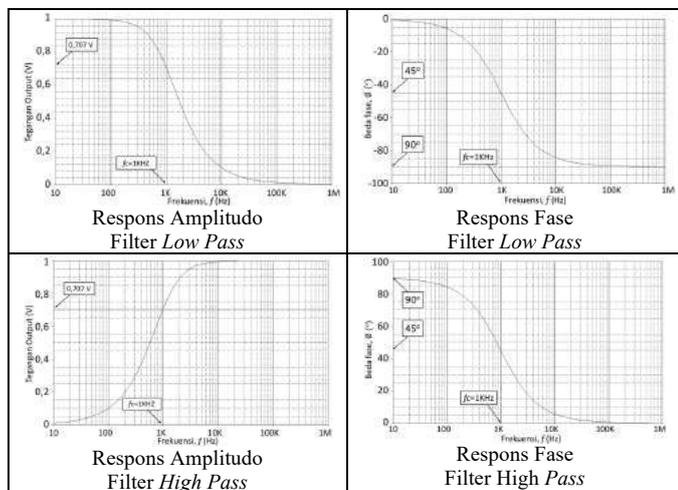
Gambar 8. Watak diferensiator dengan input gelombang sinus

Gambar 8 (kiri bawah) menunjukkan watak diferensiator yang diperoleh melalui eksperimen PSPICE untuk input gelombang sinus ketika $RC \ll T$, yakni tegangan outputnya mendahului 90° terhadap fase tegangan inputnya, sementara jika $RC \gg T$ (gambar kiri atas) fase tegangan output hampir sama dengan fase tegangan inputnya. Hal ini mengindikasikan rangkaian diferensiator telah bekerja dengan baik, memberikan penampilan watak yang sesuai dengan watak teorinya yang diperoleh dari persamaan (11), seperti ditunjukkan pada gambar kanan bawah untuk $RC \ll T$ dan gambar kanan tengah untuk kondisi $RC \gg T$.

Berdasarkan perbandingan antara watak hasil eksperimen dengan PSPICE dan watak teoritik, yang menunjukkan bahwa

keduanya memberikan tingkat kesamaan yang tinggi, maka dapat dinyatakan bahwa rangkaian diferensiator hasil pengembangan layak digunakan sebagai modul praktik pendukung laboratorium virtual elektronika dasar.

Hasil eksperimen dengan PSPICE untuk watak filter *low pass* dan filter *high pass* ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Respons frekuensi filter *low pass* dan filter *high pass* hasil eksperimen dengan PSPICE

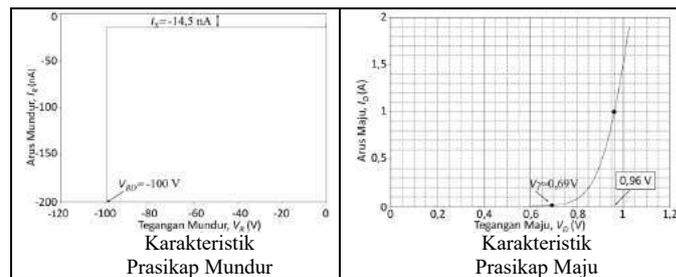
Berdasarkan respons amplitudo filter *low pass* yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE, pada frekuensi *cut-off* yakni sebesar 1KHz, terlihat tegangan output rangkaian bernilai 0,707 V dari 1 V (gambar kiri atas). Sementara itu dari respons fase terlihat beda fase tegangan output terhadap inputnya pada frekuensi yang sangat rendah sebesar 0°, pada frekuensi *cut-off* sebesar -45°, dan pada frekuensi yang sangat tinggi, beda fasenya sebesar -90° (gambar kanan atas). Kondisi ini menunjukkan keadaan yang sama dengan watak teoritik filter *low pass* seperti persamaan (12) dan (13). Eksperimen menggunakan PSPICE memperlihatkan bahwa rangkaian filter *low pass* yang dirancang telah dapat bekerja dengan baik, watak yang diperoleh sama dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai perangkat percobaan praktik dasar elektronika.

Filter *high pass* juga menunjukkan kinerja yang baik, hal itu ditunjukkan oleh nilai tegangan output yang dihasilkan rangkaian pada frekuensi *cut-off* yakni sebesar 0,707 V, nilai yang sama dengan nilai yang diberikan oleh watak teoritiknya. Berdasarkan respons fase terlihat pada frekuensi yang sangat rendah rangkaian memberikan beda fase sebesar 90°, pada frekuensi *cut-off* sebesar 45° dan pada frekuensi tinggi beda fasenya sebesar 0°. Hasil eksperimen ini telah menggambarkan bahwa rangkaian filter *high pass* yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kinerja yang sangat baik, wataknya sesuai dengan watak teoritiknya yang diperoleh dari persamaan (14) dan (15), sehingga dapat digunakan sebagai media praktik laboratorium virtual elektronika dasar.

3. Uji Kinerja Rangkaian Karakteristik Diode

Rangkaian karakterisasi diode terdiri atas karakteristik prasikap maju dan prasikap mundur. Hasil eksperimen

karakterisasi untuk kedua rangkaian rangkaian tersebut menggunakan PSPICE ditunjukkan pada gambar 82.



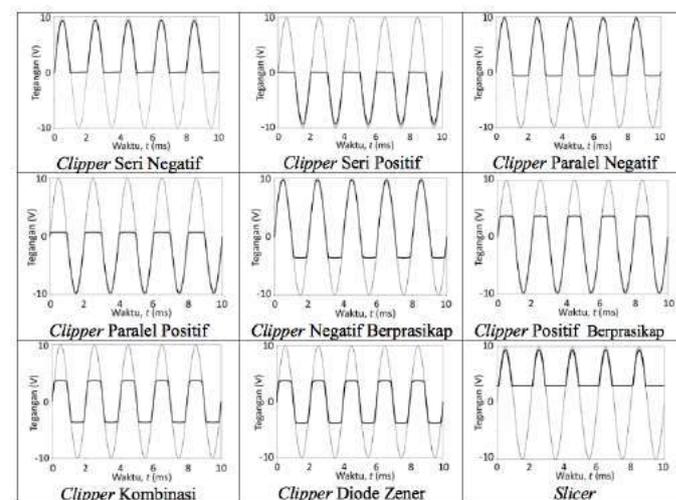
Gambar 10. Hasil pengukuran karakteristik diode 1N4002 menggunakan PSPICE

Secara umum kurva karakteristik diode 1N4002 yang diperoleh menunjukkan kemiripan dengan kurva teoritiknya yang diperoleh dari persamaan (16). Pada daerah prasikap maju, arus diode berupa fungsi eksponensial naik terhadap tegangannya dengan $V_F=0,69V$ hampir sama dengan nilai teoritiknya yang berkisar antara 0,6 sampai dengan 0,7 volt untuk diode silikon. Pada daerah prasikap mundur, arusnya sangat kecil hingga mencapai tegangan dadal tertentu sebesar -100V sesuai *datasheet*. Melalui kurva prasikap maju ditemukan pula nilai tegangan maju sebesar 0,96 V untuk arus maju sebesar 1A, nilai ini hampir sama besarnya dengan nilai tersebut menurut *datasheet* yakni pada arus maju 1 A untuk suhu 25°C, tegangan maju diode 1N4002 sebesar 0,93 sampai dengan 1,1V.

Hasil eksperimen karakterisasi diode 1N4002 menggunakan PSPICE untuk kedua rangkaian prasikap tersebut telah menghasilkan kurva dan parameter yang sama dengan karakteristik teoritiknya maupun watak yang ditetapkan oleh pabriknya, sehingga dapat dikatakan rangkaian hasil pengembangan layak digunakan sebagai perangkat praktik laboratorium virtual elektronika dasar.

4. Uji Kinerja Rangkaian Pembentuk Gelombang

Eksperimen menggunakan PSPICE untuk kinerja rangkaian pembentuk gelombang menghasilkan watak rangkaian seperti ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 11. Watak rangkaian pembentuk gelombang

Berdasarkan gambar 11, terlihat bahwa karakteristik semua rangkaian pembentuk gelombang yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE sama dengan karakteristik teoritiknya yang di peroleh melalui persamaan pada tabel 1. Hal ini mengindikasikan bahwa rangkaian pembentuk gelombang menggunakan PSPICE dapat digunakan secara layak sebagai media praktik elektronika dasar.

5. Uji Kinerja Rangkaian Rangkaian Penyearah

Hasil eksperimen dengan PSPICE untuk penyearah setengah gelombang disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah setengah gelombang dengan beban ringan untuk $I_m=9,665 \mu A$ dan $V_m=9,665 V$

Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	3,04 μA	3,08 μA	1,3%
Arus RMS (I_{rms})	4,80 μA	4,83 μA	0,6%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	3,04 V	3,08 V	1,3%
Tegangan RMS (V_{rms})	4,80 V	4,83 V	0,6%
Ripple Factor (r)	122%	121%	0,8%
Efisiensi Penyearahan (η)	40,1%	40,6%	1,2%
Faktor Guna Transformator (TUF)	28,3%	28,7%	1,4%

Memperhatikan tabel 4, dapat dikemukakan bahwa penyearah setengah gelombang dengan beban ringan hasil eksperimen dapat menampilkan arus dan tegangan serta parameter kinerja yang sesuai atau sama dengan watak teoritiknya yang diperoleh melalui persamaan pada tabel 2. Persentase perbedaan semua besaran dan parameter yang digunakan sebagai pembanding nilainya di bawah 5%, suatu kondisi yang menggambarkan bahwa watak rangkaian dengan PSPICE sama dengan watak hasil komputasi teoritik. Untuk operasi beban penuh, nilai tegangan maksimum beban penuh hasil eksperimen PSPICE sebesar 9,05 V sesuai dengan perhitungan teoritik sebesar 9,09 V atau berbeda hanya 0,4%.

Hasil eksperimen PSPICE untuk penyearah gelombang penuh disajikan pada tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah gelombang penuh dengan beban ringan untuk $I_m=9,665 \mu A$ dan $V_m=9,665 V$

Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	6,07 μA	6,16 μA	1,4%
Arus RMS (I_{rms})	6,79 μA	6,83 μA	0,6%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	6,07 V	6,16 V	1,4%
Tegangan RMS (V_{rms})	6,79 V	6,83 V	0,6%
Ripple Factor (r)	50,1%	48,2%	4%
Efisiensi Penyearahan (η)	79,9%	81,1%	1,5%
Faktor Guna Transformator (TUF)	56,6%	57,3%	1,2%

Berdasarkan tabel 5 terlihat bahwa nilai tegangan, arus dan parameter kinerja rangkaian yang diperoleh melalui eksperimen

menggunakan PSPICE hampir sama dengan nilai-nilai tersebut yang diperoleh melalui komputasi teoritik, dengan persentase perbedaan kurang dari 5%. Untuk operasi beban penuh, penyearah gelombang penuh juga memberikan nilai tegangan output yang sama dengan perhitungan teoritiknya, keduanya berbeda sangat kecil hanya 0,4% saja.

Tabel 6 berikut ini menyajikan hasil eksperimen PSPICE untuk penyearah jembatan.

Tabel 6. Besaran-besaran fisik dan parameter kinerja penyearah jembatan dengan beban ringan ($R_L=10 M\Omega$) untuk $I_m=0,9565 \mu A$ dan $V_m=9,565 V$

Besaran dan Parameter Kinerja	Pengukuran PSPICE	Komputasi Teoritik	% Perbedaan
Arus Rata-rata (I_{DC})	0,60 μA	0,61 μA	1,6%
Arus RMS (I_{rms})	0,67 μA	0,68 μA	1,5%
Tegangan Rata-rata (V_{DC})	6,0 V	6,1 V	1,6%
Tegangan RMS (V_{rms})	6,71 V	6,80 V	1,5%
Ripple Factor (r)	49,7%	48,2%	3,1%
Efisiensi Penyearahan (η)	80,2%	81,1%	1,1%
Faktor Guna Transformator (TUF)	80,0%	81,1%	1,4%

Tabel 6 telah menunjukkan bahwa nilai tegangan, arus dan parameter kinerja penyearah jembatan yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE sama dengan nilai hasil perhitungan teoritik, persentase perbedaannya kurang dari 5%. Untuk penggunaan beban penuh, penyearah ini juga memberikan kinerja yang baik, tegangan outputnya hanya berbeda 2,8% saja terhadap tegangan output hasil komputasi teoritik.

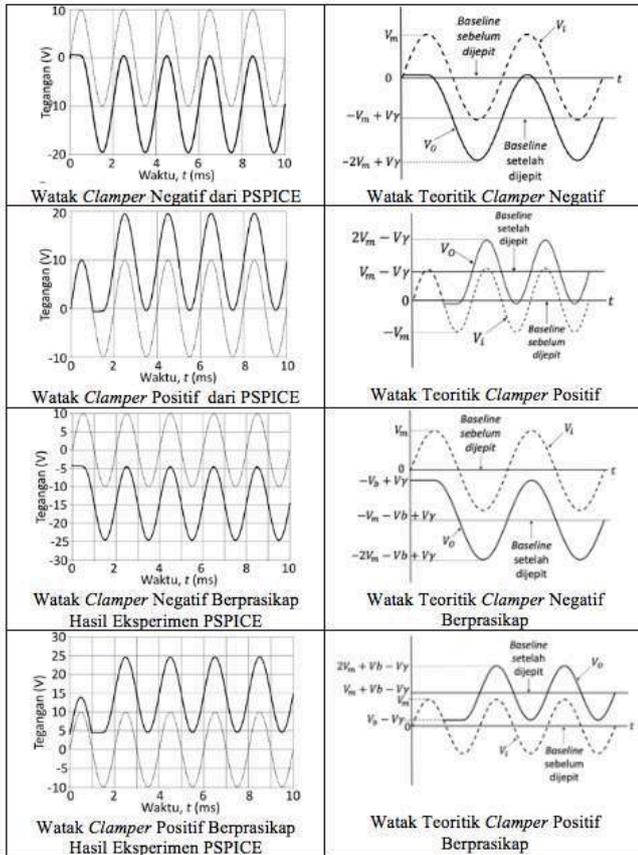
Untuk eksperimen penyearah dengan filter, rangkaian yang diuji memiliki nilai komponen $C=1000\mu F$, $R_L=220 \Omega$, dan $f=50Hz$, sehingga berdasarkan persamaan pada tabel 2, dapat dihitung ripple factor teoritiknya yakni sebesar 1,3%. Berdasarkan eksperimen ditemukan nilai $V_{r,rms}=0,1074 V$, dan $V_{DC}=8,9839 V$, sehingga nilai ripple factor hasil pengukuran adalah $r = \frac{V_{r,rms}}{V_{DC}} = \frac{0,1074}{8,9839} = 0,012 = 1,2\%$. Terlihat bahwa nilai ripple factor hasil eksperimen menggunakan PSPICE hampir sama dengan nilai hasil perhitungan teoritiknya.

Memperhatikan perbandingan hasil eksperimen terhadap watak teoritiknya, dapat disimpulkan bahwa rangkaian penyearah dalam format PSPICE mencakup jenis setengah gelombang, gelombang penuh, jembatan dan dengan filter kapasitor pada penelitian ini, sangat layak digunakan sebagai media untuk praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual PSPICE.

6. Uji Kinerja Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan

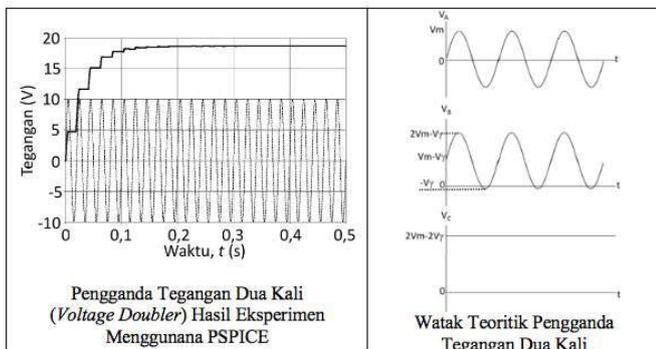
Hasil eksperimen menggunakan PSPICE untuk rangkaian penjepit ditunjukkan pada gambar 12. Merujuk gambar tersebut, terlihat bahwa semua rangkaian clamper yang diuji menunjukkan kurva watak yang sama terhadap watak teoritiknya. Pada clamper negatif, keduanya (eksperimen dan teoritik) sama-sama menunjukkan tegangan yang dijepit menempati baseline baru pada level di sekitar $-V_m$, demikian pula pada clamper positif, menempati level dekat dengan $+V_m$. Kondisi sama juga terlihat pada clamper berprinsip, baik positif maupun negatif, yang memberikan tampilan watak sama dengan watak teoritiknya, ditunjukkan oleh baseline baru hasil penjepitan menempati di sekitar nilai $-V_m -V_b$ untuk clamper

negatif berprasikap dan di sekitar $+V_m + V_b$ untuk *clamper* positif berprasikap. Mengacu pada hasil analisis tersebut, dapat dinyatakan bahwa semua rangkaian *clamper* yang diuji pada penelitian ini memberikan kinerja yang sangat baik dan wataknya sesuai atau sama dengan watak teoritiknya (persamaan-persamaan pada tabel 3), sehingga dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.



Gambar 12. Watak rangkaian penjepit hasil eksperimen menggunakan PSPICE dan hasil komputasi teoritik

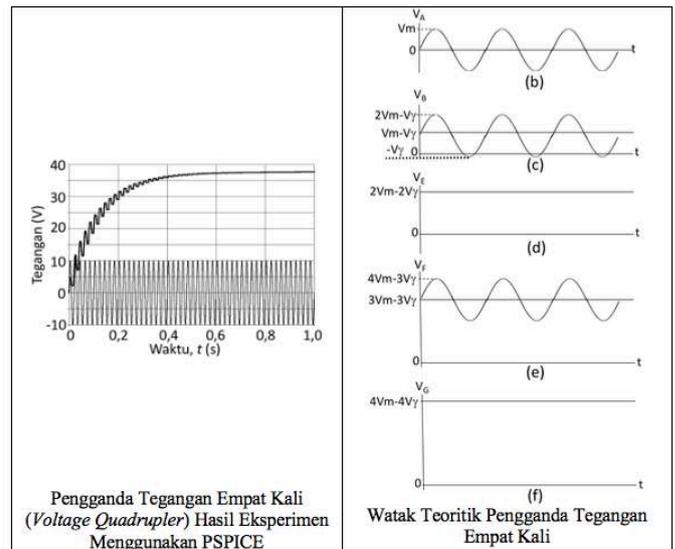
Hasil eksperimen dengan PSPICE untuk karakterisasi rangkaian pengganda tegangan dua kali ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 13. Watak pengganda tegangan dua kali

Pada gambar 13 (kiri) ditunjukkan setelah melalui keadaan transien, kira-kira $t > 0,2s$, rangkaian pengganda tegangan memberikan output tegangan searah hampir dua kali tegangan maksimum inputnya. Tegangan yang digandakan sedikit kurang dari $2V_m$. Drop tegangan sebesar kira-kira $2V_\gamma$ yang terjadi diakibatkan tegangan mengalami penjepitan oleh diode D1 dan penyearahan oleh D2, masing-masing diode memberikan pengurangan sebesar V_γ . Berdasarkan hasil analisis ini, terlihat bahwa rangkaian pengganda tegangan dua kali memberikan kinerja yang sangat baik dan wataknya sama dengan watak teoritiknya, sehingga sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar berbasis PSPICE.

Gambar 14 berikut ini menyajikan hasil karakterisasi rangkaian pengganda tegangan empat kali (*quadrupler*) menggunakan PSPICE.



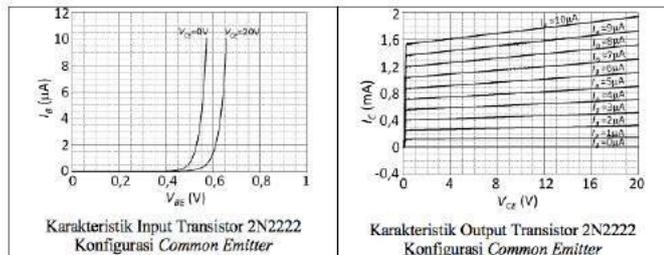
Gambar 14. Watak pengganda tegangan empat kali

Setelah melalui waktu transien, kira-kira $t > 0,8 s$, rangkaian pengganda tegangan memberikan output berupa tegangan searah yang nilainya hampir empat kali tegangan maksimum inputnya. Pada *quadrupler* ini tegangan outputnya mengalami penurunan hampir $4V_\gamma$ dari keadaan ideal $4V_m$ yang diakibatkan tegangan input yang digandakan mengalami penjepitan dua kali oleh diode D1 dan D3 (menurunkan tegangan $-2V_\gamma$) dan penyearahan oleh diode D2 dan D4 (menurunkan tegangan $-2V_\gamma$ lagi), sehingga untuk keseluruhan operasi penggandaan tegangan empat kali, output rangkaian turun sebesar $4V_\gamma$. Berdasarkan analisis ini nampak bahwa rangkaian pengganda tegangan empat kali telah dapat bekerja dengan sangat baik dan watak yang dihasilkan melalui eksperimen sama dengan watak teoritiknya, sehingga dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan PSPICE.

7. Uji Kinerja Rangkaian Karakterisasi Transistor

Hasil karakterisasi transistor 2N2222 menggunakan PSPICE ditunjukkan pada gambar 15 berikut ini. Secara visual, gambar 15 menunjukkan bahwa karakteristik transistor *common emitter* yang diperoleh secara eksperimen dengan PSPICE sama dengan karakteristik teoritiknya. Berdasarkan *datasheet* yang diterbitkan oleh pabriknya, seperti disajikan pada gambar 1 di

muka, transistor 2N2222 akan memberikan *gain* DC sebesar $\beta=160$ untuk $V_{CE}=10$ V dan $I_C=1$ mA. Jika karakteristik output transistor 2N2222 hasil eksperimen PSPICE diperhatikan, terlihat di sana bahwa penarikan garis dari $V_{CE}=10$ V dan $I_C=1$ mA akan memotong keduanya di titik yang terletak pada kurva $I_B=6 \mu\text{A}$, sehingga menghasilkan nilai $\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1\text{mA}}{6 \mu\text{A}} = 167$. Nilai *gain* arus DC yang dihasilkan ini dapat dikatakan sama dengan nilai menurut *datasheet*, sehingga parameter karakteristik transistor yang diperoleh nilainya sesuai dengan parameter teoritiknya.



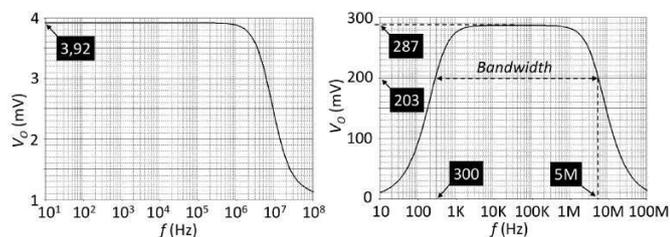
Gambar 15. Karakteristik transistor 2N2222 hasil eksperimen dengan PSPICE

Karakteristik input transistor yang diperoleh juga menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik teoritiknya. Kurvanya membentuk fungsi eksponensial naik seperti kurva watak diode, karena pertemuan basis-emitor memiliki sifat seperti diode. Pemasangan tegangan V_{CE} yang semakin tinggi telah memberikan tampilan kurva bergeser ke kanan, sesuai dengan hasil komputasi teoritik. Melalui kurva watak input juga terlihat bahwa tegangan *cut-in* yang muncul besarnya di sekitar nilai tegangan *cut-in* diode pertemuan pn seperti watak teoritiknya.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat dinyatakan bahwa disain rangkaian untuk karakterisasi diode yang diuji pada penelitian ini telah dapat menunjukkan kinerja yang sangat baik. Kurva karakteristik input dan output transistor yang diperoleh melalui eksperimen dengan PSPICE menunjukkan hasil yang valid sehingga rangkaiannya dapat digunakan sebagai media praktik elektronika dasar.

8. Uji Kinerja Rangkaian Amplifier *Common Emitter*

Melalui eksperimen dengan PSPICE, dapat dihasilkan respons amplitudo dari rangkaian amplifier yang diuji seperti pada gambar 16.



Gambar 16. Respons amplitudo amplifier *common emitter* untuk $V_i=1\text{mV}$: (a) tanpa kapasitor *bypass* (kiri); (b) dilengkapi kapasitor *bypass* (kanan)

Merujuk respons amplitudo pada gambar 16 kiri, terlihat bahwa amplifier tanpa kapasitor *bypass* memberikan *gain* tegangan AC sebesar $A_v=3,92$. Secara teoritik, dengan $r_{tr}=26 \Omega$, berdasarkan persamaan (17) nilai *gain* tegangan,

$$A_v = \frac{R_C}{r_{tr}+R_E} = \frac{8 \times 10^3}{26+2 \times 10^3} = 3,9$$

Memperhatikan *gain* tegangan hasil eksperimen dengan PSPICE dan *gain* tegangan hasil komputasi teoritik yang menunjukkan nilai hampir sama, dapat dinyatakan bahwa rancangan amplifier *common emitter* yang diuji telah memberikan kinerja yang baik, dapat memberikan *gain* tegangan sesuai rancangan.

Berdasarkan respons amplitudo pada gambar 16 kanan, nampak *gain* tegangan melonjak sangat tinggi hingga mencapai $A_v=287$, setelah rangkaian dipasang kapasitor *bypass*. Secara teoritik, jika rangkaian dipasang kapasitor *bypass*, pada frekuensi tinggi resistor R_E yang dipasang secara paralel terhadap kapasitor seperti terhubung singkat, sehingga sesuai persamaan (18) *gain* tegangan menjadi,

$$A_v = \frac{R_C}{r_{tr}} = \frac{8 \times 10^3}{26} = 307,7$$

Terlihat bahwa nilai *gain* tegangan hasil eksperimen hampir mendekati nilai perhitungan teoritiknya dengan persentase perbedaan 6,7%. Sedikit perbedaan yang muncul dapat disebabkan nilai r_{tr} diasumsikan konstan, sedangkan dalam kenyataannya nilainya berubah terhadap suhu. Melalui uji ini juga ditentukan *gain* efektif yang besarnya 0,707 dari *gain* maksimum yakni bernilai $A_v=203$ yang bersesuaian dengan frekuensi *cut-in* $f_c=300$ Hz, nilai ini sama dengan perhitungan teoritik saat amplifier ini dirancang (berdasarkan persamaan 19). Merujuk respons amplitudo pada gambar 16 kanan, terlihat daerah kerja (*bandwidth*) rangkaian sangat lebar yakni antara 300 Hz sampai dengan 5 MHz sesuai dengan *datasheet* transistor 2N2222.

Atas dasar pembahasan yang telah dilakukan, dapat dikemukakan bahwa rangkaian amplifier yang dirancang telah dapat memberikan tampilan kinerja yang sangat baik. Karakteristik yang diperoleh mencerminkan kesesuaian yang tinggi terhadap watak teoritiknya, sehingga produk rangkaian ini dapat digunakan sebagai media yang valid untuk praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE.

V. KESIMPULAN

Telah dapat dihasilkan sebuah produk perangkat pembelajaran berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual. Perangkat pembelajaran yang dihasilkan menyediakan modul praktik untuk topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan, Karakteristik Transistor, Rangkaian Penguat Transistor. Setiap topik dilengkapi dengan panduan praktik dan panduan pengoperasian PSPICE.

Semua rangkaian elektronika yang dikembangkan sebagai produk perangkat pembelajaran pada penelitian ini telah dapat bekerja dengan baik, dan karakteristik yang ditampilkan memberikan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap karakteristik teoritiknya, sehingga setiap rangkaian sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual yang diimplementasikan dengan perangkat lunak PSPICE.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. V. Prakash, "Semiconductor as a device," *National Programme on Technology Enhanced Learning*, 2013. [Online]. Available: <https://nptel.ac.in/courses/115102025/16>.
- [2] F. Colace, M. De Santo, and A. Pietrosanto, "Work in progress-virtual lab for electronic engineering curricula," *34th Annu. Front. Educ. 2004. FIE 2004.*, pp. 22–24, 2004.
- [3] K. F. Saleh, A. M. Mohamed, and H. Madkour, "Developing virtual laboratories environments for engineering education," *Int. J. Arts Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–17, 2009.
- [4] C. Bailey and M. J. Freeman, "A java bread-board simulator: Digital circuit simulation with an open-source toolset," *IADIS Int. J. Comput. Sci. Inf. Syst.*, vol. 55, no. 1, pp. 13–25, 2010.
- [5] Muchlas, "Developing a teaching model using an online collaboration approach for a digital technique practical work," *Turkish Online J. Educ. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 63–69, 2015.
- [6] B. Grob, *Basic Electronics*, Fifth Edit. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [7] Sutrisno, *Elektronika 1 Teori dan Penerapannya*. Bandung: Penerbit ITB, 1986.
- [8] R. J. Smith and R. C. Dorf, *Circuits, Devices and Systems: A First Course in Electrical Engineering*, Fifth Edit. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [9] J. Millman and C. C. Halkias, *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*, Internatio. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1972.
- [10] A. Mottershead, *Electronic Devices & Circuits an Introduction*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2013.
- [11] P. Agarwal, "Zener Diode," *National Programme on Technology Enhanced Learning*, 2009. [Online]. Available: <https://nptel.ac.in/courses/117107095/8>.
- [12] Y. S. Lee and M. H. L. Chow, "Diode Rectifiers," in *Power Electronics Handbook*, 2nd Editio., M. H. Rashid, Ed. San Diego: Elsevier, Inc., 2007, pp. 145–178.
- [13] On-Semiconductor, "Amplifier Transistors NPN Silicon," *P2N2222A/D*, Denver, Colorado, pp. 1–6, Jan-2013.
- [14] S. Kal, *Basic Electronics: Devices, Circuits and IT Fundamentals*. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2002.
- [15] R. K. Garg, A. Dixit, and P. Yadav, *Basic Electronics*. New Delhi: Laxmi Publications (P) Ltd., 2008.
- [16] P. Scherz and S. Monk, *Practical Electronics for Inventors*, Third Edit. New York: The McGraw-Hill, Companies, 2013.
- [17] J. Ma and J. V. Nickerson, "Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review," *ACM Comput. Surv.*, vol. 38, no. 3, p. 1–24., 2006.
- [18] R. V. Krivickas and J. Krivickas, "Laboratory instruction in engineering education," *Glob. J. Eng. Education*, vol. 11, no. 2, p. 191–196., 2006.
- [19] Z. Lustigova and F. Lustig, "A new virtual and remote experimental and environment for teaching and learning science," in *Education and Technology for a Better World, 9th IFIP TC 3 World Conference on Computers in Education*, A. Tatnal and A. Jones, Eds. New York: Springe, 2009, pp. 75–82.
- [20] Y. H. Elawady and A. S. Tolba, "Educational objectives of different laboratory types: a comparative study," *Int. J. Comput. Sci. Inf. Secur.*, vol. 6, no. 2, pp. 89–96, 2009.
- [21] S. M. Alessi and S. R. Trollip, *Multimedia for learning: Methods and development*. Boston: Allyn and Bacon, 2001.
- [22] I. Cadence Design Systems, *PSPICE User Guide*, Product Re. San Jose, CA: Cadence Design Systems, Inc., 2016.
- [23] P. Tobin, "The role of PSpice in the engineering teaching environment," in *International Conference on Engineering Education – ICEE 2007*, 2007.
- [24] S. A. R. Kashif and M. A. Saqib, "The use of Simulink and PSpice as educational tools in the teaching of power electronics," *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–61, Jan. 2008.
- [25] M. Z. Rahman, "Teaching electrical circuits using a virtual lab," *Transit LaGuardia J. Teach. Learn.*, no. 6, pp. 85–92, 2014.
- [26] J. D. Aguilar-Peña, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, and J. I. Fernández-Carrasco, "Blended learning for photovoltaic systems: Virtual laboratory with PSPICE," in *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAAE)*, 2016, pp. 1–6.
- [27] R. Dak, S. Khoje, and P. J. Pardeshi, "A review on cost-efficient virtual laboratory: A teaching aid," in *2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2017, pp. 663–667.
- [28] H. D. Sutjono, *Multimedia Pembelajaran Interaktif Konsep dan Pengembangan*, Edisi Pert. Yogyakarta: UNY Press, 2017.



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

Jl. Gondosuli No. 1B Semaki Yogyakarta, Telp. 0274-542886, 0274-583515 ext. 1502, 1503 Fax. 0274-542886, Website : lppm.uad.ac.id, email : lppm@uad.ac.id

SURAT PERJANJIAN PELAKSANAAN PENELITIAN

Nomor: PJB-030/SP3/LPPM-UAD/VII/2018

Pada hari ini, **Senin** tanggal **Dua** bulan **Juli** tahun **Dua ribu delapan belas (02-07-2018)**, kami yang bertandatangan di bawah ini:

1. Nama : **Dr. Widodo, M.Si.**
Jabatan : Kepala Lembaga Penelitian dan Pengembangan Universitas Ahmad Dahlan (LPP UAD), selanjutnya disebut sebagai **PIHAK PERTAMA.**
2. Nama : **Dr. Muchlas, M.T.**
Jabatan : Dosen/Peneliti pada **Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri** Universitas Ahmad Dahlan (UAD), selaku Ketua Peneliti, selanjutnya disebut **PIHAK KEDUA.**

Kedua belah pihak menyatakan setuju dan mufakat untuk mengadakan perjanjian pelaksanaan penelitian untuk selanjutnya disebut Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian (SP3) dengan ketentuan dan syarat-syarat sebagai berikut.

JUDUL PENELITIAN

Pasal 1

- (1) PIHAK PERTAMA memberikan pekerjaan kepada PIHAK KEDUA dan PIHAK KEDUA menyatakan menerima pekerjaan dari PIHAK PERTAMA berupa kegiatan pada skim Penelitian Pejabat (PJB) untuk pejabat di lingkungan UAD.
- (2) Judul penelitian sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) di atas adalah: **IMPLEMENTASI LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTRONIKA DASAR BERBASIS PERANGKAT LUNAK APLIKASI PSPICE.**

PERSONALIA PELAKSANA PENELITIAN

Pasal 2

Pelaksana kegiatan ini terdiri dari:

- Ketua Peneliti : Dr. Muchlas, M.T.
Jabatan Struktural : Wakil Rektor 1
Anggota Peneliti 1 : Nuryono Satya Widodo S.T., M.Eng.
Anggota Peneliti 2 :

BENTUK DAN JANGKA WAKTU PERJANJIAN

Pasal 3

PIHAK KEDUA melaksanakan penelitian dalam jangka waktu paling lama **10 (sepuluh) bulan** sejak ditandatangani SP3 ini, dan menyerahkan hasil laporan penelitian sementara kepada PIHAK PERTAMA selambat-lambatnya pada **02 Mei 2019.**

LUARAN/OUTPUT PENELITIAN

Pasal 4

PIHAK KEDUA berkewajiban untuk merealisasikan luaran/output penelitian sesuai dengan Panduan Penelitian Skim Pejabat.



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

Jl. Gondosuli No. 1B Semaki Yogyakarta, Telp. 0274-542886, 0274-583515 ext. 1502, 1503 Fax. 0274-542886, Website : lppm.uad.ac.id, email : lppm@uad.ac.id

BIAYA PENELITIAN DAN CARA PEMBAYARAN

Pasal 5

PIHAK PERTAMA menyediakan dana pelaksanaan penelitian kepada PIHAK KEDUA **maksimal** sejumlah **Rp 50.000.000,00 (Lima puluh juta rupiah)** yang dibebankan pada Anggaran Pendapatan dan Belanja (APB) LPP UAD Tahun Akademik 2017/2018 dibayarkan melalui rekening bank atas nama Ketua Peneliti oleh Bidang Finansial UAD dengan tahapan sebagai berikut.

- (a) **Tahap I sebesar 60% x Rp 50.000.000,00 = Rp 30.000.000,00 (Tiga puluh juta rupiah)** yang akan dibayarkan selambat-lambatnya dua minggu setelah SP3 ini ditandatangani oleh PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA melalui Bidang Finansial UAD.
- (b) **Tahap II maksimal sebesar 40%** dari total biaya penelitian yang dibayarkan setelah PIHAK KEDUA menyelesaikan semua pekerjaan penelitian dan target luaran sesuai skema ini telah tercapai dan telah divalidasi luaran oleh PIHAK PERTAMA.

JENIS LAPORAN PENELITIAN

Pasal 6

- (1) PIHAK KEDUA wajib menyusun dan menyampaikan laporan penelitian baik secara *on line* melalui portal UAD maupun *hardcopy* kepada PIHAK PERTAMA yang terdiri atas:
 - a. Laporan Kemajuan
 - b. Laporan Penelitian Sementara
 - b. Laporan Akhir Penelitian
- (2) Berkas **Laporan Kemajuan** digunakan sebagai bahan monitoring dan evaluasi (monev) internal.
- (3) Berkas **Laporan Penelitian Sementara** digunakan sebagai bahan kolokium.
- (4) Berkas **Laporan Akhir Penelitian** merupakan revisi dari Laporan Penelitian Sementara yang telah dikolokiumkan.

MONITORING DAN EVALUASI

Pasal 7

- (1) PIHAK PERTAMA berhak untuk melakukan monitoring dan evaluasi (monev) internal pelaksanaan penelitian, baik secara administrasi maupun substansi.
- (2) Pelaksanaan monev dilakukan oleh Tim yang dibentuk oleh PIHAK PERTAMA dengan tugas:
 - a. melakukan monev terhadap kemajuan penelitian;
 - b. melakukan identifikasi permasalahan yang dihadapi oleh peneliti; dan
 - c. memberikan rekomendasi besaran pembayaran Tahap II kepada PIHAK PERTAMA.
- (3) PIHAK KEDUA diharuskan **MENYIAPKAN SEMUA DOKUMEN/BUKTI** kemajuan pelaksanaan penelitiannya guna kepentingan monitoring.
- (4) Waktu pelaksanaan Monev akan ditentukan oleh PIHAK PERTAMA.

KOLOKSIUM HASIL PENELITIAN

Pasal 8

- (1) PIHAK KEDUA wajib menyerahkan **Laporan Penelitian Sementara** sebagai bahan kolokium.
- (2) Ketua Peneliti wajib hadir dan mempresentasikan hasil penelitiannya pada kolokium **Laporan Penelitian Sementara** yang pelaksanaannya akan diatur oleh PIHAK PERTAMA.
- (3) Revisi laporan penelitian yang sudah dikolokiumkan harus mendapatkan pengesahan dari *reviewer* dalam bentuk **Surat Pernyataan** dan dijilid dalam satu kesatuan laporan penelitian.



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

Jl. Gondosuli No. 1B Semaki Yogyakarta, Telp. 0274-542886, 0274-583515 ext. 1502, 1503 Fax. 0274-542886, Website : lppm.uad.ac.id, email : lppm@uad.ac.id

LAPORAN AKHIR PENELITIAN

Pasal 9

- (1) PIHAK KEDUA wajib menyerahkan **Laporan Akhir Penelitian** selambat-lambatnya **2 (dua) pekan** setelah dikolokiumkan.
- (2) Sistematika dan format laporan penelitian mengacu pada ketentuan dalam Pedoman Penelitian yang dikeluarkan oleh LPP dan ketentuan lain yang berlaku.
- (3) Berkas Laporan Akhir Penelitian yang diserahkan kepada PIHAK PERTAMA harus dilampiri:
 - (a) artikel/draft publikasi ilmiah;
 - (b) naskah/draft seminar (prosiding) dan sertifikat seminar (jika sudah ada);
 - (c) lampiran lain yang dianggap perlu (angket atau lainnya);
 - (d) daftar hadir kolokium laporan penelitian; dan
 - (e) produk penelitian (naskah buku ajar, modul, naskah akademik, dan sejenisnya) atau dokumentasi/fotonya jika produk penelitian berupa barang atau perangkat keras (*hardware*) yang disertai penjelasan ringkas alat dan petunjuk pemakaiannya.

Komponen (a), (b), (c), dan (d) dijilid dalam satu kesatuan sebagai berkas laporan akhir penelitian sesuai dengan ketentuan dalam buku pedoman penelitian atau ketentuan khusus lainnya.

Komponen (e) dijilid terpisah dari berkas laporan akhir penelitian, kecuali dokumentasi/foto produk penelitian.
- (4) Laporan Akhir Penelitian sebagaimana tersebut pada ayat (1), (2), dan (3) memenuhi ketentuan sebagai berikut:
 - a. Bentuk/ukuran kertas A4;
 - b. Warna cover sesuai ketentuan;
 - c. Di bawah bagian cover ditulis:

**PENELITIAN INI DILAKSANAKAN ATAS BIAYA
ANGGARAN DAN PENDAPATAN DAN BELANJA UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN
TAHUN AKADEMIK 2017/2018
NOMOR KONTRAK: PJB-030/SP3/LPPM-UAD/VIII/2018**

- (4) Berkas Laporan Akhir Penelitian sebagaimana tersebut dalam ayat (1) diserahkan kepada PIHAK PERTAMA sebagai berikut:
 - 1 eksemplar **ASLI** untuk PIHAK PERTAMA;
 - 1 eksemplar untuk PIHAK KEDUA;
 - 1 eksemplar untuk arsip Program Studi;
- (5) PIHAK KEDUA wajib mengunggah file laporan akhir penelitian secara lengkap pada alamat <http://www.simpel.uad.ac.id> melalui akun portal ketua peneliti dengan format file PDF.

KEWAJIBAN UNGGAH PROPOSAL PADA PORTAL UAD

Pasal 10

- (1) PIHAK KEDUA wajib mengunggah berkas Laporan Akhir Penelitian pada **PORTAL UAD** melalui akun portal masing-masing peneliti.
- (2) Berkas Laporan Akhir Penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) yang terdiri dari:
 - i. Abstrak (PDF).
 - ii. Laporan Akhir Final (PDF).
 - iii. Luaran/*out put* penelitian yang berupa: naskah publikasi jurnal; prosiding seminar; HKI; dan atau luaran lainnya (PDF).



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

Jl. Gondosuli No. 1B Semaki Yogyakarta, Telp. 0274-542886, 0274-583515 ext. 1502, 1503 Fax. 0274-542886, Website : lppm.uad.ac.id, email : lppm@uad.ac.id

SANKSI DAN PEMUTUSAN PERJANJIAN PENELITIAN

Pasal 11

- (1) PIHAK KEDUA bertanggungjawab menyelesaikan seluruh kegiatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1 dan Pasal 3
- (2) PIHAK PERTAMA berhak memberikan peringatan dan atau teguran atas kelalaian dan atau pelanggaran yang dilakukan oleh PIHAK KEDUA yang mengakibatkan tidak dapat terpenuhinya kontrak penelitian ini.
- (3) PIHAK PERTAMA berhak melakukan pemutusan perjanjian penelitian, jika PIHAK KEDUA tidak mengindahkan peringatan yang diberikan oleh PIHAK PERTAMA.
- (3) Segala kerugian material maupun finansial yang disebabkan akibat kelalaian PIHAK KEDUA, maka sepenuhnya menjadi tanggungjawab PIHAK KEDUA.
- (4) Jenis sanksi yang diberikan dapat berupa:
 - (a) tidak diperkenalkannya mengajukan proposal penelitian pada tahun anggaran berikutnya sampai kewajibannya terselesaikan; dan atau
 - (b) tidak dapat mencairkan dana tahap 2; dan atau
 - (c) mengembalikan dana yang telah diterima oleh PIHAK KEDUA.

KEADAAN MEMAKSA (*FORCE MAJEUR*)

Pasal 12

Ketentuan dalam Pasal 10 tersebut di atas tidak berlaku dalam keadaan sebagai berikut:

- a. Keadaan Memaksa (*force majeure*)
- b. PIHAK PERTAMA menyetujui atas terjadinya keterlambatan yang didasarkan pada pemberitahuan sebelumnya oleh PIHAK KEDUA kepada PIHAK PERTAMA dengan **surat pemberitahuan** mengenai kemungkinan terjadinya keterlambatan dalam penyelesaian kegiatan penelitian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1 dan Pasal 3; dan sebaliknya PIHAK KEDUA menyetujui terjadinya keterlambatan pembayaran sebagai akibat keterlambatan dalam penyelesaian perjanjian penelitian.

Pasal 13

- (1) Keadaan Memaksa (*force majeure*) sebagaimana yang dimaksud dalam Pasal 11 ayat (1) adalah peristiwa-peristiwa yang secara langsung mempengaruhi pelaksanaan perjanjian serta terjadi di luar kekuasaan dan kemampuan PIHAK KEDUA ataupun PIHAK PERTAMA.
- (2) Peristiwa yang tergolong dalam keadaan memaksa (*force majeure*) antara lain berupa bencana alam, pemogokan, wabah penyakit, huru-hara, pemberontakan, perang, waktu kerja diperpendek oleh pemerintah, kebakaran dan atau peraturan pemerintah mengenai keadaan bahaya serta hal-hal lainnya yang dipersamakan dengan itu, sehingga PIHAK KEDUA ataupun PIHAK PERTAMA terpaksa tidak dapat memenuhi kewajibannya.
- (3) Peristiwa sebagaimana dimaksud pada ayat (2) tersebut di atas, wajib dibenarkan oleh penguasa setempat dan diberitahukan dengan Surat oleh PIHAK KEDUA atau PIHAK PERTAMA kepada PIHAK PERTAMA atau PIHAK KEDUA selambat-lambatnya 7 (tujuh) hari sejak terjadinya peristiwa yang dikategorikan sebagai Keadaan Memaksa (*force majeure*).
- (4) PIHAK PERTAMA memberikan kesempatan kepada PIHAK KEDUA untuk menyelesaikan perjanjian kontrak ini sampai pada batas waktu yang disepakati oleh kedua belah pihak jika keadaan *force majeure* dinyatakan telah selesai.



LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN

Jl. Gondosuli No. 1B Semaki Yogyakarta, Telp. 0274-542886, 0274-583515 ext. 1502, 1503 Fax. 0274-542886, Website : lppm.uad.ac.id, email : lppm@uad.ac.id

PENYELESAIAN PERSELISIHAN

Pasal 14

- (1) Apabila dalam pelaksanaan perjanjian dan segala akibatnya timbul perbedaan pendapat atau perselisihan, PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA setuju untuk menyelesaikannya secara musyawarah untuk mencapai mufakat.
- (2) Apabila penyelesaian sebagaimana termaksud dalam ayat (1) di atas tidak tercapai, maka PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA sepakat menyerahkan perselisihan tersebut melalui mediasi dengan Rektor sebagai atasan langsung dari PIHAK PERTAMA yang putusannya bersifat final dan mengikat.

PENGUNDURAN DIRI

Pasal 15

- (1) Apabila PIHAK KEDUA mengundurkan diri atau membatalkan SP3 ini, maka PIHAK KEDUA wajib mengajukan Surat Pengunduran Diri yang ditujukan kepada PIHAK PERTAMA.
- (2) Surat Pengunduran Diri sebagaimana dimaksud pada ayat (1) wajib disahkan oleh Dekan fakultas ketua peneliti yang bersangkutan; dan bagi peneliti skim PDP ditambah persetujuan Dosen Pembimbing.
- (3) PIHAK KEDUA wajib mengembalikan dana yang telah diterima kepada PIHAK PERTAMA

LAIN-LAIN

Pasal 16

- (1) Hal-hal yang dianggap belum cukup dan perubahan-perubahan perjanjian akan diatur kemudian atas dasar permufakatan kedua belah pihak yang akan dituangkan dalam bentuk Surat atau Perjanjian Tambahan (*addendum*), yang merupakan kesatuan dan bagian yang tidak terpisahkan dari perjanjian awal.
- (2) Pemberitahuan dan/atau surat menyurat dari PIHAK KEDUA kepada PIHAK PERTAMA dialamatkan kepada Kepala Lembaga Penelitian dan Pengembangan Universitas Ahmad Dahlan.

Pasal 17

Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian (SP3) ini berlaku sejak ditandatangani dan disetujui oleh kedua belah pihak.

Pasal 18

Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian (SP3) ini dibuat rangkap 2 (dua); bermeterai cukup pada kedua belah pihak; dan masing-masing memiliki kekuatan hukum yang sama. Biaya meterai dibebankan kepada PIHAK KEDUA.

PIHAK PERTAMA,



Dr. Widodo, M.Si.

NIP: 196002211987091001

PIHAK KE DUA,

Dr. Muchlas, M.T.

NIP. 196202181987021001

**BORANG CAPAIAN LUARAN PENELITIAN
SUMBERDANA UAD TAHUN AKADEMIK 2018/2019
SKEMA PEJABAT**

I. IDENTITAS PENELITI

Judul penelitian : Implementasi Laboratorium Virtual Elektronika Dasar Berbasis Perangkat Lunak Aplikasi PSPICE
 Ketua Peneliti : Dr. Muchlas, M. T.
 NIDN / e-mail : 0018026201/muchlas.te@uad.ac.id
 Prodi/Fakultas : Teknik Elektro/Teknologi Industri
 Anggota Peneliti 1 : Nuryono Satya Widodo, S. T., M. Eng.
 Anggota Peneliti 2 : -
 Jenis/Tahap Penelitian : Pengembangan
 TKT/TRL : 5

II. CAPAIAN LUARAN PENELITIAN

A. PUBLIKASI ILMIAH

	Keterangan
ARTIKEL JURNAL KE-1*¹	
Nama jurnal yang dituju	Teknologi dan Kejuruan, diterbitkan oleh Universitas Negeri Malang
Level jurnal	Nasional
Status	Terakreditasi B
<i>Impact factor</i> untuk jurnal	
Judul artikel	Evaluasi <i>On Going</i> Modul Praktik Elektronika Dasar Berbasis Perangkat Lunak PSPICE
Status naskah	Draf
Alamat URL artikel	
ARTIKEL JURNAL KE-2, dst.	

*¹ Jika masih ada artikel ke-2 dan seterusnya, mohon dituliskan pada lembar tambahan

B. BUKU AJAR

Buku ke-1*²	Keterangan
Judul buku	Elektronika Dasar
Penulis	Dr. Muchlas, M.T.
Penerbit	UAD Press
No. ISBN	Sedang diusulkan
Buku ke-2, dst.	

*² Jika masih ada buku ke-2 dan seterusnya, mohon dituliskan pada lembar tambahan

C. PEMBICARA PADA PERTEMUAN ILMIAH (SEMINAR/SIMPOSIUM)

Mengikuti seminar*³	Keterangan
Pertemuan Ilmiah ke-1	
- Judul Makalah	
- Nama pertemuan ilmiah	
- Tempat pelaksanaan	
- Waktu pelaksanaan	
- Jenis pertemuan	
- Status naskah	
Pertemuan Ilmiah ke-2, dst.	

*³ Jika masih ada undangan ke-2 dan seterusnya, mohon dituliskan pada lembar tambahan

D. PEMBICARA KUNCI/KEYNOTE SPEAKER PADA PERTEMUAN ILMIAH (SEMINAR/SIMPOSIUM)

	Keterangan
- Judul makalah	Pengembangan Modul Praktik Elektronika Dasar Berbasis Program PSPICE
- Penulis	Muchlas, Nuryono Satya Widodo
- Penyelenggara	Panitia Seminar Nasional Pendidikan dan Teknologi Kejuruan, UNJ
- Waktu Pelaksanaan	3 Juli 2019
- Tempat Pelaksanaan	Universitas Negeri Jakarta
- Skala pertemuan	Regional/Nasional/Internasional
- Status pertemuan	Sudah dilaksanakan / belum
- Alamat URL artikel	
-	

*3 Jika masih ada undangan ke-2 dan seterusnya, mohon dituliskan pada lembar tambahan

E. Menjadi Peneliti Tamu (*Visiting Scientist*)

Menjadi peneliti tamu (<i>visiting scientist</i>) pada perguruan tinggi lain*4	Nasional	Internasional
- Perguruan tinggi pengundang		
- Lama kegiatan		
- Kegiatan penting yang dilakukan		

*4 Jika masih ada undangan ke-2 dan seterusnya, mohon dituliskan pada lembar tambahan

F. Hak Kekayaan Intelektual dan Lainnya

Jenis HKI	Uraian
Paten	Tuliskan judul paten adan tanggal pengajuannya
Hak Cipta	Tuliskan bentuk dan atau nama/judul hak cipta dan tanggal pengajuannya
TEKNOLOGI TEPAT GUNA	Jelaskan nama TTG dan pemanfaatan serta penggunaanya
REKAYASA SOSIAL	Uraikan kebijakan publik yang sedang atau sudah dapat diubah
JEJARING KERJA SAMA	Uraikan kapan jejaring dibentuk dan kegiatannya sampai saat ini, baik antarpeleliti maupun antarlembaga
PENGHARGAAN	Uraikan penghargaan yang diterima sebagai peneliti, baik dari pemerintah atau asosiasi profesi
LAINNYA	Tulis dan uraikan luaran HKI lainnya

Yogyakarta, Desember 2018
Ketua Peneliti,



Dr. Muchlas, M. T.

IMPLEMENTASI LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTRONIKA DASAR BERBASIS PERANGKAT LUNAK APLIKASI PSPICE



Peneliti

Dr. Muchlas, M. T.

Teknik Elektro/FTI
Universitas Ahmad Dahlan
muchlas.te@uad.ac.id

Nuryono Satya Widodo, S.T., M.Eng.

Teknik Elektro/FTI
Universitas Ahmad Dahlan
nuryono.te@uad.ac.id



Ringkasan Eksekutif

Saat ini ketersediaan modul-modul untuk mendukung praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual masih belum dapat memenuhi kebutuhan. Penelitian pengembangan ini ditujukan untuk menghasilkan perangkat pembelajaran yang layak dalam mendukung penyelenggaraan praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis program aplikasi PSPICE.

Penelitian ini menggunakan model pengembangan konseptual sebagai acuan untuk mengarahkan proses disain mencapai produk sesuai spesifikasi yang ditentukan. Kinerja produk diuji menggunakan evaluasi formatif *on going*. Untuk memperoleh informasi kinerja rangkaian atau kelayakan produk, dilakukan analisis perbandingan antara karakteristik yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan PSPICE terhadap watak teoritiknya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua modul yang dikembangkan dapat menampilkan karakteristik yang sama dengan watak teoritiknya, hal ini menunjukkan bahwa modul-modul tersebut memiliki kinerja yang sangat baik sehingga layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual berbasis PSPICE. Produk yang dihasilkan berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar yang meliputi topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pegganda Tegangan, Karakteristik Transistor, dan Rangkaian Amplifier Transistor. Setiap topik dilengkapi dengan panduan praktik dan panduan pengoperasian PSPICE.



HKI dan Publikasi

1. Evaluasi *On Going* Modul Praktik Elektronika Dasar Berbasis Perangkat Lunak PSPICE (dalam proses *submit* ke Jurnal Teknologi dan Kejuruan, Universitas Negeri Malang).
2. Pengembangan Modul Praktik Elektronika Dasar Menggunakan Program PSPICE (akan dipresentasikan dalam Seminar Nasional Pendidikan dan Teknologi Kejuruan pada 3 Juli 2019 di Universitas Negeri Jakarta).



Latar Belakang

Memperhatikan karakteristiknya sebagai media praktik yang efisien dan fleksibel serta potensinya sebagai sarana efektif pembentukan keterampilan yang dibutuhkan dunia kerja saat ini, laboratorium virtual seharusnya menjadi perangkat yang banyak digunakan oleh kalangan pendidikan tinggi teknik dalam mendukung terselenggaranya pembelajaran praktik secara *online*. Terlebih lagi, saat ini Kemenristekdikti telah meluncurkan kebijakan agar pendekatan *blended learning* (gabungan pembelajaran tatap muka dan *online*) digunakan secara luas dalam sistem pembelajaran di perguruan tinggi. Namun, kenyataan menunjukkan bahwa ketersediaan perangkat laboratorium virtual ini masih belum memenuhi harapan terutama pada pembelajaran praktik. Khusus praktik elektronika dasar, saat ini memang telah tersedia banyak *tools* yang dapat digunakan untuk membangun laboratorium virtual, namun modul-modul yang sesuai dengan materi praktik masih terlihat kurang.

Salah satu *tools* yang dapat digunakan untuk membangun laboratorium virtual bidang elektronika dasar adalah program aplikasi PSPICE. Saat ini ketersediaan modul-modul berbasis PSPICE untuk mendukung praktik elektronika dasar berbasis laboratorium virtual masih belum dapat memenuhi kebutuhan. Atas dasar kenyataan ini, perlu dilakukan pengembangan modul-modul laboratorium virtual berbasis program aplikasi PSPICE yang dapat digunakan untuk mendukung penyelenggaraan praktik elektronika dasar.

Hasil dan Manfaat

Melalui penelitian ini dihasilkan produk perangkat pembelajaran berupa rangkaian elektronik dalam format *schematic* dari PSPICE sebanyak 31 buah, untuk mendukung praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual. Perangkat pembelajaran yang dihasilkan menyediakan modul praktik untuk topik: Pengisian dan Pengosongan Kapasitor, Rangkaian RC, Karakteristik Diode, Rangkaian Pembentuk Gelombang, Rangkaian Penyearah, Rangkaian Penjepit dan Pengganda Tegangan, Karakteristik Transistor, Rangkaian Penguat Transistor. Setiap topik dilengkapi dengan panduan praktik dan panduan pengoperasian PSPICE.

Semua rangkaian elektronika yang dikembangkan sebagai produk perangkat pembelajaran pada penelitian ini telah dapat bekerja dengan baik, dan karakteristik yang ditampilkan memberikan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap karakteristik teoritiknya, sehingga setiap rangkaian sangat layak digunakan sebagai media praktik elektronika dasar menggunakan laboratorium virtual yang diimplementasikan dengan perangkat lunak PSPICE.

Selain secara langsung dapat digunakan oleh para mahasiswa untuk melakukan kerja *lab* secara mandiri, produk penelitian ini nantinya dapat digunakan oleh para dosen teknik elektro yang mengampu praktik dasar elektronika, sebagai alternatif pengganti praktik *hands-on* yang lebih efisien dan fleksibel maupun sebagai media pembelajaran di dalam kelas.



Metode

Prosedur pengembangan yang dijalankan pada penelitian mengikuti urutan kegiatan sesuai dengan langkah-langkah *analysis, design, develop, implementation, evaluation*. Pada tahap analisis, dilakukan identifikasi media yang diperlukan pada pembelajaran Elektronika Dasar di lingkungan program studi Teknik Elektro. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa media *hands-on* seperti modul praktik berbasis papan rangkaian *breadboard* dengan alat ukur multimeter dan osiloskop yang tersedia masih sedikit, bahkan modul-modul yang bersifat virtual masih belum tersedia. Melalui tahap ini dilakukan pula analisis dari media/modul yang telah digunakan untuk menentukan tujuan pembelajaran pada aspek kognitif, psikomotorik dan afektif. Setelah dilakukan analisis terhadap media-media yang digunakan baik sebagai pendukung pembelajaran di kelas maupun sebagai modul praktik di laboratorium, dapat dirumuskan tujuan pembelajaran Elektronika Dasar yakni mahasiswa dapat memahami karakteristik piranti elektronika dan aplikasinya serta dapat menganalisis dan merancang rangkaian elektronika analog sederhana.

Selanjutnya dilakukan pula analisis untuk menentukan keterampilan-keterampilan teknis yang dapat diharapkan sebagai dampak penggunaan media yang akan dikembangkan. Atas dasar analisis yang telah dilakukan, keterampilan teknis yang diharapkan dapat ditumbuhkan melalui penerapan media yang akan dibangun ini adalah mahasiswa terampil dalam: (1) menggambarkan rangkaian elektronika sederhana menggunakan simbol-simbol baku; (2) merangkai rangkaian elektronika sederhana; (3) melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik piranti elektronika; (4) melakukan eksperimen untuk menguji dan menganalisis watak rangkaian elektronika dengan berbagai parameter yang diberikan; dan (5) melakukan perancangan rangkaian elektronika sederhana serta mengujinya melalui eksperimen laboratorium.

Analisis diakhiri dengan menentukan waktu yang sesuai dari penggunaan simulator yang dikembangkan untuk media pembelajaran maupun praktik di laboratorium. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, penggunaan produk yang dikembangkan baik sebagai media pembelajaran di dalam kelas, perangkat praktik di laboratorium, maupun untuk keperluan belajar mandiri mahasiswa, memerlukan waktu 90 menit.

Langkah desain diawali dengan menentukan jenis media yang akan digunakan dalam hal ini perangkat lunak PSPICE. Selanjutnya dirumuskan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak pendukung yang terlibat dalam penggunaan PSPICE. Untuk mendukung proses desain, pada tahap ini dilakukan pula eksplorasi pustaka sebagai dasar untuk memilih bentuk rancangan modul praktik elektronika dasar yang sesuai. Melalui eksplorasi pustaka berhasil dikumpulkan rancangan rangkaian elektronik untuk pengembangan modul praktik semua topik.

Melalui tahap pengembangan dilakukan penyusunan unsur-unsur media dan mengintegrasikannya ke dalam satu kesatuan modul praktik berdasar pada basis perangkat lunak yang dipilih yakni PSPICE. Pada tahap pengembangan ini dilakukan penentuan nilai-nilai dari komponen yang digunakan untuk membangun rangkaian dan sekaligus parameter simulasinya.

Kegiatan pada tahap implementasi yang terpenting adalah melakukan sosialisasi seluas-luasnya dalam berbagai bentuk tentang laboratorium virtual berbasis PSPICE yang telah dikembangkan agar dapat digunakan oleh dosen/guru serta mahasiswa/siswa dalam mendukung proses pembelajaran elektronika dasar.

Pada penelitian ini baru dilakukan evaluasi *on going* yakni peneliti melakukan uji kinerja terhadap semua rancangan rangkaian dalam format PSPICE. Untuk memperoleh informasi kinerja rangkaian atau kelayakan produk, dilakukan analisis perbandingan antara karakteristik yang diperoleh melalui eksperimen menggunakan PSPICE terhadap watak teoritiknya.



