

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian [5], membahas sistem otomatis untuk meningkatkan faktor daya motor induksi yang rendah akibat tingginya daya reaktif. Sistem ini berbasis Arduino Uno dengan sensor ACS712, ZMPT101B, dan relay untuk mengatur kapasitor bank sesuai kebutuhan daya reaktif. Hasilnya, faktor daya meningkat dari 0,45 menjadi 0,84 dengan akurasi 90% dan kesalahan di bawah 5%, menunjukkan efektivitas sistem mikrokontroler dalam memperbaiki faktor daya motor induksi tiga fasa.

Dalam penelitian [6], menganalisis pengaruh perubahan nilai kapasitor terhadap efisiensi energi dan kestabilan tegangan sistem tiga fasa melalui simulasi MATLAB/Simulink. Variasi 3,5–9 kVAR menunjukkan kapasitor 6,5 kVAR paling optimal, meningkatkan faktor daya dari 0,70 ke 0,95 dan menstabilkan tegangan 380 V. Kapasitor berlebih (9 kVAR) menyebabkan overkompensasi dan overvoltage, sehingga pemilihan nilai kapasitansi yang tepat penting untuk menjaga efisiensi dan kualitas daya.

Adapun penelitian [7], bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kapasitor terhadap konsumsi daya dan faktor daya rumah tangga menggunakan kapasitor 4 μ F, 10 μ F, dan 25 μ F paralel dengan Power Monitor 6 in 1 AC 20A. Kapasitor 4 μ F paling efisien dengan penghematan 331,4 W dan faktor daya 0,94, sedangkan 10 μ F memberi kompensasi tertinggi 105 VAR dengan faktor daya 0,97. Variasi kapasitor efektif meningkatkan efisiensi dan kualitas daya.

Dalam penelitian [8], mengkaji efektivitas penggunaan kapasitor bank dalam meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan industri. Metode penelitian dilakukan melalui pengamatan langsung di lapangan, studi literatur, dan wawancara teknis di PLTU pabrik kelapa sawit PT. Sri Ulina Ersada Karina. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank berkapasitas 1200 kVAR (12 step unit) meningkatkan faktor daya dari 0,65 menjadi 0,96 serta mengurangi daya reaktif sebesar 1107,51 kVAR.

Adapun juga penelitian [9], meneliti dampak integrasi PLTB berbasis Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) terhadap performa sistem distribusi tenaga listrik menggunakan simulasi MATLAB R2016A pada

sistem 33 bus berkapasitas 5 MW. Hasil menunjukkan peningkatan tegangan dari 0,9378 pu menjadi 0,9466 pu dan penurunan rugi daya hingga 807,73 kW pada beban puncak. Meski kebutuhan daya reaktif meningkat pada kondisi tertentu, integrasi PLTB-SCIG tetap mampu memperbaiki profil tegangan dan efisiensi sistem distribusi.

Berdasarkan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kapasitor bank efektif dalam memperbaiki faktor daya, menstabilkan tegangan, dan mengurangi rugi daya pada sistem tenaga listrik skala rumah tangga, industri, hingga pembangkit. Variasi nilai dan konfigurasi kapasitor sangat berpengaruh terhadap hasil kompensasi daya reaktif. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada motor induksi dan sistem distribusi konvensional, sedangkan kajian pada pembangkit tenaga angin skala mikro masih terbatas. Mengingat turbin angin memiliki beban fluktuatif akibat perubahan kecepatan angin, penelitian ini difokuskan pada pemodelan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif untuk meningkatkan faktor daya turbin angin guna mendukung efisiensi dan stabilitas sistem energi terbarukan.

2.2 Dasar Teori

Sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik. Dalam sistem ini, turbin angin berperan sebagai pengubah energi angin menjadi energi mekanik pada porosnya, kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu jenis generator yang banyak digunakan adalah *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) karena efisiensinya yang tinggi, kemampuan bekerja pada kecepatan variabel, serta tidak memerlukan suplai daya reaktif eksternal. Namun, dalam proses konversi daya, sistem turbin angin sering menghadapi permasalahan faktor daya yang rendah akibat dominasi beban induktif yang menyerap daya reaktif. Kondisi ini dapat menurunkan efisiensi sistem dan meningkatkan rugi-rugi daya listrik.

Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan kapasitor bank sebagai alat kompensasi daya reaktif guna memperbaiki faktor daya, menstabilkan tegangan, dan meningkatkan efektivitas penyaluran daya dari generator menuju beban. Selain itu, pemantauan kinerja sistem dilakukan menggunakan sensor-sensor seperti sensor RPM untuk mengukur kecepatan putar turbin, sensor arus untuk mendeteksi besarnya arus keluaran generator, serta sensor tegangan untuk memantau kestabilan tegangan output.

Kombinasi antara sistem turbin angin, kapasitor bank, dan perangkat sensor ini menjadi dasar dalam analisis dan pemodelan peningkatan efektivitas daya pada turbin angin agar sistem pembangkitan bekerja lebih efisien, stabil, dan optimal.

2.2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu energi yang tidak akan pernah habis dan merupakan energi terbarukan yang memiliki potensi yang sangat besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik yang pada saat ini kebutuhan energi listrik terus meningkat. Angin merupakan massa aliran udara yang disebabkan oleh perbedaan tekanan dari suatu daerah yang memiliki ketinggian yang berbeda. Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis yang memiliki banyak potensi energi angin yang besar, tetapi sampai saat ini negara Indonesia belum bisa memanfaatkan secara penuh untuk menunjang kebutuhan energi listrik [10].

Untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik, maka langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung energi dengan formula [11]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

E = Energi kinetik (Joule)

m = Massa udara (kg)

v = Kecepatan angin (m/det)

Untuk mendapatkan massa udara dimisalkan suatu blok udara mempunyai penampang dengan luas A (m²), dan bergerak dengan kecepatan v (m/det), maka massa udara yang melewati suatu tempat adalah [11]:

$$m = A \cdot v \cdot \rho \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

m = Massa udara yang mengalir (kg/det)

A = Penampang (m²)

v = Kecepatan angin (m/det)

ρ = Kerapatan udara (kg/m³)

Dengan persamaan (2.1) dan (2.2) dapat dihitung besar daya yang dihasilkan dari energi angin yaitu [11]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

P = Daya energi per satuan waktu (watt)

A = Luas penampang (m²)

V = Kecepatan angin (m/det)

ρ = Kerapatan udara (kg/m³)

Koefisien daya merupakan perbandingan antara daya angin yang tersedia di aliran udara dengan daya mekanis yang dihasilkan oleh poros turbin. Nilai ini menunjukkan seberapa besar bagian dari energi angin yang dapat diubah menjadi energi mekanis yang berguna oleh turbin. Dengan kata lain, koefisien daya menggambarkan tingkat efisiensi turbin angin dalam memanfaatkan energi kinetik angin yang bisa dikonversi. Nilai koefisien daya bersifat tanpa dimensi dan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti bentuk dan jumlah bilah turbin, sudut serang (angle of attack), serta kecepatan angin yang mengenai rotor [12].

Secara keseluruhan, turbin angin tidak mampu menangkap seluruh energi kinetik dari angin, melainkan hanya sebagian saja. Secara teoritis, jumlah maksimum energi angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik adalah sebesar 59,3%, sesuai dengan teori Betz Limit. Efisiensi turbin angin dapat ditentukan dengan membandingkan rasio antara koefisien daya turbin dengan Betz limit, di mana nilai Betz limit adalah $16/27 = 0,593$. Nilai efisiensi turbin angin berdasarkan metode Betz limit dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [13]:

$$Cp = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Cp = \frac{P_{turbin}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

C_p = Koefisien Daya

P_{turbin} = Daya Angin (Watt)

P_{angin} = Daya Mekanik (Watt)

2.2.1.1 Potensi Energi Angin

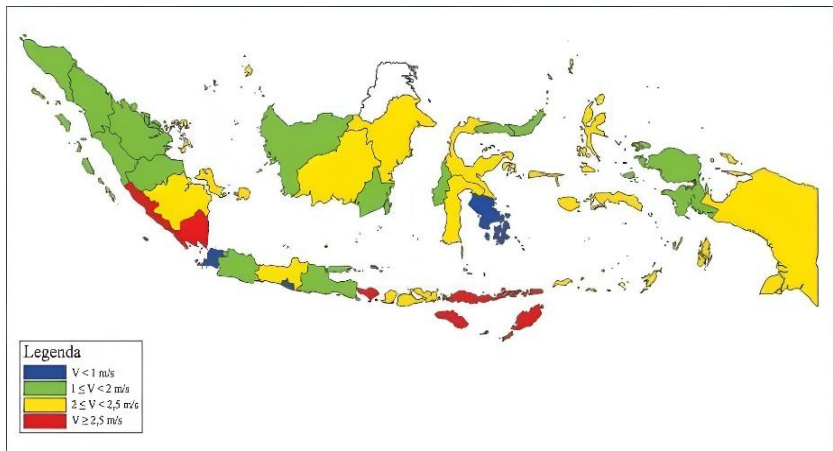
Potensi energi angin di Indonesia dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 3-5 m/s dan total daya yang dapat dibangkitkan sebesar 9.290 MW, ini merupakan salah satu potensi energi yang cukup besar, mengingat di Indonesia hanya memanfaatkannya sekitar 1% dari potensinya. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat peluang yang sangat besar untuk mengembangkan energi angin sebagai salah satu sumber energi alternatif [11].

Tabel 2. 1 Kelas Angin dan Kecepatan Angin[11]

Kelas Angin	Kecepatan Angin (m/d)	Kecepatan Angin (km/jam)	Kecepatan Angin (knot/jam)
1	0.3 – 1.5	1 – 5.4	0.58 – 2.92
2	1.6 – 3.3	5.5 – 11.9	3.11 – 6.42
3	3.4 – 5.4	12.0 – 19.5	6.61 – 10.06
4	5.5 – 7.9	19.6 – 28.5	10.7 – 15.4
5	8.0 – 10.7	28.6 – 38.5	15.6 – 20.8
6	10.8 – 13.8	38.6 – 49.6	21.7 – 26.8
7	13.9 – 17.1	49.8 – 61.5	27 – 33.3
8	17.2 – 20.7	61.6 – 74.6	33.5 – 40.2
9	20.8 – 24.5	74.7 – 88.2	40.3 – 47.7
10	24.5 – 28.5	88.4 – 102.8	47.9 – 55.4
11	28.5 – 32.6	102.8 – 117.0	55.4 – 63.4
12	>32.6 – >118	>32.6 – >118	>32.6 – >118
rata - rata	63.4	63.4	63.4

Dari pendefinisian masing-masing kelas untuk kecepatan rata-rata angin seperti pada Tabel 2.1 diatas, kategori angin dengan kecepatan rendah

atau Low Wind Speed (LWS) berada pada klasifikasi kelas 3 dan kelas 4 Pada kelas 2 kecepatan rata-rata angin mencapai 1.6 m/s – 3.3 m/d dan untuk kelas 6 kecepatan angin adalah 10.8 m/d - 13.8 m/d angin [11].



Gambar 2. 1 Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata[14]

Pengkategorian kecepatan angin menurut besar nilai kecepatan angin ke dalam 13 kategori kecepatan angin menurut skala beaufort. Lebih jelas mengenai informasi pengkategorian jenis angin menurut skala beaufort dapat dilihat pada tabel [11].

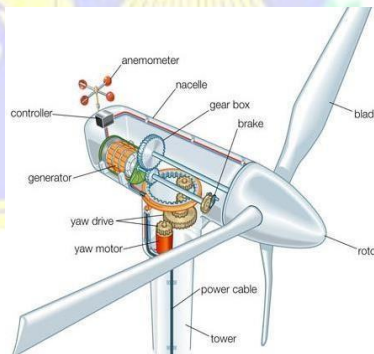
Tabel 2. 2 Kategori Laju Angin[11]

Laju	Aliran	Rata-rata Kelajuan Angin (km/jam)	Laju rata-rata Angin (m/s)
1	Aliran Angin Tenang	<1	<0,277
2	Angin Sedikit tenang	1–5	0,27–1,3
3	Sedikit berhembus	6–11	1,63–3,05
4	Berhembus pelan	12–19	3,33–5,27
5	Angin berhembus sedang	20–29	5,55–8,05

6	Berhembus sejuk	30–39	8,33–10,83
7	Berhembus kuat	40–50	11,11–13,88
8	Mendekati kencang	51–61	14,16–16,94
9	Angin Kencang	62–74	17,22–20,55
10	Kencang sekali	75–87	20,83–24,16
11	Angin Badai	88–101	24,44–28,05
12	Angin Badai dahsyat	102–117	28,33–32,5
13	Angin Badai topan	>118	>32,77

2.2.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang digunakan untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik berupa rotasi pada rotor, yang kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Untuk mencapai efisiensi maksimal 100 persen, turbin angin harus mampu menahan seluruh kecepatan angin yang mengenainya. Turbin angin biasanya memiliki kisaran kecepatan angin tertentu, di mana mereka dapat beroperasi secara optimal. Kecepatan angin yang terlalu rendah tidak cukup untuk memutar bilah turbin, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada turbin. Oleh karena itu, turbin angin dirancang untuk beroperasi dalam rentang kecepatan angin tertentu, dan sistem pengendalian turbin sering kali digunakan untuk mengatur posisi bilah agar tetap efisien dalam menangkap energi kinetik angin yang tersedia [15].



Gambar 2. 2 Turbin Angin[16]

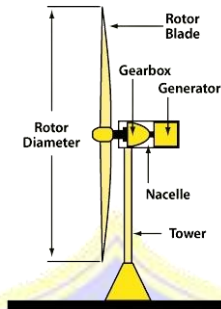
Teknologi turbin angin ini banyak digunakan karena ramah lingkungan, tidak menghasilkan emisi gas buang, serta dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di berbagai skala, mulai dari rumah tangga hingga pembangkit listrik skala besar [3]. Turbin angin juga dapat digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil, baik di pedesaan maupun di lokasi terpencil. Sistem ini biasanya terisolasi dan memasok listrik untuk kebutuhan lokal, seperti penerangan rumah atau pengisian baterai. Sistem energi hibrida angin menggabungkan tenaga angin dengan sumber energi lain, seperti energi surya atau generator berbahan bakar fosil. Kombinasi ini meningkatkan stabilitas dan keberlanjutan pasokan energi, terutama di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama [15].

2.2.2.1 Klasifikasi Turbin Angin

Berdasarkan prinsip aerodinamika, turbin angin dibagi menjadi dua jenis, yaitu drag type dan lift type. Turbin drag type bekerja dengan memanfaatkan gaya hambat dari aliran udara yang mendorong bilah turbin. Jenis ini memiliki torsi awal besar namun kecepatan putaran rendah, sehingga cocok untuk pembangkit listrik kecil atau daerah berangin rendah. Sementara itu, turbin lift type memanfaatkan gaya angkat akibat perbedaan tekanan udara di permukaan bilah, mirip prinsip kerja sayap pesawat. Jenis ini menghasilkan putaran tinggi dan efisiensi energi lebih baik, sehingga umum digunakan pada pembangkit listrik menengah hingga besar. Dilihat dari arah sumbu rotasi rotor, turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal [16].

1. Turbin angin sumbu horizontal (TASH)

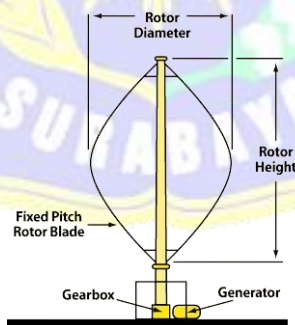
Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh baling-baling angin sederhana, sedangkan turbin besar umumnya menggunakan sensor angin yang terhubung ke servo motor. Sebagian besar turbin memiliki gearbox yang mengubah putaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat. Karena menara dapat menimbulkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah angin. Bilah turbin dibuat kaku agar tidak terdorong ke menara saat angin kencang, serta dipasang di depan menara pada jarak tertentu dengan sedikit kemiringan [17].



Gambar 2. 3 Turbin angin sumbu horizontal (TASH)[16]

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal / tegak (TASV) memiliki poros/ sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama turbin jenis ini adalah mampu menghasilkan daya dari berbagai arah angin. Dengan sumbu vertikal, generator dan gearbox dapat ditempatkan dekat tanah sehingga menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak biasanya ditempatkan di dasar seperti tanah atau di atap bangunan. Namun, kecepatan angin di ketinggian rendah lebih pelan sehingga energi angin yang tersedia lebih sedikit [17].



Gambar 2. 4 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)[16]

Menurut kapasitas terpasangnya, turbin angin dibagi menjadi tiga yaitu golongan kecil, golongan menengah dan golongan besar. Untuk ragam jenis pemakaian turbin dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini [17]:

Tabel 2. 3 Jenis Turbin Angin Berdasarkan Kapasitas[17]

Dasar Kriteria	Penggolongan			
Kapasitas Terpasang	Kecil		Menengah	Besar
	Mikro	Mini	10 kW - 250 kW	250 kW - 2 MW
	Maksimal 100 W	100 W-10 kW		

Komponen Utama Turbin Angin Dalam mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik memerlukan beberapa komponen-komponen yang mempunyai fungsi masing-masing. Komponen-komponen tersebut antara lain [16]:

1. Sudu

Sudu atau baling – baling pada turbin angin sendiri biasanya dihubungkan dengan rotor pada turbin angin. Sudu merupakan salah satu bagian dari turbin angin yang memiliki fungsi menerima energi kinetik dari angin dan merubahnya menjadi energi gerak putar pada poros penggerak.

2. Rotor

Rotor adalah komponen turbin angin yang terdiri dari bilah kipas dan penghubung poros, berfungsi menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi gerak putar.

3. Gear box

Gearbox merupakan komponen yang membantu mengatur kecepatan turbin. Gearbox turbin angin biasanya dapat meningkatkan kecepatan dari 30-60 rpm menjadi 1000-1800 rpm untuk memutar generator. Gearbox generator turbin angin (PLTB) biasanya menggunakan gearbox tipe pelat.

4. Tower

Tower atau tiang penyangga adalah bagian struktural dari turbin angin horizontal dan berfungsi sebagai struktur penyangga utama untuk bilah, poros, dan generator dari komponen sistem yang terhubung.

5. Generator

Generator adalah suatu alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik dapat berasal dari panas, air, uap, dan sebagainya. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berupa arus bolak-balik (alternating current) atau arus searah (direct current).

2.2.3 Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \phi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam listrik arus bolak balik (AC) atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \phi$ [18].

$$PF = \frac{P(\text{Watt})}{S(\text{VA})} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

PF = Faktor Daya ($\cos \phi$)

P = Daya Aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

Faktor daya bisa dikatakan sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien jaringan yang kita miliki dalam menyalurkan daya yang bisa kita manfaatkan. Faktor daya yang bagus sering dinyatakan dalam bentuk desimal atau persen, dengan nilai maksimum 1 (atau 100%), sebaliknya semakin rendah faktor daya (mendekati 0) maka semakin sedikit daya yang bisa dimanfaatkan dari sejumlah daya nyata yang sama [18].

Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha didalam sistem tenaga listrik. Satuan untuk daya listrik umumnya adalah Watt. Daya pada suatu sistem tegangan bolak-balik (AC) dikenal dengan tiga macam yaitu [19]:

1. Daya aktif

Daya aktif merupakan rata-rata daya yang nyata antara ditransmisikan atau dikonsumsi beban. Energi panas, energi kinetik, energi cahaya merupakan contoh-contoh dari daya aktif tersebut. Satuan dari daya aktif adalah watt (W). Berikut merupakan persamaan dari daya aktif adalah [20]:

$$P = V \times I \times \cos\phi \text{ (1 fasa)} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin\phi \text{ (3 fasa)} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

P = Daya aktif (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos\phi$ = Faktor daya

V_L = Tegangan Jaringan (Volt)

I_L = Arus Jaringan (Ampere)

2. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan total daya yang dibutuhkan dalam proses pembentukan medan magnet. Dari proses tersebut akan terbentuk suatu fluks medan magnet. Transformator, lampu pijar, inverter merupakan contoh-contoh yang menimbulkan daya reaktif. Daya reaktif bisa dikatakan juga sebagai hasil perkalian tegangan dan arus. Satuan dari daya reaktif adalah VAR (Volt Ampere Reaktif). Berikut merupakan persamaan dari daya reaktif [20]:

$$Q = V \times I \times \sin\phi \text{ (1 fasa)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin\phi \text{ (3 fasa)} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos\phi$ = Faktor daya

V_L = Tegangan Jaringan (Volt)

I_L = Arus Jaringan (Ampere)

3. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus listrik. atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Satuan dari daya semu adalah VA (Volt Ampere). Berikut merupakan persamaan dari daya semu [20]:

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

S = Daya semu (VA)

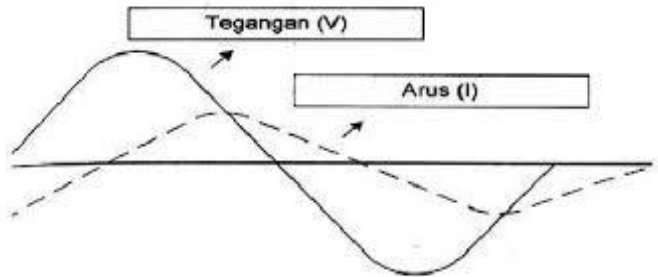
V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Faktor daya dibagi menjadi dua yaitu faktor daya tertinggal (lagging) dan faktor daya mendahului (leading). Berikut adalah penjelasan mengenai kedua faktor daya tersebut [19].

1. Faktor Daya Tertinggal (Lagging)

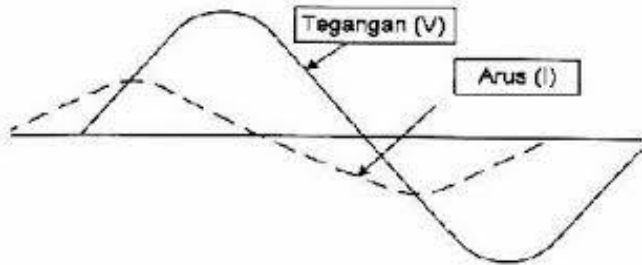
Faktor daya lagging menunjukkan kondisi disaat beban bersifat induktif dan memerlukan daya reaktif dari jaringan. Nilai $\cos \phi$ pada kondisi lagging akan bernilai positif. Kemudian pada gelombang sinus, arus (I) akan tertinggal dengan tegangan (V) atau tegangan (V) akan mendahului arus (I) dengan sudut ϕ . Gambar 1 adalah gelombang sinus pada faktor daya lagging [19].



Gambar 2. 5 Faktor Daya Lagging[19]

2. Faktor Daya Mendahului (Leading)

Faktor daya leading menunjukkan kondisi disaat beban bersifat kapasitif dan memberikan daya reaktif ke jaringan. Nilai $\cos \phi$ pada kondisi leading akan bernilai negatif. Kemudian pada gelombang sinus, Arus (I) akan mendahului tegangan (V) atau tegangan (V) akan tertinggal terhadap arus (I) sebesar sudut ϕ . Gambar 1.2 adalah gambar gelombang sinus pada faktor daya leading [19].



Gambar 2. 6 Faktor Daya Leading[19]

2.2.3.1 Strategi Perbaikan Faktor Daya

Upaya perbaikan faktor daya dilakukan dengan mengelola komponen reaktif dan induktif dalam jaringan listrik. Salah satu cara yang umum adalah mengurangi dominasi beban induktif atau menambah komponen kapasitif yang memiliki sifat faktor daya leading, sehingga dapat menyeimbangkan efek lagging dari beban induktif. Untuk mencapai faktor daya yang mendekati 1, diperlukan langkah perbaikan tanpa mengubah daya aktif (P) dan daya semu (S). Umumnya, perbaikan dilakukan dengan memasang kapasitor sebagai kompensasi kapasitif pada jaringan. Dalam perhitungannya, metode segitiga daya sering digunakan untuk menentukan kebutuhan kapasitor, karena dapat menunjukkan pengaruh daya reaktif terhadap faktor daya dalam sistem arus bolak-balik (AC). hubungan segitiga daya ditentukan dengan persamaan berikut [21]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

S = Daya semu dalam satuan Volt Ampere (VA)

P = Daya aktif dalam satuan Watt (W)

Q = Daya reaktif dalam satuan Volt Ampere Reaktif (VAR)

Faktor daya merupakan indikator efisiensi penyaluran daya pada sistem jaringan listrik. Nilai faktor daya yang mendekati 1 menunjukkan bahwa sistem bekerja lebih efisien, sedangkan nilai yang semakin kecil menandakan berkurangnya bagian energi yang benar-benar dimanfaatkan oleh beban. Semakin tinggi faktor daya, semakin optimal pemanfaatan energi listrik dan semakin sedikit energi yang terbuang dalam bentuk daya reaktif. Dalam upaya perbaikan faktor daya, daya semu berperan sebagai penentu efisiensi sistem secara keseluruhan. Peningkatan faktor daya ($\cos \phi$) akan menurunkan kebutuhan daya semu, mengurangi beban total dan arus yang mengalir, serta meningkatkan kinerja instalasi listrik baik dari sisi efisiensi

maupun stabilitas tegangan. Oleh karena itu, perhitungan daya semu sebelum dan sesudah perbaikan sangat penting dilakukan untuk menentukan kapasitas kapasitor bank yang sesuai dalam proses kompensasi daya reaktif [21].

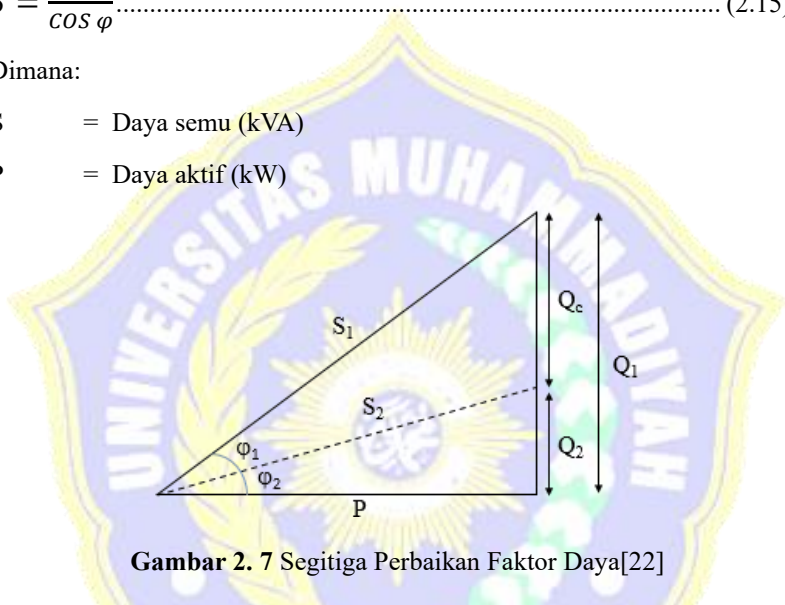
Untuk mendapatkan nilai daya semu setelah perbaikan dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [21]:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

S = Daya semu (kVA)

P = Daya aktif (kW)



Gambar 2. 7 Segitiga Perbaikan Faktor Daya[22]

Penentuan nilai kapasitansi pada kapasitor bank dimulai dengan menghitung besar daya reaktif kompensator (Qc). Secara prinsip, untuk meningkatkan faktor daya (power factor) agar mendekati nilai 1, kapasitor daya arus bolak-balik (AC) atau kapasitor bank perlu memiliki daya reaktif kompensator (Qc) yang sebanding dengan daya reaktif (Q) pada sistem yang akan diperbaiki faktornya. Menghitung daya reaktif sebelum perbaikan (Q1) dan daya reaktif yang ingin dicapai (Q2) dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut [22]:

$$Q_1 = P \times \tan \varphi_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$Q_2 = P \times \tan \varphi_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

Sehingga Untuk menghitung daya reaktif kompensator yang dibutuhkan terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan, dapat menggunakan persamaan berikut [21]:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Atau [22]:

$$Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana:

Q_C = Kapasitas kapasitor bank

Q_1 = Daya reaktif dengan faktor daya mula-mula

Q_2 = Daya reaktif dengan daya tujuan

φ_1 = Sudut sebelum perbaikan

φ_2 = Sudut setelah perbaikan

Untuk menghitung sudut fasa bisa menggunakan persamaan berikut:

$$\varphi = \cos^{-1}(PF) \dots\dots\dots (2.20)$$

Kemudian untuk menentukan besar kapasitansi pada kapasitor, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [22]:

$$C = \frac{Q_C}{2\pi \times f \times V^2} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana:

Q_C = Daya reaktif yang dikompensasi (kVAR)

C = Kapasitansi Kapasitor (μF)

f = Frekuensi (Hz)

V = Tegangan (Volt)

Adapun beberapa strategi yang dapat diterapkan untuk melakukan perbaikan faktor daya antara lain sebagai berikut :

1. Mengoptimalkan pengoperasian beban motor agar tidak bekerja melebihi kapasitas atau beban yang diperlukan.
2. Menghindari penggunaan peralatan listrik pada tegangan yang melampaui batas operasional normalnya.
3. Melakukan penggantian terhadap motor-motor yang kinerjanya menurun akibat faktor usia atau penurunan efisiensi.
4. Menerapkan pemasangan kapasitor pada sistem arus bolak-balik (AC) untuk mengurangi pengaruh medan yang ditimbulkan oleh daya reaktif (Q).

2.2.3.2 Standard Nilai Faktor Daya

Untuk menjaga kualitas dan efisiensi sistem tenaga listrik, pengaturan mengenai batas minimum faktor daya telah ditetapkan dalam beberapa standar nasional. Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2016 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero), dinyatakan bahwa kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) akan dikenakan biaya tambahan apabila faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,85. Ketentuan ini bertujuan untuk mendorong konsumen, khususnya pelanggan industri dan bisnis, agar menjaga efisiensi sistem listrik melalui pengendalian beban induktif dan pemasangan kapasitor sebagai kompensasi daya reaktif [23].

Selain itu, menurut Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011, kondisi faktor daya juga tidak boleh kurang dari 0,85. Ketentuan tersebut dibuat untuk memastikan bahwa sistem instalasi listrik bekerja dengan efisien, tidak menimbulkan rugi daya yang berlebihan, serta menjaga kestabilan tegangan pada jaringan distribusi PLN [24].

2.2.4 Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah peralatan listrik yang bersifat kapasitif, tersusun dari beberapa kapasitor yang dihubungkan secara seri atau paralel terhadap sumber tegangan untuk memperoleh nilai kapasitas tertentu. Parameter yang digunakan biasanya dinyatakan dalam satuan VAR atau KVAR, meskipun pada setiap kapasitor tercantum nilai kapasitansi dalam satuan farad atau mikrofard [6].



Gambar 2. 8 Kapasitor Bank[6]

Dari beberapa jenis kapasitor, kapasitor bank memiliki satuan yang berbeda, meskipun kapasitor bank dan kapasitor lainnya yang ada di perangkat elektronik seringkali merujuk pada penggunaan yang berbeda, pada dasarnya mereka semua adalah kapasitor dan memiliki prinsip dasar serta karakteristik fundamental yang sama. Kapasitor bank dirancang untuk aplikasi daya tinggi (industri, komersial, utilitas), memiliki nilai kapasitansi sangat besar (sering diukur dalam kVAR pada tegangan tertentu, bukan hanya Farad). Dalam sistem AC, kapasitor menghasilkan daya reaktif, daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor diukur dalam VAR (Volt-Ampere Reaktif) atau kVAR (kiloVar) [6].

$$Q = \frac{V^2}{X_C} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$= 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana:

Q = Daya reaktif (VAR atau kVAR)

V = Tegangan RMS melintasi kapasitor (Volt)

X_c = Impedansi kapasitif (Ohm)

f = Frekuensi sumber AC (Hertz)

C = Kapasitansi (Farad)

Pada intinya, kapasitor bank hanyalah kumpulan kapasitor individual yang bekerja bersama untuk mencapai tujuan yang lebih besar, terutama dalam pengelolaan daya reaktif dan stabilitas tegangan pada skala sistem tenaga [6].

Prinsip kerja kapasitor bank adalah dengan memanfaatkan kapasitor yang dipasang secara paralel pada rangkaian beban untuk memperbesar faktor daya (PF). Bila rangkaian itu diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan ke luar dari kapasitor dan mengalir ke dalam rangkaian yang memerlukannya dengan demikian pada saat itu kapasitor membangkitkan daya reaktif. Jika tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali elektron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron (I_c) berarti sama juga kapasitor menyuplai daya reaktif ke beban. Keran beban bersifat induktif (+) sedangkan daya reaktif bersifat kapasitor (-) akibatnya daya reaktif yang berlaku menjadi kecil [25].

Proses pengurangan tersebut terjadi karena kedua beban, yaitu induktor dan kapasitor, memiliki arah daya reaktif yang saling berlawanan. Akibatnya, daya reaktif total dalam sistem menjadi lebih kecil. Ketika daya reaktif menurun sementara daya aktif tetap, maka faktor daya (power factor) meningkat. Peningkatan faktor daya ini menyebabkan daya semu (kVA) berkurang, sehingga konsumsi energi listrik menjadi lebih efisien dan kerusakan peralatan listrik bisa diminimalisir. Dengan kata lain, penggunaan kapasitor bank membantu menyeimbangkan komponen reaktif sistem sehingga kinerja jaringan listrik menjadi lebih optimal [4].

Berikut ini adalah beberapa kegunaan dari kapasitor bank [26]:

1. Memperbaiki Power Factor (faktor daya) PF.
2. Menyuplai daya reaktif sehingga mamaksimalkan penggunaan daya komplek (KVA).
3. Mengurangi jatuh tegangan (Voltage drop).
4. Menghindari kelebihan beban transformer.
5. Memberikan tambahan daya tersedia.
6. Menghindari kenaikan arus/suhu pada kabel.
7. Menghemat daya / efesiensi.
8. Mengawetkan instalasi & Peralatan Listrik.
9. Kapasitor bank juga mengurangi rugi-rugi lainnya pada instalasi listrik.

Terdapat tiga metode pemasangan kapasitor yang dapat diterapkan sesuai dengan fungsi dan tujuan penggunaannya, yaitu [27]:

a. Global Compensation

Pada metode ini, kapasitor dipasang pada panel induk (Main Distribution Panel/MDP). Penurunan arus hanya terjadi pada penghantar antara panel dengan transformator. Sementara itu, arus yang melewati jalur setelah MDP tidak mengalami penurunan. Dengan demikian, rugi-rugi daya akibat disipasi panas pada penghantar setelah MDP tidak mengalami perubahan yang signifikan.

b. Group Compensation

Pada metode ini, kapasitor yang terdiri dari beberapa unit panel dipasang pada panel distribusi sekunder (Sub Distribution Panel/SDP). Metode ini sangat cocok digunakan pada instalasi industri dengan kapasitas beban terpasang besar, mencapai ribuan kVA, terutama jika jarak antara panel MDP dan SDP cukup jauh.

c. Individual Compensation

Dalam metode ini, kapasitor dipasang langsung pada masing-masing beban yang memiliki daya cukup besar. Secara teknis, metode ini dianggap lebih efektif dan efisien, namun membutuhkan ruang atau tempat khusus untuk pemasangan kapasitor, sehingga dapat mempengaruhi nilai estetika instalasi.

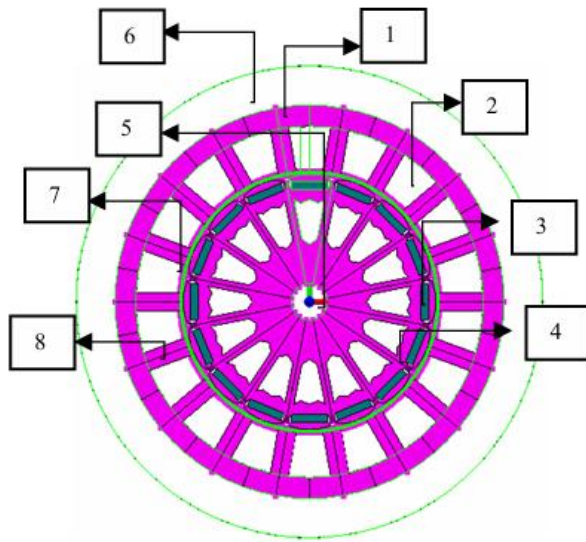
2.2.5 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) adalah generator sinkron yang menghasilkan medan eksitasi melalui magnet permanen, bukan melalui kumparan sehingga fluks magnetik dihasilkan oleh medan magnet. Penggunaan PMSG memberikan keunggulan berupa efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, perawatan yang lebih mudah, serta kemampuan menghasilkan daya yang stabil pada berbagai kondisi operasi [28].



Gambar 2. 9 Desain PMSG[29]

Jenis generator ini memiliki desain konstruksi hampir mendekati kesamaan dengan generator pada umumnya. Perbedaan antara PMSG dengan generator sinkron konvensional lainnya terletak pada rotornya. Generator magnet permanen flux radial dapat beroperasi pada putaran tinggi dan putaran rendah. Keunggulannya terletak pada kemudahan dalam instalasi magnet permanen pada rotor dan biasa dimanfaatkan pada pembangkit listrik di daerah yang memiliki kecepatan putaran yang rendah. Generator sinkron magnet permanen dibangkitkan oleh magnet permanen sebagai penghasil medan magnet pada rotor. Flux magnet dihasilkan dari magnet permanen yang mengalir melalui rotor melewati air gap menuju ke stator sehingga menghasilkan gaya gerak magnet (GGM) dari kutub magnet secara axial dan radial. Generator jenis ini banyak sekali dijadikan bahan penelitian karena memiliki keunggulan yang sangat signifikan dan biasanya digunakan untuk aplikasi wind turbine [29].



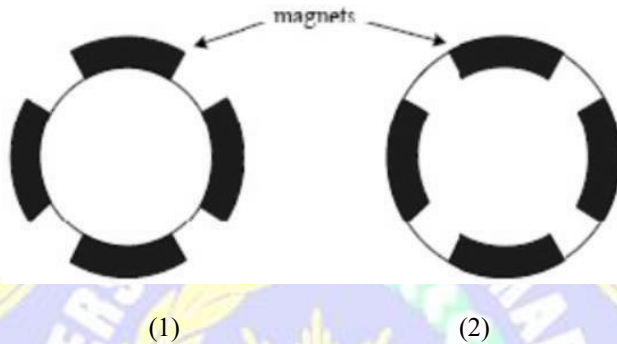
Gambar 2. 10 Kontruksi PMSG[29]

Kontruksi dari PMSG tidak serumit yang dibayangkan seperti halnya generator magnet induksi. Pada rotor PMSG magnet yang digunakan adalah magnet yang memiliki kekuatan yang tinggi [29].

Adapun keterangan pada Gambar 2.10 yaitu [29]:

1. Stator adalah komponen PMSG yang tidak bergerak.
2. Slot adalah tempat untuk menempatkan lilitan tembaga.
3. Permanen magnet berfungsi sebagai eksitasi fluks pada PMSG.
4. Fluks barrier berfungsi sebagai pengeblok fluks magnet pada rotor.
5. Rotor adalah komponen yang bergerak pada PMSG.
6. Air box adalah ruang udara dalam ruang PMSG.
7. Air gap adalah celah udara antara rotor dengan stator.
8. Teeth adalah dinding batas antar slot.

Berdasarkan arah aliran fluks yang dihasilkan oleh magnet permanen yang terletak pada rotor PMSG maka generator sinkron ini dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu generator sinkron dengan medan radial dan generator sinkron dengan medan aksial. Berdasarkan letak magnet permanen pada rotor maka PMSG tipe radial dikelompokkan menjadi 2, yaitu [28]:



Gambar 2. 11 Tampilan Melintang dari PMSG radial[28]

1. Surface Mounted PMSG

Surface Mounted PMSG merupakan jenis generator sinkron dengan magnet permanen yang dipasang langsung pada permukaan rotor. Fluks magnetik pada tipe ini mengalir secara langsung melalui celah udara (air gap), sehingga menghasilkan struktur yang relatif sederhana dan memiliki efisiensi tinggi. Jenis ini umumnya digunakan pada turbin angin kecepatan rendah (direct-drive) karena memiliki konstruksi yang ringan dan mudah diproduksi. Namun, kelemahannya terletak pada ketahanan mekanik yang lebih rendah terhadap gaya sentrifugal akibat posisi magnet yang berada di permukaan rotor.

2. Surface Inset PMSG

Surface Inset PMSG merupakan jenis generator di mana magnet permanen ditempatkan sebagian ke dalam permukaan rotor, sehingga posisi magnet lebih terlindungi secara mekanis. Desain ini memungkinkan jalur fluks magnetik yang lebih kuat dan menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan tipe surface mounted. Meskipun proses pembuatannya lebih kompleks dan memerlukan biaya yang lebih tinggi, tipe ini lebih sesuai digunakan pada sistem dengan kecepatan menengah hingga tinggi, yang menuntut stabilitas dan kekuatan mekanik yang lebih baik.

2.2.6 Sensor Infrared FC-51

Sensor Infrared FC-51 merupakan modul sensor dengan pantulan cahaya inframerah yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan atau pergerakan objek pada jarak pendek. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan intensitas cahaya inframerah yang dipantulkan oleh permukaan objek di depannya. Ketika suatu benda melewati atau berada pada area deteksi sensor, karakteristik pantulan cahaya inframerah akan berubah, sehingga modul FC-51 menghasilkan sinyal logika digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler sebagai indikator keberadaan objek [30].



Gambar 2. 12 Sensor Infrared FC-51[30]

Secara konstruktif, sensor infrared FC-51 tersusun atas dua komponen utama, yaitu pemancar inframerah (*IR Transmitter*) berupa fotodioda yang berfungsi memancarkan sinar inframerah secara kontinu dan penerima inframerah (*IR Receiver*) menggunakan fototransistor untuk menangkap cahaya pantulan dari objek lalu mengubahnya menjadi arus listrik yang diperkuat oleh struktur transistor. Mekanisme ini membuat fototransistor memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan fotodioda tunggal, meskipun dengan waktu respons yang relatif lebih lambat [31].

Perubahan arus listrik tersebut selanjutnya diproses oleh rangkaian komparator pada modul FC-51 untuk menghasilkan keluaran sinyal digital HIGH atau LOW sebagai indikator keberadaan objek. Secara umum, sensor FC-51 memiliki jarak deteksi sekitar 2–30 cm yang dapat disesuaikan melalui trimmer potentiometer untuk mengatur nilai ambang sensitivitas. Dengan karakteristik ini, sensor FC-51 banyak digunakan pada aplikasi pendeteksian objek, pengukuran kecepatan putar (RPM), dan sistem otomasi sederhana berbasis deteksi non-kontak [31].

2.2.7 Sensor Arus ZMCT103C

Sensor ZMCT103C merupakan sensor arus berbasis transformator arus (current transformer) yang memiliki konstruksi ring-core berwarna hitam dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada konduktor primer akan menimbulkan fluks magnet yang selanjutnya menginduksi lilitan sekunder pada sensor, sehingga menghasilkan arus keluaran sekunder dengan nilai maksimum sekitar 5 mA. Besarnya arus keluaran ini sebanding dengan arus primer yang terukur, sehingga sensor ZMCT103C dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan arus listrik secara akurat pada sistem AC satu fase [32].



Gambar 2. 13 Sensor Arus ZMCT103C[32]

Untuk memproses sinyal keluaran yang masih relatif kecil, sensor ZMCT103C dilengkapi dengan rangkaian pengkondisi sinyal yang menggunakan penguat operasional (op-amp) dengan IC LM358 sebagai penguat dan penyesuai level sinyal. Rangkaian ini berfungsi mengubah sinyal arus hasil induksi menjadi sinyal tegangan yang lebih stabil dan mudah dibaca oleh sistem pengukuran atau mikrokontroler. Dengan konfigurasi tersebut, sensor ZMCT103C mampu melakukan pengukuran arus dan tegangan AC satu fase secara tidak langsung tanpa harus memutus jalur penghantar utama. Metode pengukuran non-intrusif ini memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi serta meminimalkan gangguan terhadap sistem listrik yang diukur [32].

2.2.8 Sensor Tegangan ZMPT101B

Sensor ZMPT101B merupakan modul sensor tegangan yang digunakan untuk mengukur tegangan bolak-balik (AC) dengan rentang pengukuran hingga 250V atau lebih. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada penggunaan *step-down transformer* berukuran mikro yang berfungsi untuk menurunkan tegangan masukan dari sumber tegangan tinggi, seperti 220 VAC menjadi tegangan yang lebih rendah. Tegangan yang telah diturunkan selanjutnya diproses oleh rangkaian penguat operasional (*operational amplifier*) sehingga menghasilkan sinyal keluaran yang stabil dan seimbang terhadap besar tegangan masukan. Dengan demikian, sensor ini mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat serta konsisten terhadap perubahan nilai tegangan pada sisi input [33].



Gambar 2. 14 Sensor Tegangan ZMPT101B[33]

Selain memiliki ukuran yang relatif kecil, modul sensor tegangan ZMPT101B juga memiliki tingkat akurasi yang tinggi, stabilitas keluaran yang baik, serta kesesuaian dengan sistem berbasis mikrokontroler karena memiliki keluaran sebesar 5 VDC. Oleh karena itu, sensor ZMPT101B banyak diaplikasikan pada sistem pengukuran daya dan energi listrik, perangkat rumah tangga berbasis otomasi (*smart home*), serta sistem pemantauan tegangan pada berbagai peralatan industri [33].

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

