BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Padillah, dkk, 2014, merancang Konverter DC-DC tipe *Boost* berbasis *Mikrokontroler* ATMEGA 8535. Pada penelitian ini tegangan tegangan DC yang diregulasi tegangan keluarannya sesuai dengan kebutuhan, penelitian ini membuat tegangan keluaran *converter* yang dikendalikan dengan mengatur besar *duty cycle* menggunakan PWM yang dihasilkan dari *Mikrokontroler*. Hasil dari penelitian ini adalah dengan bertambahnya *duty cyle* dan beban sangat mempengaruhi kerja dan *efisiensi converter*, semakin besar beban dan *duty cyle* maka *efisiensi* konverter *boost* semakin turun. *Efisiensi* konverter *boost* tertinggi terjadi pada *duty cycle* 20 % pada beban 100 Ω yaitu sebesar 96,68 % sedangkan terendah terjadi pada beban 30 Ω *duty cyle* 35%.

Mazta, dkk, 2016, membuat rancang bangun *Interleaved Boost Converter* berbasis Arduino. Pada *converter* konvensional arus masukan dan tegangan keluran masih menghasilkan *ripple* yang cukup besar. Pada penelitian ini metode yang ditawarkan adalah menggunakan teknik *interleaved* pada *boost converter*. Hasil dari penelitian yang menggunakan simulasi dan pengujian perangkat keras *interleaved boost converter* dengan nilai *duty cycle* yang bervariasi, terlihat penurunan besar nilai *ripple* pada arus masukan dan tegangan keluaran *boost converter* jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil *boost* konverter konvensional.

Anung, dkk, 2014, meningkatkan *efisiensi* konverter DC-DC penaik tegangan dengan teknik *zero voltage switching* (ZVS) untuk koreksi faktor daya beban nonlinier, *efisiensi* dari konverter DC-DC idealnya 100% tapi pada kenyataanya kurang dari itu. Dengan rendahnya *efisiensi* dari konverter maka daya listrik yang dapat dimanfaatkan oleh beban akan berkurang, untuk waktu yang lama energi listrik yang hilang pada saklar semikondukor tidak dapat diabaikan. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan diatas pada penelitian ini adalah metode *Zero Voltage Switching* (ZVS). Metode ZVS ini menerapkan pensaklaran tegangan nol sewaktu turn-on, dengan bantuan komponen induktor resonansi (L_r) dan kapasitor resonansi (C_r). Hasil dari penelitian ini menunjukan bahwa terjadi peningkatan rata-rata *efisiensi* konverter DC-DC penaik tegangan yang digunakan sebagai koreksi faktor daya beban nonlinier dengan penerapan metode *Zero Voltage Switching* (ZVS) sebesar 4%.

Agarwal, dkk, 2014, melakukan penelitian untuk mengimplementasikan *inverter* satu phase 2 level yang menggunakan konverter DC sebagai masukan dari *inverter*. Tegangan masukan *inverter* diperoleh dari konveter DC ke DC dimana konverter DC ke DC menggunakan metode topologi loop tertutup, untuk menghasilkan 24 V menjadi 373 V pada konverter DC-DC ini menggunakan bantuan PWM yang menggunakan simulasi matlab dan menghasilkan sumber DC 373 V yang digunakaan sebagai sumber *inverter*.

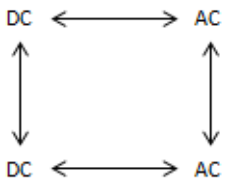
Deswal, dkk, 2008, *Application of Boost Converter for Ride-through Capability of Adjustable Speed Drives during Sag and Swell Conditions*, proses dan konservasi energy adalah dua alasan utama untuk menggunakan *speed drive* yang disesuaikan, namun peningkatan kualitas tegangan merupakan masalah penting yang banyak dihadapi oleh masyarakat komersial dan industri. Pada penelitian ini akan digunakan simulasi topologi konverter terisolasi. Hasil dari penelitian ini dengan topologi konverter terisolasi mampu meningkatkan respon dinamik cukup cepat, untuk merespon kondisi abnormal dan menghindari efek dari peningkatan tegangan yang membengkak di *adjustable speed drive*.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pengertian Konverter

Konverter adalah suatu rangkaian elektronika daya yang bisa mengubah tegangan yang satu menjadi tegangan yang lain. Terdapat empat macam konverter yaitu :

a. Konverter DC ke DC (*Chopper*)
b. Konverter AC ke DC (*Rectifier*)
c. Konverter DC ke AC (*Inverter*)
d. Konverter AC ke AC (*Cycloconverter*)

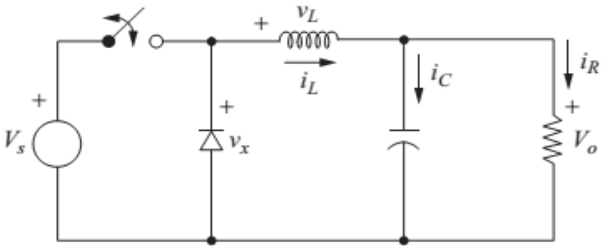


Konverter DC-DC adalah rangkaian elektronika daya yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan DC, keluaran dari konverter DC-DC tersebut bisa lebih kecil atau lebih besar dari tegangan masukannya. Secara umum ada tiga rangkaian dasar konverter DC-DC, yaitu *buck* konverter, *boost* konverter, dan *buck-boost* konverter.

2.2.2. Tipe-tipe konverter DC-DC (*chopper*)

a. *Buck* Konverter

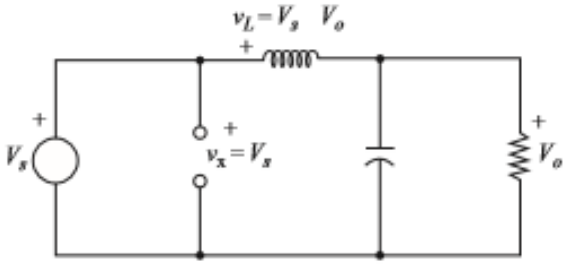
Buck konverter adalah konverter daya yang digunakan untuk mengubah suatu tegangan DC menjadi tegangan DC dengan magnitud yang lebih kecil, seperti halnya transformator pada tegangan AC yang sering kita kenal dengan sebutan transformator *step down*. Konverter *buck* bekerja menggunakan *switch* yang bekerja secara terus menerus (*on-off)* yang dikenal dengan istilah PWM (*Pulse Width Modulasion*) dan *Duty Cycle* mengendalikan frekuensi kerja *switch*. Rangkaian dasar dari *buck* konverter dapat dilihat pada Gambar 2.1.a.



Gambar 2.1.a Rangkaian dasar *buck* konverter
(Daniel, 2011)

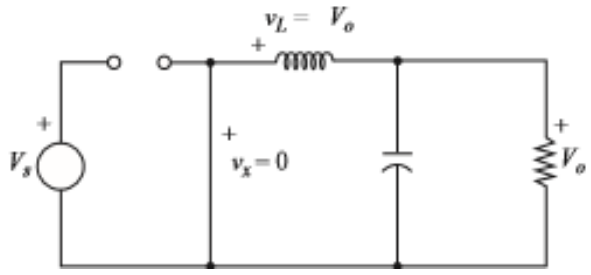
Prinsip kerja dari rangkaian *buck* konverter pada Gambar 2.1.a akan dijelaskan sebagai berikut :

Rangkaian Gambar 2.1.b menjelaskan bahwa pada saat *switch* tertutup maka dioda akan terbuka sehingga induktor mulai menyerap daya pada sumber tegangan.

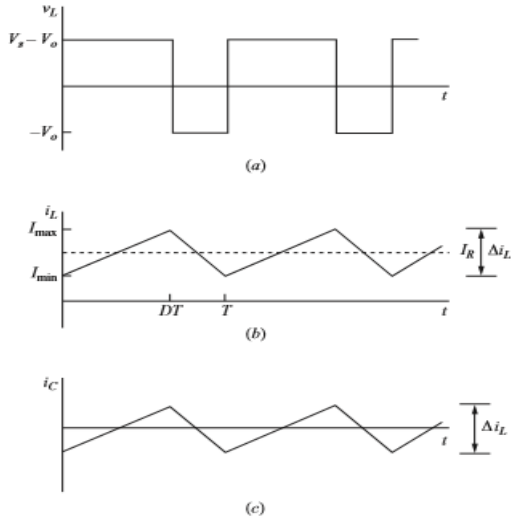


Gambar 2.1.b Rangkaian *buck* konverter pada saat *switch* tertutup
(Daniel, 2011)

Rangkaian Gambar 2.1.c menjelaskan bahwa pada saat *switch* terbuka maka dioda akan tertutup walaupun pada posisi ini tidak terhubung dengan sumber, pada posisi ini daya disuplai dari induktor yang telah menyerap daya selama rangkaian terhubung dengan sumber pada saat posisi *switch* tertutup.



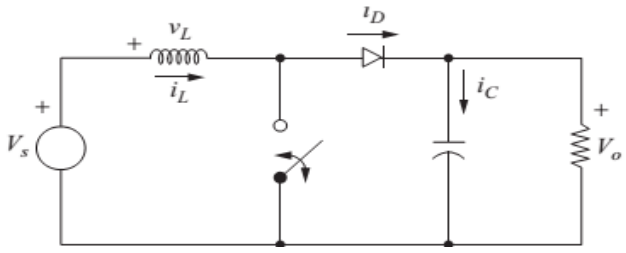
Gambar 2.1.c Rangkaian *buck* konverter saat *switch* terbuka
(Daniel, 2011)



Gambar 2.2 Gelombang keluaran dari *buck* konverter
a). Tegangan induktor, b). Arus induktor, c). Arus kapasitor
(Daniel, 2011)

b. *Boost* Konverter

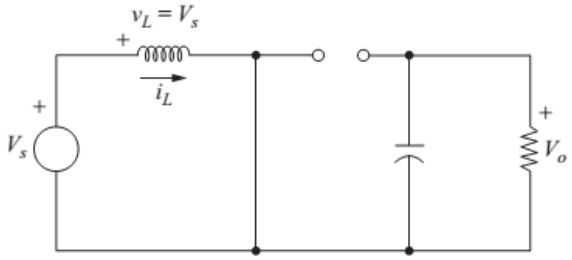
Boost konverter adalah konverter daya yang digunakan untuk mengubah suatu tegangan DC menjadi tegangan DC dengan magnitud yang lebih tinggi, seperti halnya transformator pada tegangan AC yang sering kita kenal dengan sebutan transformtor *step up*. Seperti halnya *buck* konverter, komponen komponen yang digunakan adalah sumber masukan DC, MOSFET, dioda, induktor, kapasitor, rangkaian kontrol serta beban R. Rangkain dasar dari *boost* konverter dapat dilihat pada Gambar 2.3.a.



Gambar 2.3.a Rangkaian dasar *boost* konverter
(Daniel, 2011)

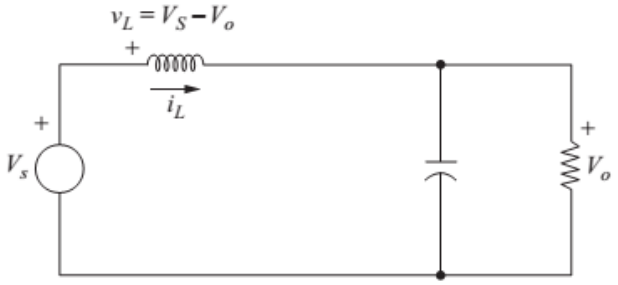
Prinsip kerja dari rangkaian *boost* konverter pada Gambar 2.3.a akan dijelaskan sebagai berikut :

Gambar 2.3.b menjelaskan ketika saklar terbuka dan dioda *off*, maka arus akan mengalir searah jarum jam dari sumber menuju ke induktor (terjadi pengisian arus induktor) polaritas sisi kiri lebih positif daripada sisi kanan.

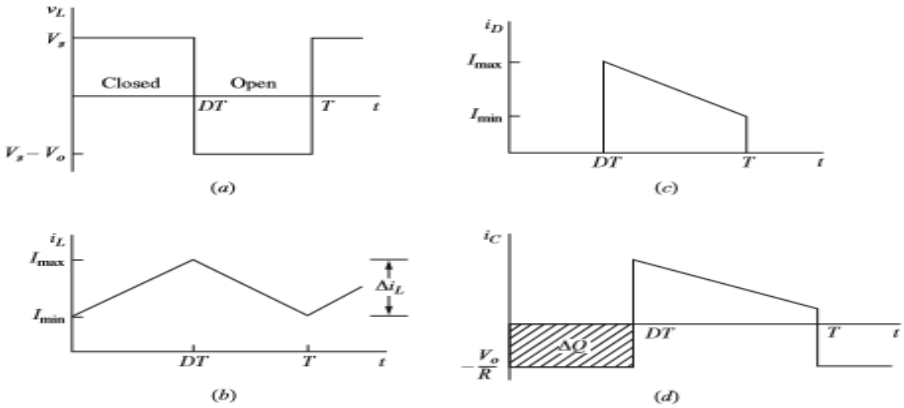


Gambar 2.3.b Rangkaian *boost* konverter saat saklar terbuka
(Daniel, 2011)

Gambar 2.3.c menjelaskan pada saat saklar tertutup dan dioda *on* , arus yang disimpan di induktor akan berkurang karena impedansi yang lebih tinggi. Berkurangnya arus pada induktor menyebabkan induktor tersebut melawannya dengan membalik polaritas (lebih negatif pada sisi kiri). Sehingga arus yang mengalir pada dioda dan pada beban adalah penjumlahan antara arus pada sumber dan arus pada induktor (seri). Disaat yang bersamaan kapasitor juga akan melakukan penyimpanan energi dalam bentuk tegangan. Itulah sebabnya konverter DC-DC tipe *boost* memiliki keluaran yang lebih tinggi dibandingkan masukannya.



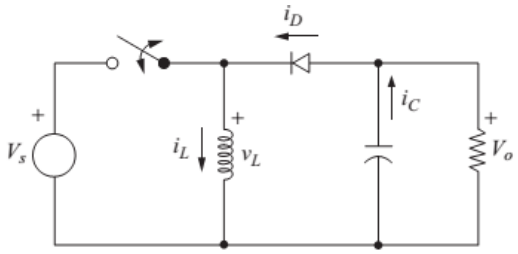
Gambar 2.3.c Rangkaian *boost* konverter saat saklar tertutup
(Daniel, 2011)



Gambar 2.4 Gelombang keluaran dari *boost* konverter
a). Tegangan induktor, b). Arus induktor, c). Arus diode, d) Arus kapasitor
(Daniel, 2011)

c. *Buck-boost* Konverter

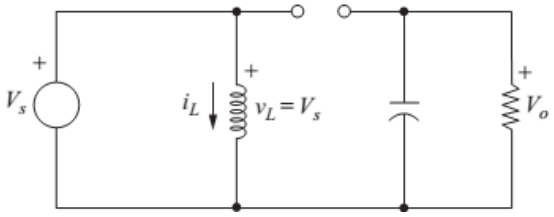
Buck-boost konverter adalah konverter DC yang tegangan keluaran dapat lebih besar atau lebih kecil dari tegangan masukan, *buck-boost* konverter memiliki polaritas tegangan keluaran terbalik dari tegangan masukan. Rangkaian dasar *buck-boost* konverter dapat dilihat pada Gambar 2.5.a.



Gambar 2.5.a Rangkaian konverter *buck-boost* konverter
(Daniel, 2011)

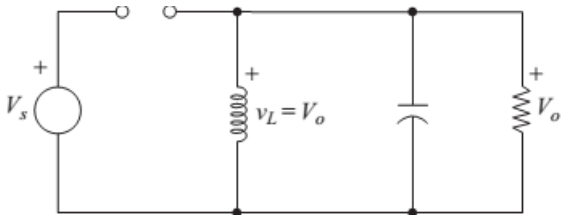
Prinsip kerja dari rangkaian *buck-boost* konverter pada Gambar 2.5.a akan dijelaskan sebagai berikut :

Gambar 2.5.b menjelaskan bahwa pada saat saklar tertutup, maka tegangan masukan langsung terhubung dengan induktor sehingga energi terkumpul pada induktor, dan pada saat yang sama kapasitor menyuplai energi ke beban.

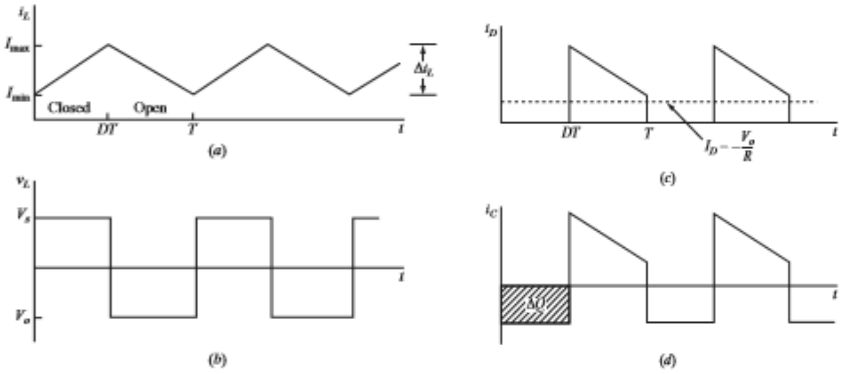


Gambar 2.5.b Rangkaian *buck-boost* konverter saat saklar tertutup
(Daniel, 2011)

Gambar 2.5.c menjelaskan bahwa pada saat saklar terbuka maka induktor terhubung dengan keluaran dan juga kapasitor, sehingga energi ditransfer dari induktor ke kapasitor dan beban.



Gambar 2.5.c Rangkaian *buck-boost* konverter saat saklar terbuka
(Daniel, 2011)



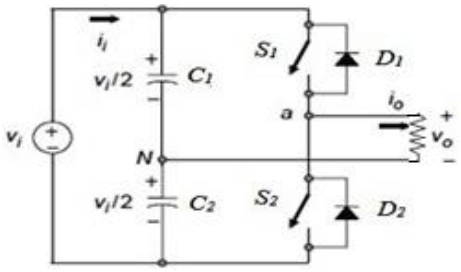
Gambar 2.6 Gelombang keluaran dari konverter *buck-boost*
a). Arus induktor, b). Tegangan Induktor, c). Arus diode, d). Arus kapasitor
(Daniel, 2011)

2.2.3. Pengertian *Inverter*

Inverter adalah rangkaian yang mengubah DC menjadi AC. Atau lebih tepatnya inverter memindahkan tegangan dari sumber DC ke beban AC. Inverter digunakan pada aplikasi seperti *adjustable-speed AC motor drives, uninterruptible power supplies (UPS)*, dan aplikasi AC yang dijalankan dari baterai.

***1. Inverter* 1 fasa**

a. *Inverter* setengah jembatan 1 fasa



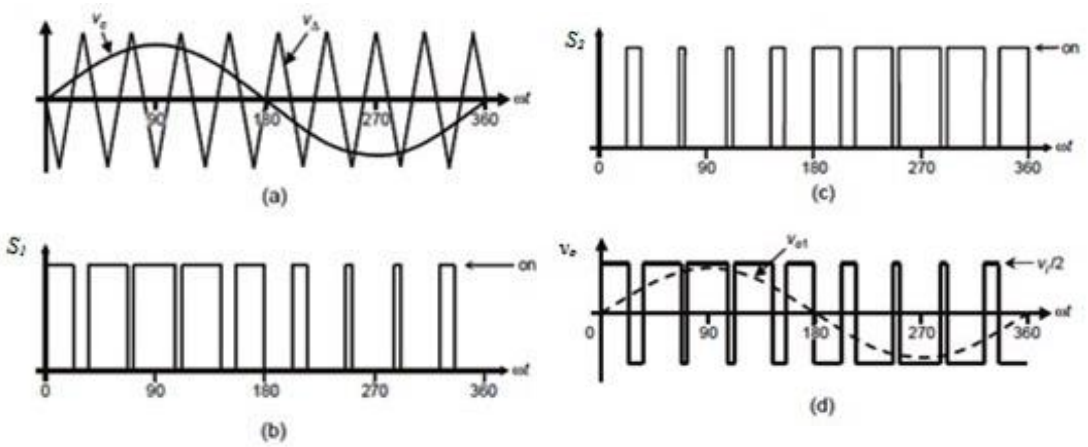
Gambar 2.7 Rangkaian *Inverter* setengah jembatan 1 fasa
(Priyono, 2016)

Pada rangkaian *inverter* diperlukan dua buah kapasitor untuk menghasilkan titik *N* agar tegangan pada setiap kapasitor $\frac{V_i}{2}$ dapat dijaga konstan.

Sakelar S_1 dan S_2 mereprensentasikan saklar elektronis yang mencerminkan komponen semikonduktor daya. Sakelar S_1 dan S_2 tidak boleh bekerja secara serempak karena akan terjadi hubung singkat rangkaian. Kondisi *on* dan *off* dari sakelar S_1 dan S_2 ditentukan dengan teknik modulasi, dalam hal ini menggunakan prinsip PWM. Untuk menghasilkan tegangan keluaran (v_O) satu fasa, terdapat dua kondisi jika Sakelar S_1 dan S_2 dioperasikan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

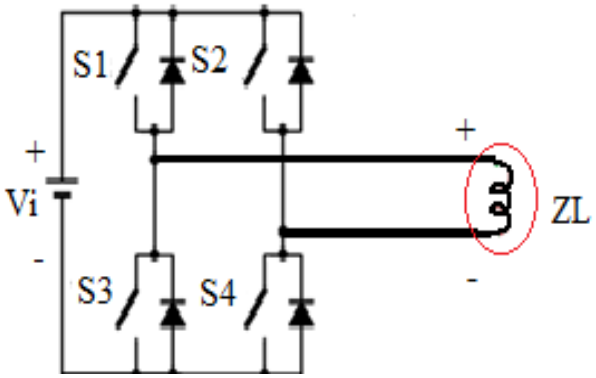
Tabel 2.1 Keadaan penyakelaran pada *Inverter* setengah jembatan 1 fasa

Kondisi Ke -	**Kondisi**	v_O	**Komponen yang aktif**
1.	S_1 *on* dan S_2 *off*	$\frac{V_i}{2}$	S_1 jika $i_O > 0$
			D_1 jika $i_O < 0$
2.	S_1 *off* dan S_2 *on*	$-\frac{V_i}{2}$	D_2 jika $i_O > 0$
			S_2 jika $i_O < 0$



Gambar 2.8 Bentuk gelombang tegangan keluaran *Inverter* setengah jembatan 1 fasa (Priyono, 2016)

***b. Inverter* jembatan 1 fasa**



Gambar 2.9 Rangkaian *Inverter* jembatan 1 fasa
(Fadhli, 2010)

Inverter jembatan adalah rangkaian teori dasar yang digunakan untuk mengubah DC ke AC. *Inverter* jembatan mempunyai pasangan saklar (S1,S2) dan (S3,S4). Keluaran AC didapatkan dari masukan DC dengan membuka dan menutup saklar-saklar pada urutan yang tepat. Tegangan keluaran V_O bisa berupa + V_{DC}, -V_{DC}, atau nol, tergantung pada saklar yang mana tertutup. Rangkaian ekivalen kombinasi saklar full bridge converter diperlihatkan pada Gambar 2.9. Sebagai catatan bahwa S1 dan S4 tidak boleh menutup pada saat yang bersamaan, begitu juga dengan S2 dan S3, yang akan menyebabkan terjadinya short circuit pada sumber DC. Tegangan keluaran dari kondisi pasangan saklar pada rangkaian *Inverter* jembatan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Tegangan keluaran pasangan saklar pada rangkaian *Inverter* jembatan

Kondisi Ke -	Saklar tertutup	Tegangan keluaran
1	S1 & S2	+ VDC
2	S3 & S4	-VDC
3	S1 & S3	0
4	S2 & S4	0

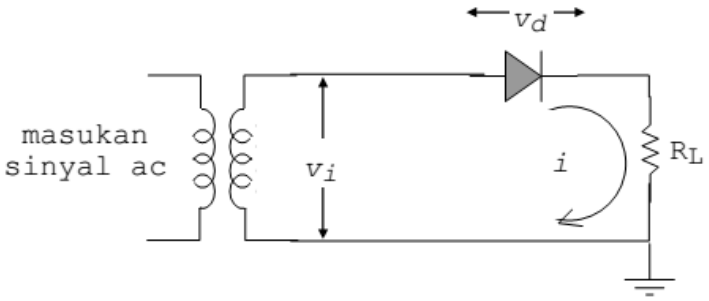
2.2.4. Pengertian Penyearah

Penerapan dioda yang paling banyak dijumpai adalah sebagai penyearah. Penyearah berarti mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Sebagian besar peralatan elektronik membutuhkan sumber daya yang berupa arus searah. Untuk kebutuhan daya dan tegangan yang kecil biasanya cukup digunakan baterai atau *Accu*, namun untuk lebih dari itu diperlukan power *supply* yang berupa penyearah. Beberapa jenis penyearah yang sering kita jumpai adalah sebagai berikut :

a. Penyearah setengah gelombang

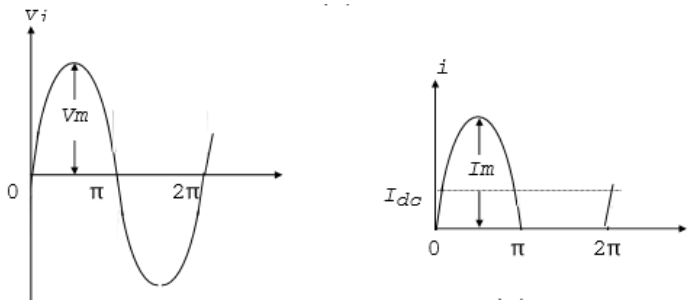
Penyearah yang paling sederhana adalah penyearah setengah gelombang, yaitu yang terdiri dari sebuah dioda. Melihat dari namanya, maka hanya setengah gelombang saja yang akan disearahkan.

Pada Gambar 2.10 rangkaian penyearah setengah gelombang sinyal masukan merupakan sinyal sinus, dioda kita anggap sebagai dioda ideal sehingga pada rangkaian penyearah dioda juga dapat dikatakan sebagai saklar.



Gambar 2.10 Rangkaian penyearah setengah gelombang
(Herman, 2007)

Prinsip kerja penyearah setengah gelombang adalah bahwa pada saat sinyal *input* berupa siklus positip maka dioda mendapat bias maju sehingga arus (i) mengalir ke beban (RL), dan sebaliknya bila sinyal *input* berupa siklus negatip maka dioda mendapat bias mundur sehingga tidak mengalir arus. Bentuk gelombang tegangan *input* (vi) ditunjukkan pada gambar (a) dan arus beban (i) pada gambar (b) dari gambar 2.11.



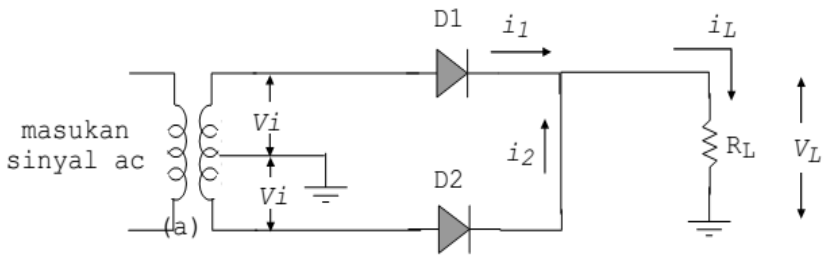
a) b)

Gambar 2.11 Gelombang tegangan *input* dan arus beban
(Herman, 2007)

b. Penyearah gelombang penuh

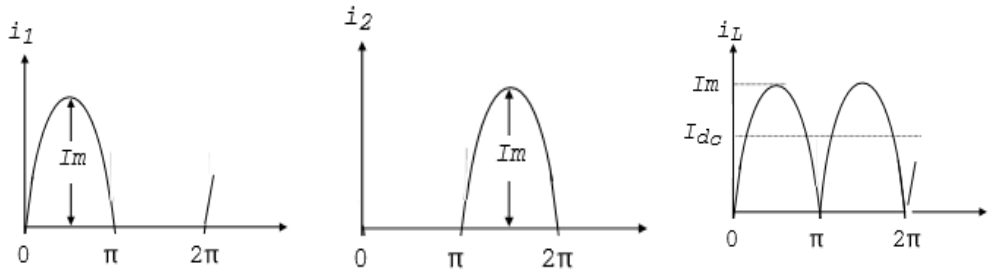
Rangkaian penyearah gelombang penuh ada dua macam yaitu dengan menggunakan trafo CT (*center*-tap = tap tengah) dan dengan sistem jembatan.

Gambar 2.12 menunjukkan penyearah gelombang penuh dengan menggunakan *center* tap.



Gambar 2.12 Gambar rangkaian penyearah gelombang penuh dengan *center* tap (Herman, 2007)

Pada Gambar 2.12 penyearah gelombang penuh dengan *center* tap, terlihat dengan jelas bahwa rangkaian penyearah gelombang penuh ini merupakan gabungan dua buah penyearah setengah gelombang yang hidupnya bergantian setiap setengah siklus, sehingga arus maupun tegangan rata-ratanya adalah dua kali dari penyearah setengah gelombang. Terminal skunder dari trafo CT mengeluarkan dua buah tegangan keluaran yang sama tetapi fasanya berlawanan dengan titik CT sebagai titik tengahnya. Kedua keluaran ini masing-masing dihubungkan ke D1 dan D2, sehingga saat D1 mendapat sinyal siklus positip maka D1 mendapat sinyal siklus negatip, dan sebaliknya. Dengan demikian D1 dan D2 hidup nya bergantian. Namun karena arus i1 dan i2 melewati tahanan beban (RL) dengan arah yang sama, maka iL menjadi satu arah hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.13.



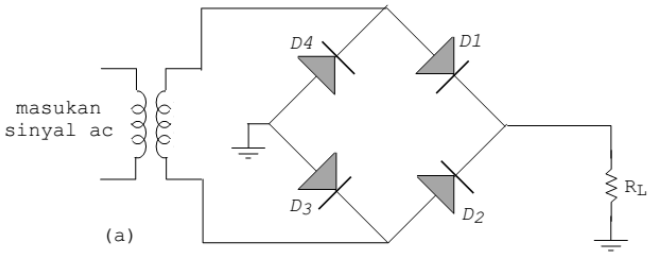
a) b) c)

Gambar 2.13 a) Arus dioda D1, b) Arus dioda D2, c) Arus beban (Herman, 2007)

Penyearah gelombang penuh model Jembatan

Penyearah gelombang penuh model jembatan memerlukan empat buah dioda. Dua dioda akan berkondusi saat isyarat positif dan dua dioda akan berkonduksi saat isyarat negatif. Model penyearah jembatan ini tidak memerlukan transformator yang

memiliki *center*-tap. Rangkian penyearah gelombang penuh model jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.14.



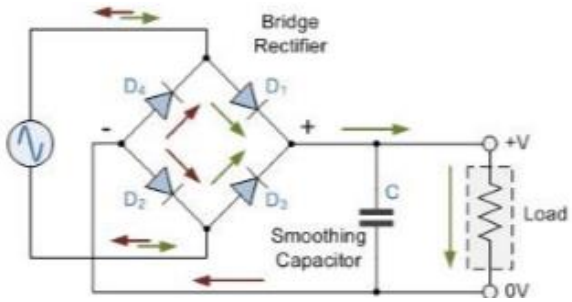
Gambar 2.14 Rangkaian penyearah gelombang penuh model jembatan (Herman, 2007)

Prinsip Kerja penyearah gelombang penuh dengan 4 dioda atau model jembatan yaitu:

Dimulai pada saat keluaran transformator memberikan level tegangan sisi positif, maka D1, D4 pada posisi bias maju dan D2, D3 pada posisi bias balik sehingga level tegangan sisi puncak positif tersebut akan di leawatkan melalui D1 ke D4. Kemudian pada saat keluaran transformator memberikan level tegangan sisi puncak negatif maka D2, D4 pada posisi bias maju dan D1, D2 pada posisi bias balik sehingan level tegangan sisi negatif tersebut dialirkan melalui D2, D4. Sedangkan untuk tegangan keluarannya sama dengan tegangan keluaran penyearah penuh pada Gambar 2.13.

2.2.5. *Filter* / Penapis

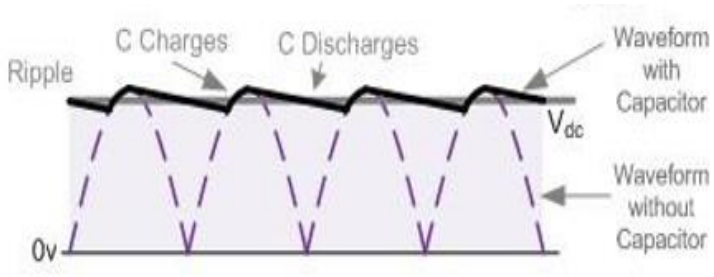
Filter atau penapis adalah bagian yang terdiri dari kapasitor atau kondensator yang berfungsi sebagai penapis atau meratakan tegangan listrik yang berasal dari *rectifier*. Secara umum peralatan elektronik membutuhkan sumber arus searah yang halus atau lebih rata. Guna menghilangkan sisa gelombang bolak balik yang berasal dari *rectifier* tersebut sering digunakan kapasitor elektrolit sebagai tapis perata. Penambahan nilai kapasitor yang dipararel dengan beban akan memberikan efek peralatan pulsa DC yang lebih halus. Nilai kapasitor yang lebih besar akan menyimpan muatan pada saat pengisian. Gambar 2.15 memperlihatkan penyearah gelombang penuh sistem jembatan dengan tambahan kapasitor sebagai *filter*.



Gambar 2.15 Gambar rangkaian penyearah gelombang penuh sistem jembatan dengan tambahan kapasitor sebagai *filter*
(Abidin, 2015)

Prinsip *filter* kapasitor adalah proses pengisian dan pengosongan kapasitor. Saat diode forward, kapasitor terisi dan tegangannya sama dengan periode ayunan tegangan sumber. Pengisian berlangsung sampai nilai maksimum, pada saat itu tegangan C sampai dengan Vp.

Untuk mencari tegangan *ripple* harus diketahui besar kapasitor yang digunakan, begitu juga sebaliknya untuk menentukan besar kapasitor yang baik untuk penyearah harus menentukan besar tegangan *ripple* yang ingin dicapai.



Gambar 2.16 gelombang keluaran dengan tambahan kapasitor
(Abidin, 2015)

Dengan frekuensi jala-jala adalah 50 Hz, maka frekuensi *ripple* penyerah gelombang penuh adalah 100 Hz, hal ini dikarenakan pada penyearah gelombang penuh mempunyai dua kali periode masukan gelombang, hanya saja *rectifier* membalik masing-masing periode setengah negatif sehingga didapat dua kali periode positif. Sedangkan untuk mengetahui besar *ripple* tegangan pada penyearahan dapat dilihat pada persamaan dibawah :

$$V_{r,p-p} = Vm\ (\frac{T}{RC}) \qquad (2-1)$$

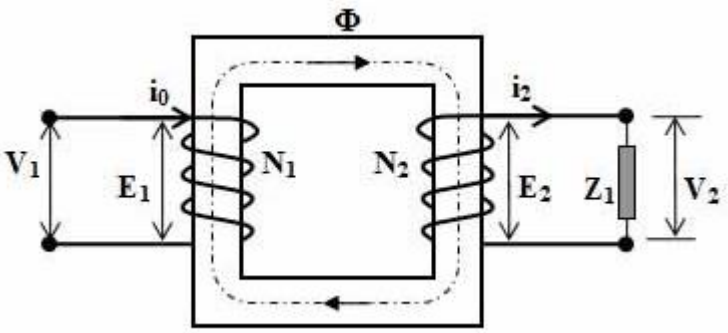
Sedangkan untuk nilai persentase *ripple* menggunakan persamaan :

$$\%\ V_r\ = \frac{V_r}{V_m}\ x\ 100\% \qquad (2-2)$$

2.2.6. Transformator

Transformator atau trafo adalah suatu peralatan/mesin listrik statis (tidak bergerak/berputar) yang dapat memindahkan sekaligus mengubah besaran energy listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lain. Proses pemindahan dilakukan melalui suatu magnetic antara kedua rangkaian listrik yang dihubungkan, sementara proses transformasi besarannya menggunakan prinsip induksi elektromagnetik di dalam gandengan *magnetic* tersebut.

Transformator umumnya terbentuk dari dua kumparan induktif yang terpisah /terisolasi satu sama lain secara elektris (agar tak terjadi aliran arus hubung singkat antara keduanya) tetapi tergandeng secara magnetic melalui suatu rangkaian magnetic (hantaran *fluks* dalam inti besi).

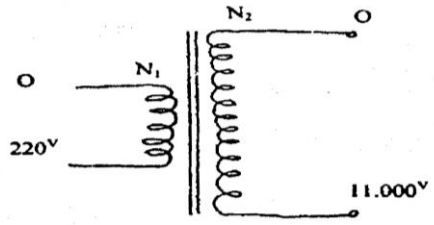


Gambar 2.17 Prinip kerja Transformaor
(Citarsa, 2012)

Transformator menggunakan prinsip hukum induksi faraday dan hukum lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial. Arus yang mengalir pada belitan primer akan menginduksi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial. (PLN Buku Petunjuk Transformator Tenaga, 2010). Ada beberapa jenis transformator berdasarkan perubahan tegangannya yaitu sebagai berikut :

a. Tipe penaik tegangan (*step-up*)

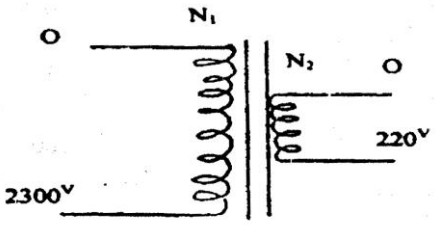
Dilakukan dengan membuat $N_2 > N_1$, sehingga V_2 akan $> V_1$ (V = tegangan kumparan) karena $N_2/N_1 = V_2/V_1$.



Gambar 2.18 Trafo *step-up*.
(Citarsa, 2012)

b. Tipe penurun tegangan (*step-down*)

Dilakukan dengan membuat $N_2 < N_1$, maka V_2 akan $< V_1$.

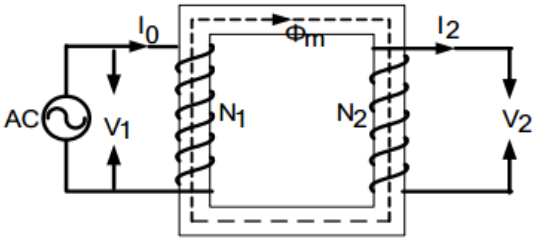


Gambar 2.19 Trafo *step-down.*
(Citarsa, 2012)

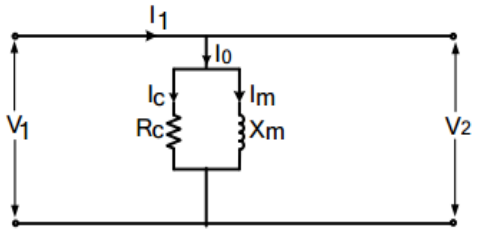
Keadaan operasi transformator dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

a. Keadaan transformator tanpa beban

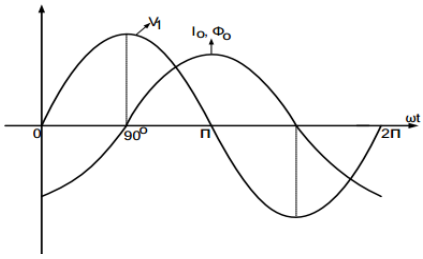
Bila kumparan primer suatu trafo dihubungkan dengan sumber V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1. Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal. Rangkaian trafo dalam keadaan tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20.a Trafo dalam keadaan tanpa beban.
(Sujono, 2012)



Gambar 2.20.b Rangkaian ekivalen trafo dalam keadaan tanpa beban.
(Sujono, 2012)



Gambar 2.20.c Gambar gelombang I_0 tertinggal 90° dari V_1
(Sujono, 2012)

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t \ \ (weber) \tag{2-3}$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi e1 (Hukum Faraday):

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{2-4}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\Phi_{max} \sin \omega t)}{dt} \tag{2-5}$$

$$e_1 = -N_1 \omega \Phi_{max} \cos \omega t \ \ (Volt) \tag{2-6}$$

$$e_1 = -N_1 \omega \Phi_{max} \sin(\omega t - 90)(tertinggal\ 90°\ dari\ \Phi) \tag{2-7}$$

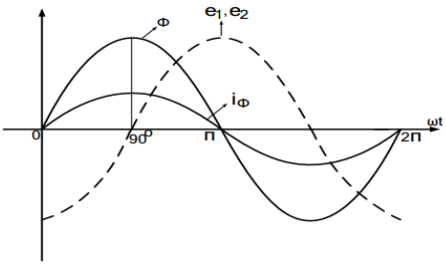
Dengan:

e_1 = gaya gerak listrik (Volt)

N_1 = jumlah belitan di sisi primer

Ω = kecepatan sudut putar (rad/sec)

Φ = fluks magnetik (weber)



Gambar 2.20.d Gelombang e_1 tertinggal dari Φ.
(Sujono, 2012)

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2\text{-}8)$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2\text{-}9)$$

$$E_1 = \frac{N_1 2\times 3{,}14 f \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2\text{-}10)$$

$$E_1 = \frac{N_1 6{,}28 f \Phi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2\text{-}11)$$

$$E_1 = 4{,}44\, N_1\, f \Phi_{max}\ (Volt) \quad (2\text{-}12)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama juga menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2\text{-}13)$$

$$e_2 = N_2 \Phi_{max} \cos \omega t\ \ (Volt) \quad (2\text{-}14)$$

$$E_2 = 4{,}44\, N_2\, f \Phi_{max}\ (Volt) \quad (2\text{-}15)$$

Sehingga perbandingan antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder adalah:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2\text{-}16)$$

Dengan:

E_1 = ggl induksi di sisi primer (Volt)

E_2 = ggl induksi di sisi sekunder (Volt)

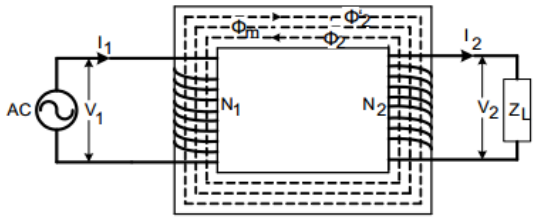
N_1 = jumlah lilitan sisi primer

N_2 = jumlah lilitan sisi sekunder

a = faktor transformasi

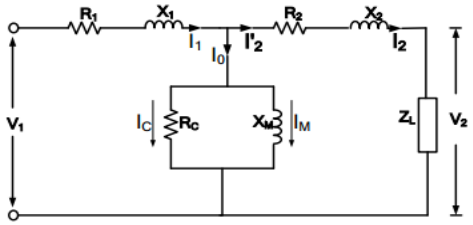
b. Keadaan transformator berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L, I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dengan $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$. Rangkaian trafo dalam keadaan berbeban dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.21.a Trafo dalam keadaan berbeban.

(Sujono, 2012)



Gambar 2.21.b Rangkaian ekivalen trafo dalam keadaan berbeban.

(Sujono, 2012)

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) N_2I_2 yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan. Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir I_2', yang menentang fluks yang dibangkitakan oleh arus beban I_2 hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I_2 \ (Ampere) \tag{2-17}$$

Bila komponen arus rugi inti (I_c) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga:

$$I_1 = I_m + I_2 \ (Ampere) \tag{2-18}$$

Dengan:

I_1 = arus pada sisi primer (A)

I_2' = arus yang menghasilka Φ_2' (A)

I_0 = arus penguat (A)

I_m = arus pemagnetan (A)

I_c = arus rugi-rugi inti (A)

Untuk menjaga fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihassilkan oleh arus pemagnetan I_m, maka berlaku hubungan:

$$N_1 I_m = N_1 I_1 - N_2 I_2 \tag{2-19}$$

$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2 \tag{2-20}$$

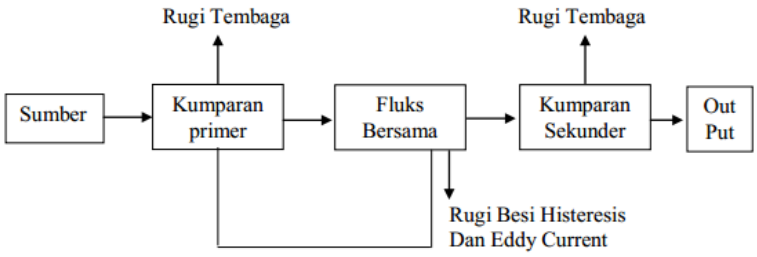
$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \tag{2-21}$$

Karena I_m dianggap kecil, maka I_2' = I_1. Sehingga:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \tag{2-22}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \tag{2-23}$$

Rugi-rugi Pada Transformator



Gambar 2.22 Rugi-rugi pada trafo.

a. Rugi tembaga (Pcu)

Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan oleh arus yang mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder. Dinyatakan dengan:

$$P_{cu} = I^2 R \qquad (2\text{-}24)$$

b. Rugi besi (Pi)

Rugi inti besi terdiri dari:

- Rugi histerisis (Ph), yaitu rugi yang disebabkan oleh fluks boak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = kh\ f\ B_{maks}^{1,6}\ (watt) \qquad (2\text{-}25)$$

Dengan:

P_h= Rugi arus pusar (watt)

k_h= Konstanta material inti

f = frekuensi (Hz)

Bmax = fluks maksimum (weber)

n = Nilai eksponensial, tergantung material dan Bmax

- Rugi arus eddy (Pe) adalah rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi. Arus pusar adalah arus yang mengalir pada material inti karena tegangan yang diinduksi oleh fluks. Rugi arus eddy dinyatakn dengan:

$$P_e = ke\ f^2\ B_{maks}^2\ (watt) \qquad (2\text{-}26)$$

Dengan:

P_e = Rugi arus pusar (watt)

k_e = Konstanta material inti

f = frekuensi (Hz)

Bmax = fluks mksimum (weber)

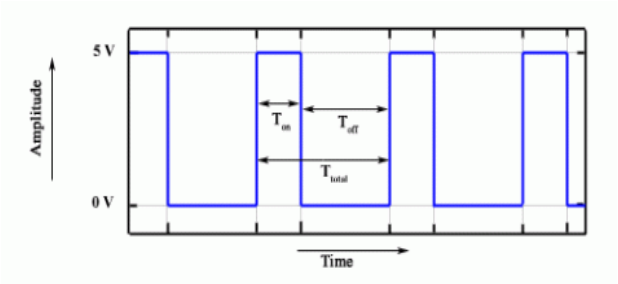
Jadi, rugi inti besi adalah:

$$P_i = P_h + P_e \ (watt) \tag{2-27}$$

2.2.7. *Pulse Width Modulation* (PWM)

Beberapa metode pengendalian penyalaan saklar-saklar daya pada aplikasi konverter dikembangkan untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan. Salah satu diantara metode pengendalian tersebut pada aplikasi konverter berbasis pensaklaran adalah PWM (*Pulse Width Modulation*).

Secara umum PWM adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal atau tegangan yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, yang akan digunakan untuk mentransfer data pada telekomunikasi ataupun mengatur tegangan sumber yang konstan untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda**.** Penggunaan PWM sangat banyak, mulai dari pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, *audio effect* dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya.



Gambar 2.23 Sinyal PWM dengan Amplitudo tetap
(Priyono, 2016)

Terlihat pada gambar 2.23 bahwa sinyal PWM adalah sinyal digital yang amplitudonya tetap, namun lebar pulsa yang aktif (*duty cycle*) per periodenya dapat diubah-ubah. Dimana periodenya adalah waktu pulsa *high* (1) T_{on} ditambah waktu pulsa *low* (0) T_{off}.

$$T_{total} = T_{on} + T_{0\,ff} \tag{2-28}$$

Duty cycle adalah lamanya pulsa *high* (1) T_{on} dalam satu perioda. Jika *f(t)* adalah sinyal PWM, maka besar *duty cycle*-nya adalah :

$$D = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \tag{2-29}$$

Pada Gambar 2.24 menggambarkan beberapa PWM dalam *duty cycle* yang berbeda.

(a)

(b)

(c)

Gambar 2.24 PWM dalam *duty cycle* yang berbeda
(a) PWM *on* 10%, (b) PWM *on* 50%, (c) PWM *on* 90%
(Priyono, 2016)

2.2.8. MOSFET

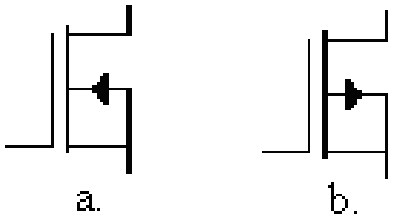
MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) adalah suatu transistor dari bahan semikonduktor (silikon) dengan tingkat konsentrasi ketidakmurnian tertentu. Tingkat dari ketidakmurnian ini akan menentukan jenis transistor tersebut, yaitu transistor MOSFET tipe-N (NMOS) dan transistor MOSFET tipe-P (PMOS). Bahan silikon ini yang akan digunakan sebagai landasan (*substrat*) penguras (*drain*), sumber (*source*), dan gerbang (*gate*). Selanjutnya transistor ini dibuat sedemikian rupa agar antara substrat dan gerbangnya dibatasi oleh oksida silikon yang sangat tipis. Oksida ini diendapkan di atas sisi kiri kanal, sehingga transistor MOSFET akan mempunyai kelebihan dibanding dengan transistor BJT (*Bipolar Junction Transistor*), yaitu menghasilkan disipasi daya yang rendah.

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor atau MOSFET adalah suatu komponen yang dikendalikan oleh tegangan dan memerlukan arus masukan yang kecil. MOSFET memiliki kecepatan *switching* sangat tinggi dan waktu *switch*ing memiliki orde nanodetik. Bila dilihat dari cara kerjanya, transistor MOS dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1). Transistor Mode Pengosongan (*Transistor Mode Depletion*)

Pada transistor mode *depletion*, antara *drain* dan *source* terdapat saluran yang

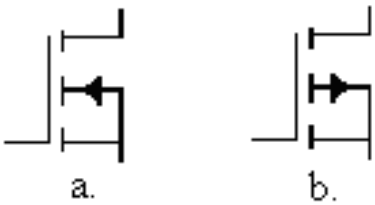
menghubungkan dua terminal tersebut, dimana saluran tersebut mempunyai fungsi sebgai saluran tempat mengalirnya elektron bebas. Lebar dari saluran itu sendiri dapat dikendalikan oleh tegangan gerbang. Transistor MOSFET mode pengosongan terdiri dari tipe-N dan tipe-P, simbol transistor ditunjukkan dalam Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Simbol Transistor MOSFET Mode *Depletion*
(a). N-*Channel Depletion* (b). P-*Channel Depletion*
(Maulana, 2014)

2). Transistor Mode peningkatan (*Transistor Mode Enhancement*)

Transistor mode enhancement ini pada fisiknya tidak memiliki saluran antara drain dan sourcenya karena lapisan bulk meluas dengan lapisan SiO_2 pada terminal *gate*. Transistor MOSFET mode peningkatan terdiri dari tipe-N dan tipe-P, simbol transistor ditunjukkan dalam Gambar 2.26.



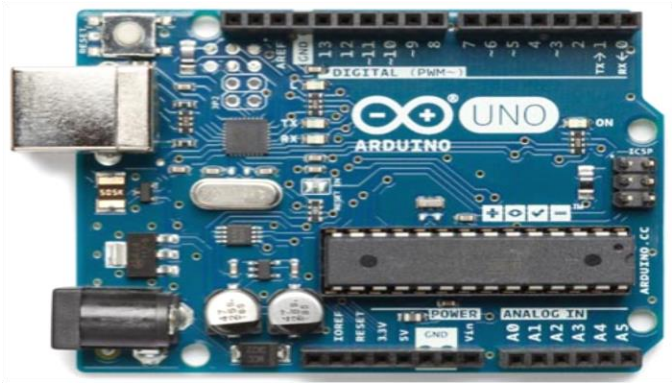
Gambar 2.26 Simbol Transistor MOSFET Mode *Enhancement*
(a). N-*Channel Enhancement* (b). P-*Channel Enhancement*
(Maulana, 2014)

2.2.8 Arduino

Arduino adalah kit elektronik atau papan rangkaian elektronik *open source* yang di dalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah chip mikrokontroler dengan jenis AVR dari perusahaan Atmel. Mikrokontroler itu sendiri adalah chip atau IC (*integrated circuit*) yang bisa diprogram menggunakan komputer. Tujuan menanamkan program pada mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca *input*, memproses *input* tersebut dan kemudian menghasilkan *output* sesuai yang diinginkan.

Beberapa Kelebihan Arduino :

- Tidak perlu perangkat chip programmer karena di dalamnya sudah ada *bootloader* yang akan menangani *upload* program dari komputer.
- Sudah memiliki sarana komunikasi USB, sehingga pengguna laptop yang tidak memiliki port serial bisa menggunakannya.
- Bahasa pemrograman relatif mudah karena *software* Arduino dilengkapi dengan kumpulan library yang cukup lengkap.
- Memiliki modul siap pakai (*shield*) yang bisa ditancapkan pada board Arduino. misalnya shield GPS, Ethernet, SD Card, dll.



Gambar 2.27 Module arduino