

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu atau angin merupakan suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber untuk menghasilkan energi listrik. Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah atau dari daerah yang memiliki suhu/temperatur rendah ke daerah bersuhu tinggi¹. Dalam realitas, tenaga angin adalah bentuk tenaga surya yang dikonversi. Hal tersebut karena proses terjadinya angin dimulai karena adanya perbedaan penyinaran matahari diberbagai tempat dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Pembangkit ini mengkonversi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin.

Berdasarkan data Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) oleh DJEPT, potensi energi angin adalah 60,6 GW dan tahun 2019 kapasitas terpasang baru sekitar 154,3 MW (0,3%). Rata-rata kecepatan angin di Indonesia adalah 2-6 m/s. Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional menunjukkan wilayah yang memiliki kecepatan angin di atas 5 m/s, yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Kecepatan angin diukur dengan alat anemometer. Daerah di Indonesia memiliki kecepatan angin yang terbilang rendah dan tidak rata. PLTB dapat dibangun pada kecepatan rendah dengan memilih tipe tubin angin maupun tipe bilah yang sesuai. Hal-hal yang mempengaruhi kecepatan angin disuatu daerah adalah sebagai berikut².

1. Relief permukaan bumi

Relief yang tidak rata dapat menjadi penghambat bagi aliran angin

2. Gradien barometris

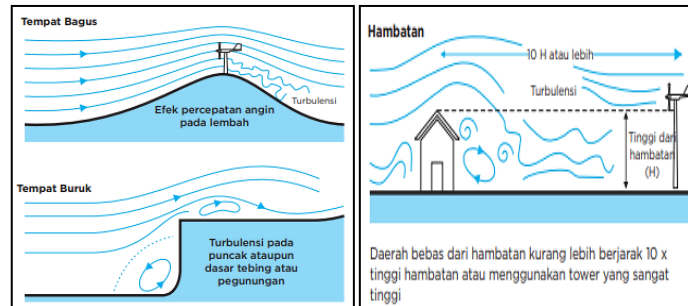
Perbedaan tekanan udara dari dua isobar yang jaraknya 111 km =. Semakin besar gradien barometrisnya, maka semakin cepat tiupan anginnya.

¹ Sudarto, Op.cit., hal 62

² Mukhammad Ulinnuha, *Faktor Yang Mempengaruhi Kecepatan Angin* (<https://tester-uji.com/>, diakses pada 19 April 2021)

3. Ketinggian tempat

Semakin tinggi lokasinya maka semakin kencang pula angin yang bertiup



Gambar 2.1 Hambatan Aliran Angin

(Sumber: Buku Panduan Energi Yang Terbarukan)

4. Panjang siang dan malam

Angin bertiup lebih cepat pada siang hari dibandingkan pada malam hari. Hal ini berkaitan dengan angin darat dan angin laut.

5. Letak lintang

Berkaitan dengan posisi matahari. Di daerah lintang tinggi sedikit mendapatkan sinar matahari sehingga suhu udaranya lebih dingin.

2.1.1 Turbin Angin

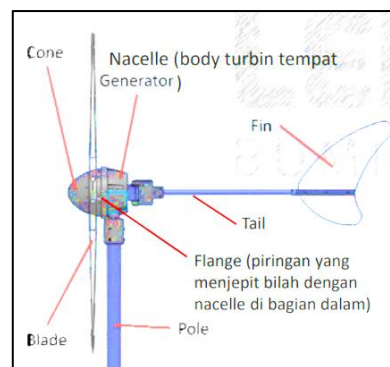
Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Prinsip kerja dari turbin angin ini yaitu menangkap angin menggunakan bilah turbin yang di desain seperti sayap pesawat terbang. Ketika angin bertiup melalui bilah tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah pada bagian bawah bilah, tekanan udara yang rendah akan menarik bilah untuk bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat ini biasanya lebih kuat dari tekanan pada depan sisi bilah, atau yang biasa disebut gaya tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan gaya tarik menyebabkan rotor berputar seperti *propeller* dan memutar generator untuk kemudian dikonversi menjadi energi listrik³.

³ Dwiyan Anugrah Ernadi, *Desain Maximum Power Point Tracking Untuk Turbin Angin Menggunakan Modified Perturb & Observe (P&o) Berdasarkan Prediksi Kecepatan Angin*, (2016), hal 18

Energi angin (*P wind*) merupakan hasil dari setengah kali masa jenis udara (ρ) dengan luas penampang sapuan bilah/*blade* (A) dan pangkat tiga dari kecepatan anginnya (V^3) sehingga dirumuskan sebagai berikut⁴.

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (2-1)$$

Berdasarkan rumus diatas, diketahui bahwa parameter yang paling signifikan adalah kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin pada daerah pembangkit energi angin tersebut maka semakin besar pula daya yang dihasilkan. Solusi untuk daerah yang memiliki kecepatan angin rendah adalah pada diameter bilah, semakin panjang diameter maka daya yang dihasilkan semakin besar.



Gambar 2.2 *Wind Turbine The Sky Dancer – 500*

(Sumber: *Lentera Energi Nusantara, 2021*)

Bagian utama dari turbin angin berupa generator (tipe generator sinkron magnet permanen/PMSG), *blade*, cone, fin, tail dan ekor. *The Sky Dancer* (TSD)-500 di PT Lentera Bumi Nusantara ini merupakan turbin angin sumbu horizontal dengan 3 *blade propeller* yang memiliki tingkat efisiensi 40%. Turbin ini mulai berputar pada kecepatan angin 2,5 m/s dan mulai memproduksi listrik pada kecepatan angin 3 m/s. Daya maksimal yang mampu di hasilkan oleh turbin angin adalah 500 Wattpeak (Wp) pada kecepatan angin di atas 12 m/s dan di atasnya. Turbin ini dapat bertahan sampai pada kecepatan angin 33 m/s⁵.

Adapun Jenis turbin angin berdasarkan gerak rotasinya ada 2 yaitu *horizontal axis wind turbine* dan *vertical axis wind turbine* yaitu sebagai berikut⁶.

⁴ Dwiyana Anugrah Ernadi, Op.cit., hal 16

⁵ Lentera Angin Nusantara, *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*, (2021), hal 15&18

⁶ Tim contained energy indonesia, *Buku Panduan Energi Yang Terbarukan*, hal 40-42

1. *Horizontal Axis Wind Turbine*

Turbin angin horisontal adalah bentuk umum pada turbin angin. Desain turbin ini mirip dengan kincir angin. Turbin angin jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* memiliki poros rotor utama dan generator listrik berada di puncaknya. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin, sedangkan turbin berukuran besar biasanya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo (M. I Umami, 2018).

Prakondisi

- a. Mulai operasikan pada saat kecepatan angin mencapai 3-5m/detik
- b. Memerlukan pemilihan lokasi yang tepat

Keuntungan

- a. Memberikan kinerja yang lebih baik pada produksi energi dibandingkan dengan turbin angin dengan sumbu vertikal
- b. Turbin angin berkapasitas 3kW menghasilkan listrik 5.000-7.000 kWh per tahun (kecepatan angin 5.4m/detik)

Kekurangan

- a. Memerlukan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk bisa memproduksi listrik
- b. Memerlukan menara yang tinggi untuk menangkap kecepatan angin yang cukup
- c. Tambahan sistem ekor (*yaw*) lebih kompleks

2. *Vertical Axis Wind Turbine*

Turbin angin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* memiliki sumbu rotor yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan menghadap angin. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta gearbox bisa ditempatkan di dekat tanah sehingga menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan.

Prakondisi

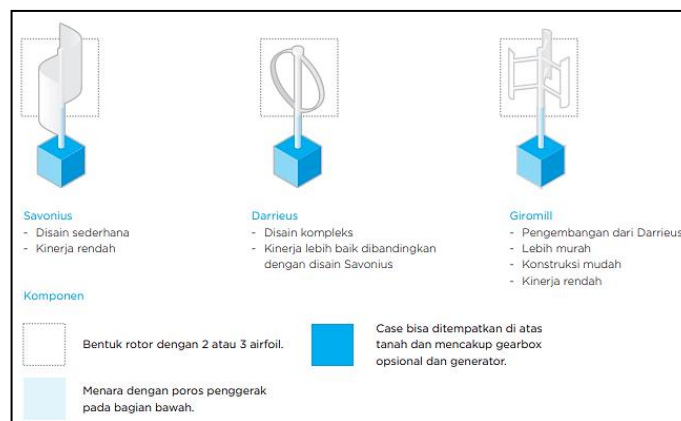
- a. Mulai beroperasi pada saat kecepatan angin mencapai 1.5-3/detik

Keuntungan

- a. Tidak perlu diarahkan ke arah angin
- b. Pemeliharaan lebih mudah dan dikenal tidak bising

Kekurangan

- a. Kinerja lebih buruk dalam memproduksi energi dibandingkan dengan turbin angin bersumbu horizontal Turbin Angin
- b. Turbin angin sumbu vertikal berkapasitas 3kW menghasilkan 2.500-6.500 kWh per tahun. (Kecepatan angin: 5,4 m/detik) tergantung desain
- c. Tidak bisa hidup sendiri, terkadang turbin angin bersumbu vertikal memerlukan motor listrik kecil untuk menghidupkannya.
- d. Kegagalan baling-baling karena aus.



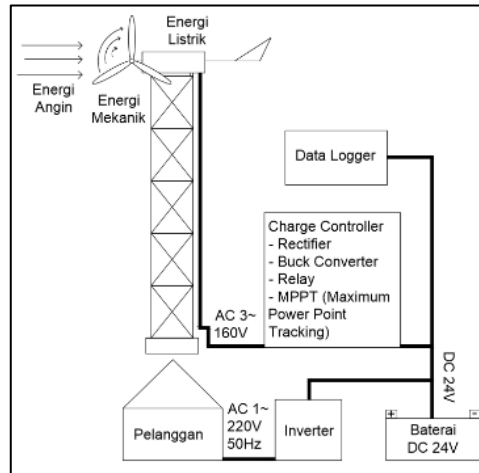
Gambar 2.3 Vertical Axis Wind Turbine

(Sumber: Buku Panduan Energi Yang Terbarukan)

2.1.2 Cara Kerja PLTB

Cara kerja PLTB dijabarkan urut seperti berikut

1. Energi kinetik, energi Angin berubah fungsi menjadi kecepatan angin yang mendorong *blade* memutar poros turbin.
2. Energi Mekanik, merupakan pemusatan energi yang terletak di sumbu poros turbin/rotor
3. Energi Listrik, putaran turbin yang di teruskan ke *Controller*, Data logger, Panel box, Batterai, Inverter, KWh meter. Energi mekanik tersebut dikonversi oleh generator untuk menghasilkan listrik.

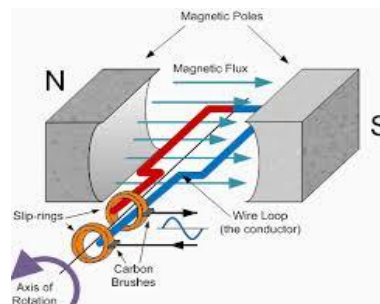


Gambar 2.4 Cara Kerja PLTB

(Sumber: *Lentera Energi Nusantara, 2021*)

2.2 Generator

Generator adalah mesin listrik dinamis yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator bolak-balik (AC) bekerja berdasarkan hukum Faraday, yaitu “Jika sebuah penghantar memotong garis-garis gaya dari suatu medan magnetik (flux) yang konstan, maka pada penghantar tersebut akan timbul tegangan.” Hukum Faraday tersebut dapat dinyatakan dengan rumus berikut⁷.



Gambar 2.5 Prinsip kerja generator (sumber: *tekniklistrik.com*)

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2-2)$$

Keterangan:

e = Gaya Gerak Listrik (volt)

ϕ = Fluks Magnet (weber)

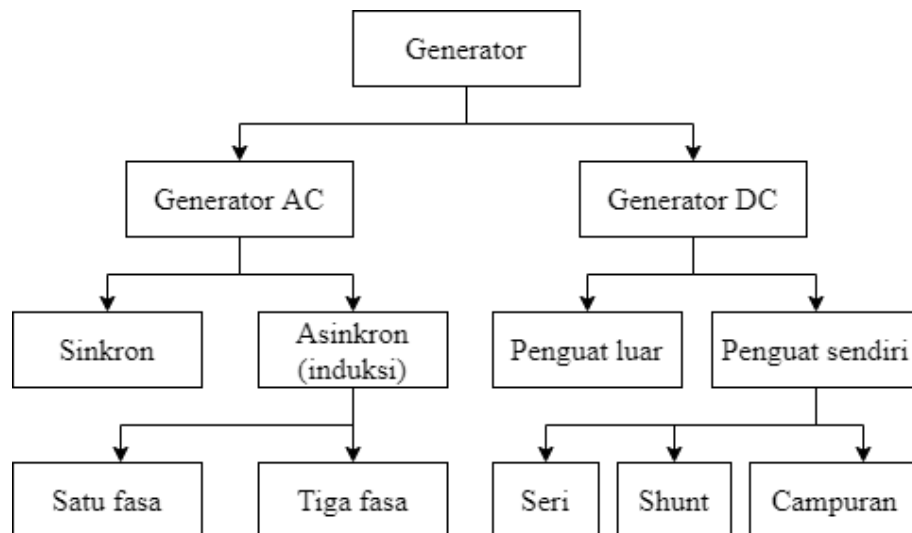
⁷ Siswoyo. *Teknik Listrik Industri Jilid 1*, (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008), hal 2-22

N = Jumlah lilitan

t = waktu (s)

Tanda (-) pada persamaan diatas merupakan hasil dari hukum Lenz yang menyatakan bahwa arah polaritas dari tegangan/ arus yang terinduksi pada kumparan akan menghasilkan arah fluks yang berlawanan dengan arah fluks yang menginduksikan tegangan tersebut.

Generator berdasarkan arusnya dibagi menjadi 2 yaitu generator AC (arus bolak-balik) dan generator DC (Arus searah). Baik generator AC dan DC memiliki 2 komponen yang sama yaitu stator dan rotor. Hanya saja desain komponen keduanya memiliki perbedaan. Pada generator AC medan magnet akan diciptakan oleh rotor sementara stator berperan sebagai konduktor yang akan menerima pergerakan elektron. Sedangkan pada generator DC magnet berperan sebagai stator dan kumparan berperan sebagai rotor⁸.



Gambar 2.6 Jenis-Jenis Generator

a. Generator sinkron

Kecepatan putar rotor dengan kutub – kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Bentuk gelombang dari tegangan yang dihasilkan disinkronkan dengan kecepatan rotor. Penerapannya pada PLTA, PLTU, PLTG, dan lain-lain.

⁸ Amrie Muchta, *Perbedaan Generator AC dan Generator DC* (<https://www.autoexpose.org/2018/07/perbedaan-generator-ac-dan-dc.html>, diakses pada 25 Maret 2021)

- b. Generator asinkron
Rotor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan lebih besar dari pada kecepatan sinkronnya. Sehingga suatu konduktor yang berputar didalam medan magnet (kumparan stator) akan membangkitkan tegangan. Frekuensi tegangan output diatur oleh sistem daya yang terhubung generator induksi. Jika generator memasok beban sendiri, maka frekuensi output akan sedikit lebih rendah. Penerapannya pada *wind turbine with gearbox* dan *hydro turbine*
- c. Generator penguat terpisah digunakan untuk meningkatkan serta elektroplating. Ini digunakan dalam tujuan daya dan pencahayaan menggunakan medan regulator
- d. Generator penguat sendiri shunt, salah satu penerapannya untuk daya serta pencahayaan biasa menggunakan regulator.
- e. Generator penguat sendiri seri, salah satu penerapannya pada lampu busur
- f. Generator penguat sendiri Campuran, salah satu penerapannya untuk menyediakan catu daya untuk mesin las DC.

2.3 Generator Sinkron

Generator sinkron banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik. generator sinkron merupakan generator yang jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub – kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Belitan atau kumparan jangkar ditempatkan pada stator sedangkan belitan medan ditempatkan pada rotor.

Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan juga berputar dengan kecepatan yang sama. Karena medan magnet putar tersebut diinduksikan pada kumparan jangkar (stator), maka pada stator muncul tegangan induksi 3 fasa dengan frekuensi elektrik yang sama (sinkron). Frekuensi elektrik yang dihasilkan generator sinkron

adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah⁹.

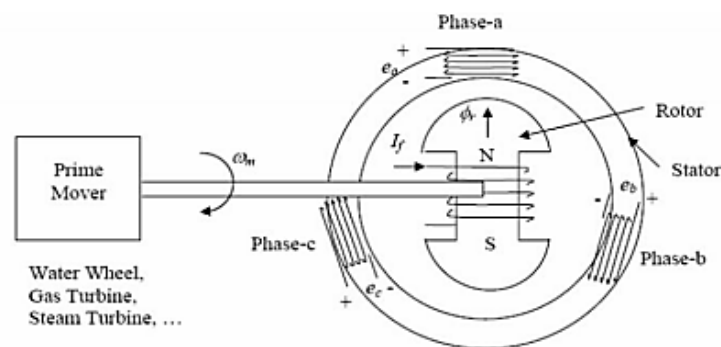
$$f = \frac{ns \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2-3)$$

dimana:

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

ns = kecepatan sinkron (rpm)



Gambar 2.7 Prinsip Kerja Generator Sinkron
(Sumber: Suad I Shahl, 2015)

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet maka persamaan di atas juga dapat digunakan untuk mencari hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik yang dihasilkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan.

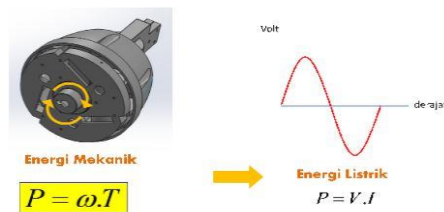
2.4 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator sinkron magnet permanen atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) adalah generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. Istilah sinkron disini merujuk pada fakta bahwa rotor dan medan magnet berputar dengan kecepatan yang sama karena medan magnet

⁹ Suad Ibrahim Shahl, *e-book Synchronous Generators*, (2015), hal.7

dihasilkan melalui magnet permanen yang terpasang pada permukaan ataupun tertanam pada rotornya.

Generator sinkron magnet permanen yang biasa dipakai pada pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) bekerja mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor (ω) yang diterimanya dari blade menjadi nilai tegangan (V) dan arus (I). Hasil keluaran dari generator ini berupa listrik AC 3 fasa¹⁰.



Gambar 2.8 Konversi energi oleh PMSG

(Sumber: Lentera Energi Nusantara, 2021)

2.5 Kelebihan dan Kekurangan Generator Sinkron Magnet Permanen

Generator sinkron magnet permanen mempunyai keuntungan secara ekonomi dan teknik, sehingga PMSG sering dipakai sebagai generator turbin angin. Keuntungannya meliputi:

2.5.1 Kelebihan

- Desain yang sederhana dan umur generator lebih awet (reliable)
- Tidak membutuhkan sumber arus listrik DC dari luar untuk membangkitkan medan magnet.
- Perubahan karakteristik efisiensi dan panas dari mesin karena tidak adanya rugi-rugi medan.
- Keandalan yang lebih tinggi karena tidak digunakannya slip rings.

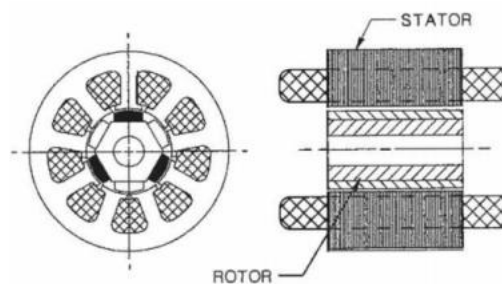
2.5.2 Kekurangan

- Tidak efisien jika menggunakan magnet permanen dengan produksi fluks magnet rendah.
- Pembangkitan daya listrik terbatas sejauh kemampuan magnet, sehingga tidak cocok digunakan dengan skala besar.

¹⁰ Lentera Angin Nusantara, Op.cit, hal 26

2.6 Kontruksi Generator Sinkron Magnet Permanen

Konstruksi generator sinkron magnet permanen sama dengan generator sinkron pada umumnya yakni terdapat stator dan rotor. Perbedaannya terdapat pada sumber eksitasi dimana generator sinkron magnet permanen menggunakan medan magnet permanen sebagai sumber eksitasi medan magnet yang menuju stator dan menggantikan sumber suplai eksternal untuk generator. Magnet permanen pada generator ini terdapat pada rotornya.

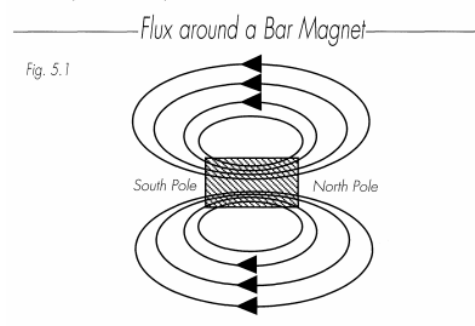


Gambar 2.9 Generator sinkron magnet permanen

(Sumber: Hendershot dkk, 1994)

2.6.1 Permanen Magnet

Sebuah magnet memiliki dua kutub, utara dan selatan. Fluks muncul dari kutub utara dan menemukan jalannya kembali ke kutub selatan¹¹ (Gambar 2.10). Berikut adalah 'sirkuit magnetik'. Fluks menyukai besi, baja, dan bahan magnetic lainnya. Fluks tidak hanya menarik mereka, tetapi jumlah fluks dalam sirkuit bias menjadi jauh lebih besar jika sirkuit tersebut terbentuk dari material tersebut.

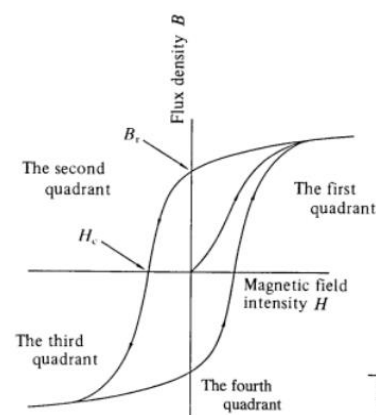


Gambar 2.10 Garis gaya magnet

(Sumber: Windpower Workshop, H. Piggott)

¹¹ Hugh Piggott, *Windpower Workshop Buliding Your Own Wind Turbine*, hal. 64

Magnet permanen merupakan material yang memiliki banyak manfaat terutama dalam bidang konversi energi, yaitu digunakan untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik maupun sebaliknya. Sehingga pengembangan material magnet permanen menjadi perhatian penting para peneliti dan akademisi untuk menghasilkan magnet dengan kualitas terbaik dan efisiensi yang tinggi dalam aplikasinya. Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada rotor merupakan medan magnet permanent yang kuat. Magnet permanen tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan disipasi daya elektrik



Gambar 2.11 Kurva histerisis magnetik

(Sumber: Kenjo Dkk, 1985)

Bahan awal magnet yang diproduksi adalah baja. Magnet yang terbuat dari baja mudah dimagnetisasi, tetapi bahan tersebut dapat menyimpan energi yang rendah sehingga mudah didemagnetisasi. Sehingga dikembangkanlah material lain agar mampu menyimpan energi yang lebih besar untuk menghasilkan peralatan yang lebih baik. Ada empat jenis pembagian magnet permanen yang digunakan untuk mesin elektrik, diantaranya yaitu¹²:

a. Alnico

Magnet ini memproduksi desitas fluks yang tinggi tetapi memiliki gaya koersif yang rendah. Ketika gaya koersif rendah dan dua magnet yang saling berhadapan berada pada jarak yang cukup dekat, kutub – kutub magnet dapat saling melemahkan.

¹² M Irsyadul Umami, *Desain Generator Sinkron Magnet Permanen Jenis Neodymium Iron Boron Untuk PLTB Daya 500 Watt Menggunakan Perangkat Lunak Magnet Infolytica*. (2018), hal 12

b. Ferrite atau ceramic magnet

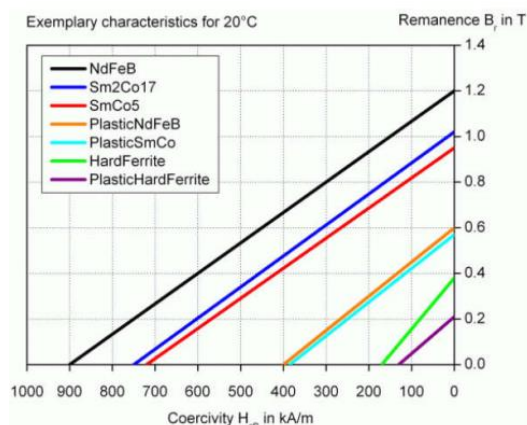
Tidak seperti Alnico, magnet ini memiliki densitas fluks yang rendah tetapi memiliki gaya koersif yang tinggi. Magnet Ferrit banyak digunakan karena bahan dan produksinya murah. Rare earth-magnet (Samarium-cobalt magnet).

c. *Rare Earth-Magnet* (Samarium-cobalt magnet)

Magnet jenis ini memiliki magnetic remanen dan gaya koersif yang tinggi. Dikarenakan harga dari magnet ini yang mahal, magnet ini pertama kali digunakan di servomotor pesawat dan peralatan militer. Sejak saat itu penggunaannya mulai meluas.

d. Neodymium Iron Boron (NdFeB)

Karakteristik magnet permanen yang paling tinggi saat ini adalah Neodymium Iron Boron (NdFeB), yang memiliki nilai produk energi maksimum sampai dengan 400 kJm^3 . Berdasarkan pada kurva karakteristik dibawah, Neodymium Iron Boron mempunyai nilai fluks remanen yang paling besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain. Dimana untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron memiliki fluks remanen senilai 1,2 T magnet permanen jenis Samarium Cobalt memiliki fluks remanen senilai 1,0 T, dan magnet permanen jenis Ceramic memiliki fluks remanen senilai 0,4 T.



Gambar 2.12 Kurva karakteristik bahan magnet permanen pada suhu 20°C (Sumber: M. I Umami, 2018)

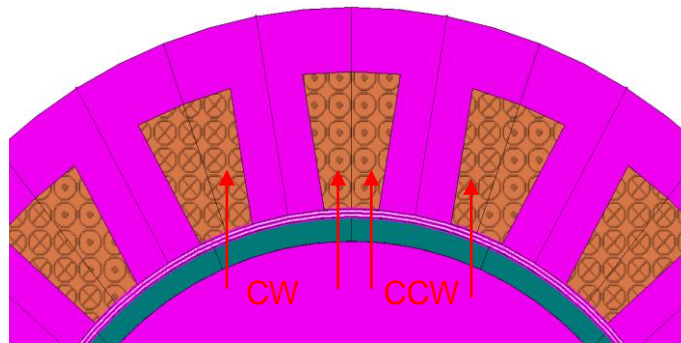
2.6.2 Kumparan

Generator memiliki kumparan dari kawat tembaga, sering juga disebut belitan/coil. Kumparan dibagi menjadi dua tipe sebagai berikut.

- Kumparan utama, atau kumparan keluaran dimana daya dibangkitkan
- Kumparan medan atau eksitasi yang harus dialiri arus untuk membangkitkan medan magnet di dalam mesin. Biasa disebut sebagai mesin eksitasi.

Generator sinkron magnet permanen tidak membutuhkan kumparan medan karena mereka tereksitasi secara permanen¹³.

Arah gerak putar lilitan coil ada 2 macam yaitu kumparan searah jarum jam (*Clock Wise-CW*) dan berlawanan arah jarum jam (*Counter Clock Wise-CCW*).



Gambar 2.13 Arah Lilitan Coil

(Sumber: Bernadus Arsoni, dkk., *Lentera Energi Nusantara*, 2020)

2.6.3 Stator dan Rotor

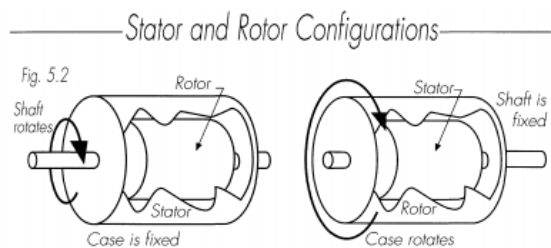
Generator mempunyai dua bagian yaitu bagian tidak bergerak (stator) dan bagian yang bergerak (rotor). Stator biasa dibuat di bagian luar, menyelimuti mesin. Rotor biasa dipasang pada shaft berputar di tengah (Gambar 2.14). Generator bekerja dengan menggerakkan magnet melewati kumparan, atau menggerakkan kumparan melewati magnet; dan hasilnya sama saja. Yang berpengaruh adalah pergerakan relatifnya. Maka dari itu, magnet bisa berada di stator ataupun di rotor. Mereka juga bisa berada di dalam atau di luar¹⁴.

Rotor merupakan salah satu komponen yang terdapat pada generator, dan rotor tersebut merupakan bagian dari generator yang berputar. Pada jenis PMSG,

¹³ Hugh Piggot, Op.cit., hal 65

¹⁴ Ibid

rotor ini sendiri juga sebagai tempat menempelnya magnet permanen dimana hal ini bisa di asumsikan sebagai penghasil medan magnet yang diperlukan dalam pembangkitan tegangan. Rotor akan dihubungkan dengan poros turbin agar dapat berputar. Pada stator diantaranya terdapat coil atau kumparan dimana kumparan tersebut merupakan salah satu komponen untuk tempat terbentuknya tegangan dan arus mengalir. Lilitan atau kumparan pada stator berfungsi sebagai tempat terjadinya gaya gerak listrik (GGL) induksi.



Gambar 2.14 Konfigurasi Stator dan Rotor
(Sumber: Windpower Workshop, H. Piggott)

2.6.4 Air Gap

Celah udara (*Air Gap*) bisa diartikan sebagai jarak antara stator dan rotor. Pada celah udara inilah yang nantinya terjadi fluks induksi antara kumparan stator yang memotong magnet permanen yang terdapat pada rotor sehingga dapat tercipta gaya gerak listrik (GGL). Pada jarak tersebut tentunya harus diperhitungkan agar didapatkan hasil kerja generator yang optimum. Secara tidak langsung hal tersebut akan membuat tegangan pada generator akan semakin besar. *Air gap* adalah rongga yang berada di bagian antara stator dan rotor.

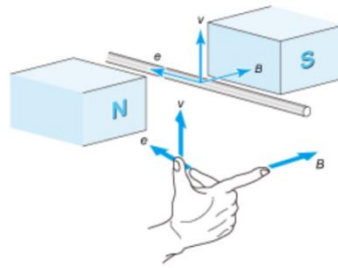
2.7 Prinsip Kerja Generator Sinkron Magnet Permanen

Generator sinkron magnet permanen memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. Ia menghasilkan flux pada kutub-kutub rotor yang memotong kumparan jangkar sehingga menghasilkan GGL bolak-balik pada ujung stator sehingga kumparan jangkar pada stator menghasilkan tegangan induksi.

Rotor merupakan bagian berputar yang ada pada generator. Pada PMSG, rotor merupakan tempat tersusunnya magnet permanent sebagai pembangkit

medan magnet yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Induksi elektromagnetik yang ada pada PMSG menggunakan hukum *fareday* yang berbunyi “adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL pada kumparan tersebut”. Tidak hanya hukum faraday, pada PMSG ini digunakan hukum *lenz* yang berbunyi “GGL induksi yang muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks menyebabkan arus mengalir”¹⁵.

Prinsip kerja generator juga berkaitan dengan kaidah tangan kanan fleming. Kaidah tangan kanan fleming adalah sebuah metode mneumonik untuk memudahkan menentukan arah vektor dari ketiga komponen hukum faraday, yakni arah gaya gerak kumparan kawat, arah medan magnet, serta arah arus.



Gambar 2.15 Kaidah Tangan Kanan Fleming

(Sumber: M. Rafi Akbar, 2020)

Rumus dari tangan kanan fleming adalah :

$$e = B \cdot l \cdot v \dots\dots\dots (2-4)$$

Keterangan:

B = kuat medan magnet (Tesla)

L = panjang kawat (m)

v = kecepatan sudut (rpm)

2.8 Kombinasi Slot Dan Pole

Kombinasi pole dan slot mempengaruhi torsi cogging, tegangan yang dihasilkan, dan juga frekuensi. Di beberapa referensi seperti pada “*Design of Brushless Permanent Magnet Motors*” sudah menyediakan kombinasi slot dan pole yang dapat digunakan seperti pada tabel 2.1.

¹⁵ Raffi Akbar, *Pengaruh Konfigurasi Star Delta Pada Rangkaian Coil Terhadap Kurva Karakteristik Generator PMSG 12S8P Menggunakan Software Magnet Infolytica*, 2020, hal 14-17

Tabel 2.1 Kombinasi slot dan pole untuk mesin tiga fasa¹⁶

3 fasa																
Slot	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
pole	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		8	6	8	6	8	6	8	6	8	6	8	6	8	6	8
		10	8	10	8	10	8	10	8	10	8	10	8	10	8	10
			10	14	14	10	14	14	10	14	14	10	14	14	10	14
			12	16	16	12	16	16	12	16	16	12	16	16	12	16
			14	20	20	14	20	20	14	20	20	14	20	20	14	20
			16	22	22	16	22	22	16	22	22	16	22	22	16	22
					26	20	26	26	18	26	26	20	26	26	20	26
					28	22	28	28	22	28	28	22	28	28	22	28
						24	32	32	22	32	32	24	32	32	24	32
						26	34	34	24	34	34	26	34	34	26	34
						30	38	38	26	38	38	28	38	38	28	38
						32	40	40	28	40	40	30	40	40	30	40
						34		44	30	44	44	32	44	44	32	44

Untuk kombinasi slot dan pole terdapat faktor belitan yang berpengaruh pada desain utama generator. Faktor belitan/Kw (*winding factor*) dapat dilihat pada tabel 2.2 (Yuliana, 2020) Pada penelitian ini memilih memakai 18 slot 16 pole yang faktor belitannya 0,945.

Tabel 2.2 Faktor belitan/Kw (winding faktor)

S/P	4	6	8	10	12	14	16	20	22	30
6	0.866	-	0.866	0.5	-	-	-	-	-	-
12	0.5	-	0.866	0.966	-	0.966	0.866	0.5	0.902	-
18	-	0.5	-	-	0.866	0.902	0.945	0.945	0.958	0.5
24	-	-	0.5	-	-	-	0.866	0.966	0.874	-
30	-	-	-	0.5	-	-	-	0.866	-	-

¹⁶ JR Hendershot and T Miller, Design Of Brushless Permanent Magnet Motors, (New York: Oxford University,1994), hal 3-10

2.9 Perhitungan Matematis Desain Generator

Rumus matematis desain generator merupakan rumus dasar untuk menentukan nilai dari beberapa parameter generator sinkron magnet permanen yang akan didesain.

2.9.1 Dimensi Utama Generator Magnet Permanen

Untuk menentukan dimensi utama dari generator maka perlu terlebih dahulu menentukan besar parameter-parameter awal seperti daya yang diinginkan, kecepatan putar rotor, faktor belitan, faktor daya dan parameter lainnya. Dimensi utama dari generator terdiri dari D dan L , dimana D adalah diameter dalam stator dan L merupakan panjang inti (*core*). Besar nilai D dan L saling berhubungan, dalam persamaan hubungan D dan L menjadi D^2L . Secara lengkap persamaan D^2L adalah sebagai berikut¹⁷,

$$D^2L = \frac{Q}{1,11 \times \pi^2 \times B_g \times a_c \times k_w \times n_s \times 10^{-3}} \dots\dots\dots (2-5)$$

Dimana:

- Q = Daya semu (KVA) ($P = Q \cos\theta$)
- P = Daya keluaran (KW)
- B_g = *specific magnetic loading* = 0.9T
- a_c = *specific electric loading* = 10.000 A/m
- n_s = Rotasi per detik (rps)
- $\cos\theta$ = Faktor daya

2.9.2 Ukuran Stator Dan Rotor

Perhitungan ukuran stator dan rotor saling berkaitan satu sama lain, setiap bagian dari stator maupun rotor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut¹⁸.

1. Menghitung derajat slot, θ_s

$$\theta_s = \frac{(2 \cdot \pi)}{N_s} \dots\dots\dots (2-6)$$

¹⁷ Meggi Octa dan I. Yasri. *Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah*. Jom FTEKNIK. Volume 5, (2018), hal 2

¹⁸ Ibid

2. Menghitung derajat pole, θp

$$\theta p = \frac{(2 \cdot \pi)}{p} \dots\dots\dots (2-7)$$

3. Menghitung Slot pitch, τs

$$\tau s = \frac{D}{2} \cdot \theta p \dots\dots\dots (2-8)$$

4. Coil pitch, τc

$$\tau c = \text{coil span} \cdot \tau s \dots\dots\dots (2-9)$$

Nilai dari coil span = 1

5. Menghitung panjang inti efektif, Li

$$Li = L \cdot Kstack \dots\dots\dots (2-10)$$

kstack adalah faktor penumpukan stator laminasi, berkisar antara 0,9-0,95 untuk ketebalan laminasi 0,35-0,5 mm (Meggi & Indra Yasri, 2018)

6. Menghitung diameter rotor, Dd

$$Dd = D - 2 \cdot lg \dots\dots\dots (2-11)$$

7. Menghitung stator yoke, Ys

$$Ys = \frac{\phi}{2 \cdot Li \cdot Bts} \dots\dots\dots (2-12)$$

Dimana nilai fluks (ϕ) = $0.9 \left(\pi \cdot \frac{Dd + (Dd - Lm)}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot L \right)$

8. Menghitung stator pole pitch, τp

$$\tau p = \frac{\pi \cdot D}{p} \dots\dots\dots (2-13)$$

9. Menghitung rotor pole pitch, τr

$$\tau r = \tau p \cdot 0,75 \dots\dots\dots (2-14)$$

10. Menghitung area kutub rotor, Apr

$$Apr = \tau r \cdot Li \dots\dots\dots (2-15)$$

11. Lebar gigi stator, Wts

$$Wts = \frac{p \cdot Bg \cdot Apr}{Ns \cdot Li \cdot Bts} \dots\dots\dots (2-16)$$

Keterangan:

Ns = Jumlah slot

Lm = tebal magnet

p = Jumlah pole/kutub

Bts = kerapatan fluks pada teeth

lg = celah udara

stator (1,55 T)

2.9.3 Jumlah Lilitan

Untuk mengetahui berapa maksimal jumlah lilitan yang memungkinkan maka perlu untuk menghitung luas dari slot pada stator. Luas dari slot stator dapat dihitung melalui persamaan berikut ini¹⁹.

1. Menghitung luas lubang slot, A_s

$$D_e = D_c - 2 \cdot Y_s \dots\dots\dots (2-17)$$

$$A_s = 0,5 \left(\left(\frac{(\pi \cdot D_e) - (W_{ts} \cdot N_s)}{N_s} \right) + \left(\frac{(\pi \cdot D_c) - (W_{ts} \cdot N_s)}{N_s} \right) \right) \cdot \left(\frac{D_e}{2} - \frac{D_c}{2} \right) \dots\dots\dots (2-18)$$

2. Menghitung area slot yang dapat terisi oleh lilitan, A_o

$$A_o = A_s \frac{Sf}{100} \dots\dots\dots (2-19)$$

Besar nilai coil fill factor (Sf) berkisar antara 30% - 50%

3. Menghitung jumlah lilitan yang dapat terisi, N_c

$$N_c = \frac{A_o}{\frac{\pi \cdot (d \cdot 10^{-3})^2}{4}} \dots\dots\dots (2-20)$$

Keterangan:

D_e = diameter dalam lubang slot

D_c = D = diameter dalam stator

d = diameter kawat konduktor

2.9.4 Mengitung Tegangan Output 3 Fasa

Besarnya kerapatan fluks magnet celah udara (B_g) berpengaruh langsung pada besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan, sesuai dengan persamaan sebagai berikut²⁰.

$$E_{ph} = 4,44 \cdot f \cdot N_c \cdot k_w \cdot k_s \cdot \phi \cdot \frac{N_s}{N_{ph}} \dots\dots\dots (2-21)$$

$$E_{LL} = E_{ph} \cdot \sqrt{3} \dots\dots\dots (2-22)$$

Skewing sering diterapkan untuk mengurangi torsi cogging. Untuk generator sinkron magnet permanen dalam penelitian ini, karena tidak menggunakan skewing, maka nilai dari faktor skewing (K_s) adalah 1 (M. I Umami, 2018)

¹⁹ Moch Fattahur Rozzaq, *Analisa Pengaruh Kombinasi Slot Dan Pole Pada Surface Permanent Magnet Generator Untuk Aplikasi Turbin Angin*, (2019), hal 15-16

²⁰ M Irsyadul Umami, Op.cit, hal 19

Keterangan:

E_{LL} = tegangan antar-fasa (volt)	k_s = faktor skewing
E_{ph} = tegangan fasa (volt)	ϕ = fluks magnet (Wb)
f = frekuensi (50 Hz)	N_{ph} = jumlah fasa
N_c = jumlah lilitan	N_s = jumlah slot
k_w = faktor belitan	

2.9.5 Mengitung Tegangan dan Arus DC

Penyearah daya merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber input AC dalam bentuk sinusoidal menjadi tegangan output DC dalam bentuk tegangan searah yang tetap. Jenis sumber tegangan input untuk mencatu rangkaian penyearah daya dapat menggunakan tegangan AC satu fasa maupun tiga fasa. penyearah daya yang digunakan pada penelitian ini adalah penyearah gelombang penuh tiga fasa yang terdapat enam dioda. Tegangan dan arus DC tersebut dapat dihitung secara matematis dengan persamaan berikut.²¹

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot V_m = 1,654 \cdot V_m \dots\dots\dots (2-23)$$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_m}{R} \dots\dots\dots (2-24)$$

Keterangan:

V_{dc} = tegangan DC	V_m = tegangan puncak
I_{dc} = arus DC	R = beban resistif

2.9.6 Mengitung Torsi

Untuk menghitung nilai torsi pada generator sinkron magnet permanen dapat menggunakan rumus sebagai berikut.²²

$$\omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60} \dots\dots\dots (2-25)$$

$$K_e = \frac{V_{peak}}{\omega} \dots\dots\dots (2-26)$$

²¹ M Irsyadul Umami, Op.cit, hal 16-17

²² Kenjo dan S Nagamori, *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*, (New York: Oxford University, 1985), hal 5

$$T = K_t \cdot I \dots\dots\dots (2-27)$$

Keterangan:

T = torsi (Nm)

n = kecepatan putar (rpm)

ω = kecepatan angular (rad/s)

$K_e = K_t =$ konstanta Back EMF

2.9.7 Menghitung Daya

Daya input pada generator sinkron magnet permanen dihasilkan dari torsi (T) dan kecepatan putar (ω) sedangkan daya output dari hasil kali tegangan (V) dan arus (I) yang dirumuskan dalam persamaan berikut. (Lentera Energi Nusantara, 2021).

$$P_{in} = \omega \times T \dots\dots\dots (2-28)$$

$$P_{out} = V \times I \dots\dots\dots (2-29)$$

2.9.8 Menghitung Efisiensi

Mutu sebuah generator sangat ditentukan oleh besarnya efisiensi generator tersebut. Semakin besar efisiensi sebuah generator maka generator tersebut semakin bagus pula. Efisiensi ini dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran generator terhadap daya masukan awal generator yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi}(\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2-30)$$

2.10 Software Magnet 7.5

Software MagNet 7.5 adalah laboratorium virtual untuk memodelkan perangkat elektromagnetik pada komputer pribadi. Pada Gambar 2.16 diatas merupakan logo dari MagNet 7.5. Pada software ini dapat memodelkan elektromagnetik, memodifikasi model generator, dan menganalisa hubungan fluks dan gaya. Pada aplikasi ini dapat menghasilkan pemodelan 3D dan pemodelan 2D, namun untuk menampilkan grafik pemodelan 3D akan memakan waktu lebih lama pada saat simulasi berjalan karena memerlukan space yang lebih besar pula.



Gambar 2.16 Logo Aplikasi MagNet 7.5

Finite Element Method atau metode Elemen Hingga, merupakan suatu cara untuk menyelesaikan permasalahan engineering dengan cara membagi objek analisa menjadi bagian-bagian kecil dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing*. Berdasarkan penjelasan diatas dapat dikatakan bahwa *Finite Element Method* (FEM) merupakan metode yang dapat digunakan untuk menghitung distribusi dari medan elektromagnetik secara kompleks.