



BUKU AJAR  
Dasar Konversi  
Energi

---

PENULIS

Izza Anshory  
Jamaaluddin  
Arief Wisaksono



# **Buku Ajar Dasar Konversi Energi**

**Penulis:**

**Izza Anshory**

**Jamaaluddin**

**Arief Wisaksono**



Diterbitkan oleh  
**UMSIDA PRESS**  
Jl. Mojopahit 666 B Sidoarjo  
ISBN: 978-623-464-040-3  
Copyright©2022

**Buku Ajar**

**Dasar Konversi Energi**

**Penulis :**

Izza Anshory

Jamaaluddin

Arief Wisaksono

**ISBN :**

978-623-464-040-3

**Editor :**

M.Tanzil Multazam,S.H,.M.Kn

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, M.Pd

**Copy Editor :**

Wiwit Wahyu Wijayanti

**Design Sampul dan Tata Letak :**

Wiwit Wahyu Wijayanti

**Penerbit :**

UMSIDA Press

**Redaksi :**

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Jl. Mojopahit No 666B

Sidoarjo, Jawa Timur

**Cetakan pertama, September 2022**

© Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dengan suatu apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga Buku Daar Konversi Energi ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ajar ini dapat digunakan sebagai pedoman bagi mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dalam proses perkuliahan serta memberikan petunjuk praktis agar mahasiswa mendapatkan gambaran secara jelas dalam materi mata kuliah Dasar Konversi Energi.

Terimakasih disampaikan kepada Dr. Hindarto, S.Kom, MT selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Terima kasih juga disampaikan kepada DRPM atas kesempatan yang diberikan dalam penyusunan buku ini. Terimakasih kepada rekan-rekan dosen yang berkontribusi dalam penulisan buku ini, baik memberikan inspirasi maupun masukan-masukan membangun yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu serta semua pihak yang telah ikut membantu dalam penyelesaian buku ini.

Kami menyadari masih terdapat kekurangan dalam buku ini. Oleh karena itu kritik dan saran terhadap penyempurnaan buku ini sangat diharapkan. Semoga buku ini dapat memberi manfaat bagi mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo khususnya dan bagi semua pihak yang membutuhkan.

Sidoarjo, 28 Agustus 2022

Penulis

Dr. Izza Anshory, ST, MT

# DAFTAR ISI

<b>BAB I. ENERGI</b>	
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Tipe Energi.....	2
1.3 Bentuk Energi .....	5
1.4 Penggunaan Energi .....	6
1.5 Degradasi .....	6
1.6 Penyimpanan Energi .....	7
1.7 Efek Penggunaan Energi .....	10
<b>BAB II. SUMBER ENERGI</b>	
2.1 Pendahuluan.....	12
2.2 Sumber Energi Tidak Terbarukan.....	13
2.3 Sumber Energi Terbarukan .....	20
<b>BAB III. PRINSIP-PRINSIP DASAR ELEKTROMAGENTIK</b>	
3.1 Pendahuluan.....	25
3.2 Hukum dari Gaya Magnet.....	25
3.3 Kuat Medan Magnet.....	28
<b>BAB IV. PRINSIP-PRINSIP KONVERSI ENERGI</b>	
4.1 Pendahuluan.....	36
4.2 Konversi Energi Mekanik .....	38
4.3 Konversi Energi Cahaya .....	39
4.4 Konversi Energi Kimia .....	40
4.5 Konversi Energi Nuklir.....	43
<b>BAB V. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR</b>	
5.1 Pendahuluan.....	46
5.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil .....	47
5.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Besar .....	54
5.4 Prinsip Kerja .....	59
5.5 Keuntungan PLTA.....	64
5.6 Penyimpanan PLTA.....	65

<b>BAB VI. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN</b>	
6.1	Pendahuluan..... 66
6.2	Karakteristik Energi Angin ..... 71
6.3	Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin ..... 75
6.4	Aspek Kelistrikan pada Turbin Angin ..... 77
<b>BAB VII. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MATAHARI</b>	
7.1	Pendahuluan..... 83
7.2	Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Matahari ..... 83
7.3	Sistem Photovoltaic..... 94
7.4	Efisiensi dan Performansi Sistem Photovoltaic ..... 97
<b>BAB VIII. TRANSFORMATOR</b>	
8.1	Pendahuluan..... 100
8.2	Jenis-jenis Transformator..... 113
8.3	Prinsip Kerja Transformator ..... 119
8.4	Konstruksi Transformator ..... 147
<b>BAB IX. MESIN DIRECT CURRENT (DC)</b>	
9.1	Pendahuluan..... 150
9.2	Rangkaian Equivalen Motor DC..... 153
9.3	Jenis-jenis Motor DC ..... 156
9.4	Prinsip Kerja Motor DC..... 161
9.5	Persamaan Kecepatan dan Torque ..... 163
<b>BAB X. MESIN ALTERNATING CURRENT (AC)</b>	
10.1	Pendahuluan..... 167
10.2	Karakteristik Motor AC ..... 168
10.3	Prinsip Kerja Motor AC..... 170
10.4	Tipe Motor AC..... 174
10.5	Motor Induksi..... 186
<b>BAB XI. MOTOR Brushless Direct Current Motor (BLDC)</b>	
11.1	Pendahuluan..... 188
11.2	Karakteristik Motor BLDC ..... 190

11.3Prinsip Kerja Motor BLDC.....	196
11.4Model Matematik Motor BLDC .....	202

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Jenis terminal baterai yang termasuk dalam standar IEC.....	1
Gambar 1.2. Perbandingan energi spesifik .....	10
Gambar 2.1. Penggambaran Sumber Energi .....	13
Gambar 2.2. Model Turbin Mikrohidro .....	14
Gambar 2.4. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air .....	15
Gambar 2.5. Prinsip pembangkit listrik tenaga biomassa .....	15
Gambar 2.6. Prinsip pembangkit listrik tenaga panas bumi.....	17
Gambar 2.7. Pembangkit listrik tenaga panas bumi .....	18
Gambar 2.8. Prinsip pembangkit listrik tenaga panas matahari surya .....	19
Gambar 2.9. Prinsip pembangkit listrik tenaga angin .....	20
Gambar 2.10. Produksi minyak dunia vs waktu untuk berbagai jumlah sumber daya .....	22
Gambar 2.11. Pembangkit listrik tenaga nuklir .....	24
Gambar 3.1. Hukum gaya lorentz kaidah tangan kanan .....	25
Gambar 3.2. Sudut hukum gaya lorentz.....	26
Gambar 3.3. Penerapan gaya lorentz pada kawat sejajar yang bearus listrik ...	27
Gambar 3.4. Gelombang Elektromagnet .....	28
Gambar 3.5. Lapisan arus permukaan .....	29
Gambar 3.6. Tipe sumber arus dan dipol magnetik .....	30
Gambar 3.7. Uniform waveguide.....	32
Gambar 3.8. Vektor mode TE atau mode H.....	35
Gambar	

# BAB 1

# ENERGI

## 1.1 Pendahuluan

Energi adalah sebuah kata yang sudah sangat familiar yang kita dengar dalam kehidupan sehari-hari. Kata energi digunakan untuk menggambarkan tenaga yang dibutuhkan untuk mengisi tenaga pada sebuah ponsel, atau tenaga yang digunakan oleh lemari es untuk memanaskan dan mendinginkan makanan dan minuman, serta energi untuk memberi daya pada kendaraan untuk bergerak.

Energi penting dalam kehidupan sehari-hari, karena dapat memberikan kemampuan untuk melakukan pekerjaan. Pekerjaan dilakukan ketika satu atau lebih gaya menggerakkan suatu objek dari kejauhan. Benda yang dipindahkan bisa sangat kecil, seperti molekul, atom, elektron, atau proton, atau mereka bisa menjadi objek yang jauh lebih besar. Ketika gaya bekerja pada objek dan melakukan pekerjaan, energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Pada periode selanjutnya kita akan belajar bagaimana kekuatan bertindak pada objek untuk melakukan pekerjaan. Semua kekuatan dapat dikaitkan dengan satu atau lebih dari empat kekuatan dasar alam.

Ketika energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lain, maka hukum kekekalan energi mensyaratkan bahwa tidak ada energi yang hilang. Jumlah total energi yang dimasukkan ke dalam proses konversi harus sama dengan jumlah total energi yang keluar. Namun, pada saat proses konversi energi, beberapa energi terbuang karena konversinya menjadi bentuk yang tidak diinginkan. Banyak proses konversi energi membutuhkan beberapa langkah, seperti ketika batubara diubah menjadi energi listrik.

Karakteristik energi yang paling luar biasa adalah ia tidak akan pernah bisa dihancurkan. Ketika dipindahkan dari satu sistem ke sistem lain, atau ketika itu mengubah alam, tidak ada energi yang diciptakan atau dihancurkan. Jika suatu benda kehilangan energi, jumlah energi yang sama pasti diperoleh oleh objek lain yang terkait dengan yang pertama. Demikian pula, ketika energi berubah bentuk, jumlahnya tetap persis sama.

Oleh karena itu, istilah "produksi energi" atau "kehilangan energi" yang digunakan oleh jurnalis, ekonom, dan politisi sebenarnya tidak akurat, karena energi tidak dapat diciptakan atau hilang. Di pembangkit listrik termal, energi tidak "diproduksi"; sebaliknya, energi kimia atau nuklir diubah menjadi energi listrik atau panas. Jumlah keseluruhan konversi ini digambarkan sebagai efisiensi. Efisiensi pembangkit listrik adalah 33%, yang berarti bahwa untuk setiap 33 unit energi listrik yang dikirim melalui jaringan listrik, 100 unit energi nuklir dikonsumsi dan 67 unit panas yang dihasilkan.

Panas yang dilepaskan ke lingkungan, misalnya sebagai uap dari menara pendingin, umumnya hilang. Namun, beberapa pembangkit listrik memulihkan sebagian untuk memanaskan rumah atau rumah kaca. Kita akan melihat meskipun energi tidak pernah bisa dihancurkan, bentuknya yang berbeda sebenarnya tidak setara, karena tidak semua transformasi yang dapat kita bayangkan mungkin terjadi.

Orang-orang selalu menggunakan energi untuk melakukan pekerjaan untuk mereka. Ribuan tahun yang lalu, manusia purba membakar kayu untuk menyediakan cahaya, memanaskan ruang hidup mereka, dan memasak makanan mereka. Belakangan, orang-orang menggunakan angin untuk memindahkan perahu mereka dari satu tempat ke tempat lain. Lebih dari seratus tiga puluh lima tahun yang lalu, orang-orang mulai menggunakan air yang jatuh untuk membuat listrik.

Energi dapat ditransmisikan dari satu sistem ke sistem lain, ia ditransfer sebagai panas dari radiator ke udara di dalam ruangan. Itu juga dapat berubah untuk mengambil bentuk yang berbeda. Dalam mainan mekanis, pegas melepas penat yang menyebabkan gerakan. Energi yang terkait dengan pergerakan sepeda diubah menjadi panas di blok rem dan pelek roda saat melakukan pengereman. Energi



yang disimpan dalam baterai senter diubah menjadi energi listrik saat kita menutup rangkaian dan nantinya diubah menjadi energi cahaya dan panas di bohlam. Di pembangkit listrik termal, energi yang disimpan dalam bahan bakar (energi kimia dalam batubara dan minyak atau energi nuklir dalam uranium) diubah (dengan pembakaran atau reaksi nuklir) menjadi panas, sebagian dari panas ini kemudian dipulihkan dalam turbin sebagai energi mekanik, akhirnya, energi mekanik ini diubah menjadi energi listrik di alternator.

Saat ini, orang menggunakan lebih banyak energi daripada sebelumnya dari berbagai sumber untuk banyak tugas dan hidup kita yang tidak diragukan lagi lebih baik untuk itu. Rumah nyaman dan penuh dengan perangkat listrik yang berguna dan menghibur. Kita dapat berkomunikasi secara instan dalam banyak cara, hidup lebih lama, hidup lebih sehat, berkeliling dunia, atau setidaknya melihatnya di televisi dan internet.

## **1.2 Tipe Energi**

### **1.2.1 Jenis Energi Berdasarkan Sumbernya**

Berdasarkan sumbernya, terdapat sepuluh sumber energi utama yang kita gunakan saat ini diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar yang tidak dapat diperbarui dan dapat diperbaharui:

#### **1) Sumber energi yang tidak dapat diperbarui**

Sumber energi ini disebut tidak dapat diperbarui karena tidak dapat diisi ulang dalam waktu singkat. Minyak bumi, bahan bakar fosil, misalnya, terbentuk ratusan juta tahun yang lalu, sebelum dinosaurus ada. Itu terbentuk dari sisa-sisa kehidupan laut kuno, sehingga tidak dapat dibuat dengan cepat. Kita bisa kehabisan sumber daya nonrenewable yang dapat dipulihkan secara ekonomi suatu hari nanti.

Termasuk sumber energi yang tidak dapat diperbaharui adalah batu bara, minyak bumi, gas alam, propana, dan uranium. Sumber energi tersebut digunakan untuk menghasilkan listrik, untuk memanaskan rumah, untuk memindahkan mobil, dan untuk memproduksi produk dari permen batangan ke ponsel.

#### **2) Sumber energi yang dapat diperbaharui**

Sumber energi yang dapat diperbaharui atau sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang dapat diisi ulang dalam waktu yang singkat. Sumber energi ini meliputi biomassa, panas bumi, tenaga air, surya, dan angin. Hari demi hari, matahari bersinar, angin bertiup, dan sungai-sungai mengalir. Masyarakat menggunakan sumber energi terbarukan terutama untuk menghasilkan listrik.

Apakah listrik merupakan sumber energi terbarukan atau tidak dapat diperbarui? Jawabannya juga tidak. Listrik berbeda dengan sumber energi lainnya karena merupakan sumber energi sekunder. Itu berarti kita harus menggunakan sumber energi lain untuk membuatnya.

### **1.2.2 Jenis Energi Berdasarkan Bentuknya**

Berdasarkan bentuknya, terdapat dua jenis energi (transisi & tersimpan) dan enam bentuk energi (mekanik, termal, listrik, kimia, elektromagnetik, dan nuklir). Energi yang tersimpan sering digambarkan sebagai energi potensial. Contoh energi potensial termasuk potensial gravitasi (elevasi massa: bentuk mekanik), potensial inersia yang juga dikenal sebagai energi kinetik (kecepatan massa: bentuk mekanik), potensial kimia (potensial terjadinya reaksi kimia), potensial listrik (perbedaan tegangan), kapasitansi listrik, dan kapasitansi termal.

Panas dan mekanik adalah contoh energi termal dan energi mekanik transisional, masing-masing. Panas dan pekerjaan melibatkan interaksi antara massa yang menarik, yang dikenal sebagai sistem, dan sekitarnya. Ketika mempertimbangkan energi, kami membedakan antara sistem (massa kepentingan) dan sekitarnya dengan batas yang memisahkan keduanya. Batasnya

mungkin fisik atau virtual. Energi transisi hanya terwujud pada batas ini. Ketika mempertimbangkan daya (energi / waktu) itu hampir selalu energi transisi yang digunakan.

- 1) **Transisi:** energi yang bergerak, energi yang melintasi batas-batas sistem.
  - arus listrik
  - kerja
  - panas
  - gelombang elektromagnetik
  
- 2) **Disimpan :** energi yang memiliki massa, posisi dalam medan gaya, dll.
  - **Potensial listrik (tegangan)**  
Mekanisme penyimpanan : kapasitor, induktor, superkonduktor.
  - **Potensial gravitasi (energi potensial dalam termodinamika rekayasa)**  
Mekanisme penyimpanan : menara air, bendungan hidrolik, berat terangkat
  - **Potensial inersia (energi kinetik dalam termodinamika rekayasa)**  
Mekanisme penyimpanan : roda gila, inersia fluida, massa yang bergerak
  - **Kompresi fluida (energi aliran atau kerja batas dalam termodinamika)**  
Mekanisme penyimpanan: tabung gas, tangki propana, piston-silinder,
  - **Potensi kimia: (energi internal, entalpi dalam termodinamika)**  
Mekanisme penyimpanan : baterai, batubara, minyak bumi, hidrogen, glukosa,
  - **Termal: (panas yang masuk akal & laten)**  
Mekanisme penyimpanan : massa, bahan perubahan fase (PCM)

Seringkali ada kebingungan antara energi dan perangkat yang mengubah atau menyimpan energi. Misalnya, ketika diminta untuk mendefinisikan energi kinetik berkali-kali maka kita akan mendengar energi kinetik yang didefinisikan sebagai *flywheel* atau roda gila. Roda gila hanyalah perangkat yang menyimpan jenis energi mekanik. Demikian pula, baterai adalah perangkat yang menyimpan jenis energi kimia. Baterai yang dilemparkan ke seberang ruangan akan menyimpan energi mekanik (kinetik).

Setiap bentuk energi dikuantifikasi menggunakan satuan yang berbeda. Kadang-kadang bentuk energi digambarkan sebagai potensial, di lain waktu sebagai laju. Satuannya bisa berupa energi, atau daya, atau keduanya. Perbedaan satuan muncul karena konsep kerja, panas, dan listrik mendahului konsep energi yang menyatukan bentuk-bentuk transisi ini. Dan pilihan unit sering ditentukan oleh kemudahan perhitungan. Misalnya, satuan umum energi elektromagnetik adalah elektron-volt [eV]. Saat menggunakan sel surya berbasis silikon untuk mengubah cahaya menjadi listrik, dibutuhkan sedikit lebih dari 1 eV foton untuk memindahkan elektron melintasi celah pita antara pita kelambu dan pita konduksi. Energi ini juga dapat dinyatakan dalam Joule (satuan energi), tetapi alih-alih bilangan yang mendekati 1 eV, kita akan menggunakan bilangan yang mendekati  $2 \times 10^{-19}$  J.

Ada beberapa bentuk energi, antara lain :

- a) **Energi Kimia:** [Btu/lbm, Btu/lbmol, kJ/kg, kJ/kmol] Tidak ada energi kimia transisi yang diketahui. Energi yang tersimpan adalah dalam bentuk potensial kimia dan biasanya dinyatakan dalam satuan energi per volume (molar) atau energi per massa. Konversi energi kimia adalah yang paling penting bagi masyarakat karena ini termasuk konversi kimia ke energi panas (pembakaran) dan konversi kimia dari energi elektromagnetik (fotosintesis). Jika energi dilepaskan selama konversi energi kimia, prosesnya dianggap eksotermik, sedangkan endotermik menunjukkan energi diserap selama proses konversi.
- b) **Nuklir:** [MeV/reaksi] Tidak ada energi nuklir transisional yang diketahui. Energi yang tersimpan adalah dalam bentuk massa atom; hubungan antara massa dan energi adalah

ekspresi Einstein  $E = mc^2$ . Energi nuklir diubah ke bentuk lain dengan interaksi partikel dengan atau di dalam inti atom. Energi nuklir diekspresikan berbagai unit, tetapi yang paling umum untuk pembangkit listrik adalah MeV /reaksi. Ada tiga reaksi nuklir yang akan dibahas.

- **Peluruhan radioaktif:** nukleus yang tidak stabil meluruh menjadi nukleus yang lebih stabil melepaskan energi elektromagnetik dan partikel.
  - **Fisi:** nukleus bermassa berat menyerap neutron dan kemudian terbelah menjadi dua atau lebih inti bermassa lebih ringan dengan pelepasan energi elektromagnetik dan partikel.
  - **Fusi:** dua inti bermassa cahaya bergabung untuk membentuk inti yang stabil dan bermassa lebih berat dengan pelepasan energi elektromagnetik.
- c) **Energi elastis:** energi yang disimpan dalam benda dengan penerapan suatu gaya. Pegas terkompresi dan karet gelang yang diregangkan adalah contoh energi elastis.
- d) **Energi potensial gravitasi:** energi posisi atau tempat. Sebuah batuan yang terletak di puncak bukit mengandung energi potensial gravitasi karena posisinya. Tenaga air, seperti air di reservoir di belakang bendungan, adalah contoh energi potensial gravitasi.
- e) **Elektromagnetik:** [J, eV, MeV] Energi elektromagnetik transisional adalah gelombang radiasi yang bergerak dengan kecepatan cahaya. Terlihat, Sinar inframerah (IR) dan ultraviolet (UV) semuanya adalah energi elektromagnetik transisional. Tidak ada energi elektromagnetik yang tersimpan yang diketahui.
- f) **Mekanik:** [ft-lbf, J], [hp, kWm] Energi mekanik transisi adalah pekerjaan. Energi mekanik yang tersimpan termasuk energi potensial, yang posisinya dalam medan gaya seperti massa yang ditinggikan dalam medan gravitasi. Energi mekanik lain yang tersimpan adalah kinetik (posisi dalam medan inersia), gas terkompresi, regangan elastis, dan potensial magnetik. Energi mekanik dinyatakan sebagai energi [ft-lbf, J] dan daya [hp, kWm].
- g) **Termal:** [J, cal, Btu], [kWt, Btu/hr] Semua bentuk energi dapat sepenuhnya diubah (100%) menjadi energi panas, tetapi kebalikannya tidak benar. Misalnya, semua energi mekanik yang tersimpan dalam mobil yang bergerak dapat diubah menjadi energi panas dengan gesekan melalui rem. Energi panas transisional adalah panas dan umumnya dinyatakan sebagai energi [J, cal, Btu] atau daya [kWt, Btu/hr]. Energi panas yang tersimpan adalah panas yang masuk akal dan laten dan dinyatakan dalam satuan energi per massa [Btu/lbm, kJ/kg].
- h) **Listrik:** [A, V], [Wh, kWh], [Kam, kWe, MWe] Energi listrik transisi terjadi karena aliran elektron, yang dinyatakan sebagai arus dengan satuan Ampere. Energi listrik yang tersimpan meliputi potensial listrik dalam medan elektrostatik dan potensial listrik dalam medan induktif, yaitu medan magnet. Energi listrik sering diekspresikan dalam hal daya [We, kWe, MWe] dan power-time [Wh, kWh]. Yang terakhir adalah ekspresi untuk energi.
- i) **Energi suara:** pergerakan energi melalui zat-zat dalam gelombang longitudinal (kompresi/rarefaction). Suara dihasilkan ketika suatu gaya menyebabkan suatu benda atau zat bergetar. Energi ditransfer melalui zat dalam gelombang.

## 1.3 Bentuk Energi

Setiap bentuk energi diukur menggunakan unit yang berbeda. Terkadang bentuk energi digambarkan sebagai potensi, di lain waktu sebagai laju. Unit-unit tersebut mungkin dari energi, atau kekuatan, atau keduanya. Perbedaan unit muncul karena konsep kerja, panas, dan listrik mendahului konsep energi yang menyatukan bentuk-bentuk transisi ini. Dan pilihan unit sering ditentukan oleh kenyamanan perhitungan. Misalnya, satuan umum energi elektromagnetik adalah elektron-volt [eV]. Saat menggunakan sel surya berbasis silikon untuk mengubah cahaya menjadi listrik, dibutuhkan sedikit lebih dari 1 foton eV untuk memindahkan elektron melintasi celah pita antara pita valansi dan konduksi. Energi ini juga dapat diekspresikan dalam Joules (satuan energi), tetapi alih-alih angka yang mendekati 1 eV kita

akan menggunakan angka yang mendekati  $2 \times 10^{-19}$  J. Tabel 1.1 merangkum bentuk, jenis, dan satuan umum energi:

Table 1.1 Bentuk energi dan satuan umum

Bentuk energy	Jenis energi		Konversi
	Transisi	Disimpan	
<b>Elektris</b> Power : W, kW Energi : kWh	Arus listrik	medan induktif medan elektrostatik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• konversi mudah &amp; efisien ke energi mekanik dan panas</li> <li>• konversi yang mudah dan kurang efisien ke energi elektromagnetik dan kimia</li> </ul>
<b>Elektromagnetik</b> Energi : eV	gelombang elektromagnetik	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• konversi mudah, tetapi tidak efisien</li> <li>• fotosintesis adalah proses konversi yang paling umum</li> <li>• tidak ada formulir tersimpan yang diketahui</li> </ul>
<b>Kimiawi</b> Energi/ massa: kJ/kg energi/mol: kJ/kmol	-	Potensi kimia: (+)eksotermik (-)endotermik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mudah dikonversi ke energi termal, listrik dan mekanik</li> <li>• tidak ada bentuk transisi yang diketahui</li> </ul>
<b>Nuklir</b> Energi : MeV	-	massa atom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mudah diubah menjadi energi mekanik, kemudian menjadi energi panas</li> <li>• tidak ada bentuk transisi yang diketahui</li> </ul>
<b>Mekanik</b> Energi: ft·lbf, J power: hp, kW, Btu/hr	kerja	Potensi aliran: regangan, elastis, kinetik, gravitasi (inersia)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mudah dikonversi ke bentuk energi lain</li> </ul>
<b>Termal</b> Energy: Btu, kJ, cal power: Btu/hr, W	panas	Energi internal: panas laten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• konversi yang tidak efisien menjadi energi mekanikal dan listrik</li> <li>• konversi dibatasi oleh hukum ke-2 termodinamika</li> <li>• semua bentuk lain mudah diubah menjadi energi panas</li> <li>• energi panas dapat disimpan dalam segala hal</li> </ul>

Ketika kita menggunakan energi, kita tidak menggunakannya sepenuhnya kita hanya mengubah bentuknya, itulah dimaksud dengan menggunakan energi. Kita mengubah satu bentuk energi menjadi yang lain. Mesin mobil membakar bensin, mengubah energi kimia dalam bensin menjadi energi gerak yang membuat mobil bergerak. Kincir angin kuno mengubah energi kinetik angin menjadi energi gerak untuk menggiling biji-bijian. Sel surya mengubah energi radiasi menjadi energi listrik.

Energi dapat berubah bentuk, tetapi jumlah total energi di alam semesta tetap sama. Satu-satunya pengecualian untuk hukum ini adalah ketika sejumlah kecil materi diubah menjadi energi selama fusi dan fisi nuklir.

## 1.4 Penggunaan Energi

Bayangkan berapa banyak energi yang digunakan setiap hari, seperti menggunakan alarm jam berbasis listrik untuk bangun tidur, mengisi daya ponsel, mandi dengan air yang dihangatkan oleh pemanas air panas menggunakan listrik atau gas alam. Klasifikasi penggunaan energi dalam sektor ekonomi.

### 1) **Residensial/Komersial**

Tempat tinggal adalah rumah orang, bangunan komersial termasuk gedung perkantoran, rumah sakit, toko, restoran, dan sekolah. Penggunaan energi perumahan dan komersial sering disatukan karena rumah dan bisnis menggunakan energi dengan cara yang sama untuk pemanasan, AC, pemanas air, penerangan, dan peralatan operasi.

Sektor residensial/komersial ekonomi mengkonsumsi 10,67 persen dari pasokan energi primer pada tahun 2016, dengan total 10,387 quads. Sektor residensial mengkonsumsi 6.045 quads dan sektor komersial mengkonsumsi 4.342 quads.

### 2) **Industri**

Sektor industri meliputi manufaktur, konstruksi, pertambangan, pertanian, perikanan, dan kehutanan. Sektor ini mengkonsumsi 21.478 quads energi pada tahun 2016, yang menyumbang 22,05 persen dari total konsumsi.

### 3) **Tenaga Listrik**

Sektor tenaga listrik meliputi fasilitas pembangkit listrik dan pembangkit listrik. Semua sektor lainnya mengkonsumsi listrik yang dihasilkan oleh sektor tenaga listrik. Sektor tenaga listrik mengkonsumsi 38,71 persen dari total pasokan energi pada tahun 2016, lebih banyak dari sektor lainnya, dengan total 37.705 quads.

### 4) **Transportasi**

Sektor transportasi mengacu pada konsumsi energi oleh mobil, bus, truk, kereta api, kapal, dan pesawat terbang. Pada 2016, AS mengkonsumsi 27.809 quad energi untuk transportasi, yang menyumbang 28,55 persen dari total konsumsi. 92,09 persen energi ini berasal dari produk minyak bumi seperti bensin, solar, dan bahan bakar jet.

## 1.5 Degradasi

Eksperimen telah menunjukkan bahwa sistem fisik secara alami cenderung menjadi semakin tidak teratur secara spontan. Di antara berbagai bentuk energi, panas sesuai dengan pergerakan molekul yang kacau. Bentuk-bentuk energi lainnya, kadang-kadang digambarkan sebagai bentuk "mulia" atau "tersedia", diperintahkan pada tingkat mikroskopis dan dengan demikian cenderung berubah menjadi panas. Fenomena ini dikenal sebagai disipasi, dan kami mengatakan bahwa panas adalah bentuk energi yang terdegradasi.

Sangat mudah untuk menghasilkan panas dari jumlah energi mulia yang setara, misalnya dalam boiler dan oven listrik atau pembakaran, orin pengumpul surya untuk pemanas air. Namun, transformasi terbalik tidak mungkin dilakukan. Jumlah panas tertentu tidak dapat sepenuhnya diubah menjadi energi mekanik, listrik atau kimia menggunakan peralatan siklus tertutup, kembali secara berkala ke keadaan awal. Ketidakmungkinan ini adalah salah satu hukum dasar fisika, dikonfirmasi oleh eksperimen yang tak terhitung jumlahnya: alam memungkinkan kita untuk mengubah hanya sebagian kecil dari panas yang tersedia menjadi bentuk energi lain, dan fraksi ini tidak pernah dapat melebihi nilai maksimum tertentu. Ini membatasi efisiensi turbin uap di pembangkit listrik, mesin mobil dan pesawat terbang, dan semua mesin lain yang menghasilkan energi mekanik dari energi panas gas panas.

Panas sering muncul sebagai "kerugian", ketika bentuk energi lain ditangani (kecuali tentu saja, untuk pemanasan domestik atau industri). Untuk mengeksploitasi energi nuklir atau energi kimia di pembangkit listrik atau mobil, kami menggunakan reaksi nuklir atau kimia untuk menghasilkan panas, hanya beberapa di antaranya yang kemudian dapat diubah kembali menjadi energi listrik atau mekanik. Situasi terbaik adalah konversi langsung energi mekanik menjadi energi listrik, dan sebaliknya. Tetapi

bahkan dalam kasus-kasus ini, sulit dalam praktiknya untuk mencegah sebagian dari energi mulia ini berubah menjadi panas. Jika poros motor listrik menggerakkan poros alternator, motor mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, dan alternator mengubah ini kembali menjadi energi listrik. Tetapi secara keseluruhan, lebih sedikit energi yang dipulihkan daripada yang awalnya dipasok; perbedaannya diperhitungkan oleh pelepasan panas melalui pemanasan joule di kumparan, atau melalui gesekan pada bantalan, dan ini tidak mungkin untuk dihilangkan sepenuhnya. Kesetaraan antara energi dapat dibandingkan dengan kesetaraan antara mata uang yang dapat dikonversi, dengan 1 dolar senilai 0,98 euro misalnya. Disipasi sebagai panas memainkan peran yang sama dengan biaya komisi bank, yang mencegah kita memulihkan jumlah yang kita mulai dengan jika kita mengubah dolar menjadi euro dan kembali. Nilai keseluruhan atau energi yang sama masih ada, tetapi tidak di kantong kita.

## 1.6 Penyimpanan Energi

Menyimpan energi selalu menjadi tantangan bagi sistem energi terbarukan. Karena energi terbarukan umumnya terputus-putus, sarana penyimpanan energi sangat penting untuk sistem yang berdiri sendiri dan energi terbarukan yang saling berhubungan. Sistem tenaga konvensional harus menyediakan tenaga listrik ketika energi terbarukan tidak tersedia. Hal ini menyebabkan masalah stabilitas untuk utilitas dan mengurangi pemulihan investasi. Penyimpanan elektro kimia (baterai) adalah sarana yang lazim untuk penyimpanan listrik, tetapi banyak lainnya lebih praktis dan ekonomis. Udara terkompresi, kumparan super konduktor, dan sel bahan bakar hidrogen adalah beberapa metode lain yang sedang dikembangkan. Efisiensi konversi dari energi panas dan mekanik ke energi listrik telah membatasi pengembangan sebagian besar alternatif ini.

Listrik adalah bentuk energi yang sangat teratur, yang berarti mudah diubah menjadi energi termal atau mekanik. Namun, energi panas adalah bentuk energi yang tidak teratur dan konversi ke listrik tidak efisien. Misalnya, konversi termal konvensional (pembangkit listrik) kurang dari 50% efisien. Proses pembakaran bahan bakar fosil untuk menggerakkan generator dan menciptakan listrik tidak efisien, meskipun merupakan sumber utama dari semua listrik yang dihasilkan. Sayangnya, sel fotovoltaik (PV) dan teknologi turbin angin kurang efisien, meskipun pertumbuhan dan kemajuan teknologi menurunkan biaya. Jika metode penyimpanan energi yang efisien tersedia, sumber terbarukan dapat menggantikan pembangkit listrik terpusat dengan pembangkit lokal. Saluran transmisi dapat diminimalkan, polusi berkurang, dan efek negatif dari pembakaran bahan bakar fosil dikurangi.

### 1.6.1 Baterai

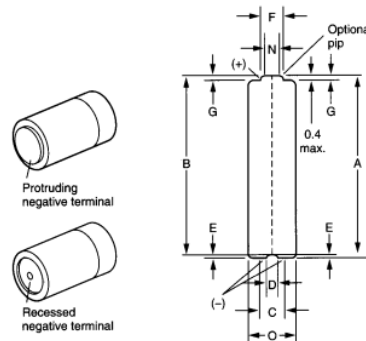
Baterai adalah perangkat yang mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan aktifnya secara langsung menjadi energi listrik melalui reaksi oksidasi-reduksi (redoks) elektrokimia. Dalam kasus sistem yang dapat diisi ulang, baterai diisi ulang dengan kebalikan dari proses. Jenis reaksi ini melibatkan transfer elektron dari satu bahan ke bahan lain melalui rangkaian listrik. Dalam reaksi redoks nonelektrokimia, seperti berkarat atau terbakar, transfer elektron terjadi secara langsung dan hanya panas yang terlibat. Karena baterai secara elektrokimia mengubah energi kimia menjadi energi listrik, baterai tidak tunduk, seperti halnya pembakaran atau mesin panas, dengan batasan siklus Carnot yang ditentukan oleh hukum kedua termodinamika. Oleh karena itu, baterai, mampu memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi. Sementara istilah "baterai" sering digunakan, unit elektrokimia dasar yang dirujuk adalah "sel". Baterai terdiri dari satu atau lebih sel-sel ini, dihubungkan secara seri atau paralel, atau keduanya, tergantung pada tegangan dan kapasitas keluaran yang diinginkan.

Sel terdiri dari tiga komponen utama:

1. Anoda atau elektroda negatif: elektroda pereduksi atau bahan bakar yang melepaskan elektron ke sirkuit eksternal dan teroksidasi selama reaksi elektrokimia.
2. Katoda atau elektroda positif: elektroda pengoksidasi yang menerima elektron dari sirkuit eksternal dan berkurang selama reaksi elektrokimia.
3. Elektrolit: konduktor ionik yang menyediakan media untuk transfer muatan, sebagai ion, di dalam sel antara anoda dan katoda. Elektrolit biasanya berupa cairan, seperti air atau pelarut lain, dengan garam

terlarut, asam, atau alkali untuk diberikan konduktivitas ionik. Beberapa baterai menggunakan elektrolit padat, yang merupakan konduktor ionik pada suhu operasi sel.

Kadang-kadang produsen peralatan dapat merancang rongga baterai perangkat mereka di sekitar baterai dari satu produsen. Sayangnya baterai yang dibuat oleh berbagai produsen tidak sama persis ukurannya. Meskipun perbedaannya mungkin tidak terlalu besar, hal ini dapat mengakibatkan desain rongga yang tidak akan menerima baterai dari semua produsen. Seiring dengan variasi ukuran, desain rongga baterai juga harus mampu mengakomodasi konfigurasi baterai yang tidak biasa yang termasuk dalam standar International Electrotechnical Commission (IEC). Misalnya, beberapa produsen baterai menawarkan baterai dengan terminal negatif tersembunyi yang dirancang untuk mencegah kontak saat dipasang mundur. Sayangnya terminal tersembunyi yang negatif akan berpasangan hanya dengan kontak yang lebarnya kurang dari diameter terminal baterai. Gambar 1.1. mengilustrasikan perbedaan dimensi antara sel dengan terminal standar dan terminal tersembunyi.



Gambar 1.1. Jenis terminal baterai yang termasuk dalam standar IEC.  
(Sumber : Handbook of Battery: 2001)

Rongga baterai tidak boleh dirancang di sekitar baterai dari satu pabrikan yang baterainya mungkin memiliki ukuran atau konfigurasi yang unik. Sebaliknya, desain rongga harus didasarkan pada standar International Electrotechnical Commission (IEC) dan dibangun untuk mengakomodasi ukuran maksimum dan minimum.

Penyimpanan baterai menggunakan cara elektrokimia adalah bentuk energi semiorder. Listrik yang dihasilkan dari penyimpanan baterai mudah diubah menjadi panas atau cahaya, tetapi proses konversi di dalam baterai relatif tidak efisien. Jenis baterai dikategorikan sebagai primer dan sekunder. Baterai Primary tidak dapat diubah—baterai tidak dapat diisi ulang dan dibuang setelah energi dikonsumsi. Sel alkali umum adalah contoh dari jenis ini. Baterai sekunder dapat diisi ulang. Baterai timbal-asam adalah jenis yang paling umum dan digunakan dalam mobil dan sistem cadangan. Efisiensi baterai sekunder adalah 70% hingga 80% untuk siklus pulang pergi (pengisian dan pengosongan). Energi hilang dalam bentuk panas untuk siklus pengisian dan pengosongan. Jenis umum lainnya dari baterai sekunder termasuk nikel–kadmium (NiCad), nikel–logam hidrida (NiMh), lithium-ion (LI), seng–udara, dan litium–polimer

### 1) Baterai Timbal-Asam (Pb-acid)

Baterai timbal-asam terdiri dari anoda timbal (Pb), katoda oksida timbal (PbO<sub>2</sub>), dan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sebagai elektrolit. Asam membutuhkan wadah plastik, dan bahan lain seperti antimon atau kalsium ditambahkan ke piring untuk menambah kekuatan dan kinerja. Baterai siklus dalam yang digunakan dalam sistem penyimpanan terbarukan kadang-kadang disebut "baterai traksi" dan menggunakan pelat yang lebih tebal dan luas permukaan pelat yang lebih besar daripada baterai mobil biasa. Baterai otomatis yang khas kadang-kadang disebut baterai "pengapian" atau "starter", karena dirancang untuk tugas singkat saat ini. Baterai timbal-asam klasik biasanya disebut sebagai "kebanjiran" jika elektrolitnya dalam bentuk cair. Teknologi rekombinan memungkinkan baterai timbal-asam disegel dan menghilangkan kebutuhan untuk menambahkan air atau ventilasi hidrogen.

Baterai disebut sebagai "katup yang diatur timbal-asam." Baterai timbal-asam juga tersedia sebagai versi "sel gel" yang disegel, yang memiliki elektrolit yang tidak dapat dicairkan dan dapat dipasang di posisi apa pun. Baterai sel gel tidak dapat diisi atau dikosongkan dengan kecepatan tinggi. Gel dapat "menggelembung" pada suhu tinggi, menyebabkan rongga permanen dan kapasitas berkurang. Namun, keunggulan baterai sel gel telah menyebabkannya menjadi pengganti umum untuk baterai yang kebanjiran.

State of charge (SOC) adalah ukuran kapasitas baterai yang tersisa. Metode yang paling akurat adalah pengukuran berat jenis (SG). Baterai timbal-asam yang terisi penuh memiliki SG sekitar 1,28, tergantung pada suhu. SG adalah rasio kepadatan elektrolit asam sulfat dibandingkan dengan air. Pengukuran pengisian dan pengosongan dengan faktor efisiensi C/D yang sesuai berdasarkan suhu baterai juga memberikan perkiraan SOC yang baik. SOC juga dapat diperkirakan dengan mengukur tegangan sel misalnya, 11,4 V untuk baterai 12 V (6 sel pada 1,9 V/sel) menunjukkan sekitar 20% SOC.

Masa pakai baterai timbal-asam tergantung pada jumlah dan kedalaman pengosongan (DOD). Kedalaman pengosongan adalah persentase kapasitas yang telah dihapus dibandingkan dengan keadaan terisi penuh. DOD adalah pelengkap dari SOC. Jika baterai habis sebesar 80% dari kapasitas penuh, DOD adalah 80% dan SOC adalah 20%. DOD biasanya dibatasi antara 75% dan 80% untuk melindungi dari pembekuan dan memperpanjang umur. Pelat timah akhirnya bergabung dengan asam untuk membuat timbal sulfat, meninggalkan kapasitas pelat yang tersisa terlalu rendah untuk melayani beban.

Peningkatan pada baterai timbal-asam sel gel adalah desain absorbed glass matt (AGM). Matt berpori yang terdiri dari boron-silikat mengandung elektrolit asam sulfat di antara pelat. Matt adalah 95% duduk urat dengan asam, dan kadang-kadang disebut "elektrolit kelaparan." Matt mencegah tumpahan, menghilangkan kerusakan beku, menghilangkan kehilangan air, dan memiliki tingkat pelepasan diri yang rendah. Namun, biaya baterai AGM dua atau tiga kali lipat dari baterai timbal-asam yang kebanjiran.

## 2) **Baterai Nikel–Kadmium (NiCad)**

NiCad, atau nikel-kadmium, menggunakan anoda kadmium dan katoda nikel-hidroksida dalam wadah stainless steel. Elektrolitnya adalah kalium hidroksida (KOH) dengan pemisah nilon. Sel NiCad hampir setengah dari berat sel timbal-asam. Sel yang disegel berarti tidak ada masalah tumpahan atau pemasangan. Dua masalah dengan baterai NiCad telah menyebabkannya menjadi kurang populer. Kadmium adalah logam yang berbahaya bagi lingkungan, dan pembuangan dibatasi. Sel juga menunjukkan masalah memori, menyebabkan berkurangnya kapasitas sebelum mencapai kehidupan yang diharapkan. Debit penuh ke kapasitas nol dan pengisian ulang harus dilakukan secara teratur untuk mencegah kegagalan memori.

## 3) **Baterai Lithium-Ion (Li-ion)**

Sel LI adalah baterai yang disukai untuk sistem komputer, karena kapasitas kepadatan energinya yang tinggi. Berat atom lithium adalah 6,9, dibandingkan dengan 207 untuk timbal. Tegangan sel LI adalah 3,5 dibandingkan dengan 2,0 untuk timbal-asam. Lebih sedikit sel untuk tegangan aplikasi yang sama berarti biaya produksi yang lebih rendah. Namun, pelat harus lebih tebal untuk mempertahankan masa pakai yang memadai, yang meningkatkan biaya secara signifikan untuk baterai berkapasitas lebih besar. Baterai LI juga membutuhkan sirkuit pengisian daya yang rumit untuk mencegah kerusakan dengan pengisian daya yang berlebihan.

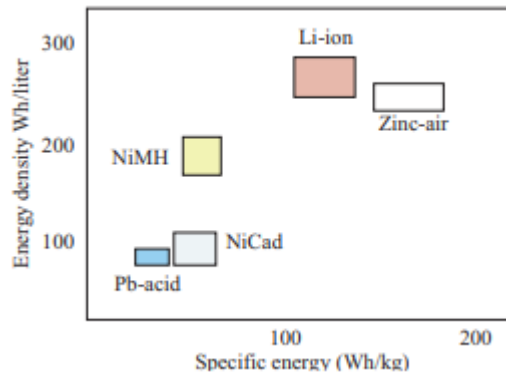
## 4) **Baterai Nikel–Logam Hidrida (NiMh)**

Sel NiMh memiliki konstruksi yang mirip dengan sel NiCad kecuali untuk anoda hidrida logam. Baterai NiMh juga digunakan untuk banyak aplikasi berdaya rendah, meskipun mereka menunjukkan self-discharge yang tinggi, dan harus diisi secara teratur untuk mempertahankan kapasitas. NiMh juga memiliki kapasitas daya puncak yang buruk dan rentan terhadap kerusakan pengisian yang berlebihan.

## 5) **Jenis Baterai Lainnya**



Jenis baterai lain yang sedang dikembangkan adalah lithium-polimer dan seng-udara. Baterai polimer menunjukkan karakteristik energi spesifik yang baik, tetapi elektrolit padat membatasi kapasitas. Baterai seng-udara juga menampilkan karakteristik energi spesifik yang baik, tetapi membutuhkan ventilasi udara yang memadai untuk pertukaran elektroda oksigen ke karbon dan seng. Energi spesifik (watt-jam/massa) adalah ukuran kinerja ketika berat menjadi perhatian utama dalam aplikasi. Kepadatan spesifik (watt-jam/volume) adalah yang terpenting ketika ruang sangat penting. Gambar 1.2 menunjukkan energi spesifik dan kepadatan spesifik untuk berbagai jenis baterai isi ulang. Baterai timbal-asam memiliki kepadatan energi terendah dan energi spesifik terendah dari semua jenis elektrokimia saat ini. Ini juga yang paling murah. Baterai lithium memiliki kepadatan tertinggi tetapi juga lebih mahal.



Gambar 1.2. Perbandingan energi spesifik  
(Sumber : Department of Mechanical Engineering – Engineering Mechanics, 2018)

## 1.7 Efek Penggunaan Energi

Relatif mudahnya penyimpanan dan juga transportasi jarak jauh batubara, minyak dan gas telah menjadi salah satu faktor kunci perkembangan industri selama dua abad terakhir. Meningkatnya penggunaan mobil ini juga karena kemampuannya untuk membawa bahan bakar yang cukup untuk menempuh jarak beberapa ratus kilometer. Namun, listrik adalah satu-satunya bentuk energi yang dapat diubah hampir seluruhnya menjadi salah satu dari yang lain dan diangkut jarak jauh dalam jumlah besar dengan biaya yang relatif rendah. Namun demikian, kehilangan energi karena panas dari saluran tegangan tinggi dan transformator mencapai 8%.

### 1.7.1 Dampak Merugikan dari Energi

Menangani semua jenis energi memiliki taraf tertentu, efek berbahaya pada lingkungan kita, dan ini harus dinilai secara individual. Contoh dampak negative dari proses penggunaan energy :

- 1) Residu pembakaran batubara, minyak, bensin atau bahkan gas tertentu jika tidak terbakar dengan benar, berbahaya bagi kesehatan manusia. Karbon dioksida adalah gas yang dipancarkan dalam jumlah terbesar. Itu menumpuk di atmosfer dan dalam bahaya mempengaruhi iklim kita dengan meningkatkan efek rumah kaca.
- 2) Reaksi nuklir menghasilkan limbah radioaktif, yang harus diproses atau dikurangi, terutama limbah berumur panjang.
- 3) Pembangkit listrik tenaga air memiliki dampak negatif pada lembah.
- 4) Turbin angin berisik dan tidak menjamin produksi berkelanjutan. Mereka juga mengambil banyak ruang untuk jumlah daya yang agak kecil yang mereka berikan.
- 5) Sel fotovoltaik memiliki kelemahan yang sama dan sangat mahal. Oleh karena itu, konversi energi matahari menjadi listrik hanya cocok untuk memasok tempat tinggal yang sangat terisolasi, atau untuk mengoperasikan perangkat portabel kecil seperti kalkulator saku. Selain itu, banyak energi yang dibutuhkan untuk memproduksi sel fotovoltaik.

- 6) Polusi termal adalah konsekuensi dari degradasi energi dan semua sumber energi tak terbarukan. Sebagian besar energi fosil yang digunakan akhirnya diubah menjadi panas. Contoh sebelumnya menunjukkan bagaimana mobil beroperasi dengan mengubah energi kimia yang dipasok sebagai bensin menjadi panas yang dilepaskan ke lingkungan. Meskipun polusi termal ini terlalu kecil untuk mempengaruhi iklim, ia dapat memiliki efek lokal: pembangkit listrik termal atau nuklir yang didinginkan oleh air dari sungai meningkatkan suhu hilir air ini secara signifikan, dan dengan demikian dapat memodifikasi keseimbangan ekologisnya. Penghematan yang signifikan dapat dilakukan dengan memulihkan panas yang hilang ini. Setengah dari energi yang kita konsumsi ditujukan untuk pemanasan domestik atau industri, memanfaatkan batu bara, gas, bahan bakar minyak atau listrik. Ini dapat dikurangi melalui penggunaan panas yang lebih efisien dari pembangkit listrik. Konsumsi energi per kapita rata-rata tidak hanya mencerminkan standar hidup, tetapi juga jumlah energi yang terbuang.

## Soal

- 1) Sebutkan bentuk energi apa saja yang berada di tempat tinggal anda ?
- 2) Kira-kira, di tempat tinggal atau rumah anda, berapa rata-rata penggunaan energi listrik anda per bulan ?
- 3) Apa saja dampak merugikan dari penggunaan energy baik terhadap lingkungan maupun diri anda sendiri ?
- 4) Buatlah daftar setidaknya tiga hingga lima cara anda dalam menghemat energi !
- 5) Jelaskan pendapat anda tentang suatu Negara yang menerapkan sumber energi terbarukan di semua sector penunjang kehidupan seperti sistem pembangkit listrik, akan tetapi dilain sisi melakukan ekspor energi tidak terbarukan?

# BAB II

## Sumber Energi

### 2.1 Pendahuluan

Energi merupakan andalan masyarakat industri. ketika populasi dunia meningkat dan orang-orang berjuang untuk standar hidup yang lebih tinggi, jumlah energi yang diperlukan untuk menopang masyarakat kita semakin meningkat. Pada saat yang sama, ketersediaan sumber tak terbarukan, terutama bahan bakar cair, menyusut dengan cepat.

Oleh karena itu, ada kesepakatan umum bahwa untuk menghindari krisis energi, jumlah energi yang dibutuhkan untuk menopang masyarakat harus dibatasi dan, sejauh mungkin, sumber-sumber terbarukan harus digunakan. Akibatnya, konservasi dan teknologi energi terbarukan akan semakin penting dan dapat diandalkan, informasi terkini tentang ketersediaan, efisiensi, dan biaya diperlukan untuk merencanakan masa depan energi yang aman.

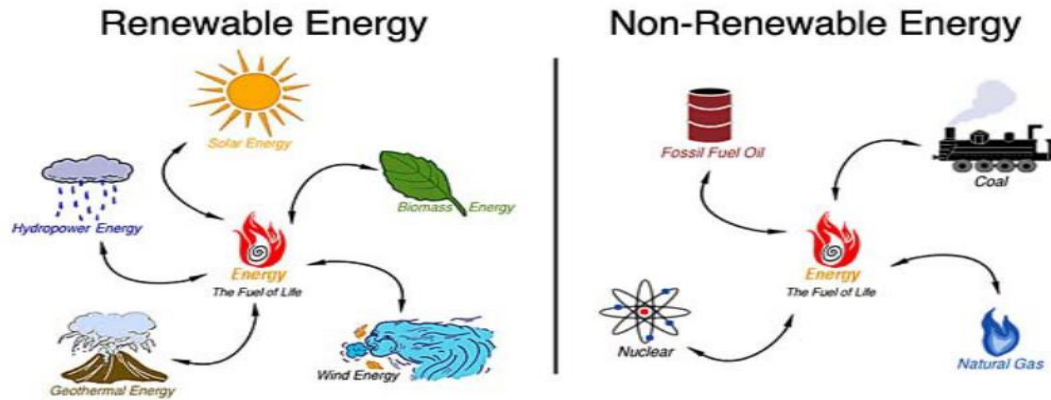
Energi terbarukan merupakan energi dari sumber yang secara alami mengisi ulang tetapi alirannya terbatas; sumber daya terbarukan hampir tidak habis-habisnya dalam durasi tetapi terbatas dalam jumlah energi yang tersedia per unit waktu.

Hari ini kita terutama menggunakan bahan bakar fosil untuk memanaskan dan memberi daya pada rumah kita dan mengisi bahan bakar mobil kita. Lebih mudah menggunakan batu bara, minyak, dan gas alam untuk memenuhi kebutuhan energi kita, tetapi kita memiliki persediaan bahan bakar ini yang terbatas di Bumi. Kami menggunakannya jauh lebih cepat daripada yang sedang dibuat. Bahkan secara kenyataannya akan kehabisan. Dan karena masalah keamanan dan problem pembuangan limbah, Amerika Serikat akan menghentikan sebagian besar kapasitas nuklirnya pada tahun 2020. Sementara itu, kebutuhan energi bangsa diperkirakan akan tumbuh sebesar 33 persen selama 20 tahun ke depan. Energi terbarukan dapat membantu mengisi kesenjangan.

Bahkan jika kita memiliki pasokan bahan bakar fosil yang tidak terbatas, menggunakan energi terbarukan lebih baik bagi lingkungan. Kita sering menyebut teknologi energi terbarukan "bersih" atau "hijau" karena menghasilkan sedikit polutan. Pembakaran bahan bakar fosil, bagaimanapun, mengirimkan gas rumah kaca ke atmosfer, menjebak panas matahari dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Para ilmuwan iklim umumnya setuju bahwa suhu rata-rata Bumi telah meningkat dalam satu abad terakhir. Jika tren ini berlanjut, permukaan laut akan naik, dan para ilmuwan memperkirakan bahwa banjir, gelombang panas, kekeringan, dan kondisi cuaca ekstrem lainnya dapat terjadi lebih sering.

Polutan lain dilepaskan ke udara, tanah, dan air ketika bahan bakar fosil dibakar. Polutan ini berdampak dramatis pada lingkungan dan manusia. Polusi udara berkontribusi pada penyakit seperti asma. Hujan asam dari sulfur dioksida dan nitrogen oksida membahayakan tanaman dan ikan. Nitrogen oksida juga berkontribusi terhadap kabut asap. Energi terbarukan juga akan membantu kita mengembangkan kemandirian dan keamanan energi. Amerika Serikat mengimpor lebih dari 50 persen minyaknya, naik dari 34 persen pada 1973. Mengganti sebagian minyak bumi kita dengan bahan bakar yang terbuat dari bahan tanaman, misalnya, dapat menghemat uang dan memperkuat ketahanan energi kita.

Pada Gambar 2.1. menunjukkan klasifikasi sumber energi yang terdiri atas sumber energi terbarukan (*renewable energy*) dan sumber energi tidak terbarukan (*non-renewable energy*). Sumber energi terbarukan terdiri atas sumber energi dari tenaga matahari, tenaga angin, energi biomassa. Sedangkan sumber energi tidak terbarukan terdiri atas bahan bakar fosil, gas alam, dan batu bara.



Gambar 2.1. Penggambaran sumber energi)  
(Sumber : EMC North Georgia, 2016))

Energi terbarukan berlimpah, dan teknologinya meningkat setiap saat. Ada banyak cara untuk menggunakan energi terbarukan. Sebagian besar dari kita sudah menggunakan energi terbarukan dalam kehidupan kita sehari-hari.

Keuntungan dari energi terbarukan adalah bahwa mereka berkelanjutan (tidak dapat diterapkan), di mana-mana (ditemukan di mana-mana di seluruh dunia, berbeda dengan bahan bakar fosil dan mineral), dan pada dasarnya tidak mencemari. Perhatikan bahwa turbin angin dan panel fotovoltaik tidak membutuhkan air untuk pembangkit listrik, berbeda dengan pembangkit uap yang ditembakkan oleh bahan bakar fosil dan tenaga nuklir.

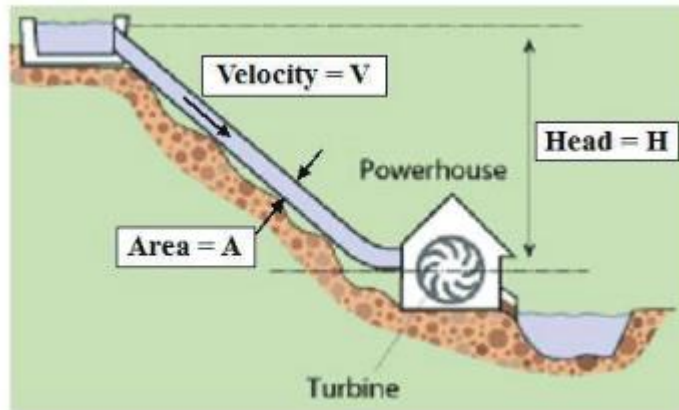
Kerugian dari energi terbarukan adalah variabilitas dan kepadatan rendah, yang secara umum menghasilkan biaya awal yang lebih tinggi. Untuk berbagai bentuk energi terbarukan, kerugian lain atau masalah yang dirasakan adalah polusi visual, bau dari biomassa, kematian unggas dan kelelawar dengan turbin angin, dan air garam dari energi panas bumi. Di mana pun fasilitas terbarukan yang besar akan ditempatkan, akan ada masalah yang dirasakan dan nyata bagi masyarakat setempat. Untuk pembangkit listrik konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil, untuk energi nuklir, dan bahkan untuk energi terbarukan.

## 2.2 Sumber Energi Terbarukan

Sumber daya alam diberikan oleh alam dan dapat digunakan sebagai sumber energi. Sumber daya alam terbarukan adalah sumber daya alam yang dapat diperbarui, atau diisi ulang dalam jumlah waktu yang wajar (dalam tahun atau rentang hidup manusia), setelah digunakan. Energi terbarukan dihasilkan dari sumber alami (matahari, angin, hujan, pasang surut, dan vegetasi) dan dapat dihasilkan lagi dan lagi saat dibutuhkan. Umumnya diisi ulang secara alami. Misalnya, pohon adalah sumber daya terbarukan karena begitu pohon dihilangkan dan digunakan, pohon baru dapat tumbuh di tempatnya.

### 1) Tenaga air

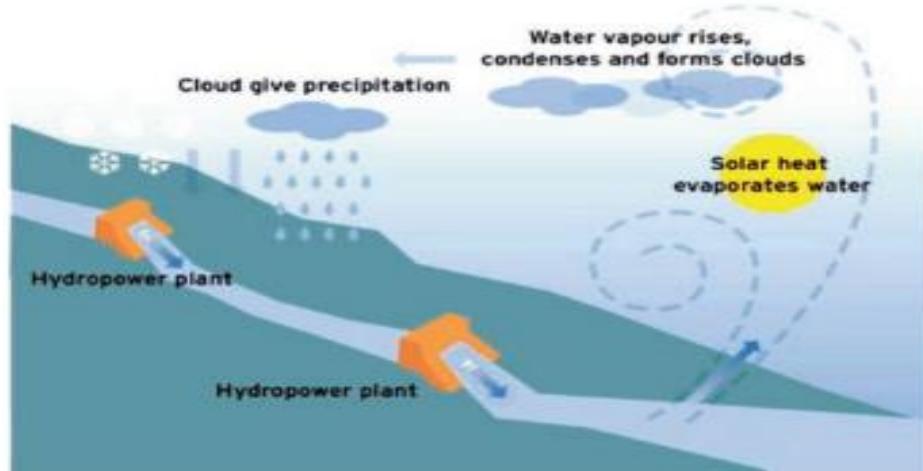
Tenaga air adalah sumber daya terbarukan kami yang paling matang dan terbesar dengan menggunakan bendungan di sungai untuk mempertahankan reservoir air yang besar. Air dilepaskan melalui turbin untuk menghasilkan daya. Sistem "Run of the river", mengalihkan air dari sungai dan mengarahkannya melalui pipa ke turbin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pembangkit listrik mikro hidro memanfaatkan energi air jatuh untuk menghasilkan listrik. Ini tidak sama dengan proyek bendungan hidro skala besar. Pemasangan yang tepat tidak memiliki efek negatif pada aliran lokal, cukup mengalihkan sebagian air yang tersedia dan kemudian mengembalikan air itu kembali ke aliran. Karena air mengalir siang dan malam, sistem mikro hidro membutuhkan penyimpanan baterai yang jauh lebih sedikit daripada teknologi lainnya. Bahkan jika alirannya jauh, itu mungkin masih layak. Jarak beberapa kilometer dapat ditempuh dengan memanfaatkan generator tegangan tinggi.



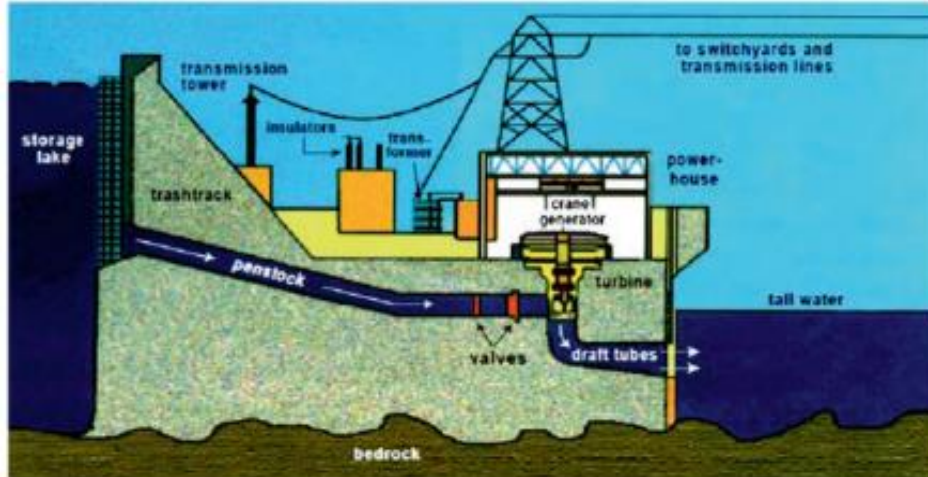
Gambar 2.2. Model Turbin Mikrohidro  
 (Sumber : DEco-Energy and Materials Science and Engineering: 2012)

Pembangkit listrik tenaga air tidak menghasilkan emisi udara tetapi dapat mempengaruhi kualitas air dan habitat satwa liar. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga air sekarang sedang dirancang dan dioperasikan untuk meminimalkan dampak pada sungai. Beberapa dari mereka mengalihkan sebagian aliran di sekitar bendungan mereka untuk meniru aliran alami sungai. Tetapi sementara ini meningkatkan habitat sungai satwa liar, itu juga mengurangi output pembangkit listrik. Selain itu, tangga ikan dan pendekatan lainnya, seperti turbin yang ditingkatkan, sedang digunakan untuk membantu ikan dengan migrasi dan menurunkan jumlah ikan yang terbunuh.

Prinsip-prinsip di mana pembangkit listrik tenaga air beroperasi ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 . Pembangkit listrik tenaga air juga dapat dibagi, berdasarkan mode operasional.



Gambar 2.3. Tenaga air menghasilkan listrik dari siklus alami air.  
 (Sumber : (Price, 2014))

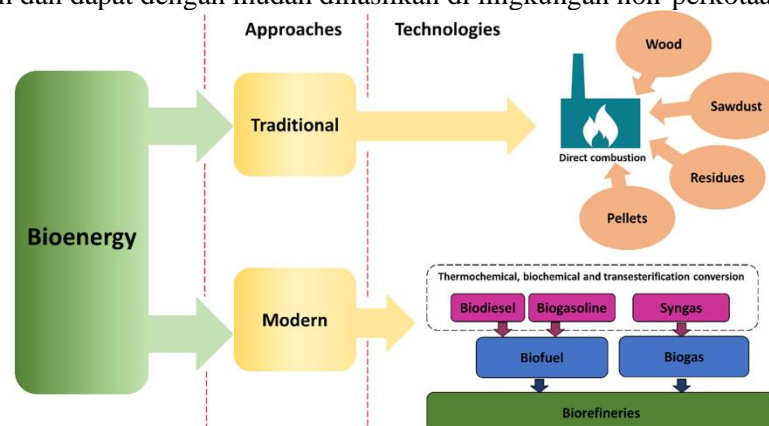


Gambar 2.4. Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga air.  
(Sumber : Price, 2014)

Menjadi aliran sungai dan waduk (pondase, waduk, dan dipompa) pembangkit listrik. Aliran pembangkit listrik sungai menggunakan aliran air dari hulu tanpa penyimpanan yang cukup besar. Ini mungkin aliran atau aliran alami yang ditentukan oleh penggunaan air lain di hulu. Pembangkit listrik run-of-river menggunakan aliran air dalam jangkauan alami sungai. Jenis pembangkit listrik tenaga air ini menunjukkan fluktuasi dalam produksi energi yang disebabkan oleh periode aliran rendah atau luapan, sedangkan pembangkit listrik reservoir dapat menyimpan air (yaitu, energi) dalam jangka waktu yang lama dan menghasilkan pasokan listrik yang stabil, relatif independen dari variasi arus masuk jangka pendek.

## 2) Bioenergy

Bioenergi adalah bentuk energi terbarukan yang dihasilkan dari sumber biomassa melalui pendekatan tradisional dan modern, di mana teknik tradisional mengandalkan pembakaran biomassa untuk menghasilkan energi sementara teknologi modern melibatkan produksi biofuel cair, pembangkitan biogas dengan pencernaan anaerobik, atau bio-kilang seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5. Selanjutnya, produksi bioenergi dapat diperoleh dalam bentuk limbah pertanian dan pengolahan kayu, residu, dan hasil hutan seperti residu penebangan. Sebagai sumber daya terbesar keempat di dunia, adaptasi biomassa menjadi sumber energi sangat prospektif karena sangat melimpah di alam dan dapat dengan mudah dihasilkan di lingkungan non-perkotaan



Gambar 2.5. Prinsip pembangkit listrik tenaga biomassa.  
(Sumber : <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-022-10392-7/figures/1>)

### 3) Biopower

Setelah tenaga air, biomassa adalah sumber daya energi terbarukan terkemuka kedua di negara ini, terhitung lebih dari 7.000 MW kapasitas terpasang. Beberapa utilitas dan perusahaan pembangkit listrik dengan pembangkit listrik tenaga batu bara telah menemukan bahwa mengganti beberapa batu bara dengan biomassa adalah pilihan berbiaya rendah untuk mengurangi emisi yang tidak diinginkan. Sebanyak 15 persen batubara dapat diganti dengan biomassa. Biomassa memiliki lebih sedikit sulfur daripada batu bara. Oleh karena itu, lebih sedikit sulfur dioksida, yang berkontribusi terhadap hujan asam, dilepaskan ke udara. Selain itu, menggunakan biomassa dalam boiler ini mengurangi emisi dinitrogen oksida.

Sebuah proses yang disebut gasifikasi-konversi biomassa menjadi gas, yang dibakar dalam turbin gas adalah cara lain untuk menghasilkan listrik. Pembusukan biomassa di tempat pembuangan sampah juga menghasilkan gas, sebagian besar metana, yang dapat dibakar dalam boiler untuk menghasilkan uap untuk pembangkit listrik atau proses industri. Biomassa juga dapat dipanaskan tanpa adanya oksigen untuk mengubahnya secara kimiawi menjadi jenis bahan bakar minyak, yang disebut minyak pirolisis. Minyak pirolisis dapat digunakan untuk pembangkit listrik dan sebagai stok pakan untuk bahan bakar dan produksi kimia.

### 4) Biofuels

Biomassa dapat diubah langsung menjadi bahan bakar cair, yang disebut biofuel. Karena biofuel mudah diangkut dan memiliki kepadatan energi yang tinggi, mereka lebih disukai untuk bahan bakar kendaraan dan kadang-kadang pembangkit listrik stasioner. Biofuel yang paling umum adalah etanol, alkohol yang terbuat dari fermentasi biomassa tinggi karbohidrat. Sumber etanol terbesar saat ini adalah jagung. Beberapa kota menggunakan etanol sebagai aditif bensin untuk membantu memenuhi standar kualitas udara ozon. Kendaraan berbahan bakar fleksibel juga sekarang ada di pasaran, yang dapat menggunakan campuran bensin dan etanol, seperti E85 campuran etanol 85 persen dan bensin 15 persen. Biofuel lain adalah biodiesel, yang dapat dibuat dari lemak nabati dan hewani. Biodiesel dapat digunakan untuk bahan bakar kendaraan atau sebagai bahan bakar tambahan untuk mengurangi emisi.

Etanol jagung dan biodiesel menyediakan sekitar 0,4 persen dari total pasar bahan bakar cair. Untuk meningkatkan pasokan biofuel yang tersedia, para peneliti sedang menguji residu tanaman seperti *cornstalks* dan daun serpihan kayu, sisa makanan, rumput, dan bahkan sampah sebagai sumber biofuel potensial.

### 5) Energi Panas Bumi

Energi Panas Bumi membutuhkan sumber daya menganggur yang memiliki potensi untuk memenuhi kebutuhan listrik dan pemanas di masa depan. Menjadi sumber daya terbarukan dan berkelanjutan, kerusakan yang dilakukan terhadap lingkungan secara bertahap rendah. Ini bebas karbon dan menyediakan pasokan panas terus-menerus. Energi ini merupakan solusi yang terjangkau untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan pemanasan global.

Panas bumi berasal dari kata Yunani, di mana 'Geo' mengacu pada Bumi, dan 'Therme' mengacu pada Panas. Panas berasal dari bawah kerak bumi. Umumnya, ditemukan jauh di bawah batuan cair 'Magma' yang terbakar di bumi dan disimpan dalam batuan dan uap di pusat bumi. Dalam proses menghasilkan tenaga dari energi ini, sumur perlu digali sejauh 1,6 mil atau lebih ke dalam reservoir bawah tanah untuk mendapatkan uap dan air panas di sana, yang kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan turbin yang terhubung ke generator listrik.

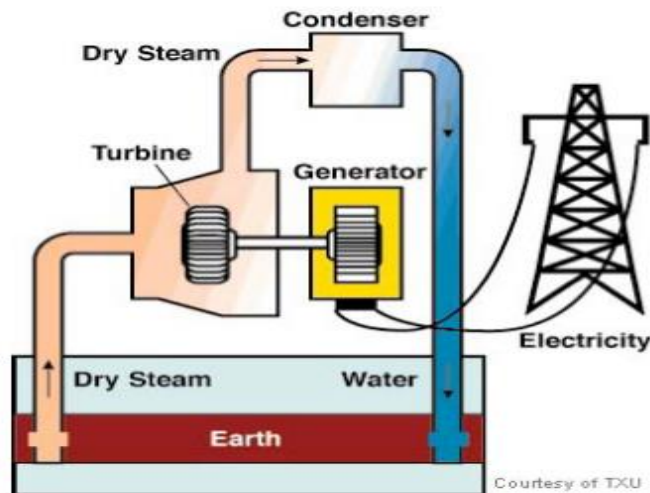
Energi terbarukan kemungkinan besar tidak akan pernah berakhir. Relatif, uap bawah tanah dan air panas yang dihasilkan oleh peluruhan unsur-unsur radioaktif di dalam Bumi adalah sumber daya alam yang dihasilkan untuk waktu yang tidak terbatas. Selain itu, survei terbaru menunjukkan bahwa hampir 10% dari kebutuhan energi saat ini dapat didukung setelah proses penyimpanan berhasil dibangun. Oleh karena itu, energi ini adalah sumber daya terbarukan.



Tempat yang cocok di mana energi ini bekerja paling baik adalah di mana panas yang ekstensif dihasilkan. "Cincin Api" adalah area di dekat Samudra Pasifik yang memiliki lebih banyak gunung berapi daripada wilayah biasa lainnya di Bumi. Juga diyakini bahwa ia mengalami gempa bumi biasa dan seringnya letusan gunung berapi. Sekitar 90% gempa terjadi, dan 75% gunung berapi terletak di Ring of Fire. Panjangnya sekitar 40.000 kilometer (24.900 meter).

Kekuatan panas bumi berasal dari peluruhan lambat mineral radioaktif seperti Uranium, yang menyebabkan batu menjadi magma. Pergerakan lempeng tektonik menyebabkan pergerakan magma ke atas, membentuk reservoir di mana uap panas bumi dan air panas dapat diambil melalui sumur. Bentuk uap atau air panas ini ditekan melalui turbin yang terhubung ke generator yang menghasilkan listrik.

Potensi energi panas bumi di 6 mil paling atas dari kerak bumi berjumlah 50.000 kali energi semua sumber daya minyak dan gas di dunia. Pembangkit listrik tenaga panas bumi produksi panas bumi mengakses uap bawah tanah atau air panas dari sumur yang dibor satu mil atau lebih ke bumi. Uap atau air panas disalurkan dari sumur untuk menggerakkan turbin uap konvensional, yang menggerakkan generator listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Biasanya, air kemudian dikembalikan ke tanah untuk mengisi ulang reservoir dan menyelesaikan siklus energi terbarukan. Ada tiga jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi: uap kering, uap flash, dan siklus biner. Tanaman uap kering mengambil dari reservoir uap, sementara uap kilat dan tanaman siklus biner mengambil dari reservoir air panas. Pabrik uap flash biasanya menggunakan air pada suhu lebih dari 360 °F.



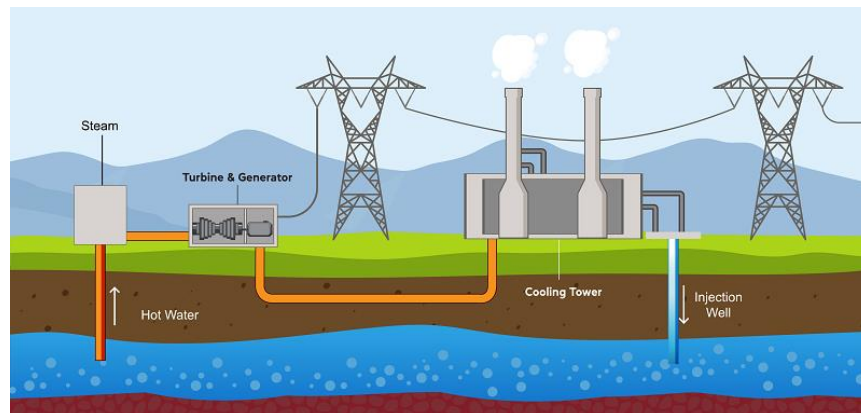
Gambar 2.6. Prinsip pembangkit listrik tenaga panas bumi  
(Sumber : EMC North Georgia, 2016)

Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. menggunakan sumber daya hidrotermal seperti turbin, generator, trafo, dan tenaga pembangkit listrik standar lainnya untuk mengubah panas menjadi listrik. Ini membutuhkan suhu tinggi eksklusif setidaknya 300 ° F hingga 700 ° F yang berasal dari sumur uap kering atau sumur air panas. Selanjutnya, sumur digali sedalam 1-2 mil ke permukaan, dan kemudian orang menggunakan perpipaan teknik uap atau air panas. Ini menggerakkan turbin yang menghasilkan listrik. Sekali lagi pembangkit listrik seperti itu biasanya ditemukan di dekat sumber air panas, geysir, dan daerah letusan gunung berapi.

Pertama, air panas dipompa dari bawah tanah melalui sumur dengan tekanan tinggi. Setelah air mencapai permukaan, tekanan diturunkan. Air yang ditekan akan lebih hangat, yang memungkinkan air berubah menjadi uap. Turbin diputar oleh uap. Itu terhubung ke generator. Secara keseluruhan, generator membantu menghasilkan listrik dengan mengirimkan arus listrik ke trafo step-up di luar pembangkit listrik. Tegangan meningkat dalam transformator, dan arus ditransmisikan melalui



saluran listrik ke gedung-gedung. Selanjutnya, uap mendingin di menara pendingin dan mengkonsolidasikan kembali ke air. Air dingin ditarik lagi ke bumi untuk memulai proses lagi.



Gambar 2.7. Pembangkit listrik tenaga panas bumi

(Sumber : <https://greenesa.com/uploads/news/1631205661Geothermalenergydetailgreenesa.png>)

## 6) Energi Surya (Panas Matahari)

Teknologi listrik tenaga surya atau fotovoltaik (PV) mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik. Listrik tenaga surya telah menjadi sumber daya utama untuk kendaraan ruang angkasa sejak dimulainya program luar angkasa. Ini juga telah digunakan untuk memberi daya pada elektronik kecil dan aplikasi pedesaan dan pertanian selama tiga dekade. Selama dekade terakhir, pasar listrik tenaga surya yang kuat telah muncul untuk memberi daya pada rumah dan bangunan yang terhubung dengan jaringan perkotaan sebagai hasil dari kemajuan teknologi surya bersama dengan perubahan global dalam restrukturisasi industri listrik.

Meskipun banyak jenis sistem tenaga surya tersedia saat ini, semuanya pada dasarnya terdiri dari tiga item utama: modul yang mengubah sinar matahari menjadi listrik; inverter yang mengubah listrik itu menjadi arus bolak-balik sehingga dapat digunakan oleh sebagian besar peralatan rumah tangga; dan mungkin atau terkadang baterai yang menyimpan kelebihan listrik yang dihasilkan oleh sistem. Sisa sistem terdiri dari peralatan seperti kabel, pemutus sirkuit, dan struktur pendukung.

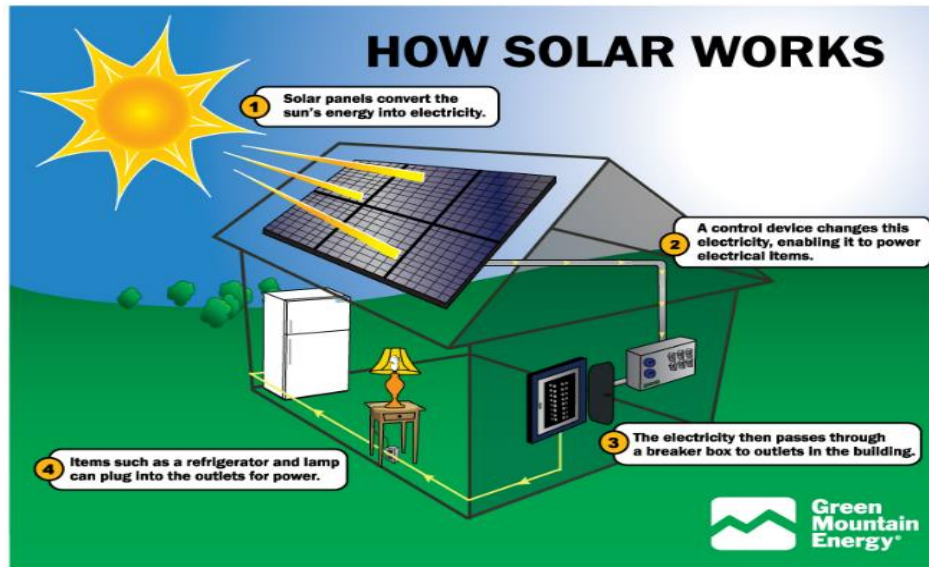
Modul saat ini dapat dibangun menjadi skylight dan dinding kaca. Beberapa modul menyerupai sirap atap tradisional, tetapi mereka menghasilkan listrik, dan beberapa dilengkapi dengan inverter built-in. Modul surya yang tersedia saat ini lebih efisien dan serbaguna daripada sebelumnya.

Di lebih dari 30 negara bagian, setiap daya tambahan yang dihasilkan oleh sistem PV, yang tidak digunakan oleh rumah atau bangunan, dapat diumpankan kembali ke jaringan listrik melalui proses yang dikenal sebagai pengukuran bersih. Pengukuran bersih memungkinkan pelanggan listrik untuk membayar hanya untuk listrik "bersih" mereka, atau jumlah daya yang dikonsumsi dari utilitas mereka dikurangi daya yang dihasilkan oleh sistem PV mereka. Pengaturan pengukuran ini memungkinkan konsumen untuk mewujudkan nilai ritel penuh untuk 100 persen energi PV yang dihasilkan oleh sistem mereka. Sistem PV yang terhubung ke jaringan tidak memerlukan baterai. Namun, beberapa sistem yang terhubung ke jaringan menggunakannya untuk daya cadangan darurat. Dan tentu saja di daerah terpencil, listrik tenaga surya seringkali merupakan alternatif ekonomi untuk ekstensi jalur distribusi mahal yang dikeluarkan oleh pelanggan yang pertama kali terhubung ke jaringan utilitas. Listrik yang dihasilkan oleh sistem listrik tenaga surya di lokasi terpencil disimpan dalam baterai. Baterai biasanya akan menyimpan listrik yang dihasilkan oleh sistem tenaga surya hingga tiga hari.

Jenis sistem apa yang harus dibeli akan tergantung pada efisiensi energi rumah Anda, lokasi rumah Anda, dan anggaran Anda. Sebelum Anda mengukur sistem Anda, cobalah mengurangi permintaan energi melalui langkah-langkah hemat energi. Membeli peralatan dan lampu hemat energi, misalnya, akan mengurangi permintaan listrik Anda dan memungkinkan Anda membeli sistem

listrik tenaga surya yang lebih kecil untuk memenuhi kebutuhan energi Anda atau mendapatkan nilai lebih dari sistem yang lebih besar. Efisiensi energi memungkinkan Anda untuk memulai dari yang kecil dan kemudian menambahkan saat kebutuhan energi Anda meningkat.

Sistem listrik tenaga panas surya digunakan di beberapa lokasi di Amerika Serikat. Sebuah pabrik skala besar di dekat Barstow, California, telah beroperasi selama sekitar 20 tahun. Sistem ini menggunakan cermin untuk memusatkan radiasi matahari langsung untuk boiler (lihat Gambar 2.8), yang menggerakkan generator listrik.



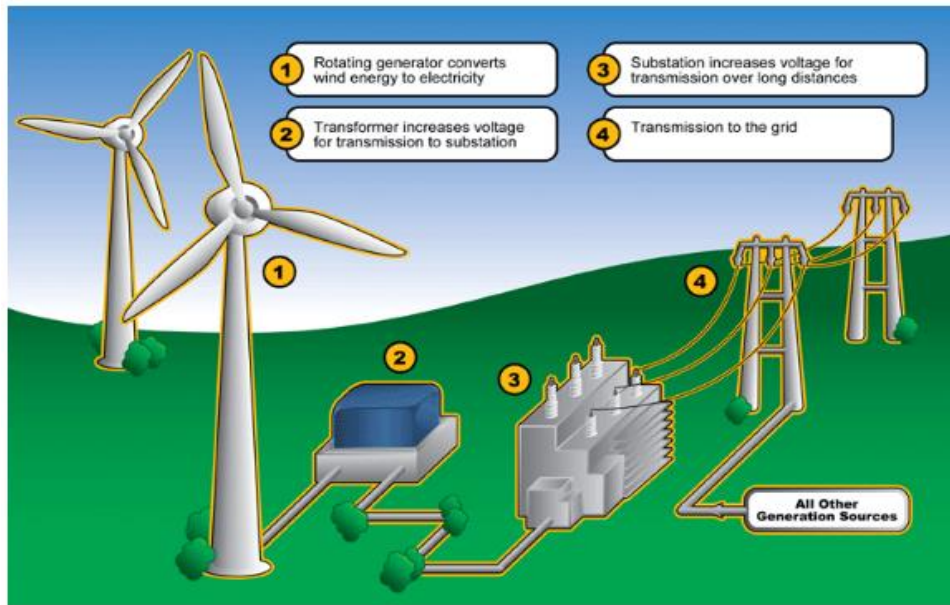
Gambar 2.8. Prinsip pembangkit listrik tenaga panas matahari/surya.  
(Sumber : EMC North Georgia, 2016)

## 7) Energi Angin

Selama ratusan tahun, orang telah menggunakan kincir angin untuk memanfaatkan energi angin. Turbin angin saat ini, yang beroperasi secara berbeda dari kincir angin, adalah teknologi yang jauh lebih efisien. Turbin angin yang menyediakan listrik ke jaringan utilitas berkisar dalam ukuran dari 50 kW hingga 1 atau 2 MW. Proyek besar berskala utilitas dapat memiliki ratusan turbin yang tersebar di banyak hektar lahan. Turbin kecil, di bawah 50 kW, digunakan untuk mengisi baterai, melistriki rumah, memompa air untuk pertanian dan peternakan, dan memberi daya pada peralatan telekomunikasi jarak jauh. Turbin angin juga dapat ditempatkan di perairan dangkal dekat garis pantai jika lahan terbuka terbatas, seperti di Eropa, dan/atau untuk memanfaatkan angin lepas pantai yang kuat.

Energi angin telah menjadi sumber energi dengan pertumbuhan tercepat di dunia sejak tahun 1990, meningkat pada tingkat rata-rata lebih dari 25 persen per tahun. Ini adalah tren yang sebagian besar didorong oleh peningkatan dramatis dalam teknologi angin. Saat ini, kapasitas energi angin berjumlah sekitar 2500 MW di Amerika Serikat. Daerah angin yang baik, yang mencakup 6 persen dari luas daratan AS yang berdekatan, dapat memasok lebih dari satu setengah kali lipat dari konsumsi listrik tahun 1993 di seluruh negeri. California sekarang memiliki jumlah turbin terpasang terbesar. Banyak turbin juga dipasang di great plains, mencapai dari Montana timur ke Minnesota dan selatan melalui Texas, untuk memanfaatkan sumber daya anginnya yang luas. North Dakota sendiri memiliki cukup angin untuk memasok 36 persen dari total konsumsi listrik tahun 1990 dari 48 negara bagian yang lebih rendah. Hawaii, Iowa, Minnesota, Oregon, Texas, Washington, Wisconsin, dan Wyoming adalah beberapa negara bagian di mana penggunaan energi angin meningkat pesat.

Teknologi turbin angin mungkin terlihat sederhana: angin memutar bilah turbin di sekitar hub pusat; hub terhubung ke poros, yang memberi daya pada generator untuk membuat listrik. Namun, turbin adalah sistem tenaga yang sangat canggih yang menangkap energi angin melalui desain blade atau airfoil baru. Sistem penggerak mekanis modern, dikombinasikan dengan generator canggih, mengubah energi itu menjadi listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Prinsip pembangkit listrik tenaga angin.  
(Sumber : EMC North Georgia, 2016)

## 8) Hidrogen

Hidrogen memiliki energi yang tinggi, namun penggunaannya sebagai bahan bakar menghasilkan air sebagai satu-satunya emisi. Hidrogen adalah unsur alam semesta yang paling melimpah dan juga yang paling sederhana. Atom hidrogen hanya terdiri dari satu proton dan satu elektron. Terlepas dari kelimpahan dan kesederhanaannya, itu tidak terjadi secara alami sebagai gas di Bumi.

Saat ini, industri memproduksi lebih dari 4 triliun kaki kubik hidrogen setiap tahun. Sebagian besar hidrogen ini diproduksi melalui proses yang disebut reformasi, yang melibatkan penerapan panas untuk memisahkan hidrogen dari karbon. Para peneliti sedang mengembangkan reformis canggih yang sangat efisien untuk menghasilkan hidrogen dari gas alam untuk apa yang disebut sel bahan bakar Membran Pertukaran Proton.

Anda dapat menganggap sel bahan bakar sebagai baterai yang tidak pernah kehilangan dayanya. Saat ini, sel bahan bakar hidrogen menawarkan potensi luar biasa untuk menghasilkan tenaga listrik untuk sistem energi terdistribusi dan kendaraan. Di masa depan, hidrogen dapat bergabung dengan listrik sebagai "pembawa energi" yang penting: menyimpan, memindahkan, dan mengirimkan energi dalam bentuk yang dapat digunakan kepada konsumen. Sumber energi terbarukan, seperti matahari, tidak dapat menghasilkan energi sepanjang waktu. Tetapi hidrogen dapat menyimpan energi terbarukan yang dihasilkan sampai dibutuhkan.

Akhirnya, para peneliti ingin secara langsung memproduksi hidrogen dari air menggunakan teknologi matahari, angin, dan biomassa dan biologis.

## 9) Energi Laut

Lautan dapat menghasilkan dua jenis energi: energi panas dari panas matahari, dan energi mekanik dari pasang surut dan gelombang. Energi panas laut dapat digunakan untuk banyak aplikasi,

termasuk pembangkit listrik. Sistem konversi listrik menggunakan air permukaan yang hangat atau merebus air laut untuk memutar turbin, yang mengaktifkan generator.

Konversi listrik dari energi pasang surut dan gelombang biasanya melibatkan perangkat mekanis. Bendungan biasanya digunakan untuk mengubah energi pasang surut menjadi listrik dengan memaksa air melalui turbin, mengaktifkan generator. Sementara itu, energi gelombang menggunakan tenaga mekanik untuk secara langsung mengaktifkan generator, atau untuk mentransfer ke fluida kerja, air, atau udara, yang kemudian menggerakkan turbin/generator.

## 2.3 Sumber Energi Tidak Terbarukan

Sumber daya alam yang tidak terbarukan adalah sumber daya yang memiliki kondisi khusus yang membuatnya (seperti materi tanaman fosil yang diubah menjadi batu bara), dan dapat memakan waktu beberapa generasi untuk bereproduksi. Terkadang kondisinya tidak mungkin terjadi lagi sehingga pasokannya terbatas dan setelah digunakan tidak dapat dihasilkan kembali dalam rentang waktu yang singkat. Sumber tidak terbarukan ada dalam bentuk gas alam, minyak, dan batubara. Misalnya, bahan bakar fosil telah meresap di bawah Bumi selama ratusan juta tahun, dan begitu mereka pergi, mereka akan membutuhkan jutaan tahun lagi untuk mengisi kembali.

### 1) Energi Batubara

Batubara adalah produk dari jutaan tahun tekanan pada bahan organik dari tanaman yang terkubur di bawah tanah. Menurut Administrasi Informasi Energi, pembangkit listrik tenaga batu bara adalah sumber listrik nomor satu di AS, dan pembakaran batu bara adalah cara yang murah untuk menghasilkan listrik dibandingkan dengan banyak sumber terbarukan. Namun, pembakaran batu bara menghasilkan gas rumah kaca, yang diyakini para ilmuwan berkontribusi besar terhadap pemanasan global.

Batubara adalah sumber daya fosil terbesar yang tersedia bagi kita dan yang paling bermasalah dari sudut pandang lingkungan. Dari semua indikasi, penggunaan batu bara akan terus tumbuh untuk produksi listrik di seluruh dunia karena peningkatan yang diharapkan di Cina, India, Australia, dan negara-negara lain. Dari sudut pandang lingkungan, ini tidak akan berkelanjutan kecuali teknologi batubara bersih atau *Clean Coal Technology* (CCT) canggih dengan penyerapan karbon dikerahkan.

Teknologi batubara bersih didasarkan pada siklus gabungan gasifikasi terintegrasi (IGCC) yang mengubah batubara menjadi gas yang digunakan dalam turbin untuk menyediakan listrik dengan CO<sub>2</sub> dan penghilangan polutan sebelum bahan bakar dibakar (Hawkins, Lashof, dan Williams 2006). Menurut R.C. Kelly, Presiden dan Chief Executive Officer Xcel Energy yang berbasis di Minneapolis, perusahaan akan membangun pabrik semacam itu di Colorado, AS. Pabrik akan menangkap CO<sub>2</sub> dan menyuntikkannya ke bawah tanah, mungkin di ladang minyak yang sudah habis. Menurut Kelly, pabrik IGCC dapat menelan biaya 20% lebih mahal untuk dibangun daripada pembangkit batubara konvensional, tetapi lebih efisien untuk dioperasikan.

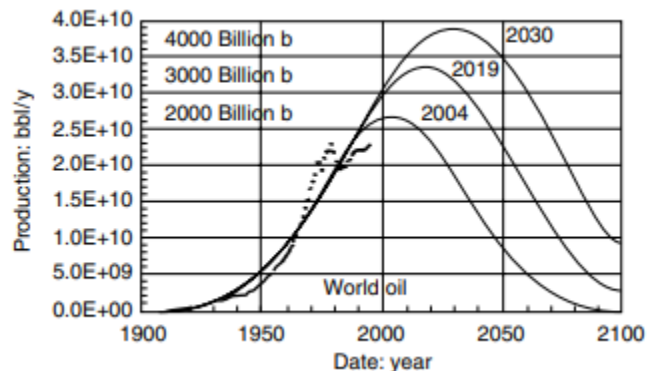
Menurut BP, sumber daya batubara dunia yang terbukti dapat dipulihkan diperkirakan sebesar 909 miliar ton pada akhir tahun 2004 dengan rasio cadangan terhadap produksi (R/P) sebesar 164 tahun. Data BP juga menunjukkan bahwa penggunaan batubara meningkat pada tingkat rata-rata 6% dari tahun 2002 hingga 2005, peningkatan terbesar dari semua sumber daya fosil. Karena China dan India terus membangun pembangkit listrik tenaga batu bara baru, masuk akal untuk berasumsi bahwa penggunaan batu bara akan terus meningkat setidaknya selama beberapa tahun ke depan. Oleh karena itu, rasio R/P akan menurun dari nilai sekarang 164 tahun. Rasio R/P ini akan semakin menurun ketika teknologi batubara bersih seperti gasifikasi batubara dan likuifikasi digunakan alih-alih pembakaran langsung.

## 2) Energi Minyak

Minyak Mentah disebut sebagai Minyak Cair. Ini digunakan untuk bensin, minyak pemanas, dan bahan bakar diesel. Selain itu, produsen menggunakan minyak untuk produk-produk seperti plastik dan bahan kimia industri.

Ada banyak perdebatan dan ketidaksepakatan tentang perkiraan "cadangan minyak akhir yang dapat dipulihkan." Namun, tampaknya ada kesepakatan yang baik tentang jumlah "cadangan minyak terbukti" di dunia. Menurut British Petroleum (2006), total cadangan minyak dunia yang teridentifikasi atau terbukti pada akhir tahun 2005 adalah 1200,7 miliar barel. Perkiraan ini mendekati cadangan 1266 miliar barel dari sumber lain yang terdaftar oleh IEA (IEA 2004). Perbedaan di antara mereka terletak pada akuntansi mereka untuk pasir tar Kanada. Mengingat tingkat produksi saat ini lebih dari 80 juta barel per hari, cadangan ini akan bertahan selama sekitar 41 tahun jika tidak ada peningkatan produksi. Tentu saja, mungkin ada cadangan tambahan yang mungkin ditemukan di masa depan. Analisis terbaru oleh Badan Informasi Energi AS (2006) memperkirakan cadangan minyak dunia yang pada akhirnya dapat dipulihkan (termasuk sumber daya yang belum ditemukan) pada antara  $2,2 \times 10^{12}$  barel (bbl) dan  $3,9 \times 10^{12}$  bbl dengan perkiraan rata-rata USGS pada  $3 \times 10^{12}$  bbl.

Sejak ahli geologi perminyakan M. King Hubbert dengan benar meramalkan pada 1956 bahwa produksi minyak AS akan mencapai puncaknya pada 1973 dan kemudian menurun (Hubbert 1974), para ilmuwan dan insinyur telah mengetahui bahwa produksi minyak di seluruh dunia akan mengikuti tren yang sama. Saat ini, satu-satunya pertanyaan adalah kapan puncak dunia akan terjadi. Bartlett (2002) telah mengembangkan model prediktif berdasarkan kurva Gaussian yang bentuknya mirip dengan data yang digunakan oleh Hubbert seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Puncak prediktif dalam produksi minyak dunia tergantung pada jumlah total yang diasumsikan dari cadangan yang dapat dipulihkan.



Gambar 2.10. Produksi minyak dunia vs. waktu untuk berbagai jumlah sumber daya (Sumber : F. Kreith, 2007)

Jika perkiraan BP tentang cadangan minyak benar, kita mungkin sudah mencapai puncaknya dalam produksi minyak dunia. Namun, jika perkiraan cadangan akhir (ditemukan dan belum ditemukan) digunakan, kita mungkin mengharapkan produksi minyak meningkat sedikit lebih lama sebelum mencapai puncaknya. Namun, mengubah total cadangan yang tersedia dari  $3 \times 10^{12}$  bbl menjadi  $4 \times 10^{12}$  bbl meningkatkan perkiraan waktu produksi puncak hanya 11 tahun, dari 2019 hingga 2030. Tidak ada pertanyaan bahwa setelah puncak dunia tercapai dan produksi minyak mulai turun, baik bahan bakar alternatif harus dipasok untuk membuat perbedaan antara permintaan dan penawaran, atau biaya bahan bakar akan meningkat drastis dan menciptakan krisis sosial dan ekonomi yang belum pernah terjadi sebelumnya untuk seluruh sistem transportasi kita.

Tren peningkatan konsumsi minyak tahunan saat ini, terutama di Cina dan India, memperpendek jendela peluang untuk transisi yang dikelola ke bahan bakar alternatif lebih jauh lagi. Oleh karena itu, terlepas dari jumlah aktual minyak yang tersisa di tanah, puncak produksi akan segera terjadi. Oleh

karena itu, kebutuhan untuk mulai melengkapi minyak sebagai bahan bakar transportasi utama sangat mendesak karena transisi yang tertib untuk mengembangkan pengganti minyak bumi akan membutuhkan waktu dan perencanaan yang matang.

### 3) Energi Gas Alam

Cadangan gas alam sering berbagi ruang dengan cadangan minyak bawah tanah, sehingga kedua sumber daya yang tidak terbarukan sering diekstraksi pada saat yang bersamaan. Konsumen menggunakannya sebagai bahan bakar memasak, untuk memanaskan rumah, dan terkadang sebagai bahan bakar kendaraan. Ini juga digunakan untuk menghasilkan 27,6% dari listrik AS. Butuh banyak generasi, mungkin jutaan tahun, untuk mengisi kembali gas alam.

### 4) Energi Nuklir

Energi nuklir memanfaatkan Uranium-235, bahan kimia radioaktif yang secara alami ditemukan di bumi. Zat radioaktif ini mengalami pembusukan dan dalam prosesnya melepaskan banyak panas. Panas kemudian digunakan untuk membuat uap; uap itu digunakan untuk memutar turbin di generator. Generator menghasilkan listrik. Tidak ada gas rumah kaca yang dilepaskan dalam proses ini. Namun, ada produk sampingan radioaktif yang harus disimpan dengan aman karena merupakan bahaya lingkungan. Ini dianggap sebagai bentuk energi yang tidak terbarukan karena dibutuhkan manipulasi nyata untuk membelah atom.

Pembangkit listrik tenaga nuklir menggunakan siklus termodinamika yang sama dengan kebanyakan pembangkit berbahan bakar fosil. Karena lingkungan yang relatif sulit untuk bahan-bahan yang membawa air bertekanan tinggi (itu radioaktif di sana), suhu ujung tinggi dari pembangkit listrik tenaga nuklir tidak dapat setinggi mungkin di pabrik berbahan bakar fosil sehingga efisiensi termal cenderung sedikit lebih rendah.

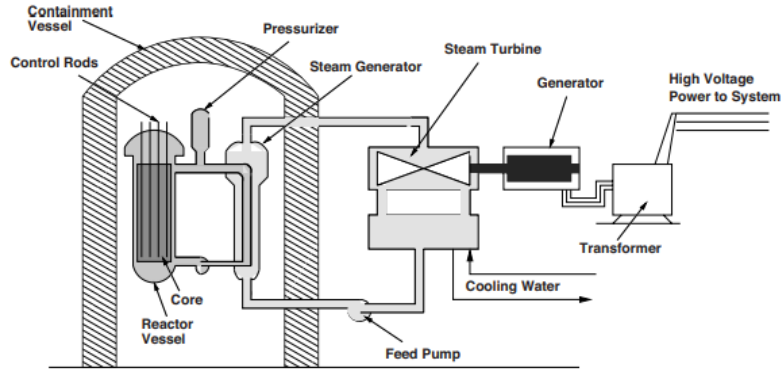
Reaktor di pembangkit listrik tenaga nuklir menghasilkan panas melalui fisi atom berat menjadi dua (atau lebih) atom yang lebih ringan. Ketika atom uranium ( $U^{235}$ ), isotop uranium yang mampu fisi, terbelah, sekitar 1/5 dari satuan massa atom (AMU) diubah menjadi energi. Karena fraksi massa  $U^{235}$  dalam uranium alami adalah sekitar 0,7%, apakah semua isotop fisi akan diubah menjadi energi, sebagian kecil sebesar sekitar  $\frac{0,2}{235} \times 0.007 \approx 6.1 \times 10^{-6}$  dari uranium alami akan diubah menjadi energi. Namun, itu ternyata energinya cukup banyak, karena  $E = MC^2 = M \times 9 \times 10^{16} \text{ J/kg}$ , atau satu kilogram uranium alami akan menghasilkan sekitar  $6,1 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{16} \approx 5,5 \times 10^{11} \text{ J} \approx 1,53 \times 10^5 \text{ kWh}$ . Jika pabrik beroperasi dengan efisiensi termal 33%, Itu berarti sekitar 51.000 kWh / kg uranium alami. Ini dibandingkan dengan mungkin 3 atau 4 kWh/kg untuk batubara.

Gambar 2.12 adalah sketsa dari pembangkit listrik tipe reaktor air bertekanan. Moderasi di sini berarti mengurangi energi neutron yang dipancarkan dari fisi inti ke tingkat yang terbaik untuk memulai fisi inti lainnya. Ketika inti uranium terbelah, ia memancarkan, antara lain, beberapa neutron 'cepat'. Neutron cepat ini, meskipun dapat mengubah  $U^{238}$  menjadi plutonium, tidak terlalu efektif dalam menginduksi fisi pada  $U^{235}$ . Melewati air yang mengelilingi batang bahan bakar, neutron diperlambat, melepaskan energi dan menjadi 'neutron termal' (sekitar 0,025 eV), ke titik di mana mereka efektif dalam menginduksi fisi. Bahkan, karena neutron yang lebih lambat lebih efektif dalam menginduksi fisi, ada koefisien reaktivitas negatif dengan suhu yang cenderung menstabilkan reaksi berantai. Kontrol lebih lanjut diberikan oleh 'batang kontrol' yang menyerap neutron. Menjatuhkan batang sepenuhnya ke dalam reaktor menghentikan reaksi berantai. Plutonium yang dihasilkan oleh neutron cepat yang berinteraksi dengan  $U^{238}$  termasuk isotop fisi yang kemudian fisi dan ini berkontribusi lebih banyak pada energi yang dihasilkan.

Tidak ada karbon yang dipancarkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir dalam operasi normal. Produk sampingan dari reaksi nuklir, bagaimanapun, adalah hal yang benar-benar jahat: mematikan radioaktif, panas dan beracun. Untungnya tidak banyak bahan bakar bekas yang diproduksi sehingga dapat (dan) hanya terkandung. Masih banyak perdebatan publik tentang apa yang harus dilakukan dengan bahan bakar bekas dan pengembangan teknik untuk memprosesnya atau untuk



menstabilkannya sehingga dapat disimpan dengan aman. Yang menarik adalah kenyataan bahwa plutonium yang ada dalam bahan bakar bekas dapat digunakan untuk membuat bahan peledak nuklir. Plutonium dapat dipisahkan secara kimiawi, sedangkan fisil  $U^{235}$  tidak dapat. Ini adalah kabar baik dan buruk: baik karena plutonium adalah bahan bakar yang berguna yang dapat dicampur dengan uranium dan dibakar dalam reaktor; buruk karena memfasilitasi fabrikasi bahan peledak nuklir, membuat mengamankan bahan bakar bekas dari calon teroris atau negara gagal sangat penting, biaya tambahan dari siklus bahan bakar nuklir.



Gambar.2.11. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir  
(Sumber : James L. Kirtley, 2010)

### Soal

- 1) Sebutkan keunggulan dari energi terbarukan?
- 2) Sebutkan kelemahan dari energi terbarukan?
- 3) Selain sumber hydropower, apa dua sumber energi terbarukan terpenting untuk negara Anda?
- 4) Apa langkah yang digunakan oleh negara anda dalam mengurangi pemakaian sumber energi tidak terbarukan ?
- 5) Apa dua sumber energi terbesar dalam penyumbang emisi karbon dioksida?

# BAB III

## PRINSIP – PRINSIP DASAR

### ELEKTROMAGNETIK

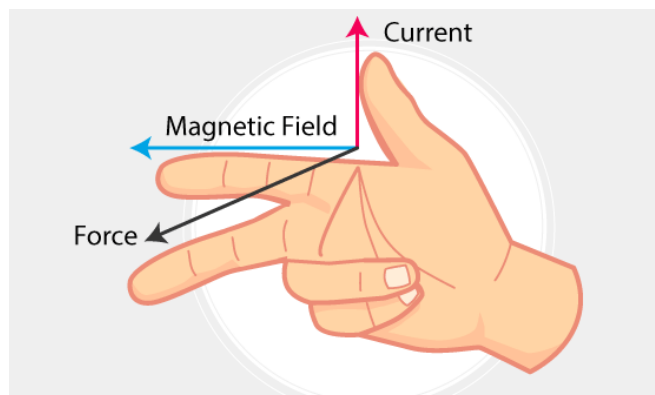
#### 3.1 Pendahuluan

Tentu saja, kita semua akrab dengan istilah "magnet", tetapi bagaimana dengan "elektromagnet"? Magnet yang medan magnetnya dihasilkan oleh arus listrik disebut elektromagnet. Biasanya, elektromagnet terdiri dari kawat yang dililitkan di sekitar kumparan. Medan magnet dihasilkan oleh arus yang mengalir melalui kawat dan difokuskan di pusat kumparan. Ketika arus terputus, medan magnet menghilang. Inti magnet yang terbentuk dari zat feromagnetik, seperti besi, sering kali dikelilingi kawat. Dengan memusatkan aliran magnet, inti magnet memperkuat magnet.

Manfaat utama elektromagnet dibandingkan magnet permanen adalah kemampuan untuk mengubah medan magnet dengan cepat hanya dengan menyesuaikan jumlah arus listrik yang mengalir melalui kumparan.

#### 3.2 Hukum dari Gaya Magnet

Ilmuwan Belanda Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) memberikan kontribusi signifikan pada bidang fisika dan fisika kuantum. Hukum gaya elektromagnetik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 menunjukkan aturan kaidah tangan kanan.



Gambar 3.1. Hukum gaya Lorentz kaidah tangan kanan  
(Sumber : <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2019/02/Right-hand-rule.png>)

Gaya Lorentz medan elektromagnetik adalah pertemuan gaya listrik dan magnet. Adanya muatan listrik yang bergerak atau arus listrik dalam medan magnet menyebabkan adanya gaya Lorentz. Arah arus listrik ( $I$ ) dan setiap induksi magnet selalu tegak lurus terhadap gaya Lorentz ( $B$ ).

$$F = q(v \times B) \quad (3.1)$$

Keterangan :

- F : gaya (Newton)
- B : medan magnet (Tesla)
- q : muatan listrik (coulomb)
- v : arah kecepatan muatan (m/s)
- x : perkalian silang operasi vector



### 3.2.1 Gaya Lorentz Pada Kawat Berarus Listrik

Gaya Lorentz yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 menjelaskan mengenai kawat yang telah dialiri arus listrik sebesar  $I$  dan dimasukkan ke dalam medan magnet sebesar  $B$ . Gaya Lorentz pada kawat lurus yang diam dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut, yang menggabungkan gaya Lorentz gaya dan definisi arus listrik:

$$F_{Lorentz} = IlB \times \alpha \quad (3.2)$$

Keterangan :

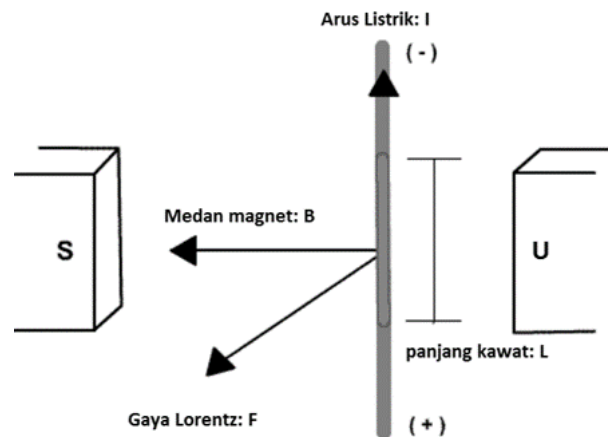
$l$  : panjang kawat (m)

$I$  : kuat arus yang mengalir pada kawat (Ampere)

$B$  : kuat medan magnet (Tesla)

$\alpha$  : sudut yang dibentuk oleh  $B$  dan  $I$

Gaya Lorentz yang dihasilkan adalah ( $\sin 90^\circ = 1$ ) jika arah arus listrik tegak lurus dengan arah medan magnet. Medan magnet biasanya selalu dikondisikan untuk selalu tegak lurus dengan arus listrik yang mengalir dalam hal ini, memastikan gaya Lorentz yang didapat selalu maksimal.

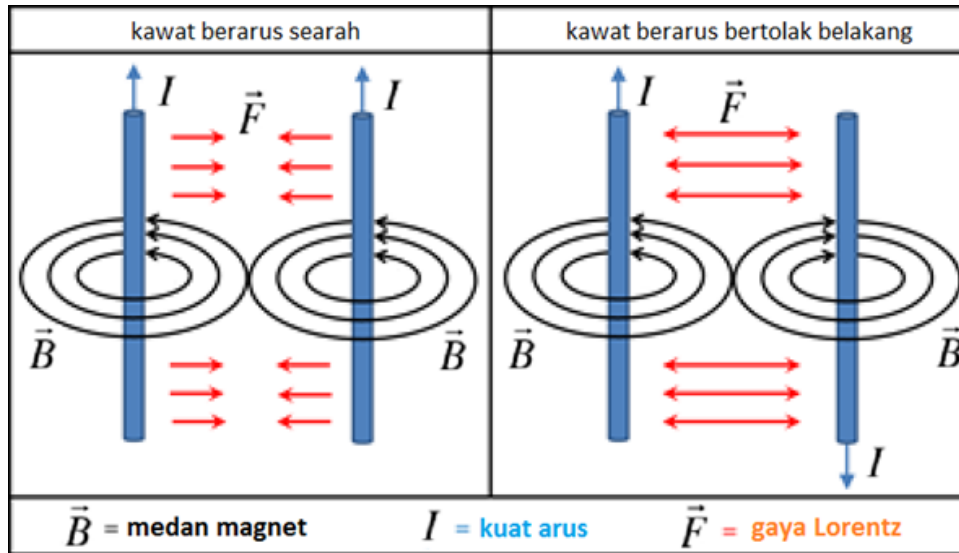


Gambar 3.2. Sudut Hukum Gaya Lorentz

(Sumber : <https://www.studiobelajar.com/wp-content/uploads/2018/09/gaya-lorentz-pengertian.png> )

### 3.2.2 Gaya Lorentz pada Kawat Sejajar Berarus Listrik

Akan timbul gaya Lorentz berupa gaya tarik menarik atau gaya tolak menolak tergantung arah arus listrik pada masing-masing kawat apabila dua buah kawat dengan panjang  $l$  yang dialiri arus listrik sebesar  $I$  diletakkan dalam medan magnet  $B$ . Gaya tarik menarik akan bekerja pada dua kabel jika arus yang mengalir melaluinya mengalir ke arah yang sama; gaya tolak akan bekerja pada mereka jika arus yang mengalir melalui mereka pergi ke arah yang berlawanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3. Penerapan Gaya Lorentz pada Kawat Sejajar yang Berarus Listrik  
 (Sumber : <https://www.studiobelajar.com/wp-content/uploads/2018/09/kawat-berarus-searah-dan-bertolak-belakang.png>)

Besarnya gaya tarik-menarik ataupun tolak-menolak pada kawat sejajar berarus listrik dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$F_{Lorentz} = F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi \alpha} \quad (3.3)$$

Keterangan :

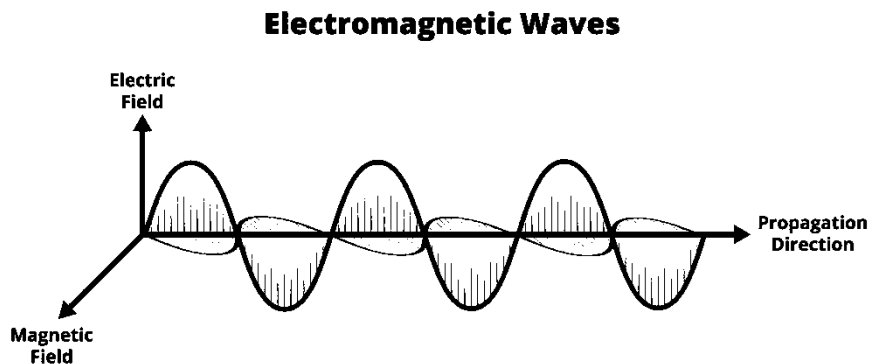
- $F_1$  : gaya tarik-menarik atau tolak-menolak pada kawat 1 (Newton)
- $F_2$  : gaya tarik-menarik atau tolak-menolak pada kawat 2 (Newton)
- $I_1$  : kuat arus yang mengalir pada kawat 1 (Ampere)
- $I_2$  : kuat arus yang mengalir pada kawat 2 (Ampere)
- $\mu_0$  : permeabilitas vakum ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A}_m$ )
- $l$  : panjang kawat (m)
- $\alpha$  : jarak antar kedua kawat (m)

**Manfaat dan pengaplikasian Gaya Lorentz :**

Manfaat dan aplikasi terbesar dari penerapan gaya Lorentz adalah motor listrik. Dengan mengalirkan arus listrik pada kumparan di dalam medan magnet, dapat menghasilkan gaya Lorentz berupa rotasi pada motor listrik untuk menggerakkan batang shaft yang kemudian dapat dipakai untuk segala kebutuhan.

### 3.3 Kuat Medan Magnet

Gelombang elektromagnetik adalah getaran periodik simultan dalam intensitas medan elektromagnetik. Tidak seperti gelombang tradisional, mereka tidak membutuhkan media untuk merambat, dan mereka bergerak dengan kecepatan cahaya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Ada tujuh jenis gelombang elektromagnetik: gelombang radio, gelombang mikro, cahaya inframerah, cahaya tampak, sinar ultraviolet, sinar-X, dan sinar gamma.



Gambar 3.4. Gelombang Elektromagnet  
(Sumber : <https://www.turito.com/blog/physics/electromagnetic-waves>)

#### 3.3.1 Magnetisasi

Hal ini dimungkinkan untuk menghubungkan, dalam semua bahan, kerapatan fluks magnet dengan intensitas medan magnet dengan sebuah hubungan konstitutif dari membentuk:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (3.4)$$

di mana magnetis bidang intensitas H dan magnetisasi M adalah itu dua penting properti. Di linier magnetis bahan magnetisasi adalah sebuah sederhana linier fungsi dari magnetis bidang:

$$\vec{M} = \vec{m} \vec{H} \quad (3.5)$$

jadi itu itu aliran kepadatan adalah juga sebuah linier fungsi:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + m) \vec{H} \quad (3.6)$$

Catatan itu di itu paling umum kasus itu magnetis kerawanan m mungkin menjadi sebuah tensor, terkemuka ke aliran kepadatan makhluk bukan co-linear dengan magnetis bidang intensitas, atau dia mungkin menjadi kompleks dan tergantung pada frekuensi, yang mengarah ke pergeseran fasa dan perilaku lossy. Tapi hubungan seperti itu akan tetap linier. Umumnya kerumitan semacam ini tidak berpengaruh besar pada listrik mesin.

#### 1. Medan Magnet dari Arus Permukaan

Vektor potensial dari arus yang dibawa diambil dari rumus

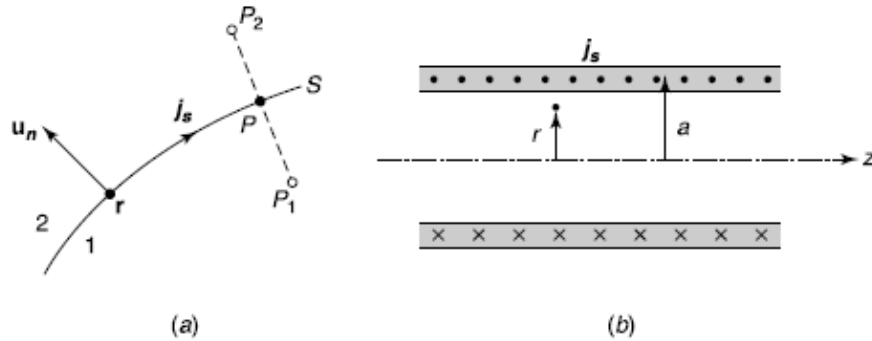
$$a(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{j_S(r')}{r-r'} dS' \quad (3.7)$$

Ketika  $\mathbf{r}$  pada  $S$ , suku kanan persamaan (3.7) menjadi integral tak wajar, tetapi konvergen. Sifat-sifat potensial vektor persamaan (3.7) dapat segera diturunkan dari sifat-sifat lapisan permukaan potensi dibahas di bagian Gambar 3.5. Dengan demikian,  $\mathbf{a}(\mathbf{r})$  adalah kontinu selama ruang angkasa, dan turunan tangensialnya mendekati batas identik di kedua sisi permukaan. Itu perilaku  $\mathbf{b}$  melintasi lapisan mengikuti dari ekspresi untuk curl dari sepotong-sepotong kontinu vektor diberikan.

$$\text{curl } \mathbf{b} = \{\text{curl } \mathbf{b}\} + \mathbf{u}_n \times (\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_1) \delta S = \mu_0 \mathbf{j}_S \delta S. \quad (3.8)$$

Persamaan (3.9) menjelaskan  $b_n$  adalah kontinu, dan itu itu tangensial komponen pengalaman sebuah loncatan :

$$(\mathbf{b}_2)_\text{tan} - (\mathbf{b}_1)_\text{tan} = \mu_0 \mathbf{j}_S \times \mathbf{u}_n. \quad (3.9)$$



Gambar 3.5. Lapisan arus permukaan : (a) umum, (b) pada silinder melingkar  
(Sumber : <https://www.studiobelajar.com/gaya-lorentz>)

Di ketentuan dari itu magnetis lapangan  $\mathbf{h} = (\mathbf{b} / \mu_0)$ , ini kondisi menjadi

$$(\mathbf{h}_2)_\text{jadi} - (\mathbf{h}_1)_\text{jadi} = \mathbf{j}_S \times \mathbf{k}_n. \quad (3.10)$$

Arus permukaan sering digunakan sebagai model untuk lapisan arus yang dililit rapat, seperti yang disarankan pada Gambar 3.5 b. Mereka juga dapat dihasilkan oleh muatan permukaan dengan kerapatan  $S$ , bergerak dengan kecepatan  $\mathbf{v}$ . Pertimbangkan, sebagai ilustrasi, *seragam*  $s$  menutupi piringan bundar berjari-jari  $a$ . Jika piringan berputar dengan kecepatan sudut, rapat arus yang dihasilkan adalah  $\mathbf{j}_S = r s \mathbf{u}$ . Dari sudut pandang magnet, piringan terdiri dari serangkaian arus melingkar, dan medan aksial dapat diperoleh dengan mengintegrasikan kontribusi bentuk. Hasilnya, untuk sebuah titik pada itu sumbu, adalah

$$\begin{aligned} b_z(0, z) &= \frac{\mu_0}{2} \int_0^a \frac{j_s r^2}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dr \\ &= \frac{\mu_0 \rho_s \Omega}{2} \int_0^a \left( \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)^3 dr \quad (3.5) \\ &= \frac{\mu_0 \rho_s \Omega}{2} \left[ \frac{2z^2 + a^2}{\sqrt{z^2 + a^2}} - 2z \right] \end{aligned}$$

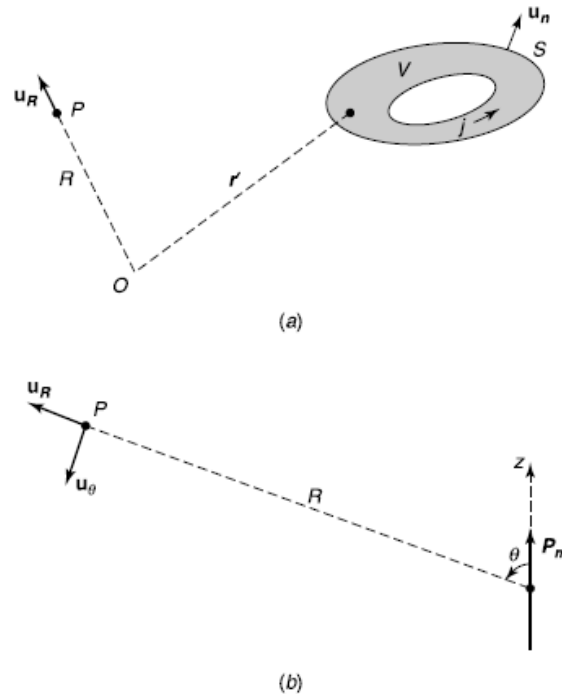
## 2. Medan Magnet dengan Jarak Jauh dari Sumber

Dari penjelasan sebelumnya, komponen  $(a_x, a_y, a_z)$  dari potensial vektor berbentuk skalar potensi, setiap dari yang mungkin diwakili oleh sebuah banyak kutub ekspansi. Dia lebih disukai, bagaimanapun, untuk menangani masalah secara vektor dari awal dan memanfaatkan solenoida karakter dari  $\mathbf{j}$ , dan dari itu maka besar jarak  $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$  bervariasi kecil lebih itu sumber wilayah  $V$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{r}) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi R} \int_V \mathbf{j}(\mathbf{r}) dV + \frac{\mu_0}{4\pi} \text{grad}_0 \left( \frac{1}{R} \right) \cdot \int_V r_j dV + \text{higher terms.} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Setelah itu dievaluasi nilai komponen x dari itu integral, yaitu

$$u_x \cdot \int_V \mathbf{j}(\mathbf{r}) dV = \int_V \text{grad}_x \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}) dV$$



Gambar 3.6. Tipe sumber arus dan dipol magnetik.  
(Sumber : <https://www.studiobelajar.com/gaya-lorentz>)

Itu tangan kanan ketentuan adalah sebuah tertentu contoh dari itu lagi umum integral

$$\begin{aligned} \int_V \mathbf{j} \cdot \text{grad}_x \theta dV &= \int_V \text{div}(\theta \mathbf{j}) dV - \int_V \theta \text{div} \mathbf{j} dV \\ &= \int_S \theta u_n \cdot \mathbf{j} dS - \int_V \theta \text{div} \mathbf{j} dV = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ekspresi ini hilang karena  $\mathbf{j}$  adalah solenoida dan menyinggung  $S$ . Menerapkan hasil ini ke  $x, y, z$ , berturut-turut mengatur setara ke  $x, y, z$ , menunjukkan itu itu pertama ketentuan di persamaan (3.6) harus menghilang.

Untuk mengevaluasi suku kedua dalam persamaan (3.6), kita mengalikan skalar integral (a diadik) dengan a vektor konstan  $\mathbf{c}$ . Kami kemudian membagi diadik menjadi simetris dan antisimetrisnyabagian. Dengan demikian,

$$\mathbf{c} \cdot \int_V \mathbf{r} \mathbf{j} dV = \frac{1}{2} \mathbf{c} \cdot \int_V (\mathbf{r} \mathbf{j} + \mathbf{j} \mathbf{r}) dV + \frac{1}{2} \mathbf{c} \cdot \int_V (\mathbf{r} \mathbf{j} - \mathbf{j} \mathbf{r}) dV \quad (3.8)$$

Integral pertama menghilang, maka dipertimbangkan  $ik$  komponen tersebut yang mana :

$$\begin{aligned} \int_V u_i \cdot (\mathbf{r} \mathbf{j} + \mathbf{j} \mathbf{r}) \cdot u_k dV &= \int_V [x_i (j \cdot u_k) + x_k j \cdot u_i] dV \\ &= \int_V (x_i \text{grad } x_k + x_k \text{grad } x_i) \cdot \mathbf{j} dV \\ &= \int \text{grad } (x_i x_k) \cdot \mathbf{j} dV \end{aligned}$$

Ekspresi ini menghilang karena persamaan (3.7) ketentuan kedua pada persamaan (3.8) di lain sisi tidak menghilang dan dapat dirubah menjadi sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} \int_V [(c \cdot r) - (c \cdot j) r] dV = \frac{1}{2} \mathbf{c} \times \int_V (\mathbf{j} \times \mathbf{r}) dV$$

Jika kita beri momen magnetic

$$P_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{r} \times \mathbf{j} dV \quad (A m^2) \quad (3.9)$$

Potensial vektor pada besar jarak mengambil wujud

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \mathbf{a}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{grad}_p \left( \frac{1}{R} \right) \times P_m + \text{higher terms}. \quad (3.10)$$

Dia adalah terlihat dari persamaan (3.10) itu | sebuah | adalah  $O(1/R^2)$  pada besar jarak, dari yang kami menyimpulkan itu b = keriting sebuah akan menjadi  $O(1/R^3)$ . Lagi khusus untuk sebuah berorientasi  $z$  di pole

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{\mu_0}{4\pi} P_m \frac{\sin \theta}{R^2} \mathbf{u}_\varphi \\ \mathbf{b} = \text{curl } \mathbf{a} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \text{grad } \frac{1}{R} \times P_m \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} (P_m \cdot \text{grad}) \text{grad } \frac{1}{R} \\ &= \frac{\mu_0 P_m \cos \theta}{2\pi R^3} \mathbf{u}_R + \frac{\mu_0 P_m \sin \theta}{2\pi R^3} \mathbf{u}_\theta \end{aligned} \quad (3.11)$$

Sebuah alternatif metode untuk itu turunan dari persamaan (3.10) adalah ke mewakili saat ini dari lingkaran kecil di  $\mathbf{r}_0$  ( a "embel-embel" ) oleh -nya distribusi ekspresi

$$\mathbf{j} = \text{curl } [\delta(r - r_0) P_m] = \text{grad } \delta(r - r_0) \times P_m \quad (3.12)$$

Jika kami memasukkan persamaan (3.12) ke dalam persamaan (3.6), dan mengambil (A8.76) ke dalam Akun, kami memperoleh

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\mathbf{r}) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \text{curl}[\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)P_m] \frac{dV}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)P_m \times \text{grad} \left( \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \right) dV \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} P_m \times \text{grad}_0 \left( \frac{1}{R} \right) \end{aligned}$$

yang adalah tepat persamaan (3.10) sejak lulusan  ${}_0 R =$

Alih-alih mulai dari representasi integral persamaan (3.6) dari  $\mathbf{a}$  untuk menurunkan multikutub ekspansi, juga dimungkinkan untuk menggunakan ekspansi dalam harmonik bola, dengan cara dibahas untuk itu skalar potensi di Bagian gambar 3.6 bahasa Jerman ke itu prosedur adalah itu ekspansi dari  $1/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$

### 3. Panduan Seragam Gelombang Elektromagnetik

Kita mulai dengan ungkapan general untuk medan elektromagnetik di dalam daerah bebas-sumber dengan aturan elektrik Hertz vector  $\bar{\pi}$  dan magnetik Hertz vector  $\bar{\pi}m$  ditunjukkan pada bagian :

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \nabla \times \nabla \times \bar{\pi} - j\omega\mu\nabla \times \bar{\pi}m \\ \bar{H} &= j\omega\varepsilon\nabla \times \bar{\pi} + \nabla \times \nabla \times \bar{\pi}m \end{aligned} \quad (3.13)$$

Solusi komplut untuk rumus Maxwell dapat dilihat pada persamaan (3.13) ketika  $\bar{\pi}$  dan  $\bar{\pi}m$  ditunjukkan ke arah konstan  $\hat{a}$ .

Untuk panduan gelombang pada Gambar 3.7 yang melintasi bagian adalah seragam sepanjang arah persamaan (3.14).

$$\bar{\pi} = \pi(x, y, z)\hat{a}. \quad \bar{\pi}m = \pi_m(x, y, z)\hat{a}. \quad (3.14)$$



Gambar 3.7. uniform waveguide.

(Sumber : <https://www.studiobelajar.com/gaya-lorentz>)

Lebih mudah untuk memilih  $\bar{\pi} = \pi z \hat{z}$ . Itu akan ditampilkan bahwa medan dihasilkan oleh  $\bar{\pi} = \pi z \hat{z}$  tidak mempunyai Hz. Komponen z dari medan magnet disebut mode Transverse Magnetic (TM). Itu juga disebut mode E sejak Ez, Komponen z dari medan elektrik proporsional dengan  $\pi z$  yang mana menciptakan mode ini. Sama halnya dengan medan yang dihasilkan oleh  $\bar{\pi}m = \pi_m z \hat{z}$  tidak mempunyai Ez dan dipanggil mode Transverse Electric (TE). Juga disebut mode H. Sekarang kita tahu bahwa mode TM dan TE bertanggungjawab dengan solusi Dirichlet's dan Neumann's eigenvalue problems, respektif.

#### a) Mode TM atau Mode E

Mode TM dihasilkan dari  $\bar{\pi} = \pi z \hat{z}$ , yang mana memenuhi skalar gelombang rumus :

$$(\nabla^2 + k^2)\pi_2 = 0 \quad (3.15)$$

Dimana k adalah nomor gelombang. Jika arah gelombang berupa kosong atau berongga, maka diberi aturan kecepatan cahaya c dan panjang gelombang  $\lambda_0$  pada ruang vakum.

$$k = k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.16)$$

Jika arah gelombang diisi oleh material dengan indeks refraksi n, k diberi oleh :

$$k = k_0 n = \frac{\omega}{c} n = \frac{2\pi}{\lambda_0} n \quad (3.17)$$

Semua terisi komponen yang diberi aturan rumus  $\pi z$

$$\bar{E} = \nabla(\nabla \cdot \bar{\pi}) + k^2 \bar{\pi} = \nabla \frac{\partial \pi_z}{\partial z} + k^2 \bar{\pi} \quad (3.18)$$

$$\bar{H} = j\omega \varepsilon \nabla \times \bar{\pi} = j\omega \varepsilon \left( \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 \bar{\pi} \right) \times \bar{\pi} = j\omega \varepsilon (\nabla_t \pi_z \times \hat{z}) \quad (3.19)$$

Dimana  $\nabla_t$  adalah “del” operator di transverse plane

$$\nabla_t = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \quad (3.20)$$

Juga perlu dicatat bahwa H adalah transverse ke arah z

Mari kita pertimbangkan perambatan konstanta  $\beta$  dari rmbatan gelombang ke arah z.

Maka vektor z dirumuskan :

$$\pi_z(x, y, z) = \phi(x, y) e^{-j\beta z} \quad (3.21)$$

Jika digabung dengan rumus persamaan (3.15) kita mendapatkan :

$$(\nabla_t^2 + k_c^2) \phi(x, y) = 0$$

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2 \quad (3.22)$$

Dari arah gelombang ,  $k_c$  adalah konstanta dan tergantung hanya dengan panduan geometri. Maka konstanta  $k_c$  disebut dengan *cutoff wave number*. Sekali  $k_c$  dikenal, maka perambatan konstanta  $\beta$  untuk frekuensi dinyatakan dari persamaan (3.22)

Komponen medan yang didapat dari persamaan (3.18) dan persamaan (3.19) meggunakan persamaan (3.21) :

$$\begin{aligned} E_z &= k_c^2 \phi(x, y) e^{-j\beta z} \\ E_t &= -j\beta \nabla_t \phi(x, y) e^{-j\beta z} \\ H_z &= 0 \\ H_t &= \frac{\hat{z} \times E_t}{Z_e} = -j\omega \varepsilon \hat{z} \times \nabla_t \phi(x, y) e^{-j\beta z} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dimana  $Z_e = \beta / \omega \varepsilon$ .



Makna dari formula diatas adalah masalah arah gelombang sekarang dikurangi skalar rumus gelombang (3.22) untuk skala fungsi  $\phi(x, y)$  diatas lintasan arah gelombang. Juga didapat dari (3.23) bahwa bagian lintasan elektrik dan magnetik medan distribusi mempunyai kesamaan bentuk kecuali bahwa medan magnet diputar  $90^\circ$  dari medan elektrik dan rasio medan elektrik terhadap medan magnet adalah  $Z_e$ . Kuantitas  $Z_e$  mempunyai dimensi impedansi an disebut *wave impedance*.

**b) Mode TE atau Mode H**

Duet dari TM mode adalah TE (Transverse Electric) mode atau H modes. Ini dapat mengacu pada Hertz vektor  $\pi_m = \pi_{mz} \hat{z}$  dan  $\pi_{mz}$  mencukupi rumus gelombang :

$$(\nabla^2 + k^2)\pi_{mz} = 0 \tag{3.24}$$

Untuk perambatan gelombang di arah z dengan perambatan konstanta  $\beta$ , kita tulis

$$\pi_{mz} = \Psi(x, y)e^{-j\beta z} \tag{3.25}$$

Kemudian kita dapat rumus skalar gelombang

$$(\nabla_t^2 + k_c^2)\Psi(x, y) = 0 \tag{3.26}$$

Perambatan konstanta  $\beta$  pada frekuensi didapat saat perpotongan gelombang nomor kc diketahui

$$\beta^2 = k^2 - k_c^2 \tag{3.27}$$

Komponen medan didapat dari bentuk berikut, mirip dengan persamaan (3.25)

$$\begin{aligned} H_z &= k_c^2 \Psi(x, y) e^{-j\beta z} \\ H &= -j\beta \nabla_t \Psi(x, y) e^{-j\beta z} \\ E_z &= 0 \\ E_t &= Z_h (H_t \times \hat{z}) = j\omega\mu \hat{z} \times \nabla_t \Psi(x, y) e^{-j\beta z} \end{aligned} \tag{3.28}$$

Dimana  $Z_h$  adalah impedansi gelombang didapat dari

$$Z_h = \frac{\omega\mu}{\beta}$$

Catatan jika arah gelombang kosong,  $k = k_0$ , tetapi arah gelombang terisi oleh material dengan indeks refraksi  $n, k = k_0 n$ .

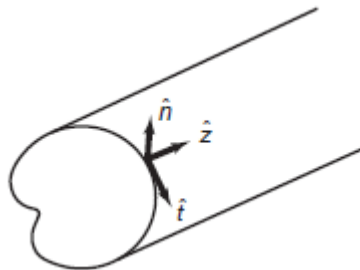
Batas kondisi untuk tembok konduksi yang sempurna adalah tangensial medan listrik harus nol. Untuk mode TM, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 menjelaskan bahwa

$$E_z = 0 \quad \text{dan} \quad E_t \times \hat{n} = 0 \tag{3.29}$$

Dimana  $\hat{n}$  adalah unit vektor normal untuk batas persamaan (3.13). Dari persamaan (3.23) kondisi pertama membutuhkan setidaknya  $k_c \neq 0$  atau  $\phi(x, y) = 0$  pada dinding. Jika  $k_c = 0$ ,  $E_z$  juga sebagai  $H_z$  identik nol pada semua poin di panduan. Karena itu ini adalah TEM mode (Transverse Electromagnetik Mode). Akan terlihat bahwa TEM modes tidak akan ada di dalam arah gelombang dengan satu tembok. Karena itu untuk mode TM,  $k_c \neq 0$  dan :

$$\phi(x, y) = 0 \quad \text{pada dinding.} \quad (3.30)$$

Sekarang kita dapat mengetahui bahwa  $\vec{E}t \times \hat{n}$  juga nol terhadap tembok. Untuk melihat ini. Tulis  $E_t = (E_t \cdot \hat{n})\hat{n} + (E_t \cdot \hat{t})\hat{t}$  dimana  $\hat{t}$  adalah unit vektor tangensi untuk tembok dan  $\hat{n}$



Gambar 3.8. Vektor Mode TE atau Mode H.  
(Sumber : <https://www.studiobelajar.com/gaya-lorentz>)

Adalah unit vektor normal terhadap dinding persamaan (3.13) Maka  $E_t \times \hat{n} = - (E_t \cdot \hat{t})\hat{z}$  tetapi  $(E_t \cdot \hat{t})$  adalah sama dengan  $-j\beta(\partial/\partial t)\phi(x, y)e^{-j\beta z}$  dari persamaan (3.23) dimana  $\partial/\partial t$  adalah turunan dari arah  $\hat{t}$ . Jika  $\phi(x, y) = 0$  pada tembok, maka  $\partial/\partial t \phi$  juga nol. Jadi  $E_t \times \hat{n} = 0$  pada tembok.

Untuk mode TE, batas kondisi  $E_t \times \hat{n} = 0$  Dari persamaan (3.28) kondisi ini dapat dilihat sebagai ekuivalen untuk

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} = 0 \quad \text{pada dinding.} \quad (3.31)$$

### Soal

- 1) Apa saja manfaat dan pengaplikasian Gaya Lorentz ?
- 2) Apa saja mode yang terdapat pada panduan seragam gelombang Elektromagnetik ?
- 3) jelaskan hukum yang menjelaskan gaya magnet ?
- 4) Apa yang dimaksud dengan kondisi Dirichlets dan Neumann's ?
- 5) Jelaskan perbedaan mode Transverse Magnetic (TM) dengan mode TE (Transverse Electric)

# BAB IV

## PRINSIP-PRINSIP KONVERSI ENERGI

### 4.1 Pendahuluan

Perangkat konversi energi adalah suatu perangkat yang mengkonversi antara listrik, magnetik, kinetik, potensial, optik, kimia, nuklir, dan bentuk energi lainnya. Proses konversi energi terjadi secara alami. Misalnya, energi diubah dari radiasi elektromagnetik optik menjadi panas ketika sinar matahari menghangatkan rumah, dan energi diubah dari energi potensial menjadi energi kinetik ketika daun jatuh dari pohon. Atau, perangkat konversi energi dirancang dan diproduksi oleh berbagai ilmuwan dan insinyur. Perangkat konversi energi ini berkisar dari komponen sirkuit terintegrasi kecil seperti termokopel yang digunakan untuk merasakan suhu dengan mengubah gelombang mikro daya dari energi panas ke listrik ke pembangkit listrik tenaga batu bara besar yang mengubah gigawatt energi yang disimpan dalam ikatan kimia batubara menjadi listrik.

Perangkat konversi energi langsung mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya melalui satu proses. Misalnya, sel surya adalah perangkat konversi energi langsung yang mengubah radiasi elektromagnetik optik menjadi listrik. Sementara beberapa sinar matahari yang jatuh pada sel surya dapat memanaskannya sebagai gantinya, efek itu tidak mendasar untuk operasi sel surya. Atau, perangkat konversi energi tidak langsung melibatkan serangkaian proses konversi energi langsung. Misalnya, beberapa pembangkit listrik tenaga surya melibatkan konversi radiasi elektromagnetik optik menjadi listrik dengan memanaskan fluida sehingga menguap. Penguapan dan perluasan gas memutar rotor turbin. Energi dari gerakan mekanis rotor diubah menjadi medan magnet yang bervariasi waktu yang kemudian diubah menjadi arus listrik bolak-balik di kumparan generator.

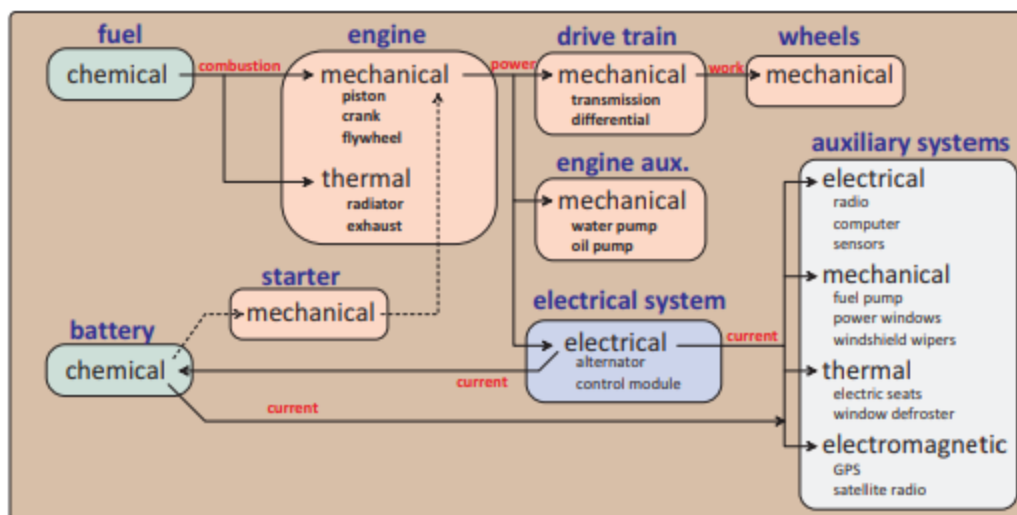
Teks ini berfokus pada perangkat konversi energi langsung yang mengubah energi listrik antara bentuk lain. Karena berbagai macam perangkat yang sesuai dengan kategori ini, konversi energi adalah topik yang penting bagi semua jenis insinyur listrik. Beberapa insinyur listrik berspesialisasi dalam membangun sistem instrumentasi. Banyak sensor yang digunakan oleh para insinyur ini adalah perangkat konversi energi langsung, termasuk pengukur regangan yang digunakan untuk mengukur tekanan, sensor efek Hall yang mengukur medan magnet, dan sensor piezoelektrik yang digunakan untuk mendeteksi getaran mekanis. Energi listrik yang dihasilkan dalam sensor mungkin sangat kecil sehingga aplikasi diperlukan. Insinyur listrik lainnya berspesialisasi dalam produksi dan distribusi tenaga listrik. Baterai dan sel surya adalah perangkat konversi energi langsung yang digunakan untuk menyimpan dan menghasilkan listrik. Mereka sangat berguna di lokasi terpencil atau di gadget genggam di mana tidak ada cara mudah untuk terhubung ke jaringan listrik. Terkait dengan itu, perangkat konversi energi langsung seperti perangkat termoelektrik dan sel bahan bakar digunakan untuk memberi daya pada satelit, rover, dan sistem kedirgantaraan lainnya. Banyak insinyur listrik bekerja di industri otomotif. Perangkat konversi energi langsung yang ditemukan di mobil termasuk baterai, kamera optik, sensor efek Hall dalam tachometer yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi, dan sensor tekanan.

Konversi energi sangat penting untuk bidang teknik elektro, tetapi juga penting untuk teknik mesin, fisika, kimia, dan cabang sains dan teknik lainnya. Misalnya, pegas adalah perangkat penyimpanan energi yang sering dipelajari oleh insinyur mesin, kapasitor adalah perangkat penyimpanan energi yang sering dipelajari oleh insinyur listrik, dan baterai adalah perangkat penyimpanan energi yang sering dipelajari oleh ahli kimia. Terkait dengan itu, penyimpanan energi dan perangkat konversi energi, seperti pegas, kapasitor, dan baterai. Mereka biasa, murah, dan tersedia secara luas. Sementara mereka ditemukan dalam objek sehari-hari, mereka adalah subjek aktif dari penelitian kontemporer juga. Misalnya, komputer laptop dibatasi oleh masa pakai baterai, dan penerimaan ponsel sering dibatasi oleh

kualitas antenna. Baterai, antenna, dan perangkat konversi energi langsung lainnya dipelajari oleh kedua perusahaan konsumen yang mencoba membangun produk yang lebih baik dan peneliti akademis yang mencoba memahami fisika dasar.

Proses konversi energi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dapat dibagi menjadi konversi Langsung dan Tidak Langsung. Konversi langsung adalah proses satu langkah seperti halnya konversi fotovoltaik dari elektromagnetik menjadi energi listrik. Contoh keduanya ditunjukkan di bawah ini:

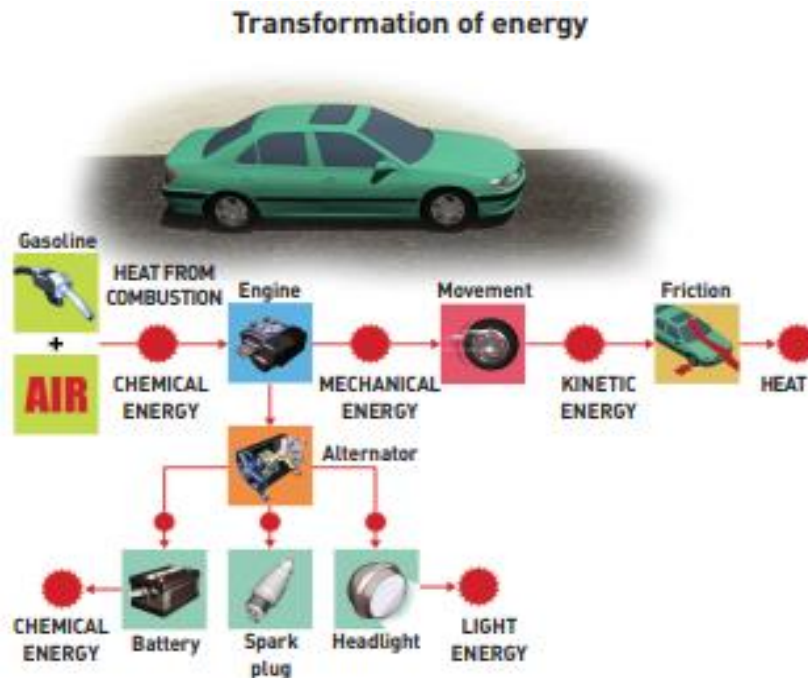
- 1) **Langsung** : Proses konversi satu langkah
  - Fotovoltaik : Elektromagnetik  $\rightarrow$  listrik
  - Baterai : kimiawi  $\leftrightarrow$  listrik
  - Pendingin termoelektrik (TEC): Termal  $\leftrightarrow$  listrik
  - Piezoelektrik : mekanis  $\leftrightarrow$  listrik
  
- 2) **Tidak langsung** : Proses konversi multi-langkah
  - Siklus diesel (gas): kimiawi  $\rightarrow$  Termal  $\rightarrow$  Mekanik  $\rightarrow$  Mekanik
  - Siklus rankine (cair-uap), turbin uap :
    - $\left\{ \begin{array}{l} \text{kimiawi} \\ \text{nuklir} \\ \text{solar} \\ \text{panas bumi} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Termal} \rightarrow \text{Mekanik} \rightarrow \text{Electris}$
  - Siklus Brayton (gas), turbin gas, turbojet:
    - $\left\{ \begin{array}{l} \text{kimiawi} \\ \text{nuklir} \\ \text{solar} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Termal} \rightarrow \text{Mekanik} \rightarrow \text{Electris}$
  - $\left\{ \begin{array}{l} \text{turbin angin} \\ \text{energi gelombang} \\ \text{energi pasang surut} \end{array} \right\} \rightarrow \text{Mekanik} \rightarrow \text{Mekanik} \rightarrow \text{Mekanik} \rightarrow \text{Electris}$



Gambar 4.1. Proses konversi energi tidak langsung dalam kendaraan.  
(Sumber : (Department of Mechanical Engineering – Engineering Mechanics, 2018))

Gambar 4.2 menunjukkan transformasi energi yang dihasilkan pada mobil sebagai berikut :

- a) Energi kimia bensin dan udara diubah menjadi panas oleh pembakaran. Ini ditransmisikan, oleh produksi gas panas, pertama ke silinder dan kemudian ke piston. Pada tahap ini, ia diubah menjadi energi mekanik dan mulai menggerakkan mobil, yang memperoleh sejumlah energi kinetik.
- b) Gesekan udara terhadap *bodywork* dan roda terhadap tanah mengubah semua energi ini menjadi panas (di jalan datar dengan kecepatan konstan).
- c) Beberapa energi dari mesin diubah menjadi energi listrik, yang menggerakkan alternator. Arus yang dihasilkan digunakan untuk membuat busi menyala untuk menyalakan bahan bakar, dan untuk mengisi ulang baterai, di sana dengan meningkatkan energi kimianya. Ini juga digunakan untuk menyalakan lampu depan untuk memancarkan energi cahaya. Jadi, pada kecepatan tertentu, kita mengkonsumsi sedikit lebih banyak bensin di malam hari daripada di siang hari.



Gambar 4.2. Transoformasi energi.  
(Sumber : (Yuvanoe, 2005))

## 4.2 Konversi Energi Mekanik

Energi Mekanik Gerak : Benda bergerak menunjukkan energi gerak mekanik, juga disebut energi kinetik. Bola yang dilemparkan melalui udara atau mobil yang melaju di jalan memiliki energi gerak mekanis. Contoh lain konversi energi mekanik :

### 1. Energi Listrik ke Energi Mekanik Gerak

Model kereta listrik menggambarkan konversi energi listrik menjadi energi gerak mekanik. Energi listrik, yang mengoperasikan kereta api, dihasilkan di pembangkit listrik. Motor listrik di mesin kereta mengubah energi listrik itu menjadi energi gerak mekanik. Karena energi listrik dikirim ke kereta dengan kecepatan yang hampir konstan, kereta melambat saat mendaki tanjakan karena energi

diperlukan untuk mengangkat kereta ke atas serta untuk memajukannya. Saat kereta menaiki tanjakan, beberapa energi gerak mekaniknya diubah menjadi energi potensial gravitasi.

## **2. Energi Mekanik Gerak ke Energi Listrik**

Meskipun kita tidak dapat dengan mudah menyimpan energi listrik dalam jumlah besar, listrik dapat terus ditransfer kepada kita dari pembangkit listrik. Di kelas, Anda akan menggunakan generator engkol tangan untuk mengubah energi mekanik gerak lengan Anda menjadi energi listrik. Di masa depan kita akan belajar lebih banyak tentang generator pembangkit listrik yang menyediakan listrik untuk rumah dan bisnis kita.

Generator percikan mengubah energi mekanik gerak menjadi energi listrik percikan api. Ketika pegas generator percikan dikompresi, energi mekanik disimpan sebagai energi regangan potensial. Ketika energi regangan yang tersimpan dilepaskan, pegas memberikan gaya pada permukaan jenis kristal tertentu, yang kemudian menjadi bermuatan listrik. Jika muatan yang cukup menumpuk di permukaan, percikan api akan melompat di antara bagian kristal yang bermuatan berlawanan.

## **3. Energi Mekanik Gerak ke Energi Panas**

Energi gerak mekanik diubah menjadi energi panas ketika permukaan bergesekan, menghasilkan gesekan antara benda-benda. Kami akan mengilustrasikan energi panas dari gesekan dengan menggunakan bor listrik untuk memutar tabung logam yang diisi dengan air. Dua blok kayu yang diperas terhadap tabung menghasilkan gesekan. Ketika kita menuangkan sedikit air ke dalam tabung logam dan memumpatnya dengan sumbat karet, energi mekanik dari gerakan yang diubah menjadi panas oleh gesekan mengubah air menjadi uap. Uap meniup gabus keluar dari tabung, sehingga mengubah energi panas kembali menjadi energi mekanik gerak sumbat.

# **4.3 Konversi Energi Cahaya**

Energi Radiasi: Sementara getaran materi menghasilkan energi panas dan suara, energi radiasi dihasilkan dari getaran muatan. Energi radiasi adalah nama lain untuk gelombang energi elektromagnetik. Misalnya, energi matahari diangkut ke Bumi sebagai gelombang energi radiasi. Gelombang radio, gelombang mikro, radiasi inframerah, gelombang cahaya, sinar-X dan sinar kosmik adalah semua gelombang energi radiasi.

### **1. Energi Listrik ke Energi Cahaya**

Di kelas Anda akan melihat lampu malam, yang mengubah energi listrik menjadi cahaya tampak, suatu bentuk energi radiasi. Lampu malam redup karena beroperasi dengan jumlah energi yang sangat kecil – hanya 0,02 watt energi listrik dibandingkan dengan 100 watt untuk bola lampu rata-rata.

### **2. Energi Radiasi ke Energi Listrik**

Sel surya mengubah energi radiasi dari matahari menjadi energi listrik. Di kelas, kita akan menggunakan sel surya untuk menyalakan bola lampu senter, menjalankan mobil mainan, dan mengoperasikan motor kecil.

### **3. Energi Radiasi ke Energi Potensial Kimia**

Tumbuhan mengubah energi radiasi dari matahari menjadi energi kimia yang tersimpan melalui proses fotosintesis. Energi nuklir yang dihasilkan di inti Matahari memancar menjauh dari Matahari ke segala arah. Beberapa energi radiasi ini menyerang Bumi dan diserap oleh tumbuhan. Sel tumbuhan menggunakan energi radiasi untuk menghasilkan energi kimia berupa karbohidrat. Ketika kita mengkonsumsi tanaman, tubuh kita mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi yang tersimpan dalam tubuh kita.

## 4.4 Konversi Energi Kimia

Energi Potensial Kimia: Energi potensial kimia ada karena atom dan molekul dapat mengambil atau mengeluarkan energi ketika mereka membentuk atau mengubah ikatan kimia. Berikut contoh konversi energy kimia :

### 1. Energi Potensial Kimia ke Energi Listrik

Mungkin perangkat penyimpanan energi yang paling umum adalah baterai. Baterai menyimpan energi potensial kimia, yang diubah menjadi energi listrik saat baterai beroperasi.

### 2. Energi Potensial Kimia ke Energi Panas

Ketika zat terbakar, energi kimia yang tersimpan diubah menjadi energi panas dan menjadi energi radiasi yang terlihat dan tidak terlihat. Membakar gas alam, batu bara, dan produk minyak bumi adalah salah satu proses konversi energi kami yang paling penting secara ekonomi. Kami akan mengeksplorasi konsekuensi ekonomi dan lingkungan dari konversi energi ini.

### 3. Energi Potensial Kimia ke Energi Radiasi

Tidak seperti bola lampu, yang mengeluarkan radiasi inframerah tak terlihat serta cahaya tampak, beberapa reaksi kimia menghasilkan cahaya tampak tanpa mengeluarkan radiasi inframerah dalam jumlah yang jelas. Reaksi chemiluminescent semacam itu terjadi ketika kunang-kunang mengeluarkan cahaya. Di kelas, kita akan melihat demonstrasi konversi energi kimia menjadi cahaya tampak.

### 4. Energi Radiasi ke Energi Potensial Kimia

Tumbuhan mengubah energi radiasi dari matahari menjadi energi kimia yang tersimpan melalui proses fotosintesis. Energi nuklir yang dihasilkan di inti Matahari memancar menjauh dari Matahari ke segala arah. Beberapa energi radiasi ini menyerang Bumi dan diserap oleh tumbuhan. Sel tumbuhan menggunakan energi radiasi untuk menghasilkan energi kimia berupa karbohidrat. Ketika kita mengonsumsi tanaman, tubuh kita mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi yang tersimpan dalam tubuh kita.

## 4.5 Konversi Energi Nuklir

Energi Nuklir: dalam reaksi nuklir, energi dikeluarkan atau diambil oleh inti atom. Energi tersedia dari inti atom yang berpotensi membusuk.

### 1. Proses Energi Nuklir ke Energi Listrik

Setelah bijih uranium ditambang, bijih tersebut dikirim ke konsentrator (pabrik) di mana bijih tersebut digiling, dirawat, dan dimurnikan. Karena bijih memiliki kadar 0,1%-0,2% uranium, satu ton bijih hanya mengandung antara 1 dan 2 kg uranium per 1000 kg bijih. Dengan demikian, ribuan hingga ton bijih harus diekstraksi dan dikirim ke pabrik untuk menghasilkan jumlah uranium yang relatif kecil. Dalam proses konsentrasi sekitar 95% bijih dipulihkan sebagai U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (yellowcake) ke tingkat kemurnian sekitar 80%. Dengan demikian, dengan asumsi 0,15% bijih uranium, penggilingan dan pemrosesan metrik ton (1000 kg) bijih menghasilkan konsentrat 1,781 kg (1,425 kg uranium dan 0,356 kg pengotor). Untuk itu pabrik harus berlokasi relatif dekat dengan lokasi tambang. Tailing bijih (limbah) berjumlah 998,219 kg dan mengandung sejumlah radon dan produk peluruhan uranium lainnya dan harus dibuang sebagai limbah radioaktif.

Konsentrat U<sup>308</sup> kemudian dibawa ke pabrik konversi di mana konsentrat dimurnikan lebih lanjut (kotoran 20% dihilangkan) dan kue kuning uranium diubah menjadi UF<sub>6</sub> ber heksafluoried uranium). Uranium hexafluoride adalah gas pada suhu yang cukup rendah dan merupakan bahan yang ideal untuk proses pengayaan isotop U-235 baik dari difusi gas atau centrifuge gas. UF<sub>6</sub> dikirim dalam silinder baja dalam keadaan padat, dan UF<sub>6</sub> diuapkan dengan meletakkan silinder dalam bak uap.

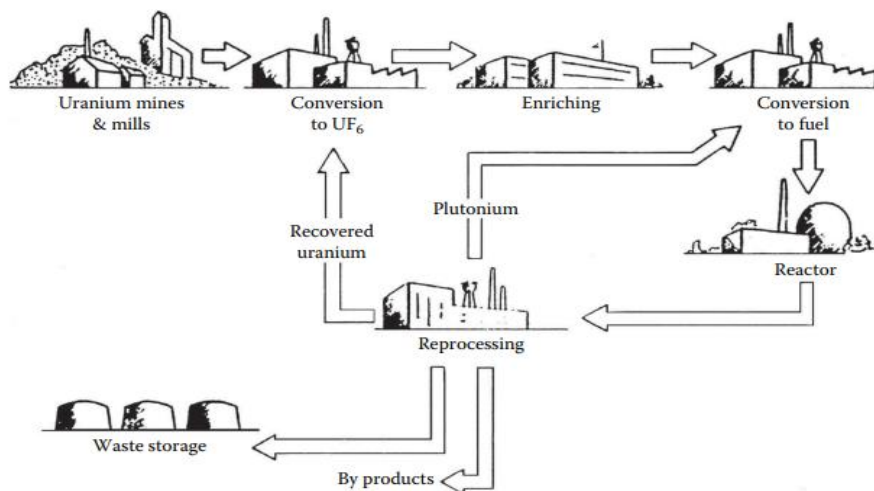
Jika uranium akan diperkaya hingga 4% U<sup>235</sup>, maka 1 kg produk U<sup>235</sup> 4% akan membutuhkan 7,4 kg pakan uranium alami dan akan menghasilkan 6,4 kg limbah uranium (ekor atau uranium yang habis) dengan kandungan isotop U<sup>235</sup> sebesar 0,2%. Bahan ini diperlakukan sebagai limbah radioaktif.

Sejumlah besar ekor (uranium yang habis) ada sebagai UF<sub>6</sub> dalam wadah pengiriman aslinya di pabrik pengayaan. Uranium yang habis (bahan padat) telah digunakan sebagai perisai untuk sumber radioaktif, cangkang penusuk lapis baja, penyeimbangan ujung rotor helikopter, pemberat pemberat kapal pesiar, dan penyeimbangan pesawat penumpang.

UF<sub>6</sub> yang diperkaya kemudian dikirim ke pabrik fabrikasi di mana ia diubah menjadi bubuk uranium dioksida (UO<sub>2</sub>). Bubuk ditekan dan disinter ke dalam pelet silinder yang ditempatkan dalam tabung zircaloy (paduan zirkonium), bertekanan dengan helium, dan disegel. Batang dikumpulkan dalam array (~17×17) yang diikat bersama oleh kisi-kisi spacer, dengan fitting ujung atas dan bawah dihubungkan oleh batang dasi atau tabung pemandu. Rakitan bahan bakar reaktor air bertekanan, masing-masing mengandung sekitar 500 kg uranium, ditempatkan dalam reaktor selama 3-4 tahun. Perakitan bahan bakar tunggal menghasilkan 160.000.000 kilowatt jam listrik dan memberi 8000 orang kebutuhan listrik tahunan mereka selama tiga tahun beroperasi. Ketika rakitan bahan bakar dikeluarkan dari reaktor, itu harus ditempatkan di kolam penyimpanan untuk memungkinkan menghilangkan panas peluruhan. Setelah sekitar lima tahun penyimpanan basah, perakitan bahan bakar dapat dilepas ke penyimpanan kering dalam wadah beton atau baja.

Di Amerika Serikat rencana saat ini adalah untuk menyimpan bahan bakar nuklir secara permanen, dengan Departemen Energi memikul tanggung jawab atas bahan bakar "bekas". Uang bagi pemerintah untuk menangani penyimpanan tersebut berasal dari biaya 1 mil per kilowatt jam yang dibayarkan oleh konsumen listrik yang dihasilkan nuklir. Pabrik adalah seperseribu dolar atau sepersepuluh sen. Dengan demikian, perakitan bahan bakar yang dijelaskan di atas akan mengumpulkan \$160.000 dalam dana limbah untuk Departemen Energi untuk menyimpan bahan bakar secara permanen. Di Eropa, ketika bahan bakar dikeluarkan dari penyimpanan basah, bahan bakar dikirim ke pabrik pemrosesan ulang di mana komponen logam dikumpulkan untuk pembuangan limbah; dan bahan bakar secara kimiawi dipulihkan sebagai uranium 96%, yang diubah menjadi uranium dioksida untuk didaur ulang ke pabrik pengayaan, 1% plutonium, yang diubah menjadi bahan bakar atau ditempatkan dalam penyimpanan, dan 3% produk fisi yang terbungkus kaca dan disimpan secara permanen.

Hal penting yang perlu diingat tentang siklus bahan bakar adalah kecilnya jumlah produk fisi radioaktif (1,5 kg) yang diciptakan sebagai limbah radioaktif dalam menghasilkan daya yang dapat melayani kebutuhan listrik tahunan 8000 orang selama tiga tahun beroperasi. Skema seluruh siklus bahan bakar yang menunjukkan sistem Amerika Serikat (sekalthrough) dan sistem Eropa (daur ulang) diberikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Proses pengolahan energy nuklir.  
(Sumber : (Michaelides, 2017))



**Contoh lain penerapan konversi energy dapat dilihat pada Tabel 4.1**

Tabel 4.1 Berbagai proses konversi energi

<b>Proses</b>	<b>Bentuk Energi</b>	<b>Contoh Perangkat</b>
Piezoelektrik	Energi Listrik ↓ Energi Mekanik	Sensor Getaran Piezoelektrik, Mikrofon Electret
Piroelektrik	Energi Listrik ↓ Energi Panas	Detektor Inframerah Piroelektrik
Efek Elektro-optik	Energi Optic Elektromagnetik ↓ Polarisasi Bahan	Optik yang Dapat Dikontrol, Tampilan Crystal Cair
Transmisi dan Penerimaan Elektromagnetik	Energi Listrik ↓ Energi Elektromagnetik	Antena
Efek Hall	Energi Listrik ↓ Energi Mekanik	Perangkat Efek Hall
Efek magnetikhidrodinamik	Energi Listrik ↓ Energi Mekanik	Perangkat Magnetohydrodynamic
Penyerapan	Energi Optic Elektromagnetik ↓ Energi Listrik	Sel Surya, Fotodetektor Optik Semikonduktor
Emisi Spontan	Energi Listrik ↓ Energi Optic Elektromagnetik	Lampu, LED
Stimulated Emission	Energi Listrik ↓ Energi Optic Elektromagnetik	Laser, optical amplifier
Efek Termoelektrik	Energi Listrik ↓ Energi Panas	Pendingin termoelektrik, perangkat Peltier, Termokopel
(Baterai atau Sel Bahan Bakar) Pemakaian	Energi Kimia ↓ Energi Listrik	Baterai, Sel Bahan Bakar
(Baterai atau Sel Bahan Bakar) Pemakaian	Energi Listrik ↓ Energi Kimia	Baterai, Sel Bahan Bakar
Emisi Thermionic	Energi Panas ↓ Energi Listrik	Perangkat Thermionic
Efek magnetikhidrodinamik	Energi Listrik ↓ Aliran Fluida	Pompa Mikrofluidik, Katup

## 4.6 Efisiensi Konversi Energi

Efisiensi energi adalah jumlah energi berguna yang bisa Anda dapatkan dari suatu sistem. Secara teori, mesin yang 100 persen hemat energi akan mengubah semua energi yang dimasukkan ke dalamnya menjadi pekerjaan yang bermanfaat. Mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk lain selalu melibatkan hilangnya energi yang dapat digunakan, biasanya dalam bentuk energi panas.

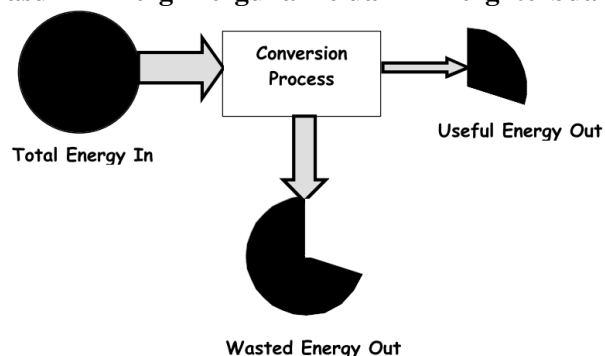
Faktanya, sebagian besar transformasi energi tidak terlalu efisien. Tubuh manusia tidak terkecuali. Tubuh Anda seperti mesin, dan bahan bakar untuk "mesin" Anda adalah makanan. Makanan memberi kita energi untuk bergerak, bernapas, dan berpikir. Tubuh Anda sangat tidak efisien dalam mengubah makanan menjadi pekerjaan yang bermanfaat. Sebagian besar energi dalam tubuh Anda dilepaskan sebagai energi panas.

Bola lampu pijar tradisional juga tidak efisien. Jenis bola lampu ini hanya mengubah sepuluh persen energi listrik menjadi cahaya dan sisanya (90 persen) diubah menjadi energi panas. Itu sebabnya bola lampu ini sangat panas saat disentuh. Inefisiensinya juga mengapa bohlam ini tidak lagi dijual untuk digunakan di rumah, dan mengapa banyak konsumen menggunakan LED dan CFL untuk penerangan.

Sebagian besar pembangkit listrik yang menggunakan uap untuk memutar turbin sekitar 35 persen efisien. Dengan demikian, dibutuhkan tiga unit bahan bakar untuk membuat satu unit listrik. Sebagian besar energi lainnya hilang sebagai limbah panas. Panas ini menghilang ke lingkungan di mana kita tidak dapat lagi menggunakannya sebagai sumber energi praktis.

Dalam semua konversi energi, beberapa energi terbuang percuma, namun, beberapa proses konversi energi membutuhkan sejumlah besar energi untuk mendapatkan sejumlah kecil energi keluar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Proses konversi semacam itu tidak efisien. Mengurangi biaya energi membutuhkan konversi energi yang efisien, yang membuang energi paling sedikit. Misalnya, bola lampu pijar mengubah energi listrik menjadi energi radiasi dalam bentuk cahaya tampak dan radiasi inframerah. Sementara cahaya tampak berguna, radiasi inframerah terbuang percuma. Radiasi inframerah yang terbuang dapat dirasakan sebagai panas saat Anda memegang tangan di dekat bohlam. Bagian dari radiasi inframerah ini digunakan untuk meningkatkan energi panas dari kaca bola lampu, yang sangat panas jika disentuh. Lampu neon lebih efisien daripada lampu pijar karena menghasilkan jumlah cahaya tampak yang sama tetapi radiasi inframerah jauh lebih sedikit.

**Total Energi Masuk = Energi Berguna Keluar + Energi terbuang Keluar**



Gambar 4.4. Efisiensi konversi energi.  
(Sumber : (Michaelides, 2017))

Efisiensi proses konversi energi sama dengan rasio jumlah energi dari jenis yang diinginkan yang dihasilkan per jumlah total energi yang dimasukkan ke dalam proses konversi.

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Energi Berguna Keluar}}{\text{Total Energi masuk}}$$

Karena setiap proses konversi energi membuang energi, rasio efisiensi untuk setiap proses konversi energi kurang dari satu – energi yang berguna selalu kurang dari total energi yang dimasukkan. Contoh 1.1 mengilustrasikan perhitungan efisiensi energi menggunakan joule energi, satuan pengukuran energi yang biasa.

**(Contoh 1.1)**

Berapa efisiensi konversi energi agar 600 joule energi agar dapat menghasilkan 150 joule energi yang bermanfaat?

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Energi Berguna Keluar}}{\text{Total Energi masuk}} = \frac{150 \text{ joules}}{600 \text{ joules}} = 0.25 = 25 \%$$

Ketika serangkaian konversi energi diperlukan untuk menghasilkan bentuk energi yang diinginkan, energi terbuang sia-sia di setiap langkah proses. Efisiensi keseluruhan dari serangkaian proses konversi energi bisa sangat rendah. Efisiensi keseluruhan adalah produk dari efisiensi setiap langkah dalam proses.

Efisiensi Keseluruhan = (Efisiensi langkah 1) x (Efisiensi langkah 2) x ... or

Efisiensi Keseluruhan = Efisiensi1 x Efisiensi2 x Efisiensi3 x .....

**(Contoh 1.2)**

Serangkaian konversi energi terjadi ketika generator engkol tangan digunakan untuk menyalakan bohlam kecil. Misalkan efisiensi gerakan tangan memutar engkol generator adalah 40%. Asumsikan bahwa efisiensi generator yang mengubah energi mekanik gerak menjadi energi listrik adalah 50%. Biarkan efisiensi bola lampu mengubah energi listrik menjadi cahaya tampak menjadi 20%. Berapa efisiensi keseluruhan dari rangkaian konversi energi ini? Jika total energi yang dimasukkan untuk memutar engkol generator adalah 1.000 joule, berapa banyak energi yang berguna diperoleh sebagai cahaya tampak dari bohlam?

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi Keseluruhan} &= \text{Efisiensi tangan} \times \text{Efisiensi generator} \times \text{Efisiensi bohlam} \\ &= 0.40 \times 0.50 \times 0.20 \\ &= 0.04 = 4\% \end{aligned}$$

Jadi, 1.000 joules x 0.04 = 40 joule energi yang bermanfaat

**Soal**

- 1) Jelaskan konversi energi yang terjadi saat Anda mengendarai sepeda olahraga dan nyalakan bola lampu yang terhubung dengannya. Konversi mana yang memberikan energi berguna yang anda inginkan?
- 2) Berikan contoh menyimpan berbagai bentuk energi ?
- 3) Bagaimana efisiensi proses konversi energi yang membutuhkan 1.500 joule energi untuk menghasilkan 500 joule energi yang bermanfaat?
- 4) Bagaimana jumlah total energi yang dimasukkan ke dalam proses konversi dibandingkan dengan jumlah total energi dari proses itu? Bagaimana jumlah total energi yang dimasukkan ke dalam proses dibandingkan dengan energi yang berguna keluar?
- 5) Jika energi dilestarikan, bagaimana kita bisa mengatakan bahwa energi terbuang sia-sia dalam proses konversi energi?

# BAB V

## PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

### 5.1 Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga air tumbuh secara dramatis di seluruh dunia dengan penemuan generator listrik dan terutama setelah menjadi mungkin untuk menghasilkan dan mentransmisikan arus bolak-balik (AC) mulai sekitar tahun 1889. Pertumbuhan permintaan listrik, peningkatan efisiensi turbin, peningkatan daya yang cepat keluaran turbin tenaga air, dan pengetahuan teknik sipil untuk membangun bendungan besar, semuanya digabungkan untuk sangat memperluas peran tenaga air dalam produksi listrik global.

Pembangkit listrik tenaga air menghasilkan lebih banyak listrik daripada sumber energi terbarukan lainnya dengan kapasitas terpasang 1064 GW pada tahun 2015 dengan 3940 TWh yang dihasilkan di seluruh dunia dan menyumbang 16,6% dari total produksi listrik global pada tahun itu. Meskipun sebagian besar negara di dunia menggunakan tenaga air, penggunaannya tidak merata. Ini adalah fungsi dari bagaimana sumber daya tenaga air didistribusikan, pilihan investasi negara di sektor ketenagalistrikan, serta kemampuan mereka untuk memobilisasi sumber daya.

Ketersediaan turbin air yang kuat dan efisien yang mencakup kisaran head rendah hingga tinggi dan kemampuan teknik untuk merancang dan membangun bendungan besar berkontribusi pada pertumbuhan pesat dalam ukuran proyek pembangkit listrik tenaga air, menjadikannya stasiun pembangkit listrik terbesar di dunia pada tahun 1930-an. Berawal dari negara-negara industri Barat, teknologi menyebar dengan cepat ke Eropa Timur, Amerika Latin, Asia, dan Afrika. Diperkirakan sekitar 50.000 bendungan besar telah dibangun pada akhir abad ke-20. Di samping pencapaian teknologi yang mengarah pada pengembangan tenaga air yang belum pernah terjadi sebelumnya, juga muncul kontroversi panas seputar pembangunan bendungan besar. Di negara-negara industri, kekhawatiran datang terutama dari (a) pemerhati lingkungan yang peduli dengan kerusakan ekosistem sungai dan habitat riparian serta hilangnya spesies dan keanekaragaman hayati akibat terputusnya aliran sungai dan banjir lahan basah dan hutan dan (b) pemangku kepentingan yang menghargai ekonomi alternatif dan kegiatan rekreasi di sungai yang mengalir bebas, seperti memancing, arung jeram, dan kano.

Pembangkit listrik tenaga air sering diklasifikasikan berdasarkan ukuran atau kapasitas terpasangnya. Klasifikasi ini, yang bervariasi antar negara, digunakan oleh pemerintah sebagai dasar kebijakan mereka untuk memberikan manfaat pajak, feed in tariff ke jaringan listrik, subsidi, dan peraturan lingkungan. Perbedaan utama dalam aplikasi dan desain sistem tenaga air berdasarkan klasifikasi ukuran adalah sebagai berikut:

- 1) Pembangkit listrik tenaga mikro hidro menyediakan listrik untuk masyarakat pedesaan terpencil. Masyarakat yang mereka layani umumnya terlalu terpencil untuk dipasok secara ekonomis oleh jaringan listrik. Rancangan teknik untuk sistem mikrohidro cenderung sesederhana mungkin dan distandarisasi untuk kemudahan pengoperasian dan pemeliharaan oleh masyarakat lokal dengan dukungan teknis yang terbatas dari luar.
- 2) Pembangkit listrik tenaga air kecil dan beberapa pembangkit listrik tenaga air menengah dirancang sebagai proyek “run of-river” (RoR). Proyek RoR menggunakan bendung untuk mengalihkan air ke intake tetapi tidak menyimpan air. Mereka cenderung memiliki dampak lingkungan yang lebih sedikit daripada proyek dengan bendungan dan waduk.
- 3) Pembangkit listrik tenaga air besar biasanya melibatkan pembangunan bendungan untuk membuat reservoir. Beberapa reservoir berukuran kecil dan digunakan untuk menyimpan air untuk memasok beban puncak harian atau mingguan. Waduk lain cukup besar untuk

menyimpan air selama bulan-bulan hujan agar tersedia selama musim kemarau dan dalam beberapa kasus selama beberapa tahun untuk memenuhi kebutuhan di tahun-tahun kering.

## 5.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil

Pengembangan pembangkit listrik tenaga air kecil tidak terlalu kontroversial dan telah berkembang relatif lebih cepat dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air besar. REN21 (2013) memperkirakan bahwa ada sekitar 75 GW pembangkit listrik tenaga air kecil (<10 MW) yang terpasang di seluruh dunia pada tahun 2012 dan sektor tersebut menarik investasi sebesar \$5,9 miliar pada tahun 2011. Investasi ke dalam proyek-proyek kecil, mini, dan mikrohidro telah didorong dalam beberapa tahun terakhir oleh fakta bahwa mereka memiliki dampak lingkungan dan sosial yang lebih sedikit dibandingkan dengan proyek-proyek hidro besar karena sebagian besar adalah RoR dan seringkali merupakan sumber daya dengan biaya terendah untuk memasok listrik jarak jauh yang tidak dialiri listrik. komunitas. Pertumbuhan yang cepat dalam investasi ke energi terbarukan variabel telah meningkatkan kebutuhan penyimpanan energi untuk stabilitas sistem. Ini telah meningkatkan tren untuk implementasi bersama dari pompa penyimpanan hidro dengan tenaga surya dan angin. Penyimpanan yang dipompa memberikan kontribusi sekitar 145 GW ke kapasitas global dengan tambahan 2,56 GW yang diinvestasikan pada tahun 2015.

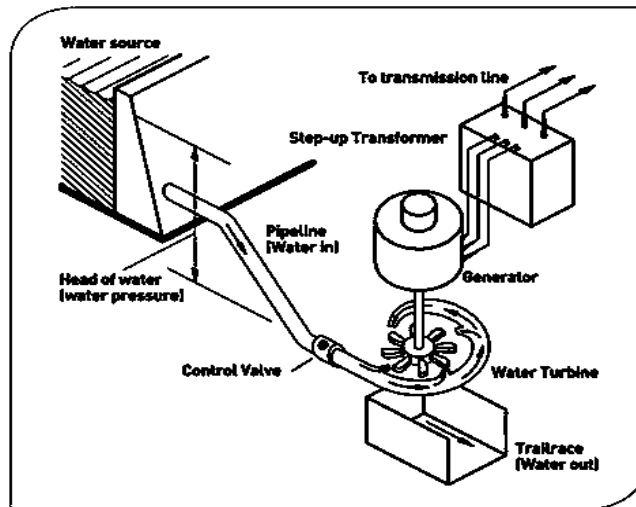
Pembangkit listrik tenaga air berskala kecil atau yang lebih dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), karena secara bahasa mikro berarti kecil dan hidro berarti air sehingga pembangkit listrik tenaga air berskala kecil bisa disebut pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Karena pembangkit tenaga listrik ini memanfaatkan aliran sungai atau aliran irigasi sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan turbin dan memutar generator. Prinsip pembangkit tenaga ini yaitu dimana ada sumber atau aliran air dengan ketinggian minimal 2,5 meter dan debit air 250 liter/detik, maka disitu ada energi listrik. Selain itu, mikrohidro tidak perlu membuat waduk seperti halnya pada PLTA.

Menurut Agus Maryono "PLTMH adalah salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) low head dengan kapasitas kurang dari 500 Kilo Watt (KW)". ). Selain itu Maria Hartiningsih (Energi Tri Mumpuni) mengatakan "Mikrohidro memanfaatkan debit dan ketinggian jatuhnya air pada sungai kecil di desa-desa untuk menghasilkan energi listrik di bawah 100 kilowatt".

PLTMH bisa digunakan sebagai salah satu opsi pengganti pembangkit listrik tenaga diesel yang dimiliki oleh pihak PLN. Oleh karena alasan ini, PLTMH perlu lebih dipertimbangkan untuk perkembangan kedepannya dalam membantu pasokan listrik. Potensi tenaga air tersebar hampir keseluruhan negeri ini dan diperkirakan memiliki daya mencapai 75.000 MW, sementara untuk pemanfaatannya saja baru sekitar 2,5 persen dari potensi yang ada. Turbin air sebagai alat pengubah energi potensial air menjadi energi torsi/putar yang dapat dimanfaatkan sebagai penggerak generator, pompa dan peralatan lain.

Pembangkit tenaga listrik mikrohidro memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air yang ada pada aliran air irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik.

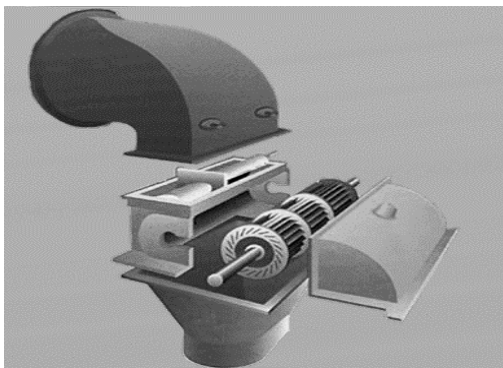
PLTMH melakukan konversi energi dengan urutan energi potensial – energi mekanik - energi listrik. Beberapa komponen instalasi PLTMH yang terpenting adalah turbin dan generator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.1. Komponen instalasi PLTMH

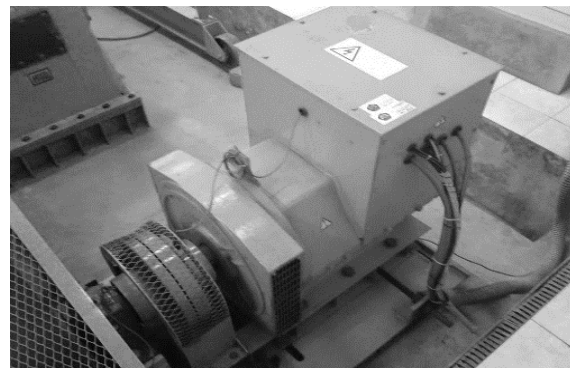
(Sumber : <https://museumlistrikpln.com/2020/06/apa-itu-pltmh.html>)

Beberapa komponen instalasi PLTMH yang terpenting adalah turbin dan generator. Turbin memiliki fungsi untuk alat penerima energi potensial dari air dan mengubahnya menjadi energi mekanik yang nantinya akan dihubungkan dengan generator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2. Sedangkan generator pada Gambar 5.3 berfungsi untuk membangkitkan energi listrik dari energi mekanik yang telah diterima dari turbin, kemampuan generator dalam menghasilkan listrik dinyatakan dalam VoltAmpere atau kilo VoltAmpere.



Gambar 5.2. turbin

(Sumber : <http://ridomanik.blogspot.com/2013/06/perancangan-mikro-hidro.html>)



Gambar 5.3. generator

(Sumber : <https://museumlistrikpln.com/2020/06/apa-itu-pltmh.html>)

### 5.2.1 Teknologi Microhidro

Sebuah skema hidro memerlukan dua hal yaitu debit air dan ketinggian jatuh (biasa disebut 'Head') untuk menghasilkan sebuah tenaga listrik yang bermanfaat. Ini adalah sebuah sistem konversi tenaga, menyerap tenaga dari bentuk ketinggian dan aliran, dan menyalurkan tenaga tersebut dalam bentuk daya listrik. Secara ilmu matematis sebenarnya tidak ada sebuah

sistem konversi daya yang dapat mengirim daya yang diserap dan dikurangi sebagian daya hilang oleh sistem itu sendiri dalam bentuk gesekan, panas, suara dan sebagainya.

Persamaan konversi dayanya adalah :

Daya yang masuk = Daya yang keluar + Kehilangan

Daya yang keluar = Daya yang masuk H Efisiensi konversi

Persamaan di atas digunakan untuk perbedaan yang kecil. Daya yang masuk, atau total daya yang diserap oleh skema hidro adalah daya kotor. Daya yang manfaatnya dikirim adalah daya bersih. Semua efisiensi dari skema  $P_{net}$  (daya bersih) =  $P_{gross}$  (daya kotor) H  $E_o$  kW. Daya kotor adalah head kotor ( $H_{gross}$ ) yang dikalikan dengan debit air ( $Q$ ) dan juga dikalikan dengan sebuah faktor ( $g = 9.8$ ), sehingga persamaan dasar dari pembangkit listrik adalah :

$$P_{net} = g H_n Q H E_o \text{ kW}$$

Dimana  $g = 9.8$

head dalam meter,

debit air dalam meter kubik per detik

$E_o = E_{konstruksi sipil} H E_{penstock} H E_{turbin} H E_{generator} H E_{sistem kontrol} H E_{jaringan} H E_{trafo}$  Biasanya  $E_{konstruksi sipil} : 1.0 - (\text{panjang saluran} H 0.002 \sim 0.005) / H_{gross}$   $E_{penstock} : 0.90 \sim 0.95$ ,  $E_{turbin} : 0.70 \sim 0.85$ ,  $E_{generator} : 0.80 \sim 0.95$

$E_{sistem kontrol} : 0.97$   $E_{jaringan} : 0.90 \sim 0.98$  (tergantung pada panjang jaringan)  $E_{trafo} : 0.98$   $E_{konstruksi sipil}$  dan  $E_{penstock}$  adalah yang biasa diperhitungkan sebagai 'Head Loss ( $H_{loss}$ )/kehilangan ketinggian'. Dalam kasus ini, persamaan diatas dirubah ke persamaan berikut :

$$P_{net} = g H (H_{gross} - H_{loss}) H Q H (E_o E_{konstruksi sipil} E_{penstock}) \text{ kW}$$

### 1) Perhitungan Teknik dan Ekonomis

Dalam PLTMH kasus perhitungannya dibedakan menjadi 2 yaitu secara Teknik dan ekonomis

#### 4.7 Perhitungan potensi daya mikrohidro dapat dihitung dengan persamaan daya:

$$(P) = 9.8 \times Q \times H_n \times h$$

di mana:

$P = \text{Daya (kW)}$

$Q = \text{debit aliran (m}^3/\text{s)}$

$H_n = \text{Head net (m)}$

$9.8 = \text{konstanta gravitasi}$

$h = \text{efisiensi keseluruhan.}$

Misalnya, diketahui data di suatu lokasi adalah sebagai berikut:

$$Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}^2,$$

$$H_n = 15 \text{ m}$$

$$h = 0.5.$$

besarnya potensi daya ( $P$ ) adalah:

$$\begin{aligned}
P &= 9.8 \times Q \times H_n \times h \\
&= 9.8 \times 500 \times 15 \times 0.5 \\
&= 36750 \text{ W} \\
&= 36,75 \text{ kW}
\end{aligned}$$

Rumus yang mendasari perhitungan potensi daya hidrolik adalah :

$$P_h = Q_d \times H_g \times g$$

Dengan :

- $P_h$  = Potensi daya hidrolik, kW
- $Q_d$  = Debit rencana, (m<sup>3</sup>)
- $H_g$  = Gross head, (m)
- $g$  = Konstanta gravitasi bumi, (9,81 m/dtk<sup>2</sup>)

## 2) Perhitungan ekonomis dalam PLTMH

### a) Net Present Value

NPV adalah nilai sekarang dari keseluruhan Discounted Cash Flow

$$NPV = \sum_t^n \frac{CIF}{(1+k)^t} - COF$$

- $k$  : discount rate
- $COF$  : Investasi
- $CIF_t$  : investasi pada periode t
- $n$  : Periode terakhir

### b) Pay Back Period

PBP merupakan lamanya waktu yang diperlukan untuk membalikkan dana investasi

$$PP = \frac{\text{investment cost}}{\text{annual CIF}}$$

### c) Return Of Investment

ROI atau laba investasi diartikan dengan rasio uang yang diperoleh atau hilang pada investasi

$$ROI = \frac{\sum_t^n \text{Benefit} - IC}{IC}$$

## 3) Produksi Energi per Tahun

PLTMH mampu menghasilkan energi pertahun dengan dilakukan perhitungan, dimana daya yang dibangkitkan (kW)  $P_{net}$ , waktu yang diperoleh dalam satu tahun (t) 8760 jam dan faktor kapasitas

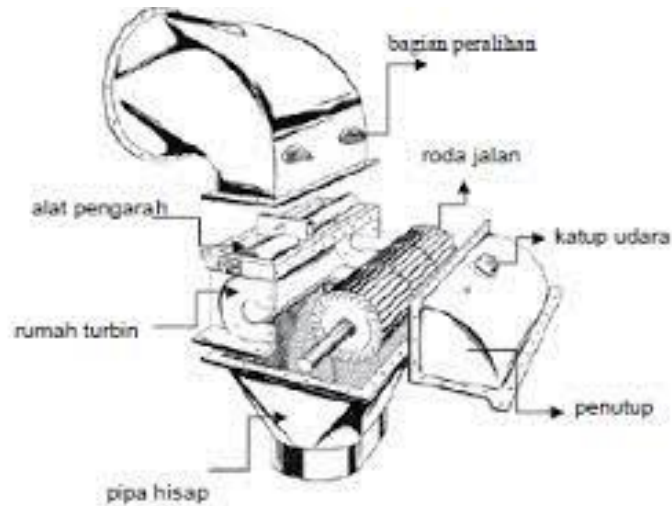
$$\text{Energi} = P_{net} \times 8760 \times \text{faktor kapasitas}$$

### a) Turbin yang digunakan

PLTMH menggunakan turbin jenis Crossflow seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4, turbin tipe ini pertama kali dibuat di Eropa. Crossflow memiliki makna air yang melintasi



kedua sudu gerak (rotasi). Turbin ini dilengkapi juga dengan pipa hisap sehingga proses kerja dan randemen turbin menjadi lebih baik. Bagian utama turbin ini terbagi menjadi 3 bagian yaitu roda jalan, alat pengarah, dan rumah turbin. Dalam turbin ini tenaga air yang bisa digunakan kurang lebih 750 kW, tinggi air jatuh diatas 1 meter sampai 200 meter, dan kapasitas antara  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  sampai  $7 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 5.4. turbin crossflow

(Sumber : <https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo/article/download/12/11>)

Gambar diatas merupakan komponen-komponen utama konstruksi turbin crossflow :

- Rumah turbin
- Alat pengarah
- Roda jalan
- Penutup
- Katup udara
- Pipa hisap
- Bagian peralihan

#### 4) Perencanaan Pipa Pesat

Pipa saluran yang memiliki fungsi untuk mengalirkan air ke turbin. Untuk mencari diameter pipa digunakan persamaan berikut setelah mengetahui luas penampang keluaran air :

$$A = \pi/4 \cdot d^2$$

Maka :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

dimana :

d : Diameter pipa (m)

A : Luas Penampang ( $\text{m}^2$ )

### 5) Perencanaan Runner Turbin

Perhitungan parameter turbin menggunakan persamaan-persamaan berikut ini :

- a) Diameter luar (D) dan lebar sudu (L)

$$LD = \frac{2,62 Q}{\sqrt{H}}$$

- b) Diameter dalam runner turbin (D1)

$$D1 = \frac{2}{3} D$$

- c) Jarak antar sudu (K)

$$K = 0,174 D$$

- d) Ketebalan semburan nozzle (M)

$$M = 0,22 \frac{Q}{L \sqrt{H}}$$

- e) Jari-jari kelengkapan sudu (r1)

$$R1 = 0,163$$

- f) Jumlah sudu (N)

$$N = \frac{\pi \cdot D}{k}$$

Daya air yang digunakan (Pair)

$$Pair = p \cdot g \cdot H \cdot Q$$

Daya yang dihasilkan turbin (Pt)

$$Pt = T \cdot \omega$$

Dengan,

$$T = F \cdot D/2$$

Atau

$$T = F \cdot r$$

Dan,

$$\omega = 2 \pi n/60$$

Efisiensi mekanik turbin

$$Pturbin = Pair \cdot \eta_t$$

Maka,

$$\eta_t = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{air}}}$$

Kecepatan keliling turbin

$$v = \frac{v \cdot \pi \cdot n}{60}$$

Daya yang dihasilkan generator ( $P_g$ )

$$P_g = V \cdot I$$

Efisiensi Transmisi

$$P_g = P_l \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{trans}}$$

Maka,

$$\eta_{\text{trans}} = \frac{P_g}{\eta_g \cdot P_l}$$

### 5.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air Berskala Besar

Ketika air hujan jatuh di atas permukaan bumi yang dimilikinya energi potensial relatif terhadap lautan ke mana ia mengalir. Ini energi dapat diubah menjadi kerja poros di mana air turun melalui jarak vertikal yang cukup besar. Situs semacam itu mengembangkan kekuatan,

$$H.P = \frac{P.Q.h}{75} \times \eta$$

P : Berat jenis air, kg/m<sup>3</sup> (=1000)

Q : Laju aliran air, m<sup>3</sup>/detik.

h : Tinggi jatuh atau kepala, m.

$\eta$  : Efisiensi konversi energi potensial menjadi energi kinetik.

Ada beberapa aplikasi utama pembangkit hidro:

1. Pembangkitan tenaga listrik.
2. Penyimpanan air irigasi.
3. Pengendalian banjir di sungai.
4. Penyimpanan persediaan air minum.

Energi air yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga air dapat menjadi kinetik atau potensial. Energi kinetik air adalah energinya dalam gerak dan merupakan fungsi dari massa dan kecepatan, sedangkan potensial energi adalah fungsi dari perbedaan ketinggian air antara dua titik, yang disebut kepala. Dalam kedua kasus, ketersediaan berkelanjutan dari air merupakan kebutuhan pokok. Untuk tujuan ini air dikumpulkan secara alami danau dan waduk di dataran tinggi dapat dimanfaatkan atau air dapat disimpan secara artifisial dengan membangun bendungan di sepanjang aliran sungai.

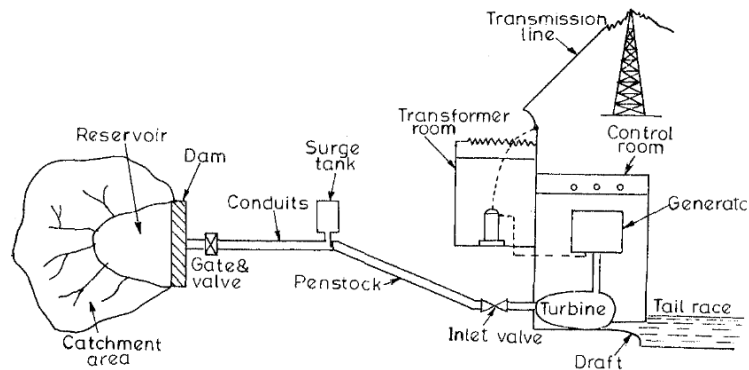
Situs yang ideal adalah situs di mana sistem danau alami yang baik, dengan daerah tangkapan air yang substansial, berada di ketinggian yang tinggi. Curah hujan adalah sumber utama air dan tergantung pada faktor-faktor seperti suhu, kelembaban, kekeruhan, arah dan kecepatan angin, dll. Kegunaan dari

hujan faU untuk pembangkit listrik lebih lanjut tergantung pada beberapa kompleks faktor yang meliputi, intensitas dan distribusi waktu, topografi, tanah dan karakteristik drainasenya, dll.

Dari berbagai sumber energi primer adalah digunakan untuk pembangkit tenaga listrik untuk penyediaan utilitas umum, hidro tenaga listrik merupakan satu-satunya sumber energi terbarukan. Listrik tenaga air listrik lebih murah dibandingkan dengan pabrik pembakaran bahan bakar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5. Biaya pembangkitan per kWh untuk stasiun hidro dan stasiun termal berada di rasio 1 : 3 yaitu, jika biaya pembangkitan untuk pembangkit listrik tenaga air katakanlah untuk pabrik adalah 20 paise per kWh, untuk termal seharusnya sekitar 60 paise per kWh. Di pembangkit listrik tenaga air, biaya pembangkitan menjadi gratis dari elemen bahan bakar.

### 5.3.1 Bagian Sistem PLTA Berskala Besar

Berikut adalah bagian – bagian sistem pembangkit listrik tenaga air berskala besar :



Gambar 5.5. hidro elektrik plant

(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

#### 1) Daerah tangkapan air dan tempat penampungan air.

Daerah di belakang bendungan, yang menampung air hujan, mengalir ke sungai atau sungai, adalah disebut daerah tangkapan air. Air yang dikumpulkan dari daerah tangkapan air disimpan di waduk, di belakang bendungan. Tujuan dari waduk adalah untuk menyimpan air selama musim hujan dan memasoknya selama musim kemarau. Permukaan air di reservoir penyimpanan dikenal sebagai head race level atau hanya balapan kepala. Reservoir dapat berupa alami atau buatan. Sebuah Waduk alami adalah danau di pegunungan tinggi dan waduk buatan dilakukan dengan membangun bendungan di seberang sungai. Air tertahan di hulu reservoir disebut tampungan.

#### 2) Bendungan dan Intake.

Bendungan adalah struktur pasangan bata urugan tanah dan/atau batuan yang dibangun di seberang sungai. Ini memiliki dua fungsi:

- untuk menyediakan kepala air,
- untuk membuat penyimpanan atau kolam,

Banyak kali bendungan tinggi dibangun hanya untuk memenuhi kebutuhan menuju pembangkit listrik. Bendungan beton dan pasangan bata cukup populer dan dibuat sebagai:

- bendungan gravitasi padat
- bendungan penopang
- bendungan melengkung

Topografi situs dan pertimbangan pondasi terutama mengatur jenis bendungan yang akan dipilih. Kedalaman yang sempit ngarai paling baik dijembatani dengan bendungan beton atau batu, sedangkan bendungan bumi paling cocok untuk lembah yang luas. Persyaratan dasar bendungan

adalah ekonomi dan keamanan. Pondasi bendungan harus menyediakan stabilitas bendungan di bawah kekuatan yang berbeda dan mendukung beratnya. Itu pondasi harus cukup kedap untuk mencegah rembesan air di bawah bendungan.

3) Saluran air masuk.

Saluran air masuk adalah Lorong dimana air dialirkan dari bendungan ke pembangkit listrik. Ini termasuk kanal, penstock (pipa tertutup) atau terowongan, flume, foreway dan juga tangki lonjakan. Terowongan dibuat dengan memotong pegunungan tempat kanal atau pipa jalur tidak dapat digunakan karena topografi. Tunneling memberikan langsung dan rute pendek untuk saluran air. Penstock. Air dapat disalurkan ke turbin melalui saluran terbuka saluran atau pipa bertekanan tertutup yang disebut penstock terbuat dari tulangan beton atau baja. Diinginkan bahwa penstock harus miring menuju pembangkit tenaga listrik dan nilainya disesuaikan sesuai dengan topografi. Penstock biasanya tidak tertutup dan ditempatkan sebagai terbuka pipa, yang memudahkan perawatan dan perbaikan.

4) Tangki Gelombang.

Ini adalah ruang penyimpanan tambahan di dekat unit daya, biasanya disediakan di pembangkit kepala tinggi atau kepala sedang ketika ada jarak yang cukup jauh antara sumber air dan unit daya, membutuhkan penstock yang panjang. Tangki lonjakan dilengkapi; ruang untuk menahan air selama penolakan beban oleh turbin dan untuk menyediakan air tambahan ketika beban pada turbin meningkat. Ada peningkatan tekanan yang tiba-tiba di penstock karena tiba-tiba penurunan laju aliran air ke turbin ketika beban on generator berkurang, maka karena tindakan gubernur, gerbang pemasukan air ke turbin tiba-tiba tertutup, hal ini menyebabkan kenaikan tekanan tiba-tiba di penstock di atas normal karena berkurang beban pada generator, yang dikenal sebagai palu air. tangki lonjakan mengurangi tekanan palu air ketika penstock dalam kondisi perubahan mendadak dalam kondisi aliran air. Jadi, tangki lonjakan berfungsi untuk mengatur aliran air melalui sistem angkut, untuk meredakan tekanan palu air, dan untuk meningkatkan kinerja mesin dengan memberikan pengaturan kecepatan yang lebih baik.

5) Forebay

Air yang dibawa oleh saluran listrik didistribusikan ke berbagai penstock yang mengarah ke turbin, melalui forebay juga dikenal sebagai kolam kepala. Air disimpan sementara di forebay, jika terjadi penolakan beban oleh turbin dan terjadi adalah penarikan dari itu ketika beban meningkat. Dengan demikian, forebay juga bertindak sebagai semacam reservoir pengatur. Ini dapat dianggap sebagai tangki lonjakan yang disediakan secara alami seperti halnya pekerjaan tangga lonjakan. Kolam kepala atau forebay dibuat di ujung saluran listrik dengan melebarkannya ke dalam bentuk baskom kecil, yang dapat menyimpan beberapa air untuk kebutuhan turbin yang menyedihkan.

6) Spillways.

Struktur ini menyediakan pembuangan surplus air dari reservoir penyimpanan ke sungai di hilir sisi bendungan. Ini termasuk gerbang dan roda gigi kontrol. Spillway adalah dianggap sebagai perangkat keamanan untuk bendungan, yang bertindak sebagai katup yang aman, yang memiliki kapasitas untuk mengalirkan banjir besar tanpa merusak bendungan. Itu membuat level reservoir di bawah yang telah ditentukan tingkat maksimum

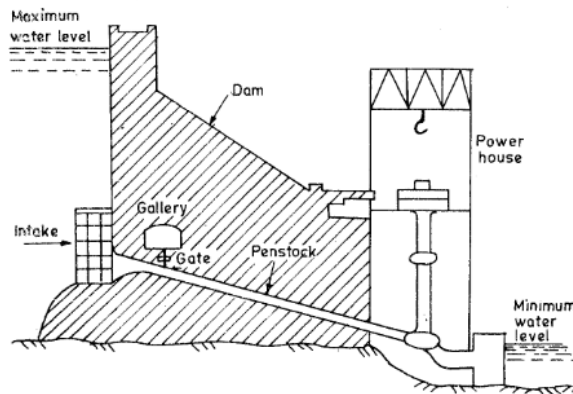
7) Power House dan Peralatannya.

Pembangkit listrik adalah bangunan di mana turbin, alternator dan pembangkit tambahan ditempatkan. Berikut konversi energi air menjadi energi listrik terjadi. Pembangkit listrik terdiri dari dua bagian utama, substruktur untuk mendukung peralatan hidrolik dan listrik dan struktur super untuk menyimpan dan melindungi peralatan ini. Superstruktur sebagian besar adalah sebuah bangunan, perumahan peralatan operasi. Pembangkit unit dan exciters biasanya terletak di lantai dasar. Turbin ditempatkan tepat di bawah permukaan lantai jika mereka berputar pada sumbu vertikal. Turbin yang berputar pada sumbu horizontal ini ditempatkan pada lantai dasar di sepanjang sisi generator.

8) Tail Race dan Outlet Water Way.

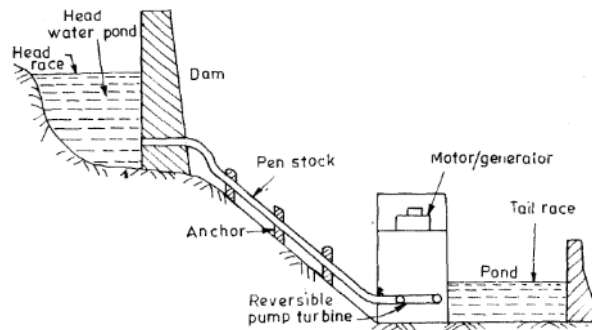
Tail Race adalah sebuah Lorong untuk membuang air yang meninggalkan turbin ke sungai dan kasus tertentu, air dari balapan ekor dapat dipompa kembali ke waduk aslinya. Air setelah melakukan pekerjaan pada runner turbin melewati draft tube ke tail race. Air tertahan di ekor balapan disebut sebagai level air balapan ekor. Draft tube sangat penting bagian dari instalasi turbin reaksi. Ini adalah bagian yang berbeda dari titik runner exit sampai ke tail race.

Pada Gambar 5.6 menunjukkan bendungan lembah, merupakan fitur yang dominan, menciptakan waduk. Power house terletak di kaki bendungan. Tidak pengalihan air dari sungai terlibat. Penyimpanan reservoir mengembangkan kepala yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Air mengalir melalui penstock yang tertanam di bendungan ke pembangkit listrik dan bergabung dengan aliran sungai utama langsung di stopkontak listrik rumah.



Gambar 5.6. Bendungan lembah  
(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

Gambar 5.7 menjelaskan tentang Pumped-storage hydroelectricity (PSH), adalah jenis penyimpanan energi hidroelektrik. Ini adalah konfigurasi dua reservoir air pada ketinggian yang berbeda yang dapat menghasilkan tenaga saat air bergerak turun dari satu ke yang lain (debit), melewati turbin. Sistem ini juga membutuhkan daya karena memompa air kembali ke reservoir atas (pengisian ulang). PSH bertindak mirip dengan baterai raksasa, karena dapat menyimpan daya dan kemudian melepaskannya saat dibutuhkan. Keistimewaan dari ini pembangkit listrik terletak pada kenyataan bahwa ketika pembangkit tersebut tidak memproduksi listrik, mereka dapat digunakan sebagai stasiun pompa yang memompa air dari tail race ke reservoir tingkat tinggi.

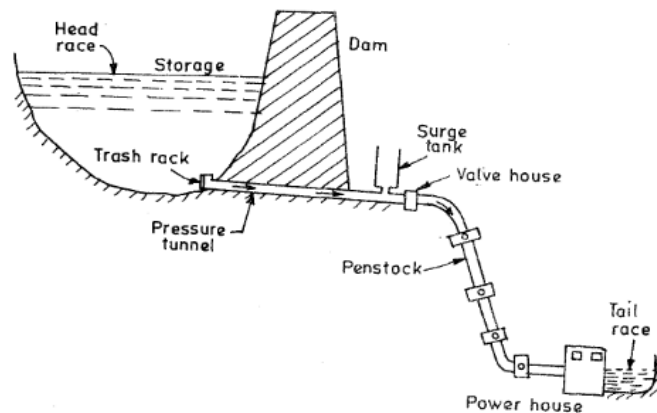


Gambar 5.7. Pembangkit Listrik Tenaga Air Penyimpanan yang Dipompa  
(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

High Head Plants. Di rancangan high head air adalah disimpan pada ketinggian tinggi karena hujan dll dan biasanya dapat bertahan sepanjang tahun.. Bagian utama dari pembangkit tersebut adalah :

- a) bendungan,
- b) intake atau head bekerja,
- c) terowongan tekanan,
- d) tangki lonjakan,
- e) pen stock,
- f) pembangkit listrik dan
- g) jalan belakang.

Di salah satu ujung reservoir pada Gambar 5.8 disediakan outlet untuk mengalirkan air ke forebays atau tangki gelombang dan dari sana ke turbin melalui penstock. Trashracks dipasang di saluran masuk terowongan tekanan untuk mencegah benda asing masuk ke terowongan. Sejak terowongan membawa total kepala sesuai dengan tingkat reservoir yang sebenarnya, pilihan terowongan tekanan harus diberikan dengan sangat hati-hati pertimbangan. Terowongan tekanan dapat diganti dengan kanal



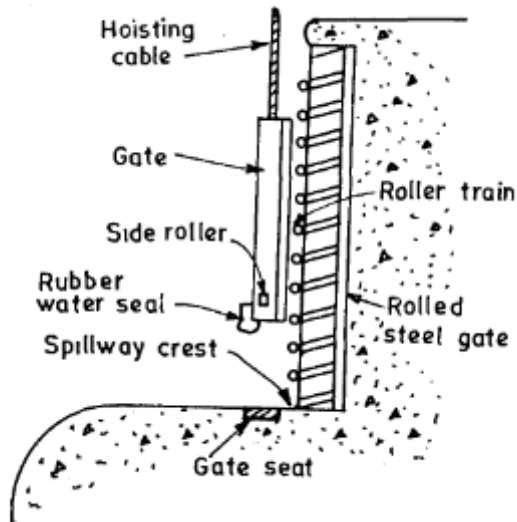
Gambar 5.8. Reservoir  
(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

Gerbang (Sistem Masuk) Dan Katup Air dibiarkan mengalir ke penstock, kanal atau langsung ke turbin melalui sistem intake. Kontrol ketinggian air hulu dan pembuangan melalui bendungan dapat dilakukan dalam tiga prinsip:

- a) Kontrol puncak
- b) Gerbang puncak
- c) Pintu air dan katup.

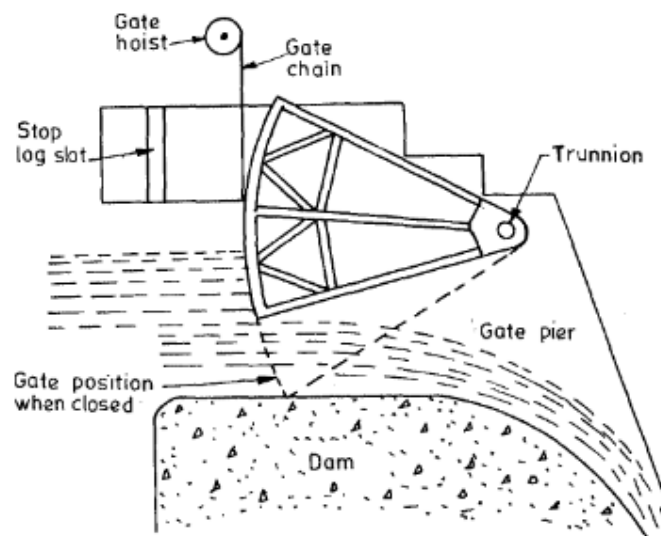
Pilihan jenis yang dipilih tergantung pada tingkat kontrol air yang diinginkan. Kontrol puncak adalah cara paling sederhana untuk membatasi ketinggian air dan dapat dipengaruhi oleh papan flash, jarum kayu, stoplogs atau gerbang miring atau gendang, tetapi perangkat ini dapat beradaptasi di kasus bendungan kecil saja. Penggunaan papan *flash* terbatas pada ketinggian hingga sekitar 3 meter. Papan flash adalah papan kayu ditempatkan di seri di puncak bendungan untuk menaikkan tingkat kolam. Gerbang dapat dibuat dari kayu, baja, besi tuang atau baja struktural dan bahan lain, tergantung pada kepala dan kapasitas debit dari unit hidro.

- a) Gerbang angkat vertikal (gerbang datar atau geser) seperti pada Gambar 5.9 menjelaskan tentang bendungan kecil. Salah satu jenisnya adalah gerbang berbatu Gerbang diangkat dengan cara mengangkat kabel.



Gambar 5.9. gerbang angkat vertikal  
(Sumber : hydro electric power plant (pdfdrive.com))

- b) Gerbang radial. yang ditunjukkan pada Gambar 5.10 menjelaskan tentang gerbang puncak untuk pelimpah tetapi juga dapat digunakan sebagai gerbang masuk. Sebuah baja pekerjaan bingkai mendukung wajah pekerjaan bingkai, wajah menjadi segmen silinder sehingga diberi nama sebagai pengkhianat atau gerbang sektor. Gerbang ini dioperasikan dari kerekan yang dipasang di jembatan melalui air eksternal. POWBr manual dapat digunakan untuk gerbang kecil saat daya listrik digunakan untuk yang lebih besar. Ketika gerbang datar datar adalah didukung pada roda bantalan rol yang menyelaraskan diri mereka disebut gerbang beroda.

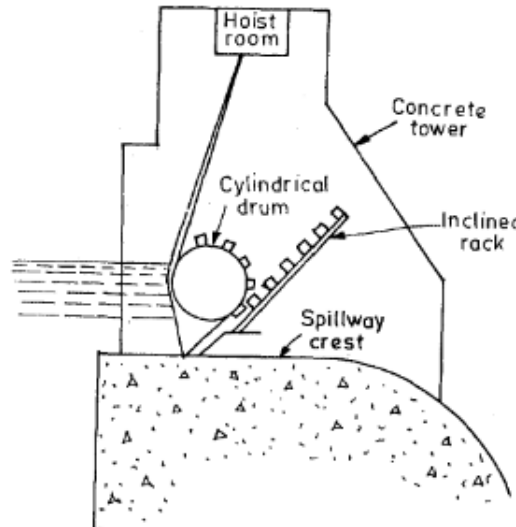


Gambar 5.10. Gerang radial  
(Sumber : hydro electric power plant (pdfdrive.com))



c) Get Roll

Gerbang berguling di rak ketika gaya diterapkan dengan cara mengangkat kabel seperti pada Gambar 5.11. Operasi dari gerbang dicapai dengan menggulung balok silinder pada bidang miring trek melskipun roda bergigi terpasang di ujungnya.



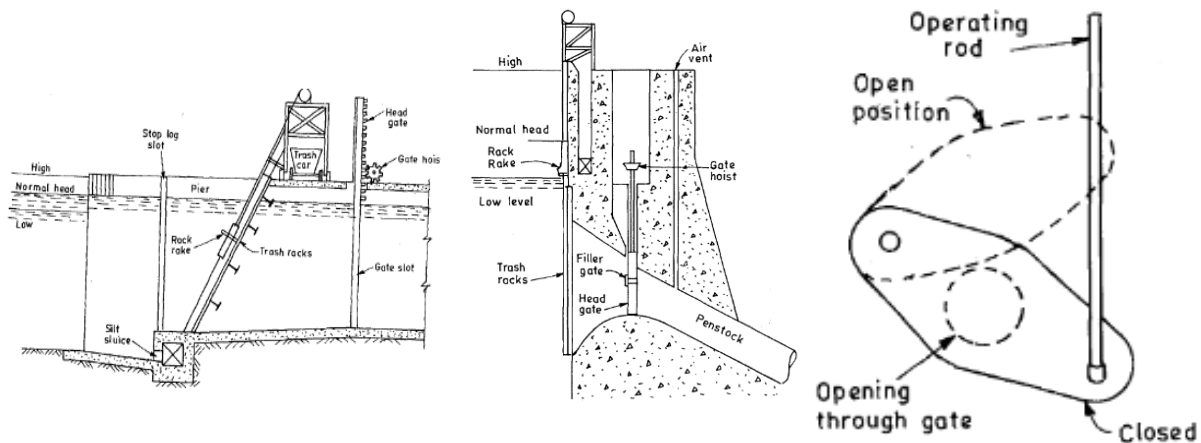
Gambar 5.11. Gerbang get roll

(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

## 5.4 Prinsip Kerja

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.12 adalah struktur di intake terowongan saluran, dan flume. Mereka memiliki boom, tempat sampah, pintu air untuk puing-puing yang lewat, dan gerbang atau katup untuk mengontrol aliran air. Boom mengalihkan es dan floating log dari intake. Mereka terdiri dari batang kayu yang diikat ujung ke ujung dan membentuk rantai terapung yang mengarahkan materi terapung ke pengalihan dengan melewati parasut. *Trashracks* memindahkan puing-puing yang mengambang atau terendam langsung di pintu masuk asupan. Mereka ditempatkan di seluruh struktur asupan untuk mencegah materi mengambang melewati penstock. Itu rak berbentuk layar palang sejajar yang dilas untuk menyilang anggota dan didukung oleh balok. Jarak bar bervariasi dari 1.5 sampai 15 em atau lebih. Jarak yang lebih kecil memberikan keamanan yang lebih besar terhadap puing-puing, tetapi menyebabkan kehilangan kepala air yang lebih besar. Gerbang mengontrol tarif aliran air yang masuk menunjukkan asupan kepala rendah yang khas. Tekanan tinggi atau headworks kepala tinggi lainnya menggunakan silinder gerbang, atau putar, bulat, kupu-kupu, atau katup jarum untuk kontrol aliran air.

Gerbang ini digunakan tidak hanya di kantor pusat tetapi juga di penstock dan di saluran masuk turbin. Mereka juga mengontrol debit melalui pintu air dan saluran untuk aliran banjir melewati saluran. Sebuah headrace mengarahkan air dari headwork ke turbin tailrace mengarahkan air dari outlet turbin ke sisi hilir tanaman. Ini mungkin flume tipe terbuka atau kanal atau terowongan tipe tertutup, jalur pipa, dan penstock. Banyak tanaman menggunakan kombinasi penstock cara air ini menangani air tinggi dan dapat dibuat dari beton bertulang, tongkat kayu, atau pelat baja. Mereka mungkin dikubur atau di atasnya tanah. Penstock memiliki aksesoris seperti tangki ventilasi ventilasi udara, dan peraturan tekanan untuk melindungi penstock dari serangan mendadak perubahan tekanan yang mungkin meledak atau meruntuhkannya secara tiba-tiba perubahan beban dan aliran.



Gambar 5.12. Urutan prinsip kerja  
(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

#### 5.4.1 Output Listrik Dari Pembangkit Listrik Tenaga Air

Dalam nomenklatur pembangkit listrik tenaga air, aliran volumetrik air disebut sebagai “aliran”, dan satuannya dalam SI adalah  $m^3/s$ . Demikian pula, ketinggian vertikal disebut sebagai "kepala", dan satuan SI adalah m. Itu hubungan antara keluaran daya, aliran, dan tinggi, yang disebut sebagai "persamaan daya," adalah dihitung sebagai berikut:

Energi potensial benda bermassa M, yang jatuh dari ketinggian tertentu h dinyatakan sebagai:

$$E = M g h \text{ (joule)}$$

dimana g adalah percepatan gravitasi. Di permukaan laut, nilai g adalah 9,81 m/s

Perhatikan bahwa, meskipun nilai g menurun di atas permukaan laut, karena variasinya relatif kecil, untuk tujuan praktis pose, nilai 9,81 m/s umumnya digunakan terlepas dari ketinggian pembangkit listrik. Juga, ingat bahwa dalam fisika satuan dasar energi adalah Joule.

Massa air adalah massa jenisnya ( $\rho$ ) kali volumenya (V), atau  $M = \rho V$ .

Jadi  $E = (\rho V) g h$  (Joule).

Sekarang bagi kedua sisi persamaan dengan waktu (t):

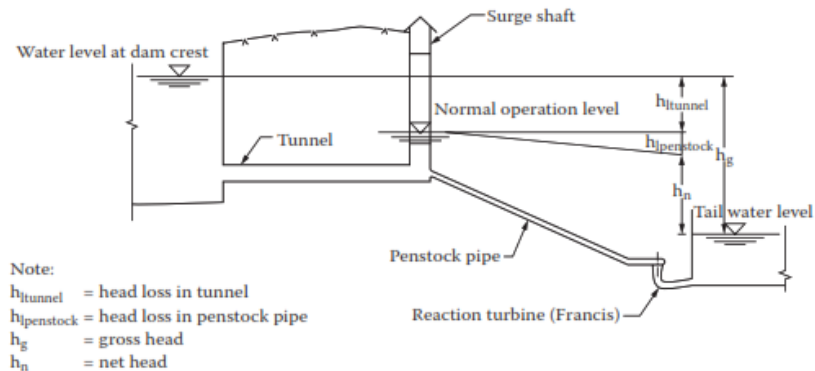
$$\frac{E}{t} = \left(\frac{\rho V}{t}\right) g h \text{ (watt)}$$

Perhatikan bahwa energi dibagi waktu (E/t) adalah daya, P, dalam watt (W), dan volume terhadap waktu (V/t) adalah aliran volumetrik air (Q) atau aliran dalam  $m^3/s$ .

Jadi, menggantikan E/t dengan P dan V/t dengan Q, persamaan daya menjadi :

$$P = \rho Q g h$$

Perhatikan bahwa  $g = 9,8 \text{ kN/m}^3$ , yang merupakan berat satuan air. Menurut prinsip termodinamika, ketika energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lain, akan ada beberapa kerugian berdasarkan efisiensi proses konversi atau peralatan. Pembangkit listrik tenaga air dihasilkan ketika potensi energi air jatuh pertama diubah menjadi energi mekanik saat memutar turbin. Turbin poros pada gilirannya menggerakkan poros generator, dan generator yang berputar mengubah energi mekanik menjadi energi listrik seperti pada Gambar 5.13



Gambar 5.13. Plant turbin poros  
 (Sumber : hydro electric power plant (pdfdrive.com))

karena head hilang di terowongan, tingkat operasi normal di poros surja akan lebih rendah dari pada tingkat puncak bendungan. Ini disebut sebagai kerugian kepala dalam terowongan (tunnel). Kemudian, saat aliran dialirkan melalui pipa penstock ke turbin, akan terjadi kerugian head lebih lanjut (yaitu, kerugian head di penstock). Dalam hal ini, kepala kotor akan menjadi perbedaan pada elevasi antara muka air pada tingkat puncak bendungan dan muka air ekor. Head bersih akan menjadi head kotor dikurangi kerugian di terowongan dan penstock.

### 1) Hidrolic Turbin

Turbin hidrolik mengubah energi dalam air yang jatuh dan bergerak, energi potensial dan kinetiknya, menjadi tenaga mekanik rotasi seperti pada Gambar 5.14.. Dalam contoh sistem tenaga air yang disederhanakan, seperti yang digambarkan dalam, tangki depan menyediakan air ke pipa penstock miring, yang membawanya ke nosel di mana ia keluar sebagai jet. Nosel mengubah energi potensial kolom air dalam pipa penstock menjadi energi kinetik yang dibawa oleh pancaran kecepatan tinggi. Energi ini ditransfer ke runner turbin ketika semburan air mengenai embusnya dan kehilangan energi kinetiknya dalam proses tersebut. Persamaan Bernoulli, yang diturunkan dari kekekalan energi, menyatakan bahwa, untuk fluida tak-kental dan tak termampatkan dalam aliran tunak, jumlah tekanan dan energi potensial dan kinetik per satuan volume adalah konstan di setiap titik dalam sistem. Persamaan Bernoulli adalah bentuk khusus dari persamaan Euler yang diturunkan sepanjang garis aliran fluida dan dapat dinyatakan, seperti yang ditunjukkan di bawah ini, dengan tiga suku:

$$\text{Energi tekanan} + \text{Energi kinetik} + \text{Energi potensial} = \text{Konstanta}$$

Setelah kerugian gesekan dalam pipa penstock, hloss, ditambahkan, persamaan Bernoulli antara permukaan depan, berlabel “0” dan saluran masuk ke nosel, berlabel “1,” dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_{loss}$$

$p_0$  : 0 pada tekanan atmosfer (tinggi tekanan pada permukaan tangki depan).

$p_1$  : kepala tekanan di saluran masuk nosel.

$v_0$  : 0 karena air di sana hampir diam (kecepatan air di tangki depan).

$v_1$  : kecepatan air dalam pipa penstock tepat sebelum nozzle.

$z_0$  : ketinggian ke permukaan air di bagian depan.

$z_1$  : ketinggian garis tengah nosel.

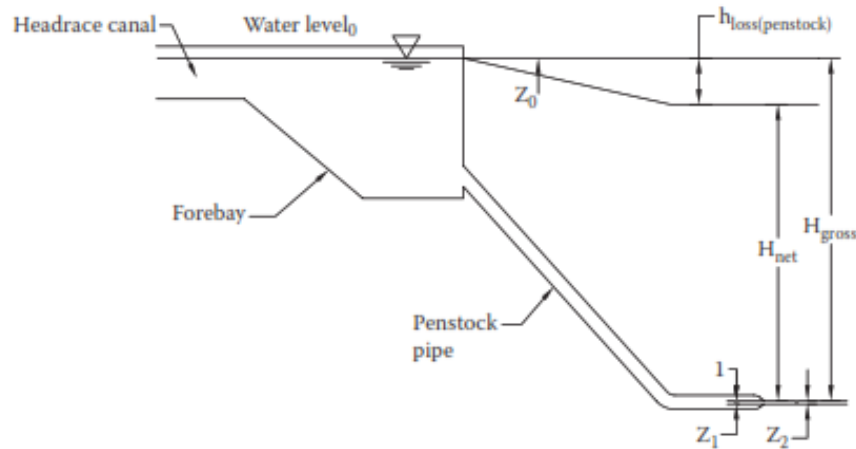
$z_0 - z_1$  kepala kotor,  $H_{gross}$ , tersedia.

$g$  : percepatan gravitasi.

$h_{loss}$  : rugi-rugi gesekan pada pipa penstock.

$H_{gross} - h_{loss} = H_{net}$  : head bersih yang tersedia untuk turbin setelah dikurangi rugi-rugi di penstock pipa.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = H_{gross} - h_{loss} = H_{net}$$



Gambar 5.14. Perhitungan hidrolic turbin  
(Sumber : hydro elektrik power plant (pdfdrive.com))

## 2) Turbin Power Output

Jika turbin impuls 100% efisien dalam mengubah energi kinetik air menjadi mekanik energi, itu energi ditransfer ke itu turbin akan menjadi

$$E = 0.5 mv^2$$

Daya, P, tersedia untuk turbin adalah tingkat di mana energi ditransfer ke runner

$$P = \frac{dE}{dt} = 0,5 \left( v^2 \frac{dm}{dt} + m \frac{dv^2}{dt} \right)$$

$v^2$  sama dengan  $2 \cdot g \cdot H_{net}$  dari Persamaan 9.3 dan dengan demikian merupakan konstanta, menghasilkan  $dv/dt = 0$ .

Jadi suku kedua dapat dihilangkan dari persamaan. Istilah pertama,  $dm/dt$ , adalah laju perubahan massa dan sama dengan  $Q$  di mana adalah kerapatan air dinyatakan dalam  $kg/m^3$  dan  $Q$  adalah laju aliran air dalam  $m^3/s$ . Karena itu,

$$P = 0,5 \rho Q (2gH_{net})$$

## 5.5 Keuntungan PLTA

Berikut keuntungan dari penerapan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) :

- 1) Pembangkit listrik tenaga air memiliki umur yang lebih panjang. yang ditetapkan kehidupan pembangkit listrik tenaga air bahkan sesuai dengan undang-undang (pasokan) listrik adalah 35 tahun sedangkan pembangkit termal adalah 25 tahun. Dari segi biaya, ini menyiratkan alokasi depresiasi yang lebih rendah per tahun.
- 2) Masa pemeliharaan dan kebutuhan lebih sedikit dibandingkan dengan pabrik pembakaran bahan bakar. Ini memberikan jalan bagi perekonomian dalam dua cara lebih sedikit pengeluaran untuk pemeliharaan dan kebutuhan kedua yang lebih rendah kapasitas cadangan, yang menawarkan penghematan biaya investasi. Itu konsumsi energi untuk alat bantu hanya satu persen dibandingkan hingga 9 persen atau lebih untuk pembangkit listrik termal.
- 3) Sejumlah besar keuntungan operasional ditawarkan oleh pembangkit listrik tenaga air:
  - unit pembangkit tenaga air dapat dimulai dan berhenti sangat cepat, sesuai kasus hamper seketika.
  - kemampuan untuk memvariasikan, outputnya jauh lebih tinggi dan lebih cepat pemadaman tak terduga lebih jarang terjadi.
  - karakteristik listrik pembangkit listrik lebih banyak menguntungkan dari sudut pandang kekuatan pinjaman untuk sistem tenaga.
  - Ada tingkat fleksibilitas yang tersedia di memberikan karakteristik yang dibutuhkan juga.
- 4) Menjadi sumber biaya pembangkitan yang lebih rendah, ini memberikan kontribusi untuk posisi keuangan yang lebih baik untuk sistem dan ini sudah mapan oleh data aktual untuk sistem di negara ini. Keuntungan ekonomi skema hidro meningkat dengan berlalunya waktu dan konsekuen eskalasi biaya bahan bakar.
- 5) Ini juga menawarkan keuntungan dalam total biaya investasi: pembangkitan melalui diferensial dalam hal persyaratan cadangan, kebutuhan daya tambahan, umur pabrik yang lebih lama, dll.
- 6) Pembangkit listrik tenaga air memberikan keuntungan yang terkenal dalam sehubungan dengan memenuhi fluktuasi beban (atau dalam pembangkitan) lebih banyak secara ekonomis dan lebih efisien.
- 7) Hasilnya, ini membantu dalam meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem dan mengarah pada kinerja dan ekonomi yang lebih baik dari pabrik pembakaran bahan bakar. Sebuah ilustrasi yang sangat jelas tentang hal ini disediakan oleh praktik penggunaan pabrik penyimpanan yang dipompa di seluruh dunia.
- 8) Pembangkit listrik tenaga air menghilangkan kebutuhan bahan bakar produksi dan transportasi ke tingkat yang sesuai. Ini adalah akan menjadi faktor yang sangat penting dalam waktu dekat di negara ini, karena keterbatasan teknis, praktis dan keuangan dalam menambah fasilitas pertambangan dan transportasi untuk batubara.

Karena alasan ini pembangkit listrik tenaga air menyediakan faktor penting untuk pengoperasian sistem yang lebih stabil dan andal secara keseluruhan dengan membentuk sumber pasokan yang stabil itu sendiri, dengan mengambil fluktuasi semua jenis, baik yang timbul dari beban sistem atau dari pemadaman paksa unit. Stabilisasi ini sendiri merupakan faktor ekonomi antara lain hal-hal lain yang memungkinkan pabrik pembakaran bahan bakar beroperasi dengan cara terbaik yang mungkin diperlukan untuk mereka.

Diketahui bahwa pembangkit listrik tenaga air adalah lebih cocok untuk tugas peaking dan juga lebih ekonomis-peaking harus diperlakukan dalam konteks India sebagai menyiratkan mengambil variasi pembangkitan beban yang mungkin terjadi melalui berbagai penyebab dan bukan hanya menutupi bagian atas kurva beban. Ada beberapa alasan lagi, murni praktis, yang lebih hidro harus dilaksanakan. Ini berhubungan dengan langit-langit kemungkinan transportasi dan penambangan batubara, bahkan jika faktor biaya ini harus ditinggalkan dari pertimbangan. Perlu dicatat bahwa setiap 1000 GWh daya yang dikirim dari pembangkit listrik membutuhkan hampir 0,7 juta ton batubara.

Karena ketersediaan air tergantung pada fenomena alam hujan, kapasitas maksimum tanaman tersebut biasanya ditetapkan pada berdasarkan jumlah minimum air yang tersedia. Untuk menyimpan air, biasanya stroage reservoir dibangun, sehingga air dapat disimpan selama periode puncak, yang dapat digunakan selama di luar periode puncak. Pekerjaan teknik sipil juga cukup besar untuk berjaga-jaga dari pembangkit listrik tenaga air. Ada dua alasan untuk ekstensif pengembangan jenis tanaman ini. Salah satunya adalah, itu, semakin banyak tenaga listrik diperlukan untuk industri, komersial dan domestic tujuan. Yang lainnya adalah biaya batu bara yang tinggi dan menipisnya (limited) cadangan.

## 5.6 Penyimpanan PLTA

Dalam proyek hidro jenis penyimpanan yang berisi jumlah besar air yang dikumpulkan selama periode hujan lebat, disuplai selama musim kemarau periode tahun. Mayoritas pembangkit listrik hidrolik di dunia adalah jenis ini. Pembangkit listrik tenaga air saat ini dapat digunakan sebagai unit catu daya independen, tetapi ini membutuhkan penyimpanan air dalam jumlah besar. Pada saat aliran air rendah, tanaman akan memasok beban dasar saja, sebagai kapasitas maksimum stasiun didasarkan pada aliran minimum air, dan karenanya menjadi tidak ekonomis. Oleh karena itu, tren saat ini adalah menggunakan pembangkit listrik tenaga air pembangkit listrik dengan pembangkit uap sebagai interkoneksi sistem. Ini dapat mengurangi biaya modal pembangkit listrik tenaga air sebagai ukuran dari waduk berkurang dalam hal ini. Dengan demikian dalam saling berhubungan sistem, selama aliran air rendah, pembangkit listrik dapat digunakan sebagai pembangkit beban puncak dan beban dasar harus dipasok oleh tenaga uap tanaman. Selama periode aliran air tinggi, pembangkit uap akan memasok beban puncak dan tenaga air akan mengambil beban dasar.

### Soal

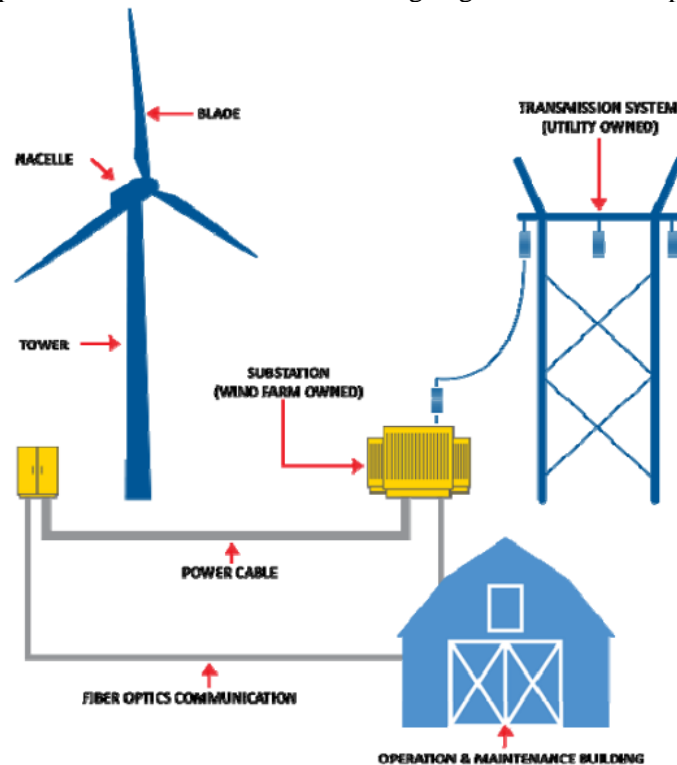
- 1) Jelaskan komponen apa saja yang digunakan dalam system pembangkit listrik tenaga air berskala kecil (mikrohidro)?
- 2) Jelaskan komponen apa saja yang digunakan dalam system pembangkit listrik tenaga air berskala besar?
- 3) Apa keuntungan menggunakan pembangkit listrik tenaga air dibandingkan pembangkit listrik yang lain?
- 4) Bagaimana cara kerja pembangkit listrik tenaga air berskala kecil?
- 5) Sebutkan system pembangkit listrik tenaga air yang telah diterapkan di kotamu dan tergolong ke system pembangkit listrik tenaga air berskala apa?

# BAB VI

## PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

### 6.1 Pendahuluan

Tenaga angin adalah solusi energi terbarukan yang hemat biaya untuk pembangkit listrik. Tenaga angin dapat secara dramatis mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan daya yang dihasilkan dari bahan bakar fosil (batu bara, minyak, dan gas alam). Produksi listrik merupakan salah satu sumber emisi karbondioksida (CO<sub>2</sub>) terbesar di Amerika Serikat. Dengan demikian, adopsi teknologi pembangkit tenaga angin telah menjadi cara utama bagi Amerika Serikat untuk mendiversifikasi portofolio energinya dan mencapai tujuan yang dinyatakan untuk mengurangi 80% emisi gas rumah kaca (GRK) pada tahun 2050. Manfaat pembangkit listrik tenaga angin termasuk tidak ada risiko bahan bakar, tidak ada emisi karbon dioksida atau polusi udara, tidak ada produksi limbah berbahaya, dan tidak perlu penambangan, pengeboran atau transportasi bahan bakar. Struktur ladang angin diilustrasikan pada gambar 6.1.



Gambar 6.1. Infrastruktur Ladang Angin.  
(Sumber : Ayee *et al.*, 2009))

Selain aplikasi skala yang lebih besar ini, ada sejumlah aplikasi lain untuk turbin angin, seperti aplikasi skala menengah pada jaringan terisolasi dan penggunaan off-grid untuk memompa air dan menyediakan jumlah listrik yang lebih kecil untuk aplikasi pengisian baterai yang berdiri sendiri.

Proyek energi angin umumnya lebih layak secara finansial di daerah "berangin". Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa potensi daya dalam angin terkait dengan kubus kecepatan angin. Namun, kinerja produksi daya turbin angin praktis biasanya lebih proporsional dengan kuadrat dari kecepatan angin rata-rata. Perbedaannya diperhitungkan oleh karakteristik konversi aerodinamis, mekanikal dan listrik dan efisiensi turbin angin. Ini berarti bahwa energi yang mungkin dihasilkan oleh turbin angin akan meningkat sekitar 20% untuk setiap peningkatan 10% dalam kecepatan angin. Dukung proyek energi angin sangat penting untuk usaha yang layak secara finansial. Penting untuk dicatat bahwa karena persepsi sensorik manusia tentang angin biasanya didasarkan pada pengamatan jangka pendek terhadap iklim ekstrem seperti badai angin dan kesan dinginnya angin, salah satu dari "kecepatan angin" ini mungkin salah ditafsirkan sebagai perwakilan dari situs yang berangin. Penilaian sumber daya angin yang tepat adalah komponen standar dan penting untuk sebagian besar pengembangan proyek energi angin.

Turbin angin adalah mesin berputar yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian diubah menjadi listrik oleh generator, tanpa emisi polutan atau gas rumah kaca. Selama berabad-abad kincir angin telah digunakan untuk memanfaatkan energi angin, umumnya untuk memberi daya pada sepotong mesin seperti penggiling untuk biji-bijian, dan turbin angin adalah padanan modern. Turbin memiliki tiga klasifikasi, berdasarkan ukuran dan kapasitas produksi: skala utilitas, skala industri/komersial, dan skala perumahan.

Teknologi turbin angin telah mencapai status matang selama 15 tahun terakhir sebagai hasil dari persaingan komersial internasional, produksi massal dan keberhasilan teknis yang berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan (R&D). Kekhawatiran sebelumnya bahwa turbin angin bersifat ekspansif dan tidak dapat diandalkan sebagian besar telah disinggung. Biaya proyek energi angin telah menurun dan ketersediaan teknis turbin angin sekarang secara konsisten di atas 97%. Faktor kapasitas pembangkit proyek energi angin juga telah meningkat dari 15% menjadi lebih dari 30% saat ini, untuk lokasi dengan rezim angin yang baik.

Sistem energi angin modern beroperasi secara otomatis. Turbin angin bergantung pada gaya aerodinamis yang sama yang diciptakan oleh sayap pesawat terbang untuk menyebabkan rotasi. Anemometer yang terus mengukur kecepatan angin adalah bagian dari sebagian besar sistem kontrol turbin angin. Ketika kecepatan angin cukup tinggi untuk mengatasi gesekan di drivetrain turbin angin, kontrol memungkinkan rotor berputar, sehingga menghasilkan daya yang sangat kecil. Kecepatan angin cut-in ini biasanya merupakan angin sepoi-sepoi sekitar 4 m/s. Output daya meningkat dengan cepat saat kecepatan angin meningkat. Ketika output mencapai daya maksimum yang dirancang untuk mesin, kontrol turbin angin mengatur output ke daya pengenalan. Kecepatan angin di mana daya pengenalan tercapai disebut kecepatan angin pengenalan turbin, dan biasanya angin kencang sekitar 15 m / s. Akhirnya, jika kecepatan angin meningkat lebih jauh, sistem kontrol mematikan turbin angin untuk mencegah kerusakan pada mesin. Kecepatan angin cut-out ini biasanya sekitar 25 m/s.

Proyek energi angin dapat diklasifikasikan berdasarkan penerapan teknologi penggunaan akhir. Proyek energi angin umum untuk aplikasi off-grid. Namun, potensi pasar terbesar untuk proyek energi angin adalah dengan aplikasi on-grid (atau grid-connected).

### **1) Aplikasi off-grid**

Secara historis, energi angin paling kompetitif di lokasi terpencil, jauh dari jaringan listrik dan membutuhkan jumlah daya yang relatif kecil, biasanya kurang dari 10 kW. Dalam aplikasi off-grid ini, energi angin biasanya digunakan dalam pengisian baterai yang menyimpan energi yang ditangkap oleh turbin angin dan memberi pengguna energi listrik sesuai permintaan, seperti yang digambarkan pada Gambar 6.2. Pemompaan air, di mana air, alih-alih energi, dapat disimpan untuk penggunaan di masa depan, juga merupakan aplikasi historis utama energi angin. Area ko-petitif utama untuk energi angin dalam aplikasi daya *off-grid* jarak jauh adalah terhadap ekstensi jaringan listrik, baterai utama (sekali pakai), diesel, gas, dan generator termoelektrik. Energi angin juga kompetitif dalam aplikasi pemompaan air.





Gambar 6.2 Aplikasi off-grid  
(Sumber : (Canada, 2012))

## 2) Aplikasi on-grid

Dalam aplikasi on-grid, sistem energi angin mengumpulkan energi listrik langsung ke jaringan utilitas listrik. Dua jenis aplikasi on-grid dapat dibedakan.

- Pembangkit listrik jaringan terisolasi, dengan kapasitas pembangkit turbin angin biasanya berkisar dari sekitar 10 kW hingga 200 kW.
- Pembangkit listrik jaringan pusat, dengan kapasitas pembangkit turbin angin biasanya berkisar antara sekitar 200 kW hingga 2 MW

## 3) Isolated-grids

Isolated-grids umum di daerah terpencil. Pembangkit listrik seringkali relatif mahal karena tingginya biaya pengangkutan bahan bakar diesel ke lokasi yang terisolasi ini. Namun, jika situs tersebut memiliki angin lokal yang baik, proyek energi angin kecil dapat dipasang untuk membantu memasok sebagian dari kebutuhan listrik. Proyek energi angin ini biasanya disebut sebagai sistem hibrida angin-diesel. Peran utama sistem energi angin adalah membantu mengurangi jumlah konsumsi bahan bakar diesel. Sistem hibrida angin-diesel ditunjukkan pada Gambar 6.3.



Gambar 6.3 Isolated-grids  
(Sumber : (Canada, 2012))

#### 4) Central-grids

Central-grid aplikasi untuk proyek energi angin menjadi lebih umum. Di daerah yang relatif berangin, turbin angin skala besar dikelompokkan bersama untuk menciptakan ladang angin dengan kapasitas dalam kisaran multi-megawatt. Lahan di dalam ladang angin biasanya digunakan untuk keperluan lain, seperti pertanian atau kehutanan. Pendekatan umum lainnya untuk pengembangan proyek energi angin termasuk pemasangan satu atau lebih turbin angin skala besar oleh individu, bisnis, atau koperasi.

Ladang angin, seperti yang digambarkan pada Gambar 6.4, terdiri dari sejumlah turbin angin (yang sering dipasang dalam baris tegak lurus terhadap arah angin), jalan akses, interkoneksi listrik dan gardu induk, sistem pemantauan dan kontrol dan bangunan pemeliharaan untuk pertanian yang lebih besar. Pengembangan proyek energi angin meliputi penentuan sumber daya angin, perolehan semua otorisasi dan izin, desain dan spesifikasi infrastruktur sipil, listrik dan mekanik, tata letak turbin angin, pembelian peralatan, konstruksi dan commissioning instalasi. Konstruksi melibatkan persiapan lokasi, penilaian jalan, membangun fondasi turbin, memasang jalur pengumpulan listrik dan transformator, mendirikan turbin, dan pembangunan gardu induk dan bangunan.



Gambar 6.4 Aplikasi Central-grid  
(Sumber : (Canada, 2012))

Turbin utilitas dan skala industri/komersial digunakan untuk menyediakan daya curah ke jaringan listrik untuk digunakan di lokasi di luar lokasi. Turbin kecil tunggal adalah untuk aplikasi mandiri penggunaan perumahan, pemompaan air, atau keperluan telekomunikasi. Turbin kecil dapat digunakan sebagai "sistem hibrida," sehubungan dengan baterai, generator diesel, atau sistem fotovoltaik (sel surya). Hal ini memungkinkan mereka untuk menyediakan daya konstan ke lokasi off-grid jarak jauh, ketika koneksi ke jaringan utilitas terlalu mahal atau tidak layak. Tabel 6.1 menunjukkan tiga jenis turbin angin, bersama dengan energi yang masing-masing mereka hasilkan dan situasi di mana mereka diterapkan.

Table 6.1. Klasifikasi Turbin Angin (Berdasarkan Kapasitas Produksi)

Klasifikasi	Produksi Energi (per Turbin)	Pengaplikasian
Skala Utilitas (Turbin Besar)	1 MW – 10 MW <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biasanya dipasang di proyek "energi angin".</li> <li>• Hasilkan energi massal untuk dijual di pasar listrik.</li> <li>• Dapat dipasang dalam jumlah kecil pada jalur distribusi (generasi terdistribusi).</li> </ul>
Skala Industri (Turbin Berukuran Sedang)	50 kW – 250 kW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biasanya digunakan dalam aplikasi listrik komersial/industri dan desa ringan.</li> <li>• Ditujukan untuk produksi jaringan jarak jauh, seringkali bersamaan dengan pembangkit diesel atau pembangkit sisi beban (di sisi pelanggan meteran) untuk mengurangi konsumsi daya jaringan berbiaya lebih tinggi dan mengurangi beban puncak.</li> <li>• Penjualan energi langsung ke utilitas lokal dapat diizinkan, tergantung pada hukum negara bagian atau peraturan utilitas.</li> </ul>
Skala Perumahan (Turbin Skala Kecil atau Mikro)	400 watts – 50 kW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digunakan oleh usaha kecil, pertanian, dan rumah individu.</li> <li>• Digunakan oleh usaha kecil, pertanian, dan rumah individu.</li> <li>• Turbin kecil dapat digunakan dengan fotovoltaik surya, baterai, dan inverter untuk menyediakan daya konstan di lokasi terpencil di mana pemasangan jalur distribusi lebih mahal atau tidak layak.</li> </ul>

## 6.2 Karakteristik Energi Angin

Ada dua jenis mesin angin (turbin) yang digunakan saat ini berdasarkan arah poros yang berputar (sumbu): mesin angin horizontal-sumbu dan mesin angin sumbu vertikal. Ukuran mesin angin sangat bervariasi. Turbin kecil yang digunakan untuk memberi daya pada satu rumah atau bisnis mungkin memiliki kapasitas kurang dari 100 kilowatt. Beberapa turbin berukuran komersial besar mungkin memiliki kapasitas 5 juta watt, atau 5 megawatt. Turbin yang lebih besar sering dikelompokkan bersama menjadi ladang angin yang menyediakan daya ke jaringan listrik.

### 1) Sumbu horizontal

Sebagian besar mesin angin yang digunakan saat ini adalah tipe sumbu horizontal. Mesin angin sumbu horizontal memiliki bilah seperti baling-baling pesawat terbang. Mesin angin horizontal yang khas berdiri setinggi bangunan 20 lantai dan memiliki tiga bilah yang membentang 200 kaki. Mesin angin terbesar di dunia memiliki bilah yang lebih panjang dari lapangan sepak bola! Mesin angin berdiri tegak dan lebar untuk menangkap lebih banyak angin.

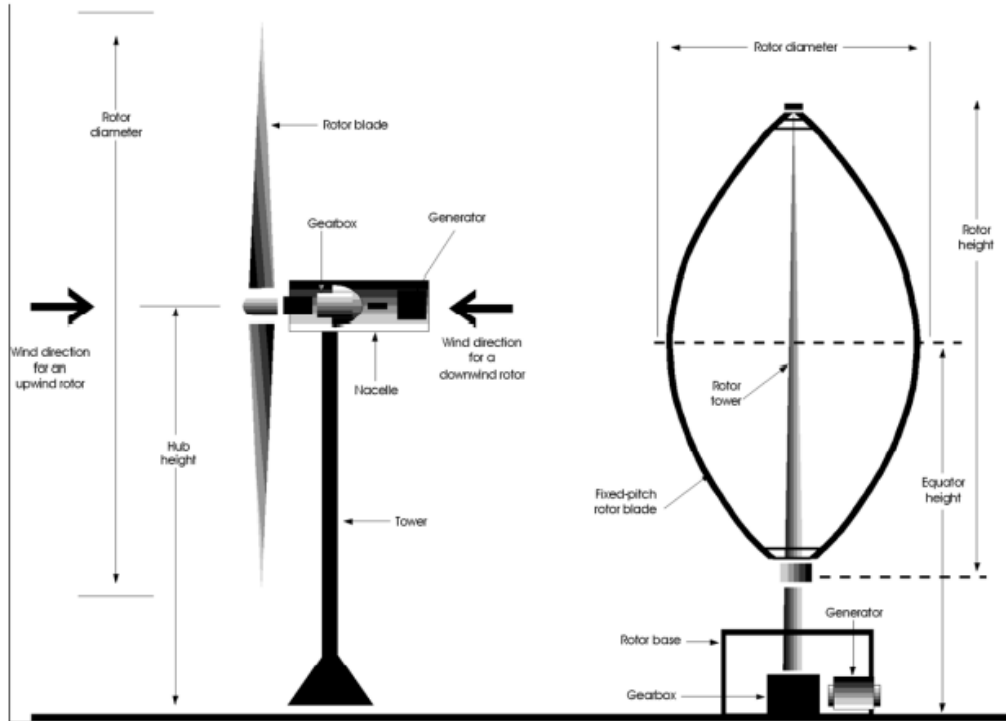
### 2) Sumbu vertikal

Mesin angin sumbu vertikal memiliki bilah yang bergerak dari atas ke bawah dan jenis yang paling umum (turbin angin Darrieus) terlihat seperti pengocok telur dua bilah raksasa. Jenis mesin angin vertikal biasanya berdiri setinggi 100 kaki dan lebar 50 kaki. Mesin angin sumbu vertikal hanya membentuk persentase yang sangat kecil dari mesin angin yang digunakan saat ini.

Wind Amplified Rotor Platform (WARP) adalah jenis sistem angin berbeda yang dirancang agar lebih efisien dan menggunakan lebih sedikit lahan daripada mesin angin yang digunakan saat ini. WARP tidak menggunakan bilah besar; sebaliknya, itu terlihat seperti tumpukan pelek roda. Setiap modul memiliki sepasang turbin kecil berkapasitas tinggi yang dipasang ke kedua permukaan saluran modul penguat angin cekungnya. Permukaan cekung menyalurkan angin ke arah turbin, memperkuat kecepatan angin hingga 50 persen atau lebih. Eneco, perusahaan yang merancang WARP, berencana memasarkan teknologi tersebut untuk memberi daya pada anjungan minyak lepas pantai dan sistem telekomunikasi nirkabel.

Turbin angin biasanya memiliki antara satu dan tiga bilah dan dikonfigurasi sebagai sumbu horizontal atau turbin sumbu vertikal. Kedua konfigurasi turbin angin utama ini ditunjukkan pada Gambar 6.5. Mesin sumbu horizontal dapat menghasilkan energi angin dalam kecepatan angin rendah. Turbin angin sumbu vertikal paling cocok untuk digunakan di lokasi perkotaan yang tidak terpengaruh oleh perubahan arah angin yang signifikan dan cepat. Sebagian besar turbin angin modern adalah mesin sumbu horizontal dengan dua atau tiga bilah, biasanya beroperasi melawan arah angin.

Dalam desain upwind, rotor menghadap angin dengan bilah turbin di depan nacelle, dan di mesin downwind rotor terletak di sisi menara yang terlindung dari angin, dan bilahnya terletak di bagian belakang nacelle. Pada mesin melawan arah angin, rotor perlu dibangun dari bahan yang tidak fleksibel dan terletak lebih jauh dari menara untuk menghindari "naungan angin," efek yang diciptakan ketika angin mengurangi kecepatan dan membungkuk menjauh dari rintangan (menara turbin) sebelum mencapainya. Mesin upwind juga membutuhkan mekanisme yaw untuk menjaga rotor menghadap angin. Mesin downwind dapat dibangun tanpa mekanisme yaw, tetapi tradeoff-nya adalah bahwa setiap kali rotor melewati menara, energi akan turun, menciptakan fluktuasi daya. Turbin angin horizontal yang beroperasi melawan arah angin, terutama digunakan dalam industri.



Gambar 6.5 Konfigurasi Turbin Angin : a) turbin sumbu horizontal, b) turbin sumbu vertical  
(Sumber : (Ayee *et al.*, 2009))

Secara konvensional pembangkit listrik tenaga angin dapat diklasifikasikan berdasarkan:

a) keluaran daya:

- microplant, dengan output daya hingga t0 100 W, digunakan untuk memberi daya pada ciurcuit off-grid,
- pembangkit listrik kecil dengan output daya dari 100 W hingga 100 kW, digunakan untuk memberi daya pada masing-masing rumah tangga atau perusahaan kecil,
- pembangkit listrik tenaga angin besar dengan output daya 100 kW ke atas, digunakan untuk menghasilkan energi yang terikat jaringan,
- skala utilitas lebih dari 1 MW,

b) ukuran konstruksi,

c) orientasi sumbu rotor:

- sumbu horizontal (HAWT),
- sumbu vertikal (VAWT),

d) kriteria lainnya:

- pemanfaatan energi angin,
- kecepatan rotor (rendah, sedang, tinggi)
- orientasi rotor dan tiang relatif terhadap arah angin – melawan arah angin dan melawan arah angin,
- desain generator: gearbox dan drive langsung..

Elemen utama turbin angin adalah rotor (bilah dan hub), sistem penggerak dan kontrol (Gbr. 6.6a). Elemen terpenting dari turbin adalah bilah karena elemen-elemen itulah yang melakukan konversi energi aktual dari energi kinetik ke mekanik menggunakan prinsip penciptaan gaya angkat pada airfoil blade. Saat ini desain dua bilah horizontal adalah konfigurasi yang paling populer (Gbr. 6.8e,f). Desain

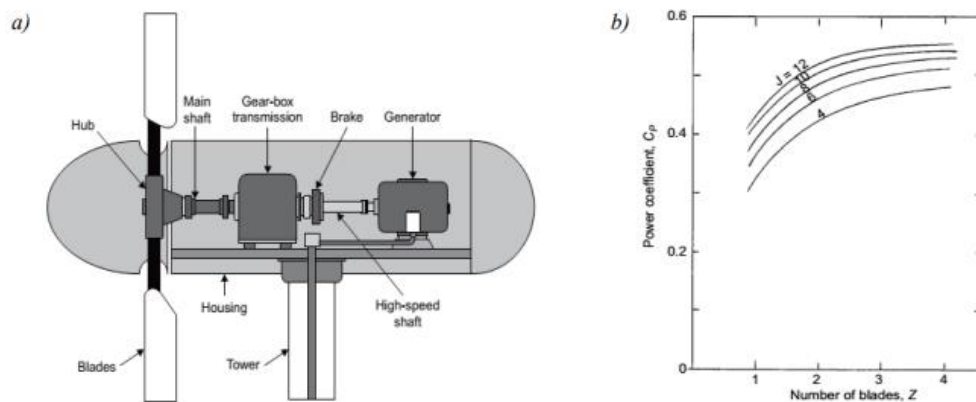
dua bilah telah terbukti paling hemat energi dan seimbang. Gambar 6.6b menunjukkan efek jumlah bilah pada koefisien daya untuk rasio kecepatan ujung tertentu.

$$J = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Dimana :

- $\Omega$  : kecepatan rotasi,
- $V_0$  : kecepatan angin,
- R : jari-jari bilah.

Pada Gambar 6.6b, mudah untuk melihat koefisien daya peningkatan yang signifikan karena konfigurasi berubah dari satu bilah ke bilah. Peningkatan jumlah bilah di masa depan menghasilkan peningkatan koefisien daya yang jauh lebih kecil, ketika kerugian efisiensi terkait gesekan diperhitungkan. Namun, konfigurasi tiga bilah lebih disukai karena hanya memiliki 2/3 dari beban konfigurasi dua bilah, menghasilkan lebih sedikit kebisingan.

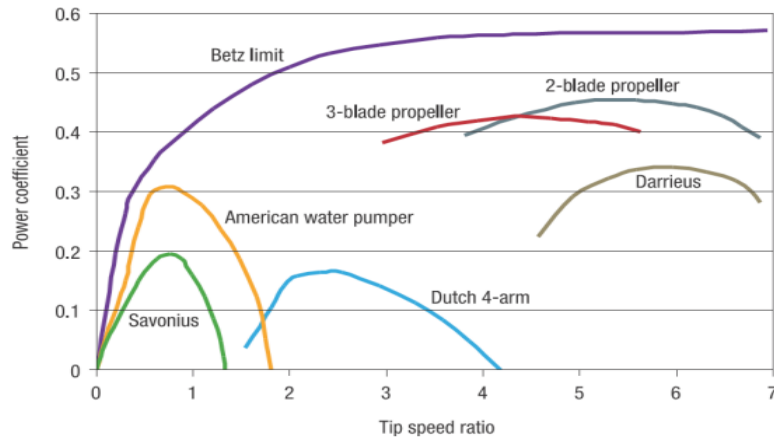


Gambar 6.6 Desain turbin angin yang disederhanakan (a). Pengaruh rasio kecepatan ujung dan jumlah bilah pada koefisien daya dalam kondisi gesekan nol (b).

(Sumber : (Tywoniuk, A., Skorupka, 2018))

Sedangkan untuk orientasi sumbu, desain VAWT yang kurang efisien daripada yang HAWT, digunakan terutama untuk skala kecil. Faktor kunci yang menyebabkan efisiensi VAWT yang lebih rendah adalah bahwa, setiap bilah mencapai gaya angkat maksimum hanya dalam satu titik per rotasi.

Gambar 6.7 mengilustrasikan perbandingan koefisien daya dari beberapa desain pabrik kincir angin pada Gambar 6.5. Ini menunjukkan bahwa satu-satunya solusi yang menjanjikan adalah penyempitan dua dan tiga bilah. Perlu dicatat bahwa turbin angin yang saat ini diproduksi tidak mencapai batas Betz 100%, itulah sebabnya konstruksi dianggap dirancang dengan baik jika dapat mencapai koefisien daya 35-45%.



Gambar 6.7 Koefisien daya dalam kaitannya dengan rasio kecepatan angin untuk desain turbin angin yang berbeda terhadap batas Betz yang menentukan efisiensi dinamis aero maksimum.  
(Sumber : (Tywoniuk, A., Skorupka, 2018))

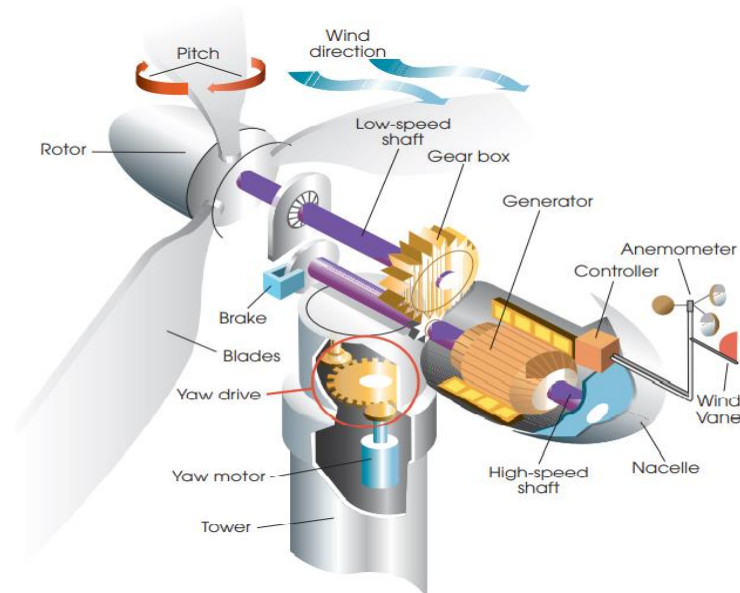


Gambar 6.8 Desain turbin angin: a) Dutch 4-arms, b) American water pumper, c) 3-blade design, d) 2-blade design e) Savonius, f) Darrieus  
(Sumber : (John Hetzer, 2012))

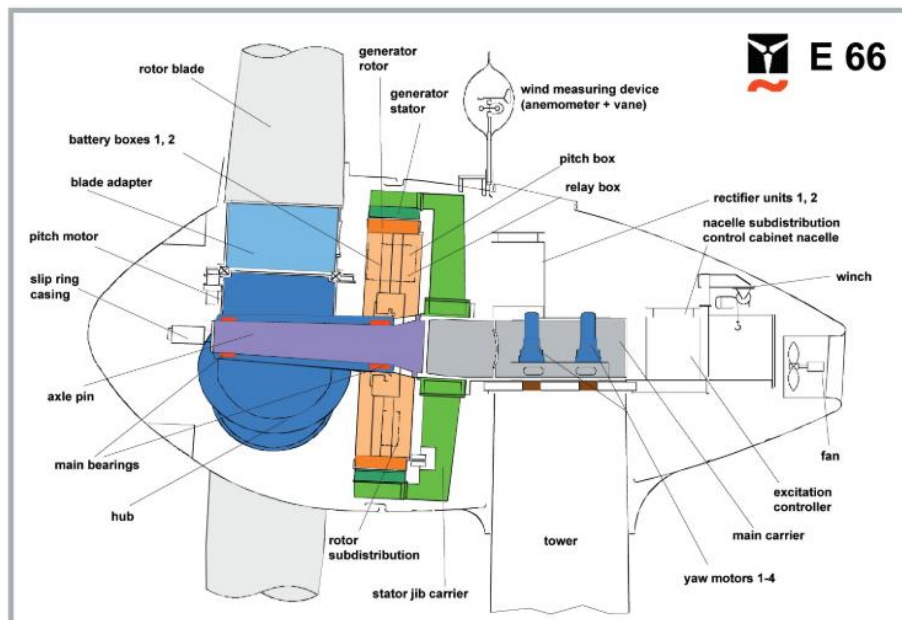


## 6.3 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Diperkirakan ada 8.000 bagian dalam turbin angin, tetapi untuk tujuan ini kami telah menyederhanakan komponen menjadi empat kategori: rotor, nacelle dan kontrol, generator dan elektronik daya, dan menara turbin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.9 dan Gambar 6.10. Rotor termasuk bilah, yang memanfaatkan energi angin dan mengubahnya menjadi energi mekanik, serta hub, yang mendukung bilah. Generator dan sistem elektronik daya mencakup drivetrain, generator – yang mengubah energi mekanik menjadi listrik – penggerak yaw untuk memutar nacelle, dan kontrol elektronik.



Gambar 6.9. Turbin Angin.  
(Sumber : (Tywoniuk, A., Skorupka, 2018))

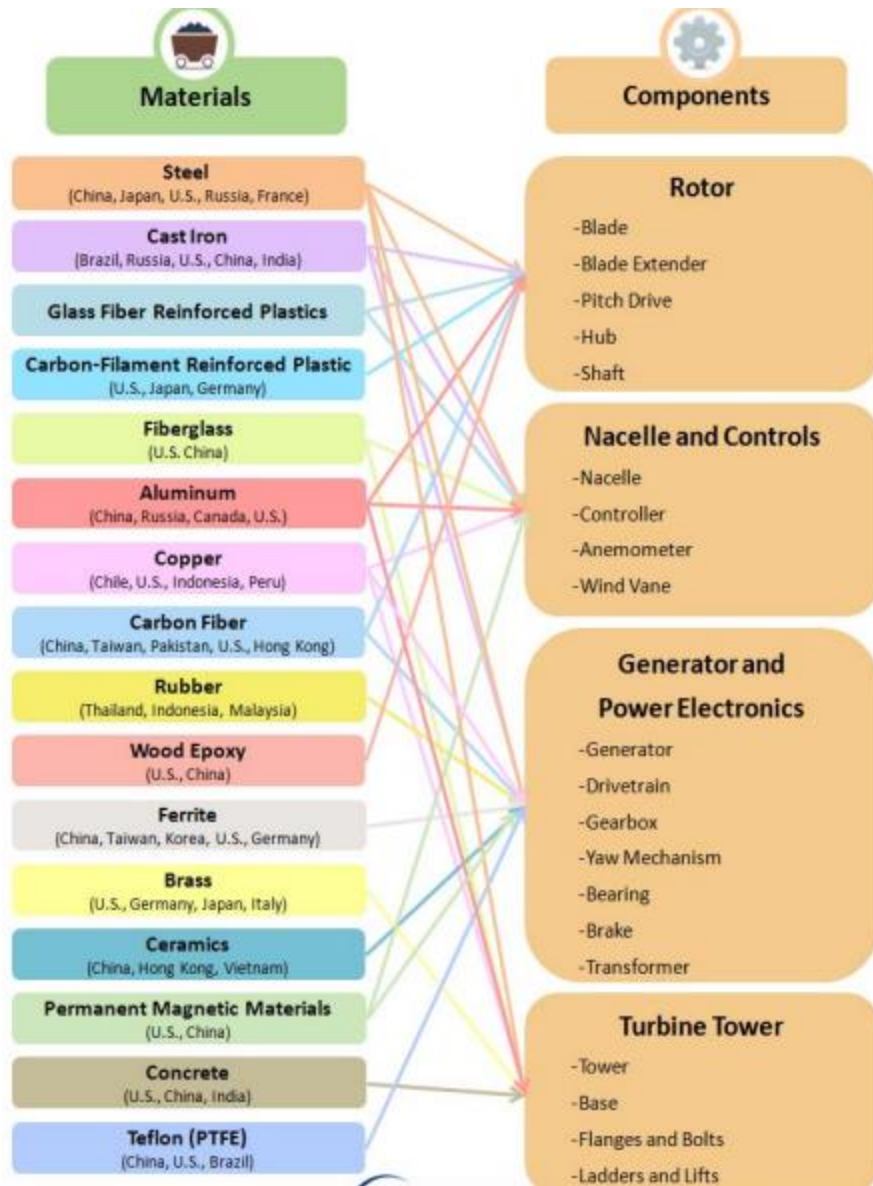


Gambar 6.10. Turbin Angin.  
(Sumber : (Tywoniuk, A., Skorupka, 2018))



Pertumbuhan pesat industri tenaga angin dalam beberapa tahun terakhir telah memberikan tekanan besar pada pemasok komponen untuk memenuhi permintaan pasar. Oleh karena itu, produsen turbin angin menggunakan berbagai strategi seperti integrasi vertikal dan menandatangani kontrak jangka panjang dengan pemasok. Karena industri tenaga angin terus berkembang, peluang akan tercipta bagi banyak perusahaan untuk terlibat di seluruh rantai nilai.

Sedangkan komponen utama serta subkomponen dengan bahan terkait turbin angin diilustrasikan pada Gambar 6.11.



Gambar 6.11 Diperkirakan ada 8.000 bagian dalam turbin angin. Komponen yang tercantum di sini hanya mencakup kategori utama Tier 1 dan Tier 2.  
(Sumber : (Tywoniuk, A., Skorupka, 2018))

## 6.4 Aspek Kelistrikan pada Turbin Angin

Di sebagian besar sistem tenaga listrik, sebagian besar daya disuplai oleh generator mesin berputar. Ini bisa dari banyak jenis, tetapi yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin terutama adalah sebagai berikut:

### 4. Generator DC

Sistem generator angin kecil yang berdiri sendiri pada suatu waktu dilengkapi dengan generator DC. Bentuk generator ini mudah untuk kontrol kecepatan dan digunakan secara luas hingga awal 1980-an, terutama ketika daya keluaran dapat digunakan dalam bentuk DC. Kebutuhan akan komutator mesin dan perlengkapan sikat menghasilkan keandalan yang rendah dan biaya perawatan yang tinggi.

Mesin DC brushless modern menggunakan eksitasi magnet permanen untuk menghilangkan kebutuhan akan komutator mesin. Konfigurasi ini pada dasarnya membentuk mesin DC konvensional luar-dalam dengan komutator mekanisnya yang digantikan oleh sirkuit pergantian elektronik. Teknologi mesin brushless ini sangat meningkatkan keandalan mesin tetapi terbatas pada peringkat mesin paling banyak kurang dari beberapa ratus watt. Dengan demikian, tidak cocok untuk mesin multi-megawatt yang dipasang dalam skema pembangkit energi angin modern.

### 5. Generator AC

Sebagian besar sistem pasokan listrik berbentuk AC tiga fase dengan frekuensi dan tegangan tetap, dan menggunakan tegangan dan arus sinusoidal. Daya listrik untuk sistem transmisi dan distribusi modern selalu dihasilkan oleh generator sinkron tiga fase dari banyak peringkat megawatt. Yang terbesar dari set mesin tersebut di Inggris dinilai pada 600 MW dan ditempatkan, dengan turbin berbahan bakar fosil atau nuklirnya, di pembangkit listrik utilitas besar atau pembangkit listrik.

Generator energi angin adalah beberapa pesanan yang ukurannya lebih kecil, tetapi meningkat peringkatnya setiap saat. Pada pertengahan 1990-an, turbin angin terbesar adalah mesin Nordex N52 dengan nilai 800 kW, meskipun ukuran rata-rata sekitar 250 kW. Sepuluh tahun kemudian, pada tahun 2004, mesin terbesar berada di kisaran 3-5 MW. Selama periode 10 tahun yang sama, diameter rotor turbin angin meningkat dari 7,44 menjadi 61-90 m.

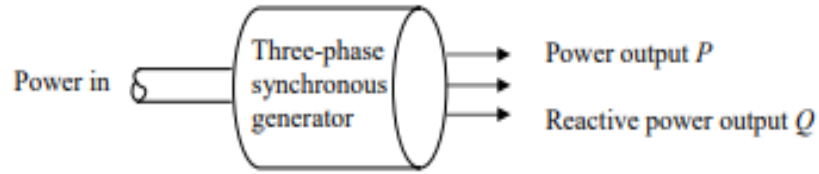
Generator AC dalam sistem tenaga angin terbagi dalam dua kategori utama.

- Generator sinkron, membutuhkan eksitasi belitan DC atau eksitasi magnet permanen, yang memberikan tegangan dan frekuensi yang keduanya sebanding dengan kecepatan rotasi.
- Generator induksi, yang membutuhkan eksitasi AC dan frekuensi serta besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung pada frekuensi arus eksitasi dan pada kecepatan dan arah rotasi.

Generator sinkron dan generator induksi keduanya sangat penting dalam sistem energi angin.

### 6. Generator Mesin Sinkron

Mesin sinkron tiga fase digambarkan pada Gambar 6.12. Statornya terdiri dari inti besi dengan tiga kelompok kumparan yang terluka di sekitarnya. Kumparan identik ini, juga bernama tiga belitan "fase", memiliki pergeseran  $120^\circ$  fase di antara masing-masing dan terhubung langsung ke sistem catu daya tiga fase atau ke beban saat berdiri sendiri. Dalam teks ini, hanya yang pertama yang dipertimbangkan. Luka kumparan pada inti rotor dari generator sinkron tiga fase diberi energi oleh sumber tegangan DC. Ini mengatur medan fluks magnetik yang memotong konduktor saat berputar. Kumparan individu dihubungkan dengan cara yang menyediakan kutub utara dan selatan alternatif. Gerakan relatif antara fluks medan berputar dan konduktor menyebabkan gaya gerak listrik (emf), yaitu tegangan, dalam kumparan stator.

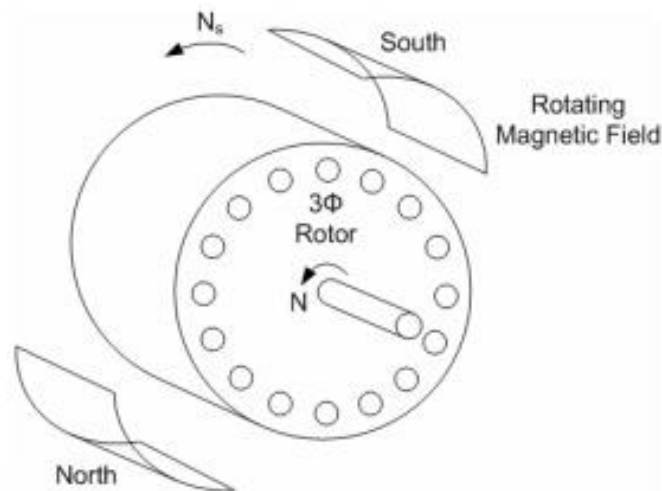


Gambar 6.12. Bentuk umum generator sinkron tiga fase  
(Sumber : (Ackermann, 2005))

## 7. Mesin Induksi Tiga Fase

Mesin induksi tiga fase, baik yang bertindak sebagai motor atau generator, memiliki struktur silinder ganda (Gambar 6.13). Rotor silinder, yang berisi belitan tiga fase terdistribusi atau belitan struktur sangkar, bebas berputar dengan kecepatan  $N$ , di dalam rongga silinder struktur stator yang dibangun di atas rangka stasioner mesin. Seperti pada mesin sinkron, stator memiliki belitan terdistribusi dan tiga fase. Dua belitan tiga fase, pada rotor dan stator, dihubungkan secara magnetis tetapi tidak secara elektrik. Ketika satu set tegangan sinusoidal seimbang dan tiga fase diterapkan pada belitan stator tiga fase, efeknya adalah menghasilkan "medan magnet berputar", yang diilustrasikan pada Gambar 5. Medan tidak berputar secara fisik tetapi efek magnetnya persis sama seperti jika ada sepasang kutub magnet yang berputar di sekitar celah udara dengan kecepatan sinkron  $N_s$ , tergantung pada frekuensi dan jumlah kutub.

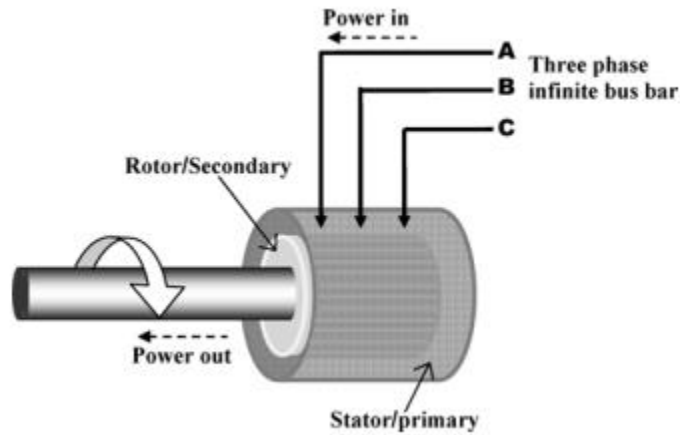
Penggunaan mesin induksi tiga fase sebagai generator sangat jauh lebih jarang daripada penggunaannya sebagai motor tiga fase. Generator induksi tiga fase digunakan dalam penggerak industri khusus tertentu tetapi sekarang terutama dapat ditemukan di industri tenaga angin yang sangat berkembang.



Gambar 6.13 Rotor motor induksi ditindakkanlanti oleh "medan magnet yang berputar".  
(Sumber : (William Shepherd., 2011))

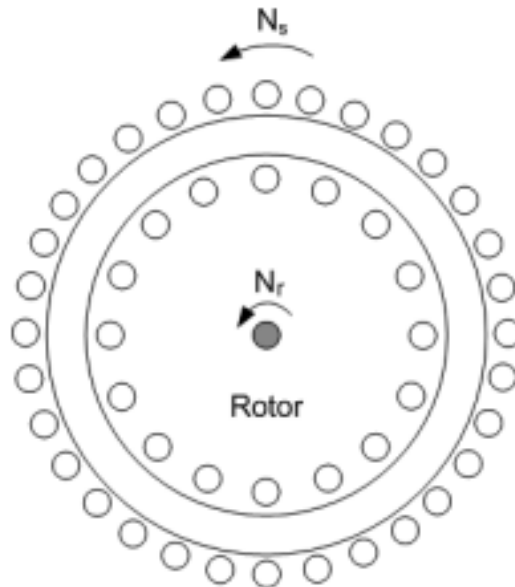
Belitan tiga fase pada stator mesin biasanya terhubung ke pasokan tiga fase tegangan dan frekuensi konstan. Belitan ini menjadi belitan utama mesin dan juga belitan eksitasi. Torsi motor dan daya keluaran dikembangkan dalam belitan sekunder pada rotor mesin. Belitan ini ditutup pada diri mereka sendiri secara langsung, Gambar 6.14, atau dalam kasus rotor luka melalui resistor yang setara.

Sirkuit eksternal dapat dihubungkan ke belitan sekunder motor melalui slip-ring dan brush gear pada rotor.



Gambar 6.14 Bentuk umum dari motor induksi tiga fase.  
(Sumber : (William Shepherd., 2011))

Motor induksi beroperasi dengan prinsip induksi elektromagnetik. Konduktor rotor berputar ke arah medan putar stator pada kecepatan  $N_r$  yang lebih rendah dari kecepatan berputar sinkron  $N_s$ .



Gambar 6.15 Kecepatan rotasi pada motor induksi tiga fase.  
(Sumber : (William Shepherd., 2011))

Dimana :

$N_s$  : kecepatan putar fluks stator

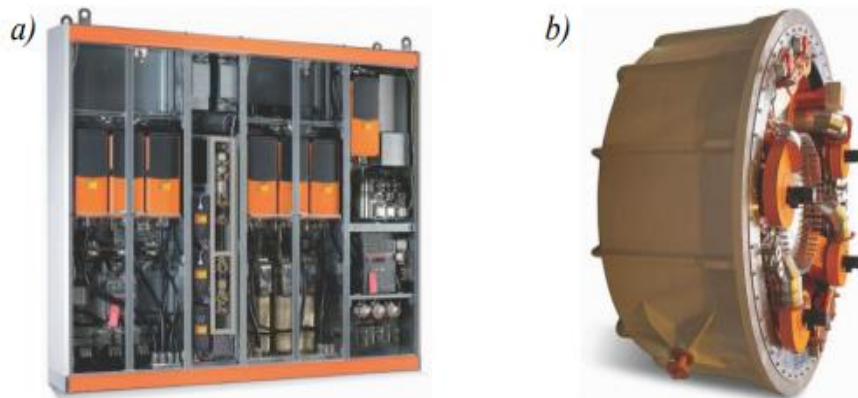
$N_r$  : kecepatan mekanis rotor

$S N_s$  : perbedaan kecepatan antara fluks stator dan rotor

$N_r + S N_s$ : fluks rotor sehubungan dengan stator.

Di generator sinkron masa lalu, ware jarang karena kebutuhan untuk menyesuaikan secara akurat dengan frekuensi jaringan elektro energik. Namun, dalam beberapa tahun terakhir jenis konstruksi ini berhasil kembali dalam turbin dengan penggerak langsung. Pada turbin angin skala besar, generator yang paling umum digunakan adalah generator induksi yang menghasilkan arus bolak-balik (AC) 50-60 Hz. Keuntungan menggunakan generator induksi adalah konstruksinya yang sederhana dan fleksibilitas tertentu dalam kecepatan rotasi kira-kira, yang memungkinkan sistem turbin untuk menyesuaikan diri dengan hembusan angin sesekali. Selama bertahun-tahun, desain generator induksi telah mengalami modifikasi, di antaranya adalah penerapan sistem energo-elektronik yang disebut konverter daya, yang memungkinkan penyesuaian dalam kecepatan rotasi. Konverter daya juga menyinkronkan generator dengan kisi-kisi energik elektro. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.16.

Semakin banyak, turbin skala utilitas telah mulai menggunakan generator dengan magnet permanen. Magnet permanen yang digunakan dalam desain generator modern terbuat dari logam tanah jarang, yang memungkinkan medan magnet yang lebih kuat. Harga bahan yang lebih tinggi adalah kerugian utama mereka. Terlepas dari kenyataan, generator magnet permanen lebih besar dan lebih mahal daripada generator induksi, mereka menawarkan kehilangan daya yang lebih kecil, peningkatan keandalan, dan efisiensi, bahkan selama operasi di bawah beban rendah.

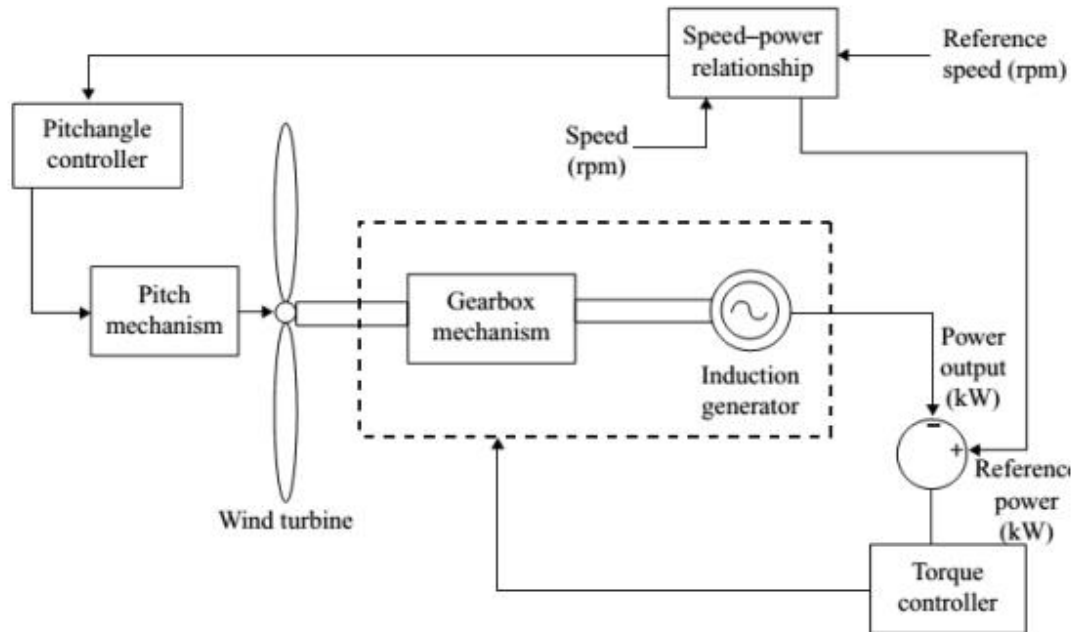


Gambar 6.16 Konverter daya (a) dan generator magnet permanen (b).  
(Sumber : (Ackermann, 2005))

Saat ini, transmisi tanpa roda gigi menjadi semakin populer. Tren ini terkait dengan fakta bahwa, selain torsi, gaya melintang dan lateral juga sering diteruskan ke transmisi melalui poros utama. Generator penggerak langsung mulai menjadi sangat populer di turbin berdaya tinggi di laut. Solusi ini bermanfaat karena penghapusan servis roda gigi turbin di pertanian laut di mana operasi ini dapat menjadi rumit dan memakan waktu. Kecepatan rotasi yang lebih rendah dari sistem yang digerakkan langsung juga meningkatkan umur struktur.

Kerugian menggunakan drive langsung dan generator kecepatan rendah adalah menghasilkan dimensi keseluruhan yang lebih besar dan karenanya beratnya, yang meningkatkan biaya konstruksi. Turbin penggerak langsung menggunakan sistem dua generator untuk operasi berkecepatan rendah dan tinggi. Solusi lain mungkin dengan menggunakan generator kecepatan variabel. Namun, ini memiliki kelemahan tersendiri, karena hasilnya akan menjadi arus variabel yang memaksa penggunaan konverter AC-DC-AC, yang sekali lagi meningkatkan biaya produksi turbins.

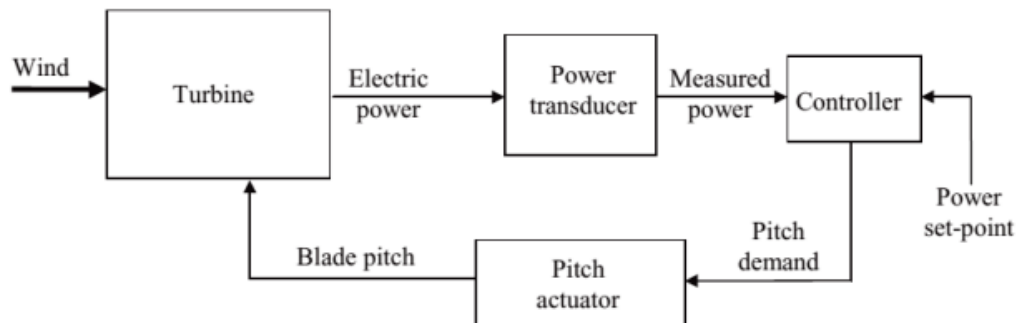
Elemen penting lain dari desain turbin angin adalah sistem kontrol yang mengintegrasikan sinyal dari banyak sensor yang dipasang pada komponennya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.17



Gambar 6.17 Diagram turbin angin kecepatan variabel dengan pitch blade yang dapat disesuaikan.  
(Sumber : (Ackermann, 2005))

. Sistem ini mengoptimalkan operasi turbin dan memastikan keselamatan jika terjadi kerusakan atau kondisi cuaca yang tiba-tiba memburuk. Sistem kontrol yang terdapat pada Gambar 6.18 harus terus mengontrol banyak parameter yang bertanggung jawab atas operasi turbin yang efisien, seperti:

- a) memposisikan bilah ke arah optimal relatif terhadap angin,
- b) mengatur nada bilah yang sesuai,
- c) memulai dan menghentikan,
- d) energi-elektronik,
- e) mendinginkan komponen,
- f) mengendalikan sistem de-icing,
- g) Diagnostik.



Gambar 6.18 Loop kontrol untuk turbin angin kecepatan tetap dengan pitch blade yang dapat disesuaikan.  
(Sumber : (Ackermann, 2005))

**Soal**

- 1) Sebutkan dan jelaskan pengaplikasian pembangkit listrik tenaga angin berdasarkan penerapan teknologi penggunaan akhir !
- 2) Sebutkan karakteristik yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga angin berdasarkan bentuk penerapan turbinnya !
- 3) Dalam sebuah system pembangkit listrik tentu akan terdapat komponen penyusunnya, sehingga system dapat berfungsi maksimal. Sebutkan komponen – komponen penyusun system pembangkit listrik tenaga angin !
- 4) Gambarkan dan jelaskan blok diagram prinsip kerja dari system pembangkit listrik tenaga angin !
- 5) Jika dilihat dari fungsinya, apakah pembangkit listrik tenaga angin lebih efisien diterapkan pada sebuah negara dibandingkan pembangkit listrik yang lain? Mengapa demikian?

# BAB VII

## PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

### 7.1 Pendahuluan

Energi terbarukan dengan cepat menjadi penting sebagai sumber daya energi karena harga bahan bakar fosil berfluktuasi. Oleh karena itu, pada tingkat pendidikan, sangat penting bagi mahasiswa teknik dan teknologi untuk memiliki pemahaman dan apresiasi terhadap teknologi yang terkait dengan energi terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang paling populer adalah energi matahari.

Energi matahari adalah aliran energi yang paling melimpah. Ini tersedia secara langsung sebagai isolasi matahari dan secara tidak langsung sebagai energi angin. Matahari mengirimkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Potensinya adalah 178 Miliar MW, yang sekitar 20.000 kali lipat dari permintaan dunia. Beberapa Energi Matahari menyebabkan penguapan air, yang menyebabkan hujan dan penciptaan sungai dll. Beberapa di antaranya digunakan dalam fotosintesis yang sangat penting. Manusia telah berusaha sejak dahulu kala untuk memanfaatkan sumber energi yang tak terbatas ini. Tetapi telah mampu memanfaatkan hanya sebagian kecil dari energi ini sampai hari ini.

#### **Kelebihan dari sistem tenaga surya:**

- Energi dan panas dari matahari gratis dan tidak terbatas.
- Tenaga surya tidak mencemari. Penggunaan tenaga surya tidak memancarkan gas rumah kaca atau limbah berbahaya.
- Tenaga surya sangat cocok dan hemat untuk pembangkit listrik di daerah terpencil atau di mana biaya jaringan utilitas ekspansi tinggi.
- Tenaga surya serbaguna. Ini dapat digunakan untuk tujuan daya rendah serta yang lebih besar - dari kalkulator genggam, jam tangan, dan lampu taman bertenaga surya hingga pemanas air, mobil, bangunan, dan satelit.
- Juga karena konstruksi sederhana dan biaya perawatan yang rendah sistem energi surya terutama digunakan untuk tujuan pembangkitan.

#### **Kelemahan dari system tenaga surya :**

- Investasi modal awal yang tinggi
- Penyimpanan energi modular meningkatkan biaya
- Kurangnya infrastruktur dan terbatasnya akses ke layanan teknis di daerah terpencil
- Produksi energi variabel berdasarkan perubahan kondisi meteorologi

### 7.2 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Matahari

Sistem Energi Surya kadang-kadang disebut sebagai Sistem Energi Alternatif. Di sebelah kiri adalah komponen dasar yang dibutuhkan untuk menghasilkan listrik dari matahari. Anda akan membutuhkan satu atau lebih Panel Surya, Pengontrol Pengisi Daya, Inverter Daya, dan tentu saja, Baterai. Penjelasan singkat tentang masing-masing komponen ditunjukkan pada Gambar 7.1.





Gambar 7.1 Rangkaian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya.  
(Sumber : (Longman Suntech Energy, 2013))

Setelah Anda mendapatkan gambaran tentang komponen yang Anda perlukan untuk sistem energi surya Anda, pastikan untuk memeriksa "Merancang sistem tenaga surya" untuk menghitung berapa banyak panel surya dan baterai penyimpanan yang Anda perlukan, konfigurasi inverter dan pengontrol muatan apa yang akan digunakan dan menentukan ukuran kawat yang tepat.

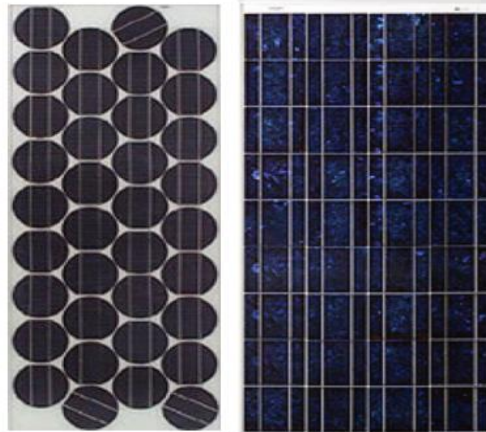
### 7.2.1 Panel Surya

Komponen pertama adalah susunan Panel Surya (Istilah untuk sekelompok panel Surya) seperti pada Gambar 7.2. Mereka menghasilkan daya dari sinar matahari dalam bentuk DC. Mayoritas modul surya yang tersedia di pasaran dan digunakan untuk tata surya perumahan dan komersial adalah silikon-kristal. Modul-modul ini terdiri dari beberapa string sel surya, berkabel secara seri (positif ke negatif), dan dipasang dalam bingkai aluminium. Setiap sel surya mampu menghasilkan 0,5 volt. Modul 36-sel dinilai menghasilkan 18 volt. Modul yang lebih besar akan memiliki 60 atau 72 sel dalam bingkai. Ukuran atau luas sel menentukan jumlah arus listrik. Semakin besar sel, semakin tinggi arus listrik.



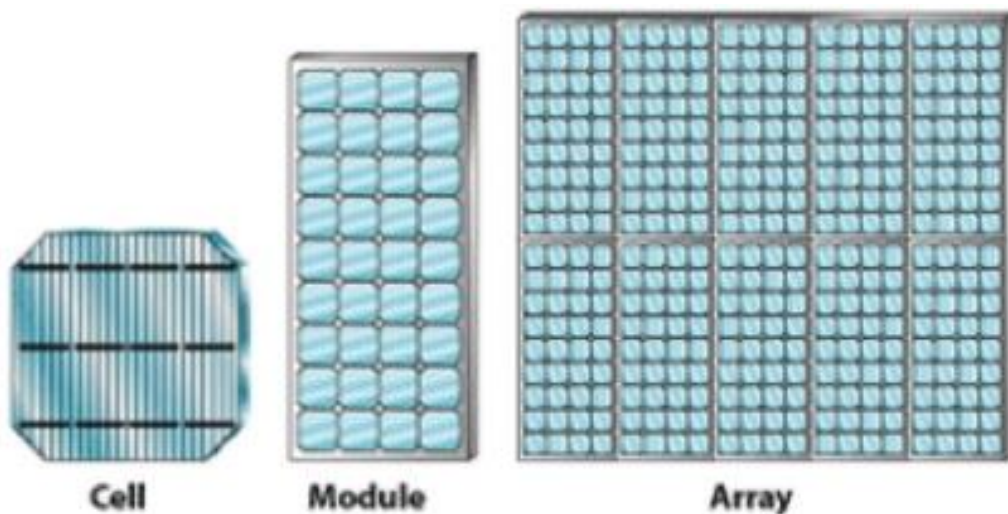
Gambar 7.2 Panel Surya.  
(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Modul PV seperti mono-kristal pertama kali diproduksi dan digunakan oleh NASA dan militer AS sedangkan Poly-crystalline lebih murah, dan ditemukan di seluruh dunia di pasar energi terbarukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.3.



Gambar 7.3 Contoh modul PV surya mono-kristal (kiri) dan poli-kristal (kanan).  
(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Modul awal adalah mono-kristal dan memiliki sel bulat. Proses pembuatannya menghasilkan sel yang lebih efisien, tetapi menghasilkan limbah, dan merupakan proses yang mahal. Modul kristal saat ini adalah poli-kristal dan dipotong menjadi sel berbentuk persegi atau persegi panjang. Proses ini membuang lebih sedikit bahan, tetapi menghasilkan modul yang kurang efisien. Namun, penurunan biaya telah menjadikannya proses yang kompetitif. *Array* surya terdiri dari beberapa modul PV yang dihubungkan bersama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4 Sel surya adalah komponen dasar. Sel-sel yang dihubungkan bersama dan dipasang dalam bingkai menyusun modul surya. Beberapa modul yang dihubungkan bersama membentuk array.

(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Menghubungkan kabel negatif (-) dari satu modul ke kabel positif (+) dari modul kedua adalah awal dari string seri. Modul pengkabelan secara seri menghasilkan tegangan masing-masing dari dua modul ditambahkan bersama-sama. Misalnya, modul 20 watt dengan nilai 17,2

volt dan 1,2 amp disambungkan secara seri ke modul serupa kedua. Hasilnya adalah string seri yang mampu menghasilkan 34,4 volt ( $17,2V + 17,2V = 34,4V$ ). Namun, arus yang dihasilkan setiap modul, tetap sama.

String seri mewakili tegangan yang dijumlahkan dari setiap modul individu. Setiap modul harus memiliki tegangan dan arus yang sama. Kabel negatif dari satu modul terhubung ke kabel positif dari modul berikutnya. Dalam sistem besar, beberapa string dirakit dan ujung yang tidak terhubung terhubung ke kabel homerun yang mendarat di terminal selungkup yang terletak di dekat array. Misalnya, jika array terdiri dari string 10 modul, masing-masing dinilai pada 30 volt dan 4 amp, string akan dinilai menghasilkan 300 volt ( $10 \times 30$  volt) dan 4 amp, atau total 1.200 watt (1,2 kW). Tujuannya adalah untuk menghubungkan modul secara seri untuk membangun tegangan. Karena tegangan AC di tempat tinggal beroperasi pada 120 hingga 240 volt, diinginkan untuk mencapai tegangan yang diperlukan untuk mengoperasikan beban di tempat tinggal.

3 jenis dasar Panel Surya:

#### 1) Panel Surya Monokristalin

Sel surya yang terbuat dari silikon Monokristalin (mono-Si), juga disebut silikon kristal tunggal (kristal tunggal-Si), dan cukup mudah dikenali oleh tepi bulat serta pewarnaan genap eksternal, dan tampilan seragam, yang menunjukkan silikon dengan kemurnian tinggi, seperti yang terlihat pada gambar di sebelah kanan. Panel surya monokristalin memiliki tingkat efisiensi tertinggi (15% -20%) karena terbuat dari silikon bermutu tinggi. Panel surya ini juga hidup paling lama. Sebagian besar produsen panel surya memberikan garansi 25 tahun pada panel surya Monokristalin seperti pada Gambar 7.5.



Gambar 7.5 Panel surya monokristalin  
(Sumber : (Longman Suntech Energy, 2013))

Namun, panel surya Monokristalin adalah yang paling mahal. Panel surya monokristalin cenderung lebih efisien dalam cuaca hangat. Kinerja menderita saat suhu naik, tetapi kurang dari panel surya polikristalin. Bagi sebagian besar pemilik rumah suhu tidak menjadi perhatian.

#### 2) Panel surya polikristalin

Sering disebut Multi-kristal, panel surya yang dibuat dengan sel Polycrystalline sedikit lebih murah & sedikit kurang efisien daripada sel Monokristalin karena sel-sel tersebut tidak tumbuh dalam kristal tunggal tetapi dalam blok besar banyak kristal seperti pada Gambar 7.6. Tidak seperti panel surya berbasis Monokristalin, panel surya polikristalin tidak memerlukan

proses Czochralski. Silikon mentah dilebur dan dituangkan ke dalam cetakan persegi, yang didinginkan dan dipotong menjadi wafer persegi sempurna. Inilah yang memberi mereka penampilan kaca pecah yang mencolok itu. Panel surya ini dapat diidentifikasi dengan jelas dengan sel persegi kuadrat sempurna seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 7.6 Polycrystalline solar panels  
(Sumber : (Longman Suntech Energy, 2013))

Efisiensi panel surya berbasis polikristalin biasanya 13-16%

### 3) Panel surya Film Tipis

Menyimpan satu atau beberapa lapisan tipis bahan fotovoltaik ke substrat adalah apa yang membuat sel surya film tipis (juga dikenal sebagai sel fotovoltaik film tipis (TFPV)). Berbagai jenis sel surya film tipis dapat dikategorikan dengan mana bahan fotovoltaik disimpan ke substrat

- **Amorphous silicon (a-Si)**

Sel surya berbasis silikon amorf secara tradisional hanya digunakan untuk aplikasi skala kecil seperti dalam kalkulator saku, karena output daya listrik rendah, Namun, innovations baru-baru ini telah membuatnya lebih menarik untuk beberapa aplikasi skala besar juga.

Dengan teknik pembuatan yang disebut "penumpukan", beberapa lapisan sel surya silikon amorf dapat digabungkan, yang menghasilkan tingkat efisiensi yang lebih tinggi (biasanya sekitar 6-8%).

- **Cadmium telluride (CdTe)**

Cadmium telluride adalah satu-satunya teknologi panel surya film tipis yang telah melampaui efisiensi biaya panel surya silikon kristal di sebagian besar pasar (sistem multi-kilowatt). Efisiensi panel surya berdasarkan kadmium telluride biasanya beroperasi pada kisaran 9-11%.

- **Copper indium gallium selenide (CIS/CIGS)**

Dibandingkan dengan teknologi film tipis lainnya di atas, sel surya CIGS telah menunjukkan potensi paling besar dalam hal efisiensi. Sel surya ini mengandung lebih sedikit jumlah kadmium bahan beracun yang ditemukan dalam sel surya CdTe. Produksi komersial panel surya CIGS fleksibel dimulai di Jerman pada tahun 2011. Tingkat efisiensi untuk panel surya CIGS biasanya beroperasi di kisaran 10-12%.



- **Organic photovoltaic cells (OPC)**

Tergantung pada teknologinya, prototipe modul film tipis telah mencapai efisiensi antara 7-13% dan modul produksi beroperasi sekitar 9%. Efisiensi modul masa depan diperkirakan akan naik mendekati sekitar 10-16%. Mereka lebih mudah diproduksi secara massal dan berpotensi lebih murah untuk diproduksi daripada sel surya berbasis kristal. Penampilan homogen mereka membuat mereka terlihat lebih menarik. Mereka dapat dibuat fleksibel, yang membuka banyak aplikasi potensial baru.

## 7.2.2 Charge Controller

Charge Controller diperlukan untuk mencegah pengisian baterai yang berlebihan seperti pada Gambar 7.7. Pengisian yang tepat akan mencegah kerusakan dan meningkatkan masa pakai dan kinerja baterai.

Pengontrol pengisian daya mengatur jumlah daya yang masuk ke baterai dari modul agar tidak mengisi daya baterai secara berlebihan. Pengontrol muatan dapat bervariasi dalam jumlah arus listrik yang dapat mereka atur. Beberapa model akan menyertakan fitur tambahan seperti menghubungkan dan mengoperasikan beban DC, dan mengatur energi yang masuk ke beban berdasarkan jumlah pengisian daya dalam baterai. Pada siang hari, array mengirimkan daya ke pengontrol dan ke baterai. Pengontrol memantau tingkat energi untuk menjaga baterai tetap terisi penuh. Pada malam hari, ketika array tidak mengirimkan energi, pengontrol memungkinkan baterai untuk memberi energi pada beban sesuai permintaan.



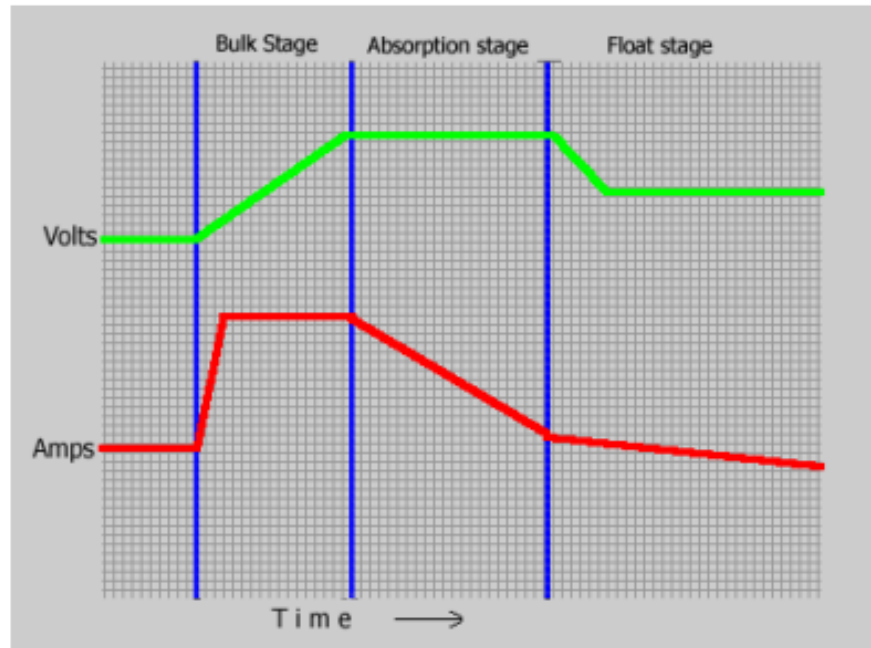
Gambar 7.7 Charge Controller.

(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Sebagian besar unit pengontrol muatan berkualitas memiliki apa yang dikenal sebagai siklus pengisian 3 tahap yang berjalan seperti ini:

- 1) **BULK (Massal):** Selama fase Massal dari siklus pengisian daya, tegangan secara bertahap naik ke tingkat Massal (biasanya 14,4 hingga 14,6 volt) sementara baterai menarik arus maksimum. Ketika tegangan tingkat massal tercapai, tahap penyerapan dimulai.
- 2) **ABSORPTION (Penyerapan):** Selama fase ini tegangan dipertahankan pada tingkat tegangan Massal untuk waktu yang ditentukan (biasanya satu jam) sementara arus secara bertahap meruncing saat baterai mengisi daya.
- 3) **FLOAT (Mengapung):** Setelah waktu penyerapan berlalu tegangan diturunkan ke tingkat float (biasanya 13, 4 hingga 13, 7 volt) dan baterai menarik arus perawatan kecil sampai siklus berikutnya.

Hubungan antara arus dan tegangan selama 3 fase siklus pengisian dapat ditunjukkan secara visual oleh grafik pada Gambar 7.8..



Gambar 7.8 siklus tahap pengisian  
(Sumber : (Longman Suntech Energy, 2013))

Sebagian besar pengontrol muatan multi-tahap adalah jenis Pulse Width Modulation (PWM). Disarankan agar pembangkit Listrik Tenaga Surya menggunakan setidaknya desain PWM ini. Pengontrol Maximum Power Point Tracking (MPPT) yang lebih baru bahkan lebih baik. Mereka mencocokkan output panel surya dengan tegangan baterai untuk memastikan pengisian maksimum (amp). Misalnya: meskipun panel surya Anda dinilai pada 100 watt, Anda tidak akan mendapatkan 100 watt penuh kecuali baterai berada pada tegangan optimal. Daya/Watt selalu sama dengan Volt kali Amp atau  $P=E*I$ . Dengan pengontrol pengisian daya biasa, jika baterai Anda rendah katakanlah 12,4 volt, maka panel surya 100 watt Anda dengan nilai 6 amp pada 16,5 volt (6 amp kali 16,5 volt = 100 watt) hanya akan mengisi daya pada 6 amp kali 12,4 volt atau hanya 75 watt. Anda baru saja kehilangan 25% dari kapasitas Anda! Pengontrol MPPT mengkompensasi tegangan baterai yang lebih rendah dengan mengirimkan lebih dekat ke 8 amp ke dalam baterai 12,4 volt yang mempertahankan daya penuh panel surya 100 watt!  $100 \text{ watt} = 12,4 \text{ volt} \text{ kali } 8 \text{ amp} = 100 (P=E*I)$ .

Pengontrol Muatan dipasang antara susunan Panel Surya dan Baterai di mana secara otomatis mempertahankan pengisian daya pada baterai menggunakan siklus pengisian 3 tahap yang baru saja dijelaskan. Inverter Daya juga dapat mengisi baterai jika terhubung ke jaringan utilitas AC atau dalam kasus sistem mandiri, Generator AC Anda sendiri.

### 7.2.3 Power Inverter

Power Inverter seperti pada Gambar 7.9 adalah jantung dari sistem. Ini mengubah output DC dari susunan panel Surya atau baterai ke AC. Daya AC ini kemudian digunakan memberi daya pada beban yang terhubung dengannya atau disuplai ke jaringan (jika ketentuan untuk hal yang sama sudah ada. Itu juga dapat mengisi baterai dari Grid atau generator ketika output surya rendah atau nihil.

Energi dari array atau bank baterai adalah arus searah (DC). Ini akan menyediakan beban DC seperti lampu, kipas, pompa, motor, dan beberapa peralatan khusus. Namun, jika energi tersebut akan digunakan untuk memberi daya pada beban yang beroperasi pada arus bolak-balik (AC), seperti yang ditemukan di tempat tinggal, arus perlu dikonversi. Inverter mengubah energi DC menjadi energi AC. Inverter tersedia dalam berbagai ukuran untuk beban berukuran berbagai. Inverter kecil dapat dicolokkan ke stopkontak kendaraan untuk mengubah energi DC 12 volt dari baterai kendaraan, menjadi energi AC 120 volt untuk memberi daya pada komputer laptop. Inverter yang lebih besar tersedia untuk memberi daya pada beban yang lebih besar. Misalnya, inverter 4000 watt dapat dihubungkan ke baterai 12 volt dan digunakan untuk memberi energi pada peralatan AC kecil. Inverter string digunakan untuk mengubah daya DC dari susunan surya ke daya AC dan dapat dihubungkan ke panel daya distribusi AC (panel layanan) di tempat tinggal atau fasilitas. Inverter string tersedia dalam berbagai ukuran tergantung pada ukuran beban AC.



Gambar 7.9 Power Inverter.

(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Inverter string yang terhubung dalam suatu sistem mengubah energi DC dari susunan surya menjadi energi AC yang cocok untuk daya rumah tangga. Inverter datang dalam berbagai ukuran berdasarkan total daya sistem (watt). Inverter string yang terhubung ke sistem grid-direct (mengirimkan energi ke utilitas lokal) mendeteksi pemadaman energi yang dipasok utilitas dan akan secara otomatis dimatikan untuk alasan keamanan. Inverter tidak menyimpan energi, tetapi mengubahnya. Jika array tidak menghasilkan energi yang cukup (kurangnya sinar matahari), inverter akan mati.

Konversi arus searah menjadi arus bolak-balik dilakukan melalui inverter. Kebutuhan untuk mengkonversi adalah, idealnya sebagian besar peralatan listrik berjalan melalui arus bolak-balik.

Ada 3 jenis inverter daya yang digunakan secara komersial.

#### 1) **Inverter Daya Gelombang Persegi**

Ini adalah jenis yang paling murah dan paling tidak diinginkan. Gelombang persegi yang dihasilkannya tidak efisien dan keras pada banyak jenis peralatan. Inverter ini biasanya cukup murah, 500 watt atau kurang, dan menggunakan plug-in pemantik rokok otomotif.

#### 2) **Inverter Daya Gelombang Sinus yang Dimodifikasi**

Ini mungkin jenis inverter daya yang paling populer dan ekonomis. Ini menghasilkan bentuk gelombang AC di suatu tempat antara gelombang persegi dan gelombang sinus murni. Inverter Sine Wave yang dimodifikasi, kadang-kadang disebut inverter Quasi-Sine Wave tidak terlalu mahal dan bekerja dengan baik di semua kecuali aplikasi yang paling menuntut dan bahkan sebagian besar komputer bekerja dengan baik dengan inverter Modified Sine Wave. Namun, ada pengecualian. Beberapa peralatan yang menggunakan kontrol kecepatan motor atau yang menggunakan timer mungkin tidak berfungsi dengan benar dengan inverter

Modified Sine Wave. Dan karena semakin banyak produk konsumen yang menggunakan kontrol kecepatan & timer, disarankan agar inverter jenis ini digunakan untuk instalasi yang lebih kecil seperti kabin berkemah.

### 3) **Inverter Daya Gelombang Sinus Sejati**

Inverter daya True Sine Wave menghasilkan yang paling dekat dengan gelombang sinus murni dari semua inverter daya dan dalam banyak kasus menghasilkan daya yang lebih bersih daripada perusahaan utilitas itu sendiri. Ini akan menjalankan hampir semua jenis peralatan AC dan juga yang paling mahal. Banyak inverter daya True Sine Wave dikendalikan komputer dan secara otomatis akan hidup dan mati saat beban AC meminta servis. Mereka sepadan dengan biaya tambahan. Misalnya Inverter daya Xantrex 2500 watt memiliki fitur pencarian dan memeriksa setiap beberapa detik untuk apa pun yang menginginkan AC, kemudian menyala secara otomatis. Anda cukup menjentikkan sakelar lampu (atau apa pun) dan itu berfungsi. Saat Anda mematikan lampu atau kulkas mulai mati misalnya, inverter daya mati untuk menghemat daya baterai.

Sementara inverter Modified Sine Wave (kadang-kadang disebut inverter gelombang sinus semu) hampir setengah dari harga inverter gelombang sinus sejati, disarankan agar inverter gelombang sinus sejati digunakan, karena sebagian besar peralatan berjalan lebih efisien dan menggunakan lebih sedikit daya dengan inverter gelombang sinus sejati dibandingkan dengan inverter daya gelombang sinus yang dimodifikasi.

### 4) **Grid Tie Power Inverter**

Jika Anda terhubung ke daya perusahaan Utilitas normal dan hanya ingin menambahkan beberapa listrik Sun Power Gratis untuk mengurangi tagihan listrik Anda dan Anda tidak memerlukan sistem yang sepenuhnya independen, ada kemungkinan bahwa inverter daya Grid Tie akan sesuai dengan kebutuhan Anda. Dengan inverter daya Grid Tie, listrik apa pun yang dihasilkan panel surya Anda akan mengurangi jumlah yang dipasok oleh perusahaan utilitas, yang pada dasarnya menurunkan tagihan Anda. Dan, jika Anda menghasilkan lebih banyak daya daripada yang Anda gunakan, Anda benar-benar dapat menjual daya ekstra kembali ke perusahaan utilitas! Untuk jenis pengaturan ini, bank baterai yang jauh lebih kecil dapat dipasang hanya untuk menutupi pemadaman jangka pendek dari beberapa menit hingga satu atau dua jam. Faktanya, jika Anda tidak sering mengalami pemadaman listrik jangka panjang dan tidak memerlukan daya cadangan, maka Anda tidak memerlukan baterai sama sekali.

## 7.2.4 **Baterai**

Terakhir adalah baterai penyimpanan. Mereka menyimpan daya listrik dalam bentuk reaksi kimia. Tanpa penyimpanan hanya akan memiliki daya saat matahari bersinar atau generator sedang berjalan.

Ketika energi matahari akan disimpan untuk digunakan ketika matahari tidak bersinar, baterai digunakan. Baterai yang paling umum digunakan untuk aplikasi PV perumahan adalah baterai timbal-asam seperti pada Gambar 7.12. Pengguna surya harus mencari baterai siklus dalam, mirip dengan apa yang digunakan dalam kereta golf, tetapi dirancang untuk sistem energi terbarukan. Ada dua jenis baterai timbal-asam: asam timbal banjir (FLA), alas kaca tertutup yang diserap (AGM). Tegangan baterai dapat bervariasi dari 2, 6, dan 12 volt. Amp-jam individu dapat bervariasi. Misalnya, baterai "A" (gambar di bawah) dinilai pada 12 volt, dan 35 amp-jam, sedangkan baterai "B" dinilai pada 12 volt dan 58 amp-jam seperti pada Gambar 7.13. Dimensi baterai individu dapat bervariasi





Gambar 7.12 Baterai A. Contoh baterai surya timbal-asam yang disegel.  
(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))



Gambar 7.13 Baterai B. Contoh baterai gel, dinilai pada 12 volt dan 58 amp-jam.  
(Sumber : (Rajashekar Reddy Palle, Jens Schuster, Yousuf Pasha Shaik, 2018))

Ada 4 jenis baterai dasar. Jenis pertama yang dibahas di sini lebih untuk tujuan kesenangan. 3 jenis berikutnya adalah baterai tipe industri yang lebih berat. Mereka semua juga dianggap deep cycle dan biasanya jenis Lead Acid dengan pelat internal yang jauh lebih tebal yang dapat menahan banyak siklus pelepasan yang dalam. 3 berikutnya ini semuanya dirancang untuk sistem energi alternatif.

#### 1) RV / Marinir / Kereta Golf

Baterai siklus dalam tipe RV atau Marine pada dasarnya untuk kapal & kemping dan hanya cocok untuk sistem yang sangat kecil. Mereka dapat digunakan tetapi tidak benar-benar memiliki kapasitas untuk layanan berkelanjutan dengan banyak siklus pengisian / pengosongan selama bertahun-tahun. Baterai jenis Biasa atau Mobil tidak boleh digunakan sama sekali karena tidak dapat dikosongkan terlalu banyak tanpa kerusakan internal. Baterai yang sangat populer untuk sistem kecil adalah baterai Golf Cart. Mereka agak lebih mahal daripada baterai rekreasi siklus dalam tetapi mungkin merupakan pilihan yang paling murah untuk sistem kecil dengan anggaran terbatas.

#### 2) Jenis Banjir

Ini adalah baterai asam timbal yang memiliki tutup untuk menambahkan air. Banyak produsen membuat jenis ini untuk penggunaan Energi Surya. Trojan, Surrette, dan Déjà mungkin yang paling terkenal. Mereka cukup murah dan bekerja dengan baik selama bertahun-tahun. Semua baterai yang kebanjiran melepaskan gas saat diisi dan tidak digunakan di dalam ruangan. Jika dipasang di selungkup, sistem ventilasi harus digunakan untuk mengeluarkan gas yang dapat meledak.

### 3) Gel

Jangan bingung dengan baterai bebas perawatan, baterai gel tertutup tidak memiliki ventilasi dan tidak akan melepaskan gas selama proses pengisian daya seperti yang dilakukan baterai yang kebanjiran. Oleh karena itu ventilasi tidak diperlukan dan mereka dapat digunakan di dalam ruangan. Ini adalah keuntungan besar karena memungkinkan baterai mempertahankan suhu yang lebih konstan dan berkinerja lebih baik.

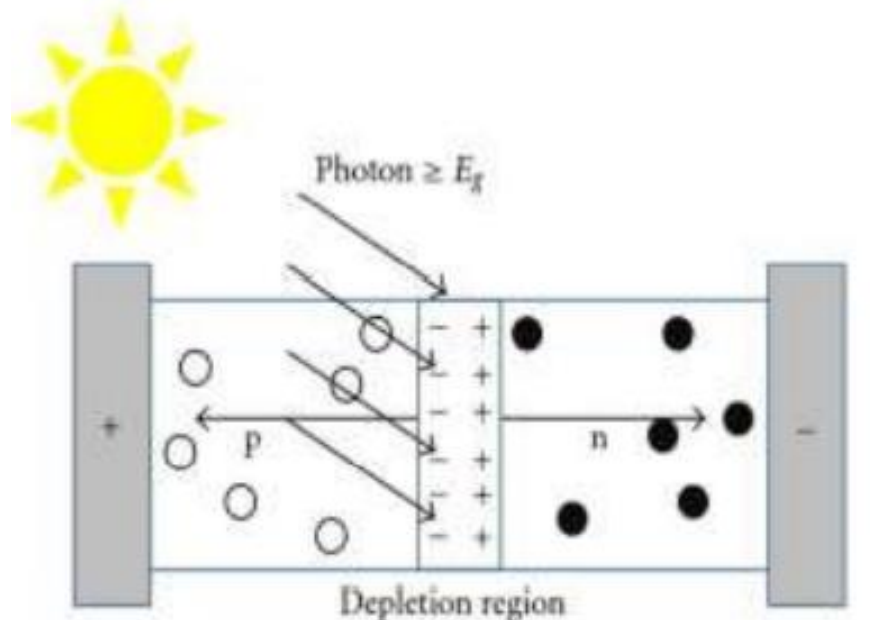
### 4) AGM

Baterai Absorbed Glass Mat bisa dibilang yang terbaik yang tersedia untuk penggunaan Tenaga Surya. Alas kaca anyaman digunakan di antara pelat untuk menahan elektrolit. Mereka tahan bocor/tumpahan, tidak mengeluarkan gas saat mengisi daya, dan memiliki kinerja yang unggul. Mereka memiliki semua keunggulan dari jenis gel yang disegel dan berkualitas lebih tinggi, mempertahankan tegangan lebih baik, self discharge lebih lambat, dan bertahan lebih lama. Seri Sun Xtender oleh Concorde Battery adalah contoh yang sangat baik dari baterai AGM. Mereka lebih mahal, tetapi Anda biasanya mendapatkan apa yang Anda bayar. Anda akan menemukan jenis baterai ini digunakan di pesawat terbang, rumah sakit, dan instalasi telepon / menara seluler jarak jauh.

## 7.3 Sistem Photovoltaic

Prinsip dasar sel surya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.14 tergantung pada efek fotovoltaiik yaitu, pada paparan sel surya terhadap sinar matahari, tegangan dan arus listrik diinduksi dalam material. Sinar matahari memancarkan partikel tak terlihat yang dikenal sebagai foton. Sel surya terdiri dari tiga bagian yaitu lapisan atas atau lapisan tipe-n, lapisan tengah (lapisan penipisan) dan lapisan bawah atau tipe-p. Cahaya panjang gelombang 350-1140 nm terpikat ke dalam lapisan penipisan. Yang terdiri dari atom netral, foton yang dipancarkan oleh sinar matahari ditembus ke lapisan penipisan membuat elektron bebas dan lubang. Elektron bebas bergerak menuju lapisan tipe-n dan lubang turun ke lapisan tipe-p. Di sana dengan menghubungkan kabel antara elektroda lapisan atas dan bawah menyediakan jalur bagi elektron untuk bergerak menuju lubang yang merupakan arus listrik.

Setiap sel menghasilkan 0,5v hingga 1v. Ketika sel surya ini terhubung secara seri dan kombinasi paralel, tegangan dan arus yang diperlukan diperoleh.



Gambar 7.14 Pengoperasian sel surya.

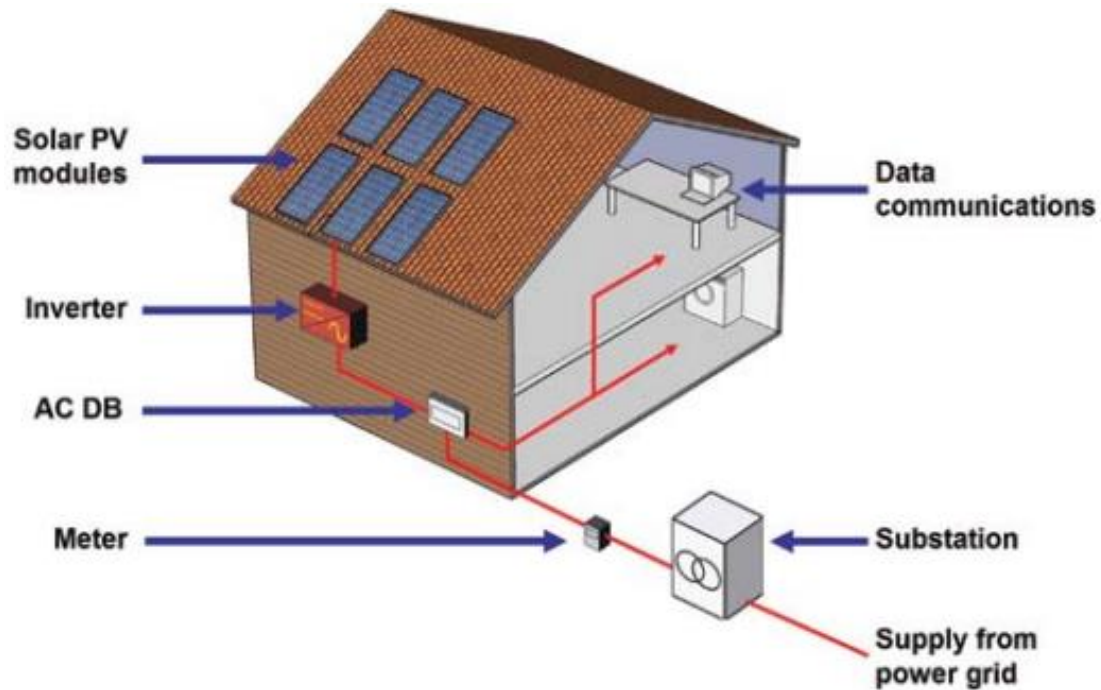
(Sumber : (Maddileti, 2019))

Sistem PV surya dapat diklasifikasikan berdasarkan aplikasi penggunaan akhir teknologi. Pada dasarnya ada tiga jenis sistem PV tenaga surya di mana listrik dapat dihasilkan yaitu : sistem PV on-grid (atau terikat jaringan), off-grid (atau berdiri sendiri), dan Hybrid.

### 7.3.1 Sistem PV On-Grid

Aplikasi utama PV surya di Singapura terhubung ke jaringan, karena pulau utama Singapura tertutup dengan baik oleh jaringan listrik nasional. Sebagian besar sistem PV surya dipasang pada bangunan atau dipasang di tanah jika tanah tidak menjadi kendala. Untuk bangunan, mereka dipasang di atap atau diintegrasikan ke dalam gedung. Yang terakhir ini juga dikenal sebagai Building Integrated Photovoltaics ("BIPV"). Dengan BIPV, modul PV biasanya menggantikan komponen bangunan lain, misalnya kaca jendela atau atap / dinding kelongsong, sehingga melayani tujuan ganda dan mengimbangi beberapa biaya.

Konfigurasi sistem PV surya yang terhubung ke jaringan ditunjukkan pada Gambar 7.15



Gambar 7.15 Konfigurasi sistem PV surya yang terhubung ke jaringan  
(Sumber : (David Tan, 2011))

Sebuah bangunan memiliki dua catu daya paralel, satu dari sistem PV surya dan yang lainnya dari jaringan listrik. Catu daya gabungan memberi makan semua beban yang terhubung ke ACDB utama.

Rasio pasokan PV surya terhadap catu jaringan listrik bervariasi, tergantung pada ukuran sistem PV surya. Setiap kali pasokan PV surya melebihi permintaan bangunan, kelebihan listrik akan diekspor ke jaringan. Ketika tidak ada sinar matahari untuk menghasilkan listrik PV di malam hari, jaringan listrik akan memasok semua permintaan bangunan.

Sistem yang terhubung ke jaringan dapat menjadi cara yang efektif untuk mengurangi ketergantungan Anda pada tenaga utilitas, meningkatkan produksi energi terbarukan, dan meningkatkan lingkungan.

Surya on-grid juga dikenal sebagai grid-tie atau grid feed tata surya terdiri dari panel surya, inverter, meteran dan jaringan listrik / utilitas. Energi listrik yang diperoleh melalui solar cell adalah arus searah. Arus bolak-balik digunakan untuk memberi daya pada sebagian besar peralatan. Arus bolak-balik diperoleh melalui inverter yang mengalir melalui meteran listrik yang mengumpankan listrik ke perangkat.

Jika pembangkit listrik tenaga surya menghasilkan lebih energi yang dibutuhkan, maka kelebihan energy listrik ini dikirim kembali atau dapat dijual/dialurkan ke jaringan listrik pemerintah, dan dapat menghasilkan sumber pemasukan. Pada malam hari atau ketika sistem tenaga surya tidak dalam kondisi yang tepat listrik dapat digunakan dari jaringan listrik.

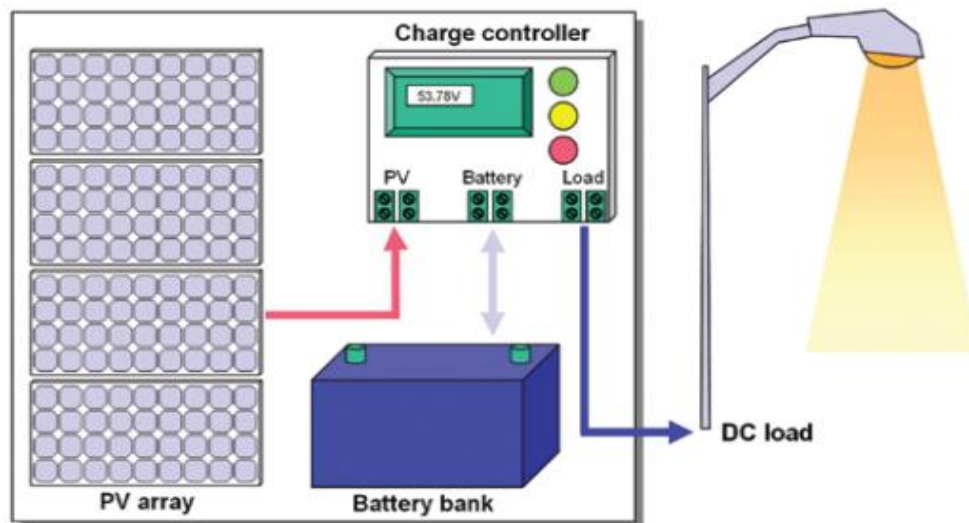
#### **Kerugian dari surya on-grid:**

Kerugian dari surya on-grid adalah bahwa selama kondisi iklim tertentu atau ketika ada masalah dengan jaringan listrik, kita tidak dapat menyimpan listrik untuk penggunaan segera yang menjadi kelemahan untuk sistem ini.

### **7.3.2 Sistem PV Off-Grid**

Sistem PV surya off-grid berlaku untuk area tanpa jaringan listrik. Saat ini, sistem PV surya semacam itu biasanya dipasang di lokasi terpencil di mana jaringan listrik jauh, seperti daerah pedesaan atau pulau-pulau lepas pantai. Tetapi mereka juga dapat dipasang di dalam kota dalam situasi di mana tidak nyaman atau terlalu mahal untuk memanfaatkan listrik dari jaringan listrik. Misalnya, di Singapura, beberapa lampu tanda parkir URA ditenagai oleh sistem PV surya off-grid.

Sistem PV surya off-grid membutuhkan baterai isi ulang siklus dalam seperti baterai timbal-asam, nikel-kadmium atau lithium-ion untuk menyimpan listrik untuk digunakan dalam kondisi di mana ada sedikit atau tidak ada output dari sistem PV surya, seperti pada malam hari, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.16.



Gambar 7.16 Konfigurasi sistem PV surya off-grid.  
(Sumber : (David Tan, 2011))

Dalam sistem tenaga surya off-grid juga dikenal sebagai sistem tenaga yang berdiri sendiri memiliki penyimpanan baterai alih-alih konektivitas ke jaringan listrik. Tenaga surya off grid minimal menggunakan listrik yang berasal dari jaringan. Ini terdiri dari sel surya, inverter dan bank baterai jika diperlukan generator juga dapat digunakan untuk cadangan daya.

### Cara kerja dari sistem tenaga surya off grid:

- 1) Konversi cahaya matahari menjadi listrik dilakukan melalui sel surya dan arus searah ini diubah menjadi arus bolak-balik menggunakan inverter. Setelah memasok listrik ke perangkat jika ada kelebihan jumlah listrik yang tertinggal, itu disimpan dalam baterai yang bertindak sebagai cadangan ketika tidak ada dukungan energi matahari.

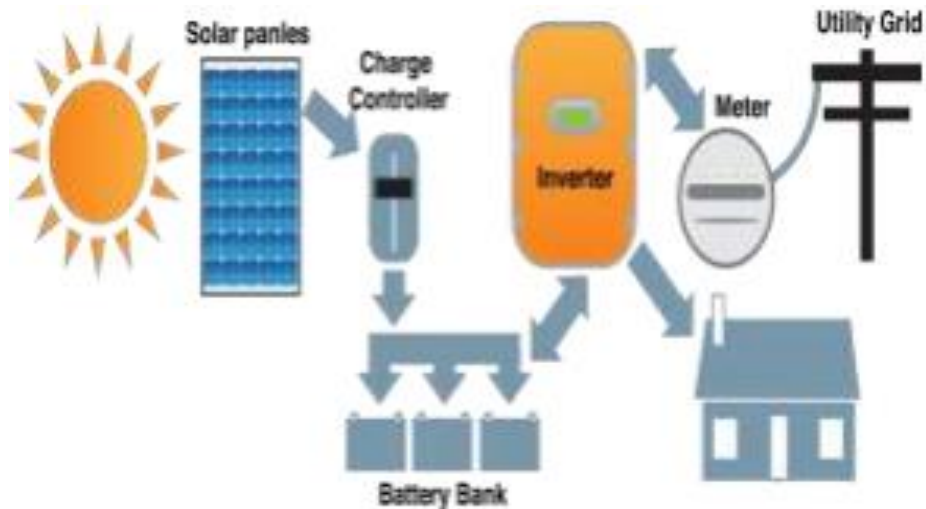
Tetapi pada saat-saat ketika kebutuhan listrik lebih banyak dan tidak ada tenaga surya yang cukup atau tidak ada daya yang memadai untuk memasok dari baterai, menjadi sulit untuk melakukan persyaratan yang diperlukan. Sistem ini lebih menguntungkan bagi orang-orang yang tinggal di daerah terpencil di mana tidak ada aksesibilitas ke jaringan utilitas. Jadi, untuk mengatasi kerugian dari sistem tenaga surya on grid dan off grid seseorang dapat menanamkan sistem tenaga surya hibrida alih-alih dua teknik pembangkit listrik ini.

### 7.3.3 Sistem PV Surya Hibrida

Hybrid solar adalah penggabungan sistem tenaga surya on grid dan off grid seperti pada Gambar 7.17. Penyimpanan daya melalui baterai untuk digunakan kapan saja, tanpa mengkonsumsinya dari jaringan listrik membuat sistem ini nyaman digunakan dan mengurangi listrik.

#### Kerja sistem tenaga surya Hibrida :

- 1) Pada siang hari, sinar matahari diubah menjadi listrik. Setiap jumlah berlebih akan disimpan dalam baterai yang mirip dengan sistem off grid. Jika ada kelebihan daya yang disimpan, itu dimasukkan kembali ke jaringan listrik yang mirip dengan on grid solar. Ketika tidak ada dukungan energi matahari atau jaringan listrik, daya dapat digunakan dari baterai. Demikian pula, ketika tidak ada cadangan baterai yang cukup yang tersisa dan tidak ada tenaga surya, aliran listrik yang tidak terputus dapat diperoleh dari jaringan listrik dan baterai juga dapat diisi.



Gambar 7.17 Sistem tenaga surya hibrida.  
(Sumber : (Maddileti, 2019))

## 7.4 Efisiensi dan Performansi Sistem Photovoltaic

Ketersediaan sumber energi lainnya merupakan faktor pertama yang harus diperhatikan. Misalnya, jarak ke jaringan listrik dan ketersediaan mesin pembakaran internal harus diteliti karena mungkin lebih hemat biaya untuk memperluas garis jaringan ke lokasi terdekat atau menggunakan mesin pembakaran internal yang tersedia jika kebutuhan energinya besar. Dalam kasus ekstensi grid, muncul

pertanyaan langsung: Seberapa jauh seharusnya garis grid dari situs untuk memastikan efektivitas biaya ekstensinya? Jawabannya bervariasi. Di lokasi medan yang relatif datar, ekstensi grid dapat menelan biaya sekitar \$10,000+ per kilometer (~\$16,000+ per mil), sedangkan di daerah medan yang lebih terjal biayanya bisa mencapai \$20,000+ per kilometer (~\$32,000+ per mil). Untuk menyeberangi selokan, gunung, atau medan sulit lainnya, harganya lebih mahal. Namun, biaya aktual bervariasi menurut negara. Biasanya, opsi surya dianggap layak untuk sebagian besar proyek energi kecil dan menengah di mana jaringannya lebih dari satu kilometer jauhnya.

Untuk sistem tenaga desa, masyarakat harus setidaknya beberapa kilometer dari layanan listrik terdekat; semakin jauh mereka, semakin kompetitif pilihan surya. Jika layanan listrik berada di dekatnya, biasanya merupakan opsi biaya yang lebih rendah untuk memperpanjang saluran listrik dan membeli transformator. Ini mungkin juga memungkinkan elektrifikasi komunitas secara keseluruhan. Namun, kriteria ini terkadang terdistorsi. Misalnya, jika dana pengembangan tersedia tetapi hanya untuk opsi energi terbarukan, listrik konvensional mungkin merupakan pilihan terbaik, tetapi pemilihan teknologi dipaksakan untuk mendukung PV.

Dinamika pilihan teknologi yang diamanatkan daripada opsi terbaik umumnya harus dihindari dalam desain proyek. Selain itu, masyarakat sering cenderung ke arah PV, bahkan di daerah elektrifikasi, karena pengaturan ini membuat mereka bebas dari tagihan listrik di masa depan. Ini mungkin bukan solusi yang indah seperti yang tampaknya: Beban biaya hanya dimuat ke biaya proyek awal yang ditanggung oleh lembaga yang menyumbang, dan mengurangi masukan masyarakat dari waktu ke waktu dapat bertentangan dengan prinsip-prinsip keberlanjutan. Masyarakat membutuhkan biaya berkelanjutan (dengan proporsi yang dapat dikelola) untuk memotivasi dan memperkuat pola pembayaran tarif listrik secara teratur.

Tabel 7.1 mengasumsikan beberapa beban dasar untuk tempat tinggal kecil di luar jaringan di Oaxaca, Meksiko. diasumsikan di musim dingin dengan 5,4 jam matahari tersedia pada bulan Desember. Baterai harus dirancang untuk otonomi 3 hari, tidak melebihi kedalaman pengosongan 45% (lihat Bab 11). Beban diasumsikan 1.040 Wh/hari

Tabel 7.1 efisiensi Komponen sistem Pv rata-rata

Array PV	80–85%
Inverter	80–90%
Wire	97–98%
Disconnects, Sekering	98–99%
Total efisiensi sistem PV yang terikat grid	60–75%
Efisiensi Baterai baru	65–75%
Total efisiensi sistem PV off-grid (AC)	40–56%
Total efisiensi sistem PV off-grid (DC)	49–62%

### Soal

- 1) Jelaskan kelebihan dan kekurangan dari sistem pembangkit listrik tenaga surya?
- 2) Gambarkan rangkaian system dari pembangkit listrik tenaga surya dan jelaskan setiap komponen penyusunnya !
- 3) Jelaskan cara kerja dari system PV off-grid, on-grid dan hybrid !
- 4) Jika dilihat dari jenis penerapan Photovoltaic dibagi menjadi off-grid, on-grid dan hybrid lebih efisien manakah diantara ketiganya? Dan jelaskan?
- 5) Jelaskan siklus tahapan pengisian dari charge controller?



# BAB VIII

## TRANSFORMATOR

### 8.1 Pendahuluan

Transformator adalah peralatan yang berharga dalam sistem tenaga listrik, karena memungkinkan kita untuk memanfaatkan tingkat tegangan yang berbeda di seluruh sistem untuk nilai yang paling ekonomis. Pembangkitan daya pada tingkat mesin sinkron biasanya pada tegangan yang relatif rendah, yang paling diinginkan secara ekonomis. Peningkatan tegangan yang dihasilkan ini ke tegangan tinggi, tegangan ekstra tinggi, atau bahkan ke tegangan ultra-tinggi dilakukan melalui transformator daya agar sesuai dengan persyaratan transmisi daya untuk meminimalkan kerugian dan meningkatkan kapasitas transmisi saluran. Tingkat tegangan transmisi ini kemudian diturunkan dalam banyak tahap untuk tujuan distribusi dan pemanfaatan.

Trafo digunakan dalam tiga bidang aplikasi yang luas:

- Transmisi daya listrik, yang melibatkan menaikkan atau menurunkan tegangan di sirkuit AC dengan penurunan atau peningkatan arus yang sesuai.
- Transmisi sinyal dengan pencocokan impedansi untuk transfer daya maksimum.
- Dalam elektronika daya, untuk konversi dan kontrol energi.

Dalam pembangkit listrik dan transmisi, generator dapat beroperasi pada kisaran 10-20 kV, sedangkan transmisi tegangan tinggi biasanya di atas 200 kV; distribusi akan berada di, katakanlah, 10 kV, selanjutnya diturunkan menjadi 110 V atau 230 V untuk suplai perumahan.

Transformer juga cocok untuk pencocokan impedansi untuk mentransfer daya maksimum dalam, katakanlah, sistem audio, di mana resistansi beban speaker mungkin  $8\Omega$ . Ini akan menjadi dicocokkan dengan impedansi keluaran penguat yang diukur dalam  $k\Omega$ . Aplikasi penting untuk elektronika daya adalah secara elektrik mengisolasi satu sirkuit dari sirkuit lainnya untuk memenuhi persyaratan peraturan keselamatan.

Prinsip dasar operasi transformator adalah bahwa ukuran berbanding terbalik dengan frekuensi operasi (sampai titik tertentu), dan ini telah membuka peran transformator dari peran yang lebih tradisional pada frekuensi daya. Ketika transformator digunakan dalam aplikasi elektronika daya yang menggabungkan isolasi listrik, tegangan yang muncul pada sakelar dapat disesuaikan oleh transformator untuk mengurangi tekanan pada sakelar.

Transformator terdiri dari dua atau lebih belitan yang saling dikopel. Sumber tegangan bolak-balik dihubungkan ke salah satu belitan – biasanya disebut sebagai belitan primer – dan ini menghasilkan medan fluks magnet yang berubah. Fluks yang dihasilkan akan bergantung pada jumlah belitan pada gulungan primer. Biasanya, belitan dililitkan pada inti bahan magnetik tanpa celah udara untuk mendapatkan tingkat fluks yang tinggi, sehingga fluks akan tergantung pada reluktansi inti, termasuk dimensi fisik panjang inti dan luas penampang di samping terhadap jumlah putaran.

Proses manufaktur dapat menghasilkan celah udara yang sangat kecil, yang memiliki keuntungan dapat mengontrol besarnya arus masuk. Fluks magnet digabungkan ke belitan lain disebut belitan sekunder dan tegangan diinduksi sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik. Induktor menyimpan energi, sedangkan, dalam transformator, energi ditransfer dari beban primer ke beban sekunder.

Biasanya, laminasi besi digunakan dalam konstruksi transformator listrik besar untuk mengurangi kehilangan arus eddy di inti. Paduan feromagnetik terkompresi (ferit) digunakan dalam aplikasi rangkaian elektronika daya untuk operasi frekuensi tinggi.

### 8.1.1 Transformator Ideal

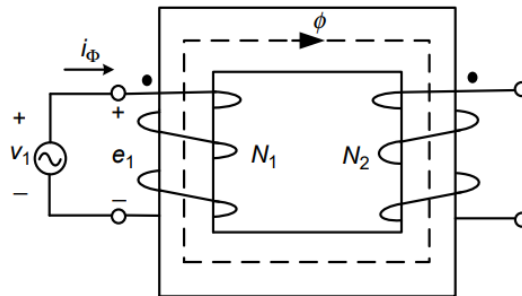
Sebuah transformator dua-belitan dasar ditunjukkan pada Gambar 8.1, di mana belitan dililitkan pada inti magnet. Eksitasi sinusoidal diterapkan pada belitan input dan belitan kedua pada rangkaian terbuka. Gulungan ini biasanya disebut sebagai gulungan primer dan sekunder. Belitan primer memiliki induktansi  $L_m$  yang disebut induktansi magnetisasi. Ini diberikan oleh:

$$L_m = \frac{N_1^2}{R_c} \quad 8.1$$

dan reluctance inti adalah

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} \quad 8.2$$

di sini  $l_c$  adalah panjang rata-rata jalur magnet di sekitar inti tertutup dan  $A_c$  adalah luas penampang inti.



Gambar 8.1 Transformator dua belitan: tidak ada kondisi beban.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Terbukti, ketika permeabilitas relatif inti meningkat, reluktansi menjadi lebih kecil, ini berarti bahwa mmf ( $N_1 I_1$ ) yang diperlukan untuk membentuk fluks dalam inti juga menjadi lebih kecil. Untuk alasan ini, biasanya diasumsikan bahwa arus magnetisasi untuk membentuk fluks di inti sangat kecil

#### 1) Kondisi tanpa beban

Gulungan sekunder pada Gambar 8.1 berada dalam rangkaian terbuka di bawah kondisi tanpa beban. Arus magnetisasi  $i_\phi$  mengalir dalam belitan primer, yang membentuk fluks bolak-balik  $\phi$  dalam inti magnet. Hubungan dasar antara tegangan yang diberikan dan fluks dalam inti mengikuti hukum Ampere dan hukum Faraday:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad 8.3$$

Menurut hukum Lenz,  $e_1$  adalah counter-emf untuk  $v_1$  dan, sesuai dengan hukum tegangan Kirchhoff,  $v_1 = e_1$ . Pada titik ini, kita akan mengasumsikan bahwa kita berhadapan dengan eksitasi sinusoidal pada frekuensi  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ) dan amplitudo fluks adalah  $\phi_{max}$

$$\phi(t) = \phi_{max} \sin \omega t \quad 8.4$$



$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{max} \cos \omega t \quad 8.5$$

atau, dalam hal fungsi sinus

$$e_1(t) = \omega N_1 \phi_{max} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad 8.6$$

yang menunjukkan bahwa fluks tertinggal dari tegangan yang diberikan sebesar 90 . Amplitudo EMF primer adalah

$$E_{1_{max}} = 2\pi f N_1 \phi_{max} \quad 8.7$$

Fluks magnet dapat dinyatakan dalam kerapatan fluks:

$$\phi_{max} = B_{max} A_c \quad 8.8$$

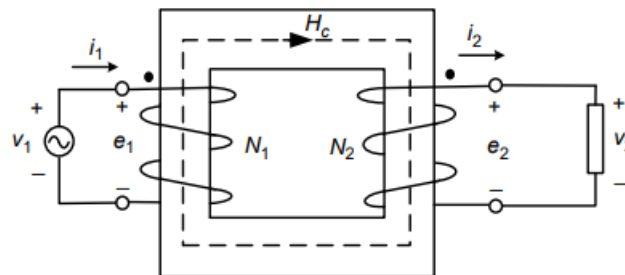
dan berikut ini:

$$E_{1_{rms}} = \frac{E_{1_{max}}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 B_{max} A_c \quad 8.9$$

Karena  $V_{1_{rms}} = E_{1_{rms}}$ , nilai rms dari tegangan input berhubungan dengan jumlah lilitan pada input atau belitan primer, rapat fluks maksimum dan luas penampang inti dengan:

$$V_{1_{rms}} = 8.44 f N_1 B_{max} A_c \quad 8.10$$

Gambar 8.2 menjelaskan mengenai persamaan transformator terkenal untuk eksitasi sinusoidal



Gambar 8.2 Transformator dua belitan: kondisi beban.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

## 2) Kondisi dengan beban

Pada titik ini, kita akan menerapkan beban pada belitan sekunder dengan lilitan  $N_2$ , menyebabkan arus  $i_2$  mengalir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.2. Tegangan  $v_1$  yang diterapkan pada belitan primer membentuk fluks  $\phi$  seperti sebelumnya:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad 8.11$$

Fluks inti bersama menghubungkan belitan sekunder dan menginduksi ggl  $e_2$  pada belitan sekunder dan tegangan  $v_2$  melintasi beban

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad 8.12$$

Mengambil rasio  $v_1/v_2$  dari Persamaan 8.11 dan 8.12 menghasilkan

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 8.13$$

Dalam hal nilai rms dari tegangan

$$\frac{V_{1rms}}{V_{2rms}} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad 8.14$$

Singkatnya, rasio transformasi tegangan berbanding lurus dengan rasio belitan transformator  $a$ .

Langkah selanjutnya adalah melihat pengaruh arus beban. Mmf yang sesuai dengan arus beban adalah  $N_2 i_2$ . Hukum Ampere menyatakan bahwa integral dari intensitas medan magnet di sekitar loop tertutup yang menghubungkan gulungan primer dan sekunder sama dengan mmf bersih. Dengan arah mmf yang diberikan oleh aturan tangan kanan, maka mengacu pada Gambar 8.2, kita memiliki:

$$H_c l_c = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad 8.15$$

Tanda negatif  $N_2 i_2$  muncul karena arus pada belitan sekunder melawan fluks  $\phi$  menurut konvensi aturan ulir kanan.

Kerapatan fluks  $B_c$  di dalam inti berhubungan dengan  $H_c$  oleh permeabilitas magnetik

$$B_c = \mu_r \mu_0 H_c \quad 8.16$$

Fluks di dalam inti adalah

$$\phi_c = B_c A_c \quad 8.17$$

Menggabungkan Persamaan 8.2, 8.15, 8.16 dan 8.17 menghasilkan

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \phi_c \times R_c \quad 8.18$$

Dalam transformator ideal, kita asumsikan inti memiliki permeabilitas tak terhingga ( $\mu_r \rightarrow \infty$ ), bahwa hambatan belitan dapat diabaikan dan tidak ada rugi inti ( $\sigma_c \rightarrow 0$ ). Kemampuan permeabel tak terbatas dalam inti berarti bahwa keengganan magnet dapat diabaikan, yang, pada gilirannya, berarti bahwa mmf yang diperlukan untuk membentuk fluks sangat kecil. Jadi, jika mmf  $N_2 i_2$  sekunder dibentuk oleh beban, itu harus dilawan oleh mmf  $N_1 i_1$  di primer untuk memenuhi Persamaan 8.18. Dalam transformator ideal hipotetis, Persamaan 8.18 menjadi

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad 8.19$$

Jadi

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad 8.20$$

Atau

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad 8.21$$

Dan dalam hal nilai rms

$$\frac{I_{1rms}}{I_{2rms}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad 8.22$$

Jadi, transformator ideal mengubah arus dalam kebalikan dari rasio belitan belitannya. Tidak ada rugi-rugi pada trafo ideal dan daya masukan sama dengan daya keluaran

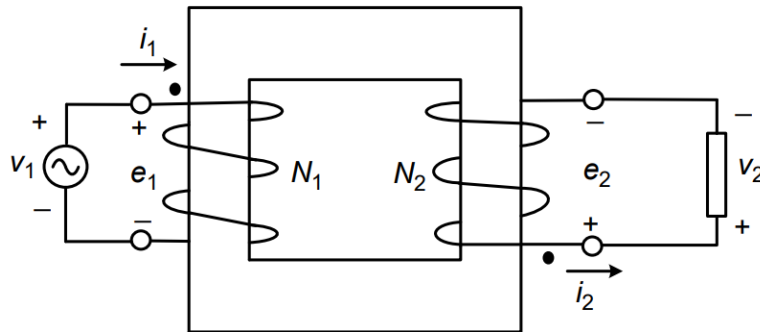
$$v_1 i_1 = N_2 i_2 \quad 8.23$$

Karena itu

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad 8.24$$

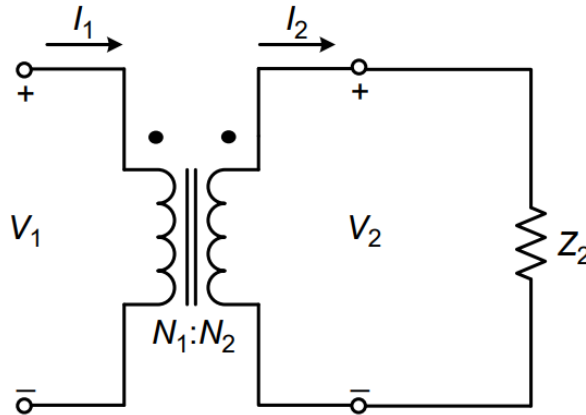
### 3) Konvensi Dot

Gulungan pada Gambar 8.3 menunjukkan arus input ke terminal tegangan positif belitan primer dan arus beban keluar dari terminal tegangan positif belitan sekunder. Ini dengan mudah memenuhi kondisi yang dikenakan pada mmf oleh hukum Ampere. Namun, kita dapat dengan mudah menggambar belitan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.4, dan sekali lagi kita dapat dengan bijaksana memilih terminal tegangan positif dan arah arus positif, sehingga hubungan dalam Persamaan 8.15 berlaku. Jelas, perhatian besar harus diberikan dalam menggambar belitan dan dalam memilih polaritas tegangan dan arus; menambahkan lebih banyak gulungan membuat situasi menjadi lebih kompleks. Pada kenyataannya, sebagian besar transformator tertutup dan tidak mungkin dengan inspeksi untuk mengetahui arah di mana setiap kumparan dililit. Untuk menghindari kebingungan, konvensi titik diadopsi.



Gambar 8.3 Transformator yang ideal: kondisi beban, belitan alternatif.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Dengan demikian, transformator pada Gambar 8.3 diwakili oleh simbol rangkaian listrik pada Gambar 8.4. Batang paralel antara dua belitan mewakili inti feromagnetik yang sama.

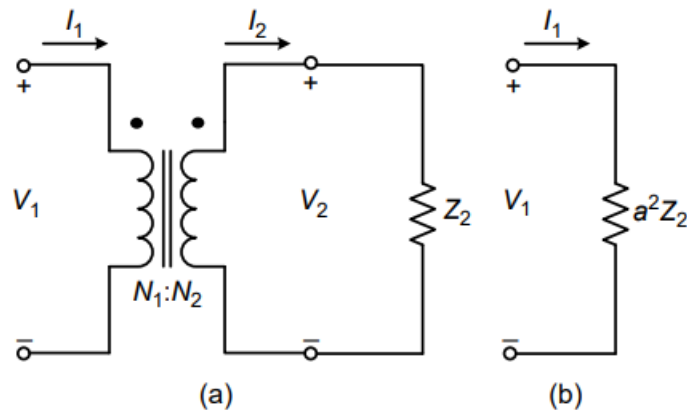


Gambar 8.4 Simbol sirkuit listrik untuk transformator.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Tanda titik pada Gambar 8.3 dan 8.4 menunjukkan terminal dengan polaritas yang sesuai. Jika salah satu mengikuti salah satu belitan, dimulai dari terminal putus-putus, kedua belitan melingkari inti dalam arah yang sama terhadap fluks (sesuai dengan aturan sekrup tangan kanan). Menggunakan konvensi ini, tegangan pada terminal putus-putus memiliki polaritas sesaat yang sama untuk belitan primer dan sekunder. Demikian pula, arus seperti yang ditunjukkan dalam fase. Menurut konvensi, arus sesaat berada dalam arah yang berlawanan melalui belitan, jadi karena itu mmfs mereka dibatalkan. Dalam simbol rangkaian listrik untuk transformator, kita dapat menyimpulkan arah fisik belitan dari konvensi titik.

#### 4) Impedansi terpantul (Reflected impedance)

Ketika sinyal ditransmisikan dalam suatu rangkaian, teorema transfer daya maksimum menyatakan bahwa daya maksimum ditransfer dari sumber ke beban ketika impedansi sumber sama dengan impedansi beban pada Gambar 8.5. Trafo dapat digunakan untuk mencocokkan impedansi antara sumber dan beban



Gambar 8.5 Impedansi yang dipantulkan dalam belitan transformator.

(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Rasio  $V_1/I_1$  adalah impedansi yang terlihat oleh terminal input transformator, mengingat:

$$V_1 = aV_2 \quad 8.25$$

$$I_1 = \frac{1}{a}I_2 \quad 8.26$$

$$Z_2^1 = \frac{V_1}{I_1} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \quad 8.27$$

di mana  $Z_2$  adalah impedansi beban. Jadi, impedansi  $Z_2$  di sekunder dapat diganti dengan impedansi setara  $Z_2^1$ , seperti yang terlihat dari terminal primer. Rangkaian ekuivalen trans dari Gambar 8.5(a) ditunjukkan pada Gambar 8.5(b).

Impedansi yang dipantulkan biasanya digunakan dalam rangkaian elektronik untuk mencapai transfer daya maksimum

### 5) Ringkasan

Dalam transformator ideal:

Tegangan ditransformasikan dalam rasio putaran langsung

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = aV_2 \quad 8.28$$

Arus ditransformasikan dalam rasio terbalik putaran

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = aI_2 \quad 8.29$$

Impedansi ditransformasikan dalam kuadrat rasio langsung

$$Z_2^1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 = a^2 Z_2 \quad 8.30$$

Notasi  $Z_2^1$  berarti impedansi sekunder  $Z_2$  tercermin dalam primer

Tegangan yang diberikan pada belitan berkaitan dengan frekuensi, jumlah belitan, rapat fluks maksimum, dan luas penampang inti.

$$V_{rms} = 8.44 fNB_{max}A_c \quad 8.31$$

Dalam membangun rangkaian listrik ekuivalen untuk transformator, kita dapat merujuk besaran dalam satu belitan ke belitan lainnya sehingga tegangan sekunder yang dipantulkan ke belitan primer adalah  $V_2^1$  dan tegangan sekunder yang dipantulkan ke belitan primer adalah  $V_1^2$ .

Hubungan tersebut adalah:

$$V_2^1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = aV_2 \quad 8.32$$

$$V_1^2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 = \frac{1}{a}V_1 \quad 8.33$$

### 8.1.2 Transformator praktis

Sejauh ini, kami telah mengidealkan transformator untuk menyederhanakan analisisnya. Namun, dalam transformator praktis, faktor-faktor berikut harus diperhitungkan:

1. arus magnetisasi dan rugi inti;
2. resistensi belitan;
3. fluks kebocoran magnet

Dalam aplikasi elektronika daya, kapasitansi belitan mungkin menjadi masalah karena kondisi resonansi dapat terjadi pada frekuensi tinggi.

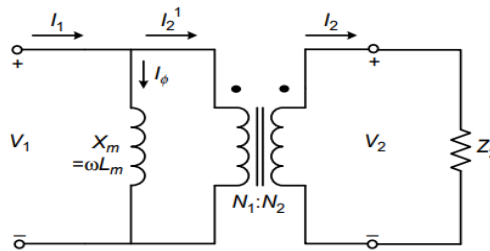
#### 1) Arus Magnetisasi dan Rugi Inti

Gambar 8.6 menjelaskan mengenai arus dalam belitan primer transformator memainkan dua peran:

- a) Ini mengatur fluks timbal balik sesuai dengan hukum Ampere.
- b) Ini menyeimbangkan efek demagnetisasi dari arus beban pada belitan sekunder

mmf bersih adalah  $N_1 I_1 - N_2 I_2$  dan, dalam hal hukum sirkuit magnetik, ini mungkin terkait dengan reluktansi inti transformator

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \phi_m \times \mathcal{R} \quad 8.34$$



Gambar 8.6 Sirkuit listrik untuk transformator dengan induktansi magnetisasi.

(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Kita sebelumnya berasumsi bahwa, dalam transformator ideal, inti memiliki permeabilitas tak terbatas. Namun pada kenyataannya, ada permeabilitas yang terbatas dan ada induktansi yang terkait dengan reluktansi inti. Kita menyebutnya induktansi magnetisasi  $L_m$ , seperti yang dijelaskan dalam Bagian 8.1 dan ditunjukkan pada Gambar 8.6.

Jadi, arus primer memiliki dua komponen: komponen magnetisasi  $I_\phi$  dan komponen beban yang dipantulkan ke dalam primer  $I_2^1$ :

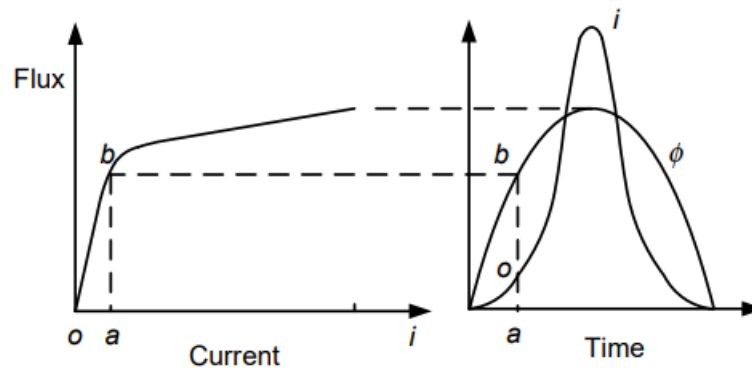
$$I_2^1 = \frac{1}{a} I_2 \quad 8.35$$

Arus magnetisasi sesaat,  $i_\phi$ , yang membentuk fluks dalam inti feromagnetik, ditentukan oleh sifat magnetik inti.

Mari kita periksa pembentukan fluks inti secara lebih rinci. Kembali ke kondisi tanpa beban dan dengan asumsi seperti sebelumnya bahwa resistansi belitan dapat diabaikan, menurut Persamaan 8.4 dan 8.6, tegangan yang diterapkan menyebabkan fluks di inti sebesar  $90^\circ$ .

Pada titik ini, kita perlu mengalihkan perhatian kita ke arus magnetisasi. Untuk menyederhanakan konstruksi kurva arus magnetisasi, kita akan menggunakan kurva magnetisasi normal nilai tunggal untuk fluks versus arus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.7. Asumsi ini, pada dasarnya, mengabaikan histeresis. Fluks yang sesuai dengan arus  $oa$  adalah  $ab$  dan nilai arus  $oa$  pada sumbu arus horizontal dari kurva magnetisasi digambar secara vertikal di  $b$  dalam domain waktu untuk memberikan nilai vertikal arus pada saat itu. Dengan cara ini, arus magnetisasi pada grafik waktu dihasilkan dan hasilnya ditampilkan, yang mencerminkan efek saturasi. Pengamatan pertama adalah bahwa arus magnetisasi dan fluks sefasa seperti yang diharapkan, karena  $mmf$  adalah produk dari fluks dan reluktansi.

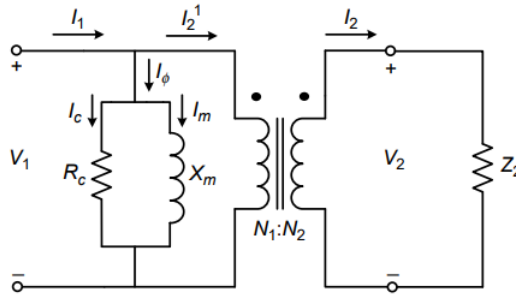
Pengamatan kedua adalah bahwa arus magnetisasi yang terdistorsi mengandung harmonik, dan analisis Fourier menunjukkan bahwa ini adalah harmonik ganjil. Ini lebih lanjut menunjukkan bahwa persentase harmonik ketiga dan kelima akan meningkat dengan meningkatnya distorsi saat inti semakin jenuh. Jelas, nilai puncak arus magnetisasi akan meningkat dengan cepat ketika transformator semakin jenuh. Kami mengasumsikan kurva magnetisasi bernilai tunggal dan mengabaikan kerugian histeresis; konstruksi pada Gambar 8.7 dapat diulang untuk histeresis dengan mencatat nilai fluks naik dan turun,



Gambar 8.7 Magnetisasi bentuk gelombang saat ini.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

yang memperkenalkan distorsi lebih lanjut dari kurva magnetisasi, tetapi efek keseluruhan pada harmonik tidak berubah secara radikal. Histeresis adalah kehilangan daya di inti dan, oleh karena itu, akan memperkenalkan komponen arus magnetisasi yang sefasa dengan tegangan yang diberikan. Dalam aplikasi elektronika daya, rugi arus eddy pada inti juga akan menambah rugi histeresis, dan arus yang mewakili rugi-rugi ini juga akan sefasa dengan tegangan yang diberikan.

Sebagai pendekatan pertama, arus magnetisasi oleh karena itu dapat dibagi menjadi dua komponen: satu dalam fase dengan tegangan yang diterapkan untuk rugi inti  $I_c$ ; dan yang lainnya sefasa dengan fluks  $I_m$ . Pendekatan ini memungkinkan kita untuk membangun diagram fasor untuk mantan trans. Komponen harmonik dari arus magnetisasi dapat, dalam beberapa keadaan, menyebabkan kondisi resonansi dengan komponen kapasitif dari rangkaian terhubung. Induktansi magnetisasi  $L_m$  atau reaktansi magnetisasi  $X_m$  dapat mewakili fluks dalam inti, dan  $R_c$  dapat mewakili rugi-rugi inti; komponen arus melalui elemen rangkaian ini bergabung untuk membentuk arus magnetisasi. Arus magnetisasi sekarang diwakili oleh cabang shunt yang terhubung melintasi  $V_1$ , terdiri dari  $R_c$  dan  $X_m$  secara paralel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.8.



Gambar 8.8. Sirkuit listrik untuk transformator dengan cabang magnetisasi.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

## 2) Resistansi belitan

Resistansi belitan dapat diwakili oleh resistansi kabel yang digunakan dalam belitan,  $R_1$  dan  $R_2$  untuk primer dan sekunder, masing-masing. Resistansi AC karena fluks internal pada konduktor dapat diperkirakan oleh

$$R_{ac} = R_{dc} \left[ 1 + \frac{\left(\frac{r_0}{\delta}\right)^4}{48 + 0.8 \left(\frac{r_0}{\delta}\right)^4} \right] \quad 8.36$$

Di mana  $d$  adalah kedalaman kulit dalam konduktor, sebagaimana didefinisikan dalam Persamaan 1.21, dan  $r_0$  adalah jari-jari konduktor. Untuk operasi frekuensi tinggi, kita harus mempertimbangkan kehilangan AC dalam bentuk efek kulit dan efek kedekatan.

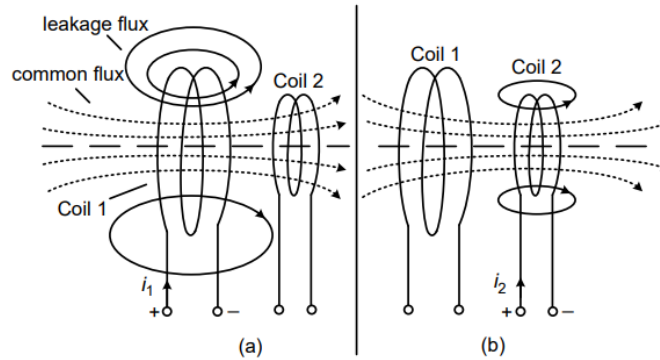
## 3) Kebocoran Magnetik

Dalam transformator ideal, fluks yang sama menghubungkan sirkuit primer dan sekunder. Namun, dalam praktiknya, selalu ada fluks bocor yang menghubungkan hanya satu belitan.

Induktansi kebocoran adalah properti dari satu belitan relatif terhadap yang lain. Jika ada belitan ketiga pada inti transformator, kebocoran primer-sekunder akan sangat berbeda dengan kebocoran primer-tercier dan seterusnya. Pertimbangkan dua kumparan dasar di udara yang disajikan pada Gambar 8.9, yang merupakan transformator dasar. Pada Gambar 8.9(a), kumparan 1 memiliki arus bolak-balik  $i_1$  yang diterapkan dan kumparan 2 dihubungkan terbuka. Ini menghasilkan medan magnet yang dijelaskan oleh garis fluks dalam diagram. Beberapa fluks ini menghubungkan kumparan kedua dan dengan demikian disebut fluks timbal balik. Fluks umum atau mutual diwakili oleh garis putus-putus.

Fluks yang tersisa tidak menghubungkan yang sekunder, dan disebut fluks bocor (digambarkan dengan garis padat). Pada Gambar 8.9(b), kumparan 1 dirangkai terbuka dan arus  $i_2$  dialirkan ke kumparan 2. Sekali lagi, fluks bocor diwakili oleh garis fluks padat dan fluks timbal balik dilambangkan dengan garis putus-putus. Jelas, sifat dari dua bidang kebocoran sangat berbeda. Aksi transformator terjadi





Gambar 8.9 Induktansi kebocoran dalam transformator.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

ketika arus mengalir pada kedua kumparan. Dalam hal ini, fluks yang menghubungkan kedua kumparan memiliki tiga komponen. Jika  $\phi_{11}$  adalah total flux linking coil 1 dan  $\phi_{22}$  adalah total flux linking coil 2, maka [1,2]:

$$\phi_{11} = \phi_{l1} + \phi_{21} + \phi_{12} \quad 8.37$$

$$\phi_{22} = \phi_{l2} + \phi_{12} + \phi_{21} \quad 8.38$$

Dimana  $\phi_{l1}$  adalah fluks bocor yang terkait dengan kumparan 1 karena  $i_1$  dalam kumparan 1,  $\phi_{21}$  adalah fluks yang menghubungkan kedua kumparan karena arus  $i_1$ ,  $\phi_{12}$  adalah fluks timbal balik karena arus  $i_2$  dalam kumparan 2 dan  $\phi_{l2}$  adalah fluks bocor dari kumparan 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.10. Masing-masing elemen fluks ini mewakili sebuah induktansi. Dari persamaan fluks, kita dapat menurunkan persamaan untuk tegangan pada setiap kumparan:

$$V_1 = [L_{l1} + L_1] \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad 8.39$$

$$V_2 = [L_{l2} + L_2] \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad 8.40$$

Dari bentuk persamaan ini, kita dapat mengekstrak induktansi diri kumparan 1 dan kumparan 2 masing-masing sebagai  $L_{11}$  dan  $L_{22}$ , di mana:

$$L_{11} = L_{l1} + L_1 \quad 8.41$$

$$L_{22} = L_{l2} + L_2 \quad 8.42$$

Tentu saja, seperti yang selalu terjadi pada induktansi timbal balik,  $M_{12} = M_{21} = M$ . Arus pada kumparan 1 menimbulkan fluks, beberapa di antaranya menghubungkan kumparan 2. Menurut definisi, induktansi timbal balik adalah rasio fluks yang menghubungkan satu kumparan karena arus pada kumparan lainnya, sehingga

$$L_1 = \frac{N_1}{N_2} M \quad 8.43$$

$$L_2 = \frac{N_2}{N_1} M \quad 8.44$$

Dengan demikian

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad 8.45$$

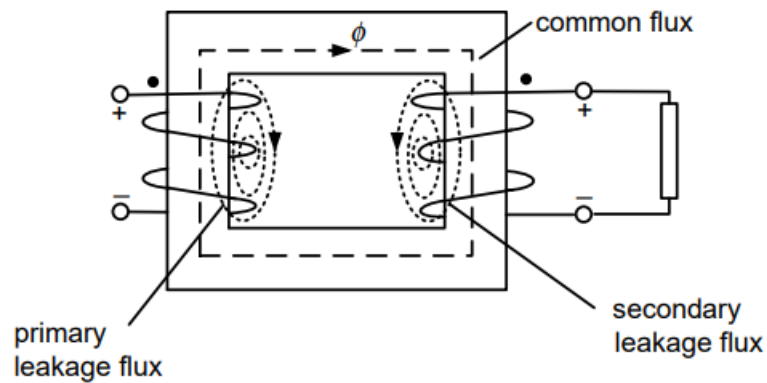
Istilah induktansi kebocoran dalam Persamaan 8.41 dan 8.42 dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 8.43 dan 8.44

$$L_{l1} = L_{11} - \frac{N_1}{N_2} M \quad 8.46$$

$$L_{l2} = L_{22} - \frac{N_2}{N_1} M \quad 8.47$$

Mendefinisikan

$$k_1 = \frac{L_1}{L_{11}} = 1 - \frac{L_{l1}}{L_{11}} \quad 8.48$$



Gambar 8.10 Induktansi kebocoran dalam transformator.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Dan

$$k_2 = \frac{L_2}{L_{22}} = 1 - \frac{L_{l2}}{L_{22}} \quad 8.49$$

Berikut ini

$$k = \sqrt{k_1 k_2} \quad 8.50$$

Dan

$$M = k \sqrt{L_{11} L_{22}} \quad 8.51$$

k disebut koefisien kopling. Mengambil definisi k dan hubungan rangkaian dalam Persamaan 8.39 dan 8.40, dengan konvensi titik yang sesuai, menghasilkan representasi rangkaian listrik ekivalen klasik dari transformator – model yang biasanya digunakan dalam simulasi rangkaian transformator. Gambar 8.10 menunjukkan tata letak fisik belitan dengan konvensi titik dan rangkaian listrik ekivalen dengan induktor kopel. Induktansi kebocoran dipengaruhi oleh operasi frekuensi tinggi

Pengaruh kebocoran dapat diwakili oleh induktor kebocoran primer dan sekunder atau reaktansi kebocoran primer dan sekunder  $X_{l1}$  dan  $X_{l2}$ , masing-masing

#### 4) Rangkaian Equivalent

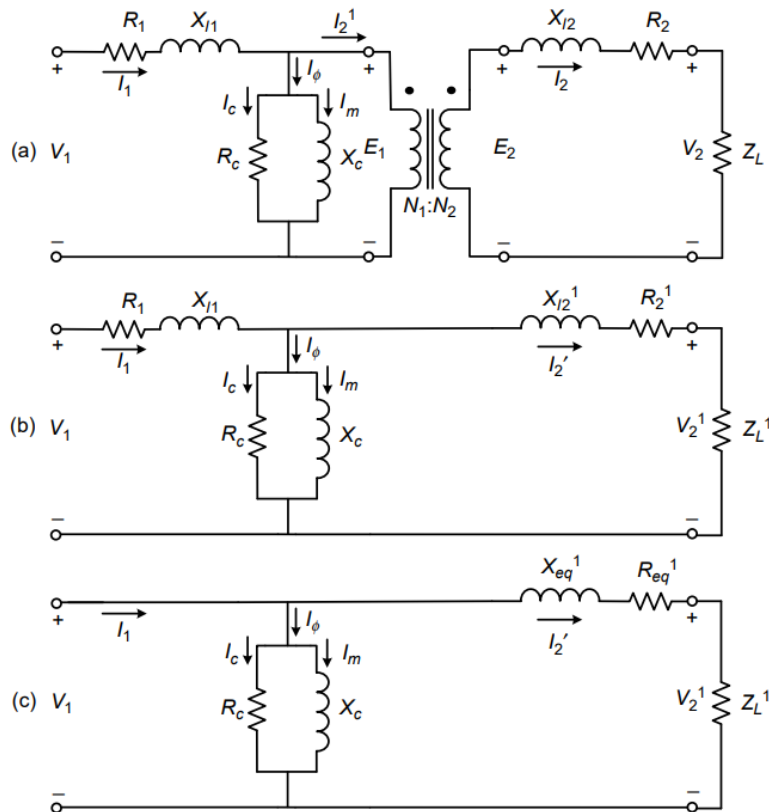
Model rangkaian ekivalen sekarang lengkap dan ditunjukkan pada Gambar 8.11(a). Untuk transformator ideal:

$$\frac{E_1}{E_2} = a \tag{8.52}$$

Sebagai langkah selanjutnya, kita dapat merujuk semua besaran di sekunder ke primer untuk mendapatkan rangkaian ekivalen dari Gambar 8.11(b).

Reaktansi bocor dari belitan sekunder mengacu pada belitan primer adalah:

$$X_{l2}^1 = a^2 X_{l2} \tag{8.53}$$



Gambar 8.11 Sirkuit setara transformator.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Hambatan dari belitan sekunder mengacu pada belitan primer adalah:

$$R_2^1 = a^2 R_2 \quad 8.54$$

Tegangan melintasi belitan sekunder yang dirujuk ke primer diberikan oleh Persamaan 8.32:

$$V_2^1 = aV_2 \quad 8.55$$

Dan arus di sekunder yang disebut primer adalah

$$I_2^1 = \frac{1}{a} I_2 \quad 8.56$$

Akhirnya, kita dapat menggabungkan jumlah yang sesuai seperti hambatan belitan dan reaktansi bocor:

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 \quad 8.57$$

$$X_{eq} = X_{l1} + a^2 X_{l2} \quad 8.58$$

Cabang shunt yang mewakili kehilangan inti dan magnetisasi inti dapat dipindahkan ke terminal input dengan sedikit kehilangan akurasi untuk mendapatkan Gambar 8.11(c). Ini adalah perkiraan untuk Gambar 8.11(b), karena  $I_\phi$  akan sedikit berubah, tetapi sangat kecil, sehingga kesalahannya dapat diabaikan. Namun, ini sangat menyederhanakan perhitungan sirkuit.

Ini adalah rangkaian listrik ekuivalen biasa yang digunakan untuk mewakili transformator dan, dengan analisis rangkaian tradisional tegangan beban, regulasi dan efisiensi transformator dapat ditentukan

## 8.2 Persamaan Transformator Umum

Sejauh ini, kami telah memperlakukan transformator dalam peran tradisionalnya dengan eksitasi sinusoidal. Untuk aplikasi elektronika daya, kita harus memperluas analisis untuk memasukkan eksitasi non-sinusoidal dan menangani frekuensi jauh di atas frekuensi listrik biasa. Kita akan mulai dengan menggeneralisasi persamaan untuk tegangan, daya dan rugi-rugi. Disipasi rugi-rugi akan menentukan kenaikan suhu pada belitan, yang akan mengarah pada optimalisasi ukuran inti transformator. Dalam Bab 6, kami akan menunjukkan bahwa optimasi lebih lanjut akan dihasilkan dari analisis rugi frekuensi tinggi pada belitan

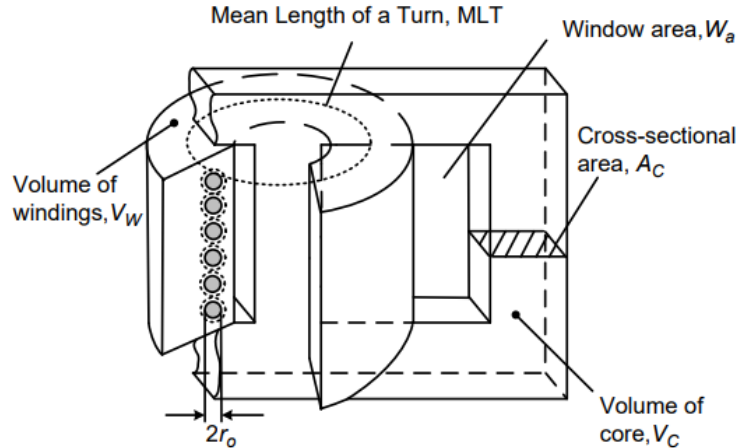
### 1. Persamaan tegangan

Hukum Faraday menghubungkan tegangan tekan pada belitan  $v$  dengan laju perubahan kerapatan fluks  $B$

$$v = N \frac{d\phi}{dt} = NA_m \frac{dB}{dt} \quad 8.59$$

di mana  $N$  adalah jumlah lilitan dan  $A_m$  adalah luas penampang efektif inti magnet. Dalam kasus inti yang dilaminasi dan dililit pita, ini lebih kecil dari luas fisik,  $A_c$ , karena ruang interlaminasi dan insulasi.

Tata letak transformator tipikal ditunjukkan pada Gambar 8.12 dan parameter fisik diilustrasikan. Kedua area tersebut dihubungkan oleh faktor penumpukan inti,  $k_f (A_m = k_f A_c)$ . Biasanya,  $k_f$  adalah 0,95 untuk inti yang dilaminasi.



Gambar 8.12 Tata letak transformator yang khas.  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Nilai rata-rata tegangan yang diberikan selama interval  $\tau$  dari titik di mana kerapatan fluks adalah nol ke titik di mana ia berada pada nilai maksimumnya ( $B_{max}$ ) adalah  $\langle v \rangle$ . Ini dapat ditemukan dengan mengintegrasikan Persamaan 8.59:

$$\begin{aligned} \langle v \rangle &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v(t) dt \\ &= \frac{1}{\tau} N A_m \int_0^{B_{max}} dB \\ &= \frac{1}{\tau} N A_m B_{max} \end{aligned} \quad 8.60$$

Kami ingin menghubungkan ini dengan nilai rms dari bentuk gelombang tegangan yang diterapkan. Faktor bentuk  $k$  didefinisikan sebagai rasio nilai rms dari bentuk gelombang tegangan yang diterapkan dengan nilai rata-rata  $\langle v \rangle$ :

$$k = \frac{V_{rms}}{\langle v \rangle} \quad 8.61$$

Menggabungkan Persamaan 8.60 dan 8.61 menghasilkan:

$$V_{rms} = \frac{k}{\tau} f N \quad 8.62$$

dengan:

$$K_v = \frac{k}{\tau} = \frac{k}{\tau f} \quad 8.63$$

di mana  $f = \frac{1}{T}$  adalah frekuensi tegangan periodik yang diberikan  $v(t)$ , dan  $T$  adalah periode  $v(t)$ .

Persamaan 8.62 memiliki bentuk yang sama dengan persamaan tegangan transformator klasik, faktor bentuk gelombang, yang didefinisikan oleh  $k$ ,  $\tau$  dan  $T$  (atau  $f$ ). Untuk bentuk gelombang sinusoidal,  $K=4.44$  dan, untuk bentuk gelombang persegi,  $K=4.0$ .

## 2. Persamaan daya

Persamaan 8.64 berlaku untuk setiap belitan transformator. Sangat mudah untuk menghitung produk arus  $\times$  tegangan atau peringkat VA dari setiap belitan di transformator. Mengambil jumlah produk VA dalam  $n$  belitan transformator dan mengambil tegangan yang diberikan oleh Persamaan 8.64:

$$\sum VA = K_v f B_{max} A_m \sum_{i=1}^n N_i I_i \quad 8.64$$

$N_i$  adalah jumlah lilitan pada belitan  $i$  yang dialiri arus dengan nilai rms  $I_i$ .

Faktor pemanfaatan jendela  $k_u$  adalah rasio total area konduksi  $W_c$  untuk semua konduktor di semua belitan dengan total area belitan jendela  $W_a$  dari inti:

$$k_u = \frac{W_c}{W_a} \quad 8.65$$

Luas total konduksi berhubungan dengan jumlah konduktor (belitan) dan luas masing-masing konduktor yang dijumlahkan pada semua belitan:

$$W_c = \sum_{i=1}^n N_i A_{wi} \quad 8.66$$

di mana  $A_{wi}$  adalah daerah penghantar kawat dalam belitan  $i$ . Substitusi Persamaan 8.67 ke Persamaan 8.68:

$$k_u = \frac{\sum_{i=1}^n N_i A_{wi}}{W_a} \quad 8.67$$

Dengan demikian:

$$\sum_{i=1}^n N_i A_{wi} = k_u W_a \quad 8.68$$

Rapat arus pada setiap belitan adalah  $J_i = I_i A_{wi}$ . Biasanya, area kawat dan area konduksi diambil sebagai area konduktor telanjang. Namun, kita dapat menjelaskan efek kulit dalam konduktor dan efek kedekatan antara konduktor dengan mencatat bahwa peningkatan resistansi karena efek ini dimanifestasikan dengan mengurangi area konduksi efektif. Faktor efek kulit,  $k_s$ , adalah peningkatan resistensi (atau penurunan area konduksi) karena efek kulit, dan juga untuk faktor efek kedekatan,  $k_x$ :

$$k_s = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad 8.69$$

$$k_x = \frac{R'_{ac}}{R_{dc}} \quad 8.70$$

Memasukkan definisi ini ke dalam faktor pemanfaatan jendela:

$$k_u = \frac{k_b}{k_s k_x} \quad 8.71$$

di mana  $k_b$  adalah rasio luas total konduktor telanjang (*bare conductor total area*) dengan luas belitan jendela.

Definisi dalam Persamaan 8.69 membuat kelonggaran dalam faktor pemanfaatan jendela untuk efek kulit dan kedekatan. Pada titik ini, kami tidak memiliki ekspresi analitis untuk efek kulit dan kedekatan; kita akan membahas efek ini secara rinci di Bab 8. Biasanya,  $k_b=0.7$ ,  $k_s=1.3$  dan  $k_x=1.3$ , memberikan  $k_u=0.4$ .

Menggabungkan Persamaan 8.66 dan 8.68, dengan rapat arus  $J_o$  yang sama di setiap belitan, menghasilkan total VA untuk semua belitan. Dalam Bagian 3.3, kami menunjukkan bahwa distribusi optimal arus antara beberapa belitan dicapai ketika kerapatan arus yang sama diterapkan pada setiap belitan:

$$\sum VA = K_v f B_{max} k_f A_c J_o k_u W_a \quad 8.72$$

Produk dari luas penampang inti dan luas belitan jendela  $A_c W_a$  muncul dalam Persamaan 8.72 dan merupakan indikasi ukuran inti, dan disebut produk penampang jendela  $A_p$ . Menyusun Ulang Persamaan 8.72 menghubungkan penjumlahan peringkat VA dari semua belitan dengan sifat fisik, listrik dan magnetik transformator:

$$\sum VA = K_v f B_{max} J_o k_f k_u A_p \quad 8.73$$

### 3. Rugi -rugi belitan

Rugi ohmik atau  $I^2 R$  di salah satu belitan adalah:

$$I^2 R = \rho_w \frac{l_{wi}}{A_{wi}} I_i^2 = \rho_w \frac{N_i MLT (J_o A_{wi})^2}{A_{wi}} \quad 8.74$$

Resistivitas listrik konduktor adalah  $\rho_w$  dan panjang konduktor dalam belitan adalah  $l_{wi}$ , yaitu produk dari jumlah lilitan  $N_i$  dan panjang rata-rata lilitan (MLT).

Arus dalam belitan dinyatakan dalam rapat arus. Rugi resistif total untuk semua belitan adalah:

$$P_{cu} = \sum RI^2 = \rho_w \sum_{i=1}^n \frac{N_i MLT (J_o A_{wi})^2}{A_{wi}} \quad 8.75$$

Menggabungkan definisi faktor pemanfaatan jendela,  $k_u$  (Persamaan 8.75), dan mencatat bahwa volume belitan (lilit penuh  $k_u = 1$ ) adalah  $V_w = MLT \times W_a$ , maka:

$$P_{cu} = \rho_w V_w k_u J_o^2 \quad 8.76$$

### 4. Rugi-rugi inti

Secara umum, kehilangan inti per satuan volume diberikan dalam  $W/m^3$  sesuai dengan persamaan Steinmetz umum (Persamaan direproduksi di bawah):

$$P_{fe} = K_c f^\alpha B_{max}^\beta$$

dimana  $K_c$ ,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta. Rugi inti meliputi rugi-rugi histeresis dan arus eddy. Data pabrikan biasanya diukur untuk eksitasi sinusoidal. Dengan tidak adanya data uji pada inti desain, data pabrikan harus digunakan. Konstanta juga dapat disimpulkan dari pengukuran kehilangan inti

### 5. Optimasi

Menghilangkan rapat arus dalam Persamaan 8.77 menggunakan Persamaan 8.78 menghasilkan ekspresi untuk rugi-rugi tembaga atau belitan:

$$P_{cu} = \rho_w V_w k_u \left[ \frac{\sum VA}{K_v f B_{max} k_f k_u A_p} \right]^2 = \frac{a}{f^2 B_{max}^2} \quad 8.77$$

Ditulis dalam bentuk ini untuk menunjukkan bahwa rugi tembaga berbanding terbalik dengan kuadrat frekuensi dan kuadrat kerapatan fluks.

Penulisan menunjukkan bahwa kehilangan inti juga tergantung pada frekuensi dan kerapatan fluks: Penulisan Ulang menunjukkan bahwa kehilangan inti juga bergantung pada frekuensi dan kerapatan fluks:

$$P_{fe} = V_c K_c f^\alpha B_{max}^\beta = b f^\alpha B_{max}^\beta \quad 8.78$$

Rugi total terdiri dari rugi inti dan belitan gabungan:

$$P = \frac{a}{f^2 B_{max}^2} + b f^\alpha B_{max}^\beta \quad 8.79$$

Domain  $P$  berada di kuadran pertama bidang  $f$ - $B_{max}$ .  $P$  positif di mana-mana dan itu tunggal di sepanjang sumbu. Jika  $\alpha = \beta$ ,  $P$  memiliki minimum global  $\left\{ \frac{dP}{d(fB_m)} \right\} = 0$  pada produk kerapatan fluks frekuensi:

$$f_o B_o = \left[ \frac{2a}{\beta b} \right]^{\frac{1}{\beta+2}} \quad 8.80$$

Untuk  $\alpha = \beta = 2$ , dengan Persamaan 4.77 dan 4.78, hasil kali kerapatan fluks frekuensi adalah:

$$f_o B_o = \sqrt[4]{\frac{\rho_w V_w k_u}{\rho_c V_c K_c}} \sqrt{\frac{\sum VA}{K_v k_f k_u A_p}} \quad 8.81$$

Mengingat bahwa  $B_o$  harus lebih kecil dari kerapatan fluks saturasi  $B_{sat}$ , ada frekuensi kritis, yang diberikan oleh Persamaan 4.81 di atas, di mana kerugian total dapat diminimalkan dengan memilih nilai kerapatan fluks optimal yang lebih kecil dari nilai saturasi ( $B_o < B_{sat}$ ). Persamaan 8.81 menunjukkan bahwa  $f_o B_o$  berhubungan dengan rapat daya pada transformator, karena  $A_p$  berhubungan dengan ukuran inti.

Dalam kasus yang lebih umum ( $\alpha \neq \beta$ ), tidak ada minimum global. Minimum  $P$  pada frekuensi tertentu diperoleh dengan mengambil turunan parsial terhadap  $B_{max}$  dan menyetelnya ke nol:

$$\frac{\partial P}{\partial B_{max}} = -\frac{2a}{f^2 B_{max}^3} + \beta b f^\alpha B_{max}^{\beta-1} = 0 \quad 8.82$$

Kerugian minimum terjadi ketika:

$$P_{cu} = \frac{\beta}{2} P_{fe} \quad 8.83$$

untuk frekuensi tetap  $f$ .

Nilai minimum  $P$  pada kerapatan fluks tertentu diperoleh dengan mengambil turunan parsial terhadap  $f$  dan menyetelnya ke nol. Kerugian minimum terjadi ketika:



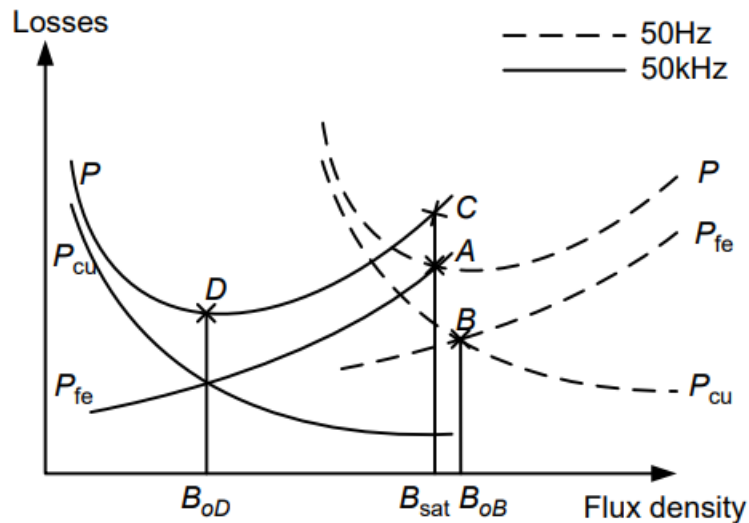
$$P_{cu} = \frac{\alpha}{2} P_{fe} \quad 8.84$$

untuk kerapatan fluks tetap  $B_{max}$ .

Evaluasi Persamaan 8.84 pada  $B_o = B_{sat}$  memberikan frekuensi kritis di atas mana kerugian total diminimalkan dengan beroperasi pada nilai kerapatan fluks optimum yang lebih kecil dari nilai saturasi ( $B_o < B_{sat}$ ):

$$f_o^{\alpha+2} B_o^{\beta+2} = \frac{2 \rho_w V_w k_u}{\alpha \rho_c V_c K_c} \left[ \frac{\sum VA}{K_v k_f k_u A_p} \right]^2 \quad 8.85$$

Sifat Persamaan 8.85 diilustrasikan pada Gambar 8.13. Dua set kurva yang ditampilkan adalah untuk frekuensi rendah (misalnya, 50 Hz) dan frekuensi tinggi (misalnya, 50 kHz).



Gambar 8.13 Berliku, inti, dan total kerugian pada frekuensi yang berbeda.  
(Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

Pada 50 Hz, rapat fluks optimum (di titik  $B$ ) lebih besar dari rapat fluks saturasi, sehingga rugi-rugi minimum yang dapat dicapai adalah di titik  $A$ . Namun rugi-rugi belitan dan inti tidak sama. Pada 50 kHz, kerapatan fluks optimum lebih kecil dari kerapatan fluks saturasi dan rugi-rugi inti dan belitan sama pada titik optimal  $D$ . Langkah pertama dalam desain adalah menentukan apakah kerapatan fluks optimum yang diberikan oleh kriteria optimasi di Persamaan 8.83 lebih besar atau lebih kecil dari kerapatan fluks saturasi.

## 6. Power factor

Nilai VA dari setiap belitan diperlukan untuk melanjutkan desain transformator, seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 8.86. Secara tradisional, konsep faktor daya diterapkan pada bentuk gelombang sinusoidal dari arus dan tegangan, dan faktor daya hanyalah kosinus dari sudut fasa  $u$  antara bentuk gelombang. Dalam elektronika daya, bentuk gelombang sering kali merupakan campuran sinusoidal dan gelombang persegi. Pengertian faktor daya adalah:

$$k_p = \frac{\langle p \rangle}{V_{rms} I_{rms}} \quad 8.86$$

di mana  $\langle p \rangle$  adalah daya rata-rata yang dikirimkan pada terminal di mana  $V_{rms}$  dan  $I_{rms}$  masing-masing adalah nilai tegangan dan arus rms.

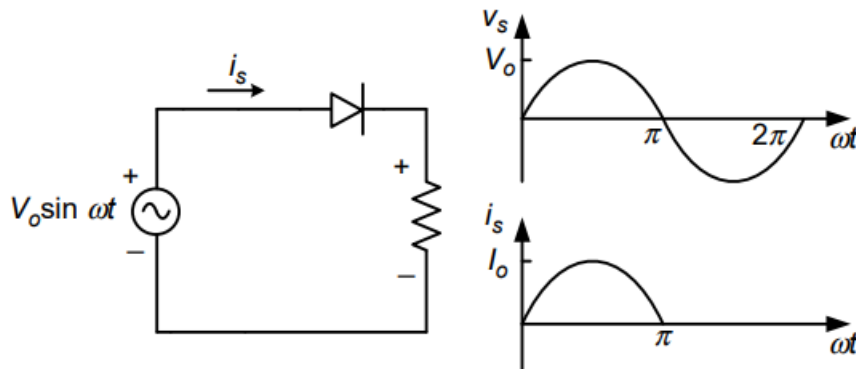
Pertimbangkan kasus di mana tegangan adalah sinusoidal dan arus adalah gelombang persegi. kekuatan rata-rata adalah:

$$\langle p \rangle = \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T v(t)i(t) = V_{rms} I_{1 rms} \cos(\theta) \quad 8.87$$

Karena  $v(t)$  adalah sinusoidal murni, hanya dasar bentuk gelombang arus yang akan menghasilkan nilai DC atau rata-rata dari produk  $v(t)i(t)$ .  $V_{rms}$  adalah nilai rms tegangan dan  $I_{1 rms}$  adalah nilai rms dasar bentuk gelombang arus.  $\theta$  adalah sudut fase antara bentuk gelombang tegangan dan dasar dari bentuk gelombang arus.

Persamaan 8.87 dapat ditulis ulang:

$$\langle p \rangle = V_{rms} I_{rms} \frac{I_{1 rms}}{I_{rms}} \cos(\theta) = V_{rms} I_{rms} k_d k_\theta \quad 8.88$$



Gambar 8.14 Penyearah setengah gelombang dengan beban resistif.  
(Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

Dimana  $k_d$  disebut faktor distorsi dan  $k_u$  disebut faktor perpindahan. Perhatikan bahwa  $I_{rms}$  adalah nilai rms dari bentuk gelombang total termasuk semua harmonik. Jelasnya, untuk sinusoidal murni,  $k_d$  adalah satu dan  $k_u$  sama dengan  $\cos u$ , definisi klasik dari faktor daya.

### 8.3 Jenis-jenis Transformator

Ada dua Jenis Dasar Transformator :

- 1) Transformator Fase Tunggal
- 2) Transformator Tiga Fase

Di bawah ini adalah lebih banyak jenis transformator yang diturunkan melalui berbagai fungsi dan operasi dll.

Jenis Transformator dengan mengacu pada inti :

- 1) Transformator Tipe Core

- 2) Transformator Tipe Shell
- 3) Transformator Tipe Berry

Jenis Transformator dengan mengacu pada fungsi :

- 1) Transformator Daya Besar
- 2) Transformator Distribusi
- 3) Transformator Daya Kecil

Jenis Transformator dengan mengacu pendinginan :

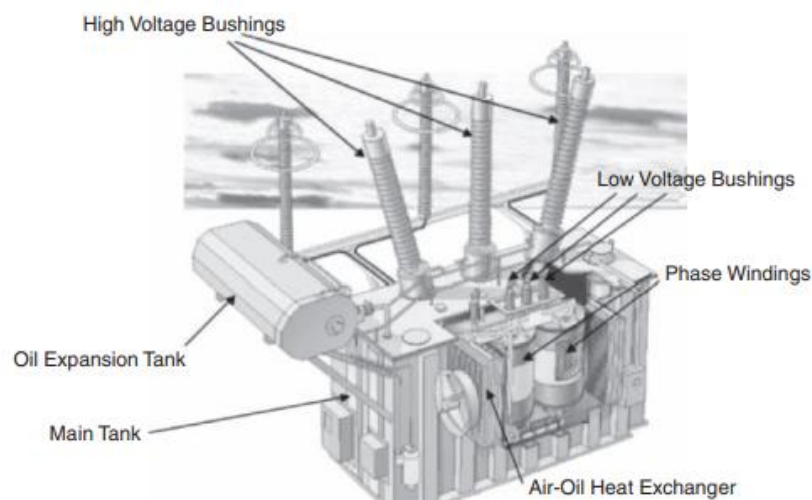
- 1) Transformator Tipe Self Air Cooled atau Dry
- 2) Oil Immersed, Self Cooled (OISC) or ONAN (Oil natural, Air natural)
- 3) Oil Immersed, Combination of Self Cooled and Air blast (ONAN)
- 4) Oil Immersed, Water Cooled (OW)
- 5) Oil Immersed, Forced Oil Cooled
- 6) Oil Immersed, Combination of Self Cooled and Water Cooled (ONAN+OW)
- 7) Oil Forced, Air forced Cooled (OFAC)
- 8) Forced Oil, Water Cooled (FOWC)
- 9) Forced Oil, Self Cooled (OFAN)

Jenis-jenis Transformator Instrumen

- 1) Transformator arus
- 2) Transformator potensial
- 3) Transformator arus konstan
- 4) Transformator inti berputar atau regulator induksi
- 5) Transformator otomatis

### 8.3.1 Transformator Fase Tunggal (Single Phase Transformer)

Transformator yang digunakan dalam sistem tenaga listrik dapat dibangun sebagai unit tiga fase dan mungkin memiliki pola belitan yang banyak dan rumit. Tetapi transformator tiga fase adalah intinya dari berbagai hal, dapat dimengerti sebagai tiga unit fase tunggal, dan ada banyak aplikasi untuk transformator yang bekerja hanya dengan tenaga listrik fase tunggal, jadi diskusi ini dimulai dengan transformator fase tunggal seperti ditunjukkan pada Gambar 8.15



Gambar 8.15 Transformator ABB Trafo-Star™. Direproduksi dengan izin ABB Ltd. Anotasi oleh Penulis

(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

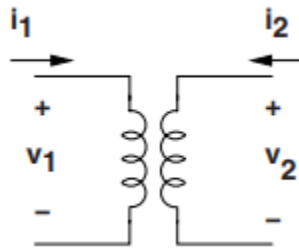
### 1) Transformator Ideal

Transformator sebenarnya adalah perangkat elektromagnetik yang cukup kompleks, tunduk pada analisis yang terlibat, tetapi untuk tujuan belajar tentang sistem tenaga listrik, itu akan cukup untuk memulai dengan model yang disederhanakan untuk transformator yang disebut transformator ideal. Ini adalah elemen sirkuit dua port, ditunjukkan pada Gambar 8.16.

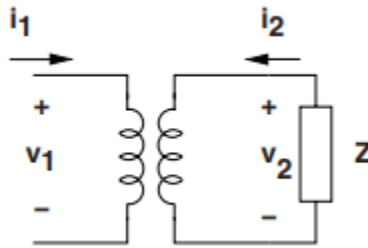
Transformator ideal sebagai elemen jaringan membatasi variabel terminalnya dengan cara berikut

$$\frac{v_1}{N_1} = \frac{v_2}{N_2} \quad (8.89)$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (8.90)$$



Gambar 8.16 Transformator ideal.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))



Gambar 8.17 Transformasi impedansi  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Dalam operasi normal, transformator mengubah rasio  $N_1/N_2$  dipilih sehingga tegangan yang diinginkan muncul di terminal yang tepat. Misalnya, untuk mengubah tegangan distribusi 13,8 kV ke tingkat 120/240 V yang cocok untuk layanan fase tunggal perumahan atau komersial, seseorang akan menggunakan transformator dengan rasio belokan  $13800/240 = 57,5$ . Untuk membagi tegangan rendah menjadi dua, keran pusat pada belitan tegangan rendah akan digunakan.

Transformator, setidaknya dalam bentuk miring, tidak mengkonsumsi, memproduksi atau menyimpan energi. Perhatikan bahwa, menurut Persamaan 8.89 dan 8.90, jumlah aliran daya ke transformator ideal secara identik nol:

$$p_1 + p_2 = v_1 i_1 + v_2 i_2 \quad (8.91)$$

Transformator juga mengubah impedansi. Untuk menunjukkan bagaimana ini, lihat Gambar 8.17. Di sini, beberapa impedansi terhubung ke satu sisi transformator yang ideal.

Lihat bahwa adalah mungkin untuk menemukan impedansi yang setara yang dilihat dari sisi lain transformator.

Memperhatikan bahwa

$$I_2 = -\frac{N_1}{N_2} I_1$$

dan itu

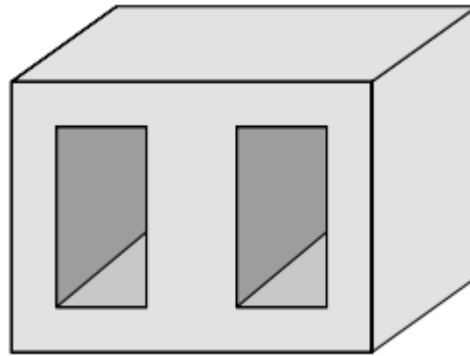
$$V_2 = -ZI_2$$

Kemudian rasio antara tegangan input dan arus adalah

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 ZI_1 \quad (8.92)$$

Ternyata, model transformator yang ideal tidak terlalu buruk untuk menunjukkan perilaku transformator nyata dalam banyak keadaan. Dalam transformator yang beroperasi pada frekuensi daya ada dua penyimpangan yang berarti dari perilaku ideal transformator nyata, dan ini terkait dengan inti transformator itu sendiri, dan karena belitan transformator memiliki resistansi dan reaktansi kebocoran.

Transformator dililitkan pada sirkuit magnetik (inti) yang terbuat dari lembaran tipis, yang disebut laminasi, dari baja. Untuk transformator daya, baja silikon berorientasi butir digunakan sehingga transformator memiliki kehilangan yang relatif rendah saat diberi energi. Inti transformator itu sendiri mungkin terlihat seperti kartun yang ditampilkan pada Gambar 8.18. Pada gambar ini, laminasi baja akan berorientasi pada bidang kertas dan belitan transformator akan terletak di 'jendela' di inti itu.



Gambar 8.18 Inti transformator.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Dengan asumsi bahwa transformator memiliki  $N_1$  berputar dalam satu belitan, terhubung ke tegangan  $V_1$ , dan bahwa inti itu sendiri memiliki area  $A_c$ , maka kerapatan fluks di inti adalah

$$B_c \approx \frac{V_1}{\omega N_1}$$

Bahan inti akan menarik beberapa kekuatan reaktif dan tentu saja akan mengalami kerugian dari histeresis dan arus eddy. Kekuatan dan kehilangan reaktif itu mungkin diperkirakan oleh elemen reaktif dan resistif shunt. Jika daya nyata dan reaktif yang ditarik

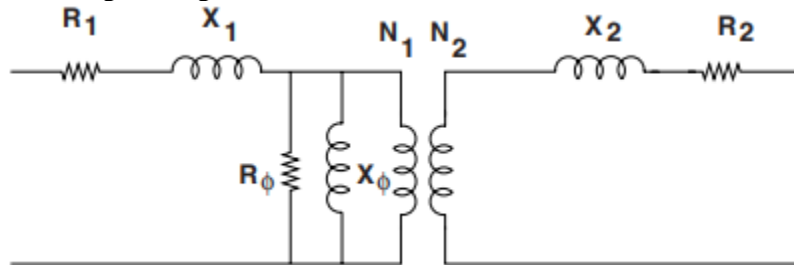
oleh inti masing-masing adalah  $P_c$  dan  $Q_c$ , elemen resistansi dan reaktansi yang menggambarkan perilaku transformator adalah:

$$R_\phi \approx \frac{V_1^2}{P_c}$$

$$X_\phi \approx \frac{V_1^2}{Q_c}$$

Metode memperkirakan kehilangan daya nyata dalam sirkuit magnetik akan dijelaskan dalam Bab 8. Umumnya, dimungkinkan untuk menggunakan data tabulasi pada bahan inti dalam hubungannya dengan kerapatan fluks  $B_c$  dan frekuensi  $\omega$  untuk menyimpulkan 'watt per kilogram' dan angka 'VAR per kilogram' untuk bahan inti tertentu. Nilai  $P_c$  dan  $Q_c$  kemudian dihitung dengan menggunakan dua angka tersebut dan mengalikannya dengan massa inti. Penting untuk disadari di sini bahwa perilaku besi magnetik adalah nonlinier sehubungan dengan kerapatan fluks, sehingga elemen inti resistif dan reaktif ini hanya perkiraan untuk perilaku transformator aktual, dan nilainya akan menjadi fungsi titik operasi. Kehilangan inti adalah elemen yang sangat penting dari perilaku transformator karena transformator daya dalam sistem utilitas hampir selalu diberi energi, sehingga kehilangan 'tanpa beban' pada transformator daya relatif mahal.

Belitan pada transformator daya, tentu saja, memiliki ketahanan. Mereka juga membuat fluks magnetik, tidak semuanya saling digabungkan. (Fluks di inti semuanya saling digabungkan, tetapi akan ada beberapa fluks 'kebocoran' di udara di sekitar inti, dan inilah yang memunculkan elemen fluks kebocoran.) Model transformator daya yang kira-kira lengkap ditunjukkan pada Gambar 8.19. Elemen dan resistansi reaktan kebocoran dikaitkan dengan masing-masing belitan.

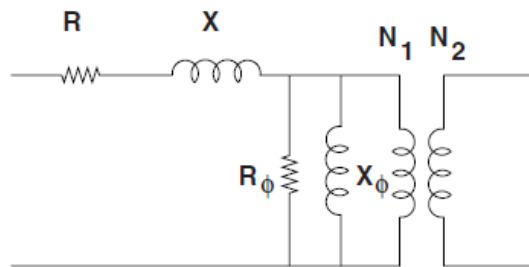


Gambar 8.19 Model sirkuit yang setara dari transformator daya  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Karena impedansi dapat diubah di seluruh transformator ideal, model yang agak lebih kompak dapat diturunkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.20.

$$R = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2$$

$$X = X_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2$$

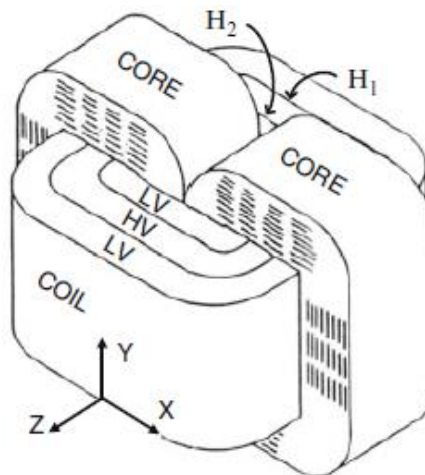


Gambar 8.20 Model rangkaian ekuivalen transformator daya

Biasanya, elemen inti dari transformator daya cukup besar, sehingga mereka memiliki sedikit efek pada perilaku sistem tenaga, meskipun elemen kehilangan inti penting secara ekonomi. Juga, resistansi seri cenderung cukup kecil, sehingga dalam studi sistem sering ditemukan bahwa hanya reaktansi kebocoran seri yang perlu diwakili. Seperti yang akan ditunjukkan bagian transformator ideal dari rangkaian setara transformator tidak muncul di sebagian besar studi sistem.

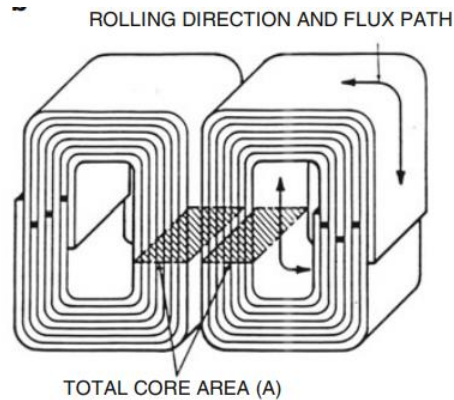
## 2) Transformator tanpa beban

Gambar 8.21 menunjukkan transformator dua belitan dengan permeabilitas relatif yang sangat besar ( $\mu_r = \infty$ ) dari inti besinya dengan sirkuit sekundernya terbuka dan tegangan bolak-balik  $v_1(t)$  diterapkan ke terminal primernya. Untuk menyederhanakan gambar, adalah praktik umum pada diagram skematik transformator untuk menunjukkan belitan primer dan sekunder seolah-olah mereka berada di kaki / anggota badan inti yang terpisah, meskipun belitan sebenarnya saling terkait dalam praktiknya.



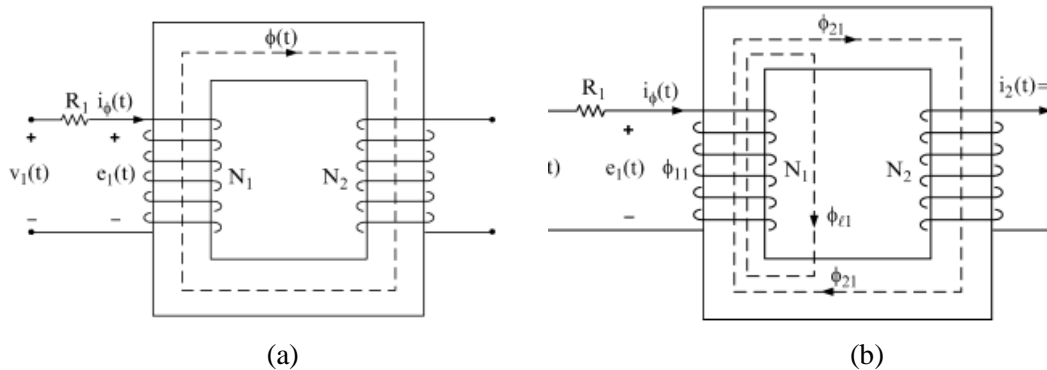
Gambar 8.21. Transformator dengan dua belitan  
(Sumber :(Ewald F. Fuchs, 2011))

Distribusi fluks skematis dari transformator dua belitan dengan permeabilitas relatif terbatas dari inti besinya tanpa beban digambarkan pada Gambar 8.22. Fluks pada tanpa beban.



Gambar 8.22. Transformator dua belitan dengan permeabilitas relatif terbatas  
(Sumber :(Ewald F. Fuchs, 2011))

$i_2(t) = 0$ , adalah  $\phi_{11} = \phi_{21} + \phi_{11}$ , di mana  $\phi_{21}$  adalah fluks yang dihubungkan dengan kumparan 2 (subskrip pertama) dan diproduksi oleh kumparan 1 (subskrip kedua), dan  $\phi_{11}$  adalah fluks kebocoran koil 1. Arus steady-state kecil  $\phi(t)$ , yang disebut arus yang menarik, ada di primer dan membentuk fluks bolak-balik dalam rangkaian magnetik. Fluks  $\phi(t)$  (mengabaikan kebocoran dan fluks pingiran) menginduksi gaya elektromagnetik (emf) di primer sama dengan



Gbr. 8.23 (a) Transformator fase tunggal dengan permeabilitas relatif yang sangat besar ( $\mu_r = \infty$ ) dari inti besinya dengan sekunder terbuka (tanpa beban). (b) Distribusi fluks skematik terperinci dari transformator dua belitan dengan permeabilitas relatif terbatas dari inti besinya tanpa beban  
(Sumber :(Ewald F. Fuchs, 2011))

$$e_l(t) = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_l \frac{d\phi_{11}}{dt} \quad (8.93)$$

di mana  $\lambda_1 = N_1\phi_{11}$  adalah hubungan fluks dengan primer,  $\phi_{11}$  adalah fluks primer, dan  $N_1$  adalah jumlah putaran primer. Gaya elektromagnetik (emf)  $e_1(t)$  bersama dengan penurunan tegangan (karena  $R_1$ ) dalam resistansi primer  $R_1$  (setiap fluks kebocoran dan fluks pingiran diabaikan) harus diimbangi dengan tegangan yang diberikan  $v_1(t)$ ; Sehingga,



$$v_1(t) = R_1 i_\phi(t) + e_1(t) \quad (8.94)$$

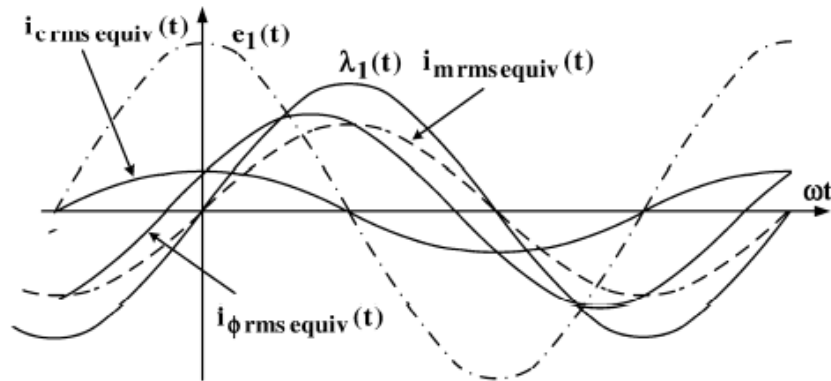
Di sebagian besar peralatan daya (misalnya, transformator) penurunan resistansi tanpa beban memang sangat kecil, dan emf  $e_1(t)$  yang diinduksi hampir sama dengan tegangan yang diterapkan  $v_1(t)$ . Selain itu, bentuk gelombang tegangan dan fluks sangat dekat dengan sinusoidal. Analisis kemudian dapat sangat disederhanakan: jika fluks seketika adalah sinusoidal maka nilai rms dari tegangan yang diinduksi adalah

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{max} = 4.44 f N_1 \phi_{max} \quad (8.95)$$

Jika penurunan tegangan resistif  $R_1 \cdot i_\phi(t)$  dapat diabaikan, emf  $e_1(t)$  sama dengan tegangan yang diberikan  $v_1(t)$ . Dalam kondisi ini, jika tegangan cosinusoidal diterapkan pada belitan, fluks inti sinusoidal harus ditetapkan yang nilai maksimumnya (amplitudo) memenuhi persyaratan bahwa  $E_{1,max} = V_{1,max}$  dan, oleh karena itu,

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{4.44 \cdot f \cdot N_1} \quad (8.95a)$$

Fluks  $\phi_{max}$  ditentukan semata-mata oleh tegangan yang diberikan  $V_1$ , frekuensinya  $f$ , dan jumlah putaran  $N_1$  dari belitan primer. Hubungan penting ini tidak hanya berlaku untuk transformator tetapi juga untuk perangkat apa pun (misalnya, induktor, mesin listrik) yang dioperasikan dengan tegangan terkesan co-sinusoidal atau sinusoidal  $V_1$ , jika penurunan resistansi dapat diabaikan. Sifat magnetik inti menentukan arus  $i_\phi$  yang menarik yang ternyata nonsinusoidal, tetapi telah digantikan oleh padanannya (nilai rms yang sama, frekuensi yang sama, kerugian yang sama dengan arus menarik nonsinusoidal) komponen co-sinusoidal atau sinusoidal pada Gambar 8.22.



8.22 Domain waktu: Fungsi keterkaitan fluks sinusoidal  $\lambda_1(t)$ , tegangan kosinus  $e_1(t)$ , arus eksitasi  $i_\phi(t)$  (sinusoid setara), arus kehilangan inti kosinus  $i_c rms equiv(t)$ , dan arus magnetisasi sinusoidal  $i_m rms equiv(t)$   
(Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

Untuk fluks terukur  $\phi_{max\_rated}$  hubungan berikut harus dipertahankan

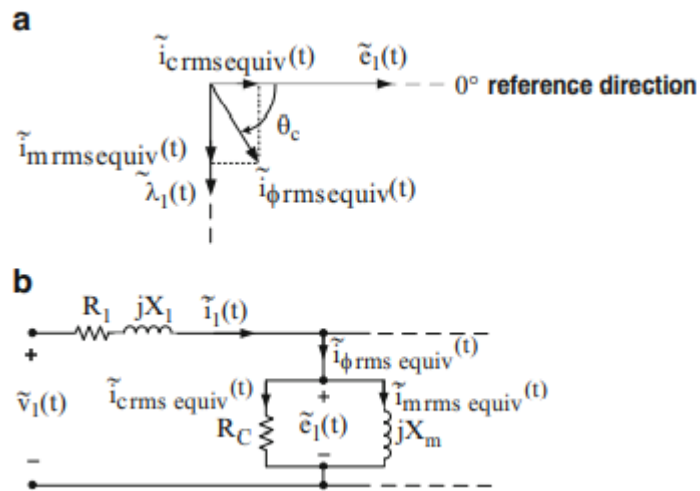
$$\frac{E_1}{f} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \phi_{max\_rated} = 4.44 N_1 \phi_{max\_rated} \quad (8.95b)$$

Jika pelemahan fluks diizinkan, maka hubungannya

$$\frac{E_1}{f} \approx \frac{V_1}{f} < \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \phi_{\max\_rated} = 4.44 N_1 \phi_{\max\_rated} \quad (8.95c)$$

dapat digunakan.

Jika arus yang menarik dianalisis dengan metode seri Fourier, itu akan ditemukan terdiri dari fundamental dan keluarga harmonik aneh. Arus yang menarik  $i_\phi(t)$  kemudian dapat diwakili oleh sinusoid yang setara, yang memiliki nilai dan frekuensi rms yang sama dan menghasilkan kerugian (rata-rata) yang sama dengan gelombang aktual. Ini terdiri dari komponen fundamental yang tertinggal dari emf  $e_1(t)$  sebesar 90. Diagram fasor pada Gambar 8.23a) dan sirkuit yang setara (Gambar 8.23b) sekarang dapat dibangun mewakili hubungan fluks  $\tilde{\lambda}_1(t)$ ; arus yang menarik  $\tilde{i}_\phi rms equiv(t)$ ; core-loss current  $\tilde{i}_c rms equiv(t)$ ; dan magnetisasi arus  $\tilde{i}_m rms equiv(t)$ ; dalam domain fasor (lihat Gambar 8.23a, b).



Gambar 8.23 (a) Diagram fasor yang mewakili  $\tilde{\lambda}_1(t)$ ;  $\tilde{i}_\phi rms equiv(t)$ ;  $\tilde{i}_c rms equiv(t)$ ;  $\tilde{i}_m rms equiv(t)$ . (b) Sirkuit setara dengan  $\tilde{i}_\phi rms equiv(t)$ ;  $\tilde{i}_c rms equiv(t)$ ;  $\tilde{i}_m rms equiv(t)$ . (Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

(lihat Gbr. 8.22). Representasi sinus/kosinus yang setara seperti itu akan sangat penting untuk konstruksi diagram fasor.

Arus eksitasi fundamental yang setara jika  $i_\phi rms equiv(t)$  dapat, pada gilirannya, diselesaikan menjadi dua komponen, satu dalam fase dengan emf  $e_1(t)$  dan yang lainnya tertinggal emf sebesar 90. Komponen dalam fase mendasar menjelaskan daya yang diserap oleh histeresis dan kerugian arus eddy pada intinya. Ini disebut komponen inti-loss  $\tilde{i}_c rms equiv(t)$ , dan sisanya disebut arus magnetisasi  $\tilde{i}_m rms equiv(t)$  Kerugian inti sekarang dapat didefinisikan sebagai

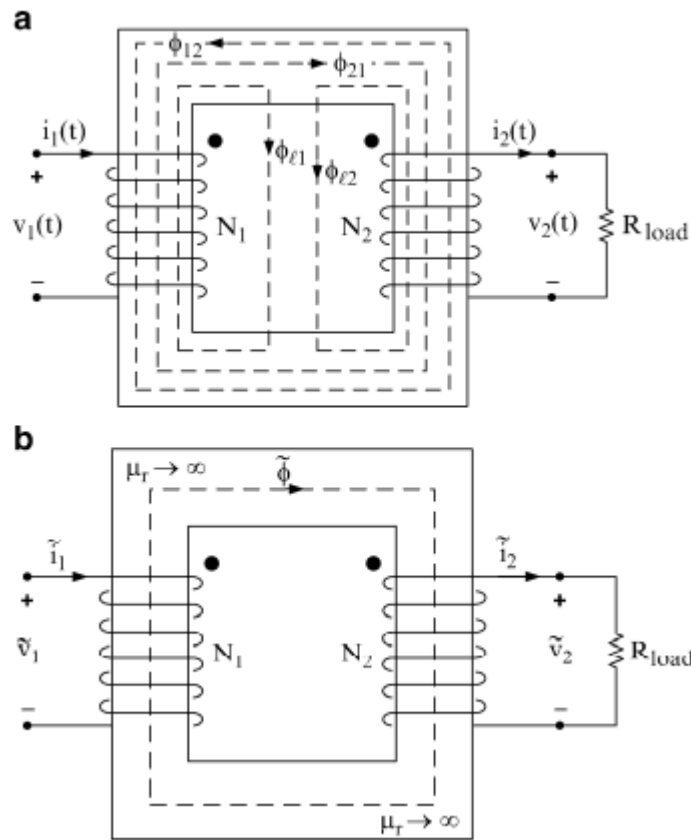
$$P_c = E_1 |\tilde{i}_\phi rms equiv(t)| \cos \theta_c \quad (8.96)$$

di mana  $E_1$ ; adalah nilai rms dari  $\tilde{e}_1(t)$

### 3) Transformator Ideal saat Beban

Distribusi fluks transformator dua belitan dengan permeabilitas terbatas inti besinya saat dimuat digambarkan dalam Gambar 8.24a. Fluks saat dimuat adalah  $\phi_{11} = \phi_{21} + \phi_{l1}$  dan  $\phi_{21} = \phi_{12} + \phi_{l2}$ , di mana  $\phi_{21}$  adalah fluks yang dihubungkan dengan kumparan 2 (subskrip pertama) dan diproduksi oleh kumparan 1 (subskrip kedua);  $\phi_{l1}$  adalah fluks yang dihubungkan dengan kumparan 1 (subskrip pertama) dan diproduksi oleh kumparan 2 (subskrip kedua). Fluks  $\phi_{l1}$  dan  $\phi_{l2}$  adalah fluks kebocoran dari kumparan 1 dan kumparan 2, masing-masing. Fluks total koil 1 adalah  $\phi_1 = \phi_{11} - \phi_{l2}$  dan koil 2 adalah  $\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}$ . Fluks timbal balik adalah  $\phi_m = \phi_{21} + \phi_{12}$ .

Sebagai perkiraan pertama untuk teori kuantitatif transformator yang dimuat, pertimbangkan transformator ideal dengan primer belokan  $N_1$  dan belitan sekunder belokan  $N_2$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.24b



Gbr. 8.24 (a) Distribusi fluks transformator dua belitan dengan permeabilitas terbatas inti besinya saat dimuat. (b) Transformator ideal saat dimuat dengan  $R_1 = R_2 = 0$ ,  $\mu_r = \infty$ , fluks kebocoran dan fluks pinggiran diabaikan  
(Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

Perhatikan bahwa arus sekunder didefinisikan sebagai aliran positif keluar dari belitan; dengan demikian arus sekunder positif menciptakan mmf ( $-N_2 i_2$ ) dalam arah yang berlawanan dari yang diciptakan oleh arus primer positif ( $+N_1 i_1$ ): total mmf yang terkait dengan transformator (jendela) adalah (sisi kiri hukum Ampere, lihat (6.2)

$$F = mmf = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (8.97)$$

Biarkan sifat-sifat transformator ini diidealkan karena resistansi belitan  $R_1, R_2$  sangat kecil. Asumsikan bahwa semua fluks terbatas pada inti (tidak ada fluks kebocoran dan tidak ada fluks pinggiran) dan menghubungkan kedua belitan. Kerugian inti dapat diabaikan, dan permeabilitas inti sangat tinggi ( $\mu_c = \mu_r \mu_0 = \infty$ ) sehingga hanya arus menarik yang sangat kecil ( $i_\phi = 0, H_c = 0$ ) diperlukan untuk menetapkan fluks  $\phi(t)$ : transformator hipotetis seperti itu yang memiliki sifat-sifat ini sering disebut transformator ideal.

Hubungan Transformator Ideal: Ketika tegangan yang bervariasi waktu  $v_1(t)$  terkesan pada terminal utama, fluks inti  $e_1$  akan dibuat sedemikian rupa sehingga emf  $e_1(t)$  sama dengan tegangan yang terkesan ketika resistansi belitan  $R_1$ , kebocoran dan fluks pinggiran dapat diabaikan. Jadi dari hukum Faraday mengikuti:

$$v_1(t) = e_1(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (8.98)$$

Fluks inti juga menghubungkan belitan sekunder dan menghasilkan emf  $e_2(t)$  yang diinduksi dan tegangan terminal sekunder yang sama  $v_2(t)$  (fluks catatan  $e_1$  diproduksi bersama oleh arus primer dan sekunder  $i_1(t)$  dan  $i_2(t)$ , masing-masing) yang diberikan oleh

$$v_2(t) = e_2(t) = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (8.99)$$

Membagi (7,8) dengan (7,9) menghasilkan

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8.100)$$

Sekarang biarkan beban (misalnya,  $R_{load}$ ) dihubungkan ke belitan sekunder: arus  $i_2$  dan mmf ( $-N_2 i_2$ ) kemudian ada di sekunder dan mmf sekunder ini harus dilawan dengan primer. Oleh karena itu mmf primer kompensasi ( $+N_1 i_1$ ) dan  $i_1$  saat ini harus dipanggil sedemikian rupa sehingga hukum Ampere terpenuhi:  $F = H_c l_c = 0$  (karena  $H_c = 0$  dan  $\mu_c = \mu_r \mu_0 = \infty$ ) atau dengan (7.7):

$$F = N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

Atau

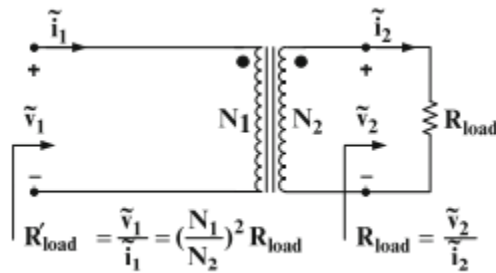
$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \quad (8.101)$$

Gambar 8.25 menjelaskan kekuatan pada primer (input) dan sekunder (output) harus dilestarikan karena semua kerugian (ohmik dan inti besi) diabaikan

$$p(t) = v_1(t)i_1(t) = v_2(t)i_2(t) \quad (7.102)$$

dan ketahanan beban (*e.g.*,  $R_{load} = \frac{v_2(t)}{i_2(t)} = \frac{\tilde{v}_2(t)}{\tilde{i}_2(t)}$ ) terhubung ke sekunder dapat dinyatakan dalam ketentuan jumlah primer  $R'_{load} = \frac{v_1(t)}{i_1(t)} = \frac{\tilde{v}_1(t)}{\tilde{i}_1(t)}$  sebagai berikut

$$R_{load} = \frac{v_1(t)}{i_1(t)} = \frac{\tilde{v}_1(t)}{\tilde{i}_1(t)} \quad (8.103)$$



Gambar 8.25 Beban resistansi  $R_{load}$  seperti yang terlihat melalui transformator ideal menjadi  $R'_{load} = \frac{v_1(t)}{i_1(t)} = \frac{\tilde{v}_1(t)}{\tilde{i}_1(t)}$

dengan (8.100),  $v_2(t) = (N_2/N_1)v_1(t)$ , dan dari (7.11),  $i_2(t) = (N_2/N_1)i_1(t)$ , dimasukkan ke dalam (8.103) hasil

$$R_{load} = \frac{(N_2/N_1) v_1(t)}{(N_1/N_2) i_1(t)} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \frac{\tilde{v}_1(t)}{\tilde{i}_1(t)} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R'_{load}$$

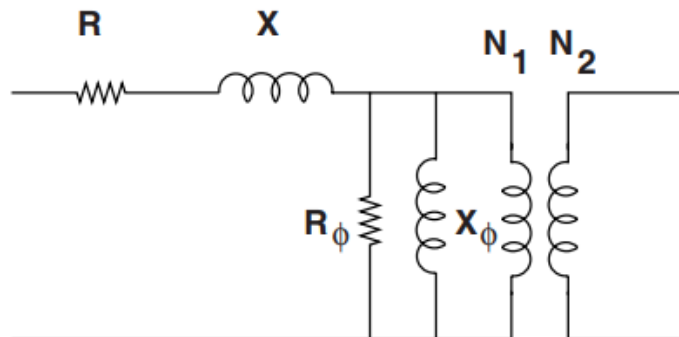
atau hambatan beban seperti yang terlihat melalui transformator yang ideal adalah

$$R'_{load} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_{load} \quad (8.104)$$

Analisis di atas berkaitan dengan hambatan beban. Hubungan yang sama berlaku untuk impedansi beban.

### 8.3.2 Transformator Tiga Fase

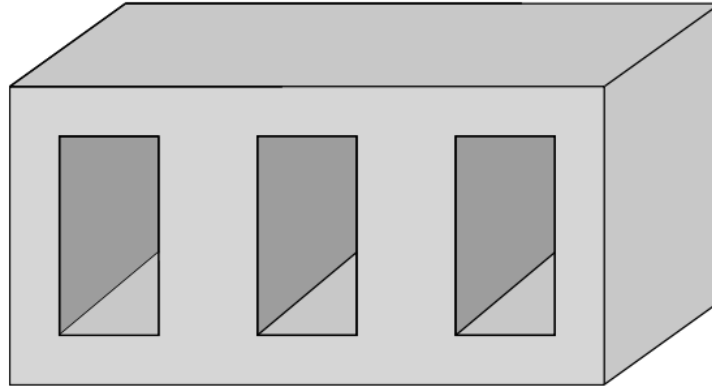
Transformator polifase dapat diimplementasikan sebagai tiga transformator fase tunggal atau sebagai tiga set belitan pada inti yang sesuai. Gambar 8.26 menunjukkan inti tiga fase. Satu set belitan, masing-masing merupakan transformator fase tunggal, akan dililitkan di sekitar setiap kaki inti berkaki tiga ini.



Gambar 8.26 Model rangkaian transformator daya yang setara dengan semua hambatan kebocoran dan belitan mengacu pada satu sisi.

(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Transformator tiga fase beroperasi sebagai tiga transformator fase tunggal seperti ditunjukkan pada Gambar 8.27. Komplikasinya adalah bahwa ada sejumlah cara untuk melilitkannya, dan sejumlah cara untuk menghubungkannya.



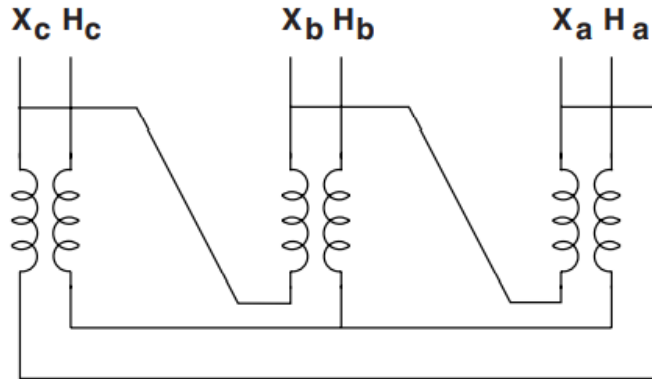
Gambar 8.27 Inti transformator tiga fase, tiga kaki.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Pada kedua 'sisi' koneksi transformator (yaitu sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah), dimungkinkan untuk menghubungkan belitan transformator baik garis ke netral (wye), atau baris ke baris (delta). Jadi kita dapat berbicara tentang koneksi transformator menjadi wye-wye, delta-delta, wye-delta, atau delta-wye.

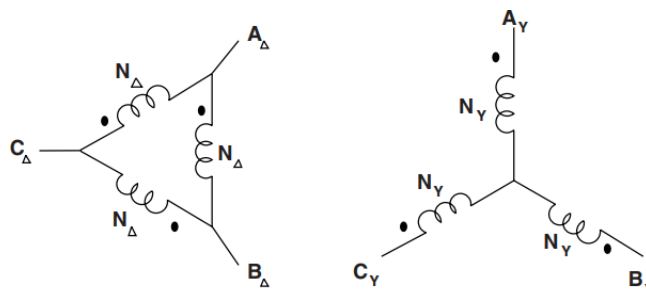
Koneksi transformator baik di wye-wye atau delta-delta cukup mudah dipahami. Masing-masing tegangan line-neutral (dalam kasus wye-wye), atau line-line (dalam kasus delta-delta) ditransformasikan oleh salah satu dari tiga transformator. Di sisi lain, interkoneksi transformator wye-delta atau delta-wye sedikit lebih kompleks. Gambar 8.28 menunjukkan koneksi delta-wye, dalam bentuk apa yang mungkin disebut 'diagram kabel'. Bentuk yang lebih skematis (dan lebih umum) dari gambar yang sama ditunjukkan pada Gambar 8.29. Dalam gambar itu, elemen belitan yang tampak sejajar dililitkan pada segmen inti yang sama, dan karenanya merupakan transformator fase tunggal.

Asumsikan bahwa  $N$  dan  $N_Y$  adalah jumlah putaran. Jika masing-masing transformator dianggap ideal, ada kendala tegangan dan arus berikut:

$$\begin{aligned} v_{aY} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (v_{a\Delta} - v_{b\Delta}) & i_{a\Delta} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (i_{aY} - i_{cY}) \\ v_{bY} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (v_{b\Delta} - v_{c\Delta}) & i_{b\Delta} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (i_{bY} - i_{aY}) \\ v_{cY} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (v_{c\Delta} - v_{a\Delta}) & i_{cY} &= \frac{N_y}{N_\Delta} (i_{cY} - i_{bY}) \end{aligned}$$



Gambar 8.28 Koneksi transformator Delta-wye.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))



Gambar 8.29 Skema koneksi transformator Delta-wye  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

di mana masing-masing tegangan adalah saluran-netral dan arus berada di saluran di terminal transformator.

Pertimbangkan apa yang terjadi jika transformator delta-wye terhubung ke sumber tegangan tiga fase yang seimbang, sehingga :

$$v_{a\Delta} = \text{Re}(Ve^{j\omega t})$$

$$v_{b\Delta} = \text{Re}\left(Ve^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}\right)$$

$$v_{c\Delta} = \text{Re}\left(Ve^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}\right)$$

Kemudian, amplitudo kompleks di sisi wye adalah:

$$V_{aY} = \frac{N_Y}{N_\Delta} V \left(1 - e^{-j\frac{2\pi}{3}}\right) = \sqrt{3} \frac{N_Y}{N_\Delta} V e^{j\frac{\pi}{6}}$$

$$V_{bY} = \frac{N_Y}{N_\Delta} V \left(e^{-j\frac{2\pi}{3}} - e^{j\frac{2\pi}{3}}\right) = \sqrt{3} \frac{N_Y}{N_\Delta} V e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

$$V_{aY} = \frac{N_Y}{N_\Delta} V \left( 1e^{-j\frac{2\pi}{3}} - 1 \right) = \sqrt{3} \frac{N_Y}{N_\Delta} V e^{j\frac{5\pi}{6}}$$

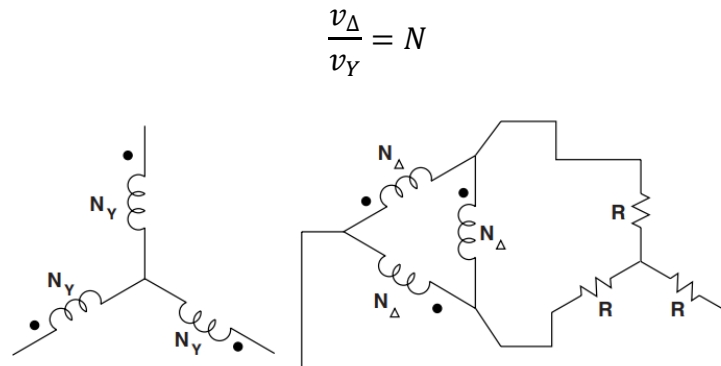
Dua pengamatan harus dilakukan di sini:

- Rasio tegangan (yaitu, rasio garis-garis atau garis-netral) berbeda dari rasio belokan dengan faktor  $\sqrt{3}$ .
- Semua tegangan sisi wye digeser secara bertahap sebesar  $30^\circ$  sehubungan dengan tegangan sisi delta.

Contoh :

Misalkan kita memiliki masalah berikut untuk dipecahkan:

Gambar 8.30 menjelaskan tentang resistor yang terhubung dengan wye tiga fase seimbang terhubung ke sisi delta transformator wye-delta dengan rasio tegangan nominal



Gambar 8.30 Resistor dengan Wye Tiga Fasa  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Apa impedansi yang melihat ke sisi wye transformator, dengan asumsi drive dengan sumber yang seimbang?

Situasi ditunjukkan pada Gambar 8.30.

Penting untuk mengingat hubungan antara rasio tegangan dan rasio belokan, yaitu:

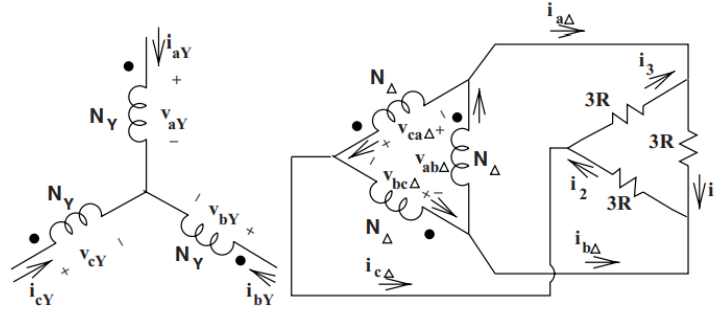
$$\frac{v_\Delta}{v_Y} = N = \frac{N_\Delta}{\sqrt{3}N_Y}$$

Jadi itu:

$$\frac{N_\Delta}{N_Y} = \frac{N_\Delta}{\sqrt{3}}$$

Selanjutnya, transformasi setara wye–delta untuk beban membuat gambar terlihat seperti Gambar 8.31





Gambar 8.31 Situasi yang setara.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

Dalam situasi ini, setiap belitan sekunder transformator terhubung langsung ke salah satu dari tiga resistor. Arus dalam resistor diberikan oleh:

$$i_1 = \frac{v_{ab\Delta}}{3R}$$

$$i_2 = \frac{v_{bc\Delta}}{3R}$$

$$i_3 = \frac{v_{ca\Delta}}{3R}$$

Arus garis adalah:

$$i_{a\Delta} = i_1 - i_3 = \frac{v_{ab\Delta} - v_{ca\Delta}}{3R} = i_{1\Delta} - i_{3\Delta}$$

$$i_{b\Delta} = i_2 - i_1 = \frac{v_{bc\Delta} - v_{ab\Delta}}{3R} = i_{2\Delta} - i_{1\Delta}$$

$$i_{c\Delta} = i_3 - i_2 = \frac{v_{ca\Delta} - v_{bc\Delta}}{3R} = i_{3\Delta} - i_{2\Delta}$$

Memecahkan arus di kaki transformator , kurangi, misalnya, ekspresi kedua dari yang pertama:

$$2i_{c\Delta} - i_{2\Delta} - i_{3\Delta} = \frac{2v_{ab\Delta} - v_{bc\Delta} - v_{ca\Delta}}{3R}$$

Sekarang, mengambil keuntungan dari fakta bahwa sistem seimbang:

$$i_{1\Delta} + i_{2\Delta} + i_{3\Delta} = 0$$

$$v_{ab\Delta} + v_{bc\Delta} + v_{ca\Delta} = 0$$

Untuk menemukan:

$$i_{1\Delta} = \frac{v_{ab\Delta}}{3R}$$

$$i_{2\Delta} = \frac{v_{bc\Delta}}{3R}$$

$$i_{3\Delta} = \frac{v_{ca\Delta}}{3R}$$

Akhirnya, hubungan transformator yang ideal memberikan:

$$v_{ab\Delta} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} v_{aY} \quad i_{aY} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} i_{1\Delta}$$

$$v_{bc\Delta} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} v_{bY} \quad i_{bY} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} i_{2\Delta}$$

$$v_{ca\Delta} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} v_{cY} \quad i_{cY} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} i_{3\Delta}$$

Jadi itu:

$$i_{aY} = \left(\frac{N_{\Delta}}{N_Y}\right)^2 \frac{1}{3R} V_{aY}$$

$$i_{bY} = \left(\frac{N_{\Delta}}{N_Y}\right)^2 \frac{1}{3R} V_{bY}$$

$$i_{cY} = \left(\frac{N_{\Delta}}{N_Y}\right)^2 \frac{1}{3R} V_{cY}$$

Resistansi yang tampak (yaitu, jelas apakah itu akan dihubungkan dalam wye) di terminal wye transformator adalah:

$$R_{eq} = 3R \left(\frac{N_Y}{N_{\Delta}}\right)^2$$

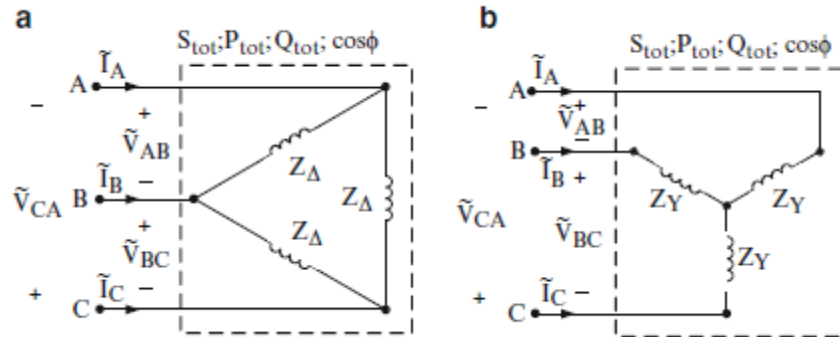
Dinyatakan dalam hal rasio tegangan, ini adalah:

$$R_{eq} = 3R \left(\frac{N}{\sqrt{3}}\right)^2 = R \left(\frac{v_Y}{v_{\Delta}}\right)^2$$

Penting untuk dicatat bahwa solusi ini membutuhkan waktu jauh. Diambil secara konsisten (seragam pada garis-netral atau seragam berdasarkan garis-garis), impedansi berubah di seluruh transformator dengan kuadrat rasio tegangan, apa pun koneksi yang digunakan.

**1) Kesetaraan Sirkuit Yang Terhubung dengan Y dan D**

Untuk  $\Delta$  (Gbr. 8.32a) dan Y (Gbr. 8.32b) sirkuit beban yang terhubung dengan tegangan line-to-line (VL-L), arus saluran (IL), faktor daya (cos $\phi$ ), daya nyata total (Ptot), daya reaktif total (Qtot) dan daya nyata total atau daya voltampere (Stot) adalah persis sama untuk kedua kasus. Dengan kata lain, kondisi yang dilihat dari terminal A, B, dan C dari Gambar 8.32a, b identik dan seseorang tidak dapat membedakan antara kedua sirkuit dari jumlah terminalnya. Juga akan terlihat bahwa impedansi (resistansi dan reaktansi) per fase koneksi Y seimbang adalah persis sepertiga dari nilai yang sesuai per fase koneksi  $\Delta$  seimbang.



Gambar 8.32 (a, b) Kesetaraan sirkuit yang terhubung dengan  $\Delta$  dan Y (Sumber : (Ewald F. Fuchs, 2011))

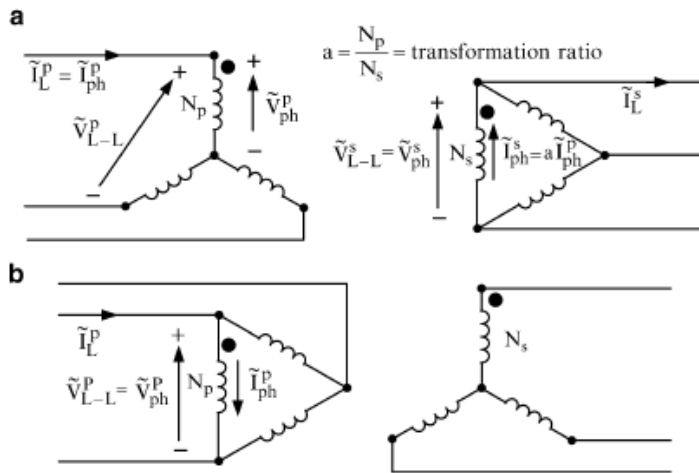
Akibatnya koneksi  $\Delta$  yang seimbang dapat diganti dengan koneksi Y yang seimbang, asalkan impedansi sirkuit per fase mematuhi hubungan

$$Z_Y = \left(\frac{1}{3}\right) Z_{\Delta} \tag{8.12}$$

Skema komputasi umum untuk sirkuit seimbang dapat didasarkan sepenuhnya pada sirkuit yang terhubung dengan Y (atau seluruhnya sirkuit yang terhubung dengan  $\Delta$ ).

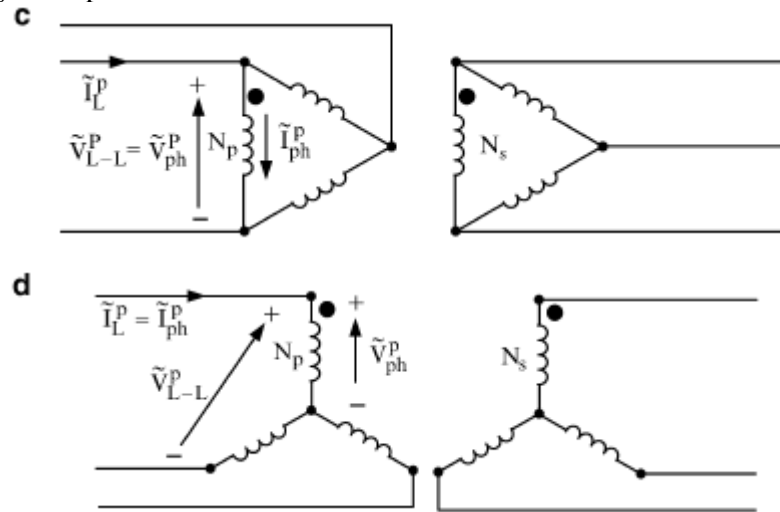
**2) Sirkuit Transformator Tiga Fase**

Tiga transformator fase tunggal dapat dihubungkan untuk membentuk bank tiga fase dengan salah satu dari empat cara yang ditunjukkan pada Gambar 8.33a–b



Gambar 8.33 (a) Koneksi Y- $\Delta$  dari transformator tiga fase (b) koneksi  $\Delta$ -Y dari koneksi  $\Delta$ - $\Delta$  transformator tiga fase

dan juga ditunjukkan pada Gambar 8.33 c-d.



Gambar 8.33 (c) transformator tiga fase (d) dari koneksi Y-Y dari transformator tiga fase.

### Contoh Aplikasi 8.1: Koneksi Transformator Tiga Fase (Ideal)

Gambar 8.33a mewakili koneksi Y- $\Delta$ , yaitu, primer terhubung dalam Y dan sekunder dalam  $\Delta$ . Dimulai dengan besaran tegangan saluran-ke-garis utama  $V_{L-L}^P$  seseorang memperoleh besarnya tegangan saluran-ke-netral (fase) primer

$V_{ph}^P = V_{L-L}^P / \sqrt{3}$ . Primer dan sekunder fase "a" adalah luka pada anggota tubuh inti besi yang sama dan, oleh karena itu, primer ( $\tilde{V}_{ph}^P$ ) dan sekunder ( $\tilde{V}_{ph}^S$ ) berada dalam fase untuk tanda titik yang diberikan pada Gambar 8.13a. Jika rasio belokan antara belitan fase primer ( $N_p$ ) dan sekunder ( $N_s$ ) adalah  $a = (N_p/N_s)$  maka

$$V_{ph}^S = \frac{V_{ph}^P}{a} = \frac{V_{L-L}^P / \sqrt{3}}{a}$$

Besarnya tegangan saluran-ke-saluran sekunder untuk koneksi- $\Delta$  identik dengan besarnya tegangan fase

$$V_{L-L}^S = V_{ph}^S = \frac{V_{L-L}^P / \sqrt{3}}{a}$$

Dimulai dengan arus garis utama  $I_L^P$  yang identik dengan arus fase utama untuk koneksi Y  $\tilde{I}_{ph}^P = \tilde{I}_L^P$  satu diperoleh untuk arus fase sekunder  $I_{ph}^S = a I_L^P$ . Arus garis sekunder kemudian  $I_L^S = \sqrt{3} I_{ph}^S = \sqrt{3} a I_{ph}^P = \sqrt{3} a I_L^P$ .

Daya nyata utama (input) adalah

$$S^P = 3 V_{ph}^P I_{ph}^P = 3 \frac{V_{L-L}^P}{\sqrt{3}} I_{ph}^P = \sqrt{3} V_{L-L}^P I_L^P$$

dan daya nyata sekunder (output) adalah

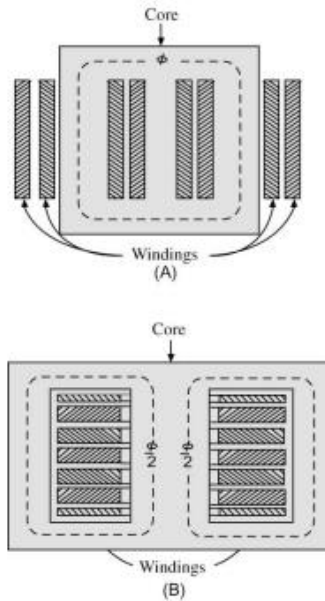
$$S^S = 3 V_{ph}^S I_{ph}^S = 3 V_{L-L}^S I_{ph}^S = 3 \frac{V_{L-L}^P / \sqrt{3}}{a} a I_L^P = \sqrt{3} V_{L-L}^P I_L^P = S^P$$

Ini berarti daya nyata input identik dengan daya nyata output karena kerugian transformator telah diabaikan karena penggunaan hubungan transformator yang ideal. Pembaca didorong untuk melakukan analisis yang sesuai untuk Gambar 8.33b–d

### 8.3.3 Transformator tipe Shell dan Core

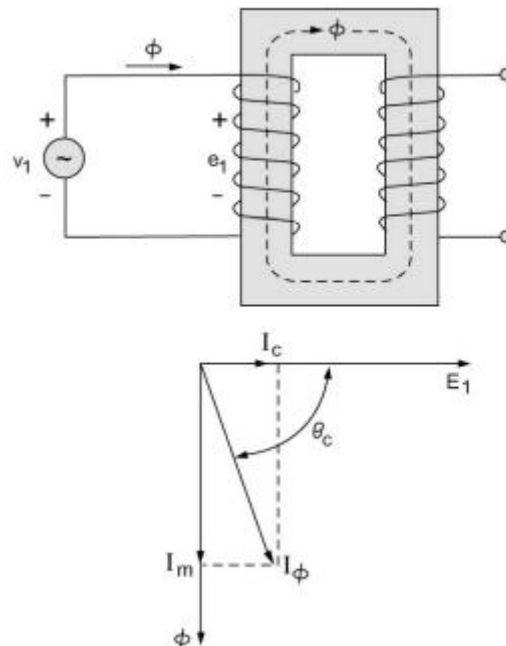
Tindakan transformator membutuhkan fluks untuk menghubungkan dua belitan. Ini akan diperoleh lebih efektif jika inti besi digunakan karena inti besi membatasi fluks ke jalur tertentu yang menghubungkan kedua belitan. Bahan magnetik seperti besi mengalami kehilangan energi karena penerapan tegangan bolak-balik ke loop B-H-nya. Kerugian terdiri dari dua bagian. Yang pertama disebut kerugian eddy-saat ini, dan yang kedua adalah kerugian histeresis. Kehilangan arus Eddy pada dasarnya adalah kehilangan  $IR$  karena arus yang diinduksi dalam bahan magnetik. Untuk mengurangi kerugian ini, sirkuit magnetik biasanya terbuat dari tumpukan laminasi tipis. Kehilangan histeresis disebabkan oleh energi yang digunakan dalam mengarahkan domain magnetik material di sepanjang medan. Kerugian tergantung pada bahan yang digunakan.

Dua jenis konstruksi digunakan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.34. Yang pertama dilambangkan tipe inti, yang merupakan cincin tunggal yang dikelilingi oleh satu atau lebih kelompok belitan. Panjang rata-rata rangkaian magnetik untuk tipe ini panjang,



Gambar 8.34 Konstruksi Transformator (A) Tipe Core dan (B) Tipe Shell  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

Karena nonlinier kurva B-H dari bahan magnetik, arus primer tanpa beban (untuk tujuan ilustrasi) tidak akan menjadi sinusoida melainkan versi terdistorsi tertentu, yang masih periodik. Untuk tujuan analisis, analisis Fourier menunjukkan bahwa komponen fundamental tidak sefasa dengan tegangan yang diberikan. Arus primer fundamental ini pada dasarnya terbuat dari dua komponen. Yang pertama sefasa dengan tegangan dan dikaitkan dengan daya yang diambil oleh rugi-rugi arus eddy dan histeresis dan disebut komponen rugi-inti  $I_c$  dari arus eksitasi  $I_\phi$ . Komponen yang tertinggal  $90^\circ$  disebut arus magnetisasi  $I_m$ . Harmonik yang lebih tinggi diabaikan. Gambar 8.35 menunjukkan diagram fasor tanpa beban untuk transformator satu fasa.



Gambar 8.35 Transformator tanpa beban  
(Sumber : (Mohamed E. El-Hawary, 2000))

sedangkan panjang rata-rata belitan pendek. Kebalikannya berlaku untuk jenis shell, di mana sirkuit magnetik melingkupi belitan.

## 8.4 Prinsip Kerja Transformator

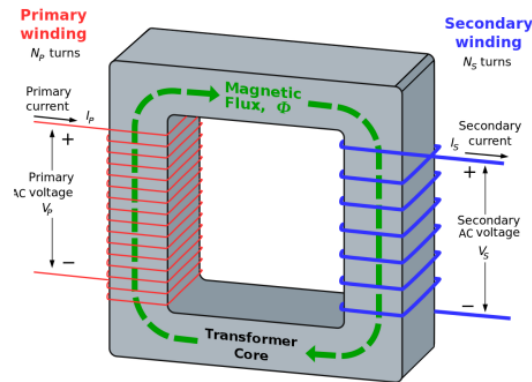
Prinsip dasar yang mendasari yang memberi jalan bagi teknologi ini adalah induksi elektromagnetik. Medan magnet diproduksi dalam konduktor pembawa arus searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam. Dengan cara yang sama, ketika arus melewati kumparan, ia menghasilkan medan magnet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.48. Medan magnet berfluktuasi karena arus yang mengalir melalui kumparan. Kemudian, karena kumparan pertama dihubungkan dengan belitan sekunder, medan magnet yang berfluktuasi akan menginduksi EMF (gaya elektromagnetik) dalam kumparan sekunder karena induksi elektromagnetik. EMF bersih dalam kumparan sekunder akan didasarkan pada jumlah putaran di kumparan pertama. EMF yang dihasilkan dalam kumparan kedua dapat dihitung berdasarkan tegangan input yang diberikan. Oleh karena itu, tegangan dapat diubah dengan mengubah jumlah belokan. Dengan mengurangi jumlah belokan dalam belitan sekunder, kita dapat menghasilkan tegangan output yang kurang dari tegangan input, transformator semacam itu dikenal sebagai "Transformator Step-down." Sebaliknya, dengan meningkatkan jumlah belokan dalam belitan sekunder, tegangan output sekunder akan lebih besar dari tegangan input primer, yang seperti itu disebut "Step-up Transformer." Sebagian besar transformator telah membangun sistem pendingin untuk mengurangi peningkatan peringkat daya. Trafo besar diisi dengan oli trafo untuk mengedarkan tangki transformator sehingga mendinginkan insulasi listrik dan belitan. Itu juga dapat didinginkan melalui udara, minyak, air dan kombinasi lainnya.

### 8.4.1 Prinsip Operasi & Kerja Transformator

Transformator adalah perangkat statis (dan tidak mengandung pada bagian yang berputar, karenanya tidak ada kehilangan gesekan), yang mengubah daya listrik dari satu sirkuit ke sirkuit lain tanpa mengubah frekuensinya. itu Melangkah ke atas (atau Mundur) tingkat Tegangan dan Arus AC.

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi timbal balik dari dua kumparan atau induksi Elektromagnetik Faraday Law. Ketika arus dalam kumparan primer diubah, fluks yang terhubung ke kumparan sekunder juga berubah. Akibatnya EMF diinduksi dalam kumparan sekunder karena hukum Faraday dari induksi elektromagnetik.

Transformator didasarkan pada dua prinsip: pertama, bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet (elektromagnetisme), dan, kedua bahwa medan magnet yang berubah dalam kumparan kawat menginduksi tegangan melintasi ujung kumparan (induksi elektromagnetik) seperti pada Gambar 8.36. Mengubah arus dalam kumparan primer mengubah fluks magnetik yang dikembangkan. Fluks magnetik yang berubah menginduksi tegangan dalam kumparan sekunder.



Gambar 8.36 induksi elektromagnetik pada tranformator.

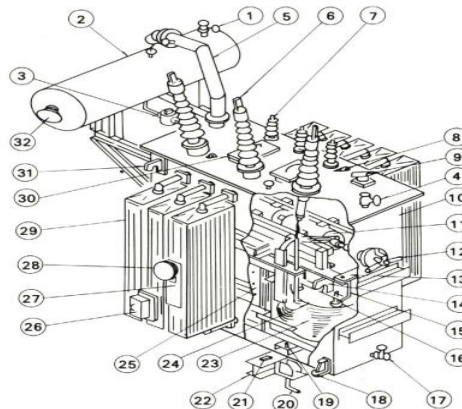
(Sumber : <https://www.electricaltechnology.org/2012/02/working-principle-of-transformer.html>)

Transformator sederhana memiliki inti baja besi lunak atau silikon dan belitan yang ditempatkan di atasnya (inti besi). Baik inti dan belitan diisolasi satu sama lain. Belitan yang terhubung ke pasokan utama disebut primer dan belitan yang terhubung ke sirkuit beban disebut sekunder.

Belitan (koil) yang terhubung ke tegangan yang lebih tinggi dikenal sebagai belitan tegangan tinggi sedangkan belitan yang terhubung ke tegangan rendah dikenal sebagai belitan tegangan rendah. Dalam kasus transformator step up, kumparan primer (belitan) adalah belitan tegangan rendah, jumlah putaran belitan sekunder lebih banyak daripada primer. Begitu juga sebaliknya untuk transformator step down

## 8.5 Konstruksi Transformator

Bagian-bagian penyusun kontruksi transformator ditunjukkan pada Gambar 8.37:



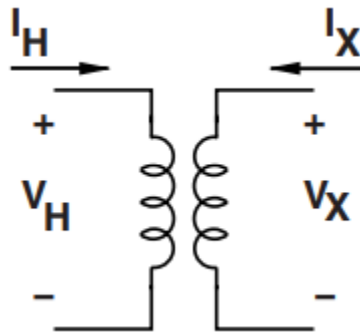
Gambar 8.37. Bagian dari tranformator.

(Sumber : <https://www.electricaltechnology.org/2012/02/working-principle-of-transformer.html>)

1	Katup filter oli	17	Katup pembuangan oli
2	Konservator	18	Mendongkrak bos
3	Buchholz relay	19	Sumbat
4	Katup filter oli	20	Baut pondasi
5	Ventilasi pelepas tekanan	21	Grounding terminal
6	Bushing tegangan tinggi	22	Basis selip
7	Bushing tegangan rendah	23	Coil
8	Suspensi	24	Coil pelat tekanan
9	B C T Terminal	25	Inti
10	Tangki	26	Kotak terminal untuk perangkat pelindung
11	Pengisi daya keran yang tidak berenergi	27	Plat peringkat
12	Ketuk pegangan pengisi daya	28	Termometer dial
13	Lebih cepat untuk inti dan coil	29	Radiator
14	Mencantumkan hook untuk inti dan coil	30	Lubang got
15	Bingkai akhir	31	Pengait pengangkat
16	Baut tekanan coil	32	Pengukur level oli tipe dial

### SOAL

- 1) Transformator yang ideal ditunjukkan pada Gambar 8.32. Gunakan model ini untuk transformator distribusi dari  $V_H = 24 \text{ kV}$  ke  $V_X = 240 \text{ V (RMS)}$ . Ini, tentu saja, transformator fase tunggal dan merupakan jenis yang biasa digunakan untuk menyediakan layanan 240 V yang biasa digunakan di Amerika Serikat. Ini disadap tengah untuk menyediakan 120 V untuk sirkuit cabang. Asumsikan transformator ini dinilai pada 24 kVA.
  - a) Apa peringkat saat ini  $I_X$  dan  $I_H$ ?
  - b) Jika sisi sekunder ('X') memiliki 26 putaran, berapa banyak putaran yang dimiliki sisi primer ('H')?



Gambar 8.38 Transformator ideal.  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

- c) Jika transformator ini dimuat oleh resistor nilai  $R$ , berapa nilai  $R$  yang mengakibatkan transformator dimuat ke peringatnya?
  - d) Jika sekunder dimuat oleh resistor nilai  $R$ , apa impedansi melihat ke sisi primer?
- 2) Dua model alternatif untuk transformator fase tunggal ditunjukkan pada Gambar 8.33. 'Model A' menunjukkan kebocoran dan elemen inti yang dirujuk ke sisi 'H', sedangkan 'Model B' menunjukkannya di sisi 'X'. Ini adalah transformator 24 kVA, 8 kV hingga 240 V, RMS.



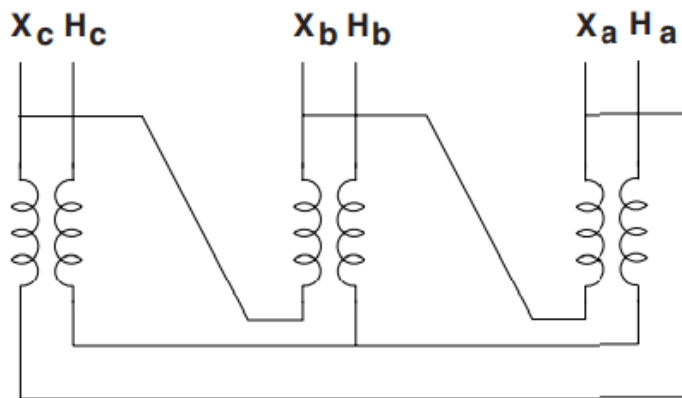
- 4.8 Jika inti menyerap 100 W dan 1000 VAR, apa saja elemen inti  $R_c$  dan  $X_c$  jika berada :
- Di sisi 'H' (Model A)?
  - Di sisi 'X' (Model B)?

- 4.9 Jika, ketika berjalan pada arus pengenal, kehilangan tembaga adalah 1.200 W, apa elemen resistansi seri:

- Jika berada di sisi 'H':  $R_H$
- Jika ada di sisi 'X':  $R_X$

- 3) Transformator yang terhubung dengan delta-wye ditunjukkan pada Gambar 8.34. Ini adalah transformator 128 kV hingga 345 Kv, line-line, RMS. Sisi 'X' adalah sisi 128 kV.

- Apakah itu rasio belokan  $N_X : N_Y$ ?
- Gambar diagram fasor tegangan primer dan sekunder. Pastikan untuk mendapatkan sudut fase relatif yang tepat.
- Jika beban seimbang menarik 100 MVA pada faktor daya 0,8 dari sisi 'H', apa arus pada primer dan sekunder. Asumsikan bahwa tegangan Fase A pada sisi 'X' memiliki sudut fase nol (yaitu, gunakan  $V_{aX}$  sebagai referensi fase).



Gambar 8.39. Koneksi transformator Delta-wye.

(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

- 4) Transformator yang terhubung dengan delta-wye ditampilkan dalam format skematik pada Gambar 8.35. Transformator ini dari 600 V, RMS di sisi 'H' hingga 208 V, RMS di sisi 'X'.

- Berapa rasio belokan antara sisi 'H' ke sisi 'X'?
- Jika transformator terbuka di sisi 'X' tetapi terhubung ke 600 V yang seimbang, sumber garis-garis di sisi 'H', gambar diagram fasor yang menunjukkan tegangan di kedua sisi.
- Sekarang transformator dimuat oleh satu resistor 10 yang terhubung dari terminal AX ke netral (titik bintang) dari sisi 'X'. Sisi 'H' terhubung ke sumber tegangan 600 V (line-line, RMS) yang terhubung dalam wye.
  - Apa itu daya nyata dan reaktif yang diambil dari setiap fase sumber di sisi 'H'?
  - Gambar diagram fasor yang menunjukkan tegangan dan arus utama (sisi 'H').

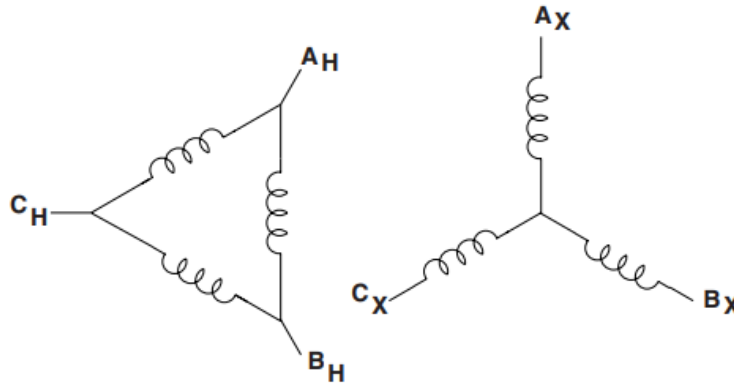


Figure 8.40 Delta-ye transformer connection  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

- 5) Koneksi transformator delta-ye ditampilkan dalam bentuk skematis pada Gambar 8.36, Transformator ini adalah pengaturan step-down dari 13,8 kV, line-line, hingga 480 V, line-line, keduanya RMS. Lihat Gambar 8.37. Resistor di sisi wye masing-masing menggambar 100 A.
- Berapa banyak daya yang ditarik di sisi wye dari masing-masing dari tiga sekunder transformator?
  - Berapa rasio belokan antara transformator fisik yang membentuk bank transformator tiga fase?
  - Apa tiga arus di sisi utama masing-masing dari tiga transformator? Tunjukkan dalam diagram vektor yang cukup proporsional. Tunjukkan tegangan di seluruh belitan transformator tersebut juga.

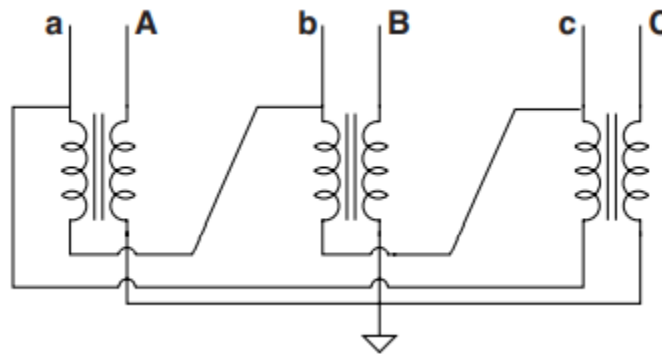
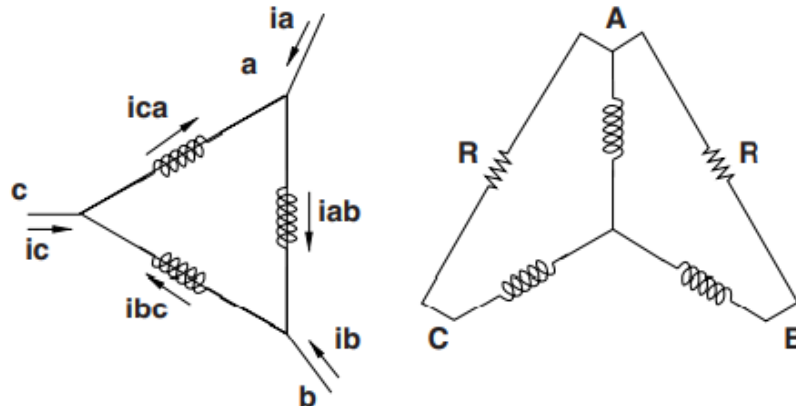


Figure 8.41. Transformer hookup  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

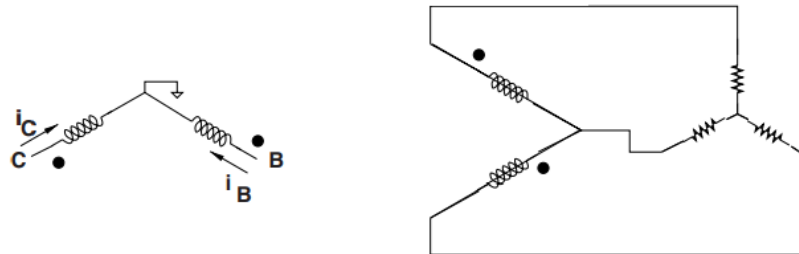
- Sekarang, apa tiga arus ke terminal primer transformator yang terhubung ke delta? Perhatikan dalam diagram vektor yang proporsional.
- Dengan asumsi sumber pada sisi 13,8 kV terhubung dengan wye, berapa banyak daya nyata dan reaktif yang diambil dari setiap fase? Apakah ini sesuai dengan daya yang ditarik oleh beban?



Gambar 8.42. Koneksi transformator yang dimuat tidak seimbang  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

- 6) Dua transformator terhubung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.38. Ini sesuai dengan dua fase primer yang terhubung dengan wye (dibumikan, tentu saja), dengan sekunder di 'delta terbuka'. Transformator dililit untuk rasio 13,8 kV/480 V. Pendahuluan terhubung ke sumber 13,8 kV (garis-garis) dan delta terbuka sekunder mendorong beban seimbang yang terhubung dengan wye yang menarik 100 A per fase.

- a) Berapa rasio giliran fisik transformator ini?



Gambar 8.43. Delta terbuka dua transformator  
(Sumber : (James L. Kirtley, 2010))

- b) Buat sketsa dan dimensi diagram fasor yang memperlihatkan arus dalam dua belitan sekunder.  
 c) Buat sketsa dan dimensi diagram fasor yang menunjukkan arus dalam dua belitan utama.  
 d) Dengan asumsi bahwa sisi wye transformator terhubung ke sumber tegangan, tarik arus di belitan utama  $i_A$ ,  $i_B$  dan  $i_C$ , sehubungan dengan tegangan di sisi wye.  
 e) Tunjukkan bahwa jumlah kekuatan nyata dan reaktif di sisi wye cocok dengan jumlah yang sama di sisi delta.  
 f) Apa yang akan terjadi jika tanah di sisi wye dihilangkan?

# BAB IX

## MESIN DIRECT CURRENT (DC)

### 9.1 Pendahuluan

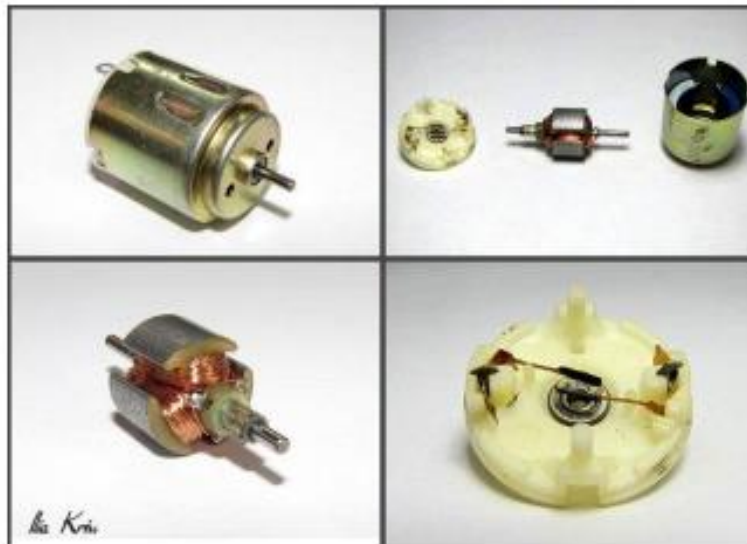
Istilah "motor DC" secara tradisional digunakan untuk merujuk pada "motor DC yang disikat". Di bagian motor DC, kita telah melihat bahwa sikat diperlukan untuk mengubah arus bolak-balik yang dihasilkan dalam generator DC menjadi arus searah (dan sebaliknya untuk motor DC). Kita juga telah melihat bahwa "belitan medan" digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang diperlukan untuk konversi energi. Jika belitan digantikan oleh magnet permanen, medan magnet yang berputar kemudian dihasilkan tanpa perlu belitan terpisah. Selain itu, kerugian di lapangan akan dihilangkan. Ada peningkatan yang signifikan dalam teknologi magnet permanen sejak beberapa tahun terakhir. Magnet permanen adalah paduan seperti Neodymium Iron Boron (NdFeB) dan Samarium Cobalt telah menjadi populer dalam beberapa tahun terakhir.

Sekarang, jika magnet permanen ditempatkan pada rotor, belitan angker akan diam dan karenanya sikat dapat dilepas. Ini memiliki dua keunggulan : 1. Kerugian resistif dalam kuas sepenuhnya dihilangkan 2. Masalah pemeliharaan dan keselamatan juga diurus.

Dengan demikian, motor DC dengan magnet permanen tanpa sikat disebut motor DC brushless atau hanya motor BLDC.

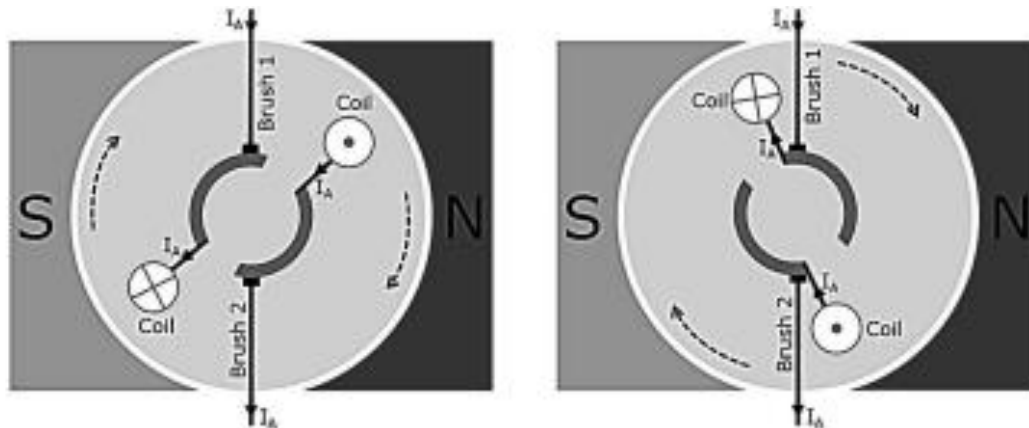
#### 9.1.1 Struktur motor dan deskripsi fungsional

Gambar 9.1 menunjukkan pengaturan khas mesin DC, yang terdiri dari rumah motor yang dikemas penuh serta magnet permanen pada stator, rotor dengan belitan dan sikat pergantian. Magnet stator menciptakan medan magnet yang tereksitasi secara terpisah untuk mesin. Rotor membawa belitan rotor, yang diumpankan oleh tegangan DC melalui komutator dan sikat.



Gambar 9.1. Struktur mekanis motor DC magnet permanen yang tereksitasi secara eksternal; searah jarum jam: sepenuhnya dikemas, terurai, sikat dan rotor.  
(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

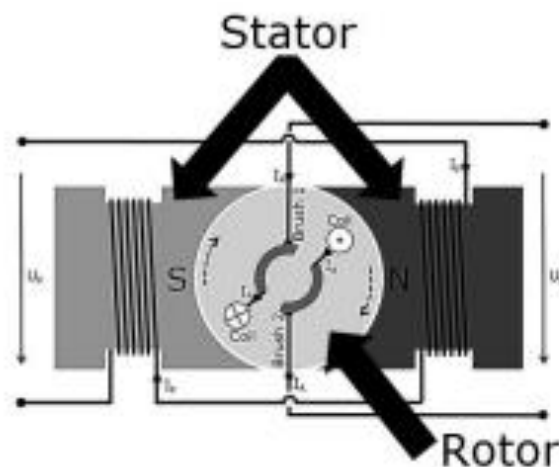
Gambar 9.2 menunjukkan penampang skematis dari mesin DC. Ini menjelaskan bagaimana kuas menghubungkan komutator dan bagaimana medan rotor mengubah arahnya tergantung pada sikat mana yang menghubungkan segmen komutator mana.



Gambar 9.2. Penampang sederhana dari mesin DC magnet permanen dengan dua kemungkinan posisi komutator, tepat setelah (kiri) dan sesaat sebelum (kanan) pergantian berikutnya. (Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Oleh karena itu, ketika rotor berputar, arah bidang rotor berubah tergantung pada arah belitan kontak sikat yang sebenarnya. Seperti halnya setiap pergantian tegangan dialihkan secara mekanis ke dalam satu set belitan baru (induktansi), percikan dapat terjadi. Percikan terutama merupakan masalah bagi arus yang lebih tinggi dan pada kecepatan tinggi: Sikat dan komutator dapat membakar kontak listrik mereka dan menyebabkan mengakhiri kebakaran cincin di komutator dengan membiarkan arus bocor.

Bidang stator dapat diproduksi oleh magnet permanen (seperti yang ditunjukkan pada gambar sebelumnya) atau dengan belitan DC khusus, menghasilkan medan eksitasi yang diperlukan. Gambar 9.3. menunjukkan mesin DC dengan belitan eksitasi pada stator alih-alih magnet permanen. Berbeda dengan eksitasi berbasis magnet permanen, pengaturan ini memungkinkan medan eksitasi diatur.

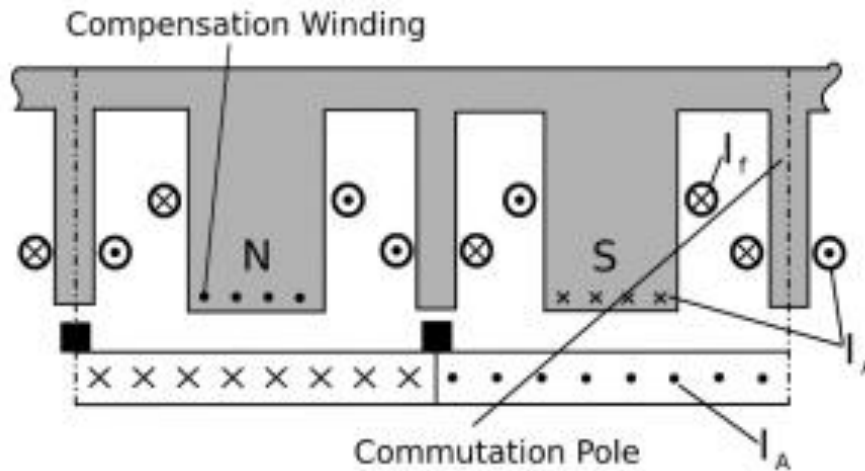


Gambar 9.3. Representasi skematis dari mesin DC yang tereksitasi secara elektrik (Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Rotor mesin juga disebut "angker" dan oleh karena itu arus rotor disebut arus anker. Karena struktur motor DC, medan eksitasi dan medan anker saling ortogonal. Jika kedua bidang dapat disesuaikan secara independen seperti pada mesin DC yang tereksitasi secara terpisah, kontrol torsi dan fluks independen dapat dengan mudah diterapkan pada mesin DC.

Rotor mesin DC memiliki konduktor pembawa arus di mana medan magnet diproduksi. Untuk memberi makan arus anker ke rotor yang berputar, sikat diperlukan. Dalam kebanyakan kasus, sikat adalah blok karbon kecil yang ditekan oleh pegas terhadap komutator (area kontak tembaga) dari rotor yang berputar. Komutator mengubah arah arus anker selama rotasi (lihat Gambar 9.4, sehingga bidang anker selalu ortogonal ke bidang eksitasi (lebih detail dapat ditemukan di bagian "Leksikon" untuk produksi torsi).

Untuk mengurangi percikan pada sikat, belitan kompensasi digunakan pada mesin DC besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.4. Belitan ini ditempatkan di dekat kutub Utara (N) dan Selatan (S) stator. Tugas mereka adalah mengurangi bidang stator di tiang komutasi, oleh karena itu mengurangi percikan yang diinduksi, ketika sikat berkomutasi. Karena bidang stator utama tergantung pada amplitudo dan arah arus anker, arus anker juga digunakan dalam belitan kompensasi.



Gambar 9.4.: Belitan kompensasi dan tiang pergantian mesin DC yang dihebohkan secara terpisah.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

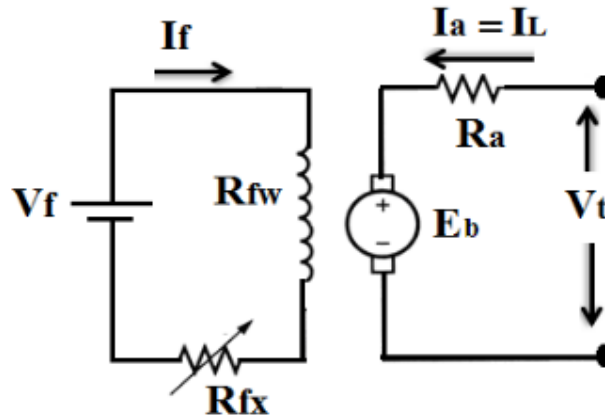
"Sebagai perkiraan, masa sikat 7500 jam dapat dianggap normal untuk tujuan umum, motor DC tenaga kuda sedang dengan film komutator yang baik yang beroperasi dengan kecepatan permukaan komutator di kisaran 2500 hingga 4000 rpm. Umur minimum mungkin 2000 hingga 5000 jam dengan 10000 jam menjadi maksimum. Namun, tidak jarang motor dengan beban ringan atau variabel, seperti motor perkakas mesin, memiliki masa pakai sikat yang kurang dari 2000 jam. Masa pakai sikat bahkan lebih jauh berkurang pada kecepatan permukaan komutator yang lebih tinggi. Sebagai aturan praktis, umur sikat pada 3600 rpm adalah setengah dari 1800 rpm. Kehidupan sikat juga dipengaruhi oleh beban." Koneksi langsung antara masa pakai sikat dan kecepatan rotor menjelaskan mengapa mesin DC yang disikat paling sering ditemukan dalam aplikasi kecepatan yang lebih rendah (<10.000 rpm).

## 9.2 Rangkaian Equivalen Motor DC

### 9.2.1 Motor DC yang Tereksitasi Secara Terpisah

Belitan medan shunt disuplai dari sumber daya DC konstan yang terpisah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.5 untuk menghasilkan fluks magnetik, diwakili oleh resistor  $R_f$ .

Resistor  $R_{fc}$  mewakili resistor variabel eksternal (kadang-kadang disatukan dengan resistansi kumparan medan) yang digunakan untuk mengontrol jumlah arus di sirkuit medan. Belitan angker diwakili oleh e.m.f  $E_b$  belakang dan resistor  $R_a$ . dipasang dari sumber daya DC ( $V_t$ )



Gambar 9.5. Rangkaian Ekuivalen Motor DC yang Tereksitasi Secara Terpisah.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Dimana rangkaian ekuivalen tersebut dapat dirumuskan secara matematis :

$$V_f = I_f * R_f$$

$$V_t = E_b + I_a R_a$$

$$E_b = K_a \varphi W_m$$

$$T_a = K_a \varphi I_a$$

Keterangan :

$R_{fw}$  : Ketahanan belitan lapangan.

$R_{fc}$  : Resistensi rheostat kontrol yang digunakan dalam sirkuit lapangan.

$R_f = R_{fw} + R_{fx}$  : resistansi medan total

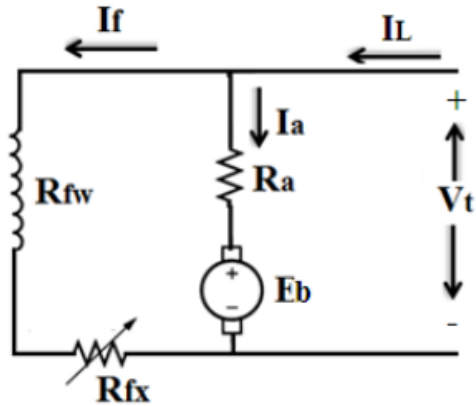
$R_a$  : Resistensi sirkuit angker.

### 9.2.2 Motor DC Yang kekuatannya dari angker motor

Belitan medan mendapatkan kekuatannya dari terminal angker motor.

#### 1) Motor Shunt DC

Belitan shunt mendapatkan tenaganya dari terminal angker motor. Belitan medan shunt terhubung melintasi (sejajar dengan) terminal angker seperti Gambar 9.6.



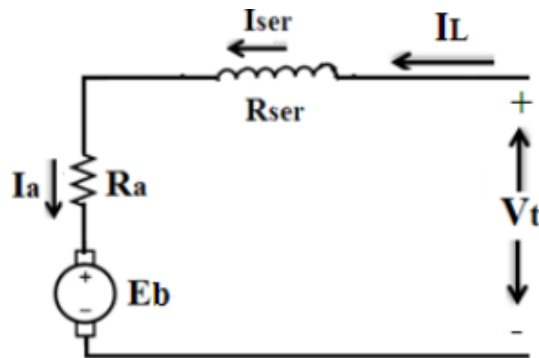
Gambar 9.6. Rangkaian Ekivalen Motor Shunt DC.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Dimana rangkaian ekivalen tersebut dapat dirumuskan secara matematis :

$$\begin{aligned}
 V_f &= V_t = I_f * R_f \\
 V_t &= E_b + I_a R_a \\
 E_b &= K_a \phi \omega_m \\
 I_L &= I_a - I_f \\
 T_a &= K_a \phi I_a
 \end{aligned}$$

### 2) Motor DC seri

Belitan medan seri terhubung secara seri dengan belitan anker ditunjukkan pada Gambar 9.7.



Gambar 9.7. Rangkaian Ekivalen Motor DC seri.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_{ser} = I_a \\
 V_t &= E_b + I_a (R_f + R_{ser}) \\
 T_a &= K_a \phi I_a \\
 \phi &= C I_a \\
 T_a &= K_a C I_a^2
 \end{aligned}$$

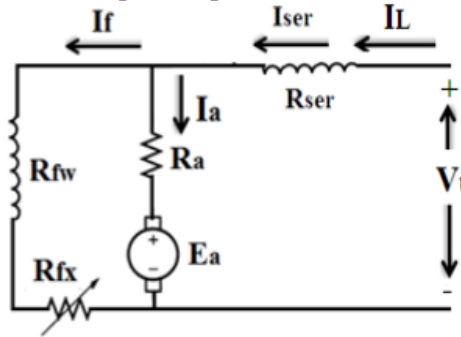
### 3) Motor DC majemuk

Baik shunt dan belitan medan seri dihubungkan dengan belitan anker dalam shunt pendek atau shunt panjang.



a) **Motor DC senyawa shunt pendek**

Ketika belitan medan shunt terhubung langsung melintasi terminal angker, itu disebut motor majemuk shunt pendek pada Gambar 9.8.



Gambar 9.8. Rangkaian Ekuivalen Motor DC senyawa shunt pendek.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

$$I_L = I_{ser}$$

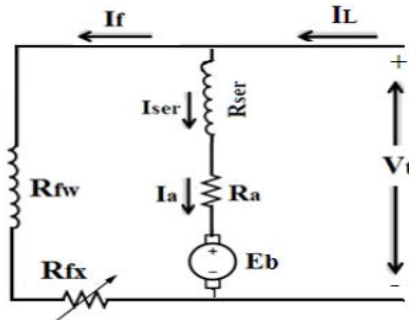
$$I_a = I_L - I_f$$

$$I_f = \frac{V_t + I_{ser} * R_{ser}}{R_f}$$

$$V_t = E_b + (I_a * R_a) + (I_{ser} * R_{ser})$$

b) **Motor DC kompon shunt panjang**

Ketika belitan medan shunt terhubung melintasi beban, itu disebut motor majemuk shunt panjang ditunjukkan pada Gambar 9.9.



Gambar 9.9. Rangkaian Ekuivalen Motor DC kompon shunt panjang.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

$$I_f = \frac{V_t}{R_f}$$

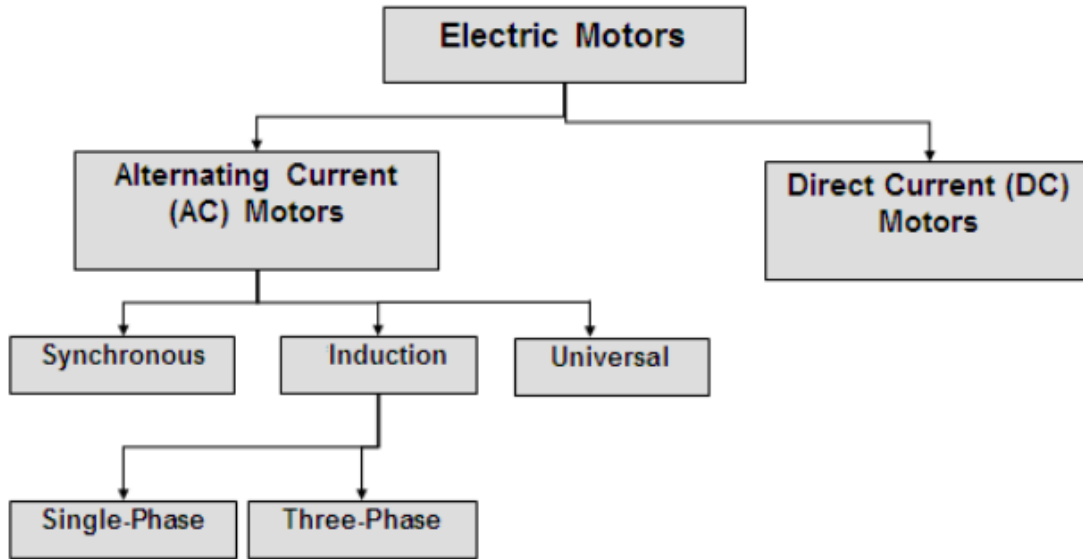
$$I_a = I_{ser} = I_L - I_f$$

$$V_t = E_b + (I_a * R_a) + (I_{ser} * R_{ser})$$

$$V_t = E_b + I_a(R_a + R_{ser})$$

### 9.3 Jenis-jenis Motor Listrik

Jenis – jenis motor listrik ditunjukkan pada Gambar 9.10

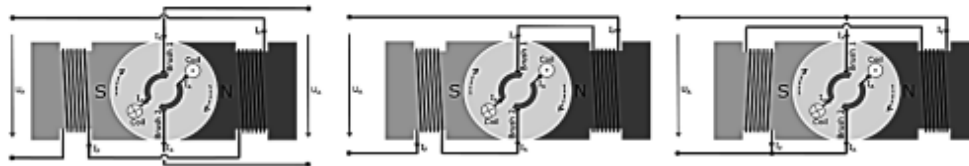


Gambar 9.10. Bagan jenis – jenis motor.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Motor DC dapat dipisahkan menjadi tiga jenis:

- Secara terpisah / eksternal bersemangat
- Luka seri
- Mesin DC luka paralel.

Motor DC berbasis magnet permanen yang disebutkan sebelumnya adalah subtype dari motor DC yang tereksitasi secara terpisah, yang tidak memiliki kontrol fleksibel dari medan eksitasi yang disediakan stator dan oleh karena itu strukturnya jauh lebih sederhana seperti pada Gambar 9.11.



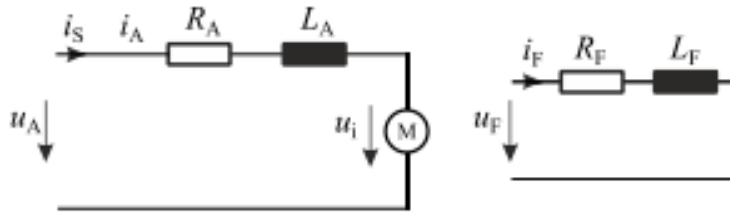
Secara terpisah /  
eksternal bersemangat      Luka seri      Mesin DC luka paralel

Gambar 9.11. Ikhtisar dari tiga jenis motor DC yang berbeda.  
(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Bagian berikut membahas pengaturan spesifik dan karakteristik yang dihasilkan dari masing-masing jenis motor DC secara lebih rinci.

### 9.3.1 Mesin DC yang Secara Terpisah

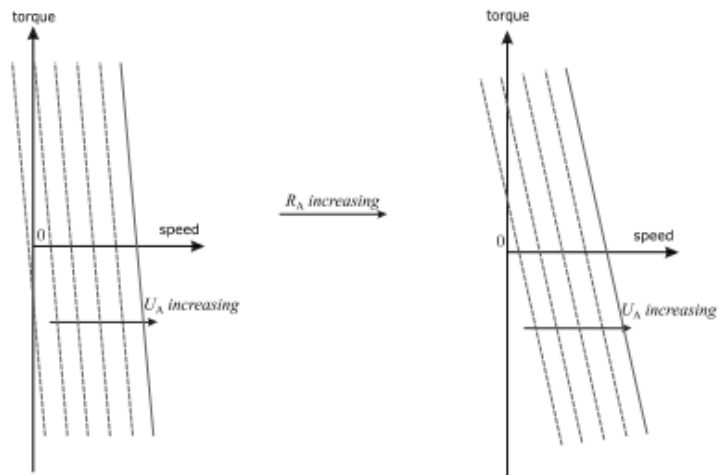
Mesin DC yang tereksitasi secara eksternal atau terpisah terdiri dari dua sirkuit listrik: Sirkuit anker (sisi kiri) dan sirkuit medan (sisi kanan) digambarkan dalam diagram sirkuit yang setara pada Gambar 9.12. Sirkuit medan terdiri dari belitan, yang memiliki  $L_F$  induktansi dan  $R_F$  resistansi ohmik. Tegangan tidak diinduksi dalam belitan medan, karena tidak bergerak dalam medan magnet. Sirkuit anker diwakili oleh kumparan dengan resistansi yang sesuai  $R_A$  dan  $L_A$  induktansi. Selain itu,  $u_i$  sumber tegangan termasuk dalam rangkaian setara yang mewakili tegangan emf belakang yang diinduksi. Tegangan  $u_i$  berbanding lurus dengan kecepatan mesin dan menjelaskan tegangan yang diinduksi penghitung karena medan rotor yang berputar (lihat bab "Leksikon" untuk emf belakang).



Gambar 9.12. Mesin DC yang bersemangat secara terpisah.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Mesin ini banyak digunakan pada servo drive karena medan eksitasi dan arus anker dapat dikontrol secara independen. Saat mengendalikan mesin DC yang tereksitasi secara terpisah, biasanya, fluksnya tetap konstan. Karakteristiknya adalah, dengan demikian, garis lurus dengan kemiringan negatif yang tergantung pada ketahanan anker  $R_A$ , seperti yang terlihat pada Gambar 9.13. Dengan meningkatnya  $R_A$ , garis karakteristik pada Gambar 9.13 menjadi kurang curam. Oleh karena itu, kecepatan turun lebih cepat dengan meningkatnya torsi beban. Mesin yang baik harus memiliki ketahanan anker kecil sehingga karakteristik kecepatan torsi yang lebih kaku diperoleh.



Gambar 9.13. Kurva karakteristik kecepatan torsi dari mesin DC yang dihebohkan secara terpisah.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

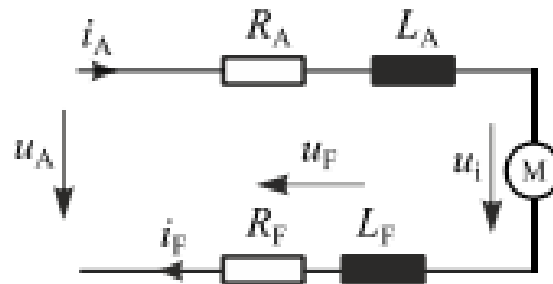
### 9.3.2 Kontrol Mesin DC yang Dihebitsitasi Secara Terpisah

Kecepatan mesin DC yang tereksitasi secara terpisah dapat bervariasi, baik dengan mengubah tegangan terminal  $U_A$  anker atau dengan menjaga  $U_A$  tetap konstan dan mengubah resistor eksternal tambahan di sirkuit anker atau dengan mengubah  $\phi$  fluks di mesin dengan mengontrol tegangan eksitasi medan  $U_F$ . Tegangan eksitasi medan  $U_F$  dapat diatur dengan menggunakan penyearah elektronik / konverter / buck-chopper terpisah. Oleh karena itu, fluks dalam mesin diubah. Semakin rendah fluks, semakin tinggi kecepatan mesin. Namun, sekali lagi pada tingkat torsi yang berkurang, daya keluaran pada poros dijaga konstan. Torsi mesin DC berbanding lurus dengan  $I_A$  arus anker dan fluks  $\phi$  di dalam mesin.

Kecepatan selanjutnya dapat dikontrol dengan mengubah tegangan anker, ketika ada sumber terpisah yang memasok arus medan. Metode ini menghindari kerugian dari pengaturan kecepatan yang buruk dan efisiensi rendah dari metode kontrol ketahanan anker. Kontrol resistansi anker menambahkan resistansi tambahan ke dalam rangkaian anker untuk mengubah arus anker. Namun, resistansi ini menyebabkan kerugian tambahan.

### 9.3.3 Mesin DC Luka Seri

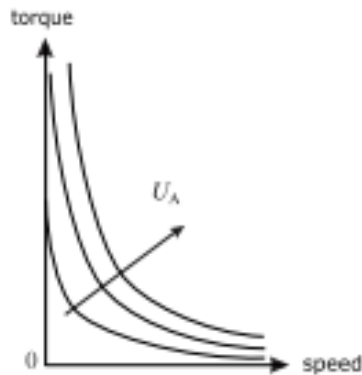
Jika belitan medan dihubungkan secara seri dengan belitan anker, maka diperoleh mesin luka seri (Gambar 9.14).



Gambar 9.14. Mesin DC luka seri.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Untuk menentukan karakteristik kecepatan torsi dari mesin luka seri, kita harus mengenali bahwa fluks dalam mesin sebanding dengan arus anker ( $\phi \sim I_F = I_A$ ). Selain itu, diasumsikan bahwa tidak ada saturasi dalam mesin yang terjadi, yang menghasilkan karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 9.15



Gambar 9.15. Kurva karakteristik kecepatan torsi dari mesin luka seri.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Bentuk karakteristik ini sangat khas, oleh karena itu karakteristik semacam ini sering disebut sebagai perilaku mesin laka seri. Mesin ini menghasilkan torsi maksimumnya pada kecepatan nol. Ketika mesin mempercepat torsi turun drastis dengan kecepatan yang meningkat. Motor seri tidak dapat dioperasikan tanpa beban, karena mereka akan berakselerasi sampai kecepatan berlebih (penghancuran mekanis)! Setiap kali mesin diturunkan (torsi = 0), maka alat berat berakselerasi ke kecepatan yang sangat tinggi (akhirnya bahkan kecepatan berlebih). Dengan motor seri, kecepatannya sepenuhnya tergantung pada beban. Beban berbanding terbalik dengan kecepatan anker. Jika beban tinggi, anker akan berputar dengan kecepatan rendah.

Mesin seri-luka juga dapat dioperasikan dengan arus bolak-balik. Ketika  $I_A$  arus anker berubah arah, bidang yang dikembangkan oleh  $I_A$  juga berubah serupa. Dengan demikian, arah torsi tetap sama. Namun, arus eddy diinduksi dalam besi mesin oleh fluks bergantian, menghasilkan kerugian tambahan. Oleh karena itu, besi penghantar fluks dari mesin semacam itu harus terbuat dari lembaran laminasi tipis yang diisolasi satu sama lain.

### 9.3.4 Kontrol Kecepatan Mesin DC Seri

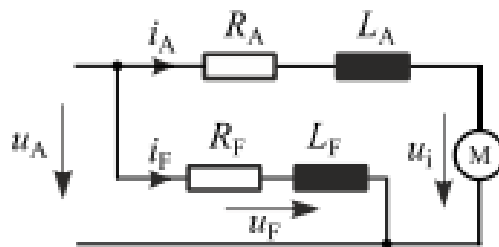
Metode yang mudah untuk mengontrol kecepatan adalah dengan menjaga tegangan anker tetap konstan dan dengan mengubah resistansi anker. Kerugiannya adalah kerugian tambahan yang dihasilkan dalam resistensi. Dengan menambahkan resistansi, arus anker berkurang dan dengan demikian kecepatan mesin juga berkurang.

Metode kontrol kecepatan lain dapat dicapai dengan menyesuaikan tegangan anker. Metode ini menguntungkan karena tidak ada kerugian tambahan yang dihasilkan dalam resistensi.

### 9.3.5 Shunt atau Mesin Luka Paralel

Pada mesin DC shunt wound, belitan medan dihubungkan secara paralel dengan rangkaian anker sehingga tegangan anker  $U_A$  dan tegangan eksitasi  $U_F$  sama. Pada motor shunt dan terpisah yang bersemangat, fluks medan hampir konstan. Akibatnya, peningkatan torsi harus disertai dengan peningkatan arus anker yang sangat hampir proporsional dan karenanya dengan sedikit penurunan emf belakang. Karena emf belakang ditentukan oleh fluks dan kecepatan, kecepatan harus turun sedikit seperti yang terlihat pada Gambar 9.16.

Saat ini, mesin shunt jarang digunakan dalam aplikasi industri. Jenis mesin ini dapat digunakan di mana kecepatan konstan diperlukan dan torsi awal tidak harus setinggi itu seperti pada kipas, blower atau pompa sentrifugal.



Gambar 9.16. Mesin DC luka paralel.

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Karakteristik torsi-vs.-kecepatan mesin DC luka shunt sudah ditunjukkan pada Gambar 9.15. Karakteristiknya sama, karena untuk mesin DC yang tereksitasi secara terpisah, fluks konstan diasumsikan pada tegangan anker tertentu  $U_A$ . Dalam mesin luka shunt ini selalu terjadi. Dengan meningkatnya kecepatan torsi berkurang.

Motor loka shunt memiliki kemampuan untuk mengatur sendiri kecepatannya saat rotor mesin dimuat. Tidak seperti motor seri, kecepatan motor shunt tidak tergantung pada beban poros. Saat beban ke motor meningkat, kecepatan motor melambat seketika. Memperlambat kecepatan mengurangi emf belakang, yang pada gilirannya meningkatkan arus di cabang angker. Hal ini mengakibatkan peningkatan kecepatan motor. Di sisi lain, jika beban berkurang, maka kecepatan motor akan naik seketika. Ini pada gilirannya akan meningkatkan emf belakang, sehingga mengurangi arus ke motor. Secara bertahap motor akan mengurangi kecepatannya. Akibatnya, motor shunt DC mampu mempertahankan kecepatan konstan terlepas dari perubahan beban. Karena fitur ini motor digunakan di mana presisi halus dari kecepatan motor diperlukan (20). Ini juga dapat dicapai dengan mesin DC yang tereksitasi secara terpisah, ketika fluks bidang diatur ke nilai konstan.

### **9.3.6 Kontrol kecepatan mesin DC loka shunt**

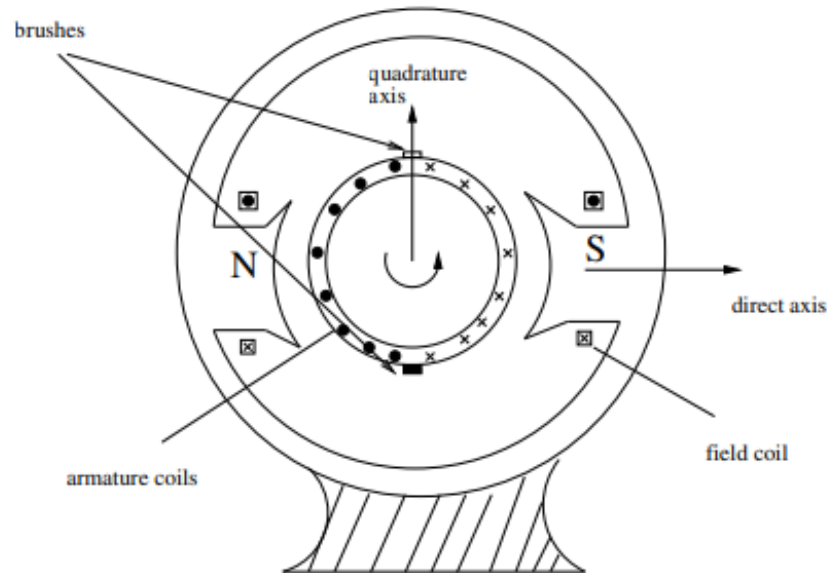
Dalam "kontrol resistansi medan" variasi kecepatan dilakukan dengan menggunakan resistansi variabel yang dimasukkan secara seri dengan bidang shunt. Peningkatan resistansi pengendali mengurangi arus medan IF yang mengarah pada pengurangan fluks dan peningkatan kecepatan. Metode kontrol kecepatan ini tidak tergantung pada beban pada motor. Daya yang terbuang dalam mengendalikan resistansi lebih rendah dibandingkan dengan resistansi pengendali di jalur angker, karena arus medan adalah nilai yang kecil dibandingkan dengan IA arus angker.

Kecepatan maksimum tercapai pada nilai minimum fluks, yang juga berarti bahwa kecepatan tertinggi hanya diperoleh pada torsi yang dikurangi.

Dalam "kontrol resistansi angker" sirkuit angker memiliki resistansi variabel tambahan. Bidang terhubung langsung melintasi suplai sehingga fluks tidak berubah karena variasi resistansi seri. Metode ini digunakan dalam mesin cetak, crane dan hoist, di mana kecepatan yang lebih rendah dari pengenal digunakan untuk waktu yang singkat hanya karena kerugian tambahan dalam resistansi.

## **9.4 Prinsip Kerja Motor DC**

Prinsip pengoperasian motor BLDC sama dengan motor DC. Konduktor yang menghadap ke kutub magnet tertentu (katakanlah kutub N) membawa arus dalam satu arah sementara yang menghadap ke kutub lain membawa arus ke arah yang berlawanan. Berdasarkan hal ini, bidang yang diciptakan oleh konduktor magnet dan angker selalu ortogonal satu sama lain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.17. Perhatikan konvensi penamaan "sumbu langsung" dan "sumbu quadrature".

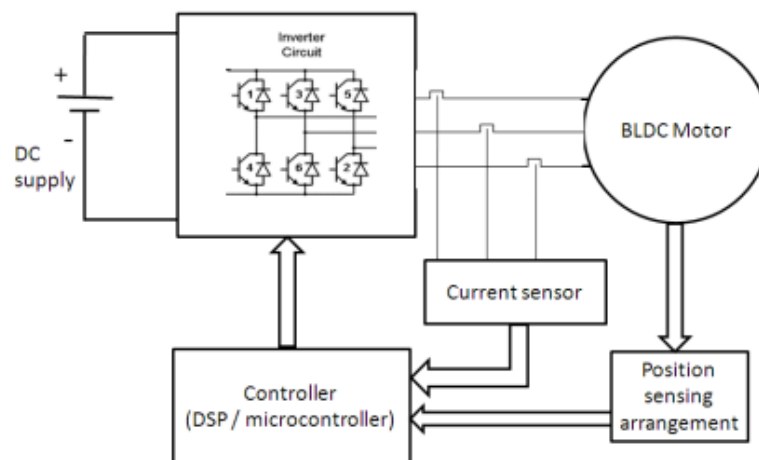


Gambar 9.17 Bidang ortogonal dalam mesin DC  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Misalkan rotor dua kutub berputar di bawah angker. Ketika kutub N melewati konduktor sepenuhnya, beberapa mekanisme diperlukan untuk mengubah arah arus dalam konduktor itu. Jika tidak, arah gaya pada konduktor akan terbalik (mengapa?). Pada motor DC konvensional, jumlah segmen komutator sama dengan jumlah konduktor dalam angker. Ketika segmen komutator beralih dari satu sikat ke sikat lainnya, ada perubahan arah pasokan (dalam kasus motor). Pada mesin BLDC, pembalikan arah arus ini dilakukan melalui sakelar elektronik daya. Sekarang, saat membalikkan arah adalah fungsi posisi rotor. Oleh karena itu, diperlukan penginderaan posisi yang "feedback" ke drive elektronik daya yang "menggerakkan dan mengontrol" pasokan yang diberikan kepada motor.

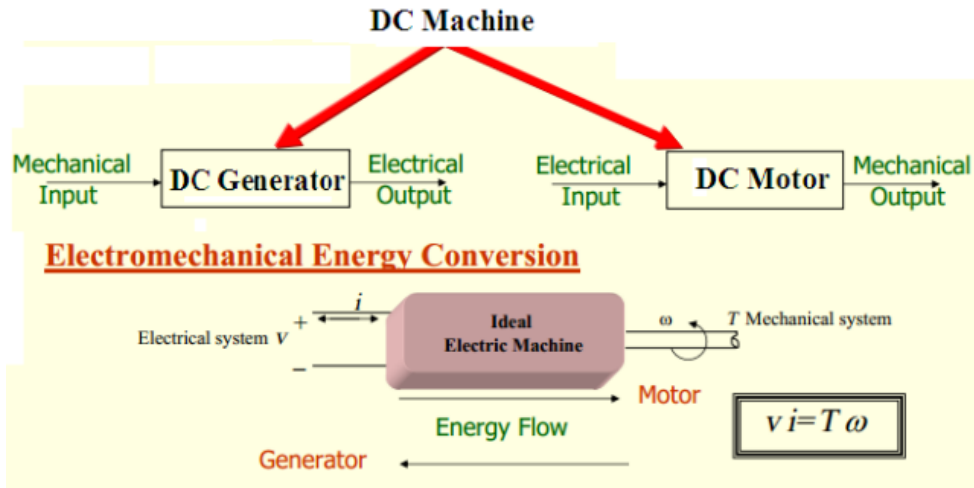
Oleh karena itu diagram blok lengkap dari drive BLDC adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.18. Ini terdiri dari 3 bagian

- Mesin BLDC
- Elektronik daya (konverter DC-AC)
- Penginderaan posisi dan sistem kontrol drive



Gambar 9.18 Blok Diagram Kompleks dari Motor BLDC.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Prinsip kerja dan konversi energi motor DC ditunjukkan pada Gambar 9.19:

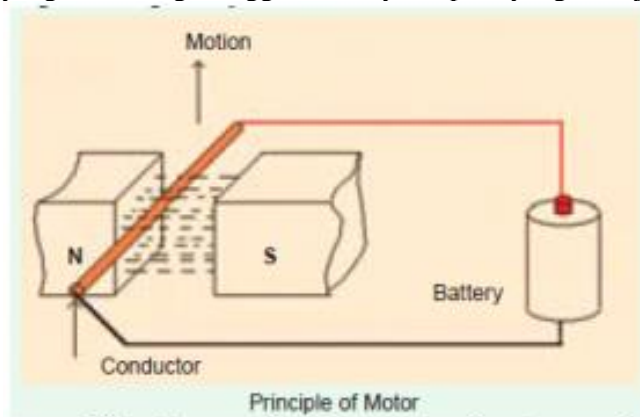


Gambar 9.19 Prinsip kerja dan konversi energy motor DC.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Dalam motor DC:

- Kutub medan disuplai oleh arus eksitasi DC, yang menghasilkan medan magnet DC
- Belitan anker (konduktor) disuplai oleh arus dc melalui sikat, dan komutator

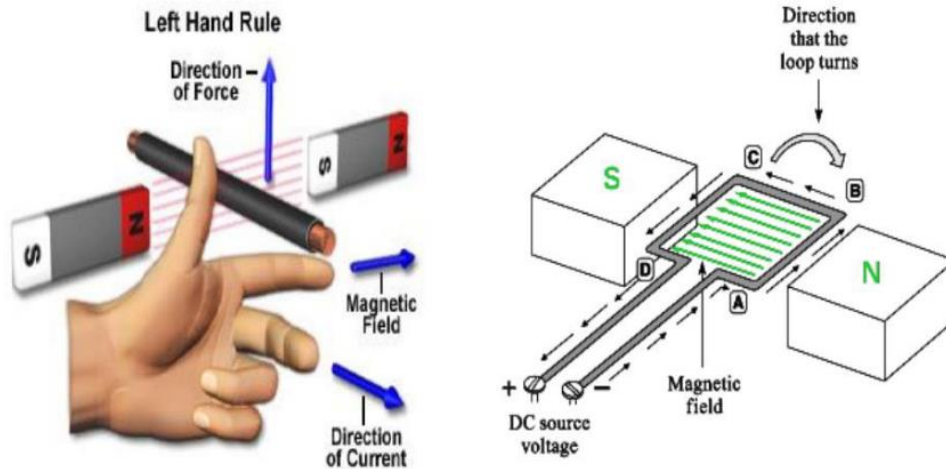
Menurut persamaan gaya Lorents, konduktor pembawa arus ketika ditempatkan dalam medan magnet mengalami gaya yang cenderung menggerakannya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.20



Gambar 9.20 Konduktor pembawa arus ketika ditempatkan dalam medan magnet.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Semua konduktor yang ditempatkan di pinggiran motor DC mengalami gaya-gaya ini. Gaya-gaya ini menyebabkan anker berputar searah jarum jam seperti pada Gambar 9.21. Oleh karena itu, anker motor DC berputar ke arah torsi yang dikembangkan oleh motor.





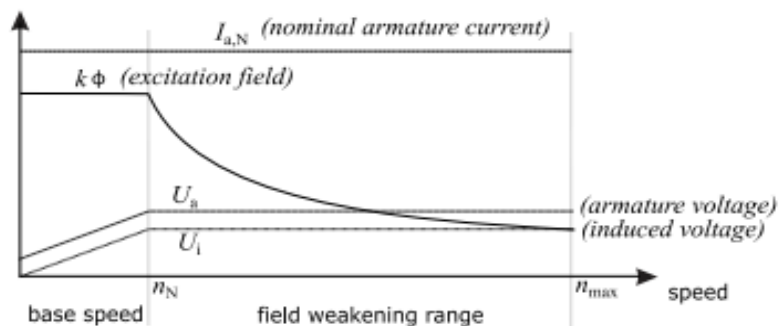
Gambar 9.21 Kaidah tangan kiri hukum gaya Lorentz pada Motor DC.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

## 9.5 Persamaan Kecepatan dan Torque

Berikut ini, batas operasi steady state dari mesin DC yang dihebohkan secara terpisah dipertimbangkan. Mesin DC yang tereksitasi secara terpisah dapat dioperasikan di keempat kuadran jika inverter yang sesuai digunakan. Pada Gambar 9.22 operasi berkelanjutan di kuadran pertama (torsi  $T > 0$  dan kecepatan  $n > 0$ ) dapat dilihat.

Resistansi angker diabaikan ketika membahas jumlah listrik dan mekanik dalam pertimbangan ini. Namun, ketika membahas batas termal mesin, resistansi belitan tidak dapat diabaikan, jika tidak, tidak akan ada kerugian DC karena arus angker. Dalam rentang kecepatan dasar ( $<n_N$ ), atau rentang kontrol angker, fluks  $\phi$  dijaga konstan pada nilai pengenalan ( $k \cdot \phi = \text{const.}$ ,  $k$  adalah konstanta spesifik mesin), oleh karena itu torsi sebanding dengan arus angker  $I_A$  dan tegangan yang diinduksi  $U_i$  sebanding dengan kecepatan: Torsi  $\sim I_A$  dan Kecepatan  $\sim U_i$ . Dalam kecepatan dasar batas termal mesin adalah  $I_a = I_{a,N}$ ,  $N$  yang merupakan arus angker nominal dan oleh karena itu arus maksimal yang juga membatasi torsi nominal  $T_N \sim I_{a,N} = \text{const.}$  Di bawah kecepatan dasar, arus angker dapat disesuaikan terus menerus hingga nilai pengenalan maksimum  $I_{a,N}$ . Oleh karena itu, torsi pengenalan dapat diperoleh di seluruh rentang kecepatan dasar. Dengan demikian, tegangan angker  $U_A$  meningkat secara linier dengan kecepatan yang mirip dengan  $u_i$  tegangan yang diinduksi.

Torsi awal dan torsi maksimum dibatasi oleh arus angker yang dapat berhasil dikomunikasikan. Tenaga mekanik  $P_m$  sebanding dengan kecepatan  $n$  dan torsi yaitu kenaikan di wilayah kecepatan dasar secara linier dengan kecepatan (torsi konstan pada nilai maksimum).



Gambar 9.22 Batas operasi mesin DC yang dihebohkan secara terpisah.  
(Sumber : (Al-naib, 2019))

Batas daya mekanik dapat dihitung dengan:  $P_{m,N} = T_N \cdot 2\pi \cdot n_N$ . Ini dicapai dengan kecepatan nominal  $n_N$ . Pada kecepatan nominal  $n_N$  tegangan yang diinduksi  $u_i$  mencapai tegangan angker  $U_A$  dikurangi penurunan tegangan di atas resistansi angker seperti yang dapat ditentukan dari loop tegangan dari rangkaian ekuivalen yaitu  $u_i \approx U_A - R_A \cdot i_A$ . Untuk lebih mencapai kecepatan yang lebih tinggi yaitu di luar kecepatan yang dinilai, seseorang harus mengurangi bidang  $k \cdot \phi$  (rentang pelemahan medan). Keuntungan substansial dari prinsip kontrol semacam itu adalah kemungkinan untuk meningkatkan rentang kecepatan untuk konfigurasi drive tertentu tanpa terlalu banyak mengukur mesin dan konverter. Namun, regulator lapangan saat ini diperlukan. Dalam rentang pelemahan medan (kecepatan  $> n_N$ ) alat berat dapat dioperasikan pada daya konstan  $P_m$  yaitu Torsi mengurangi proporsional menjadi  $1/\text{kecepatan}$ . Dalam rentang pelemahan medan, fluks mesin dikurangi sedemikian rupa sehingga tegangan yang diinduksi  $U_{i,N}$ , yang sebanding dengan fluks  $\cdot$  kecepatan  $U_i \sim \phi \cdot n$ , dan tegangan angker  $U_a$  disimpan pada nilai maksimum masing-masing.

Mengoperasikan alat berat pada kecepatan yang lebih tinggi ( $n_k$ ) dalam kombinasi dengan arus pengenal penuh, dapat menyebabkan peningkatan percikan di bawah sikat (pergantian yang salah). Untuk memastikan pergantian yang baik pada kecepatan yang lebih tinggi, eksitasi tidak boleh jatuh di bawah nilai minimum dan arus angker harus dikurangi. Untuk mencapai kecepatan tinggi ini, arus angker  $I_a$  harus dikurangi, yang memungkinkan peningkatan lebih lanjut dari  $U_i$  tegangan yang diinduksi hingga nilai angker  $U_a$ . Pengurangan arus angker  $I_a$  pada gilirannya mengurangi torsi mesin maksimum dan oleh karena itu juga tenaga mekanik  $P_m$ .

### Soal

- 1) Jelaskan bagian – bagian komponen penyusun Motor DC !
- 2) Sebutkan dan jelaskan rangkaian ekuivalen Motor DC !
- 3) Bagaimana prinsip kerja dari Motor DC ?
- 4) Sebutkan dan jelaskan jenis – jenis dari Motor DC !
- 5) Apa hubungan antara kecepatan dengan torsi pada Motor DC ?

# BAB X

## Motor Alternating Current (AC)

### 10.1 Pendahuluan

Motor AC telah menerima banyak perhatian dalam beberapa tahun terakhir sebagai pengganti yang diusulkan untuk motor DC dalam aplikasi kontrol kecepatan berkinerja tinggi, di mana torsi dan kecepatan harus dikontrol secara independen. Motor induksi jauh lebih andal, lebih kompak, lebih efisien, dan lebih murah untuk dibeli dan dirawat daripada motor DC. Karena motor induksi tidak memiliki pergantian sikat karbon, mereka sangat cocok untuk lingkungan korosif dan eksplosif. Di masa lalu, motor induksi sulit dikendalikan karena mereka berperilaku sebagai sistem nonlinier yang kompleks. Namun, penampilan di pasar mikroprosesor yang kuat dan murah telah memungkinkan untuk mengimplementasikan secara real time algoritma kompleks yang diperlukan untuk kontrol motor induksi.

Motor AC digunakan di seluruh dunia di banyak perumahan, komersial, industri, dan aplikasi utilitas. Motor mengubah listrik energi menjadi energi mekanik. Motor AC dapat menjadi bagian dari pompa atau kipas, atau terhubung ke beberapa bentuk mekanis lainnya peralatan seperti penggulung, konveyor, atau mixer. Motor AC ditemukan pada berbagai aplikasi dari yang membutuhkan motor tunggal untuk aplikasi yang membutuhkan beberapa motor.

Motor AC atau motor arus bolak-balik adalah motor listrik yang terdiri dari stator dengan kumparan yang dialiri arus bolak-balik untuk mengubah arus listrik menjadi tenaga mekanik. Stator adalah bagian motor yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Motor AC dapat berupa satu atau tiga fase dengan motor tiga fase terutama digunakan untuk konversi daya massal. Motor AC fase tunggal digunakan untuk konversi daya kecil.

Ada dua jenis motor AC, yaitu sinkron dan induksi. Pada motor sinkron, putaran poros berada pada kecepatan yang sama dengan frekuensi arus yang diberikan dengan elektromagnet AC multifase pada stator yang menghasilkan medan magnet berputar. Motor induksi, atau motor asinkron, adalah motor eksitasi tunggal di mana arus diterapkan ke salah satu bagian motor, stator. Fluks dari stator memotong kumparan hubung singkat di rotor, yang merasakan torsi yang membuat rotor berputar.

Motor AC adalah sumber daya untuk berbagai aplikasi karena fleksibilitas, efisiensi, dan pengoperasian tanpa suara. Mereka digunakan pada pompa, pemanas air, peralatan taman, oven, peralatan off road dan umumnya ditemukan di banyak peralatan, peralatan, dan peralatan. Mereka adalah perangkat yang menarik dan menarik karena mereka dapat dengan mudah masuk ke dalam berbagai aplikasi. Desain motor AC agak langsung dengan stator lilitan tembaga yang digerakkan secara magnetis yang memiliki medan magnet berputar.

Komponen utama motor AC adalah stator, drum luar stasioner, dan rotor, bagian dalam berputar yang melekat pada poros motor. Stator dan rotor menghasilkan medan magnet yang berputar. Gulungan stator yang menciptakan medan putar dibuat oleh arus bolak-balik. Pada motor AC, belitan berfungsi sebagai angker dan belitan medan. Ketika stator terhubung ke fluks suplai AC, celah udara terbentuk memutar fluks pada kecepatan sinkron tetap, yang menghasilkan tegangan pada belitan stator dan rotor. Motor AC disebut sebagai motor induksi karena menggunakan arus listrik untuk menghasilkan torsi, yang dihasilkan oleh induksi elektromagnetik dari medan magnet stator.

Ada dua klasifikasi motor AC: motor sinkron dan motor asinkron. Motor asinkron lebih dikenal sebagai motor induksi. Motor sinkron dan induksi memiliki konfigurasi stator yang sama untuk menghasilkan medan magnet yang berputar. Namun, mereka memiliki konstruksi rotor yang berbeda karena perbedaan cara mereka menghasilkan medan magnet rotor. Pada motor sinkron, biasanya medan magnet rotor dibangkitkan dari belitan medan yang dieksitasi oleh sumber daya arus searah (DC). Untuk motor sinkron berukuran kecil hingga menengah, magnet permanen biasanya digunakan untuk membangkitkan medan magnet rotor. Di sisi lain, pada motor induksi, medan magnet rotor dihasilkan

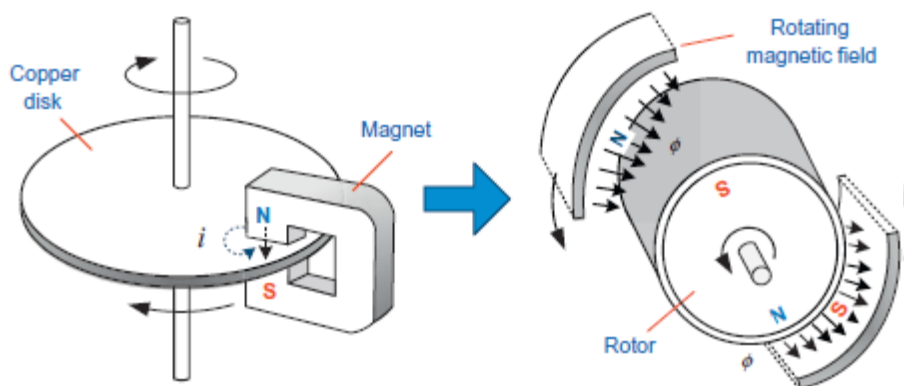
oleh daya AC. Sangat menarik untuk dicatat bahwa daya AC ini ditransfer dari stator dengan induksi elektromagnetik.

Motor induksi memiliki beberapa keunggulan seperti konstruksi sederhana, keandalan, kekasaran, perawatan rendah, biaya rendah, kemampuan operasi kecepatan tinggi, dan kemampuan untuk dioperasikan dengan koneksi langsung ke sumber listrik AC. Di sisi lain, motor sinkron lebih unggul daripada motor induksi dalam hal efisiensi, kerapatan daya, respons dinamis, dan faktor daya.

Dalam bab ini, kita akan mempelajari prinsip operasi dasar dan karakteristik motor AC secara lebih rinci. Kita akan mulai dengan memeriksa jenis motor yang lebih umum, motor induksi.

## 10.2 . Motor Induksi

Prinsip dasar motor induksi pertama kali ditunjukkan oleh percobaan yang dikenal sebagai Disk Arago pada tahun 1824. Dari percobaan ini, ditemukan bahwa, ketika magnet berputar di sepanjang tepi piringan tembaga (zat nonmagnetik), piringan berputar di arah magnet pada kecepatan yang lebih kecil (Gambar . 10.1). Pada tahun 1832, Faraday mendemonstrasikan bahwa fenomena ini disebabkan oleh arus yang diinduksi dalam piringan tembaga. Penemuan fenomena ini pada akhirnya mengarah pada pengembangan konsep dasar motor induksi. Ketika sebuah magnet melewati tepi piringan tembaga, gaya gerak listrik (EMF) adalah diinduksi pada bagian piringan yang mengalami perubahan medan magnet. Tegangan induksi menyebabkan arus eddy mengalir di disk. Akibatnya, karena bagian pembawa arus dibangun di bawah medan magnet magnet, gaya (dikenal sebagai gaya Lorentz) dibuat pada bagian pembawa arus. Arah gaya sama dengan arah gerak magnet, dan gaya ini membuat piringan tembaga berputar bersama magnet.



Gambar 10.1. Disk Arago dan konsep dasar motor induksi.

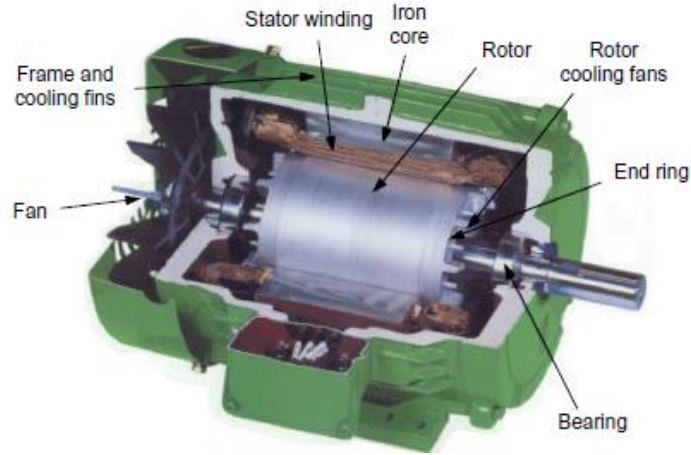
Dalam motor induksi berdasarkan konsep dasar ini, putaran seperti itu magnet diwujudkan oleh medan magnet berputar yang dihasilkan dari stator tiga fase gulungan yang terhubung ke sumber daya AC tiga fase. Rotor, kemudian, mengikuti medan magnet yang berputar.

Motor induksi paling banyak digunakan sebagai motor serba guna di banyak aplikasi industri karena biayanya yang rendah dan konstruksi yang kokoh. Secara tradisional, motor induksi telah dihubungkan langsung ke tegangan saluran 60 atau 50 Hz dan dioperasikan pada kecepatan yang hampir konstan. Namun, baru-baru ini, penggerak kecepatan variabel dimungkinkan oleh konverter elektronik daya seperti inverter, sehingga motor induksi banyak digunakan di banyak aplikasi yang membutuhkan kontrol kecepatan.

## 10.3 Struktur Motor Induksi

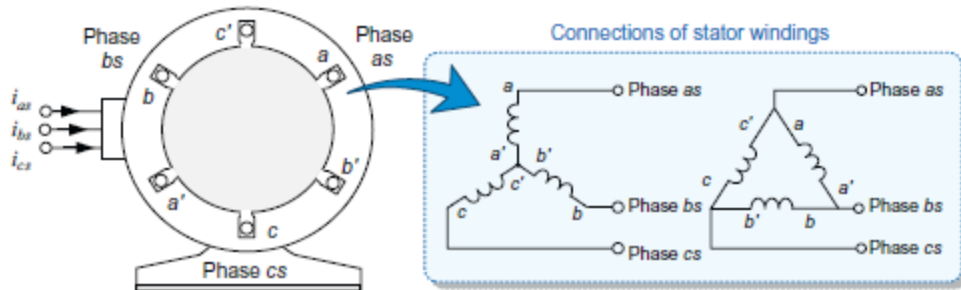
Struktur motor induksi tipikal ditunjukkan pada Gambar. 10.2. Motor induksi memiliki konfigurasi stator dan rotor silinder, yang dipisahkan oleh celah udara radial yang seragam. Stator dan rotor terbuat dari inti besi, yang memiliki belitan yang dimasukkan di dalamnya. Inti besi bukanlah gumpalan padat

tunggal tetapi terdiri dari tumpukan laminasi terisolasi dari baja silikon, biasanya dengan ketebalan sekitar 0,3 0,5 mm untuk mengurangi kerugian arus eddy. Inti besi terbuat dari bahan feromagnetik seperti baja, besi lunak, atau berbagai paduan nikel untuk menghasilkan fluks magnet secara efisien dan mengurangi kerugian histeresis.



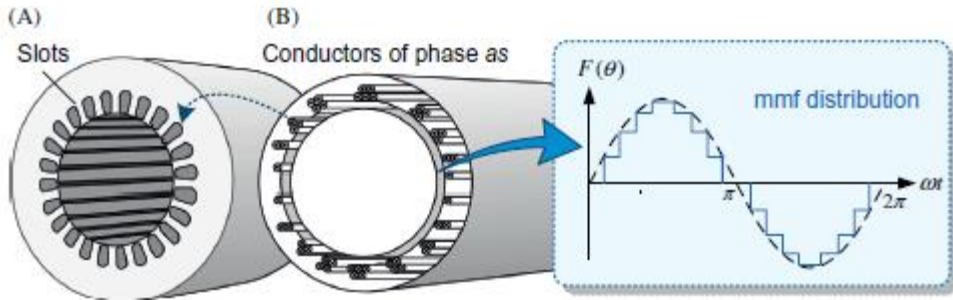
Gambar 10.2. Struktur Motor Induksi

Pada motor induksi, hanya belitan stator yang diumpankan oleh catu daya AC tiga fasa. Perlu dicatat bahwa belitan stator tiga fase melakukan peran baik sebagai belitan jangkar dan belitan medan dari motor DC. Gulungan tiga fase ini ditempatkan di slot yang dipotong secara aksial di sepanjang pinggiran bagian dalam inti besi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.3. Mereka dipindahkan dari satu sama lain dengan 120 derajat listrik di sepanjang pinggiran dan biasanya terhubung di delta untuk tegangan suplai rendah atau dalam wye untuk tegangan suplai tinggi.



Gambar 10.3. Belitan Stator

Semua belitan di setiap belitan didistribusikan secara terus menerus di banyak slot yang tersebar di sekitar pinggiran, sehingga kerapatan belitan bisa sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.4. Tujuan pengaturan ini adalah untuk membentuk distribusi fluks sinusoidal di celah udara ketika arus mengalir melaluinya. Berliku ini jenis ini disebut belitan terdistribusi. Konfigurasi belitan terdistribusi meningkatkan pemanfaatan inti besi dan mengurangi harmonisa ruang gaya gerak magnet (mmf), menghasilkan riak torsi yang lebih rendah dibandingkan dengan belitan terkonsentrasi, di mana semua gulungan belitan fase ditempatkan dalam satu slot di bawah sebuah tiang.



Gambar 10.4. Belitan fase stator. (A) Inti stator dan (B) belitan terdistribusi sinusoidal dan mmf.

Mirip dengan stator, rotor memiliki inti besi silinder yang terdiri dari laminasi baja silikon. Perlu dicatat bahwa rangkaian listrik (belitan atau konduktor) di inti besi rotor tidak diumpankan oleh sumber daya eksternal tetapi arusnya mengalir oleh EMF yang diinduksi. Ada dua jenis rotor yang digunakan pada motor induksi: rotor sangkar tupai dan rotor belitan.

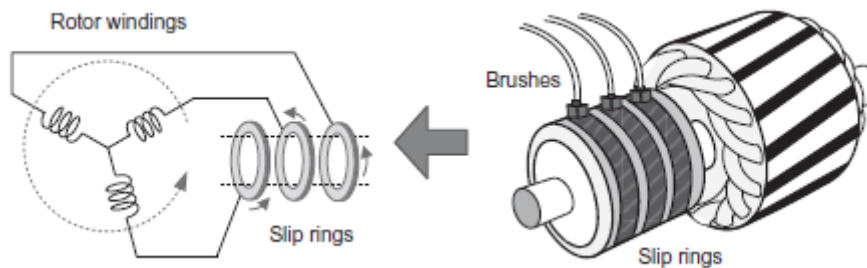
Rotor sangkar tupai memiliki inti besi berlapis dengan slot untuk menempatkan konduktor miring, yang mungkin berupa batangan tembaga, aluminium, atau paduan. Batang rotor ini dihubungkan pendek pada kedua ujungnya melalui cincin ujung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 10.5. Rotor Sangkar Tupai

Rotor ini mendapatkan namanya dari kemiripan strukturnya dengan sangkar tupai. Konduktor rotor tidak ditempatkan persis sejajar dengan poros tetapi dimiringkan oleh satu slot-pitch untuk mengurangi torsi cogging, dan ini memungkinkan motor berjalan dengan tenang. Karena konstruksinya yang sederhana dan kokoh, sekitar 95% motor induksi menggunakan rotor sangkar-tupai.

Serupa dengan belitan pada stator, rotor belitan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.6 memiliki satu set belitan tiga fase, yang biasanya terhubung Y. Gulungan rotor diikat ke cincin slip pada poros rotor dan dengan demikian dapat diakses melalui sikat. Karena konfigurasi ini, pada motor induksi tipe rotor belitan, resistansi rotor dapat divariasikan dengan menghubungkan resistor eksternal ke belitan rotor melalui sikat. Hal ini memungkinkan karakteristik kecepatan torsi motor induksi divariasikan sesuai kebutuhan. Sekarang, kita akan membahas secara detail motor induksi sangkar tupai, yang merupakan jenis motor induksi yang paling umum.



Gambar 10.6. Rotor Belitan

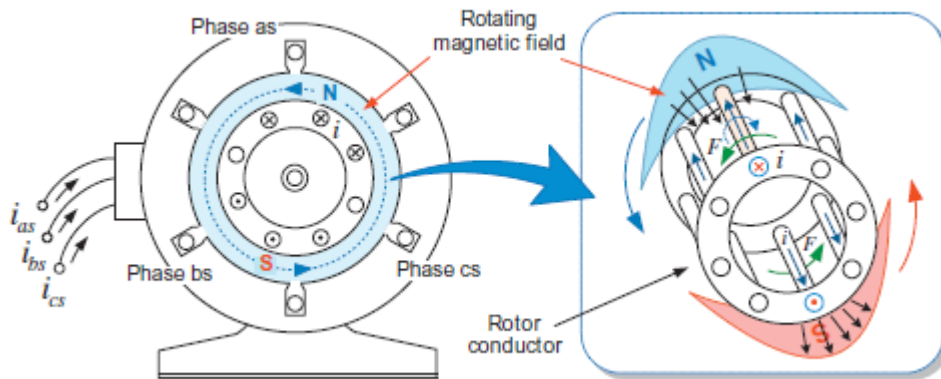


## 10.4 Dasar-Dasar Motor Induksi

Pada motor induksi, ketika sumber tegangan AC tiga fase diterapkan pada belitan stator, yang dipindahkan sebesar 120 derajat listrik dalam ruang terhadap satu sama lain, arus tiga fase yang mengalir dalam belitan ini akan menghasilkan medan magnet yang berputar. di celah udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.7. Kecepatan medan magnet ini berbanding lurus dengan frekuensi tegangan sumber AC yang diterapkan.

Misalkan medan magnet yang berputar bergerak berlawanan arah jarum jam, tegangan induksi membuat arus dalam konduktor korsleting mengalir ke arah seperti yang digambarkan pada Gambar 3.7 Ini karena arus induksi akan membentuk fluks yang menentang perubahan yang dipaksakan oleh medan magnet yang berputar, sesuai dengan hukum Lenz. Saat menerapkan aturan tangan kiri Fleming pada arus induksi dan medan magnet yang berputar, gaya pada konduktor dikembangkan ke arah yang sama dengan medan magnet yang berputar.

Seperti dijelaskan di atas, motor induksi tidak memiliki sumber eksternal yang disediakan untuk belitan rotornya tetapi memanfaatkan arus rotor yang dihasilkan oleh induksi elektromagnetik. Inilah sebabnya mengapa disebut motor induksi. Ketika motor induksi berjalan, kecepatan rotor selalu sedikit lebih kecil dari kecepatan medan magnet yang berputar, yaitu kecepatan sinkron. Jika rotor berputar dalam kecepatan yang sama dengan medan magnet yang berputar, tidak akan ada tegangan dan arus induksi pada belitan rotor hubung singkat dan dengan demikian tidak ada torsi. Pada motor induksi, kecepatan rotor cukup lambat untuk menyebabkan jumlah arus rotor yang tepat mengalir sehingga torsi yang dikembangkan mungkin cukup untuk menggerakkan beban. Dengan demikian, peningkatan beban akan menyebabkan rotor melambat.

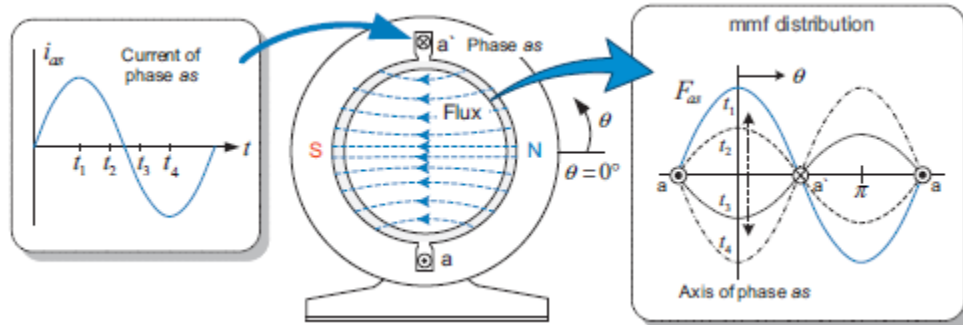


Gambar 3.7. Rotasi Motor Induksi

Ketika medan magnet berputar terhubung ke konduktor di rotor, EMF berdasarkan hukum Faraday diinduksi di konduktor. Tegangan induksi menyebabkan arus pada konduktor korsleting. Torsi dihasilkan pada konduktor pembawa arus dalam medan magnet yang berputar. Melalui torsi yang dikembangkan ini, rotor kemudian akan mulai berputar ke arah yang sama dengan medan magnet yang berputar.

Misalkan medan magnet yang berputar bergerak berlawanan arah jarum jam, tegangan induksi membuat arus dalam konduktor korsleting mengalir ke arah seperti yang digambarkan pada Gambar 3.7 Ini karena arus induksi akan membentuk fluks yang menentang perubahan yang dipaksakan oleh medan magnet yang berputar, sesuai dengan hukum Lenz. Saat menerapkan aturan tangan kiri Fleming pada arus induksi dan medan magnet yang berputar, gaya pada konduktor dikembangkan ke arah yang sama dengan medan magnet yang berputar.

Putaran mmf dihasilkan oleh arus tiga fasa yang mengalir melalui belitan stator tiga fasa. Untuk memulainya, pertimbangkan mmf yang dihasilkan dari arus yang mengalir dalam belitan fase seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.8. Kami hanya akan mempertimbangkan koil terpusat pada sumbu magnetik fase sebagai belitan terdistribusi untuk kesederhanaan

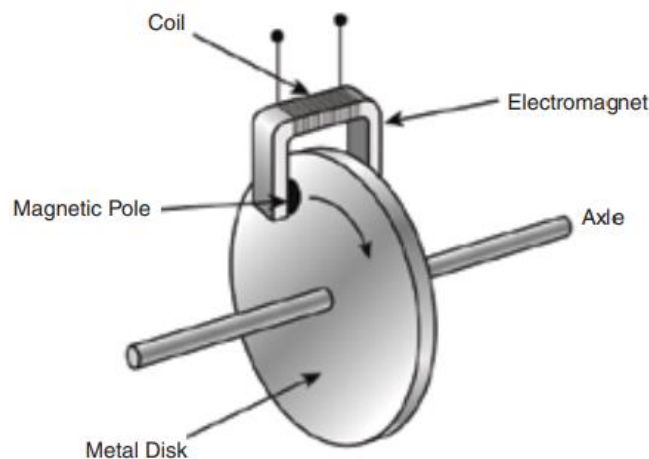


Gambar 10.8. Fase sebagai arus dan mmf

## 10.5 Prinsip Kerja Motor AC

### 10.5.1 Prinsip Operasi AC Motors 1 (Disk Arago)

Motor AC menghasilkan "fluks magnetik" dan "arus yang diinduksi" di dalam motor dengan aksi stator dan rotor, dan mendapatkan gaya rotasi. Prinsip operasi motor AC dapat dijelaskan dengan menggunakan disk Arago seperti ditunjukkan pada Gambar 10.9



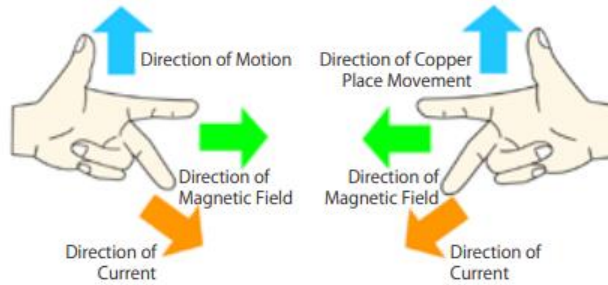
Gambar 10.9. Prinsip Operasi AC Motors 1 (Disk Arago).  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Disk Arago adalah fenomena ketika magnet dipindahkan di sepanjang permukaan disk logam, disk berputar untuk mengikuti magnet. Pertama, siapkan pelat tembaga bundar yang dapat berputar bebas dan magnet. Tempatkan mereka sehingga pelat tembaga berada di antara kutub magnet, tetapi magnet tidak menyentuh pelat tembaga.

Selanjutnya, pindahkan magnet berbentuk U di sepanjang tepi pelat tembaga. Pelat tembaga akan mulai berputar dan mengejar magnet.

Prinsip disk Arago dapat dijelaskan dengan "Aturan Tangan Kanan Fleming" dan "Aturan Tangan Kiri Fleming" seperti pada Gambar 10.10.





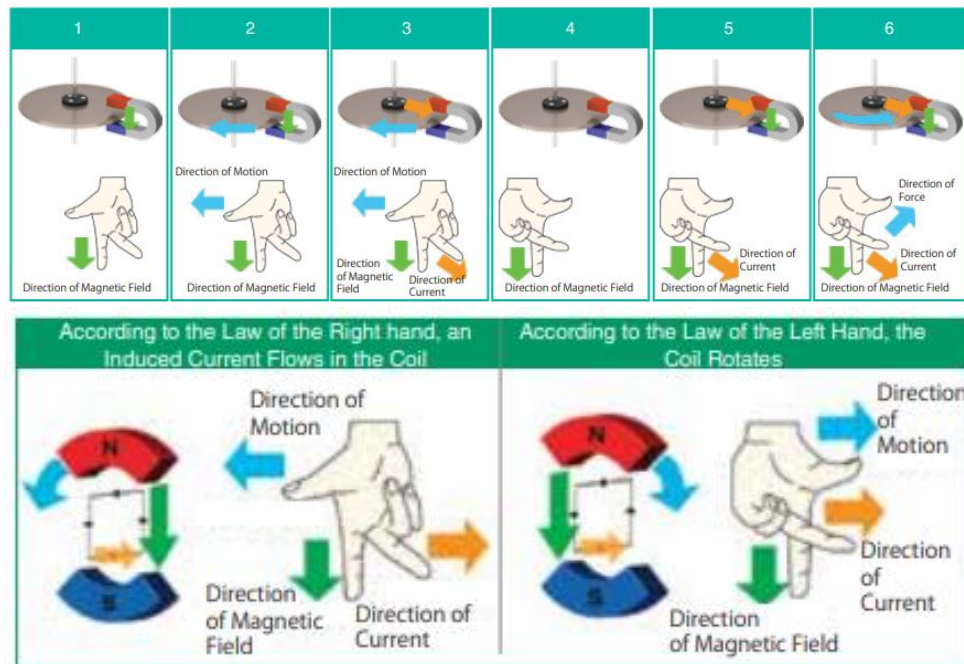
Gambar 10.10. Aturan tangan kanan dan kiri Fleming.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Aturan Tangan Kanan Fleming menunjukkan arah arus yang diinduksi (untuk generator) ketika konduktor dilewatkan melalui garis fluks magnetik. Aturan Tangan Kiri Fleming menunjukkan arah gaya gerak listrik (untuk motor) ketika konduktor dilewatkan melalui garis fluks magnetik. Kami menerapkan kedua hukum ini pada hubungan antara pelat tembaga dan magnet dalam urutan aturan tangan kanan, maka aturan tangan kiri.

Kecepatan rotasi disk tembaga akan sedikit lebih lambat daripada magnet. Hal ini memungkinkan gaya rotasi dihasilkan oleh konduktor yang melewati medan magnet.

### 10.5.2 Prinsip Operasi Motor AC 2 (Medan Magnet Berputar)

Prinsip pengoperasian motor AC dapat dijelaskan dengan mengganti disk Arago dengan struktur internal motor AC. Elektromagnet kutub N dan kutub S adalah model stator yang disederhanakan. Kumputan tertutup di tengah adalah model rotor konduktor yang disederhanakan seperti pada Gambar 10.11.



Gambar 10.11. Elektromagnet kutub N dan kutub S adalah model stator yang disederhanakan dengan aturan tangan kanan dan kiri Fleming.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Tempatkan kumparan tertutup di medan magnet dan putar magnet luar searah jarum jam. Kemudian, arus yang diinduksi mengalir di koil. Ketika arus mengalir, ia bereaksi dengan medan magnet dan menghasilkan gaya gerak listrik di koil. Kumparan mulai berputar ke arah yang sama dengan magnet. Pada motor yang sebenarnya, rotor seperti serangkaian kumparan yang tumpang tindih yang dihubungkan bersama sehingga gaya rotasi dapat dihasilkan secara efisien seperti pada Gambar 10.12.



Gambar 10.12. Rotor pada Motor AC.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Rotor sangkar tupai adalah rotor dengan beberapa batang aluminium dan besi miring. Dalam rotor sangkar tupai, arus mengalir di bagian aluminium seperti pada Gambar 10.13.

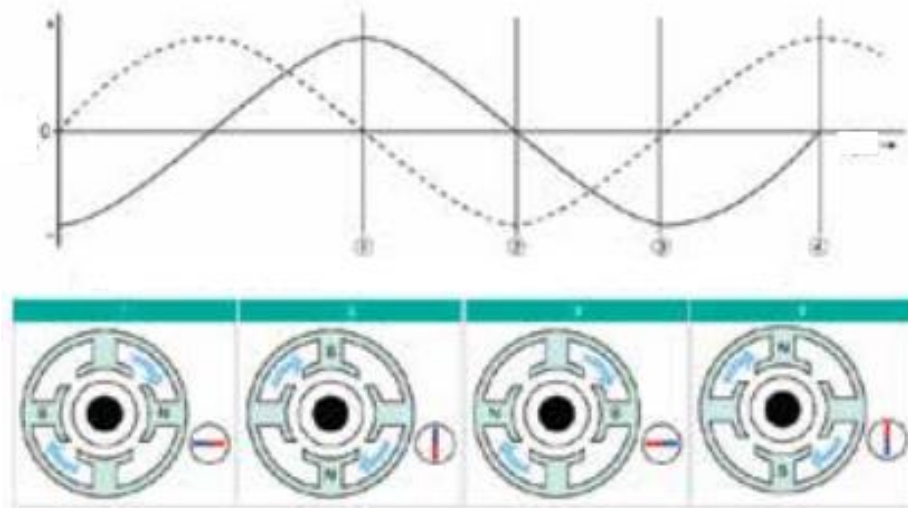
- **Medan Magnet Berputar (Catu Daya Fase Tunggal, Catu Daya Tiga Fase)**  
Saat stator menghasilkan medan magnet yang berputar di sekitar rotor, rotor berputar. Bagian selanjutnya menjelaskan bagaimana motor AC menghasilkan medan magnet yang berputar.
- **Catu Daya Fase Tunggal - Pergeseran Fase menggunakan Kapasitor**  
Di dalam motor yang digerakkan oleh catu daya fase tunggal ada dua belitan, belitan utama dan belitan tambahan.



Gambar 10.13. Rangkaian Catu Daya Fase Tunggal.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Hubungkan belitan utama ke catu daya dan belitan tambahan ke catu daya melalui kapasitor. Arus dari catu daya mengalir langsung ke belitan utama. Di sisi lain, arus melalui kapasitor mengalir melalui belitan tambahan.

Saat beroperasi dengan catu daya fase tunggal, kami menggunakan kapasitor penggerak fase untuk menghasilkan bentuk gelombang yang dekat dengan catu daya dua fase dan menghasilkan medan magnet yang berputar seperti pada Gambar 10.14



Gambar 1014. Grafik gelombang catu daya fase tunggal.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001 )

Saat menghubungkan catu daya fase tunggal, ulangi fenomena (1) ke (4).

- 1) Tegangan diterapkan pada belitan utama, tegangan tidak diterapkan pada belitan tambahan. Kutub N dan kutub S dihasilkan di kutub magnet belitan utama.
- 2) Tegangan diterapkan pada belitan tambahan, dan tegangan tidak diterapkan pada belitan utama. Kutub N dan kutub S dihasilkan di kutub magnet dari belitan tambahan.
- 3) Tegangan diterapkan pada belitan utama, tegangan tidak diterapkan pada belitan tambahan. Kutub magnet yang berlawanan dengan yang ada di (1) dihasilkan di kutub magnet belitan utama.
- 4) Tegangan diterapkan pada belitan tambahan, dan tegangan tidak diterapkan pada belitan utama. Kutub magnet yang berlawanan dengan yang ada di (2) dihasilkan di kutub magnet dari belitan tambahan.

Dengan cara ini, medan magnet yang dihasilkan dalam stator berubah untuk menghasilkan rotasi jarum jam.

- **Untuk Catu Daya Tiga Fase - Pergeseran Fase Catu Daya**

Pada motor fase tunggal, ada dua belitan, belitan utama dan belitan tambahan, tetapi motor tiga fase terdiri dari tiga belitan.

Dengan asumsi fase U, V, W di sisi catu daya, ada tiga jalur yang arusnya dapat mengalir, UV, VW, WU. Hubungkan belitan ini langsung ke catu daya seperti pada Gambar 10.15



Gambar 10.15. Catu Daya Motor Tiga Fase.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Di jalur U, V, W dari catu daya tiga fase, setiap fase digeser sebesar  $120^\circ$ . Karena pergeseran fase ini menciptakan medan magnet yang berputar di stator, tidak perlu menghubungkan kapasitor, seperti dengan motor fase tunggal.

## 10.6 Tipe Motor AC

Motor ac yang dapat mulai langsung dari saluran terutama adalah jenis induksi. Motor universal juga digunakan secara luas untuk alat genggam kecil bertenaga ac. Mereka dapat berlari langsung dari garis atau menyesuaikan kecepatannya melalui elektronik.

Motor loncatan dengan berbagai desain membutuhkan elektronik untuk beroperasi. Mereka digunakan terutama untuk memosisikan alat atau komponen dan jarang digunakan untuk memberikan gerakan berputar yang stabil.

Selain motor-motor ini, motor ac magnet permanen dengan cepat menggantikan motor dc dan induksi untuk kecepatan dan kontrol posisi yang akurat, tetapi mereka juga mengurangi ukuran dan meningkatkan efisiensi. Mereka membutuhkan daya dan kontrol elektronik untuk memulai dan menjalankan.

### 10.6.1 Motor Induksi Fase Tunggal

Untuk menghasilkan rotasi, belitan stator multi-fase sering digunakan dalam motor ac, disuplai dari sistem arus simetris dan seimbang. Gaya magnetomotif dari belitan ini berinteraksi dengan medan magnet rotor (diinduksi atau diterapkan) untuk menghasilkan torsi. Dalam motor induksi tiga fase, medan rotor dibuat oleh arus yang diinduksi oleh kecepatan relatif rotor dan medan stator yang berputar secara sinkron.

Dalam motor induksi yang disuplai oleh arus stator fase tunggal, tidak begitu jelas bagaimana gaya magnetomotif yang berputar dapat dibuat dan torsi diproduksi. Dua konsep berbeda dapat digunakan untuk menghasilkan torsi.

Konsep desain pertama yang secara konseptual lebih sederhana melibatkan generasi arus kedua yang mengalir dalam belitan kedua stator. Belitan tambahan ini dipindahkan secara spasial pada stator. Ini membawa desain motor mendekati prinsip multi-fase. Arus belitan tambahan harus keluar dari fase dengan arus di belitan utama. Ini dicapai melalui peningkatan resistensi di dalamnya atau melalui kapasitor secara seri dengan itu. Motor dapat beroperasi dengan cara ini di seluruh rentang kecepatannya.

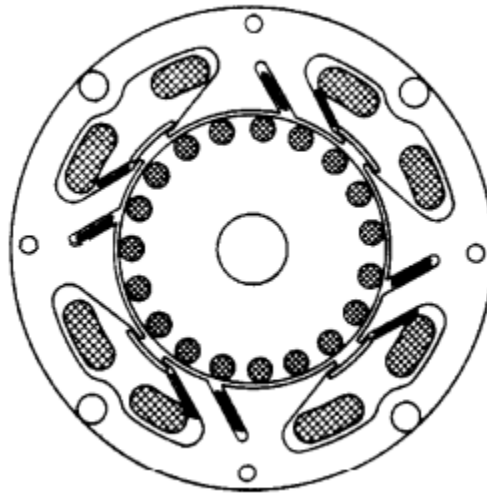
Setelah motor berputar, konsep desain kedua memungkinkan fase tambahan terputus. Arus dalam belitan utama hanya menghasilkan fluks berdenyut, yang dapat dianalisis sebagai jumlah dari dua bidang berputar dengan amplitudo yang sama tetapi arah yang berlawanan. Bidang-bidang ini, seperti yang terlihat dari rotor yang bergerak, berputar pada kecepatan yang berbeda, menginduksi arus di dalamnya dengan frekuensi dan amplitudo yang berbeda. Jika kecepatan rotor adalah  $\omega_r$ , frekuensi yang diterapkan pada stator adalah  $f_s$ , dan jumlah pasangan

kutub di motor adalah  $p$ ; frekuensi arus yang diinduksi dalam rotor adalah  $f_s - p\omega$  dan  $f_s + p\omega$ . Arus yang tidak sama ini menghasilkan torsi yang tidak sama di dua arah, yang mengarah ke torsi bersih bukan nol.

Berbagai desain motor induksi fase tunggal dihasilkan dari berbagai cara kedua fase dihasilkan dan oleh apakah fase tambahan tetap berenergi setelah memulai.

### 10.6.2 Motor Tiang Berbayang

Motor-motor ini sederhana, andal, dan tidak efisien. Belitan stator tidak didistribusikan pada permukaan rotor, melainkan terkonsentrasi pada kutub yang menonjol. Belitan tambahan, yang harus menghasilkan fluks keluar dari fase dengan belitan utama, tidak lain adalah belokan berkabel keras dan pendek di sekitar sebagian tiang utama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.16



Gambar 10.16. Motor tiang teduh dengan kutub meruncing dan irisan magnetik.  
(Sumber: (Oriental Motor, 2001))

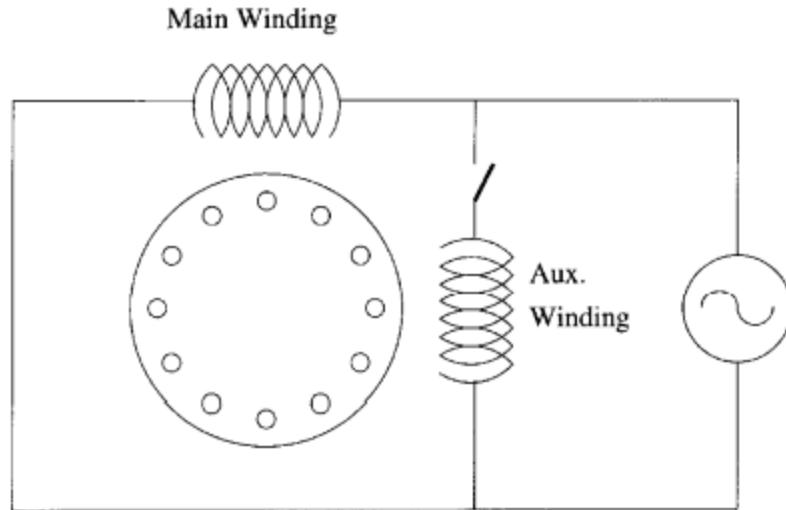
Karena belokan korsleting, fluks dari bagian tiang yang diarsir tertinggal di belakang fluks dari kutub utama. Motor selalu berputar dari utama ke kutub yang teduh, dan tidak mungkin untuk mengubah arah. Motor tiang berbayang tidak efisien dan memiliki arus start dan running yang tinggi dan torsi awal yang rendah.

Mereka digunakan ketika keandalan dan biaya penting. Ukurannya yang kecil membuat efek keseluruhan dari kerugian mereka, seperti kipas kecil, tidak penting. Ukurannya berkisar dari 0,002 hingga 0,1 hp.

### 10.6.3 Motor Split-Phase Resistensi

Motor-motor ini memiliki belitan tambahan yang memiliki resistansi lebih tinggi daripada belitan utama dan dipindahkan secara spasial pada stator sekitar  $90^\circ$ . Kedua belitan didistribusikan pada permukaan stator dan terhubung ke tegangan saluran. Tetapi konstanta waktu di antara mereka membuat arus dalam belitan tambahan mengarah ke kutub utama. Pengaturan ini menghasilkan torsi awal yang bukan nol tetapi relatif rendah dan arus awal yang tinggi.

Penggunaan belitan tambahan hanya terbatas pada permulaan; motor berjalan lebih efisien tanpa itu, seperti motor fase tunggal yang dijelaskan sebelumnya. Sakelar, diaktifkan oleh kecepatan sentrimugal atau dengan suhu stator, memutuskan belitan tambahan segera setelah memulai. Gambar 10.17 menunjukkan skema koneksi untuk motor jenis ini.

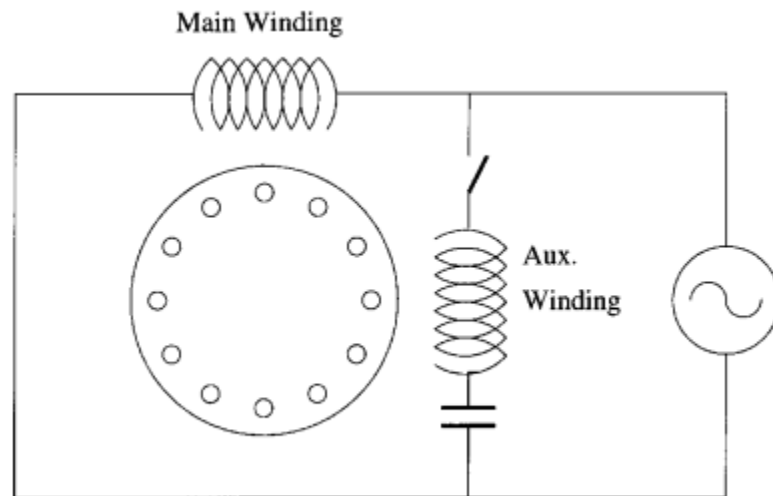


Gambar 10.17. Koneksi motor fase split resistif.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Motor-motor ini mewakili peningkatan efisiensi dan torsi awal di atas motor tiang teduh, dengan mengorbankan peningkatan biaya dan keandalan yang lebih rendah. Mereka dibangun dengan ukuran yang lebih besar, tetapi aplikasi mereka dibatasi oleh arus awal yang tinggi.

#### 10.6.4 Motor Kapasitor

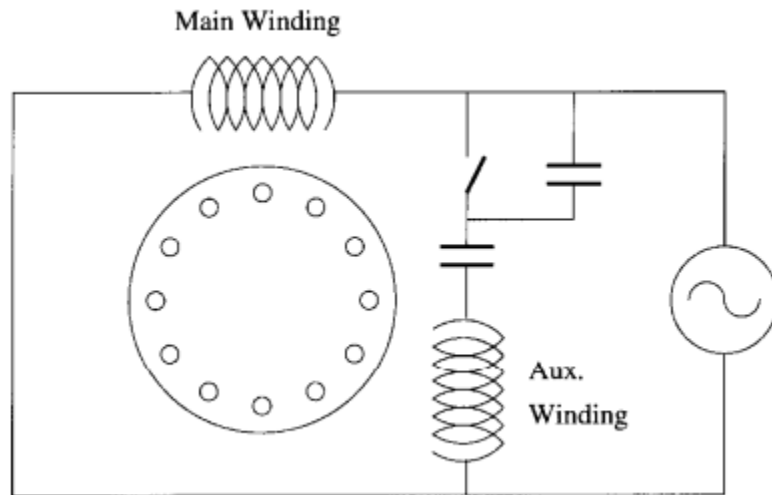
Cara lain untuk menghasilkan sudut fase arus dalam belitan tambahan adalah dengan memasukkan kapasitor secara seri dengan itu. Kapasitor dapat diputuskan setelah dihidupkan, dalam motor capacitor-start. Operasi mereka mirip dengan motor fase split resistansi, tetapi mereka memiliki karakteristik awal yang lebih baik dan bisa sebesar 5 hp. Gambar 10.12 menunjukkan secara skematis diagram kabel motor kapasitor-start.



Gambar 10.12. Koneksi motor penggerak kapasitor.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

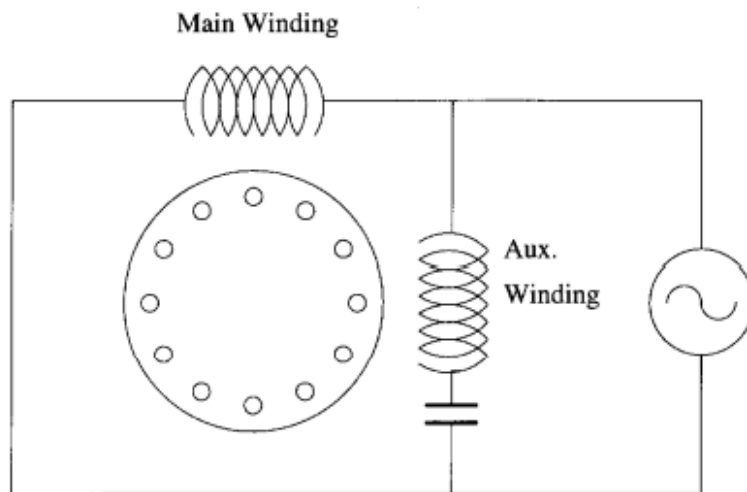
Untuk mengoptimalkan awal dan berjalan, nilai kapasitor yang berbeda digunakan. Satu nilai kapasitor dihitung untuk meminimalkan arus awal dan memaksimalkan torsi awal,

sementara yang lain dirancang untuk memaksimalkan efisiensi titik operasi. Sakelar sentrifugal menangani pergantian. Motor semacam itu dibuat sebanyak 10 hp, dan biayanya relatif tinggi karena sakelar dan dua kapasitor. Gambar 10.13 menunjukkan skema diagram kabel motor capacitor-start dan -run.



Gambar10.13. Koneksi motor kapasitor-start, yang dijalankan kapasitor.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Motor kapasitor split permanen menggunakan kapasitor yang sama di seluruh rentang kecepatan motor. Nilainya membutuhkan kompromi antara nilai-nilai motor dua kapasitor. Hasilnya adalah desain motor yang dioptimalkan untuk aplikasi tertentu, seperti kompresor atau kipas angin. Gambar 10.14 menunjukkan skema diagram kabel untuk motor split-capacitor permanen.



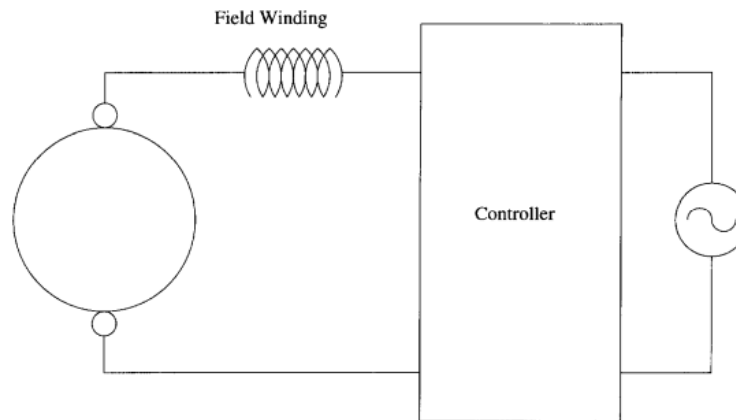
Gambar 10.14. Koneksi motor split-capacitor permanen.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

### 10.6.5 Motor Universal

Motor-motor ini dapat disuplai dari daya dc atau ac. Desain mereka pada dasarnya mirip dengan motor dc dengan belitan seri. Ketika dioperasikan sebagai motor ac, dipasang misalnya oleh sumber 60-Hz, arus di angker dan belitan medan berbalik 120 kali per detik. Karena torsi kira-kira sebanding dengan angker dan arus medan, menghubungkan belitan ini secara seri menjamin bahwa arus berbalik pada keduanya pada saat yang bersamaan. Ini mempertahankan torsi searah. Gambar 10.15 menunjukkan diagram skematik koneksi untuk motor universal.

Motor-motor ini dapat berjalan dengan kecepatan setinggi 20.000 rpm, kecepatan yang ringkas untuk tenaga kuda tertentu. Aplikasi mereka yang paling populer termasuk bor portabel, mixer makanan, dan kipas angin.

Motor universal yang dipasang dari ac dengan mudah ke aplikasi kecepatan variabel. Potensiometer, ditempatkan melintasi tegangan saluran, mengontrol penembakan TRIAC, membantu memvariasikan nilai efektif tegangan pada motor.



Gambar 10.15. Koneksi motor universal.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

### 10.6.6 Motor AC Magnet Permanen

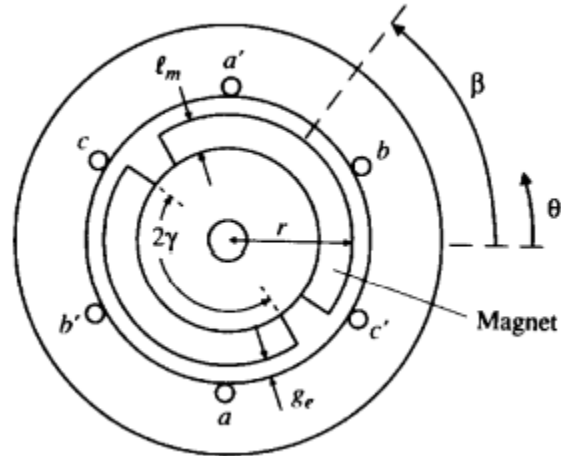
Jika dibandingkan dengan motor induksi, motor magnet permanen menawarkan torsi steady-state yang lebih tinggi untuk ukuran yang sama dan efisiensi yang lebih baik. Mereka memiliki belitan polifase di stator yang dapat terkonsentrasi atau didistribusikan. Putaran distribusi kepadatan belitan ini dapat berbentuk persegi panjang atau dapat diperkirakan sinusoid. Rotor memiliki inti baja, dengan magnet permanen yang dipasang di permukaan atau insetnya. Magnet ini dapat dibuat dari berbagai bahan, termasuk tanah jarang, keramik, atau ferit.

Gambar 10.16 dan Gambar 10.17 menunjukkan skema mesin ac magnetik permanen dengan sumbu d yang sejajar dengan arah magnetisasi rotor dan sumbu q tegak lurus terhadapnya. Magnet dapat dipasang pada permukaan rotor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.16, atau inset atau "terkubur" di dalamnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.17. Gambar 10.18 menunjukkan skema belitan terdistribusi di stator, sedangkan Gambar 10.19 menunjukkan yang terkonsentrasi. Motor dengan belitan terkonsentrasi biasanya memiliki kehilangan belitan yang lebih rendah, karena belokan ujungnya lebih pendek. Selain itu, medan magnet yang mereka hasilkan di celah udara tidak didistribusikan secara sinusoid dan dapat menyebabkan denyut torsi yang lebih tinggi dan arus eddy di magnet rotor.

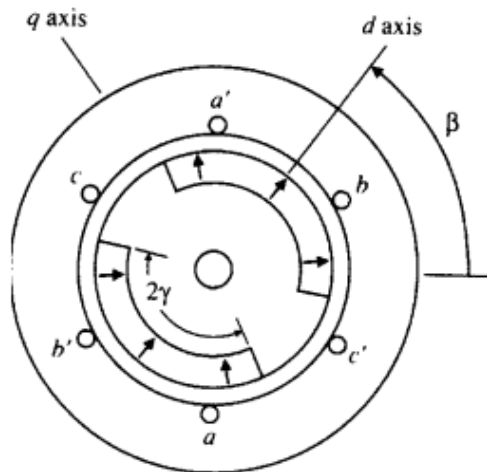
Rotor motor ac magnet permanen dapat dirancang dengan berbagai tujuan. Bahan magnetik tanah jarang seperti Nd-Fe-B memiliki kepadatan energi yang tinggi dan dapat menghasilkan desain yang ringkas. Ferit dan magnet keramik memiliki biaya yang lebih rendah



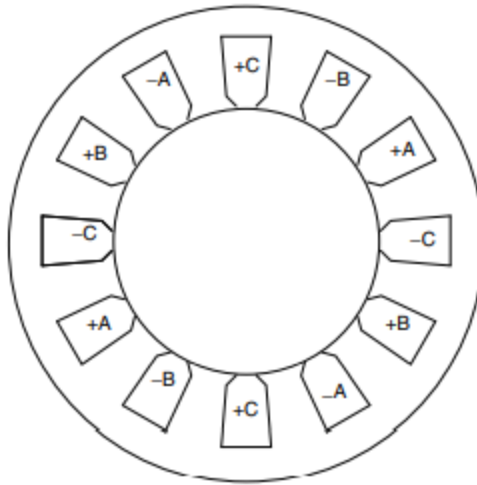
dan kepadatan energi yang lebih rendah. Di sisi lain, magnet tanah jarang memiliki konduktivitas tinggi, yang dapat menyebabkan kerugian arus eddy yang tinggi. Karena sebagian besar bahan magnetik memiliki permeabilitas mirip dengan udara, dua hasil topologi dasar: motor PMAC yang dipasang di permukaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.20, dan motor PMAC magnet interior, topologi dasar yang ditunjukkan pada Gambar 10.21.



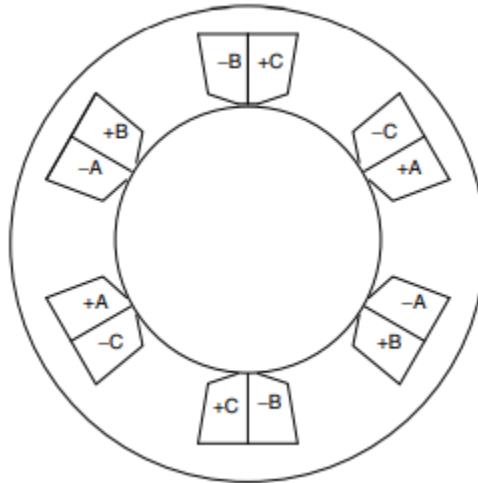
Gambar 10.16. Magnet yang dipasang di permukaan pada motor ac magnet permanen.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))



Gambar 10.17. Magnet inset (interior) pada motor ac magnet permanen.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))



Gambar 10.18. Stator ac magnet permanen dengan belitan terdistribusi.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

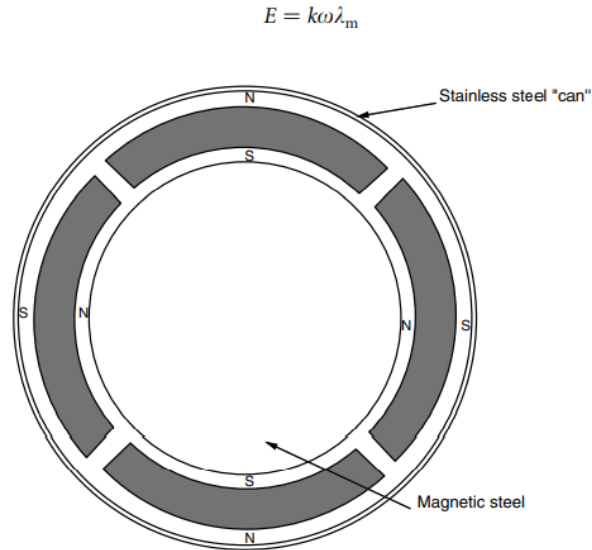


Gambar 10.19. Stator ac magnet permanen dengan belitan terkonsentrasi.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

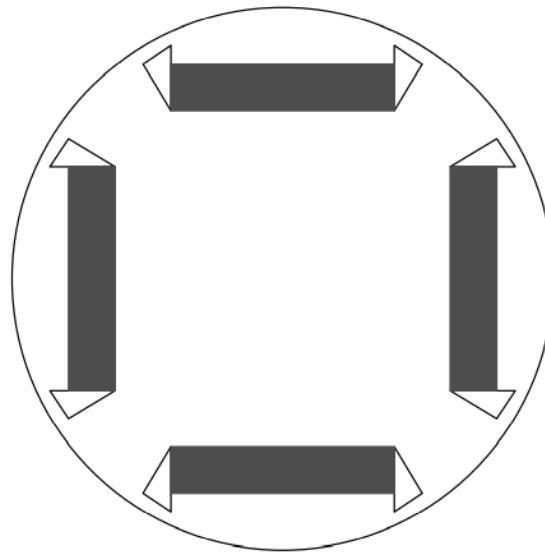
Untuk motor magnet permukaan, arus diterapkan pada belitan stator, menghasilkan vektor arus,  $i_q$ , tegak lurus terhadap fluks rotor,  $B_m$ . Torsinya kemudian adalah

$$T = k i_q \lambda_m$$

di mana  $\lambda$  adalah hubungan fluks stator per fase, karena  $B_m$ . Saat kecepatan rotor,  $\omega$ , meningkat, tegangan,  $E$ , diinduksi dalam belitan stator karena fluks rotor



Gambar 10.20. Rotor ac magnet permanen dengan magnet yang dipasang di permukaan.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))



Gambar 10.21. Rotor ac magnet permanen dengan magnet inset.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Meningkat juga. Untuk torsi beban tertentu, oB kecepatan dasar memungkinkan catu daya mencapai batas tegangan atasnya dan tidak dapat memberikan tegangan stator yang diperlukan. Ini mencegah motor mencapai kecepatan yang lebih tinggi. Untuk mengurangi masalah ini, arus dalam stator maju di depan fluks rotor, di luar 90-. Ini pada dasarnya mendemagnetisasi motor dan memungkinkan operasi pada kecepatan yang lebih tinggi. Wilayah operasi ini, yang disebut melemahnya lapangan, mengarah pada efisiensi yang lebih rendah dan mengurangi torsi maksimum yang tersedia.

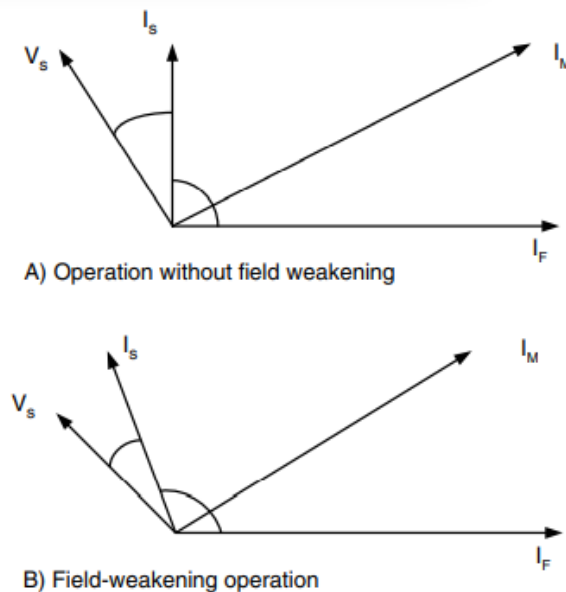
Pada jenis motor dengan magnet yang terkubur di rotor, permeabilitas dan keengganan magnetik tidak konstan secara rotasi. Meskipun sejumlah desain dapat didasarkan pada konsep ini, torsi elektromagnetik yang dikembangkan di semuanya memiliki dua komponen: satu mirip

dengan motor dengan rotor silinder, seperti yang dijelaskan sebelumnya dan dihasilkan dari interaksi arus stator dan magnet rotor, dan satu lagi yang dihasilkan dari variasi keengganan magnetic.

$$T = k(i_q \lambda_m + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

Gambar 10.22 menunjukkan bahwa ruang-vektor arus stator tegak lurus terhadap fluks rotor (ditunjukkan oleh  $I_F$ ) di bawah inia certain speed  $\omega_b$  (kecepatan dasar) yang ditentukan oleh tegangan stator maksimum yang dapat disediakan oleh inverter. Untuk mencapai kecepatan di atas  $\omega_b$ , arus stator harus ditingkatkan melampaui 90°, melemahkan medan magnet dan menciptakan kerugian belitan yang lebih tinggi. Belitan stator disuplai oleh sumber dc melalui sakelar elektronik yang merupakan inverter. Pengontrol menentukan sakelar mana yang akan ditutup kapan saja untuk memberikan arus yang sesuai ke stator. Pengontrol ini digunakan sebagai input perintah kecepatan atau torsi, pengukuran arus, dan pengukuran atau perkiraan posisi rotor.

Ketika belitan stator berbentuk persegi panjang dan diberi energi hanya berdasarkan posisi rotor, set motor PM, inverter, dan pengontrol yang dihasilkan disebut motor dc brushless. Torsi yang dikembangkan sebanding dengan fluks celah udara,  $B_m$ , dan arus stator,  $I_s$



Gambar 10.22. Vektor ruang ac magnet permanen untuk kerugian minimal dan untuk melemahnya medan.

(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

$$T = k B_m I_s$$

Karena kecepatan rotor,  $\omega_s$ , tegangan, E, (emf belakang) diinduksi ke belitan stator.

$$E = k \omega B_m$$

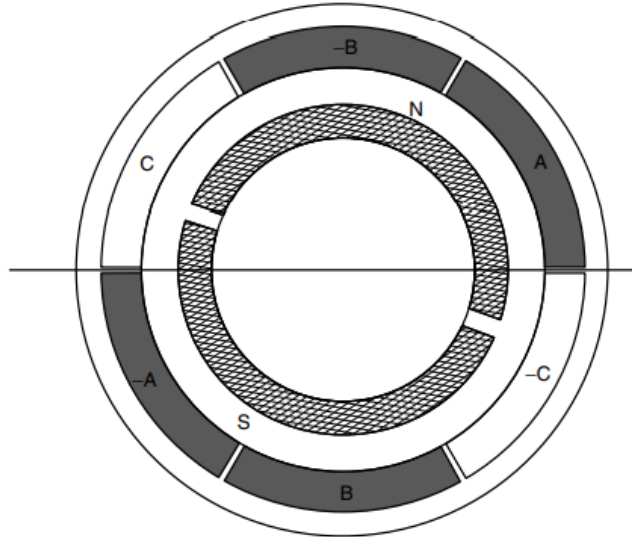
### 10.6.7 Stepping Motors (Motor Loncatan)

Gambar 10.23 dan Gambar 10.24 menunjukkan kasus motor dc brushless tiga fase dengan masing-masing sabuk fase mencakup 60° dan magnet stator menutupi hampir 180°. Hanya dua fase yang harus diberi energi, sebagaimana ditentukan oleh posisi rotor. Motor-motor ini mengubah serangkaian pulsa daya menjadi serangkaian gerakan sudut yang sama. Pulsa ini

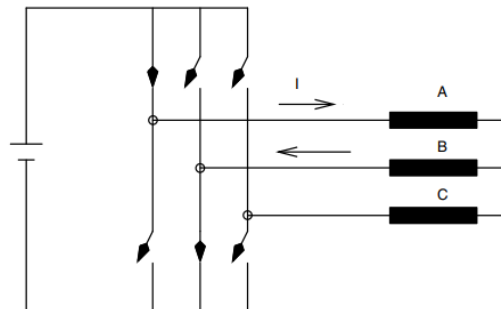
dapat dikirim pada laju variabel, memungkinkan penentuan posisi rotor yang akurat tanpa umpan balik. Mereka dapat mengembangkan torsi hingga 15 Nm dan dapat menangani 1500 hingga 2500 pulsa per detik. Mereka tidak memiliki kesalahan steady-state dalam penentuan posisi dan kepadatan torsi tinggi. Karakteristik penting dari motor loncatan adalah bahwa ketika satu fase diaktifkan, mereka tidak mengembangkan torsi berputar. Sebaliknya, mereka membentuk torsi penahanan, membantu mereka secara akurat mempertahankan posisi mereka, bahkan di bawah beban. Motor loncatan berasal dari motor keengganan variabel atau dari motor sinkron magnet permanen.

Salah satu desain motor loncatan, berdasarkan motor keengganan switched yang sangat menonjol, menggunakan sejumlah besar gigi di rotor (biasanya 45) untuk menciptakan saliency, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.25. Dalam desain ini, ketika gigi rotor sejajar di Fase 1, mereka tidak sejajar di Fase 2 dan 3. Denyut arus pada Fase 2 akan menyebabkan rotasi yang mengarah pada penyelarasan. Sebagai gantinya, jika pulsa diterapkan ke Fase 3, rotor akan bergerak pada jarak yang sama dalam rotasi yang berlawanan.

Sudut yang sesuai dengan pulsa kecil, biasanya 3 hingga 5°. Ini hasil dari fase satu stator yang menarik pada satu waktu. Motor loncatan magnet permanen menggunakan magnet permanen di rotor. Gambar 10.25 menunjukkan langkah-langkah dalam gerakan motor loncatan PM empat fase.



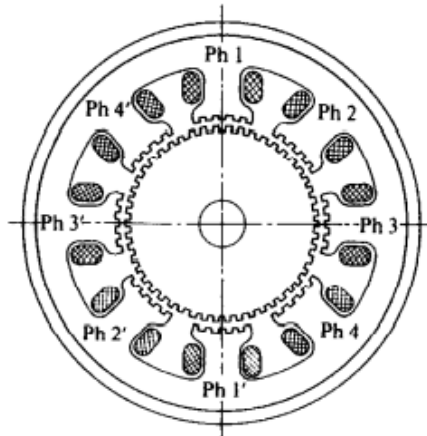
Gambar 10.23. Motor dc brushless dengan belitan berenergi A dan B.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))



Gambar 10.24. Inverter untuk dc brushless dengan belitan berenergi A dan B.  
(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

Motor loncatan hibrida hadir dalam banyak desain. Satu, ditunjukkan pada Gambar 10.25, terdiri dari dua rotor yang dipasang pada poros yang sama, dipindahkan oleh setengah gigi. Magnet permanen ditempatkan secara aksial di antara rotor, dan fluks magnetik mengalir secara radial di celah udara. Ini menutup melalui sirkuit stator. Torsi diciptakan oleh interaksi dua medan magnet yang berasal dari magnet dan arus stator. Desain ini memungkinkan kontrol sudut langkah yang lebih halus dan torsi yang lebih tinggi, serta torsi yang lebih halus selama langkah.

Dasar dari operasi stepping-motor adalah pemanfaatan sakelar elektronik daya dan sirkuit yang menyediakan waktu dan durasi pulsa. Motor loncatan tertentu dapat beroperasi pada frekuensi maksimum saat memulai atau berjalan tanpa beban. Ketika frekuensi pulsa ke motor yang berjalan meningkat, motor akhirnya kehilangan sinkronisme. Hubungan antara torsi beban gesekan dan frekuensi pulsa maksimum disebut karakteristik tarik-keluar



Gambar 10.25. Tampilan penampang motor keengganan variabel empat fase. Jumlah gigi rotor 50, nomor langkah.

(Sumber : (Oriental Motor, 2001))

### Soal

- 1) Sebutkan komponen yang menyusun system pada Motor AC dan jelaskan peranannya masing – masing !
- 2) Bagaimana cara kerja dalam pengaplikasian Motor AC ?
- 3) Sebutkan jenis – jenis Motor AC !
- 4) Sebutkan contoh penerapan Motor AC dalam kehidupan sehari – hari?
- 5) Jelaskan apa yang dimaksud dengan “Rolling Mill”?

# BAB XI

## MOTOR Brushless Direct Current Motor (BLDC)

### 11.1 Pendahuluan

Selama 150 tahun mesin arus searah DC telah memainkan peran penting dalam penggerak listrik. Keuntungan dasar yang terkait dengan aplikasinya dalam drive meliputi: penyesuaian kecepatan rotasi yang mudah, start-up dan pembalikan yang tidak rumit, operasi yang stabil untuk kecepatan kecil serta sifat dinamis yang baik memastikan reaksi cepat terhadap perubahan parameter catu daya. Mesin DC dengan klasik desain terdiri dari stator dengan elektromagnet yang ditenagai oleh arus eksitasi dan yang berperan untuk menghasilkan medan magnet eksitasi. Gulungan armature yang berputar dihubungkan ke komutator mekanis dengan sikat grafit-logam tergelincir di atasnya. Mereka merupakan sambungan listrik antara gulungan armature bergerak dan sirkuit eksternal. Komutator mekanis, yang merupakan perangkat yang sebagian besar memiliki makna sejarah, memainkan peran sebagai penyearah mekanis, yang mengubah arus AC dengan frekuensi yang sesuai dengan kecepatan rotasi rotor menjadi arus DC di luar angker. Pada masanya, komutator mekanis adalah perangkat yang luar biasa, yang bagaimanapun merepotkan selama eksploitasi dan mahal dalam hal biaya investasi. Itu juga merupakan tautan terlemah dalam sistem dalam arti keandalan operasi serta diperlukan servis berkala dan overhaul berkala. Mesin DC brushless modern (BLDC) menampilkan dua perbedaan mendasar yang kontras dengan mesin DC komutasi mekanis.

Pertama-tama, ia tidak memiliki komutator mekanis di mana sikat yang membentuk simpul listrik digunakan untuk tergelincir. Sebagai gantinya digunakan komutator elektronik statis yang berperan sebagai pergantian arus pada belitan jangkar dalam fungsi sudut posisi rotor  $r$ . Oleh karena itu, prinsip yang mengatur mesin DC dipertahankan, yaitu mesin bergerak sendiri. Dalam karakteristik mesin, efek dasarnya melibatkan fakta bahwa seiring dengan peningkatan beban, mesin cenderung melambat kecuali jika dilengkapi dengan kontrol kecepatan eksternal untuk stabilisasi kecepatan. Sebagai akibat dari perlambatan kecepatan rotasi ini, arus jangkar cenderung meningkat dan ini mengarah ke titik kesetimbangan baru dari operasi. Perbedaan relevan kedua antara mesin komutasi mekanis klasik dan motor mutakhir melibatkan penggantian elektromagnet yang menarik medan magnet utama dengan rakitan magnet permanen yang dipilih secara memadai. Solusi ini dimungkinkan sebagai hasil dari parameter magnetik dan utilitas parameter lainnya dan akhirnya nilai komersial magnet permanen. Mereka mengandung unsur tanah jarang, seperti neodimium (Nd), samarium (Sm) antara lain. Penerapan magnet permanen meningkatkan efisiensi mesin karena tidak ada rugi daya pada belitan eksitasi dan menyebabkan penurunan massa mesin. Namun, dalam hal konstruksi dan persyaratan termal operasi mesin tidak ada kemajuan karena magnet permanen dipasang di mesin dan menyediakan fluks eksitasi memerlukan kondisi operasi yang memadai yang tidak memungkinkan penurunan atau peluruhan medan magnet dari magnet. . Persyaratan ini pada dasarnya melibatkan pembatasan suhu di dalam motor magnet permanen, pembatasan pengaruh reaksi jangkar sedemikian rupa sehingga memastikan bahwa demagnetisasi ireversibel magnet tidak terjadi dan tidak memperluas celah udara untuk mencegah kelebihan magnet permanen. Kita harus ingat bahwa mesin DC magnet permanen (PMDC) harus dirancang dengan cara yang memastikan operasi mereka selama beberapa tahun tanpa penurunan parameter eksploitasi. Perbedaan penting lainnya antara mesin DC komutasi mekanis klasik. dan yang tanpa sikat menyangkut jumlah belitan jangkar dan, selanjutnya, bentuk gelombang arus pada sisi DC. Dalam mesin komutator, jumlah belitan yang biasa bervariasi sekitar beberapa lusin, sebagai akibatnya

ada cukup banyak segmen komutator. Sehubungan dengan ini, arus DC mengandung pulsasi yang sangat kecil karena pergantian terjadi setiap beberapa derajat sudut rotasi rotor. Akibatnya, torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh mesin ini cenderung menunjukkan pulsasi kecil. Dalam mesin BLDC dari desain teknik yang paling umum ada tiga fase belitan dinamo, yang dipantulkan oleh tiga cabang komutator elektronik (penyearah dikendalikan oleh sudut posisi rotor). Hal ini menghasilkan pulsasi arus dan torsi yang cukup besar yang dihasilkan oleh mesin karena pergantian terjadi setiap  $60^\circ$  dari sudut rotasi rotor, sebagai alternatif dalam kelompok anoda dan katoda dari komutator elektronik. Jelas mungkin untuk meningkatkan jumlah belitan jangkar dan jumlah cabang komutator sehingga mengarah pada pengurangan pulsasi arus; Namun, dua efek negatif mengikuti. Salah satunya terkait dengan kebutuhan untuk menggunakan komutator elektronik yang lebih luas dan mahal, sementara yang lain melibatkan peningkatan kerugian pergantian dan penurunan efisiensi drive. Komentar terakhir yang bisa dibuat di awal pengantar ini adalah bahwa mesin DC brushless dengan magnet permanen dapat sangat bervariasi dalam hal struktur tekniknya. Pertama-tama, mungkin ada mesin kecil yang berfungsi sebagai servodrives dalam teknologi, peralatan rumah tangga, dan kendaraan. Selain itu, ada mesin yang lebih besar, yang diterapkan pada penggerak listrik dari perangkat yang dikendalikan secara otomatis, termasuk penggerak pada sambungan manipulator. Terakhir, ada mesin berdaya tinggi dengan parameter penggerak yang digunakan dalam mesin industri, misalnya di pabrik baja atau kapal. Mesin BLDC mungkin memiliki berbagai jumlah fase, memiliki konstruksi silinder dan dalam beberapa aplikasi mereka dapat memiliki bentuk piringan dengan jangkar tidak bergerak dan magnet yang berputar. Solusi terakhir dapat digunakan untuk drive tanpa roda gigi dengan putaran rendah. Mesin BLDC tidak perlu memiliki rentang putaran yang rendah, seperti yang telah dibahas sebelumnya, tetapi juga dapat beroperasi di bawah kecepatan rotasi yang melebihi 10.000 [putaran/menit]. Jumlah versi yang tersedia besar dan masih terus bertambah.

Brushless DC Motor (BLDC) adalah motor sinkron AC tiga fase yang terdiri dari rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak dan terbuat dari magnet permanen, sedangkan stator adalah bagian tak bergerak yang terbuat dari kumparan 3 fase. Motor BLDC juga disebut sebagai motor komutasi elektronik. Seperti halnya pergantian mekanis, pergantian elektronik membantu dalam mencapai torsi searah yang mirip dengan mesin DC konvensional. Pada mesin BLDC rotor terdiri dari magnet permanen, sedangkan stator dililit dengan sejumlah kutub tertentu. Seringkali motor BLDC diproduksi sebagai mesin tipe rotor luar.

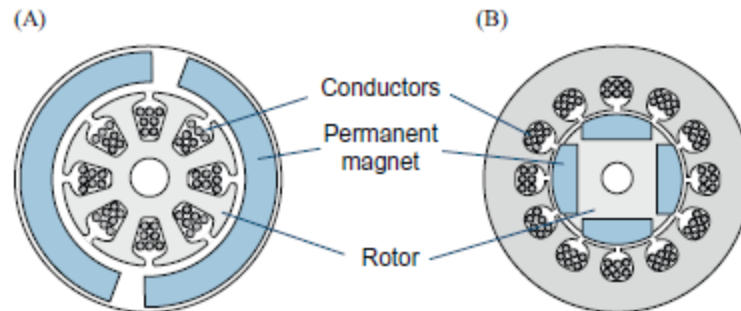
Motor BLDC banyak digunakan dalam aplikasi termasuk peralatan, otomotif, kedirgantaraan, konsumen, medis, peralatan industri otomatis dan instrumentasi. Perbedaan mendasar pada mesin DC konvensional adalah bahwa pergantian dilakukan secara elektronik oleh pengontrol daripada secara mekanis dengan kuas. Belitan terhubung ke sirkuit kontrol, yang memberi energi pada belitan sedemikian rupa sehingga medan berputar dihasilkan. Magnet rotor mencoba sejajar dengan medan stator yang memberikan torsi dan dengan demikian bergerak. Struktur mesin BLDC pada dasarnya adalah mesin sinkron magnet permanen (PMSM/) dengan belitan terkonsentrasi. Umumnya mesin ini juga dikenal sebagai PMSM dengan magnet yang dipasang di permukaan dan belitan terkonsentrasi; namun, di beberapa industri istilah BLDC lebih baik. Brushless DC Motors atau BLDC Motors telah menjadi kontributor signifikan dari teknologi penggerak modern. Popularitas mereka yang cepat telah melihat peningkatan berbagai aplikasi di bidang Peralatan Konsumen, Industri Otomotif, Otomasi Industri, Kimia dan Medis, Dirgantara dan Instrumentasi. Motor DC brushless digerakkan oleh listrik arus searah (DC) dan menyelesaikan sistem pergantian yang dikontrol secara elektronik (pergantian adalah proses menghasilkan torsi rotasi di motor dengan mengubah arus fase melaluinya pada waktu yang tepat) alih-alih sistem pergantian mekanis. Sesuai dengan namanya, motor BLDC tidak menggunakan sikat untuk pergantian; sebaliknya, mereka dikomunikasi secara elektronik. Motor BLDC memiliki banyak keunggulan dibandingkan motor DC yang disikat dan motor induksi.

Pada motor BLDC, untuk menghilangkan sikat-sikat pada motor DC, belitan jangkar ditempatkan pada sisi stator dan magnet ditempatkan pada sisi rotor. Akibatnya, motor BLDC memiliki konfigurasi yang berbeda dari motor DC. Karena ada tingkat kebebasan dalam konfigurasi motor saat merancang untuk menghilangkan kuas, berbagai desain motor BLDC agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang luas seperti konfigurasi yang lebih kecil atau lebih tipis dimungkinkan. Motor BLDC memiliki banyak



keunggulan seperti efisiensi tinggi, kepadatan daya tinggi, rasio torsi-ke-inersia tinggi, kemampuan operasi kecepatan tinggi, metode penggerak sederhana, dan biaya rendah. Dengan demikian, saat ini, mereka banyak digunakan untuk solusi hemat biaya di banyak aplikasi penggerak motor kecil dan menengah seperti peralatan rumah tangga, industri, produk kantor, dan kendaraan ringan.

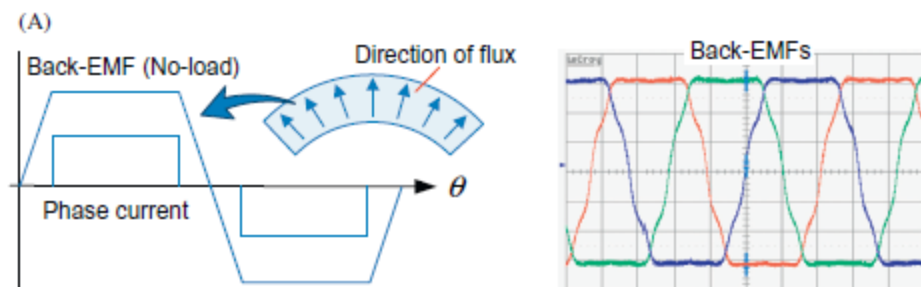
Motor BLDC tidak memiliki kelemahan krusial dari motor DC karena fungsi sikat dan komutator diganti dengan sakelar semikonduktor yang beroperasi berdasarkan informasi dari posisi rotor. Akibat penggantian ini, konfigurasi motor BLDC menjadi berbeda dengan motor DC, tetapi mirip dengan konfigurasi motor sinkron magnet permanen (PMSM). Seperti ditunjukkan pada Gambar 11.1B, motor BLDC memiliki konfigurasi di mana belitan ditempatkan pada sisi stator dan magnet pada sisi rotor. Ini menghasilkan konfigurasi terbalik dari motor DC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.1A.



Gambar 11.1. Konfigurasi (A) motor DC dan (B) motor BLDC.  
(Sumber: Review and future trends, IET Electr. Power Application, 2017)

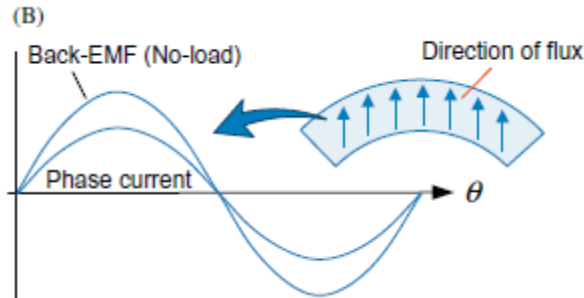
Namun, mirip dengan arus yang mengalir pada belitan jangkar motor DC, arus yang mengalir pada belitan motor BLDC adalah gelombang kuasi-persegi. Konfigurasi motor BLDC seperti ini memiliki kelebihan dibandingkan motor DC. Dibandingkan dengan rotor berat motor DC yang terdiri dari banyak konduktor, motor BLDC memiliki rotor inersia yang rendah. Dengan demikian motor BLDC dapat memberikan respon kecepatan yang cepat. Selain itu, belitan yang ditempatkan di sisi stator dapat dengan mudah menghilangkan panas, memungkinkan motor BLDC memiliki kemampuan torsi puncak yang lebih baik dibandingkan dengan motor DC yang arus maksimumnya dibatasi untuk menghindari demagnetisasi magnet. Selain itu, motor BLDC dapat beroperasi pada kecepatan yang lebih tinggi karena perangkat pergantian nonmekanis.

Karena kesamaan strukturalnya, motor BLDC sering dikacaukan dengan PMSM. Umumnya, motor BLDC dapat dibedakan dari PMSM berdasarkan bentuk gaya gerak baliknya (back-EMF). Motor BLDC dirancang untuk mengembangkan bentuk gelombang EMF balik trapesium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.2A. Dengan demikian amplitudo kerapatan fluks magnet yang dihasilkan oleh magnet rotor tetap konstan sepanjang celah udara. Ini dapat dicapai dengan menggunakan magnet dengan magnetisasi paralel.



Gambar 11.2.A. Motor BLDC dengan bentuk gelombang back-EMF trapesium

Ketika motor BLDC dengan bentuk gelombang EMF belakang trapesium diumpankan dengan arus stator persegi panjang, torsi konstan dapat dikembangkan. Di sisi lain, PMSM adalah jenis motor AC dengan bentuk gelombang back-EMF sinusoidal, dan dengan demikian arusnya harus menjadi bentuk gelombang sinusoidal untuk pembangkitan torsi konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.2B.



Gambar 11.2.B. Motor AC dengan bentuk gelombang back-EMF sinusoidal

Bentuk gelombang back-EMF sinusoidal membutuhkan kerapatan fluks magnet yang dihasilkan oleh magnet rotor untuk didistribusikan secara sinusoidal di sepanjang celah udara. Sebuah PMSM sering disebut sebagai motor BLAC, berbeda dengan motor BLDC. Kerapatan daya motor BLDC dengan bentuk gelombang EMF balik trapesium adalah 15% lebih tinggi daripada PMSM. Hal ini dikarenakan bentuk gelombang trapesium memiliki komponen fundamental yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk gelombang sinusoidal, meskipun memiliki nilai puncak yang sama. Selain bentuk gelombang back-EMF, ada beberapa perbedaan antara motor BLDC dan PMSM.

## 11.2 Konstruksi Motor BLDC

Motor Brushless DC terdiri dari rotor dalam bentuk magnet permanen dan stator dalam bentuk belitan anker polifase.. Ini berbeda dari motor dc konvensional sedemikian rupa sehingga tidak mengandung kuas dan pergantian dilakukan dengan menggunakan elektronik, menggunakan drive elektronik untuk memberi makan belitan stator. Motor BLDC menggunakan pergantian elektronik dan dengan demikian menghilangkan sikat yang robek secara mekanis.

Kumparan anker dialihkan secara elektronik oleh transistor atau penyearah yang dikendalikan silikon pada posisi rotor yang benar sedemikian rupa sehingga medan anker berada di quadrature ruang angkasa dengan kutub medan rotor. Oleh karena itu gaya yang bekerja pada rotor menyebabkannya berputar. Sensor hall atau rotary encoder paling sering digunakan untuk merasakan posisi rotor dan diposisikan di sekitar stator. Umpan balik posisi rotor dari sensor membantu menentukan kapan harus mengganti arus anker.

Motor brushless DC (BLDC) digunakan untuk berbagai persyaratan aplikasi seperti beban yang bervariasi, beban konstan dan aplikasi pemosisian di bidang kontrol industri, otomotif, penerbangan, sistem otomasi, peralatan perawatan kesehatan, dll. Beberapa aplikasi khusus motor BLDC adalah

- Hard drive komputer dan pemutar DVD / CD
- Kendaraan listrik, kendaraan hibrida, dan sepeda listrik
- Robot industri, peralatan mesin CNC, dan sistem yang digerakkan sabuk sederhana
- Mesin cuci, kompresor, dan pengering
- Kipas, pompa, dan blower

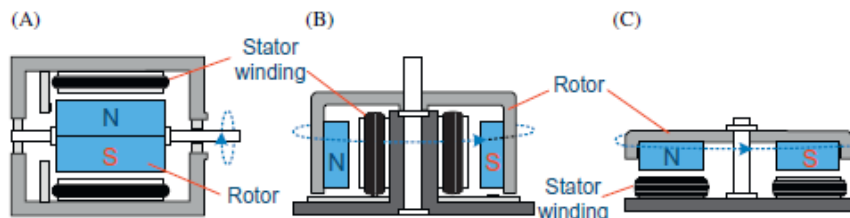
Motor BLDC dapat dikategorikan menurut jumlah belitan statornya yaitu fase tunggal, dua fase, tiga fase, dan multi fase. Motor BLDC fase tunggal banyak digunakan untuk peralatan dan mesin kecil karena strukturnya yang sederhana, rangkaian penggerak yang sederhana, dan biaya yang rendah. Namun, motor tersebut hanya dapat berputar dalam satu arah. Selanjutnya, karena memiliki titik penahan di mana

tidak ada torsi awal, desain motor termasuk bagian tambahan diperlukan untuk start-up. Torsi reluktansi biasanya digunakan sebagai torsi awal, menghasilkan torsi cogging yang besar. Motor BLDC fase tunggal bermanfaat untuk aplikasi daya kecil di bawah 10W seperti kipas dan blower yang memerlukan torsi awal yang rendah.

Motor BLDC multi-fase di atas empat fase dapat terutama diterapkan pada aplikasi luar angkasa dan militer yang membutuhkan keandalan tinggi karena peningkatan kepadatan daya dan kemampuan toleransi kesalahan. Motor BLDC tiga fasa adalah yang paling banyak digunakan dan pembahasan kita akan terbatas pada motor-motor ini dalam buku ini. Ada dua desain motor BLDC yang diklasifikasikan menurut arah fluks magnetnya: tipe fluks radial, di mana fluks dari magnet rotor melintasi celah udara dalam arah radial dan tipe fluks aksial, di mana fluks melintasi celah udara di arah aksial seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 11.3. Secara tradisional motor fluks radial telah digunakan hampir secara eksklusif. Tipe motor ini dapat berupa tipe rotor dalam atau tipe rotor luar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.3A dan B. Sebagai tipe yang paling umum, desain rotor dalam memiliki keunggulan kapasitas pembuangan panas yang lebih tinggi, torsi-ke-torsi yang tinggi, rasio inersia, dan inersia rotor yang lebih rendah. Aplikasi umumnya adalah drive servo yang membutuhkan respons dinamis yang cepat.

Karena rotor berbentuk silinder dengan poros tempat bantalan dipasang, motor jenis ini dapat menghasilkan lebih sedikit getaran dan kebisingan akustik. Motor rotor luar yang ditunjukkan pada Gambar 11.3B, di mana magnet rotor berputar di sekitar belitan stator yang terletak di inti besi motor, memiliki inersia rotor yang relatif tinggi. Jadi motor ini cocok untuk sistem yang membutuhkan operasi kecepatan konstan. Magnet yang ditempelkan di dalam kuk bermanfaat untuk operasi kecepatan tinggi. Motor rotor luar dapat menggunakan lebih banyak bahan magnetik daripada perangkat rotor dalam, yang berarti ia mampu menghasilkan lebih banyak fluks meskipun magnet produk energi yang digunakan lebih rendah. Saat ini, motor jenis ini semakin banyak digunakan di banyak aplikasi seperti disk drive komputer, kipas pendingin, dan mesin cuci.

Pada motor fluks aksial yang ditunjukkan pada Gambar 11.3C, rotor cakram dengan magnet yang fluksnya dalam arah aksial berputar menghadap stator. Magnet permanen direkatkan ke permukaan rotor. Dalam topologi desain ini, motor kecil sering memiliki belitan stator tanpa biji yang dipasang pada substrat nonmagnetik atau belitan stator tanpa slot yang dipasang pada inti besi tanpa slot.

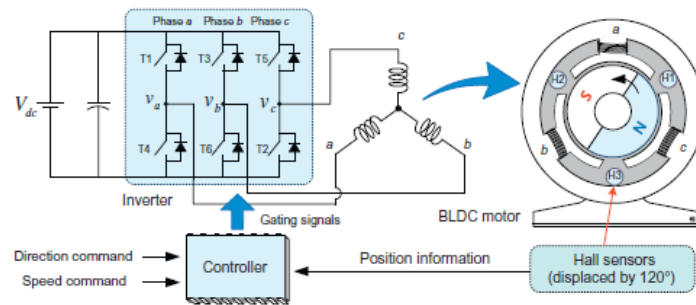


Gambar 11.3. Klasifikasi motor BLDC. (A) Fluks radial (rotor dalam), (B) fluks radial (rotor luar), dan (C) fluks aksial.

Keuntungan utama dari teknologi tersebut adalah bahwa ia memiliki torsi riak dan kebisingan akustik yang sangat rendah karena torsi cogging yang terkait dengan motor inti besi tipikal dapat dihilangkan karena tidak ada variasi keengganan. Inersia rotor yang relatif tinggi menguntungkan untuk operasi kecepatan yang konstan. Namun, karena peningkatan celah udara efektif, fluks yang tersedia agak rendah. Aplikasi umum adalah drive VCR dan pemutar CD. Motor fluks aksial dengan struktur yang lebih ramping dengan panjang aksial yang lebih pendek ini sangat cocok untuk aplikasi di mana panjang aksial motor adalah parameter desain pembatas, atau motor secara langsung digabungkan ke beban yang digerakkan. Aplikasi semacam itu termasuk kendaraan listrik motor roda dan motor lift.

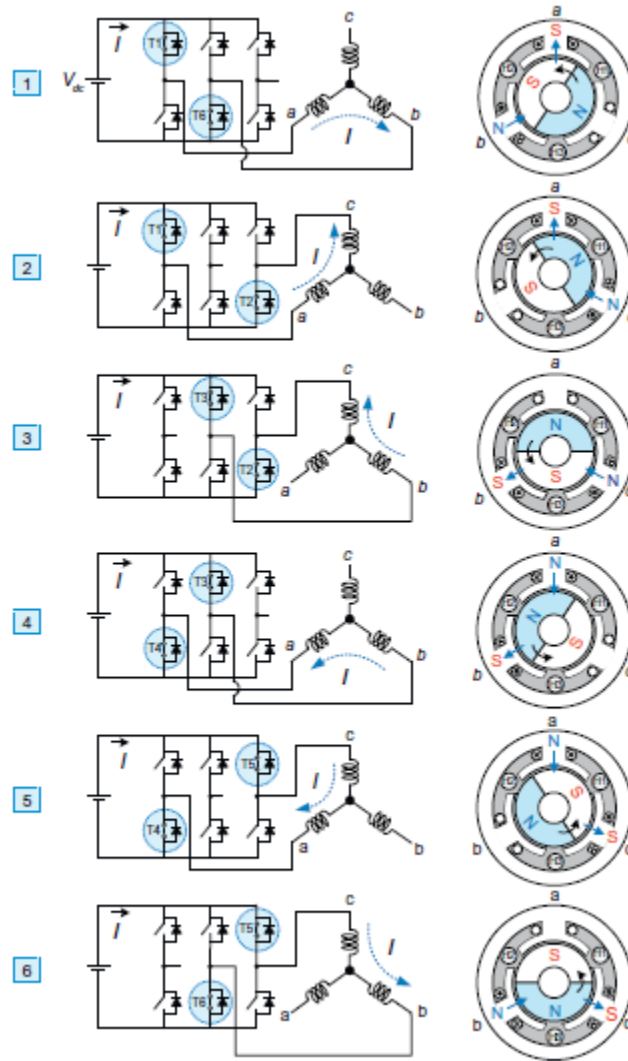
## 11.3 Sistem Penggerak Motor BLDC

Prinsip dasar penggerak motor BLDC adalah mengubah belitan fasa, yang harus dieksitasi sesuai dengan posisi magnet permanen pada rotor untuk menghasilkan torsi kontinu. Untuk melaksanakan fungsi ini, informasi tentang posisi magnet rotor sangat diperlukan. Penginderaan posisi biasanya dicapai dengan sensor efek Hall. Sistem penggerak motor BLDC dua kutub tiga fase terhubung-Y ditunjukkan pada Gambar 11.4. Tiga sensor efek Hall dipindahkan satu sama lain sebesar 120 derajat listrik pada stator untuk mendeteksi fluks medan magnet yang dihasilkan dari magnet rotor. Tiga sinyal keluaran sensor efek Hall memungkinkan kita mengenali posisi rotor yang dibagi menjadi enam bagian berbeda. Dengan demikian, penggerak dasar (sering disebut penggerak enam langkah) untuk menyelesaikan satu siklus listrik terdiri dari enam bagian yang berbeda.



Gambar 11.4. Sistem Penggerak Motor BLDC

Urutan switching untuk penggerak enam langkah diilustrasikan pada Gambar 11.5. Dalam penggerak motor BLDC, hanya dua dari belitan tiga fase yang dieksitasi, sedangkan belitan lainnya dibiarkan tanpa eksitasi. Sinyal umpan balik posisi rotor dapat digunakan untuk menentukan dua dari belitan tiga fase mana yang harus dieksitasi untuk menghasilkan torsi kontinu pada setiap saat. Sebagai rangkaian penggerak, inverter tiga fase digunakan untuk mengalirkan arus ke belitan dua fase yang dibutuhkan. Dalam inverter untuk drive BLDCM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.5, perangkat switching hanya dua fase bekerja pada saat tertentu. Dengan demikian, setiap perangkat switching memiliki interval konduksi 120. Dalam penggerak enam langkah, pergantian sakelar aktif dilakukan ke sakelar fase lain, dan dengan demikian waktu mati tidak diperlukan untuk perlindungan hubung singkat di inverter.

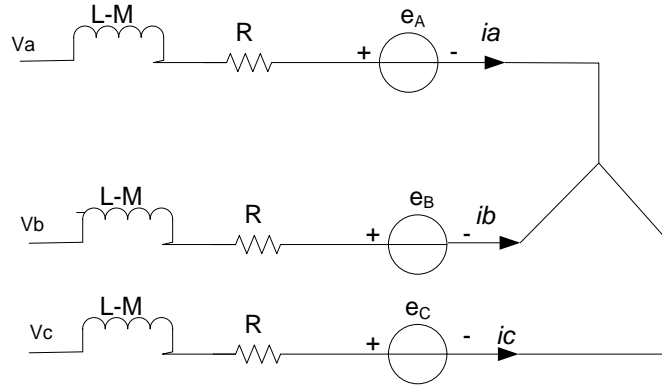


Gambar 11.5. Urutan switching untuk motor BLDC tiga fase dua kutub.  
 (Sumber: IET Electr. Power:2007)

## 11.4 Pemodelan Motor BLDC

Pada bagian ini, akan dijelaskan mengenai model matematis motor BLDC tiga fasa. Model motor BLDC mirip dengan PMSM karena kesamaan strukturalnya. Persamaan model motor BLDC terdiri dari persamaan tegangan, persamaan torsi dan persamaan gerak. Stator pada motor BLDC umumnya memiliki tiga belitan seperti yang ada pada motor induksi atau permanen magnet synchronous motor. Diagram rangkaian untuk belitan stator ditunjukkan pada gambar 11.6

Persamaan tegangan untuk belitan stator motor BLDC dapat dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 11.6. Diagram Rangkaian Belitan Stator  
(Sumber : Ain Shams Engineering Journal, 2016)

Persamaan tegangan pada terminal yang berbeda ditunjukkan pada persamaan berikut ini :

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + (L - M) \frac{d}{dt} (i_a - i_b) + e_a - e_b$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + (L - M) \frac{d}{dt} (i_b - i_c) + e_b - e_c$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + (L - M) \frac{d}{dt} (i_c - i_a) + e_c - e_a$$

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + B_v w_m + T_L$$

$$e_a = \frac{K_e}{2} w_m F(\theta_e)$$

$$e_b = \frac{K_e}{2} w_m F(\theta_e - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_c = \frac{K_e}{2} w_m F(\theta_e - \frac{4\pi}{3})$$

Persamaan torsi elektroniknya sebagai berikut :

$$T_e = \frac{K_t}{2} \left[ F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right]$$

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e \leq \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{5\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e \leq 2\pi \end{cases}$$

Dengan keterangan :

$B_v$	: konstanta gesekan
$K_e$	: jalur konstanta back emf
$K_t$	: jalur konstanta torsi
$T_L$	: torsi beban
$T_e$	: torsi elektronik
$e_a, e_b, e_c$	: phase back emf
$i_a, i_b, i_c$	: phase arus
$v_a, v_b, v_c$	: tegangan antar jalur
$\theta_e$	: sudut elektrik ( $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$ )
$\theta_m$	: sudut rotor
$\omega_m$	: kecepatan rotor
$J$	: inersia rotor
$L$	: induktansi phasa

Model persamaan fungsi transfer sebagai berikut :

$$i_a = -i_b = i$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{di_b}{dt} = \frac{di}{dt}$$

$$v_{ab} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_a - e_b)$$

Jadi untuk nilai  $e_b = -e_a$

$$v_{ab} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e_a$$

$$U_d = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_e \omega_m$$

Untuk membangun model matematika pada system elektromekanik untuk persamaan gerak adalah :

$$K_t i - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m$$

Ketika motor BLDC bekerja dengan tidak ada beban, maka persamaan arusnya dapat ditulis sebagai berikut dengan diasumsikan  $T_L = 0$

$$i = \frac{J}{K_t} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m$$

$T_L$  = torsi beban

$J$  = inersia momen rotor

$B_v$  = koefisien gesekan

$$U_d = r_a \left( \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + L_a \frac{d}{dt} \left( \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + K_e \omega_m$$

$$U_d = \frac{L_a J}{K_t} \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \frac{r_a J + L_a B_v}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{r_a B_v + K_e K_t}{K_t} \omega_m$$

Dengan menggunakan transformasi laplace

$$G_u(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_d(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_e K_t)}$$

ngan menggunakan metode yang sama, fungsi transfer antar torsi beban dan kecepatan adalah

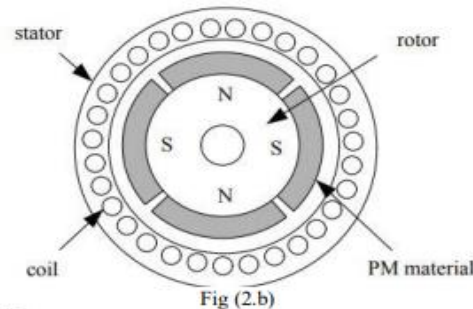
$$G_L(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_L(s)} = \frac{-(r_a + L_a s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_e K_t)}$$

Respon kecepatan motor BLDC yang disebabkan oleh tegangan dan torsi beban adalah :

$$\begin{aligned} \omega_m(s) &= G_u(s)U_d(s) + G_L(s)T_L(s) \\ &= \frac{K_T U_d(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_e K_T)} - \frac{(r_a + L_a s) T_L(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_e K_T)} \end{aligned}$$

## 11.5 Karakteristik Motor BLDC

"Keuntungan dari motor BLDC rotor internal terletak pada inersia rotor yang rendah dan disipasi panas yang hilang secara superior. Sebaliknya, untuk motor rotor eksternal, kumparan penghasil panas diisolasi terhadap lingkungannya oleh rumah rotor dan magnet. Motor rotor eksternal menampilkan keunggulannya dalam aplikasi yang diproduksi secara massal, karena mereka dapat diproduksi dengan lebih murah. Dapat juga dibuat lebih pendek dan biasanya memiliki torsi standstill yang lebih rendah (torsi penahan), serta torsi yang lebih tinggi berkat diameter rotor yang lebih besar, pada gaya magnet yang sama". Konstruksi motor ini memiliki banyak kesamaan motor induksi tiga fase serta motor DC konvensional. Motor ini memiliki bagian stator dan rotor seperti semua motor lainnya. Motor BLDC dapat dibangun dalam konfigurasi fisik yang berbeda. Tergantung pada belitan stator, ini dapat dikonstruksi sebagai motor fase tunggal, dua fase, atau tiga fase. Namun, motor BLDC tiga fase dengan rotor magnet permanen paling umum digunakan. Gambar 11.7 menunjukkan detail konstruksi motor BLDC.



Gambar 11.7. Komponen Penyusun Motor BLDC.

(Sumber : <https://www.utmel.com/blog/categories/motors/what-is-brushless-dc-motors-blde>)



### 11.5.1 Stator

Stator motor BLDC yang terdiri dari laminasi baja bertumpuk untuk membawa belitan. Belitan ini ditempatkan di slot yang dipotong secara aksial di sepanjang pinggiran bagian dalam stator. Belitan ini dapat diatur dalam bintang atau delta. Namun, sebagian besar motor BLDC memiliki stator terhubung bintang tiga fase.

Setiap belitan dibangun dengan banyak kumparan yang saling berhubungan, di mana satu atau lebih kumparan ditempatkan di setiap slot. Untuk membentuk jumlah kutub yang genap, masing-masing belitan ini didistribusikan di atas pinggiran stator. Stator harus dipilih dengan peringkat tegangan yang benar tergantung pada kemampuan catu daya. Untuk aplikasi robotika, otomotif, dan penggerak kecil, motor BLDC tegangan 48 V atau kurang lebih disukai. Untuk aplikasi industri dan sistem otomasi, motor peringkat 100 V atau lebih tinggi digunakan. (Gambar 11.8) menunjukkan detail konstruksi stator motor BLDC.



Gambar 11.8. Detail konstruksi stator motor BLDC

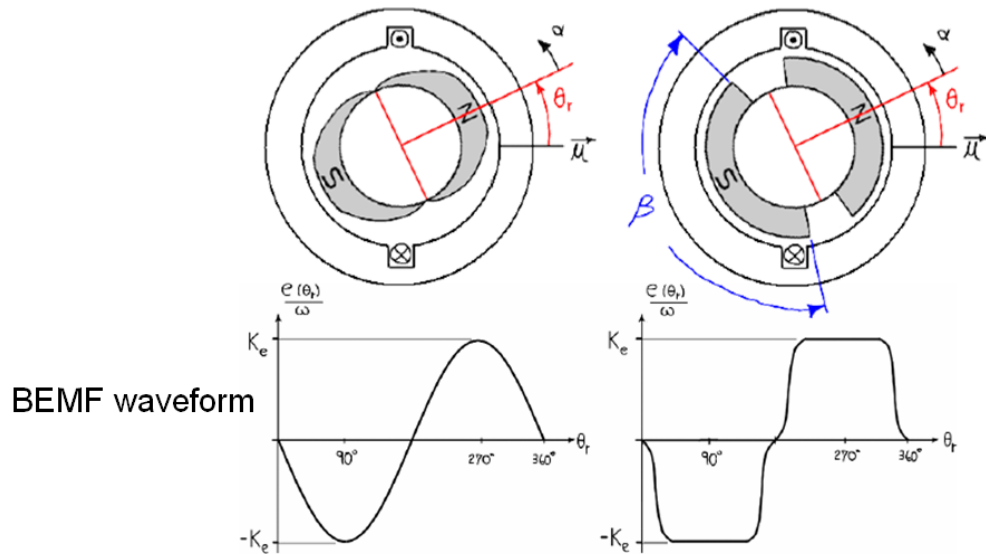
(Sumber : <https://www.kartanagari.co.id/wp-content/uploads/2021/09/MOTOR2.jpg>)

Umumnya, sebagian besar motor BLDC terdiri dari tiga belitan stator yang terhubung dalam mode bintang atau "Y" (tanpa titik netral). Selain itu, berdasarkan interkoneksi koil, belitan stator dibagi lagi menjadi Motor Trapezium dan Sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.9.

Dalam motor trapesium, arus penggerak dan EMF belakang berbentuk trapesium (bentuk sinusoidal dalam kasus motor sinusoidal). Biasanya, motor berperingkat 48 V (atau kurang) digunakan dalam otomotif dan robotika (mobil hibrida dan lengan robot).

## Sinusoidal Motors

## Trapezoidal Motors



Gambar 11.9. Belitan stator yaitu Motor Trapesium dan Sinusoidal.

(Sumber : <https://e2e.ti.com/support/motor-drivers-group/motor-drivers/f/motor-drivers-forum/909911/faq-trapezoidal-motors-vs-sinusoidal-motors>)

### 11.5.2 Rotor

Motor BLDC menggabungkan magnet permanen di rotor. Jumlah kutub di rotor dapat bervariasi dari 2 hingga 8 pasangan kutub dengan kutub selatan dan utara magnetik tergantung pada persyaratan aplikasi. Untuk mencapai torsi maksimum di motor, kerapatan fluks material harus tinggi. Bahan magnetic yang tepat untuk rotor diperlukan untuk menghasilkan kepadatan medan magnet yang diperlukan.

Magnet ferit tidak mahal, namun mereka memiliki kepadatan fluks rendah untuk volume tertentu. Magnet paduan tanah jarang digunakan secara komon untuk desain baru. Beberapa paduan ini adalah Samarium Cobalt (SmCo), Neodymium (Nd), dan Ferrite and Boron (NdFeB). Rotor dapat dibangun dengan konfigurasi inti yang berbeda seperti inti melingkar dengan magnet permanen di pinggir, inti melingkar dengan magnet persegi panjang, dll.

Berdasarkan aplikasi, jumlah kutub dapat bervariasi antara dua dan delapan dengan kutub Utara (N) dan Selatan (S) ditempatkan secara bergantian. Gambar 11.10 menunjukkan tiga susunan kutub yang berbeda. Dalam kasus pertama, magnet ditempatkan di pinggir luar rotor.



Gambar 11.10. Rotor pada Motor BLDC.

(Sumber : <https://www.edn.com/wp-content/uploads/media-1178412-bldcfg3.jpg>)

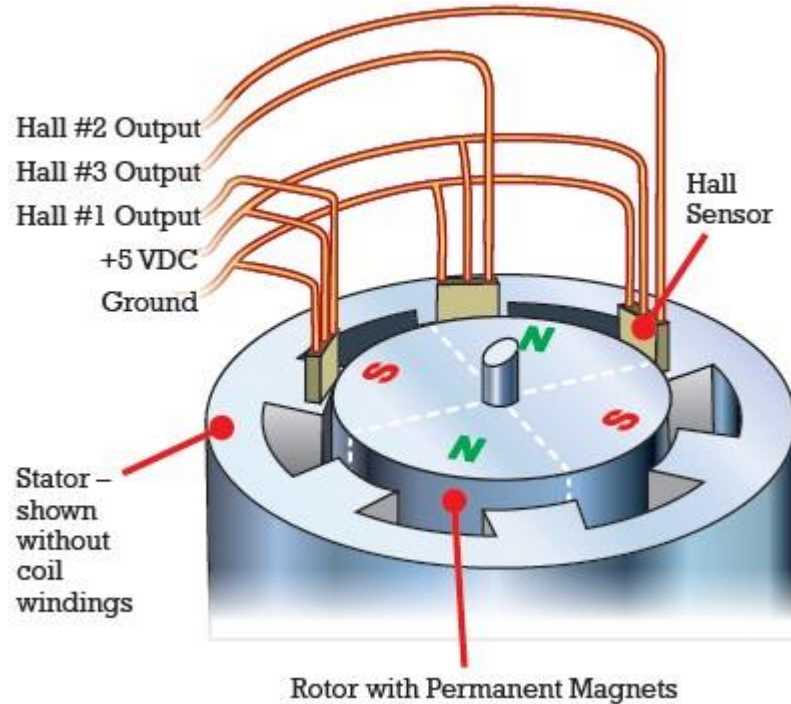
Konfigurasi kedua disebut rotor tertanam magnetik, di mana magnet permanen persegi panjang tertanam ke dalam inti rotor. Dalam kasus ketiga, magnet dimasukkan ke dalam inti besi rotor. Pada dasarnya motor BLDC dapat dibangun dengan dua cara - dengan menempatkan rotor di luar inti dan belitan di inti dan satu lagi dengan menempatkan belitan di luar inti. Dalam pengaturan sebelumnya, magnet rotor bertindak sebagai isolator dan mengurangi laju pembuangan panas dari motor dan beroperasi pada arus rendah. Ini biasanya digunakan pada penggemar. Dalam pengaturan yang terakhir, motor menghilangkan lebih banyak panas, sehingga menyebabkan peningkatan torsi. Ini digunakan dalam hard disk drive.

### 11.5.3 Posisi Sensor (Hall Sensors)

Karena tidak ada sikat di BLDC Motor, pergantian dikendalikan secara elektronik. Untuk memutar motor, belitan stator harus diberi energi secara berurutan dan posisi rotor (yaitu kutub Utara dan Selatan rotor) harus diketahui secara tepat memberi energi pada satu set belitan stator tertentu.

Sensor Posisi, yang biasanya merupakan Sensor Hall (yang bekerja berdasarkan prinsip Hall Effect) umumnya digunakan untuk mendeteksi posisi rotor dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Karena pergantian motor BLDC dikendalikan secara elektronik, belitan stator harus diberi energi secara berurutan untuk memutar motor. Sebelum memberi energi pada belitan stator tertentu, pengakuan posisi rotor diperlukan. Jadi sensor Hall Effect yang tertanam di stator merasakan posisi rotor. Sebagian besar Motor BLDC menggunakan tiga Sensor Hall yang tertanam ke dalam stator untuk merasakan posisi rotor.

Sensor hall memberikan informasi untuk menyinkronkan eksitasi angker stator dengan posisi rotor. Setiap sensor menghasilkan sinyal Rendah dan Tinggi setiap kali kutub rotor lewat di dekatnya. Urutan pergantian yang tepat ke belitan stator dapat ditentukan berdasarkan kombinasi respons ketiga sensor ini. Gambar 11.11 menunjukkan posisi sensor di motor BLDC.



Gambar 11.11. Sensor Hall.

(Sumber : [https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/images/white-papers/connecting-brushless-dc-motors-to-electronic-controllers/figure\\_1.jpg?revision=f42d675f-a2b8-4595-bed1-bb346acf9d9c&la=en&hash=B218C5568753B22608151E04ED9DD172](https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/images/white-papers/connecting-brushless-dc-motors-to-electronic-controllers/figure_1.jpg?revision=f42d675f-a2b8-4595-bed1-bb346acf9d9c&la=en&hash=B218C5568753B22608151E04ED9DD172) )

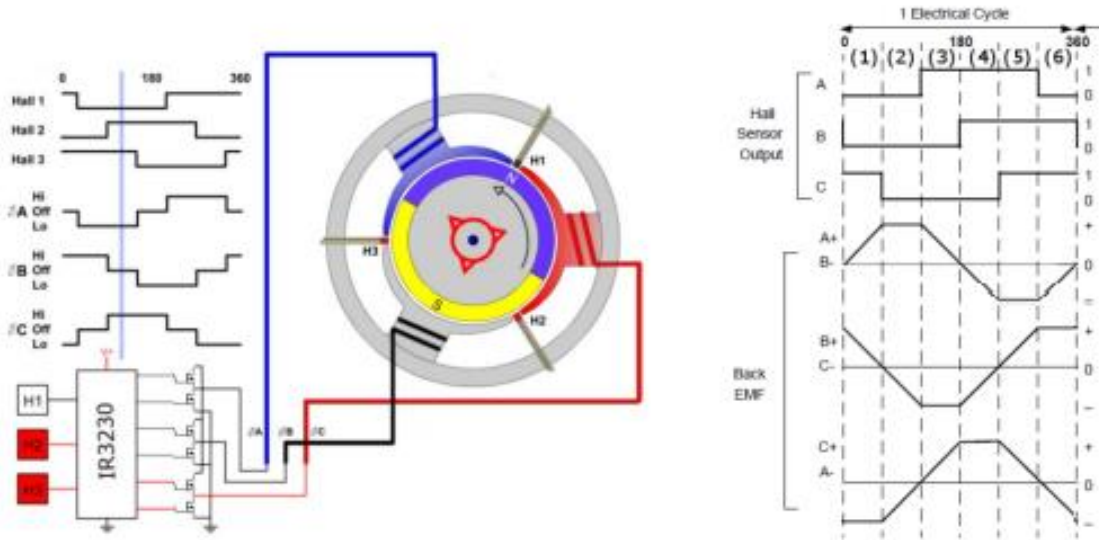
Secara umum, semua algoritma kontrol yang dirancang untuk mesin sinkron dengan belitan terkonsentrasi juga dapat diterapkan pada motor BLDC. Berikut ini, algoritma kontrol yang paling umum.

### 1) Kontrol trapesium atau komutasi blok

Juga dikenal sebagai kontrol enam langkah, kontrol trapesium adalah algoritma yang paling sederhana. Untuk masing-masing dari enam langkah pergantian (dalam mesin tiga fase), jalur arus terbentuk di antara sepasang belitan, meninggalkan belitan ketiga terputus. Metode ini menghasilkan riak torsi tinggi, yang mengarah ke getaran, kebisingan, dan kinerja yang lebih buruk dibandingkan dengan algoritma lain.

Berbeda dengan mesin sinkron umum (yang dikendalikan dengan tegangan gelombang sinus), secara tradisional motor BLDC dikendalikan dengan tegangan berbentuk blok (arus berbentuk trapesium). Pada Gambar 11.10., skema kontrol tipikal ditampilkan. Motor BLDC tiga fase memiliki tiga Sensor Hall (H1 hingga H3), yang bertindak sebagai sensor posisi dan dalam kasus motor BLDC juga sebagai sinyal switching (ditunjukkan sebagai "Hall 1", "Hall 2" dan "Hall 3" pada Gambar 7).

Segera setelah rotor melewati Sensor Hall, pengontrol mengalihkan tegangan DC ke fase berikutnya ("A", "B" atau "C"). Oleh karena itu, algoritma kontrol agak sederhana dan hanya membutuhkan mikrokontroler ringan untuk eksekusi algoritmik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.12, tegangan memiliki bentuk persegi panjang. Bentuk tegangan persegi panjang ini menghasilkan arus trapesium dan bentuk emf belakang pada mesin.



Gambar 11.12. Kontrol motor BLDC dengan Sensor Hall (kiri), output Sensor Hall yang patut dicontoh dan bentuk gelombang emf belakang (kanan).

(Sumber : (Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss, Dr. Clemens Müller, 2019))

Kerugian dari pergantian blok adalah bahwa karena peralihan diskrit antara fase, medan stator dan rotor tidak selalu tegak lurus satu sama lain. Ini menghasilkan torsi yang lebih rendah daripada yang dapat dicapai dengan kontrol lain.

Selanjutnya, pergantian blok menyebabkan riak torsi dengan enam kali (pada mesin tiga fase) frekuensi frekuensi putar listrik motor. Hal ini menyebabkan getaran dan kebisingan akustik yang mengganggu. Terutama pada kecepatan rendah motor tidak akan berputar secara seragam. Inilah sebabnya mengapa pergantian blok tidak cocok untuk aplikasi putaran lambat (kurang dari 10% dari kecepatan nominal nN).

## 2) Kontrol sinusoidal

Juga dikenal sebagai pergantian tegangan-ke-frekuensi, kontrol sinusoidal mengatasi banyak masalah yang disebabkan oleh kontrol trapesium. Ini memasok arus yang bervariasi (sinusoidal) ke tiga belitan eksitasi, sehingga mengurangi riak torsi dan mengarah ke rotasi yang halus. Namun, arus yang bervariasi waktu ini dikontrol menggunakan regulator PI dasar, yang menyebabkan kinerja buruk pada kecepatan yang lebih tinggi.

"Bentuk energi optimal adalah pergantian sinusoidal, di mana setiap belitan motor ditenagai dengan gelombang sinus yang digeser 120°, menghasilkan medan magnet stator yang terus berputar dengan kekuatan kendala. Namun, jika terjadi perubahan beban antara dua sensor aula, gelombang sinus tidak dapat disesuaikan, sehingga mengakibatkan posisi medan magnet yang salah. Ini hanya dapat diperbaiki dengan sinyal sensor hall berikutnya. Oleh karena itu, pergantian sinusoidal idealnya membutuhkan sistem resolusi yang lebih tinggi untuk menentukan posisi rotor. Biasanya, ini terdiri dari encoder optik atau magnetik yang menentukan posisi rotor dengan presisi yang cukup setiap saat dan menyesuaikan arus dengan demikian."

## 3) Kontrol berorientasi lapangan (FOC)

Juga dikenal sebagai kontrol vektor, FOC memberikan efisiensi yang lebih baik pada kecepatan yang lebih tinggi daripada kontrol sinusoidal. Ini juga menjamin efisiensi yang dioptimalkan bahkan selama operasi sementara dengan mempertahankan fluks stator dan rotor dengan sempurna. FOC juga memberikan kinerja yang lebih baik pada perubahan beban dinamis jika dibandingkan dengan semua teknik lainnya. (untuk informasi selengkapnya lihat bagian "Kontrol mesin sinkron")

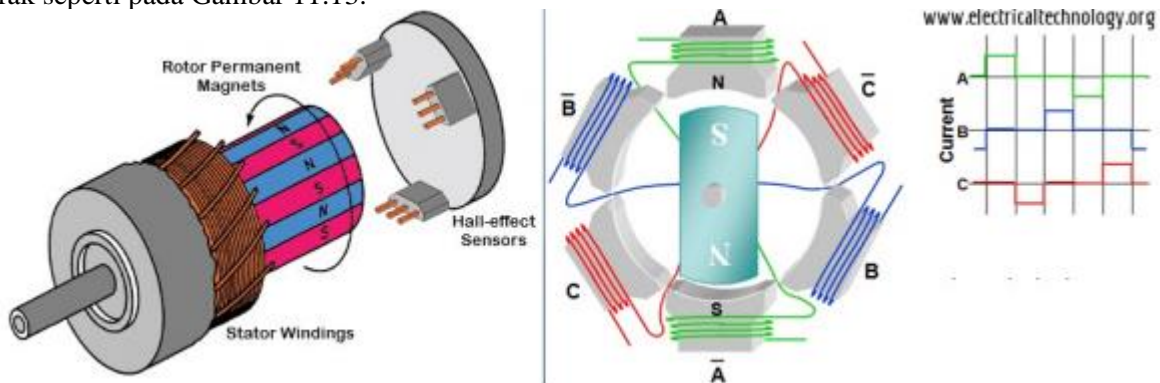
#### 4) Kontrol tanpa sensor

Alih-alih menggunakan sensor pada stator (atau encoder pada rotor), emf belakang dapat diukur dan digunakan untuk menentukan posisi rotor dan oleh karena itu sinyal switching dari semua fase. Bagaimana output sensor aula dan kecocokan emf belakang ditunjukkan pada Gambar 2 di sebelah kanan. Jelas bahwa posisi switching dapat ditentukan ketika emf belakang diketahui. Jenis kontrol tanpa sensor ini cukup sederhana. Metode yang lebih canggih untuk menentukan posisi rotor dimungkinkan di mana misalnya arus diukur. Inti dari jenis sistem ini adalah model motor yang tepat, yang digunakan secara paralel dengan motor nyata dan menghitung nilai kontrol yang diharapkan. Nilai kontrol yang diharapkan kemudian dibandingkan dengan kuantitas yang diukur. "Hasilnya adalah 'encoder virtual' yang memberikan informasi posisi dan kecepatan, dimulai pada kecepatan minimum tertentu, dengan presisi yang sama dengan encoder optik atau magnetik yang sebenarnya."

"Kesamaan kedua metode tanpa sensor, adalah bahwa tidak ada informasi tentang posisi rotor yang tersedia saat idle, sehingga diperlukan metode startup khusus. Mirip dengan motor stepper, motor dioperasikan dalam mode terkontrol untuk beberapa siklus pergantian sampai mencapai kecepatan yang diperlukan dan pengukuran tanpa sensor dapat menentukan posisi rotor."

## 11.6 Prinsip Kerja Motor BLDC

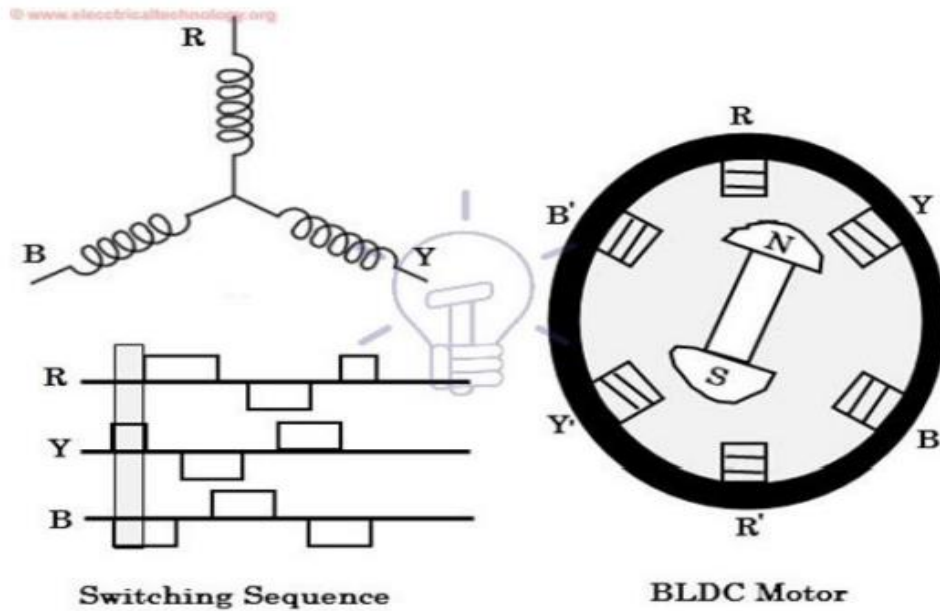
Motor BLDC bekerja berdasarkan prinsip yang mirip dengan motor DC konvensional, yaitu hukum yang menyatakan bahwa setiap kali konduktor pembawa arus ditempatkan di medan magnet ia mengalami gaya. Sebagai konsekuensi dari gaya reaksi, magnet akan mengalami gaya yang sama dan berlawanan. Dalam kasus motor BLDC, konduktor pembawa arus diam sementara magnet permanen bergerak seperti pada Gambar 11.13.



Gambar 11.13. Konstruksi, prinsip kerja & pengoperasian Motor BLDC (Brushless DC Motor).  
(Sumber : [https://sklc-tinymce-2021.s3.amazonaws.com/2020/09/mceclip2\\_1600882679.png](https://sklc-tinymce-2021.s3.amazonaws.com/2020/09/mceclip2_1600882679.png))

Ketika kumparan stator dialihkan secara elektrik oleh sumber pasokan, itu menjadi elektromagnet dan mulai menghasilkan medan seragam di celah udara. Meskipun sumber pasokannya adalah DC, switching membuat untuk menghasilkan bentuk gelombang tegangan AC dengan bentuk trapesium. Karena kekuatan interaksi antara stator elektromagnet dan rotor magnet permanen, rotor terus berputar. Gambar 11.14 menjelaskan mengenai stator motor berdasarkan keadaan peralihan yang berbeda.





Gambar 11.14. Stator motor berdasarkan keadaan peralihan yang berbeda.  
 (Sumber : [https://sklc-tinymce-2021.s3.amazonaws.com/2020/09/mceclip3\\_1600882696.png](https://sklc-tinymce-2021.s3.amazonaws.com/2020/09/mceclip3_1600882696.png))

Dengan peralihan belitan sebagai sinyal Tinggi dan Rendah, belitan yang sesuai berenergi sebagai kutub Utara dan Selatan. Rotor magnet permanen dengan kutub Utara dan Selatan sejajar dengan kutub stator yang menyebabkan motor berputar. Amati bahwa motor menghasilkan torsi karena perkembangan gaya tarik-menarik (ketika penyelarasan Utara-Selatan atau Selatan-Utara) dan gaya tolakan (ketika penyelarasan Utara-Utara atau Selatan-Selatan). Dengan cara ini motor bergerak searah jarum jam.

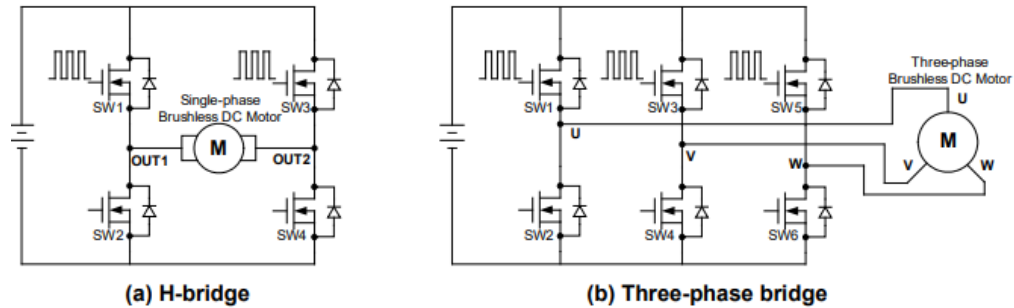
Di sini, orang mungkin mendapatkan pertanyaan bahwa bagaimana kita tahu kumparan stator mana yang harus diberi energi dan kapan harus melakukannya. Ini karena; putaran terus menerus motor tergantung pada urutan peralihan di sekitar kumparan. Seperti dibahas di atas bahwa sensor Hall memberikan umpan balik posisi poros ke unit pengontrol elektronik.

Berdasarkan sinyal dari sensor ini, pengontrol memutuskan kumparan tertentu untuk diberi energi. Sensor efek hall menghasilkan sinyal tingkat Rendah dan Tinggi setiap kali kutub rotor lewat di dekatnya. Sinyal-sinyal ini menentukan posisi poros.

### 11.6.1 Kontrol Motor DC Brushless

#### 1) Konfigurasi Switch dan PWM

Motor DC brushless menggunakan sakelar listrik untuk mewujudkan pergantian arus, dan dengan demikian terus memutar motor. Sakelar listrik ini biasanya dihubungkan dalam struktur jembatan-H untuk motor BLDC fase tunggal, dan struktur jembatan tiga fase untuk motor BLDC tiga fase yang ditunjukkan pada Gambar 11.15. Biasanya sakelar sisi tinggi dikontrol menggunakan modulasi lebar pulsa (PWM), yang mengubah tegangan DC menjadi tegangan termodulasi, yang dengan mudah dan efisien membatasi arus startup, kecepatan kontrol, dan torsi. Umumnya, meningkatkan frekuensi switching meningkatkan kerugian PWM, meskipun menurunkan frekuensi switching membatasi bandwidth sistem dan dapat meningkatkan pulsa arus riak ke titik-titik di mana mereka menjadi destruktif atau mematikan driver motor BLDC.



Gambar 11.15 Sirkuit pengemudi listrik  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))

## 2) Prinsip Pergantian Elektronik

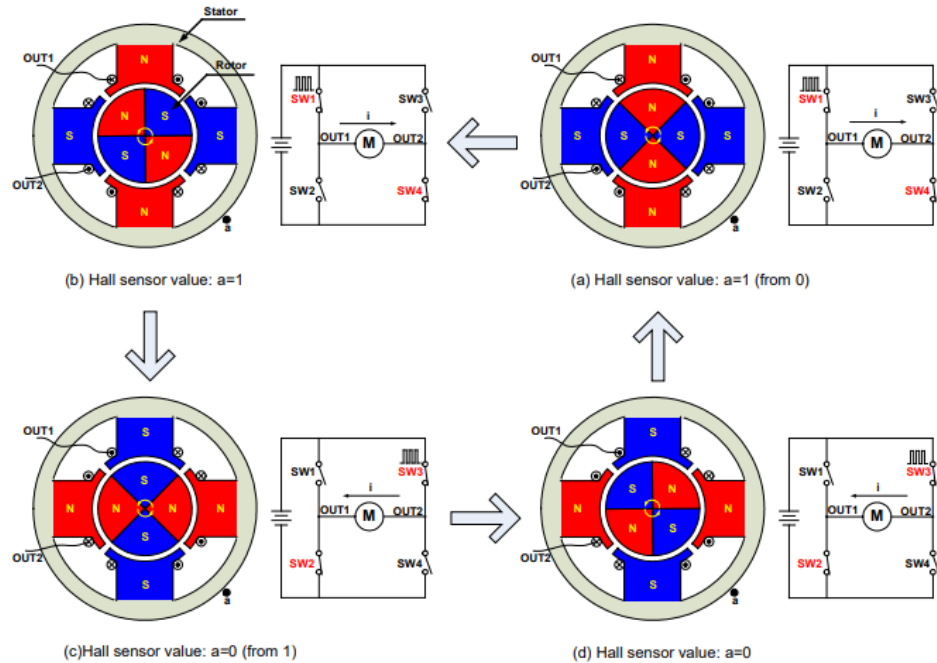
### a) Motor BLDC Fase Tunggal

Pergantian BLDC bergantung pada umpan balik pada posisi rotor untuk memutuskan kapan harus memberi energi pada sakelar yang sesuai untuk menghasilkan torsi terbesar. Cara termudah untuk mendeteksi posisi secara akurat adalah dengan menggunakan sensor posisi. Perangkat sensor posisi yang paling populer adalah sensor Hall. Sebagian besar motor BLDC memiliki sensor Hall yang tertanam ke dalam stator pada ujung motor yang tidak bisa dikendarai.

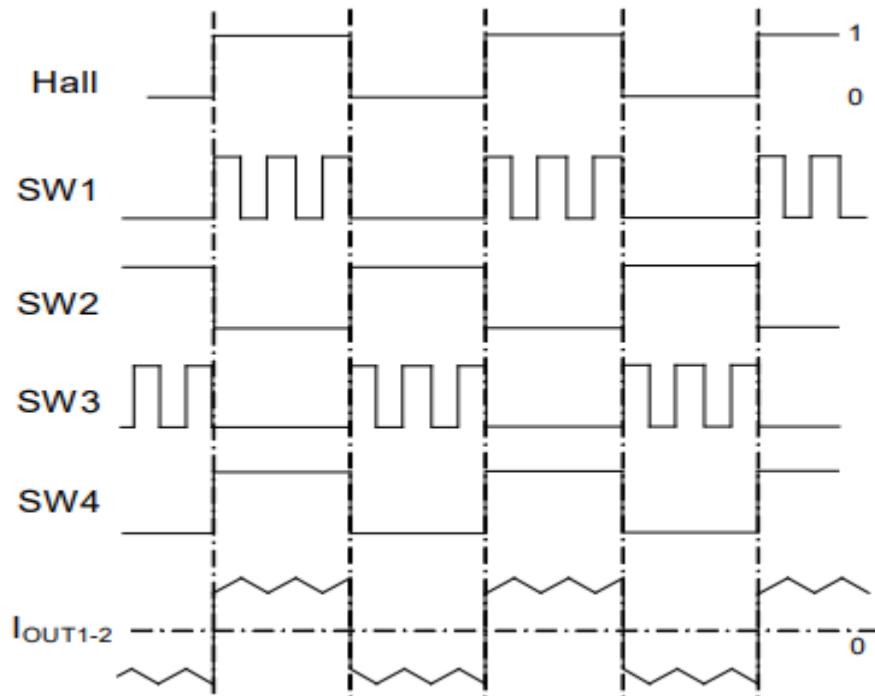
Gambar 11.16 menunjukkan urutan pergantian sirkuit pengemudi motor BLDC fase tunggal. Magnet permanen membentuk rotor dan terletak di dalam stator. Sensor posisi Hall ("a") dipasang ke stator luar, yang menginduksi tegangan output yang sebanding dengan intensitas magnetik (asumsikan sensor menjadi HIGH ketika Kutub Utara rotor lewat, dan menjadi LOW ketika Kutub Selatan rotor lewat). SW1 dan SW4 menyala saat output sensor Hall HIGH, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.14(a) dan (b). Pada tahap ini, arus angker mengalir melalui belitan stator dari OUT1 ke OUT2 dan menginduksi kutub elektromagnetik stator alternatif yang sesuai. Gaya magnet yang dihasilkan oleh medan magnet rotor dan medan elektromagnetik stator menyebabkan rotor berputar. Setelah sinyal rotor mencapai  $180^\circ$ , tegangan output Hall berbalik karena kedekatannya dengan Kutub Selatan. SW2 dan SW3 kemudian menyala dengan pembalikan saat ini dari OUT2 ke OUT1, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.16(c) dan (d). Kutub magnet stator yang berlawanan menginduksi rotor untuk terus berputar ke arah yang sama.

Gambar 11.17 menunjukkan contoh sinyal sensor Hall sehubungan dengan sinyal penggerak sakelar dan arus angker. Arus angker menunjukkan bentuk gelombang gigi gergaji karena kontrol PWM. Tegangan yang diberikan, frekuensi switching, dan siklus tugas PWM adalah tiga parameter utama untuk menentukan kecepatan dan torsi motor.





Gambar 11.16 Urutan Pergantian Motor BLDC Fase Tunggal  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))



Gambar 11.17 Sensor Motor BLDC Fase Tunggal versus Waktu Drive  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))

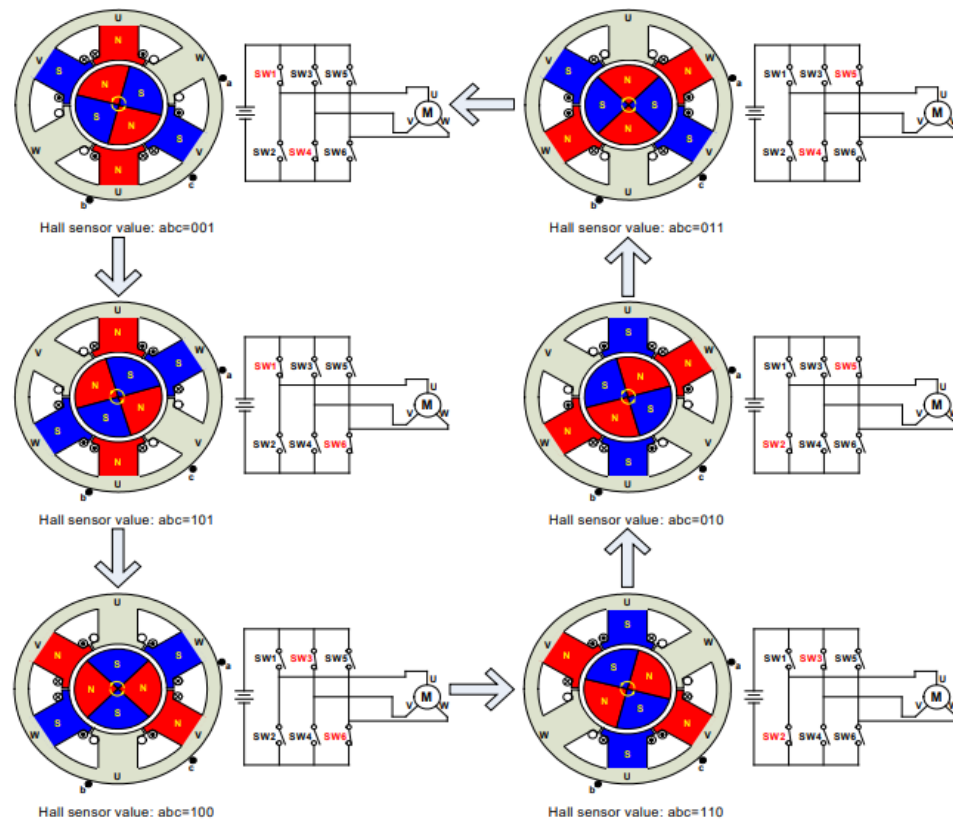
**b) Motor BLDC Tiga Fase**

Motor BLDC tiga fase membutuhkan tiga sensor Hall untuk mendeteksi posisi rotor. Berdasarkan posisi fisik sensor Hall, ada dua jenis output: pergeseran fase  $60^\circ$

dan pergeseran fase  $120^\circ$ . Menggabungkan ketiga sinyal sensor Hall ini dapat menentukan urutan komunikasi yang tepat.

Gambar 11.18 menunjukkan urutan pergantian sirkuit pengemudi motor BLDC tiga fase untuk putaran berlawanan arah jarum jam. Tiga sensor Hall—"a," "b," dan "c"—dipasang pada stator pada interval  $120^\circ$ , sedangkan belitan tiga fase berada dalam formasi bintang. Untuk setiap rotasi  $60^\circ$ , salah satu sensor Hall mengubah statusnya; dibutuhkan enam langkah untuk menyelesaikan seluruh siklus listrik. Dalam mode sinkron, peralihan arus fase diperbarui setiap  $60^\circ$ . Untuk setiap langkah, ada satu terminal motor yang digerakkan tinggi, terminal motor lain digerakkan rendah, dengan yang ketiga dibiarkan mengambang. Kontrol drive individual untuk pengemudi tinggi dan rendah memungkinkan drive tinggi, drive rendah, dan drive mengambang di setiap terminal motor.

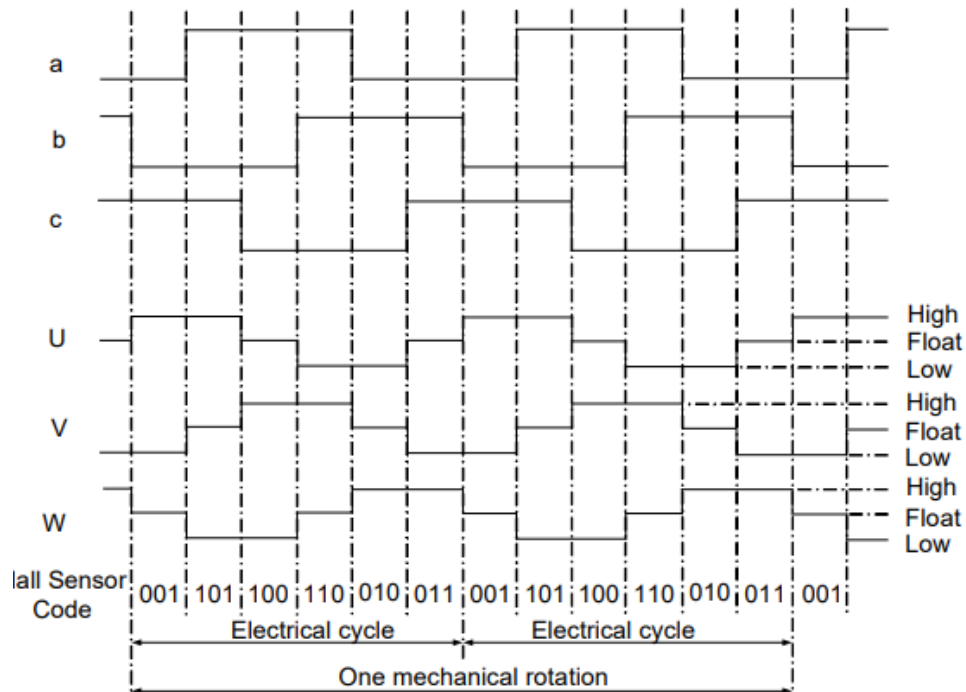
Namun, satu siklus sinyal mungkin tidak sesuai dengan revolusi mekanis yang lengkap. Jumlah siklus sinyal untuk menyelesaikan rotasi mekanis ditentukan oleh jumlah pasangan kutub rotor. Setiap pasangan tiang rotor membutuhkan satu siklus sinyal dalam satu rotasi mekanis. Jadi, jumlah siklus sinyal sama dengan pasangan kutub rotor.



Gambar 11.18 Urutan Pergantian Motor BLDC Tiga Fase  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))

Gambar 11.19 menunjukkan diagram waktu di mana belitan fase—U, V, dan W—diberi energi atau melayang berdasarkan sinyal sensor Hall a, b, dan c. Ini adalah contoh sinyal sensor Hall yang memiliki pergeseran fase  $120^\circ$  sehubungan satu sama lain, di mana motor berputar berlawanan arah jarum jam. Menghasilkan sinyal Hall dengan pergeseran fase  $60^\circ$  atau memutar motor searah jarum jam

membutuhkan urutan waktu yang berbeda. Untuk memvariasikan kecepatan rotasi, gunakan sinyal modulasi lebar pulsa pada sakelar pada frekuensi yang jauh lebih tinggi daripada frekuensi rotasi motor. Umumnya, frekuensi PWM harus setidaknya 10 kali lebih tinggi dari frekuensi rotasi motor maksimum. Keuntungan lain dari PWM adalah bahwa jika tegangan bus DC jauh lebih tinggi daripada tegangan pengenal motor, sehingga membatasi siklus tugas PWM untuk memenuhi tegangan pengenal motor mengontrol motor.



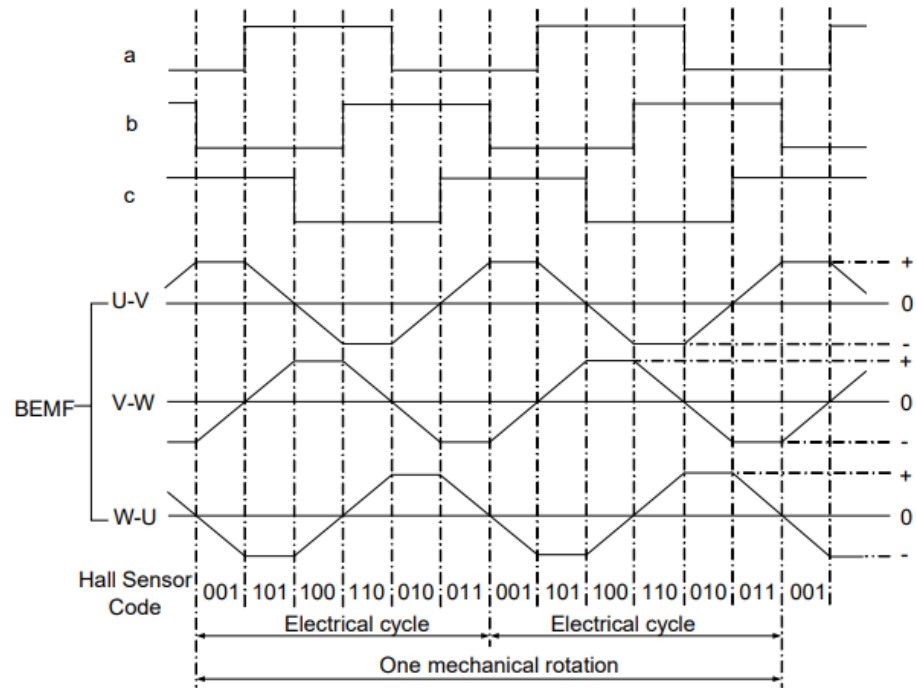
Gambar 11.19 Sensor motor BLDC tiga fase versus waktu berkendara  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))

### c) Kontrol Motor BLDC Sensorless

Namun, sensor tidak dapat digunakan dalam aplikasi di mana rotor berada dalam rumah tertutup dan membutuhkan entri listrik minimal, seperti kompresor atau aplikasi di mana motor direndam dalam cairan. Oleh karena itu, driver tanpa sensor BLDC memantau sinyal BEMF alih-alih posisi yang terdeteksi oleh sensor Hall untuk mengubah sinyal. Hubungan antara output sensor dan BEMF ditunjukkan pada Gambar 11.20. Sinyal sensor berubah keadaan ketika polaritas tegangan BEMF bersilangan dari positif ke negatif atau dari negatif ke positif. Penyeberangan nol BEMF menyediakan data yang tepat untuk pergantian.

Namun, karena BEMF sebanding dengan kecepatan rotasi, ini menyiratkan bahwa motor membutuhkan kecepatan minimum untuk umpan balik yang tepat. Jadi dalam kondisi kecepatan yang sangat rendah seperti start-up detektor tambahan seperti loop terbuka atau amplifier BEMF diperlukan untuk mengontrol motor (Ini di luar cakupan catatan aplikasi ini).

Pergantian tanpa sensor dapat menyederhanakan struktur motor dan menurunkan biaya motor. Aplikasi di lingkungan berdebu atau berminyak yang hanya memerlukan pembersihan sesekali, atau di mana motor umumnya tidak dapat diakses, mendapat manfaat dari komunikasi tanpa sensor.



Gambar 11.20 Sensor Aukla versus BEMF.  
(Sumber : (Zhao and Yangwei, 2011))

## 11.7 Keuntungan dan Kerugian Motor BLDC

### a) Keuntungan Motor BLDC

Motor BLDC dikomandoi secara elektrik oleh sakelar daya alih-alih sikat. Dibandingkan dengan motor DC yang disikat atau motor induksi, motor BLDC memiliki banyak keunggulan:

- Efisiensi dan keandalan yang lebih tinggi
- Kebisingan akustik yang lebih rendah
- Lebih kecil dan lebih ringan
- Respons dinamis yang lebih besar
- Karakteristik kecepatan versus torsi yang lebih baik
- Rentang kecepatan yang lebih tinggi
- Umur lebih panjang
- Ini tidak memiliki komutator mekanis dan masalah terkait
- Efisiensi tinggi karena penggunaan rotor magnet permanen
- Kecepatan operasi yang tinggi bahkan dalam kondisi yang dimuat dan dibongkar karena tidak adanya sikat yang membatasi kecepatan
- Geometri motor yang lebih kecil dan bobotnya lebih ringan daripada motor DC tipe dan AC induksi yang disikat
- Umur panjang karena tidak diperlukan inspeksi dan pemeliharaan untuk sistem komutator
- Respons dinamis yang lebih tinggi karena inersia rendah dan membawa belitan di stator
- Lebih sedikit interferensi elektromagnetik
- Cukup operasi (atau kebisingan rendah) karena tidak adanya kuas

**b) Kekurangan BLDC Motor**

Berikut kerugian dari penggunaan Motor BLDC :

- Motor-motor ini mahal
- Pengontrol elektronik yang diperlukan kontrol motor ini mahal
- Tidak banyak ketersediaan banyak solusi kontrol elektronik terintegrasi, terutama untuk motor BLDC kecil
- Membutuhkan sirkuit drive yang kompleks
- Perlunya sensor tambahan

**Soal**

- 1) Apa perbedaan yang mendasar antara mesin DC Konvensional dengan mesin Brushless DC ?
- 2) Sebutkan algoritma control yang diterapkan pada motor BLDC?
- 3) Apa fungsi sensor Hall pada motor BLDC ? dan mengapa sangat penting untuk motor BLDC?
- 4) Bagaimana prinsip kerja motor BLDC ?
- 5) Jelaskan hubungan antara torsi, kecepatan dan daya yang terjadi pada motor BLDC ?

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Dai, M. Dong, R. Ye, A. Ma, and W. Yang, "A review on electric vehicles and renewable energy synergies in smart grid," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016-Sept, no. Ciced 2016, pp. 10–13, 2016.
- [2] G. R. C. Mouli, P. Van Duijsen, F. Grazian, A. Jamodkar, P. Bauer, and O. Isabella, "Sustainable e-bike charging station that enables ac, dc and wireless charging from solar energy," *Energies*, vol. 13, no. 14, 2020.
- [3] S. K. Gill, K. Vu, and C. Aimone, "Quantifying fossil fuel savings from investment in renewables and energy storage," *2017 Saudi Arab. Smart Grid Conf. SASG 2017*, pp. 1–6, 2018.
- [4] M. R. Rahmatian, H. Abdi, S. Rezaei, and H. Rahimzadeh, "Demand side management and charging and discharging for multiple PHEVs to reduce cost and reduce fossil fuel using game theory in smart grid," *2015 IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2015 - Conf. Proc.*, pp. 128–132, 2015.
- [5] J. W. Bose, A. Concordia, C. Dunlop, R. D. Fouad, A. A. Kundur, P. Schulz, R. P. Anderson, P. M. Robb, D. D. Lamont, "PROPOSED TERMS & DEFINITIONS FOR POWER SYSTEM STABILITY," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 7, pp. 1894–1898, 1982.
- [6] B. P. D. P. TEKNOLOGI, *Outlook Energi Indonesia 2014*, no. 1. 2014.
- [7] R. A. Hanifah, S. F. Toha, S. Ahmad, and M. K. Hassan, "Swarm-Intelligence Tuned Current Reduction for Power-Assisted Steering Control in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 7202–7210, 2018.
- [8] A. Gaurav and A. Gaur, "Modelling of Hybrid Electric Vehicle Charger and Study the Simulation Results," *2020 Int. Conf. Emerg. Front. Electr. Electron. Technol. ICEFEET 2020*, pp. 2–7, 2020.
- [9] J. Domínguez-Navarro, JA; Dufo-López, R; Yusta-Loyo, "Electrical Power and Energy Systems Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, no. August 2018, pp. 46–58, 2019.
- [10] S. S. Babu and A. Suresh, "Current Programmed Controlled DC-DC Converter for Emulating the Road Load in Six Phase Induction Motor Drive in Electric Vehicle," *2020 IEEE Int. Conf. Power Electron. Renew. Energy Appl. PEREA 2020*, 2020.
- [11] Y. Ma, S. Lv, X. Zhou, and Z. Gao, "Review Analysis of Voltage Stability in Power System," *IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.*, pp. 7–12, 2017.
- [12] P. Kundur *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [13] A. Sabir and M. Kassas, "A novel and simple hybrid fuzzy/pi controller for brushless dc motor drives," *Automatika*, vol. 56, no. 4, pp. 424–435, 2015.
- [14] C. M. Rahul Charles and J. S. Savier, "Bidirectional DC-DC converter fed BLDC motor in electric vehicle," *Proc. 2021 1st Int. Conf. Adv. Electr. Comput. Commun. Sustain. Technol. ICAECT 2021*, 2021.

- [15] M. F. Bhuiyan, M. Rejwan Uddin, Z. Tasneem, M. Hasan, and K. M. Salim, "Design, Code Generation and Simulation of a BLDC Motor Controller using PIC Microcontroller," *2018 Int. Conf. Recent Innov. Electr. Electron. Commun. Eng. ICRIEECE 2018*, pp. 1427–1431, 2018.
- [16] R. V. A. Krishnan, N. Tomson, C. S. A. John, and S. Navya, "A microcontroller based five phase BLDC motor drive," *Proceeding IEEE Int. Conf. Green Comput. Commun. Electr. Eng. ICGCCEE 2014*, pp. 1–6, 2014.
- [17] Y. K. Lee, "Commutation Torque Ripple Minimization for Three Phase BLDC Motor Drive using A Simple PWM Scheme Reliable to Motor Parameter Variation," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2019-Decem, no. 11, pp. 4–7, 2019.
- [18] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," *AIN SHAMS Eng. J.*, 2016.
- [19] S. Lin and S. Wang, "Condition Monitoring of BLDC Motor Drive Systems by Hilbert Huang Transform," no. 1, 2015.
- [20] I. Anshory, I. Robandi, and Wirawan, "Monitoring and optimization of speed settings for Brushless Direct Current (BLDC) using Particle Swarm Optimization (PSO)," in *Proceedings - 2016 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2016*, 2016.
- [21] S. George, R. V. Chacko, and S. K., "Modelling and simulation of Electric Vehicle Power train in SEQUEL," *IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst.*, 2014.
- [22] S. E. Mokhlis, S. Sadki, and B. Bensassi, "System Identification of a DC Servo Motor Using ARX and ARMAX Models," *Proc. - 2019 4th Int. Conf. Syst. Collab. Big Data, Internet Things Secur. SysCoBioTS 2019*, pp. 1–4, 2019.
- [23] A. A. Portillo, M. Frye, and C. Qian, "Particle swarm optimization for PID tuning of a BLDC motor," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009*, 2009, pp. 3917–3922.
- [24] A. Ali, S. F. Ahmed, K. A. Kadir, M. K. Joyo, and R. N. S. Yarooq, "Fuzzy PID controller for upper limb rehabilitation robotic system," *2018 IEEE Int. Conf. Innov. Res. Dev. ICIRD 2018*, no. May, pp. 1–5, 2018.
- [25] A. Varshney, D. Gupta, and B. Dwivedi, "Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 310–321, 2017.
- [26] M. A. Ibrahim, A. K. Mahmood, and N. S. Sultan, "Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 822–830, 2019.
- [27] C.-T. Chao, N. Sutarna, J.-S. Chiou, and C.-J. Wang, "Equivalence between Fuzzy PID Controllers and Conventional PID Controllers," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 6, p. 513, 2017.
- [28] V. K. R. Singh Patel and A. K. Pandey, "Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–14, 2013.

- [29] O. Aguilar-Mejia, H. Minor-Popocalt, and R. Tapia-Olvera, "Parameter tuning of a PID controller with reactive bio-inspired for PMSM," *2018 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2018*, no. Ropec, 2019.
- [30] S. Y. Chen, B. C. Yang, T. A. Pu, C. H. Chang, and R. C. Lin, "Active Current Sharing of a Parallel DC-DC Converters System Using Bat Algorithm Optimized Two-DOF PID Control," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84757–84769, 2019.
- [31] S. Mondal, A. Mitra, and M. Chattopadhyay, "Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control," *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Technol. ICECCT 2015*, 2015.
- [32] N. Castelo Damasceno and O. Gabriel Filho, "PI controller optimization for a heat exchanger through metaheuristic Bat Algorithm, Particle Swarm Optimization, Flower Pollination Algorithm and Cuckoo Search Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 9, pp. 1801–1807, 2017.
- [33] D. Paliwal and D. K. Sambariya, "A Novel Control Approach for buck converter based PMBLDC motor using BAT algorithm," *Proc. 4th Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol. ICECA 2020*, pp. 159–164, 2020.
- [34] H. Jigang, F. Hui, and W. Jie, "A PI controller optimized with modified differential evolution algorithm for speed control of BLDC motor," vol. 60, no. 2, pp. 135–148, 2019.
- [35] S. Bharat, A. Ganguly, R. Chatterjee, S. Member, B. Basak, and D. Sheet, "A Review on Tuning Methods for PID Controller," *Asian J. Conver. Technol.*, vol. V, no. I, pp. 1–4, 2019.
- [36] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Z. Alam, and A. N. Nordin, "Control BLDC motor speed using PID controller," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 11, no. 3, pp. 477–481, 2020.
- [37] A. Usman and B. S. Rajpurohit, "Speed control of a BLDC Motor using Fuzzy Logic Controller," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, pp. 1–6, 2017.
- [38] S. K. Singh, N. Katal, and S. G. Modani, "Optimization of PID Controller for Brushless DC Motor by using Bio-inspired Algorithms 1," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 7, pp. 1302–1308, 2014.
- [39] R. Arulmozhiyal, "An Intelligent Speed Controller for Brushless DC Motor," *Ind. Electron. Appl. (ICIEA), 2012 7th IEEE Conf.*, pp. 16–21, 2011.



## BIODATA PENULIS



**Dr. Izza Anshory, ST, MT.** lahir di Ponorogo, 09 Desember 1975. Lulus Sarjana di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang, pada tahun 1999. Kemudian penulis melanjutkan jenjang studi S2 di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) pada tahun 2004 dan lulus pada tahun 2007. Selanjutnya pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi S3 di Teknik Elektor ITS Surabaya dan lulus pada tahun 2021. Penulis mengawali karirnya sebagai dosen di Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo .



**Arief Wisaksono., Ir., MM.** lahir di Ponorogo, 11 April 1968. Lulus Sarjana Pada tahun 1992, penulis mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Universitas Muhammadiyah Surabaya. Penulis melanjutkan magister manajemen tahun lulus 2010. Penulis mengawali karirnya sebagai Instruktur Komputer di Scomptec Surabaya, sebagai Technical Support PT. Surabaya Post selama hampir 10 tahun, bergabung dengan Universitas Muhammadiyah Sidoarjo sebagai Dosen di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.



**Dr. Ir. Jamaaluddin., MM.** lahir di Surabaya, 10 Oktober 1970. Lulus Sarjana Pada tahun 1993, penulis mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Universitas Brawijaya Malang. Penulis melanjutkan magister manajemen tahun lulus 2012 di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Selanjutnya pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi S3 di Teknik Elektor ITS Surabaya dan lulus pada tahun 2021. Penulis mengawali karirnya sebagai dosen di Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Sidoarjo



UMSIDA PRESS  
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo  
Jl. Mojopahit No. 666B  
Sidoarjo, Jawa Timur

ISBN 978-623-464-040-3 (PDF)

