

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah sumber energi yang berasal dari proses alam yang dapat diperbaharui secara berkelanjutan. Sumber energi ini tidak akan habis dalam jangka waktu yang lama dan memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Ma, Chen and Wu, 2007). Energi terbarukan dianggap sebagai solusi penting untuk mengatasi masalah perubahan iklim dan krisis energi karena mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca.



Gambar 2.1 Energi Terbarukan
Sumber : (*Ma, Chen and Wu, 2007*)

2.1.1 Pentingnya Energi Terbarukan

Penggunaan energi terbarukan semakin penting seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap dampak negatif dari bahan bakar fosil, seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang berkontribusi pada efek rumah kaca, yang menyebabkan

pemanasan global dan perubahan iklim(Maulana *et al.*, 2021). Selain itu, cadangan bahan bakar fosil yang terbatas juga menimbulkan kekhawatiran tentang ketersediaan energi di masa depan.

Energi terbarukan menawarkan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Ramah lingkungan: Energi terbarukan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang jauh lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil, sehingga dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim.
2. Sumber daya yang melimpah: Sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, air, dan biomassa tersedia dalam jumlah besar dan dapat diperbaharui secara alami.
3. Diversifikasi energi: Penggunaan energi terbarukan dapat membantu negara-negara mengurangi ketergantungan pada impor energi, meningkatkan keamanan energi, dan mendiversifikasi sumber energi.

2.1.2 Peran Energi Terbarukan dalam Mengurangi Emisi Karbon

Energi terbarukan memiliki peran penting dalam mengurangi emisi karbon dan memitigasi perubahan iklim(Mursid *et al.*, 2021). Dengan menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber utama energi, energi terbarukan dapat secara signifikan mengurangi jumlah karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer. Beberapa cara energi terbarukan berkontribusi dalam mengurangi emisi karbon antara lain:

1. Pembangkit listrik tenaga surya dan angin: Menggunakan sinar matahari dan angin untuk menghasilkan listrik tidak menghasilkan emisi karbon, sehingga secara langsung mengurangi jejak karbon dari sektor pembangkitan listrik.

2. Bioenergi dan biomassa: Sumber energi ini menggunakan bahan organik sebagai bahan bakar, yang dalam proses pertumbuhannya menyerap karbon dioksida dari atmosfer. Jika digunakan secara berkelanjutan, biomassa dapat menjadi sumber energi bersih.
3. Tenaga air (hidro): Pembangkit listrik tenaga air memanfaatkan energi potensial dari air yang mengalir, dan meskipun konstruksi bendungan besar dapat memiliki dampak lingkungan, operasinya tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca.

2.1.3 Jenis-jenis Energi Terbarukan

Berbagai jenis sumber energi terbarukan yang tersedia meliputi:

1. Energi Angin: Menghasilkan listrik melalui penggunaan turbin angin yang digerakkan oleh aliran udara. Turbin angin dapat dipasang di darat (onshore) atau di laut (offshore) untuk memanfaatkan potensi angin yang lebih besar.
2. Energi Surya (Matahari): Menggunakan panel surya fotovoltaik untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik. Teknologi ini cocok untuk berbagai aplikasi, mulai dari skala rumah tangga hingga pembangkit listrik besar.
3. Energi Hidro: Menghasilkan listrik melalui turbin yang digerakkan oleh aliran air, biasanya dari bendungan atau sungai. Ini merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling stabil.
4. Biomassa: Menggunakan bahan organik seperti kayu, sampah organik, atau limbah pertanian untuk menghasilkan energi melalui pembakaran atau konversi menjadi bahan bakar bio.
5. Energi Panas Bumi (Geotermal): Memanfaatkan panas yang tersimpan di bawah permukaan bumi untuk menghasilkan listrik atau pemanasan.

2.1.4 Fokus pada Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang berkembang pesat dan banyak diterapkan di berbagai negara. Turbin angin mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator(Pamungkas, Wijayanto and Saputro, 2017). Energi angin menjadi pilihan yang menarik karena tidak menghasilkan emisi karbon selama operasinya dan dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan biaya yang semakin rendah.

1. Potensi Energi Angin di Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup besar, terutama di wilayah-wilayah tertentu seperti Nusa Tenggara, Sulawesi, dan pantai selatan Jawa. Kecepatan angin di beberapa daerah ini cukup tinggi untuk menggerakkan turbin angin, sehingga berpotensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif. Namun, di sebagian besar wilayah Indonesia, kecepatan angin cenderung rendah hingga sedang, yang membuat penggunaan turbin angin berkecepatan tinggi kurang efektif. Oleh karena itu, turbin angin tipe Savonius yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah menjadi pilihan yang lebih cocok untuk kondisi geografis Indonesia.

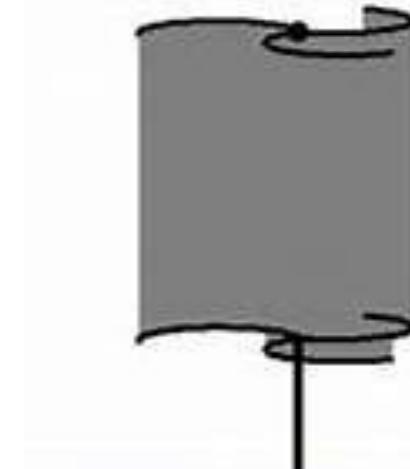
2. Tantangan dalam Pengembangan Energi Angin di Indonesia

- a. Meskipun memiliki potensi, pengembangan energi angin di Indonesia masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain:

- b. Kecepatan angin yang rendah: Sebagian besar wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata yang rendah, yang dapat mengurangi efisiensi pembangkit listrik tenaga angin konvensional.
- c. Infrastruktur yang terbatas: Keterbatasan infrastruktur pendukung seperti jaringan listrik yang tidak merata dan lokasi instalasi yang sulit dijangkau dapat menghambat pengembangan proyek energi angin.
- d. Biaya awal yang tinggi: Meskipun biaya operasional turbin angin relatif rendah, biaya awal untuk instalasi dan pengadaan teknologi masih cukup mahal, terutama jika membutuhkan impor komponen.

2.2 Turbin Angin Tipe Savonius

2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Angin Tipe Savonius



Gambar 2.2 Turbin Angin
Sumber : *(Purnama, Hantoro and Nugroho, 2013)*

Turbin angin tipe Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal yang bekerja berdasarkan prinsip gaya tarik (drag force) dari angin yang mengenai permukaannya. Turbin ini dirancang dengan bilah berbentuk setengah silinder yang dipasang secara simetris pada sumbu vertikal. Ketika angin bertiup, angin akan mengenai sisi cekung

bilah yang menyebabkan putaran (Purnama, Hantoro and Nugroho, 2013). Gaya tarik pada sisi cekung bilah lebih besar daripada gaya hambat pada sisi cembung, sehingga menciptakan torsi yang menyebabkan turbin berputar.

Karena bekerja dengan prinsip drag, turbin angin Savonius tidak memerlukan angin yang berkecepatan tinggi untuk mulai berputar, sehingga cocok untuk kondisi angin yang lambat atau rendah. Inilah yang membuat turbin Savonius unggul untuk digunakan di daerah yang tidak memiliki angin yang cukup kuat untuk menggerakkan turbin angin horizontal konvensional.

2.2.2 Desain dan Cara Kerja

Desain turbin angin Savonius cukup sederhana, biasanya terdiri dari dua atau tiga bilah setengah silinder yang dihubungkan ke sumbu tengah(Rudianto and Ahmadi, 2016). Bilah-bilah ini diatur sedemikian rupa sehingga angin dapat mendorong bilah yang bergerak berlawanan arah angin, sementara bilah lain bergerak mengikuti aliran angin. Keunggulan desain ini adalah kemampuannya untuk menangkap angin dari segala arah (omnidirectional), sehingga tidak memerlukan sistem pengarah untuk menyesuaikan posisi turbin terhadap arah angin.

Turbin Savonius menghasilkan torsi yang tinggi pada kecepatan angin rendah, tetapi efisiensi konversinya relatif lebih rendah dibandingkan turbin angin horizontal. Efisiensi yang lebih rendah ini disebabkan oleh gaya hambat yang lebih besar pada sisi bilah yang bergerak melawan arah angin.

2.2.3 Keunggulan dalam Kecepatan Angin Rendah

Turbin angin tipe Savonius memiliki beberapa keunggulan utama ketika dioperasikan pada kecepatan angin rendah:

1. Mulai berputar pada kecepatan angin rendah: Turbin Savonius dapat mulai berputar dengan angin yang memiliki kecepatan rendah (sekitar 2-3 m/s), sehingga cocok untuk daerah dengan sumber daya angin yang terbatas.
2. Desain sederhana dan biaya rendah: Desainnya yang sederhana membuat biaya produksi dan perawatan lebih murah dibandingkan turbin angin horizontal.
3. Mampu menangkap angin dari berbagai arah: Karena merupakan turbin sumbu vertikal, Turbin ini tidak memerlukan sistem pengarah untuk menyesuaikan dengan arah angin.

2.2.4 Perbandingan dengan Jenis Turbin Angin Lainnya

Turbin Angin Horizontal: Turbin angin horizontal, seperti turbin Darrieus, memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi daripada Turbin Savonius karena bekerja berdasarkan gaya angkat (lift force) dan lebih efisien pada kecepatan angin tinggi. Namun, turbin horizontal membutuhkan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk mulai beroperasi dan memerlukan mekanisme untuk menyesuaikan posisi turbin terhadap arah angin.

Turbin Sumbu Vertikal Lainnya (Darrieus): Turbin Darrieus bekerja berdasarkan gaya angkat dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada Savonius, tetapi membutuhkan kecepatan angin awal yang lebih besar untuk mulai berputar dan lebih kompleks dalam desainnya. Selain itu, Darrieus juga kurang stabil pada kecepatan angin rendah dibandingkan Savonius.

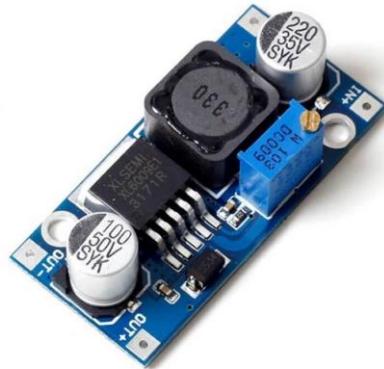
2.2.5 Penerapan dalam Pembangkitan Listrik Skala Kecil

Turbin angin Savonius sering digunakan untuk pembangkitan listrik skala kecil, seperti di daerah pedesaan atau lokasi terpencil yang memiliki akses terbatas

ke jaringan listrik utama. Kelebihan dalam memanfaatkan angin dengan kecepatan rendah dan biaya perawatan yang rendah membuatnya cocok untuk aplikasi seperti pompa air, penerangan jalan, dan pembangkit listrik rumah tangga.

2.3 Konverter DC-DC dan *Boost Converter*

2.3.1 Jenis-jenis Konverter DC-DC dan Prinsip Dasar Kerjanya



Gambar 2.3 Boost Converter
Sumber : (*Siregar and Lubis, 2019*)

Konverter DC-DC adalah rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC dari satu level ke level lain (Siregar and Lubis, 2019). Konverter ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti sistem daya portabel, kendaraan listrik, dan pembangkit energi terbarukan. Ada beberapa jenis konverter DC-DC berdasarkan fungsinya, yaitu:

- 1. *Buck Converter (Step-Down Converter)*:**

Buck converter digunakan untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah. Ini adalah jenis konverter yang paling umum digunakan ketika tegangan input lebih tinggi dari tegangan yang dibutuhkan oleh beban.

2. *Boost Converter (Step-Up Converter):*

Boost converter digunakan untuk menaikkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi. Konverter ini sering digunakan dalam aplikasi di mana tegangan dari sumber daya (misalnya baterai) perlu ditingkatkan untuk memenuhi kebutuhan beban.

3. *Buck-Boost Converter:*

Buck-boost converter dapat menurunkan atau menaikkan tegangan input tergantung pada konfigurasi rangkaianya. Ini adalah pilihan yang fleksibel untuk aplikasi yang memerlukan berbagai tingkat tegangan output.

4. Cuk Converter dan SEPIC (*Single-Ended Primary Inductor Converter*):

Kedua jenis konverter ini memungkinkan penyesuaian tegangan output baik di atas maupun di bawah tegangan input, dengan kelebihan kontrol arus yang lebih baik.

5. Isolated DC-DC Converter:

Konverter ini menggunakan transformator untuk memisahkan sisi input dan output secara elektrik, menyediakan keamanan tambahan dan perlindungan terhadap lonjakan tegangan.

6. Prinsip Dasar Kerja Konverter DC-DC

Prinsip dasar dari konverter DC-DC adalah mengatur tegangan output dengan cara mengalihkan arus melalui komponen penyimpanan energi seperti induktor dan kapasitor. Switching elektronik seperti MOSFET atau IGBT digunakan untuk mengontrol aliran arus dengan kecepatan tinggi,

yang menciptakan perubahan tegangan yang kemudian dihaluskan oleh komponen penyaring.

2.3.2 Penjelasan Spesifik tentang *Boost Converter*

Boost Converter adalah konverter daya yang digunakan untuk mengubah suatu tegangan DC menjadi tegangan DC dengan magnitud yang lebih tinggi, seperti halnya transformator pada tegangan AC yang sering kita kenal dengan sebutan transformtor step up. Seperti halnya *boost konverter*, komponen-komponen yang digunakan adalah sumber masukan DC, MOSFET, dioda, induktor, kapasitor, rangkaian kontrol serta beban.

Komponen utama dalam bost converter meliputi:

1. Sakelar elektronik (biasanya MOSFET): Mengontrol aliran arus dengan membuka dan menutup pada frekuensi tinggi.
2. Dioda: Memberikan jalur arus saat sakelar terbuka.
3. Induktor: Menyimpan energi dalam bentuk medan magnet dan melepaskannya untuk menjaga kelancaran aliran arus.
4. Kapasitor: Menghaluskan tegangan output untuk mengurangi tegangan ripple.

A. Prinsip kerja *boost converter* adalah sebagai berikut:

1. Prinsip kerja *boost converter* adalah untuk mengubah tegangan DC rendah menjadi tegangan DC yang lebih tinggi. Ini dilakukan dengan menggunakan komponen utama seperti induktor, saklar (misalnya transistor), dioda, dan kapasitor. Berikut adalah langkah-langkah utama dalam proses kerja *boost converter*:
2. Sakelar (Transistor) Ditutup (ON):

3. Ketika saklar (misalnya transistor) dalam keadaan tertutup, arus mengalir melalui induktor. Induktor ini menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Selama periode ini, tegangan keluaran adalah lebih rendah daripada tegangan masukan karena saklar tertutup.

4. Sakelar Dibuka (OFF):

5. Ketika saklar dibuka, arus yang mengalir dari induktor akan dipaksa untuk mengalir melalui dioda menuju kapasitor. Karena induktor berusaha untuk mempertahankan arusnya (karena sifat induktansi), tegangan induktor naik lebih tinggi dari tegangan masukan, sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi.

6. Proses Pengisian Kapasitor:

7. Kapasitor akan terisi dengan energi dari induktor dan dioda. Tegangan keluaran kemudian meningkat sesuai dengan rasio induktansi dan siklus saklar yang diatur..

B. Karakteristik *Boost Converter*

1. Tegangan Keluaran Lebih Tinggi: *Boost converter* meningkatkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi.
2. Efisiensi Tinggi: Biasanya efisiensi boost converter bisa mencapai 85% hingga 95%, tergantung pada desain dan komponen yang digunakan.
3. Pengaturan Tegangan: Tegangan keluaran dapat dikendalikan dengan mengubah siklus kerja (duty cycle) saklar.
4. Arus Masukan Lebih kecil dari Arus Keluaran: Arus masukan lebih besar daripada arus keluaran pada kondisi yang sama.

5. Penggunaan Induktor dan Dioda: *Boost converter* menggunakan induktor untuk menyimpan energi dan dioda untuk mengalirkan arus pada saat saklar dimatikan..

2.3.3 Fungsi dan Pentingnya *Boost Converter* dalam Mengatur dan Menstabilkan Tegangan Keluaran

Boost converter memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi yang memerlukan tegangan DC yang stabil dari sumber daya yang tidak selalu konsisten. Berikut adalah beberapa fungsi utama *boost converter* dan pentingnya dalam aplikasi tertentu

1. Meningkatkan Tegangan Masukan

Fungsi utama dari *boost converter* adalah untuk meningkatkan tegangan masukan yang rendah menjadi tegangan keluaran yang lebih tinggi. Hal ini sangat berguna dalam aplikasi yang membutuhkan tegangan lebih tinggi dari sumber tegangan yang tersedia, seperti dalam sistem tenaga surya atau sumber daya dengan tegangan rendah.

2. Pengaturan Tegangan yang Fleksibel

Boost converter memungkinkan pengaturan tegangan keluaran secara fleksibel. Dengan mengubah siklus kerja saklar (duty cycle), kita dapat mengontrol dan menstabilkan tegangan keluaran sesuai dengan kebutuhan beban. Ini sangat penting dalam aplikasi yang membutuhkan tegangan stabil untuk menjaga kinerja peralatan.

3. Meningkatkan Efisiensi Sistem

Dalam banyak sistem, meningkatkan tegangan keluaran dengan cara yang efisien membantu mengurangi kerugian daya. Dengan efisiensi tinggi (biasanya mencapai 85%-95%), boost converter dapat mengurangi pemborosan daya, yang sangat penting untuk perangkat yang bergantung pada sumber daya baterai atau tenaga terbatas.

4. Menjaga Kestabilan Tegangan pada Beban yang Berubah

Salah satu tantangan dalam pengelolaan daya adalah perubahan beban. *Boost converter* dapat menstabilkan tegangan keluaran meskipun ada variasi dalam beban atau tegangan masukan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa perangkat yang sensitif terhadap tegangan dapat beroperasi dengan baik dalam kondisi yang bervariasi.

5. Menyediakan Tegangan untuk Aplikasi Tertentu.

Boost converter sering digunakan dalam aplikasi seperti sistem tenaga surya, pengisian baterai, dan perangkat portabel yang membutuhkan tegangan lebih tinggi dari sumber daya yang tersedia. Mereka juga penting dalam aplikasi yang membutuhkan tegangan stabil, seperti alat ukur elektronik, sistem komunikasi, dan perangkat medis.

Secara keseluruhan, boost converter sangat penting dalam mengatur dan menstabilkan tegangan keluaran, menjaga efisiensi daya, serta memastikan kestabilan dan kinerja optimal dalam berbagai aplikasi.

2.4 Tegangan Ripple pada *Bost Converter*

2.4.1 Definisi dan Penjelasan tentang Tegangan Ripple

Tegangan ripple adalah fluktuasi kecil atau variasi tegangan yang terjadi pada tegangan output DC di sekitar nilai rata-ratanya. Tegangan ini muncul akibat proses switching dalam konverter DC-DC, seperti *boost converter*, di mana arus melalui induktor dan kapasitor berubah secara periodik(Syamsul, 2023). Tegangan ripple biasanya terjadi pada frekuensi yang sama dengan frekuensi switching dari konverter, menghasilkan bentuk gelombang yang memiliki komponen AC superimposed pada tegangan DC.

Tegangan Ripple pada *Boost Converter* mengacu pada fluktuasi atau variasi kecil dalam tegangan keluaran yang terjadi akibat proses switching (pemutusan dan penghubungan saklar). Ripple ini muncul karena siklus kerja saklar yang mengatur aliran arus dan tegangan dalam sistem konverter. Meskipun boost converter bertujuan untuk menghasilkan tegangan yang stabil, tegangan ripple tetap ada karena sifat sistem switching.

2.4.2 Penyebab Tegangan Ripple

Beberapa faktor yang menyebabkan munculnya tegangan ripple pada bost converter meliputi:

1. Frekuensi Switching: Semakin tinggi frekuensi switching saklar, semakin kecil komponen ripple. Namun, frekuensi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan gangguan elektromagnetik (EMI) dan kerugian daya.
2. Kapasitor Output: Kapasitor output berfungsi untuk meredam fluktuasi tegangan dan menyaring komponen ripple. Kapasitor yang lebih besar cenderung mengurangi ripple, tetapi ukuran dan biaya komponen ini menjadi faktor pembatas.

3. Induktor: Induktor membantu menyimpan energi sementara saklar bekerja. Pengaturan induktansi yang tepat dapat membantu mengurangi ripple dengan menstabilkan aliran arus.
4. Daya Beban: Beban yang tidak stabil atau fluktuasi beban dapat menyebabkan tegangan ripple meningkat, karena perubahan arus yang cepat akan menghasilkan fluktuasi tegangan yang lebih besar.
5. Rasio Siklus Kerja (Duty Cycle): Perubahan pada rasio siklus kerja saklar dapat mempengaruhi ukuran tegangan ripple. Siklus kerja yang lebih tinggi dapat meningkatkan ripple karena adanya ketidakseimbangan dalam pengisian dan pelepasan energi dari induktor.

2.4.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Tegangan Ripple pada *Boost Converter*

Tegangan ripple dipengaruhi oleh beberapa parameter dalam desain dan operasi *boost converter*, termasuk:

1. Frekuensi Switching: Semakin tinggi frekuensi switching, semakin kecil ripple tegangan yang dihasilkan. Namun, frekuensi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan gangguan elektromagnetik (EMI).
2. Kapasitor Output: Kapasitor yang lebih besar dapat menyaring lebih banyak komponen ripple dan membantu menstabilkan tegangan keluaran.
3. Induktor: Induktor dengan nilai induktansi yang lebih besar dapat mengurangi ripple karena membantu menstabilkan arus dan mengurangi fluktuasi.
4. Rasio Siklus Kerja (Duty Cycle): Duty cycle yang lebih tinggi dapat meningkatkan ripple. Pengaturan duty cycle yang optimal dapat membantu mengurangi ripple.

5. Beban (Load): Beban yang berubah-ubah dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang lebih besar dan memperburuk ripple.

2.4.4 Pengaruh Tegangan Ripple terhadap Kinerja dan Keandalan Perangkat Elektronik

Tegangan ripple yang berlebihan dapat berdampak negatif pada kinerja dan keandalan perangkat elektronik. Beberapa pengaruh yang dapat terjadi antara lain:

1. Gangguan pada perangkat sensitif: Perangkat elektronik yang sensitif terhadap perubahan tegangan, seperti sensor, mikrokontroler, dan perangkat komunikasi, dapat terganggu oleh tegangan ripple yang tinggi. Hal ini dapat menyebabkan kesalahan pembacaan, penurunan kinerja, atau bahkan kerusakan perangkat.
2. Mengurangi umur komponen: Tegangan ripple yang tinggi dapat menyebabkan arus yang tidak stabil mengalir melalui komponen seperti kapasitor, yang dapat memperpendek umur pemakaian komponen tersebut. Kapasitor elektrolitik, misalnya, sangat dipengaruhi oleh arus ripple dan dapat mengalami peningkatan suhu yang mempercepat degradasi.
3. Efisiensi sistem yang menurun: Tegangan ripple dapat menyebabkan hilangnya efisiensi dalam sistem daya, karena energi yang hilang dalam bentuk fluktuasi tegangan tidak dapat digunakan secara efektif oleh beban.
4. Peningkatan gangguan elektromagnetik (EMI): Tegangan ripple dapat menyebabkan peningkatan emisi EMI, yang dapat mempengaruhi kinerja perangkat lain di sekitarnya atau menyebabkan gangguan pada komunikasi.

2.5 Induktansi dan Pengaruhnya pada Sistem Konverter

2.5.1 Teori tentang Induktansi dan Fungsi Induktor dalam Rangkaian Elektronik

Induktansi adalah sifat dari suatu komponen listrik, yang disebut induktor, yang menghambat perubahan arus listrik. Induktor adalah komponen pasif yang terdiri dari lilitan kawat yang menghasilkan medan magnet saat arus mengalir melaluinya(Soto *et al.*, 2007). Ketika arus berubah, induktor akan menghasilkan tegangan yang berlawanan dengan perubahan arus tersebut. Satuan untuk induktansi adalah Henry (H), dan nilainya tergantung pada jumlah lilitan, bahan inti, dan ukuran fisik induktor.

Dalam rangkaian elektronik, induktor berfungsi untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet dan dapat digunakan untuk:

1. Penyaringan (filtering): Menghaluskan fluktuasi tegangan atau arus dengan menyaring komponen frekuensi tinggi.
2. Menyimpan energi: Dalam konverter daya seperti buck converter, induktor menyimpan energi ketika sakelar terbuka dan melepaskannya saat sakelar tertutup, yang membantu menghasilkan tegangan yang lebih stabil.

2.5.2 Hubungan antara Rasio Induktansi dan Tegangan Ripple dalam *Bost Converter*

Rasio induktansi mengacu pada definisi induktansi, yaitu perbandingan antara gaya gerak listrik (GGL) yang terinduksi dalam suatu konduktor atau kumparan dengan laju perubahan arus listrik yang menyebabkannya. Dengan kata lain, induktansi (dilambangkan dengan 'L' dan diukur dalam satuan Henry) adalah ukuran

kemampuan suatu konduktor untuk melawan perubahan arus listrik yang melewatinya, di mana arus yang berubah menghasilkan medan magnet yang kemudian menginduksi GGL pada konduktor itu sendiri.

Tegangan ripple adalah variasi tegangan output yang dihasilkan akibat proses switching dalam *boost converter*. Rasio induktansi berperan penting dalam menentukan besarnya tegangan ripple yang terjadi. Secara umum, peningkatan nilai induktansi akan menurunkan tegangan ripple karena induktor yang lebih besar dapat menyimpan lebih banyak energi dan menghaluskan perubahan arus(PRASETYO, 2011).

Hubungan antara rasio induktansi dan tegangan ripple dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Induktansi yang Lebih Tinggi Mengurangi Ripple.

- Semakin besar nilai induktansi dalam *boost converter*, semakin kecil tegangan ripple yang dihasilkan. Ini karena induktor yang lebih besar dapat lebih efektif menahan perubahan arus yang cepat selama siklus switching.
- Induktor dengan nilai induktansi yang lebih tinggi dapat menyimpan lebih banyak energi selama periode saklar ON dan melepaskannya secara lebih halus saat saklar OFF, yang membantu mengurangi fluktuasi tegangan.

2. Induktansi yang Lebih Rendah Meningkatkan Ripple:

- Jika nilai induktansi terlalu kecil, maka perubahan arus selama siklus switching akan lebih cepat, yang menghasilkan fluktuasi tegangan yang lebih besar pada keluaran. Hal ini meningkatkan tegangan ripple.

- Induktor yang lebih kecil tidak dapat menyimpan energi dengan baik, sehingga lebih banyak energi yang "terbuang" dalam bentuk fluktuasi arus yang mempengaruhi kestabilan tegangan keluaran.

3. Pengaruh Induktansi terhadap Durasi Pembangkitan Ripple:

- Induktor berfungsi untuk mengatur arus dalam boost converter. Induktansi yang lebih tinggi membuat perubahan arus lebih gradual, sehingga mengurangi frekuensi dan amplitudo ripple yang dihasilkan.
- Dengan induktansi yang lebih rendah, arus akan berubah lebih cepat, menyebabkan peningkatan tegangan ripple.

2.5.3 Studi Literatur Terkait Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memahami pengaruh variasi induktansi terhadap tegangan ripple dalam *boost converter*:

Penelitian tentang pengaruh induktansi terhadap efisiensi *boost converter* menunjukkan bahwa peningkatan nilai induktansi dapat meningkatkan efisiensi pengaturan tegangan dengan mengurangi tegangan ripple. Namun, efisiensi dapat menurun jika induktansi terlalu besar karena meningkatkan resistansi internal dan rugi-rugi magnetik.

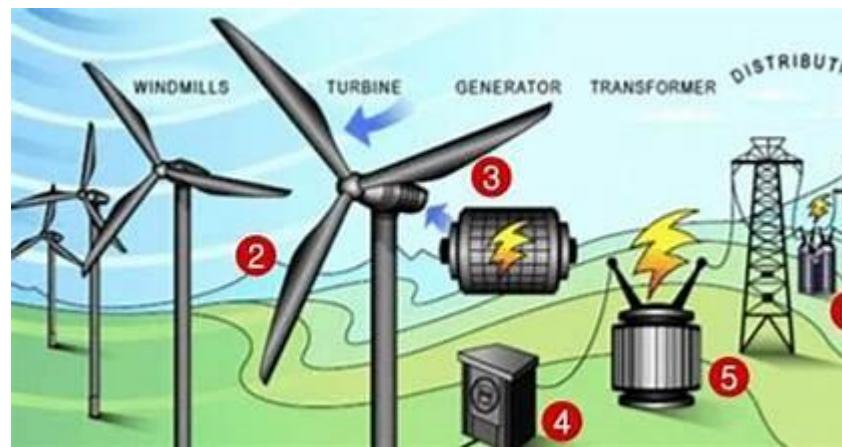
Studi tentang optimasi nilai induktansi menunjukkan bahwa ada nilai induktansi optimal yang memberikan tegangan ripple minimum untuk frekuensi switching tertentu. Nilai induktansi yang lebih tinggi dari optimal dapat memperlambat respons transient dan mengurangi efisiensi pada perubahan beban yang cepat.

Literatur tentang desain converter untuk sistem energi terbarukan menekankan pentingnya pemilihan induktansi yang tepat dalam aplikasi seperti sistem pembangkit

listrik tenaga angin, di mana tegangan input sering kali bervariasi. Induktansi yang sesuai dapat membantu menstabilkan tegangan output dan meningkatkan efisiensi konversi energi.

2.6 Sistem Pembangkitan Listrik dengan Turbin Angin

2.6.1 Proses Konversi Energi Angin Menjadi Listrik



Gambar 2.4 Pembangkit Tenaga Turbin
Sumber : (*Siregar and Lubis, 2019*)

Proses konversi energi angin menjadi listrik melibatkan beberapa tahap utama, yaitu:

1. Turbin Angin: Energi kinetik angin digunakan untuk memutar bilah-bilah Turbin angin, yang kemudian menghasilkan gerakan mekanis.
2. Generator: Gerakan mekanis dari Turbin angin digunakan untuk memutar rotor dalam generator, yang kemudian mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Generator ini umumnya menghasilkan tegangan AC.
3. Penyearah (Rectifier): Tegangan AC yang dihasilkan oleh generator dapat diubah menjadi tegangan DC menggunakan penyearah, jika diperlukan untuk aplikasi tertentu atau untuk penyimpanan dalam baterai.

4. Konverter DC-DC (seperti buck converter): Mengatur tegangan DC yang dihasilkan agar sesuai dengan kebutuhan beban atau sistem penyimpanan energi(Nabeshima *et al.*, 2004). Konverter ini mengatasi fluktuasi tegangan yang disebabkan oleh perubahan kecepatan angin.

2.6.2 Kendala Teknis dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Kendala utama yang dihadapi dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin, khususnya yang menggunakan Turbin angin tipe Savonius, meliputi:

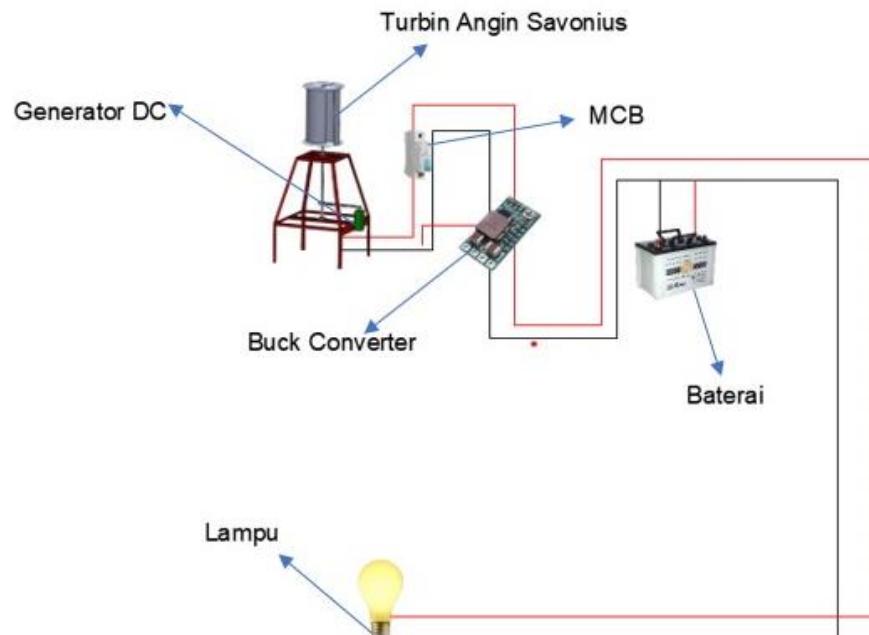
1. Fluktuasi tegangan: Kecepatan angin yang tidak stabil menyebabkan variasi dalam kecepatan putaran Turbin angin dan tegangan keluaran generator. Fluktuasi ini dapat mengganggu kestabilan sistem listrik yang menggunakan tegangan tersebut.
2. Efisiensi rendah pada kecepatan angin rendah: Meskipun Turbin angin Savonius dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah, efisiensi konversinya tetap lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin horizontal, terutama pada kecepatan angin tinggi.
3. Pengaturan tegangan yang kompleks: Fluktuasi tegangan memerlukan sistem pengaturan yang mampu merespons perubahan dengan cepat. Konverter DC-DC, seperti *boost converter*, diperlukan untuk menjaga stabilitas tegangan.

2.6.3 Upaya Stabilisasi Tegangan

Beberapa strategi untuk menstabilkan tegangan keluaran dari sistem pembangkit listrik tenaga angin meliputi:

1. Penggunaan konverter DC-DC: Mengatur tegangan keluaran dengan menurunkan atau menaikkannya sesuai kebutuhan, sekaligus menyaring tegangan ripple agar output lebih stabil.
2. Kapasitor filter: Digunakan untuk menghaluskan tegangan output dengan menyimpan dan melepaskan muatan listrik selama siklus switching konverter.
3. Kontrol adaptif pada frekuensi switching: Menyesuaikan frekuensi switching *boost converter* berdasarkan kondisi operasi untuk mengurangi tegangan ripple.
4. Penggunaan teknologi penyimpanan energi: Seperti baterai atau superkapasitor, untuk menyerap kelebihan energi saat angin kencang dan melepaskannya saat angin lemah, sehingga menjaga tegangan tetap stabil.

2.7 Komponen Dan Alur Alat



Gambar 2.5 : Alur Kerja Alat

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. *Boost Converter*

Boost converter digunakan untuk menaikkan dan menstabilkan tegangan DC dari generator agar sesuai dengan kebutuhan sistem. *Boost 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 boost converter untuk dinaikkan dan distabilkan.
4. Aliran listrik melewati MCB sebagai pengaman sistem sebelum disalurkan ke baterai untuk penyimpanan atau langsung ke beban (lampa).
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 yang Digunakan
1	Zhang et al. (2020)	"Influence of Inductor Selection on Ripple Reduction in Buck Converters"	Peningkatan nilai induktansi mengurangi tegangan ripple, tetapi induktansi terlalu besar menurunkan respons dinamis sistem.	Nilai induktansi, tegangan ripple, respons dinamis sistem.
2	Kumar & Jain (2018)	"Design Optimization of Buck Converter for Renewable Energy Applications"	Pemilihan induktor dan kapasitor yang tepat meningkatkan efisiensi konverter dan menurunkan tegangan ripple.	Nilai induktor, nilai kapasitor, efisiensi konverter, tegangan ripple.
3	Wong et al. (2019)	"Comparative Study of Ripple Reduction Techniques in DC-DC Converters"	Kapasitor tambahan dan frekuensi switching tinggi lebih efektif dalam mengurangi tegangan ripple dibanding induktansi.	Kapasitor tambahan, frekuensi switching, nilai induktansi, tegangan ripple.
4	Patel & Singh (2021)	"Impact of Inductance Variation on Performance of Buck-Boost Converters"	Nilai induktansi optimal diperlukan untuk tegangan ripple minimal, variasi induktansi memengaruhi efisiensi konverter.	Variasi induktansi, tegangan ripple, efisiensi konverter.
5	Lee & Kim (2017)	"Performance Analysis of Buck Converters in Wind Energy Systems"	Penggunaan induktor besar menstabilkan tegangan output pada turbin angin tipe Savonius.	Ukuran induktor, tegangan output, kecepatan angin.
6	Almasri et al. (2022)	"Effects of Switching Frequency on the Ripple"	Frekuensi switching tinggi mengurangi tegangan ripple, tetapi meningkatkan	Frekuensi switching, tegangan ripple, rugi-

		Voltage of Buck Converters"	rugi-rugi switching.	rugi switching.
7	Ghosh & Prasad (2019)	"Design of High-Efficiency Buck Converter for Low-Voltage Renewable Applications"	Komponen ESR rendah, seperti kapasitor, mengurangi tegangan ripple dan meningkatkan efisiensi konverter.	Nilai ESR kapasitor, tegangan ripple, efisiensi konverter.
8	Silva & Mendes (2018)	"Control Strategies for Ripple Minimization in DC-DC Converters for Wind Systems"	Strategi kontrol adaptif mengoptimalkan induktansi dan kapasitor untuk tegangan output yang stabil di kecepatan angin bervariasi.	Strategi kontrol, nilai induktansi, nilai kapasitor, tegangan output, kecepatan angin.
9	Han & Zhang (2020)	"Influence of Component Selection on DC-DC Converter Performance in Hybrid Systems"	Induktansi yang tepat mengurangi tegangan ripple, khususnya pada sumber energi terbarukan yang tidak stabil.	Nilai induktansi, tegangan ripple, stabilitas sumber energi.
10	Rahman & Ahamed (2023)	"Optimization of Buck Converter for Wind Power Applications"	Pemilihan induktor dan kapasitor optimal meningkatkan stabilitas tegangan pada kecepatan angin rendah.	Nilai induktor, nilai kapasitor, stabilitas tegangan, kecepatan angin.

Penelitian tugas akhir ini, "Pengaruh Rasio Induktansi terhadap Tegangan Ripple pada *DC-DC Converter* dalam Sistem Turbin Angin Tipe Savonius", berfokus secara spesifik pada analisis rasio induktansi terhadap tegangan ripple dalam konteks turbin angin tipe Savonius. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengeksplorasi berbagai aspek *boost converter*, seperti pemilihan komponen secara umum (Zhang et al., 2020), strategi kontrol adaptif (Silva & Mendes, 2018), atau

pengaruh frekuensi switching (Almasri et al., 2022), tugas akhir ini memperdalam efek rasio induktansi dalam aplikasi energi angin spesifik. Selain itu, penelitian ini menyoroti efisiensi sistem turbin angin Savonius, yang jarang dibahas dalam studi terdahulu, menjadikannya kontribusi unik pada pengembangan teknologi energi terbarukan.