

2. TEORI PENUNJANG

2.1. Dioda

Dioda adalah suatu bahan semikonduktor yang didesain sedemikian rupa sehingga hanya dapat mengalirkan arus satu arah saja. Struktur dioda tidak lain adalah sambungan semikonduktor P dan N. Satu sisi adalah semikonduktor dengan tipe P dan satu sisinya yang lain adalah tipe N. Dengan struktur demikian arus hanya akan dapat mengalir dari sisi P menuju sisi N. Simbol untuk dioda dapat dilihat pada gambar 2.1.a. Gambar tersebut menunjukkan sambungan PN dengan sedikit pembatas tipis yang disebut lapisan deplesi (*depletion layer*), dimana di situ terdapat keseimbangan *hole* dan elektron. Pada sisi P banyak terbentuk *hole-hole* yang siap menerima elektron sedangkan di sisi N banyak terdapat elektron-elektron yang siap untuk bebas. Lalu jika diberi bias positif (*forward bias*), dengan arti kata memberi tegangan potensial sisi P lebih besar dari sisi N, maka elektron dari sisi N dengan akan tergerak untuk mengisi *hole* di sisi P. Jika elektron mengisi *hole* di sisi P, maka akan terbentuk *hole* pada sisi N karena ditinggalkan elektron. Ini disebut aliran *hole* dari P menuju N, Kalau menggunakan terminologi arus listrik, maka dikatakan terjadi aliran listrik dari sisi P ke sisi N. Penjelasan tersebut diilustrasikan pada gambar 2.1.b.

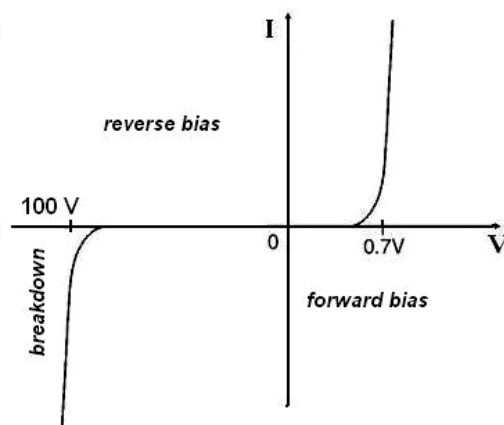


Gambar 2.1. (a) simbol dioda (b) dioda dibias maju

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Diode Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/diode.htm>>.

Sebaliknya, jika dioda diberi bias negatif (*reverse bias*) dioda tidak dapat mengalirkan arus, namun memang ada batasnya. Sampai beberapa puluh bahkan ratusan volt baru terjadi *breakdown*, dimana dioda tidak lagi dapat menahan aliran

elektron yang terbentuk di lapisan deplesi. Di sini dioda sudah tidak mampu lagi menahan disipasi daya yang sangat besar, karena semakin besar V_r , arus baliknya juga semakin besar. Tegangan V_r ini disebut sebagai tegangan tembus dioda (*peak inverse voltage*). Grafik karakteristik arus dioda dapat dilihat pada gambar 2.2. Dalam aplikasinya, karena sifatnya yang hanya dapat menghantar arus listrik satu arah saja, dioda banyak digunakan sebagai penyearah arus (*rectifier*). Contoh berbagai karakteristik dioda diperlihatkan pada tabel 1.1.



Gambar 2.2. Grafik karakteristik arus dioda

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Diode Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/diode.htm>>.

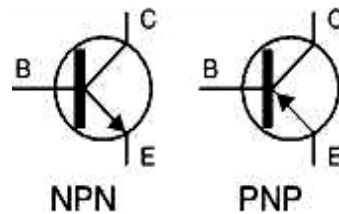
Tabel 1.1. Contoh Karakteristik Beberapa Dioda

Symbol	Parameter	Value							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current, .375 " lead length @ $T_A = 75^\circ\text{C}$	1.0							A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
T_{stg}	Storage Temperature Range	-55 to +175							$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							$^\circ\text{C}$

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Diode Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/diode.htm>>.

2.2. Transistor

Transistor merupakan komponen semikonduktor yang memiliki dua sambungan (*junction*). Sambungan itu membentuk transistor PNP maupun NPN. Ujung-ujung terminalnya berturut-turut disebut emitor, basis dan kolektor. Transistor ini disebut transistor *bipolar*, karena struktur dan prinsip kerjanya tergantung dari perpindahan elektron di kutub negatif mengisi kekurangan elektron (*hole*) di kutub positif. $\beta = 2$ dan polar = kutub. Transistor bipolar ditemukan pertama kali oleh William Shockley pada tahun 1951.

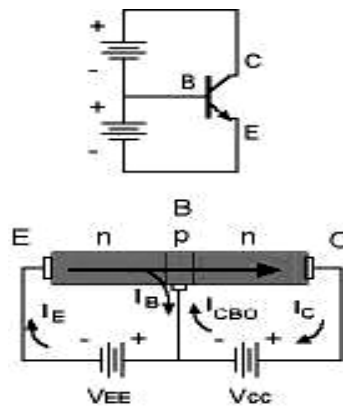


Gambar 2.3. Simbol Transistor

Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

2.2.1. Pembiasan Transistor

Transistor bipolar memiliki 2 *junction* yang setara dengan penggabungan 2 buah dioda. Emiter-Basis adalah satu *junction* dan Basis-Kolektor *junction* lainnya. Seperti pada dioda, arus hanya akan mengalir hanya jika diberi bias positif, yaitu hanya jika tegangan pada material P lebih positif daripada material N (*forward bias*). Pada gambar ilustrasi transistor NPN berikut ini, *junction* basis-emiter diberi bias positif sedangkan basis-kolektor mendapat bias negatif (*reverse bias*).



Gambar 2.4. Pembiasan Transistor NPN

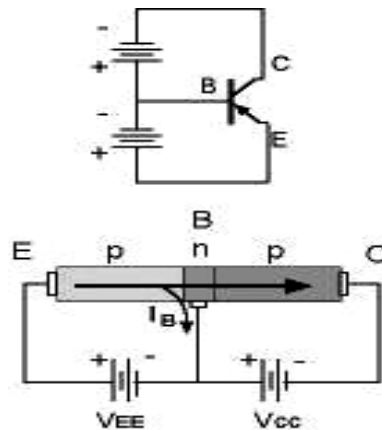
Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

Karena basis-emiter mendapat bias positif maka seperti pada dioda, elektron mengalir dari emiter menuju basis. Kolektor pada rangkaian ini lebih positif sebab mendapat tegangan positif. Karena kolektor ini lebih positif, aliran elektron bergerak menuju kutub ini. Misalnya tidak ada kolektor, aliran elektron seluruhnya akan menuju basis seperti pada dioda. Tetapi karena lebar basis yang sangat tipis, hanya sebagian elektron yang dapat bergabung dengan hole yang ada pada basis. Sebagian besar akan menembus lapisan basis menuju kolektor. Inilah alasannya mengapa jika dua dioda digabungkan tidak dapat menjadi sebuah transistor, karena persyaratannya adalah lebar basis harus sangat tipis sehingga dapat ditembus oleh elektron.¹

Jika misalnya tegangan basis-emitor dibalik (*reverse bias*), maka tidak akan terjadi aliran elektron dari emitor menuju kolektor. Jika pelan-pelan 'keran' basis diberi bias maju (*forward bias*), elektron mengalir menuju kolektor dan besarnya sebanding dengan besar arus bias basis yang diberikan. Dengan kata lain, arus basis mengatur banyaknya elektron yang mengalir dari emiter menuju kolektor. Ini yang dinamakan efek penguatan transistor, karena arus basis yang kecil menghasilkan arus emiter-kolektor yang lebih besar. Juga dapat dijelaskan bahwa basis mengatur membuka dan menutup aliran arus emiter-kolektor (*switch on/off*). Pada transistor PNP, fenomena yang sama dapat dijelaskan dengan

¹ Gary Brown, Kelsey Park School., *Basic Transistor Tutorial*, 14 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/components/tran.html> >.

memberikan bias seperti pada gambar 2.5. Dalam hal ini yang disebut perpindahan arus adalah arus *hole*.



Gambar 2.5. Pembiasan Transistor PNP

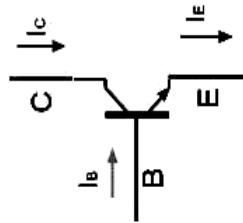
Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005, < <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

2.2.2. Arah Arus Transistor

Ada beberapa notasi yang sering digunakan untuk menunjukkan besar tegangan pada suatu titik maupun antar titik. Notasi dengan 1 *subscript* adalah untuk menunjukkan besar tegangan pada satu titik, misalnya V_C = tegangan kolektor, V_B = tegangan basis dan V_E = tegangan emitter. Ada juga notasi dengan 2 *subscript* yang dipakai untuk menunjukkan besar tegangan antar 2 titik, yang disebut juga dengan tegangan jepit. Diantaranya adalah :

- V_{CE} = tegangan jepit kolektor- emitor
- V_{BE} = tegangan jepit basis – emitor
- V_{CB} = tegangan jepit kolektor – basis.

Sedangkan Notasi seperti V_{BB} , V_{CC} , V_{EE} berturut-turut adalah besar sumber tegangan yang masuk ke titik basis, kolektor dan emitor



Gambar 2.6. Arah Arus Transistor NPN

Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

Dari hukum Kirchhoff diketahui bahwa jumlah arus yang masuk ke satu titik akan sama jumlahnya dengan arus yang keluar. Jika teorema tersebut diaplikasikan pada transistor, maka hukum itu menjelaskan hubungan :

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.1)$$

Persamaan (1) tersebut mengatakan arus emiter I_E adalah jumlah dari arus kolektor I_C dengan arus basis I_B . Karena arus I_B sangat kecil sekali atau disebutkan $I_B \ll I_C$, maka dapat dinyatakan :

$$I_E = I_C \quad (2.2)$$

Pada *datasheet* sering dijumpai spesifikasi α_{DC} (alpha DC) yang berarti perbandingan arus kolektor terhadap arus emitor, yang dinyatakan dengan persamaan :

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.3)$$

Karena besar arus kolektor umumnya hampir sama dengan besar arus emiter maka idealnya besar α_{DC} adalah = 1 (satu). Namun umumnya transistor yang ada memiliki α_{DC} kurang lebih antara 0.95 sampai 0.99. Selain α_{DC} , ada juga istilah β , yaitu perbandingan antara arus kolektor dengan arus basis. β lebih dikenal dengan istilah h_{fe} dan dinyatakan dalam persamaan :

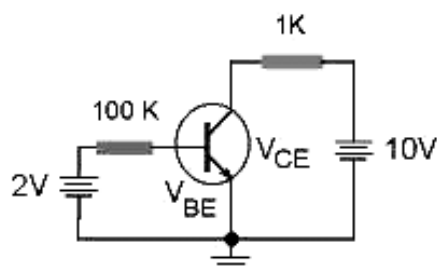
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.4)$$

Dengan kata lain, β adalah parameter yang menunjukkan kemampuan penguatan arus (current gain) dari suatu transistor. Parameter ini ada tertera di

datasheet transistor dan sangat membantu para perancang rangkaian elektronika dalam merencanakan rangkaiannya.

2.2.3. Daerah Kerja Transistor

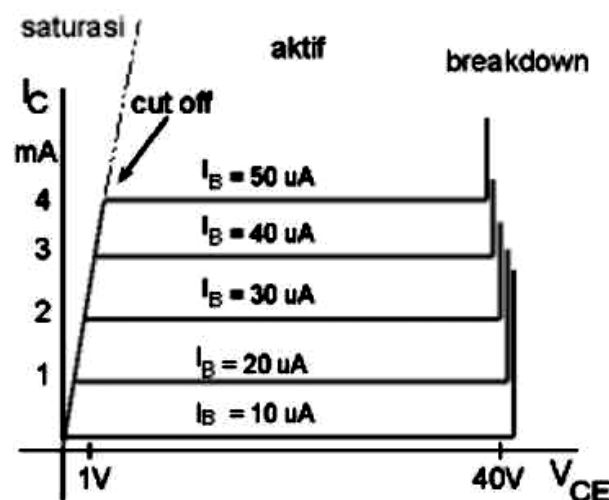
Satu hal lain yang menarik adalah bagaimana hubungan antara arus basis I_B , arus kolektor I_C dan tegangan kolektor-emiter V_{CE} . Dengan menggunakan rangkaian bias transistor pada gambar 2.7., tegangan V_{BB} dan V_{CC} dapat diatur untuk memperoleh plot garis-garis kurva kolektor.



Gambar 2.7. Rangkaian Bias Transistor

Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005, < <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

Pada gambar 2.8. dari rangkaian bias transistor, telah diplot beberapa kurva kolektor arus I_C terhadap V_{CE} dimana arus I_B dibuat konstan.



Gambar 2.8. Kurva kolektor

Sumber : Zam, Efy Zamidra, *Transistor*. Surabaya : Penerbit Indah, 2004. p.33.

Dari kurva ini terlihat ada beberapa *region* yang menunjukkan daerah kerja transistor. Pertama adalah daerah *saturasi*, lalu daerah *cut-off*, kemudian daerah *aktif* dan seterusnya daerah *breakdown*.

- Daerah Aktif.

Daerah kerja transistor yang normal adalah pada daerah aktif.. Dari kurva ini diperlihatkan bahwa arus I_C hanya tergantung dari besar arus I_B . Daerah kerja ini biasa juga disebut daerah linear (*linear region*). Jika hukum Kirchhoff mengenai tegangan dan arus diterapkan pada *loop* kolektor maka dapat diperoleh hubungan :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (2.5)$$

Dapat dihitung disipasi daya transistor adalah :

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C \quad (2.6)$$

Rumus ini mengatakan bahwa disipasi daya transistor adalah hasil perkalian antara V_{CE} dan I_C . Disipasi daya ini berupa panas yang menyebabkan naiknya temperatur transistor. Umumnya untuk transistor *power* sangat perlu untuk mengetahui spesifikasi P_{Dmax} , yaitu daya maksimal yang mampu diserap oleh komponen. Spesifikasi ini menunjukkan temperatur kerja maksimum yang diperbolehkan agar transistor masih bekerja normal². Sebab jika transistor bekerja melebihi kapasitas daya P_{Dmax} , maka transistor dapat rusak atau terbakar. Pada aplikasinya, daerah aktif sering dimanfaatkan sebagai *amplifier*.

- Daerah Saturasi

Daerah saturasi adalah daerah dimana kenaikan arus basis tidak menghasilkan kenaikan arus kolektor. Pada kondisi saturasi I_C telah memiliki nilai maksimal. Kondisi saturasi sering digunakan untuk keperluan *switch* (saklar).

² Gary Brown, Kelsey Park School., *Basic Transistor Tutorial* , 14 September 2005, <<http://www.kpsec.freeuk.com/components/tran.html>>.

- Daerah *Cut Off*

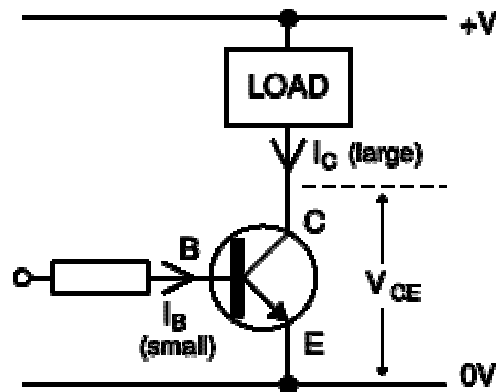
Daerah ini merupakan daerah dimana tidak ada arus yang mengalir dari kolektor ke emiter (untuk NPN) dan juga sebaliknya (untuk PNP).

- Daerah *Breakdown*

Adalah daerah terlarang untuk operasi transistor. Transistor tidak boleh bekerja pada daerah ini, karena akan dapat merusak transistor tersebut. Untuk berbagai jenis transistor nilai tegangan V_{CEmax} yang diperbolehkan sebelum *breakdown* bervariasi. V_{CEmax} pada *datasheet* transistor selalu dicantumkan juga.

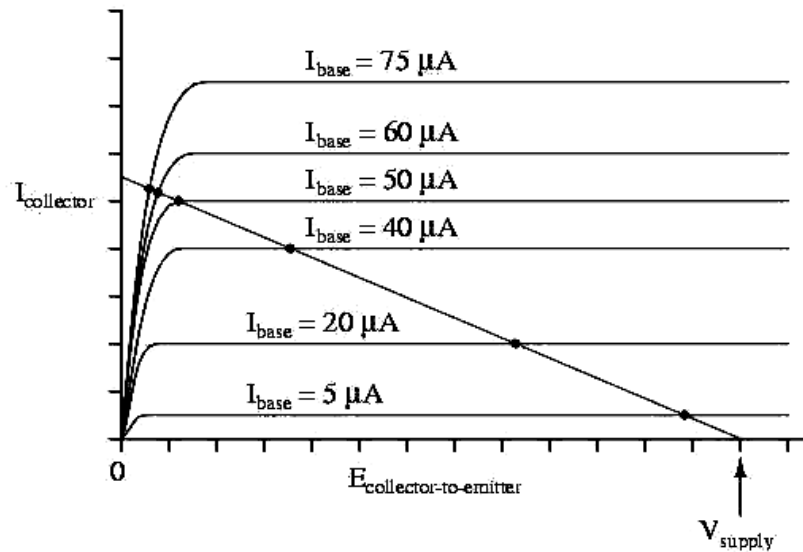
2.2.4. Transistor Sebagai Saklar.

Ketika transistor digunakan sebagai saklar, dia harus dalam keadaan *ON* atau *OFF*. Pada kondisi *ON* tegangan V_{CE} mendekati nol dan arus I_C adalah maksimal. Untuk kondisi *ON* ini, transistor mengalami saturasi. Sebaliknya, untuk kondisi *OFF*, transistor berada dalam keadaan *cut off*, dimana tegangan V_{CE} adalah maksimal sebesar tegangan input, dan arus I_C bernilai "0". Penjelasan tentang transistor sebagai saklar seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Transistor sebagai Saklar.

Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

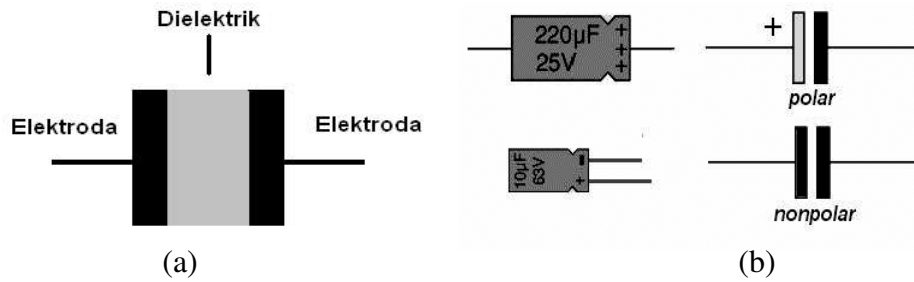


Gambar 2.10. Kurva Garis Beban Transistor.

Sumber : Kelsey Park School., *Transistors*, 12 September 2005,
< <http://www.kpsec.freeuk.com/trans.htm> >.

2.3. Kapasitor

Kapasitor adalah komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik. Struktur sebuah kapasitor terbuat dari 2 buah plat metal yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik. Bahan-bahan dielektrik yang umum dikenal misalnya udara vakum, keramik, gelas dan lain-lain. Jika kedua ujung plat metal diberi tegangan listrik, maka muatan-muatan positif akan mengumpul pada salah satu kaki (elektroda) metalnya dan pada saat yang sama muatan-muatan negatif terkumpul pada ujung metal yang satu lagi. Muatan positif tidak dapat mengalir menuju ujung kutub negatif dan sebaliknya muatan negatif tidak bisa menuju ke ujung kutub positif, karena terpisah oleh bahan dielektrik yang non-konduktif. Muatan elektrik ini "tersimpan" selama tidak ada konduksi pada ujung-ujung kakinya.



Gambar 2.11. (a) Prinsip Dasar Kapasitor (b) Bentuk dan simbol kapasitor

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Capacitor Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm>>.

2.3.1. Kapasitansi

Kapasitansi didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu kapasitor untuk dapat menampung muatan elektron. Coulombs pada abad 18 menghitung bahwa 1 coulomb = 6.25×10^{18} elektron. Kemudian Michael Faraday membuat *postulat* bahwa sebuah kapasitor akan memiliki kapasitansi sebesar 1 farad jika dengan tegangan 1 volt dapat memuat muatan elektron sebanyak 1 coulombs. Dengan rumus dapat ditulis :

$$Q = C.V \quad (2.7)$$

Q = muatan elektron dalam C (coulombs)

C = nilai kapasitansi dalam F (farads)

V = besar tegangan dalam V (volt)

Dalam praktek pembuatan kapasitor, kapasitansi dihitung dengan mengetahui luas area plat metal (A), jarak (t) antara kedua plat metal (tebal dielektrik) dan konstanta (k) bahan dielektrik. Dengan rumusan dapat ditulis sebagai berikut :

$$C = (8,85 \times 10^{-12})(kA/t) \quad (2.8)$$

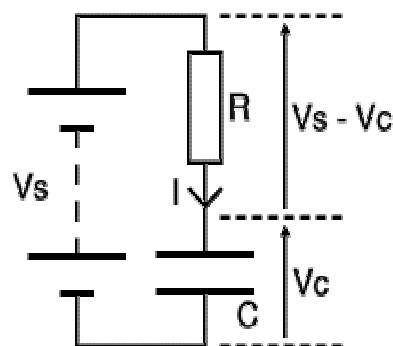
Untuk rangkaian elektronik praktis, satuan farad adalah sangat besar . Umumnya kapasitor yang ada di pasar memiliki satuan μF ($10^{-6} F$), nF ($10^{-9} F$) dan pF ($10^{-12} F$). Konversi satuan penting diketahui untuk memudahkan membaca besaran sebuah kapasitor. Misalnya 0.047 μF dapat juga dibaca sebagai 47nF, atau contoh lain 0.1nF sama dengan 100pF.

2.3.2. Membaca Kapasitansi

Pada kapasitor yang berukuran besar, nilai kapasitansi umumnya ditulis dengan angka yang jelas. Lengkap dengan nilai tegangan maksimum dan polaritasnya. Misalnya, dengan jelas tertulis kapasitansinya sebesar 22 μ F/25v. Kapasitor yang ukuran fisiknya mungil dan kecil biasanya hanya bertuliskan 2 (dua) atau 3 (tiga) angka saja. Jika hanya ada dua angka satuannya adalah *pF* (*pico farads*). Sebagai contoh, kapasitor yang bertuliskan dua angka 47, maka kapasitansi kapasitor tersebut adalah 47 pF.

Jika ada 3 digit, angka pertama dan kedua menunjukkan nilai nominal, sedangkan angka ke-3 adalah faktor pengali. Faktor pengali sesuai dengan angka nominalnya, berturut-turut 1 = 10, 2 = 100, 3 = 1.000, 4 = 10.000 dan seterusnya. Misalnya pada kapasitor keramik tertulis 104, maka kapasitansinya adalah $10 \times 10.000 = 100.000\text{pF}$ atau $= 100\text{nF}$. Contoh lain misalnya tertulis 222, artinya kapasitansi kapasitor tersebut adalah $22 \times 100 = 2200\text{ pF} = 2.2\text{ nF}$.

2.3.3. Charge dan Discharge Pada Kapasitor



Gambar 2.12. Rangkaian Kapasitor

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Capacitor Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm>>.

Pada gambar 2.12. kapasitor (C) *discharge* dari tegangan sumber (V_s) dengan arus yang mengalir melalui resistor (R). Tegangan pada kapasitor (V_c) awalnya nol, namun akan terus meningkat seiring dengan proses *charge*. Kapasitor dikatakan berada pada kondisi penuh pada proses *charge* jika tegangan kapasitor (V_c) sama dengan tegangan sumber (V_s). Arus *charge* yang melalui

kapasitor ditentukan oleh besar tegangan pada resistor (dalam hal ini adalah $V_s - V_c$), dan dirumuskan sebagai :

$$I = \frac{(V_s - V_c)}{R} \quad (2.9)$$

Pada kondisi awal, $V_c = 0$, sehingga arus *charge* :

$$I_o = \frac{V_s}{R} \quad (2.10)$$

Selama proses *charge* V_c akan meningkat sampai kapasitor mencapai muatan (Q) tertentu. Proses ini pada akhirnya akan menurunkan tegangan pada resistor yang juga menyebabkan arus *charge* semakin mengecil sampai mencapai nilai 0. Waktu yang diperlukan selama proses *charge* kapasitor dirumuskan dengan :

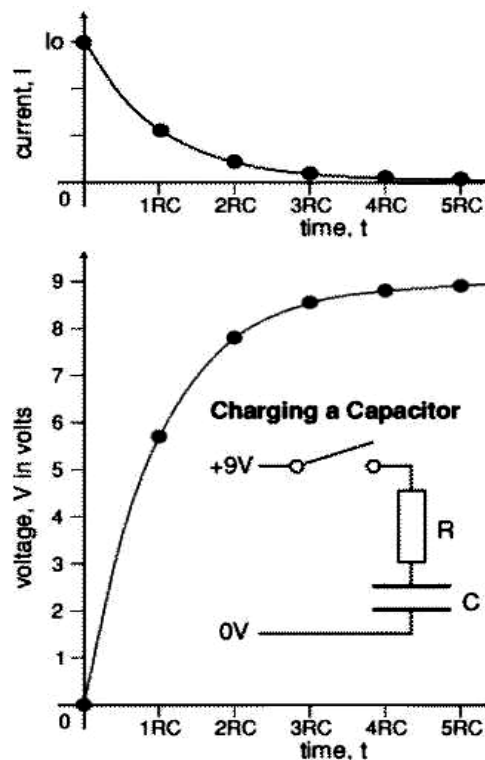
$$t = R \times C \quad (2.11)$$

dimana ,

t = waktu *charge* (detik)

R = resistansi (Ω)

C = kapasitansi (farad)



Gambar 2.13. Grafik Arus Dan Tegangan Pada Proses *Charge* Kapasitor

Sumber : HowStuffWorks, Inc., *How Capacitor Work*, 12 September 2005, <<http://electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm>>.

Dari gambar 2.13. terlihat bagaimana tegangan meningkat saat kapasitor *charge*. Pada awalnya tegangan meningkat cepat, karena arus *charge* yang cukup besar. Tetapi saat arus menurun, maka kenaikan tegangan semakin lambat. Dari grafik terlihat pada saat waktu *charge* mencapai $5RC$ tegangan kapasitor sama dengan tegangan sumber. Di sini berarti kapasitor sudah terisi penuh. Proses *charge* dan *discharge* pada kapasitor dimanfaatkan sebagai filter sebuah *power supply*.

2.3.4. Reaktansi Kapasitor.

Reaktansi kapasitor (X_C) adalah nilai kapasitor sebagai hambatan pada tegangan AC. Seperti pada resistansi, satuan reaktansi adalah dalam Ω (Ohm). Tetapi nilai perhitungan nilai reaktansi lebih kompleks dari resistansi, karena dipengaruhi oleh frekuensi. Perhitungan untuk nilai reaktansi kapasitor dirumuskan dengan :

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.12)$$

dimana ,

X_C = Reaktansi Kapasitor dalam ohm (Ω)

C = Kapasitif dalam farad (F)

F = frekuensi dalam hertz (Hz)

2.4. Operational Amplifier

Operational Amplifier atau di singkat op-amp merupakan salah satu komponen analog yang populer digunakan dalam berbagai aplikasi rangkaian elektronika.

Syarat ideal dari suatu *operational amplifier* ialah :

- Impedansi *input* (Z_{in}) besar sekali.
- Impedansi *output* (Z_{out}) kecil sekali.
- Gain (A) besar .
- Memiliki *bandwidth* yang besar sekali.
- Tidak ada beda tegangan antara kaki tegangan positif dan kaki tegangan negatif ($E_d = 0$).
- Tidak ada tegangan *offset*.

Ada dua aturan penting dalam melakukan analisa rangkaian op-amp berdasarkan karakteristik op-amp ideal. Aturan ini dalam beberapa literatur dinamakan *golden rule*, yaitu :

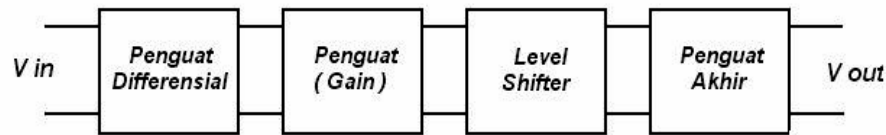
- Aturan 1 : perbedaan tegangan antara input v_+ dan v_- adalah nol ($v_+ - v_- = 0$ atau $v_+ = v_-$)
- Aturan 2 : arus pada input Op-amp adalah nol ($i_+ = i_- = 0$)

Pada perencanaan sistem ini, *operational amplifier* (op-amp) dioperasikan sebagai *comparator* dan *non inverting amplifier*.

2.4.1. Diagram Op-Amp

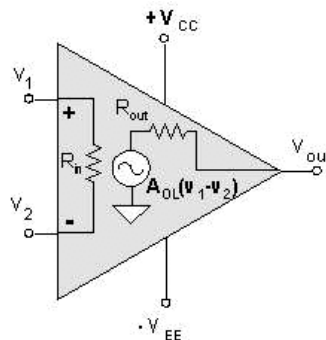
Op-amp di dalamnya terdiri dari beberapa bagian, yang pertama adalah penguat diferensial, lalu ada tahap penguatan (*gain*), selanjutnya ada rangkaian penggeser level (*level shifter*) dan kemudian penguat akhir yang biasanya dibuat

dengan penguat *push-pull* kelas B. Gambar 2.14.(a) berikut menunjukkan diagram dari op-amp yang terdiri dari beberapa bagian tersebut.



Gambar 2.14.(a) Blok Diagram Op-amp

Sumber : Taufik, Electronic Lab., *Penguat Operasional*, 4 Oktober 2005,
< <http://www.electroniclab.com/forum> >.



Gambar 2.14.(b) Skematik dan Simbol Op-Amp

Sumber : Taufik, Electronic Lab., *Penguat Operasional*, 4 Oktober 2005,
< <http://www.electroniclab.com/forum> >.

Simbol op-amp adalah seperti pada gambar 2.14.(b) dengan 2 input, *non-inverting* (+) dan input *inverting* (-). Umumnya op-amp bekerja dengan *dual supply* (+V_{cc} dan -V_{ee}) namun banyak juga op-amp dibuat dengan *single supply* (V_{cc} - *ground*). Simbol rangkaian di dalam op-amp pada gambar-2(b) adalah parameter umum dari sebuah op-amp. R_{in} adalah resistansi input yang nilai idealnya infinit (tak terhingga). R_{out} adalah resistansi output dan besar resistansi idealnya 0 (nol). Sedangkan A_{OL} adalah nilai penguatan open loop dan nilai idealnya tak terhingga.

2.4.2. Parameter Penting pada Op-Amp

Saat ini banyak terdapat tipe-tipe op-amp dengan karakteristik yang spesifik. Op-amp *type* 741 dalam kemasan IC DIP 8 pin sudah dibuat sejak tahun

1960-an. Untuk tipe yang sama, tiap pabrik mengeluarkan seri IC dengan inisial atau nama yang berbeda. Misalnya dikenal MC1741 dari motorola, LM741 buatan National Semiconductor, SN741 dari Texas Instrument dan lain sebagainya.³ Tergantung dari teknologi pembuatan dan desain IC-nya, karakteristik satu op-amp dapat berbeda dengan op-amp lain. Tabel 1.2. menunjukkan beberapa parameter op-amp yang penting beserta nilai idealnya dan juga contoh real dari parameter LM741.

Tabel 1.2. Parameter Op-Amp yang Penting

Parameter	Simbol	Op-Amp Ideal	LM741
<i>Open Loop Voltage Gain</i>	A_{OL}	<i>Infinite</i>	100.000
<i>Unity Gain Frequency</i>	F_{unity}	<i>Infinite</i>	1MHz
<i>Input Resistance</i>	R_{in}	<i>Infinite</i>	2M Ω
<i>Output Resistance</i>	R_{out}	0	75 Ω
<i>Input Bias Current</i>	$I_{in(bias)}$	0	80nA
<i>Input Offset Current</i>	$I_{in(off)}$	0	20nA
<i>Input Offset Voltage</i>	$V_{in(off)}$	0	2mV
<i>Slew Rate</i>	SR	<i>Infinite</i>	0,5V/us
<i>Common Mode Rejection Ratio</i>	CMRR	<i>Infinite</i>	90dB

Sumber : Taufik, Electronic Lab., *Penguat Operasional*, 4 Oktober 2005, < <http://www.electronclab.com/forum> >.

- *Open Loop Voltage Gain*

Op-amp idealnya memiliki penguatan *open-loop* (A_{OL}) yang tak terhingga. Namun pada prakteknya op-amp semisal LM741 memiliki penguatan yang terhingga kira-kira 100.000 kali. Sebenarnya dengan penguatan yang sebesar ini, sistem penguatan op-amp menjadi tidak stabil. Input diferensial yang amat kecil saja sudah dapat membuat outputnya menjadi saturasi.

- *Unity Gain Frequency*

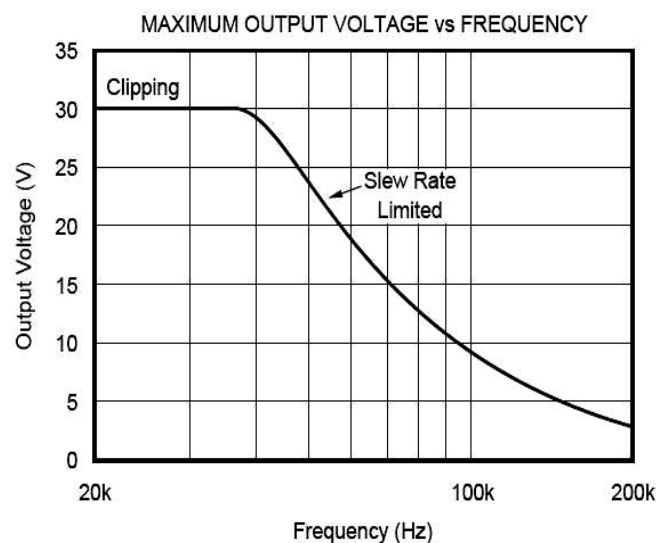
Op-amp ideal mestinya bisa bekerja pada frekuensi berapa saja mulai dari sinyal dc sampai frekuensi giga Hertz. Parameter *unity-gain frequency* menjadi

³ Pallas, Abraham, *Electronic Devices and Circuit Analysis*. New York : Delmar Publisher Inc, 1986.p.433.

penting jika op-amp digunakan untuk aplikasi dengan frekuensi tertentu. Parameter A_{OL} biasanya adalah penguatan op-amp pada sinyal DC. Response penguatan op-amp menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi sinyal input. Op-amp LM741 misalnya memiliki *unity-gain frequency* sebesar 1 MHz. Ini berarti penguatan op-amp akan menjadi 1 kali pada frekuensi 1 MHz. Jika perlu merancang aplikasi pada frekuensi tinggi, maka pilihlah op-amp yang memiliki *unity-gain frequency* lebih tinggi.

- *Slew Rate*

Di dalam op-amp kadang ditambahkan beberapa kapasitor untuk kompensasi dan mereduksi *noise*. Namun kapasitor ini menimbulkan kerugian yang menyebabkan *response* op-amp terhadap sinyal input menjadi lambat. Op-amp ideal memiliki parameter *slew-rate* yang tak terhingga. Sehingga jika input berupa sinyal kotak, maka outputnya juga kotak. Tetapi karena ketidak idealan op-amp, maka sinyal output dapat berbentuk ekponensial.



Gambar 2.15. *Slew Rate*

Sumber : National Semiconductor Corp., *LM741*, 25 Oktober 2005, <<http://www.national.com/OpAmp/LM741.htm>>.

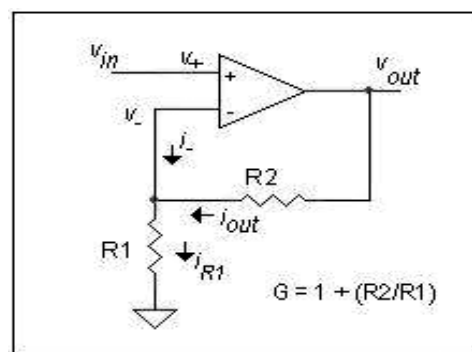
- *Common Mode Rejection Ratio*

Parameter ini cukup penting untuk menunjukkan kinerja op-amp tersebut. Op-amp dasarnya adalah penguat diferensial dan mestinya tegangan input yang

dikuatkan hanyalah selisih tegangan antara input v_1 (*non-inverting*) dengan input v_2 (*inverting*). Karena ketidak-idealannya op-amp, maka tegangan persamaan dari kedua input ini ikut juga dikuatkan. Parameter CMRR diartikan sebagai kemampuan op-amp untuk menekan penguatan tegangan ini (*common mode*) sekecil-kecilnya. CMRR didefinisikan dengan rumus $CMRR = A_{DM}/A_{CM}$ yang dinyatakan dengan satuan dB. Contohnya op-amp dengan $CMRR = 90$ dB, ini artinya penguatan A_{DM} (*differential mode*) adalah kira-kira 30.000 kali dibandingkan penguatan A_{CM} (*common mode*). Kalau CMRR-nya 30 dB, maka artinya perbandingannya kira-kira hanya 30 kali. Kalau diaplikasikan secara real, misalkan tegangan input $v_1 = 5.05$ volt dan tegangan $v_2 = 5$ volt, maka dalam hal ini tegangan diferensialnya (*differential mode*) = 0.05 volt dan tegangan persamaannya (*common mode*) adalah 5 volt. Dengan CMRR yang makin besar maka op-amp diharapkan akan dapat menekan penguatan sinyal yang tidak diinginkan (*common mode*) sekecil-kecilnya. Jika kedua pin input dihubungkan singkat dan diberi tegangan, maka output op-amp idealnya nol. Dengan kata lain, op-amp dengan CMRR yang semakin besar akan semakin baik.

2.4.3. Non-Inverting Amplifier

Prinsip utama rangkaian penguat *non-inverting* adalah seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.16. Seperti namanya, penguat ini memiliki masukan yang dibuat melalui input non-inverting. Dengan demikian tegangan keluaran rangkaian ini akan satu fasa dengan tegangan inputnya.



Gambar 2.16. Rangkaian *Non-Inverting Amplifier*

Sumber : Taufik, Electronic Lab., *Penguat Operasional*, 4 Oktober 2005,
< <http://www.electroniclab.com/forum> >.

$$V_{in} = V_+ = V_-$$

$$I_{OUT} = \frac{(V_{OUT} - V_-)}{R2} = \frac{(V_{OUT} - V_{IN})}{R2} \quad (2.13)$$

$$I_{R1} = \frac{V_{in}}{R1}$$

Berdasarkan hukum Kirchoff :

$$I_{R1} = I_{out} + I_- \quad (2.14)$$

Aturan nomor 2 menyebutkan bahwa $I_- = 0$.

Maka persamaan menjadi $I_{out} = I_{R1}$, sehingga diperoleh bahwa :

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.15)$$

2.5. Power Supply

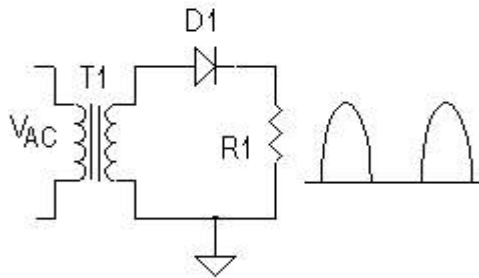
Perangkat elektronika mestinya dicatu oleh sumber tegangan arus searah DC (*direct current*) yang stabil agar dapat bekerja dengan baik. Baterai atau *accu* adalah contoh sumber tegangan DC. Namun untuk aplikasi yang membutuhkan catu daya lebih besar, sumber dari baterai tidak cukup. Sumber tegangan yang besar adalah sumber tegangan arus bolak-balik AC (*alternating current*) dari pembangkit tenaga listrik. Untuk itu diperlukan suatu perangkat yang dapat mengubah sumber tegangan arus bolak balik (AC) menjadi sumber tegangan arus searah (DC) sebesar tegangan yang diharapkan.. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.1. bahwa *power supply* memiliki 3 rangkaian utama, yaitu :

- *Rectifier* (penyearah)
- *Filter* (perata), dan
- *Regulator*

2.5.1. Rectifier (penyearah)

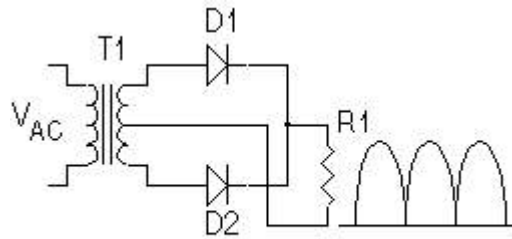
Bagian ini berfungsi untuk merubah tegangan AC menjadi DC. Prinsip *rectifier* (*penyearah*) yang paling sederhana ditunjukkan pada gambar 2.17. Transformator diperlukan untuk menurunkan tegangan AC dari jala-jala listrik

pada kumparan primernya menjadi tegangan AC yang lebih kecil pada kumparan sekundernya

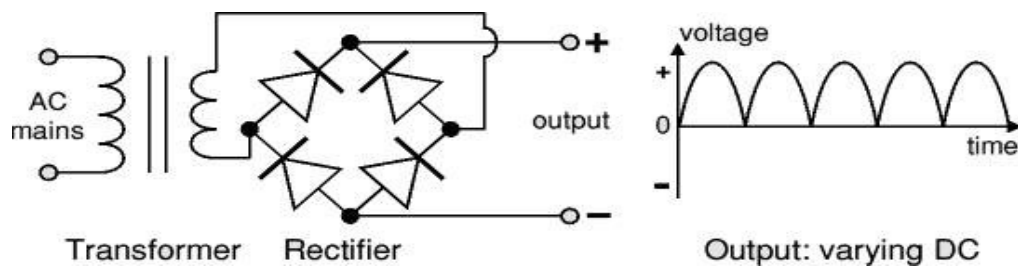


Gambar 2.17. *Half wave Rectifier*

Pada rangkaian ini, dioda berperan untuk hanya meneruskan tegangan positif ke beban RL. Ini yang disebut dengan penyearah setengah gelombang (*half wave*). Pada *half wave*, frekuensi *output* yang dihasilkan adalah sama dengan frekuensi *input*. Untuk mendapatkan penyearah gelombang penuh (*full wave*) diperlukan transformator dengan *center tap* (CT) seperti pada gambar 2.18. Tegangan positif fasa yang pertama diteruskan oleh D1 sedangkan fasa yang berikutnya dilewatkan melalui D2 ke beban R1 dengan CT transformator sebagai *common ground*.. Dengan demikian beban R1 mendapat suplai tegangan gelombang penuh seperti gambar di atas. Untuk beberapa aplikasi seperti misalnya untuk men-catu motor dc yang kecil atau lampu pijar DC, bentuk tegangan seperti ini sudah cukup memadai. Walaupun terlihat di sini tegangan *ripple* dari kedua rangkaian masih sangat besar. Rangkaian full wave rectifier juga dapat dibentuk dengan transformator non-CT, namun diperlukan empat buah dioda untuk desainnya. Rangkaian ini disebut *bridge rectifier* (penyearah jembatan) seperti pada gambar 2.19. Berbeda dengan half wave, frekuensi tegangan *output* kedua rangkaian ini adalah 2 kali frekuensi tegangan *inputnya*.



Gambar 2.18. Full wave Rectifier



Gambar 2.19. Bridge Rectifier

Sumber : Marshall Brain, *Power Supply* , 14 September 2005,
<<http://www.kpsec.freeuk.com/power supply.html> >

Untuk ketiga jenis rectifier di atas, maka diperoleh persamaan seperti pada tabel 1.3. di mana:

V_P = Tegangan puncak (AC)

V_{AVG} = Tegangan rata - rata (DC)

Π = Konstanta (3,14)

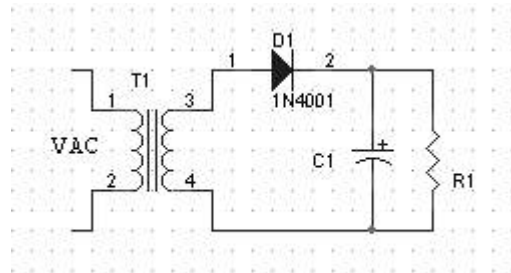
Tabel 1.3. Rumus Rectifier

PARAMETER	RECTIFIER		
	HALF WAVE	FULL WAVE	BRIDGE
V_{AVG}	$\frac{V_P}{\pi}$	$\frac{2V_P}{\pi}$	$\frac{2V_P}{\pi}$
V_P	$\sqrt{2}V_{RMS}$	$\sqrt{2}V_{RMS}$	$\sqrt{2}V_{RMS}$

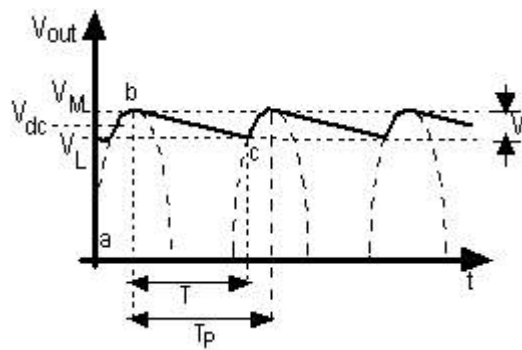
Sumber : Malvino, Albert Paul, *Electronic Principles Third Edition*. New York : Mc-Graw Hill Companies, 1999. p.59.

2.5.2. Filter (Perata)

Gambar 2.20 adalah rangkaian penyearah setengah gelombang dengan filter kapasitor C yang paralel terhadap beban R. Ternyata dengan filter ini bentuk gelombang tegangan keluarannya bisa menjadi rata.



Gambar 2.20. *Half wave* dengan filter Kapasitor.



Gambar 2.21. Bentuk Gelombang Dengan Filter Kapasitor.

Sumber : Marshall Brain, *Power Supply* , 14 September 2005,
<http://www.kpsec.freeuk.com/power_supply.html >

Gambar 2.21 menunjukkan bentuk keluaran tegangan DC dari rangkaian penyearah setengah gelombang dengan filter kapasitor. Garis b-c kira-kira adalah garis lurus dengan kemiringan tertentu, dimana pada keadaan ini arus untuk beban R1 dicatu oleh tegangan kapasitor. Sebenarnya garis b-c bukanlah garis lurus tetapi eksponensial sesuai dengan sifat pengosongan kapasitor. Kemiringan kurva b-c tergantung dari besar arus I yang mengalir ke beban R. Jika arus $I = 0$ (tidak ada beban) maka kurva b-c akan membentuk garis horizontal. Namun jika beban arus semakin besar, kemiringan kurva b-c akan semakin tajam. Tegangan yang keluar akan berbentuk gigi gergaji dengan tegangan *ripple* yang besarnya adalah :

$$V_r = V_M - V_L \quad (2.16)$$

dan tegangan dc ke beban adalah :

$$V_{DC} = V_M + \frac{V_M}{2} \quad (2.17)$$

Rangkaian penyearah yang baik adalah rangkaian yang memiliki tegangan *ripple* paling kecil. V_L adalah tegangan *discharge* atau pengosongan kapasitor C, sehingga dapat ditulis :

$$V_L = V_M e^{-T/RC} \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan 2.17 ke persamaan 2.15, sehingga diperoleh :

$$V_R = V_M (1 - e^{-T/RC}) \quad (2.19)$$

Jika $T \ll RC$, dapat ditulis :

$$e^{-T/RC} = 1 - \frac{T}{RC} \quad (2.20)$$

Sehingga jika ini disubsitisi ke rumus (4) dapat diperoleh persamaan yang lebih sederhana :

$$V_R = V_M \left(\frac{T}{RC} \right) \quad (2.21)$$

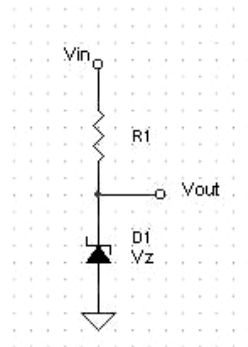
V_M/R tidak lain beban, sehingga dengan ini terlihat hubungan antara beban arus I dan nilai kapasitor C terhadap tegangan *ripple* V_r . Perhitungan ini efektif untuk mendapatkan nilai tegangan ripple yang diinginkan.

$$V_R = Ix \frac{T}{C} \quad (2.22)$$

Rumus tersebut mengatakan, jika arus beban I semakin besar, maka tegangan *ripple* akan semakin besar. Sebaliknya jika kapasitansi C semakin besar, tegangan *ripple* akan semakin kecil. Untuk penyederhanaan biasanya dianggap $T=Tp$, yaitu periode satu gelombang sinus dari tegangan AC yang frekuensinya 50Hz atau 60Hz. Jika frekuensi jala-jala listrik 50Hz, maka $T = Tp = 1/f = 1/50 = 0.02$ det. Ini berlaku untuk penyearah setengah gelombang. Untuk penyearah gelombang penuh, tentu saja fekuensi gelombangnya dua kali lipat, sehingga $T = 1/2 Tp = 0.01$ det.

2.5.3. Regulator

Rangkaian penyearah sudah cukup bagus jika tegangan *ripple*-nya kecil, namun ada masalah stabilitas. Jika tegangan PLN naik/turun, maka tegangan outputnya juga akan naik/turun. Seperti rangkaian penyearah di atas, jika arus semakin besar ternyata tegangan dc keluarannya juga ikut turun. Untuk beberapa aplikasi perubahan tegangan ini cukup mengganggu, sehingga diperlukan komponen aktif yang dapat meregulasi tegangan keluaran ini menjadi stabil. Rangkaian *regulator* yang paling sederhana ditunjukkan pada gambar 2.22. Pada rangkaian ini, zener bekerja pada daerah *breakdown*, sehingga menghasilkan tegangan output yang sama dengan tegangan zener atau $V_{out} = V_z$.



Gambar 2.22. Regulator dengan Zener

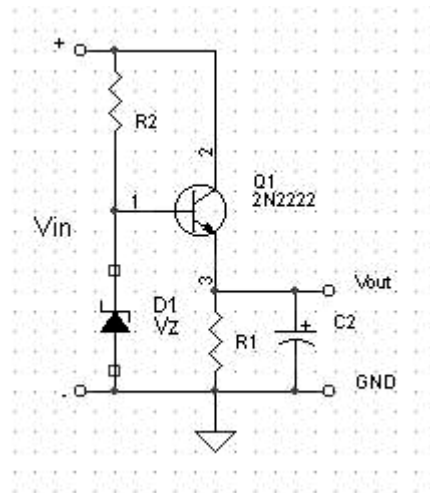
Prinsip rangkaian catu daya yang seperti ini disebut *shunt regulator*, salah satu ciri khasnya adalah komponen *regulator* yang paralel dengan beban. Ciri lain dari *shunt regulator* adalah, rentan terhadap *short-circuit*. Perhatikan jika V_{out} terhubung singkat (*short-circuit*) maka arusnya tetap $I = V_{in}/R_1$. Disamping *regulator shunt*, ada juga yang disebut dengan *regulator seri*. Prinsip utama *regulator seri* seperti rangkaian pada gambar 2.23. Pada rangkaian ini tegangan keluarannya adalah :

$$V_{OUT} = V_Z - V_{BE} \quad (2.23)$$

V_{BE} adalah tegangan *basis-emitor* dari transistor Q1 yang besarnya antara 0.2 - 0.7 volt tergantung dari jenis transistor yang digunakan. Dengan mengabaikan arus I_B yang mengalir pada basis transistor, dapat dihitung besar tahanan R_2 yang diperlukan adalah :

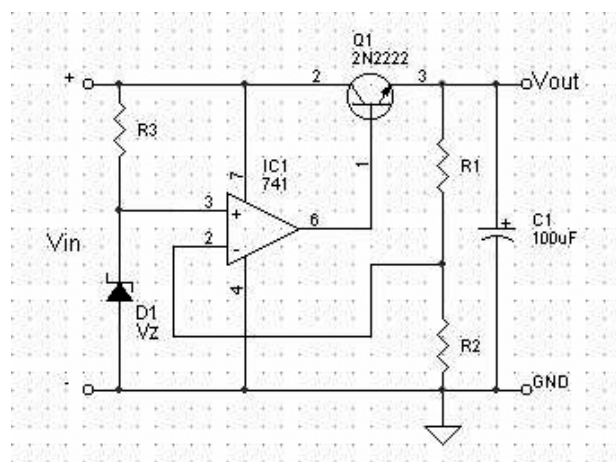
$$R2 = (V_{in} - V_Z) / I_Z \quad (2.24)$$

I_Z adalah arus minimum yang diperlukan oleh dioda zener untuk mencapai tegangan *breakdown* zener tersebut. Besar arus ini dapat diketahui dari *datasheet*.



Gambar 2.23. Rangkaian *Regulator* Seri

Jika diperlukan catu arus yang lebih besar, tentu perhitungan arus basis I_B pada rangkaian di atas tidak bisa diabaikan lagi. Dimana seperti yang diketahui, besar arus I_C akan berbanding lurus terhadap arus I_B atau dirumuskan dengan $I_C = \beta I_B$. Untuk keperluan itu, transistor $Q1$ yang dipakai bisa diganti dengan transistor *darlington* yang biasanya memiliki nilai β yang cukup besar. Dengan transistor *darlington*, arus basis yang kecil bisa menghasilkan arus I_C yang lebih besar.



Gambar 2.24. *Regulator* Dengan OP-Amp

Teknik regulasi yang lebih baik lagi adalah dengan menggunakan Op-Amp untuk men-*drive* transistor Q1, seperti pada rangkaian gambar 2.24. Dioda zener disini tidak langsung memberi umpan ke transistor Q1, melainkan sebagai tegangan referensi bagi Op-Amp IC1. Umpan balik pada pin negatif dari sebuah Op-amp adalah cuplikan dari tegangan keluar dari sebuah *regulator*, yaitu :

$$V_{in-} = (R_2 / (R_1 + R_2)) \times V_{out} \quad (2.25)$$

Jika tegangan keluar V_{out} meningkat, maka tegangan $V_{in(-)}$ juga akan naik sampai tegangan ini sama dengan tegangan referensi V_z . Demikian sebaliknya jika tegangan keluar V_{out} menurun, misalnya karena arus ke beban meningkat, Op-amp akan menjaga kestabilan di titik referensi V_z dengan memberi arus I_B ke transistor Q1. Sehingga pada setiap saat Op-amp menjaga kestabilan, maka berlaku :

$$V_{in+} = V_z \quad (2.26)$$

Dengan mengabaikan tegangan V_{BE} transistor Q1 dan mensubstitusi rumus (2.25) ke dalam rumus (2.24) maka diperoleh hubungan matematis :

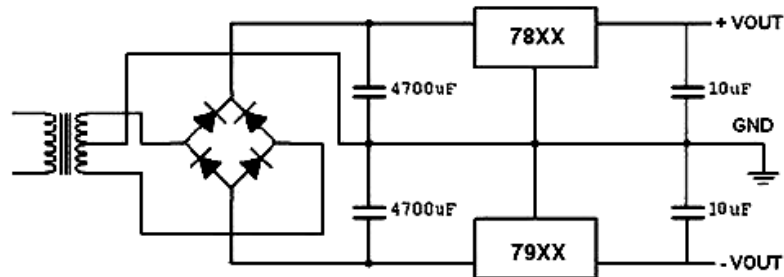
$$V_{out} = ((R_1 + R_2) / R_2) \times V_z \quad (2.27)$$

Jadi tegangan output ditentukan oleh besar R1 dan R2.

2.5.4. IC *Regulator* LM78XX dan LM79XX.

Sekarang tidak perlu susah payah lagi mencari op-amp, transistor dan komponen lainnya untuk merealisasikan rangkaian *regulator* seperti di atas. Karena rangkaian semacam ini sudah dikemas menjadi satu IC *regulator* tegangan tetap. Komponen seri 78XX sebagai *regulator* tegangan tetap positif dan seri 79XX yang merupakan *regulator* untuk tegangan tetap negatif. Bahkan komponen ini biasanya sudah dilengkapi dengan pembatas arus (*current limiter*) dan juga pembatas suhu (*thermal shutdown*). Komponen ini hanya tiga pin dan dengan menambah beberapa komponen saja sudah dapat menjadi rangkaian catu daya yang ter-regulasi dengan baik. Misalnya 7805 adalah *regulator* untuk mendapat tegangan 5 volt, 7812 *regulator* tegangan 12 volt dan seterusnya. Sedangkan seri

79XX misalnya adalah 7905 dan 7912 yang berturut-turut adalah *regulator* tegangan negatif 5 dan 12 volt.



Gambar 2.25. *Regulator* menggunakan IC 7805 dan 7905

2.5.5. IC *Regulator* LM317

Selain dari *regulator* tegangan tetap ada juga IC *regulator* yang tegangannya dapat diatur. Prinsipnya sama dengan *regulator* OP-amp yang dikemas dalam satu IC misalnya LM317 untuk *regulator variable* positif. Bedanya resistor R1 dan R2 ada di luar IC, sehingga tegangan keluaran dapat diatur melalui resistor eksternal tersebut. Namun perlu diketahui supaya rangkaian *regulator* dengan IC tersebut bisa bekerja, tegangan input harus lebih besar dari tegangan *output regulator*nya. Biasanya perbedaan tegangan V_{in} terhadap V_{out} yang direkomendasikan ada di dalam *datasheet* komponen tersebut. Pemakaian *heatshink* (aluminium pendingin) dianjurkan jika komponen ini dipakai untuk men-catu arus yang besar. Di dalam *datasheet*, komponen seperti ini maksimum bisa dilewati arus mencapai 1 A.

2.5.6. Parameter pada *Power Supply*.

Kualitas sebuah *power supply* ditentukan oleh 2 hal utama, yaitu :

- *Load Regulation*, adalah parameter yang menunjukkan seberapa besar perubahan tegangan pada beban bila terjadi perubahan arus. Semakin kecil nilai *load regulation*, semakin baik kualitas *power supply*. Untuk *power supply* laboratorium, nilai *load regulation* kurang dari 1 %. Untuk menghitung nilai *load regulation*, digunakan rumus :

$$\text{Load Regulation} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (2.28)$$

Dimana V_{NL} = Tegangan tanpa beban

V_{FL} = Tegangan dengan beban maksimal

- *Line Regulation*, adalah perbandingan antara perubahan tegangan *input* dengan perubahan tegangan *output*. Sama dengan *load regulation*, semakin kecil nilai *line regulation*, semakin baik kualitas *power supply*. Untuk *standard* laboratorium, nilai ini juga kurang dari 1%. *Line Regulation* dirumuskan dengan :

$$\text{Line Regulation} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta V_{OUT}} \times 100\% \quad (2.29)$$

2.6. ICL 7107

ICL 7107 merupakan ADC $3\frac{1}{2}$ digit yang digunakan untuk keperluan *display*. IC ini dilengkapi dengan *seven segmen decoder*, *display driver*, referensi, dan *clock*. Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh ICL 7107 antara lain :

- Disipasi daya rendah, umumnya kurang dari 10 mW.
- *Noise* rendah, kurang dari $15\mu V_{P-P}$.
- Pembacaan data *input* yang akurat.
- Internal *Clock* dan referensi.

Namun demikian, *range* data input yang mampu dibaca adalah 1mV-2V. Karena itu, masih diperlukan rangkaian pengkondisi sinyal (seperti *inverting amplifier*, *noninverting amplifier*) untuk keperluan *display* tegangan yang lebih tinggi. Keterangan lebih detail tentang IC ini dapat dilihat pada lampiran.

2.7. Kabel

2.7.1. Konstruksi Kabel.

Dalam rangkaian elektronik, kabel berfungsi sebagai penghantar arus listrik. Pada dasarnya konstruksi kabel terdiri dari 4 macam, yaitu :

- *Single Conductor* (kabel tunggal), dibedakan menjadi 2 macam yaitu tanpa isolator maupun dengan isolator.
- *Multiconductor* (kabel serabut), terdiri dari banyak kawat dan dilengkapi isolator.
- *Twisted pairs*, terdiri dari 2 pasang kabel yang biasanya saling membelit.
- Coaxial, merupakan kawat yang diselubungi oleh bagian konduktor yang lebih kecil.

2.7.2. Resistansi Kabel.

Sebagai penghantar arus, kawat pada kabel juga memiliki resistansi. Perhitungan resistansi sebuah penghantar dirumuskan sebagai :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2.28)$$

Dimana,

R = resistansi kawat (Ω)

ρ = resistivitas kawat (Ωm)

l = panjang kawat (m)

A = Luas penampang kawat (m^2)

Dari persamaan di atas, tampak bahwa resistansi kawat pada kabel sebanding dengan panjangnya dan berbanding terbalik dengan luas penampangnya. Semakin luas penampang kabel, maka resistansi yang dimiliki juga akan semakin kecil sehingga kemampuannya untuk menghantarkan arus listrik juga semakin besar.

2.7.3. Kapasitas Penyaluran

Kapasitas penyaluran lewat kabel ditentukan oleh besarnya arus yang lewat melalui kabel tersebut. Arus yang diizinkan melewati kabel dirumuskan dengan :

$$I = \sqrt{\frac{1}{nR} \left(\frac{\Delta T}{R_{TH}} \right) - W_d} \quad (2.29)$$

dimana,

- ΔT = Selisih suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- n = jumlah inti (kawat) kabel
- R = Resistansi kabel
- R_{TH} = Tahanan termis ($^{\circ}\text{-cm/W}$)
- W_d = Rugi dielektrik (W/cm)

Dari persamaan 2.28 dan 2.29 dapat disimpulkan bahwa arus maksimal yang dapat mengalir melalui kabel berbanding lurus dengan luas penampang.