

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Terbarukan dan Energi Angin

Energi terbarukan merupakan salah satu solusi utama untuk mengatasi tantangan energi global yang dihadapi dunia saat ini, termasuk kelangkaan sumber daya dan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh energi fosil(Syamsul, 2023). Dalam hal ini, energi angin menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dan telah digunakan secara luas di berbagai negara.



Gambar 2. 1 Energi terbarukan
Sumber : (*Efendi, 2022*)

2.1.1 Pengertian Energi Terbarukan dan Pentingnya dalam Konteks Global

1. Pengertian Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber-sumber yang dapat diperbarui secara alami dan tidak akan habis dalam waktu yang relatif singkat. Contoh utama energi terbarukan meliputi energi surya (matahari), energi angin, energi hidro (air), biomassa, dan energi panas bumi. Sumber daya ini dapat dihasilkan terus menerus karena siklus alam, seperti siklus air atau angin, yang berfungsi secara berulang, sehingga menjadikan energi ini lebih berkelanjutan dibandingkan energi fosil(Wiryajati, Satiawan and Suksmadana,).

2. Pentingnya Energi Terbarukan dalam Konteks Global

Energi terbarukan menjadi sangat penting dalam konteks global karena berbagai alasan:

- a. Mengurangi Emisi Karbon dan Polusi: Penggunaan energi terbarukan membantu menurunkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Hal ini sangat penting untuk mengurangi dampak perubahan iklim dan menjaga kualitas udara.
- b. Keamanan Energi: Dengan memanfaatkan sumber daya lokal, negara-negara dapat mengurangi ketergantungan mereka pada impor bahan bakar fosil. Ini dapat meningkatkan keamanan energi karena tidak lagi sepenuhnya tergantung pada pasokan energi dari luar negeri, yang harganya cenderung fluktuatif.
- c. Keberlanjutan Ekonomi: Pengembangan teknologi energi terbarukan dapat mendorong inovasi dan penciptaan lapangan kerja baru di berbagai sektor, seperti manufaktur, instalasi, dan pemeliharaan peralatan energi terbarukan.
- d. Konservasi Sumber Daya Alam: Dengan beralih ke energi terbarukan, eksploitasi sumber daya alam yang tidak terbarukan, seperti minyak bumi dan batu bara, dapat dikurangi, sehingga memperpanjang umur sumber daya ini untuk generasi mendatang.

Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap masalah lingkungan dan perubahan iklim, penggunaan energi terbarukan menjadi prioritas utama dalam upaya mencapai target pengurangan emisi karbon secara global.

2.1.2 Prinsip Dasar Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik

Energi angin adalah salah satu bentuk energi kinetik yang dihasilkan oleh pergerakan udara di atmosfer (Herwana, 2024). Angin terjadi akibat perbedaan tekanan udara yang disebabkan oleh pemanasan tidak merata permukaan bumi oleh matahari. Energi angin dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik melalui proses konversi yang melibatkan turbin angin. Berikut adalah prinsip dasar konversi energi angin menjadi energi listrik:

1. Penangkapan Energi Kinetik Angin

Turbin angin terdiri dari baling-baling atau bilah yang dipasang pada rotor. Ketika angin bertiup, energi kinetik dari angin akan menggerakkan bilah turbin sehingga rotor berputar. Kecepatan putaran ini bergantung pada kecepatan angin dan desain turbin, termasuk panjang bilah.

2. Konversi Energi Mekanik ke Energi Listrik

Putaran rotor menyebabkan poros utama yang terhubung dengan rotor berputar. Poros utama ini kemudian terhubung dengan generator listrik. Di dalam generator, energi mekanik dari putaran poros diubah menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik. Generator menggunakan medan magnet untuk menghasilkan arus listrik ketika kumparan kawat berputar di dalam medan tersebut.

3. Pengaturan Tegangan dan Distribusi Energi Listrik

Energi listrik yang dihasilkan oleh generator sering kali tidak langsung sesuai dengan kebutuhan beban. Oleh karena itu, digunakan sistem kontrol dan konverter daya (seperti *buck converter*) untuk mengatur tegangan dan

frekuensi agar sesuai dengan standar jaringan listrik atau aplikasi yang dituju, seperti pengisian baterai atau suplai langsung ke peralatan listrik.

Efisiensi dari konversi ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti desain turbin, kecepatan angin, ketinggian turbin, dan lokasi pemasangan. Karena energi angin bervariasi, turbin angin biasanya dilengkapi dengan mekanisme untuk menyesuaikan sudut bilah dan putaran rotor agar dapat mengoptimalkan penangkapan energi angin.

2.1.3 Kelebihan dan Kekurangan Energi Angin sebagai Sumber Energi Terbarukan

1. Kelebihan Energi Angin

a. Ramah Lingkungan

Energi angin tidak menghasilkan polusi udara atau emisi gas rumah kaca selama proses pembangkitan listrik, menjadikannya salah satu sumber energi yang paling ramah lingkungan. Dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, energi angin dapat membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

b. Sumber Energi yang Melimpah dan Terbarukan

Angin adalah sumber energi yang melimpah dan tidak akan habis. Karena angin merupakan fenomena alam yang terjadi secara terus-menerus, energi angin dapat diandalkan dalam jangka panjang sebagai bagian dari solusi energi terbarukan.

c. Biaya Operasional Rendah

Setelah turbin angin dipasang, biaya operasional dan pemeliharaannya relatif rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional, karena tidak memerlukan bahan bakar.

d. Mengurangi Ketergantungan pada Bahan Bakar Fosil

Energi angin dapat membantu mengurangi ketergantungan pada impor minyak dan gas, yang sering kali harganya fluktuatif dan tidak stabil.

1. Kekurangan Energi Angin

a. Variabilitas Sumber Daya

Energi angin bergantung pada kondisi cuaca dan kecepatan angin yang tidak selalu konstan. Pada saat angin tenang, turbin tidak dapat menghasilkan listrik dengan efisien, sehingga membutuhkan sistem penyimpanan energi atau pembangkit listrik cadangan.

b. Kebutuhan Ruang yang Luas

Instalasi turbin angin memerlukan lahan yang luas, terutama untuk turbin darat. Selain itu, penempatan turbin dapat menimbulkan masalah terkait izin lahan dan estetika di beberapa lokasi.

c. Potensi Dampak terhadap Ekosistem

Meskipun lebih bersih dibandingkan dengan bahan bakar fosil, turbin angin dapat menyebabkan gangguan terhadap fauna, seperti burung dan kelelawar, yang berisiko terbang menabrak bilah turbin.

d. Biaya Investasi Awal yang Tinggi

Meskipun biaya operasionalnya rendah, biaya awal untuk pembangunan dan instalasi turbin angin cukup tinggi, sehingga memerlukan investasi besar di awal proyek.

2.2 Turbin Angin Tipe Savonius

Turbin angin tipe Savonius adalah salah satu jenis turbin angin vertikal yang dirancang untuk memanfaatkan energi angin dalam menghasilkan listrik, terutama di daerah dengan kecepatan angin rendah (HAKIM, 2022). Turbin ini memiliki desain sederhana namun efektif dalam menangkap angin dari berbagai arah, sehingga sering digunakan untuk aplikasi skala kecil dan menengah.

2.2.1 Deskripsi dan Prinsip Kerja Turbin Angin Tipe Savonius

1. Deskripsi Turbin Angin Tipe Savonius

Turbin angin tipe Savonius pertama kali diperkenalkan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin ini merupakan jenis turbin angin poros vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine, VAWT*) yang memiliki bentuk seperti setengah silinder yang dipotong secara vertikal dan dipasang dengan arah yang berlawanan. Biasanya, turbin ini terdiri dari dua atau lebih bilah berbentuk lengkung yang membentuk sebuah rotor (Alit, Nurchayati and Pamuji, 2016). Desain ini memungkinkan turbin untuk menangkap angin dari segala arah, menjadikannya lebih fleksibel dibandingkan dengan turbin angin horizontal.

2. Prinsip Kerja Turbin Angin Tipe Savonius

Turbin Savonius bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan dan drag aerodinamis. Ketika angin bertiup, sisi cekung dari bilah akan menangkap angin,

sementara sisi cembung akan menolak sebagian angin, menciptakan perbedaan gaya yang menyebabkan rotor berputar. Energi kinetik dari angin diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor. Putaran ini kemudian ditransmisikan ke generator melalui poros untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik (Siregar and Lubis, 2019). Karena turbin Savonius berputar dengan kecepatan rendah, mereka sering dipasangkan dengan mekanisme peningkat kecepatan (*gearbox*) untuk mencapai kecepatan yang diperlukan oleh generator.

2.2.2 Karakteristik Turbin Angin Vertikal dan Perbedaannya dengan Jenis Turbin Angin Lainnya

1. Karakteristik Kincir Angin Vertikal
 - a. Turbin angin dengan poros vertikal, seperti tipe Savonius, memiliki beberapa karakteristik khusus:
 - b. Tidak Memerlukan Arah Angin yang Konsisten: Karena bilahnya berputar di sekitar poros vertikal, turbin vertikal dapat menangkap angin dari segala arah (*omnidirectional*), sehingga tidak memerlukan sistem yaw untuk menghadap angin.
 - c. Mudah Dipasang dan Dipelihara: Turbin vertikal dapat dipasang dekat dengan tanah, sehingga memudahkan pemeliharaan. Komponen seperti generator dan gearbox juga dapat diletakkan di dasar turbin, membuatnya lebih mudah diakses.
 - d. Kecepatan Putar yang Lebih Rendah: Turbin vertikal umumnya berputar lebih lambat dibandingkan dengan turbin horizontal, yang menyebabkan lebih sedikit kebisingan. Namun, ini juga berarti bahwa mereka menghasilkan daya

yang lebih rendah untuk ukuran yang sama dibandingkan dengan turbin horizontal.

2. Perbedaan dengan Jenis Turbin Angin Lainnya (Turbin Horizontal)

Turbin angin poros horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) adalah jenis turbin yang lebih umum digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin skala besar (Maulana *et al.*, 2021). Perbedaan utama antara turbin vertikal dan horizontal adalah sebagai berikut:

- a. Arah Poros Putar: Pada turbin horizontal, poros rotor sejajar dengan arah angin, sementara pada turbin vertikal, poros rotor tegak lurus terhadap arah angin.
- b. Efisiensi Energi: Turbin horizontal biasanya lebih efisien dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik karena bilahnya dapat bergerak lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan angin (superkritikal), sedangkan turbin vertikal cenderung bekerja lebih baik dalam kecepatan angin rendah dan turbulensi.
- c. Kompleksitas Instalasi: Turbin horizontal memerlukan menara yang tinggi dan mekanisme yaw untuk menghadap angin, sedangkan turbin vertikal tidak memerlukan orientasi khusus dan dapat dipasang di lokasi dengan ruang terbatas atau kondisi angin yang berubah-ubah.

2.2.3 Keunggulan dan Keterbatasan Turbin Angin Tipe Savonius dalam Kondisi Angin Rendah

1. Keunggulan Kincir Angin Tipe Savonius

a. Kemampuan Mengoperasikan pada Kecepatan Angin Rendah

Turbin Savonius dapat berfungsi dengan baik bahkan pada kecepatan angin yang rendah, sehingga cocok untuk wilayah yang tidak memiliki potensi angin yang tinggi (Pamungkas, Wijayanto and Saputro, 2017). Ini disebabkan oleh desain bilahnya yang dapat menangkap lebih banyak angin meskipun kecepatan anginnya rendah.

b. Fleksibilitas Penempatan

Karena mampu menangkap angin dari segala arah, turbin Savonius dapat dipasang di area dengan turbulensi tinggi atau angin yang tidak konsisten, seperti di perkotaan. Ini membuatnya cocok untuk aplikasi seperti pembangkit listrik skala kecil di rumah atau gedung.

c. Desain yang Sederhana dan Biaya Pemeliharaan Rendah

Turbin ini memiliki konstruksi yang sederhana tanpa memerlukan mekanisme yang rumit seperti yaw atau pitch control. Komponen utama yang terletak dekat dengan tanah juga memudahkan pemeliharaan, yang berarti biaya operasional lebih rendah.

2. Keterbatasan Kincir Angin Tipe Savonius

a. Efisiensi Rendah dalam Menghasilkan Daya

Turbin Savonius memiliki koefisien daya yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin horizontal, sehingga tidak dapat

menghasilkan listrik dalam jumlah besar untuk skala pembangkit listrik komersial. Efisiensi yang rendah ini membatasi penggunaan utamanya untuk aplikasi skala kecil.

b. Kecepatan Putar yang Lebih Lambat

Kecepatan putar turbin Savonius yang rendah menyebabkan daya yang dihasilkan cenderung lebih sedikit dan memerlukan peningkatan kecepatan melalui gearbox untuk mencapai kecepatan operasional generator. Hal ini dapat menambah kompleksitas dan biaya sistem.

c. Ukuran dan Berat yang Lebih Besar untuk Output yang Sama

Dibandingkan dengan turbin horizontal dengan daya yang sama, turbin Savonius memerlukan struktur yang lebih besar dan berat untuk menangkap energi angin yang setara. Ini membuatnya kurang efisien dalam hal penggunaan material dan ruang.

2.3 Buck converter

Buck converter merupakan jenis konverter daya yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC (Direct Current) dari level yang lebih tinggi menjadi level yang lebih rendah (Fossas and Olivar, 1996). Alat ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik dan sistem tenaga listrik, termasuk dalam sistem energi terbarukan seperti turbin angin dan panel surya.

2.3.1 Pengertian dan Prinsip Kerja Buck converter

1. Pengertian *Buck converter*

Buck converter adalah konverter DC-DC yang menurunkan tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang lebih rendah (Chen, Shen and Hwang,

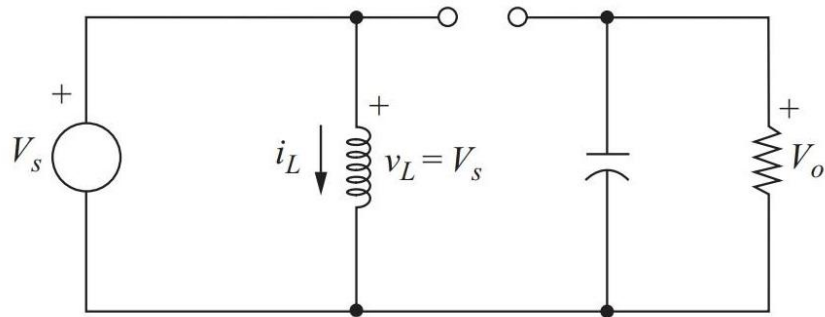
2012). Alat ini sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengaturan tegangan, seperti pada sistem tenaga elektronik, pengisian baterai, dan perangkat elektronik lainnya. *Buck converter* bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa sinyal yang diberikan kepada saklar elektronik, yang memungkinkan pengaturan tegangan keluaran dengan efisiensi yang tinggi.

2. Prinsip Kerja *Buck converter*

Prinsip kerja *buck converter* melibatkan pengaturan siklus on/off dari saklar elektronik (biasanya berupa transistor MOSFET) untuk mengendalikan jumlah energi yang disalurkan ke beban. Ketika saklar dalam keadaan "on," arus mengalir dari sumber tegangan melalui induktor menuju beban, dan energi disimpan dalam induktor. Saat saklar "off," induktor melepaskan energi yang disimpannya ke beban melalui dioda (Soto *et al.*, 2007). Dengan mengatur waktu "on" dan "off" dari saklar (duty cycle), tegangan keluaran dapat dikendalikan agar sesuai dengan kebutuhan.

Prinsip kerja dari buck-boost converter dapat dibagi menjadi 2 kondisi kerja, yaitu:

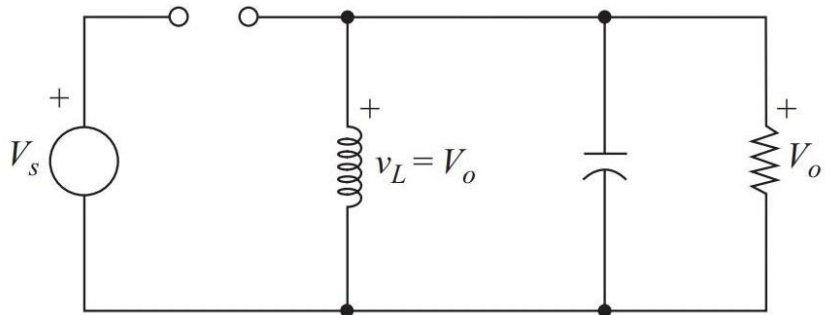
- a. Kondisi 1 ketika switch on (tertutup), seperti pada Gambar 2.6 dioda bekerja pada mode reverse bias dan semua tegangan masukan mengalir melintasi induktor sehingga tegangan pada induktor disimpan dalam bentuk medan magnet dan disaat yang bersamaan kapasitor dalam kondisi discharge.



Gambar 2. 2 Buck-boost converter kondisi 1

Sumber : (Ikhsandy, 2020)

b. Kondisi 2 ketika switch off (terbuka), seperti Gambar 2.7 Tegangan masukan terputus dan dioda bekerja dalam kondisi forward bias sehingga energi yang tersimpan pada induktor akan dilepaskan menuju beban dan kapasitor dalam kondisi charge (Tiwari, 2018).



2. 3 Buck-boost converter kondisi 2

Sumber : (Ikhsandy, 2020)

2.3.2 Komponen Utama dan Fungsinya dalam *Buck converter*

Buck converter terdiri dari beberapa komponen utama, masing-masing memiliki fungsi tertentu dalam proses konversi tegangan. Berikut adalah komponen-komponen utama dalam *buck converter* beserta fungsinya:

1. Saklar Elektronik (MOSFET atau Transistor)

Berfungsi sebagai saklar yang membuka dan menutup aliran arus dari sumber tegangan ke induktor dan beban. Saklar ini dikendalikan oleh sinyal PWM (Pulse Width Modulation) untuk mengatur siklus kerja (*duty cycle*).

2. Induktor (L)

Induktor berfungsi untuk menyimpan energi saat saklar "on" dan melepaskan energi tersebut ke beban saat saklar "off." Induktor membantu dalam menghaluskan aliran arus ke beban dan mengurangi riak tegangan pada output.

3. Dioda (atau dioda Schottky untuk efisiensi yang lebih tinggi)

Dioda digunakan untuk menyediakan jalur arus ketika saklar dalam keadaan "off." Ini memungkinkan arus yang dihasilkan oleh energi yang tersimpan dalam induktor tetap mengalir ke beban.

4. Kapasitor (C)

Kapasitor ditempatkan di output untuk menyaring riak tegangan dan menghasilkan tegangan keluaran yang lebih stabil dan halus. Ini bekerja dengan cara menyimpan dan melepaskan muatan untuk mengurangi fluktuasi tegangan.

5. Pengontrol Sinyal PWM (Pulse Width Modulation)

Pengontrol PWM menghasilkan sinyal yang mengatur siklus kerja (*duty cycle*) dari saklar elektronik. Dengan mengatur lebar pulsa sinyal, tegangan keluaran dapat disesuaikan agar mencapai nilai yang diinginkan.

Setiap komponen ini bekerja secara sinergis untuk memastikan konversi tegangan dari sumber ke beban dilakukan dengan efisiensi tinggi dan stabilitas yang baik (Chakrabarty, Poddar and Banerjee, 1996).

2.3.3 Mekanisme Pengaturan Tegangan Keluaran melalui *Duty cycle*

1. Pengertian *Duty cycle*

Duty cycle adalah rasio antara waktu saklar dalam keadaan "on" (waktu penghantaran) terhadap total periode siklus pengaturan (waktu "on" + waktu "off"). *Duty cycle* biasanya dinyatakan dalam persentase (Ismail and Elnady, 2019). Misalnya, *duty cycle* 50% berarti saklar "on" selama setengah dari total waktu siklus.

2. Pengaruh *Duty cycle* terhadap Tegangan Keluaran

Tegangan keluaran pada *buck converter* berbanding lurus dengan *duty cycle*. Semakin tinggi *duty cycle*, semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan, dan sebaliknya. Hubungan antara tegangan input (V_{in}) dan tegangan output (V_{out}) pada *buck converter* dapat dirumuskan sebagai:

$$V_{out} = D \times V_{in}$$

di mana D adalah *duty cycle* (berkisar antara 0 hingga 1).

3. Mekanisme Pengaturan dengan PWM

Pulse Width Modulation (PWM) digunakan untuk mengatur *duty cycle* dengan cara mengubah lebar pulsa sinyal yang mengontrol saklar. Dengan mengubah *duty cycle*, *buck converter* dapat menurunkan tegangan output sesuai dengan kebutuhan beban. Mekanisme ini memastikan bahwa tegangan keluaran tetap stabil meskipun terjadi perubahan pada tegangan input atau variasi beban.

Contoh penerapan mekanisme ini adalah ketika beban memerlukan tegangan yang lebih rendah dari sumber daya. Dengan mengurangi *duty cycle*, *buck converter* menurunkan tegangan output ke tingkat yang sesuai (Liou, Yeh and

Kuo, 2008). Pengaturan ini memungkinkan *buck converter* untuk bekerja dengan efisiensi yang tinggi, mengurangi energi yang terbuang, dan menjaga kestabilan tegangan keluaran.

2.4 Stabilitas Tegangan dan Efisiensi Konversi Energi

Stabilitas tegangan dan efisiensi konversi energi adalah dua aspek penting dalam sistem kelistrikan, termasuk pada konverter daya seperti *buck converter*. Keduanya memainkan peran besar dalam memastikan bahwa sistem berfungsi secara optimal dan aman (Yang, Ye and Liu, 2007).

2.4.1 Definisi Stabilitas Tegangan dalam Sistem Kelistrikan

Stabilitas tegangan dalam sistem kelistrikan mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan keluaran pada nilai yang konstan meskipun terjadi perubahan kondisi, seperti fluktuasi beban atau tegangan input. Dalam konteks konverter daya, stabilitas tegangan penting untuk memastikan bahwa perangkat atau sistem yang bergantung pada pasokan daya menerima tegangan yang sesuai untuk operasi yang aman dan efisien (Nabeshima *et al.*, 2004). Tegangan yang tidak stabil dapat menyebabkan kerusakan komponen, menurunkan efisiensi sistem, atau bahkan menyebabkan kegagalan sistem.

2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Konversi Energi pada *Buck converter*

Efisiensi konversi energi pada *buck converter* dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut:

1. Kerugian Saklar Elektronik: Efisiensi dapat berkurang akibat rugi-rugi saat saklar elektronik (misalnya, MOSFET) bekerja. Kerugian ini termasuk

rugi switching (saat transisi dari on ke off atau sebaliknya) dan rugi konduksi (saat saklar dalam keadaan on).

2. Kerugian pada Induktor: Induktor mengalami rugi-rugi berupa kerugian resistif pada kawat lilitan (DC resistance losses) dan kerugian inti (core losses) yang disebabkan oleh perubahan medan magnet.
3. Kerugian Dioda atau Komponen Penyearah: Penggunaan dioda untuk mengarahkan arus saat saklar "off" juga menghasilkan kerugian daya akibat tegangan maju dioda.
4. Kerugian Kapasitor: Kapasitor yang digunakan untuk menyaring riak tegangan dapat mengalami rugi-rugi terkait dengan Equivalent Series Resistance (ESR).
5. Frekuensi Switching: Frekuensi switching yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi karena memungkinkan penggunaan komponen dengan ukuran lebih kecil, tetapi juga meningkatkan rugi switching.

2.4.3 Dampak Perubahan Beban terhadap Stabilitas Tegangan dan Efisiensi Sistem

Perubahan beban, terutama yang tiba-tiba, dapat mempengaruhi kinerja *buck converter* dalam beberapa cara:

1. Stabilitas Tegangan: Perubahan beban yang signifikan dapat menyebabkan fluktuasi tegangan keluaran karena waktu respons dari pengontrol PWM mungkin tidak cukup cepat untuk mengimbangi perubahan ini. Akibatnya, terjadi overshoot atau undershoot pada tegangan keluaran.

2. Efisiensi Konversi: Efisiensi dapat menurun jika *buck converter* tidak bekerja pada titik operasi yang optimal. Saat beban berubah, rugi-rugi switching dan konduksi juga berubah, yang dapat menyebabkan variasi dalam efisiensi.

2.5 Pengaruh Perubahan Beban pada Sistem Konverter Daya

Perubahan beban adalah fenomena umum dalam sistem kelistrikan, dan dampaknya harus dipertimbangkan dalam desain dan pengoperasian konverter daya seperti *buck converter*.

2.5.1 Teori Perubahan Beban dan Dampaknya pada Kinerja Konverter Daya

Perubahan beban terjadi ketika ada perubahan pada arus yang ditarik oleh perangkat atau sistem yang terhubung dengan sumber daya (Deane and Hamill, 1990). Dalam konteks konverter daya, perubahan beban memengaruhi arus keluaran dan dapat menyebabkan perubahan tegangan keluaran. Dampaknya dapat meliputi:

Ketidakstabilan Tegangan Keluaran: Jika pengendalian sistem tidak cukup responsif, perubahan beban dapat menyebabkan tegangan keluaran berubah secara signifikan.

Efisiensi Konversi yang Berubah-ubah: Konverter mungkin tidak beroperasi pada kondisi efisiensi maksimum ketika terjadi perubahan beban.

2.5.2 Kajian tentang Perubahan Beban Tegangan Peak To Peak pada Sistem Elektronik dan Listrik

Perubahan beban merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kinerja sistem elektronik dan listrik. Dalam konteks sistem konversi daya, seperti

pada *buck converter* yang digunakan untuk mengatur tegangan keluaran dari sumber daya, perubahan beban dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang dihasilkan. Tegangan peak to peak merupakan parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas daya pada sistem elektronik dan listrik, karena mencerminkan rentang perubahan tegangan dari puncak positif ke puncak negatif dalam siklus sinyal listrik.

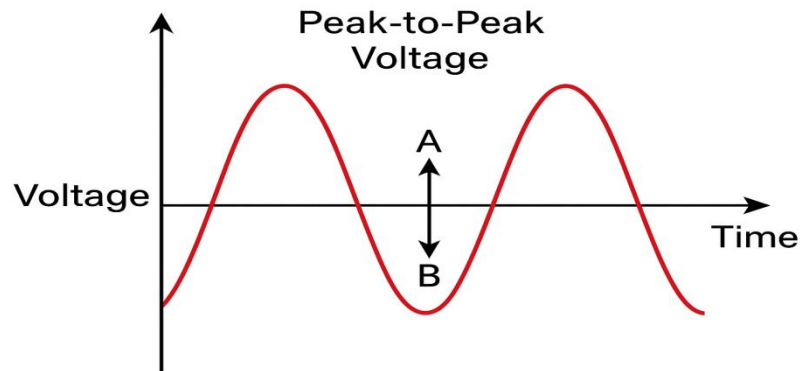
1. Tegangan Peak to Peak

Tegangan peak to peak adalah selisih antara nilai tegangan puncak positif dan nilai tegangan puncak negatif dalam sinyal listrik. Pada sistem yang menghasilkan tegangan AC atau DC dengan riak (ripple), tegangan peak to peak sering digunakan sebagai ukuran fluktuasi sinyal. Semakin besar tegangan peak to peak, semakin besar pula variasi tegangan dalam sistem tersebut, yang dapat menunjukkan ketidakstabilan daya. Stabilitas tegangan sangat penting dalam aplikasi elektronik yang sensitif, seperti perangkat komunikasi, sistem kontrol, dan pembangkit energi.

2. Pengaruh Perubahan Beban pada Tegangan Peak to Peak

Perubahan beban pada suatu sistem listrik dapat mempengaruhi tegangan peak to peak yang dihasilkan. Ketika beban pada sistem meningkat, arus yang ditarik dari sumber juga meningkat, yang dapat menyebabkan penurunan tegangan pada output jika sistem tidak mampu menyediakan daya yang cukup untuk mengimbangi perubahan tersebut. Sebaliknya, jika beban berkurang secara tiba-tiba, tegangan output dapat mengalami kenaikan. Fluktuasi ini sering terjadi pada

sistem konversi daya seperti *buck converter*, yang dirancang untuk menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan beban.



Gambar 2. 4 Beban tegangan peak to peak

Sumber : (*kakangnurdin, 2022*)

Pada gambar di atas ditunjukkan bentuk gelombang sinusoidal yang berosilasi terhadap waktu. Sumbu horizontal merepresentasikan waktu, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan besar tegangan. Bagian tertinggi dari gelombang ditandai sebagai puncak positif (A), sedangkan bagian terendah ditandai sebagai puncak negatif (B). Panah ganda yang menghubungkan kedua titik ini menunjukkan besarnya tegangan *peak-to-peak* (V_{p-p}). Nilai V_{p-p} merupakan selisih antara tegangan puncak positif dengan tegangan puncak negatif. Jika sinyal bersifat simetris, maka nilai V_{p-p} sama dengan dua kali amplitudo gelombang. Dengan demikian, gambar tersebut secara jelas memperlihatkan bagaimana tegangan peak-to-peak diukur dari jarak vertikal penuh antara puncak atas dan puncak bawah suatu sinyal AC.

Pada *buck converter*, perubahan beban dapat mempengaruhi karakteristik operasi, termasuk siklus tugas (*duty cycle*) yang diperlukan untuk

mempertahankan tegangan output pada tingkat yang diinginkan. Siklus tugas yang tidak stabil akibat perubahan beban akan mempengaruhi besar kecilnya riak tegangan (ripple voltage), yang pada gilirannya mempengaruhi tegangan peak to peak. Oleh karena itu, analisis terhadap pengaruh perubahan beban diperlukan untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi sistem elektronik dan listrik.

3. Mekanisme Pengendalian Perubahan Beban pada Sistem Konversi Daya

Untuk mengatasi masalah perubahan beban dan dampaknya terhadap tegangan peak to peak, sistem konversi daya biasanya dilengkapi dengan mekanisme pengaturan, seperti kontrol feedback atau loop tertutup, yang memungkinkan penyesuaian siklus tugas secara otomatis untuk menjaga tegangan output tetap stabil. Mekanisme ini memantau perbedaan antara tegangan output aktual dan tegangan referensi, kemudian menyesuaikan siklus tugas untuk meminimalkan perbedaan tersebut. Dengan demikian, fluktuasi tegangan peak to peak dapat dikurangi, dan kualitas daya yang lebih baik dapat dicapai.

4. Aplikasi Pengendalian Tegangan Peak to Peak dalam Sistem Listrik

Pengendalian tegangan peak to peak sangat penting dalam berbagai aplikasi, seperti pembangkit energi terbarukan, sistem distribusi listrik, dan perangkat elektronik. Pada pembangkit listrik tenaga angin, misalnya, perubahan kecepatan angin menyebabkan fluktuasi pada tegangan output generator. Menggunakan *buck converter* untuk menstabilkan tegangan output dapat meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan. Dalam perangkat elektronik, menjaga tegangan peak to peak tetap rendah dapat mengurangi gangguan elektromagnetik (EMI) dan meningkatkan kinerja keseluruhan sistem.

2.5.3 Studi Kasus atau Penelitian Terdahulu Terkait Efek Perubahan Beban pada *Buck converter*

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *buck converter* dengan teknik pengendalian adaptif atau berbasis prediksi dapat meningkatkan respons sistem terhadap perubahan beban. Studi kasus juga menunjukkan bahwa penggunaan komponen berkualitas tinggi dan penyesuaian parameter pengendalian (seperti frekuensi switching dan nilai induktor) dapat mengurangi dampak negatif perubahan beban pada kinerja *buck converter*.

2.6 Aplikasi Sistem Konversi Energi dengan Turbin Angin

Buck converter dapat digunakan dalam sistem konversi energi berbasis turbin angin untuk mengatur tegangan keluaran yang bervariasi akibat fluktuasi kecepatan angin (Chen, Shen and Hwang, 2012).

2.6.1 Implementasi Turbin Angin untuk Pembangkit Listrik Skala Kecil dan Menengah

Turbin angin banyak digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil dan menengah, seperti di rumah tangga atau komunitas lokal. Sistem ini biasanya menggunakan turbin angin vertikal, termasuk tipe Savonius, karena desainnya yang sederhana dan kemampuan menangkap angin dari berbagai arah. Sistem ini memerlukan perangkat pengendali tegangan seperti *buck converter* untuk menjaga stabilitas keluaran.

2.6.2 Tantangan Teknis dalam Stabilisasi Tegangan Keluaran dari Turbin Angin

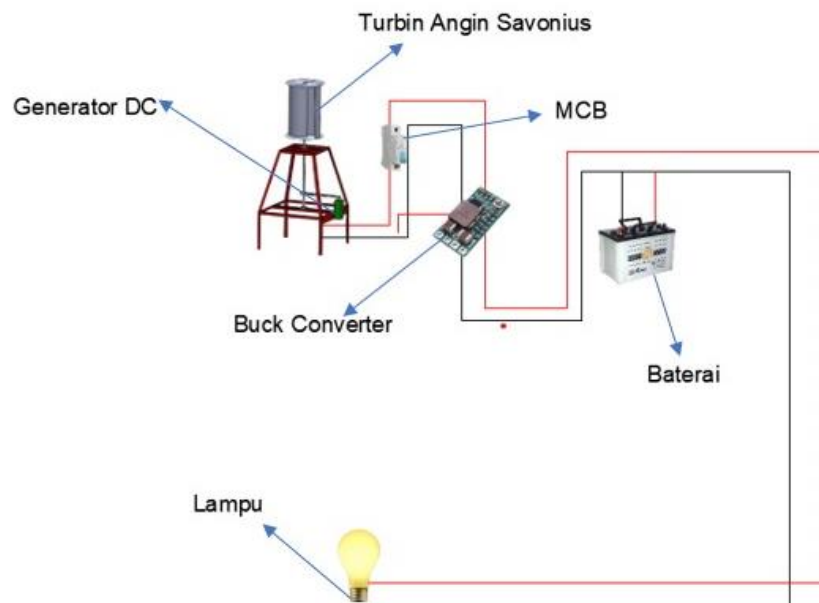
Turbin angin menghasilkan tegangan yang tidak stabil akibat perubahan kecepatan angin. Tantangan teknis dalam stabilisasi tegangan meliputi:

1. Fluktuasi Tegangan yang Cepat: Memerlukan sistem kontrol yang responsif untuk mengatasi fluktuasi tegangan dengan cepat.
2. Variasi Frekuensi dan Amplitudo: Membutuhkan konverter daya yang mampu menyesuaikan dengan perubahan parameter input.

2.6.3 Integrasi *Buck converter* dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Integrasi *buck converter* dalam sistem tenaga angin memungkinkan penyesuaian tegangan keluaran ke level yang diinginkan. Dengan pengaturan *duty cycle* yang sesuai, *buck converter* dapat membantu menstabilkan tegangan keluaran dan meningkatkan efisiensi sistem. Penggunaan *buck converter* juga dapat mengurangi riak tegangan dan meningkatkan kualitas daya listrik yang dihasilkan.

2.7 Komponen Dan Alur Alat



Gambar 2. 5 Alur alat
Sumber : (Jendri Datu 2024)

2.7.1 Komponen

1. Turbin Angin Savonius

Turbin ini merupakan sumber energi mekanik utama dalam sistem. Turbin Savonius dirancang untuk menangkap energi angin, terutama pada kecepatan angin rendah hingga sedang. Energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin akan diteruskan ke generator.

2. Generator DC

Generator DC mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin menjadi energi listrik berupa arus searah (DC). Tegangan yang dihasilkan oleh generator akan bervariasi sesuai dengan kecepatan putaran turbin dan kondisi angin.

3. *Buck converter*

Buck converter digunakan untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan DC dari generator agar sesuai dengan kebutuhan sistem. *Buck converter* juga berfungsi untuk mengurangi tegangan ripple yang dapat memengaruhi performa perangkat elektronik yang terhubung.

4. MCB (Miniature Circuit Breaker)

Komponen ini bertindak sebagai pengaman dalam sistem listrik. Jika terjadi arus berlebih atau korsleting, MCB akan memutuskan aliran listrik untuk melindungi komponen lain dalam rangkaian.

5. Baterai

Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin. Energi ini dapat digunakan untuk kebutuhan beban (seperti lampu) ketika kecepatan angin rendah atau saat turbin tidak beroperasi.

6. Lampu (Beban)

Lampu digunakan sebagai beban listrik dalam sistem ini. Energi listrik dari baterai atau langsung dari *buck converter* digunakan untuk menyalakan lampu.

2.7.2 Alur Kerja Sistem

1. Energi angin menggerakkan turbin Savonius, yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik.
2. Energi mekanik ini diteruskan ke generator DC, yang mengubahnya menjadi energi listrik berupa arus searah (DC).
3. Tegangan dari generator DC disalurkan ke *buck converter* untuk diturunkan dan distabilkan.

4. Aliran listrik melewati MCB sebagai pengaman sistem sebelum disalurkan ke baterai untuk penyimpanan atau langsung ke beban (lampu).
5. Baterai menyediakan daya listrik untuk beban ketika turbin angin tidak menghasilkan energi.

2.8 Kajian Pustaka

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Variabel Ukur
1	Amir, M., & Farid, M. (2018)	"Performance Analysis of <i>Buck converter</i> under Variable Load Conditions"	Menemukan bahwa perubahan beban signifikan menyebabkan fluktuasi tegangan yang memengaruhi efisiensi konversi.	Beban variabel, tegangan keluaran, efisiensi
2	Liu, Y., & Li, H. (2019)	"Adaptive Control of <i>Buck converter</i> for Renewable Energy Applications"	Penggunaan kontrol adaptif meningkatkan stabilitas tegangan dan efisiensi sistem di bawah perubahan beban cepat.	Stabilitas tegangan, efisiensi, kecepatan beban
3	Singh, A., & Kumar, R. (2020)	"Impact of Load Variations on DC-DC <i>Buck converter</i> Performance in Wind Energy Systems"	Perubahan beban pada sistem energi angin menyebabkan peningkatan riak tegangan dan menurunkan efisiensi jika tidak dikontrol dengan baik.	Riak tegangan, efisiensi, beban variabel
4	Zhang, X., & Zhao, L. (2017)	"Efficiency Improvement of <i>Buck converter</i> with Synchronous Rectification"	Penggunaan rectifier sinkron mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi konversi hingga 5% dibandingkan dengan dioda konvensional.	Efisiensi konversi, rugi daya, jenis rectifier
5	Wang, T., & Chen, Y. (2021)	"Dynamic Performance Analysis of <i>Buck converters</i> in Variable Load Applications"	Menggunakan pengendalian berbasis prediksi untuk meningkatkan respons dinamis <i>buck converter</i> di bawah kondisi beban yang berubah-ubah.	Respons dinamis, stabilitas tegangan, beban
6	Hadi, S., & Yusuf, A. (2016)	"Application of <i>Buck converter</i> in Small-Scale Wind Energy Conversion Systems"	<i>Buck converter</i> efektif untuk menstabilkan tegangan keluaran dari turbin angin tipe Savonius pada kecepatan angin rendah.	Tegangan keluaran, kecepatan angin, kestabilan

7	Guo, J., & Zhang, T. (2018)	"Improving Voltage Stability of DC-DC Converters in Renewable Energy Systems"	Menunjukkan bahwa optimisasi komponen seperti kapasitor dan induktor dapat mengurangi riak tegangan dan meningkatkan stabilitas.	Riak tegangan, stabilitas, komponen konverter
8	Ramesh, M., & Patel, V. (2019)	"Control Strategies for <i>Buck converters</i> in Wind Turbine Systems"	Teknik kontrol berbasis fuzzy logic lebih efektif dalam menjaga kestabilan tegangan di bawah variasi beban dibandingkan kontrol konvensional.	Teknik kontrol, stabilitas tegangan, variasi beban
9	Kurniawan, D., & Rahman, F. (2017)	"Pengaruh Beban Variabel pada Kinerja Konverter DC-DC Buck dalam Sistem Fotovoltaik"	Beban variabel menghasilkan fluktuasi tegangan yang lebih besar pada sistem fotovoltaik dibandingkan dengan sistem beban tetap.	Beban variabel, fluktuasi tegangan, sistem fotovoltaik
10	Al-Hussaini, A., & Salman, M. (2022)	"Analysis of Small Load Variations on <i>Buck converter</i> Performance in Energy Harvesting Systems"	Perubahan beban kecil dapat menyebabkan penurunan efisiensi dan memerlukan pengaturan frekuensi switching yang optimal.	Perubahan beban, efisiensi, frekuensi switching

Analisis Pengaruh Perubahan Beban Tegangan Peak to Peak pada *Buck converter* dalam Sistem Turbin Angin Tipe Savonius, memiliki fokus unik yang menggabungkan analisis perubahan beban tegangan dengan stabilitas *buck converter* dalam aplikasi spesifik sistem turbin angin tipe Savonius. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, seperti Liu dan Li (2019) serta Singh dan Kumar (2020) yang menekankan pengendalian adaptif atau pengaruh variasi beban pada stabilitas tegangan dan efisiensi konverter secara umum, tugas akhir ini memberikan konteks aplikasi langsung pada turbin angin Savonius. Selain itu,

penelitian ini melengkapi temuan Hadi dan Yusuf (2016) yang menunjukkan efektivitas *buck converter* untuk stabilisasi tegangan dalam turbin angin kecil dengan menambahkan analisis mendalam terhadap pengaruh perubahan beban tegangan peak-to-peak, yang belum banyak dikaji. Hal ini menciptakan kontribusi baru pada bidang efisiensi energi terbarukan dan stabilitas elektronik dalam sistem angin

