

BAB II

KERANGKA TEORITIS DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1. Kerangka Teoritis

2.1.1. Unjuk Kerja Kompensator Daya

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, pengertian *unjuk kerja* adalah cara bekerja, perilaku, penampilan³. Sedangkan kompensator dengan kata dasar *kompensasi* yang artinya ganti rugi⁴. Dan *daya listrik* didefinisikan sebagai laju penyerapan energi listrik dalam instalasi listrik⁵. Jadi, pengertian unjuk kerja kompensator daya adalah cara kerja atau perilaku yang dapat diperlihatkan oleh kompensator daya dalam mengkompensasi atau mengganti kerugian-kerugian penyerapan energi listrik yang terjadi dalam suatu instalasi listrik.

Cara kerja yang dilakukan kompensator daya dalam hal mengganti kerugian-kerugian penyerapan energi listrik adalah dengan memperbaiki faktor daya agar mendekati nilai ideal ($pf \approx 1$). Perbaikan faktor daya dilakukan dengan pemasangan komponen kapasitif secara paralel untuk jenis beban induktif (fasa lagging) dan pemasangan komponen induktif untuk jenis beban yang bersifat kapasitif (fasa leading).

³ Kemdiknas, *Kamus Besar Bahasa Indonesia Daring*, (Dikutip pada tanggal 5 November 2011 dari website <http://bahasa.kemdiknas.go.id/kbbi/index.php>, 2008).

⁴ *Ibid.*

⁵ Van Valkenburg, 1994, *Analisis Jaringan Listrik*, (Jakarta: Erlangga), 319

2.1.1.1. Jenis Beban pada Tegangan Bolak-Balik

2.1.1.1.1. Beban Resistif

Beban resistif (R) yaitu beban yang sifatnya menahan aliran arus listrik⁶. Beban resistif hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu. Tegangan dan arus sefasa. Persamaan daya adalah:

$$P = V \cdot I$$

Keterangan :

P = daya aktif, dalam watt

V = tegangan catu, dalam volt

I = arus beban, dalam amper

Beban resistor yang terhubung dengan sumber tegangan bolak-balik, maka tegangan pada ujung-ujung resistor dapat dinyatakan dengan rumus⁷:

$$v_R = RI \cos \omega t$$

Dengan mengabaikan GGL induksi yang timbul pada resistor, besarnya arus listrik yang mengalir melalui resistor dapat ditentukan dengan persamaan:

$$i = \frac{V}{R} \cos \omega t$$

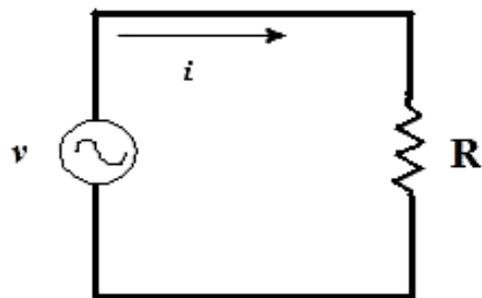
Dalam persamaan arus untuk beban resistif tampak bahwa kuat arus listrik yang mengalir melalui resistor juga merupakan fungsi

⁶ Trevor Linsley, 2004, *Instalasi Listrik Tingkat Lanjut (Edisi Ketiga)*, Jakarta: Erlangga, 112

⁷ Mahmood Nahvi & Joseph E, 2003, *Rangkaian Listrik (Edisi Keempat)*, Bandung: Erlangga, 126

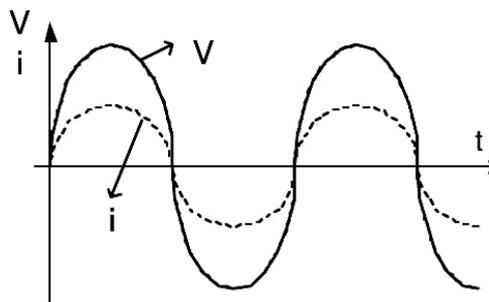
sinusoidal. Jadi arus listrik pada beban resistif juga merupakan arus bolak-balik.

Gambar 2.1. melukiskan sebuah rangkaian induktor yang ujung-ujungnya dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik.

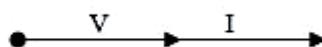


Gambar 2.1. Beban Resistif pada Tegangan AC

Gambar 2.2. memperlihatkan grafik yang melukiskan tegangan bolak-balik dan kuat arus listrik bolak-balik dalam suatu sistem koordinat yang sama.



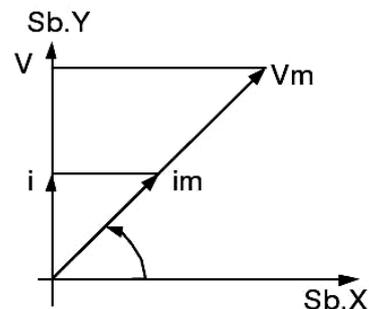
Gambar 2.2. Kurva V dan I untuk Beban Resistif.



Gambar 2.3. Grafik Hubungan V dan I pada Beban Resistif

Dari *gambar 2.2.* tampak bahwa tegangan dan arus mencapai nilai maksimum, nol dan minimum pada saat yang bersamaan. Pada keadaan demikian, dikatakan bahwa tegangan dan arus mempunyai fase yang sama (sefase).

Cara lain untuk memperlihatkan hubungan antara tegangan dan arus dapat dilakukan dengan melukiskan dengan diagram fasor, seperti yang diperlihatkan dalam *gambar 2.4.*



Gambar 2.4. Diagram Fasor Beban Resistif.

Pada penggambaran dengan fasor mempunyai ketentuan bahwa :

(1) panjang fasor menyatakan tegangan dan arus bolak-balik, yakni V_m dan i_m . (2) Proyeksi menyatakan nilai-nilai sesaat dari tegangan dan arus bolak-balik, yaitu : $V = V_m \cdot \sin \omega t$ dan $i = i_m \cdot \sin \omega t$

2.1.1.1.2. Beban Induktif (L)

Beban induktif (L) yaitu beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti coil, transformator, dan

solenoida⁸. Beban induktif dapat mengakibatkan pergeseran fasa (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat *lagging*. Penyebab arus menjadi lagging terhadap tegangan adalah energi yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban induktif menyerap daya aktif dan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Keterangan:

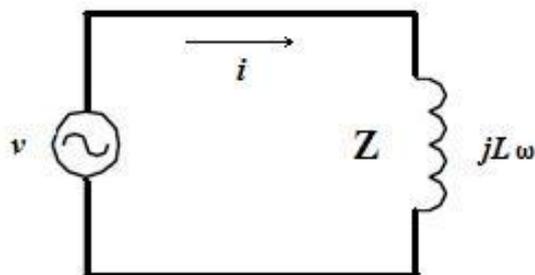
P = daya aktif dalam *watt*

V = tegangan catu dalam *volt*

I = arus beban dalam *amper*.

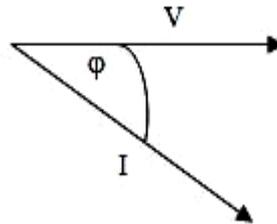
φ = sudut antara arus dan tegangan dalam *derajat*

Gambar 2.5. melukiskan sebuah rangkaian induktor yang ujung-ujungnya dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik serta grafik hubungan antara arus dengan tegangan yang terjadi pada rangkaian induktor ketika dicatu dengan sumber tegangan bolak-balik.



Gambar 2.5. Beban Induktif pada Sumber Tegangan AC

⁸ Alto Belly dkk, 2010, *Daya Aktif, Reaktif & Nyata*, (Jakarta: Universitas Indonesia), 14



Gambar 2.6. Grafik Arus dan Tegangan Pada Beban Induktif

Beda tegangan bolak-balik pada ujung-ujung rangkaian induktor dinyatakan dengan ⁹: $v_L = \omega LI \cos(\omega t + 90^\circ)$

Apabila induktor mempunyai induktansi sebesar L , maka berdasar Hukum Lenz dinyatakan dengan persamaan :

$$V = L \frac{di}{dt}$$

Sehingga : $L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t$

$$di = \frac{V_m}{L} \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

$$i = \int \frac{V_m}{L} \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

Sehingga arus listrik yang mengalir : $i = \frac{V_m}{\omega L} \cos \omega t$

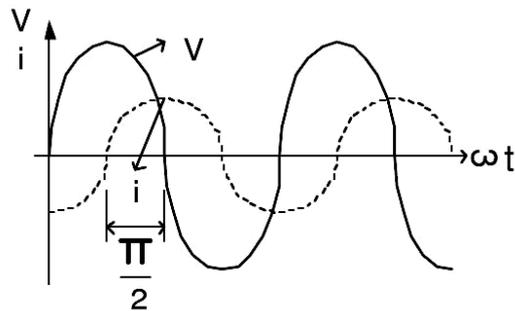
dengan menggunakan fungsi trigonometri, arus listrik dapat dituliskan

kembali dengan persamaan : $i = i_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$

besarnya $X_L = \omega L$ dikenal dengan sebagai *reaktansi induktif*¹⁰. Dalam sistem SI, satuan X_L adalah Ohm (Ω).

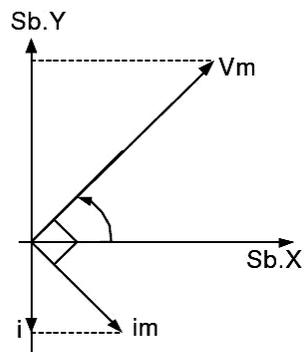
⁹ Mahmood Nahvi & Joseph E, *Op-Cit*, 126

Gambar 2.7. melukiskan diagram hubungan antara tegangan dan arus untuk rangkaian induktor (L) dalam sebuah sistem koordinat yang sama.



Gambar 2.7. Kurva Hubungan V dan I Beban Induktif

Dari *gambar 2.7.* tampak bahwa tegangan dan arus berbeda fase sebesar $\pi/2$. Dalam diagram fasor, hubungan tegangan dan arus untuk rangkaian induktor diperlihatkan oleh *gambar 2.8.*



Gambar 2.8. Diagram Fasor Beban Induktif.

¹⁰ Tim Penyusun, 2003, *Dasar Rangkaian Listrik*, Yogyakarta: Modul Proyek Pengembangan Kurikulum Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan, 27

2.1.1.1.3. Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif (C) yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) pada suatu sirkuit¹¹. Komponen kapasitif dapat menyebabkan arus *leading* terhadap tegangan dan menyerap daya aktif serta mengeluarkan daya reaktif.

Persamaan daya aktif untuk beban kapasitif adalah:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Keterangan:

P = daya aktif dalam *watt*

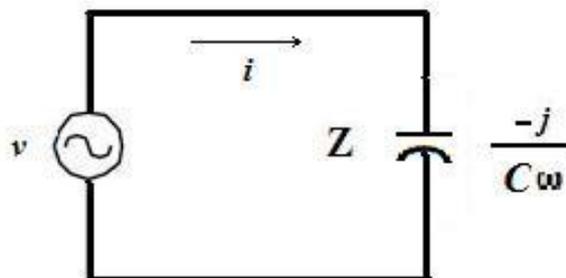
V = tegangan catu dalam *volt*

I = arus beban dalam *amper*.

φ = sudut antara arus dan tegangan

Sebuah kapasitor dengan kapasitansi C dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, didapatkan tegangan kapasitor¹²:

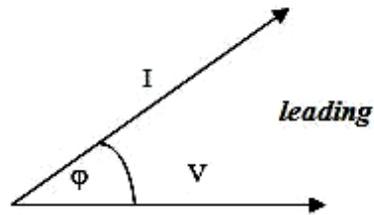
$$v_C = \frac{I}{\omega C} \cos(\omega t - 90^\circ)$$



Gambar 2.9. Beban Kapasitif pada Sumber Tegangan AC

¹¹ *Ibid*, 28

¹² Mahmood Nahvi & Joseph E, *Op-Cit*, 126



Gambar 2.10. Grafik Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif

Berdasarkan definisi kapasitansi, $Q = V \cdot C = V_m \cdot C$ serta terkait definisi arus listrik (i), merupakan turunan pertama dari muatan Q terhadap waktu (t), maka diperoleh persamaan:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$i = \omega V_m C \sin \omega t$$

$$= \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t$$

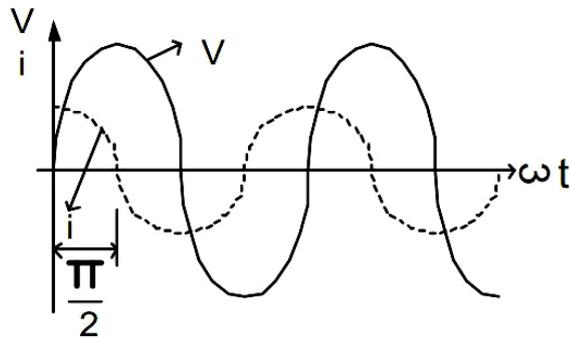
$$= \frac{V_m}{X_C} \cos \omega t$$

$$i = i_m \cos \omega t$$

Besaran $X_C = \frac{1}{\omega C}$, dikenal dengan *Reaktansi Kapasitif*¹³. Dalam

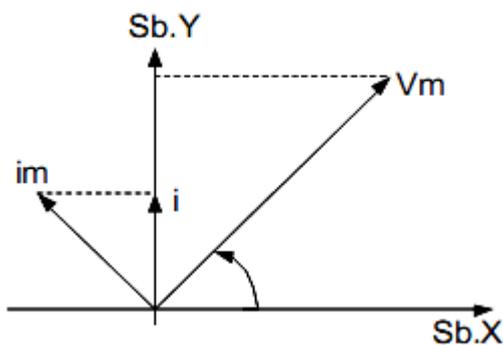
satuan SI, satuan X_C adalah ohm (Ω) sedangkan satuan C adalah farad. Jika grafik hubungan antara tegangan dan arus untuk rangkaian kapasitor digambarkan dalam sebuah sistem koordinat yang sama, maka akan diperoleh kurva tegangan dan arus seperti pada *gambar 2.11*.

¹³ *Ibid*, 29



Gambar 2.11. Kurva Hubungan V dan I Beban Kapasitif

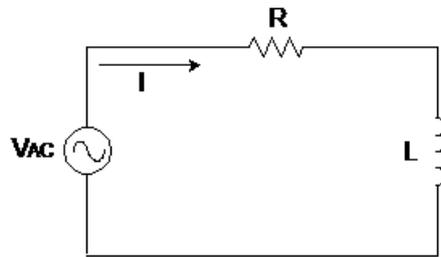
Dari gambar 2.11. bahwa tegangan dan arus berbeda fase $\pi/2$ yaitu arus mendahului tegangan sebesar $\pi/2$. Diagram fasor untuk rangkaian kapasitor C dapat diperlihatkan oleh gambar 2.12.



Gambar 2.12. Diagram Fasor Beban Kapasitif

2.1.1.1.4. Impedansi R-L Seri

Besarnya nilai impedansi total Z pada rangkaian R-L seri seperti gambar 2.13. ditentukan oleh nilai komponen resistif dan nilai reaktansi induktif serta nilai reaktansi induktif tergantung dari nilai induktansi dan frekuensi.



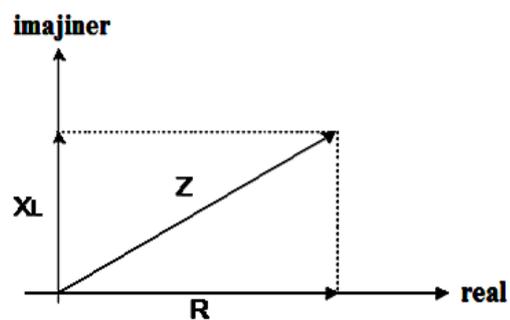
Gambar 2.13. Rangkaian R-L Seri

Hubungan antara resistansi R , reaktansi induktif X_L , dan impedansi Z dirumuskan:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 \quad \text{sehingga} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

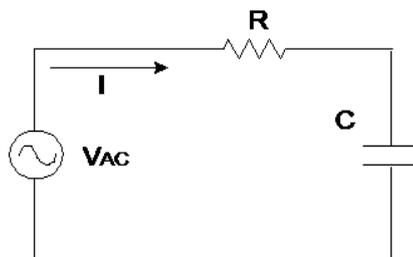
dan nilai dari X_L adalah $X_L = 2\pi fL$

Pada *Gambar 2.14.* terlihat hubungan antara R dan X_L . Sumbu horizontal menunjukkan sumbu nyata (real) untuk nilai dari sebuah resistansi R dengan sudut 0° , sedangkan sumbu vertikal menunjukkan sumbu khayal (imajiner) untuk nilai dari sebuah reaktansi induktif X_L dengan sudut 90° dari sumbu nyata.



Gambar 2.14. Diagram Impedansi R-L Seri

2.1.1.1.5. Impedansi R-C Seri



Gambar 2.15. Rangkaian R-C Seri

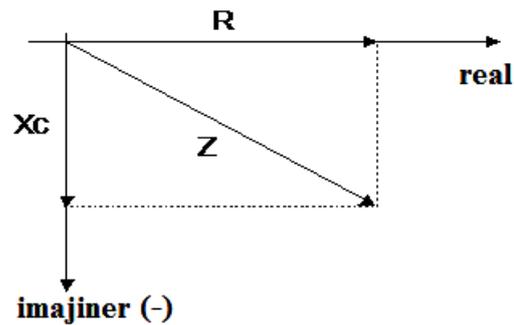
Untuk rangkaian R-C seri seperti pada gambar 2.15., besarnya nilai impedansi total Z ditentukan oleh nilai komponen resistif dan nilai reaktansi kapasitif, Nilai reaktansi kapasitif tergantung dari nilai kapasitansi dan frekuensi.

Hubungan antara resistansi R , reaktansi kapasitif X_C , dan impedansi Z dapat dirumuskan:

$$Z^2 = R^2 + X_C^2 \quad \text{sehingga} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Nilai dari X_C adalah $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

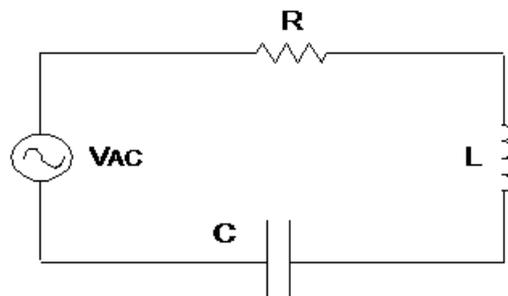
Pada gambar 2.16. terlihat hubungan antara R dan X_C . Sumbu horizontal menunjukkan sumbu nyata (real) untuk nilai dari sebuah resistansi R dengan sudut 0° , sedangkan sumbu vertikal menunjukkan sumbu khayal (imajiner) untuk nilai dari sebuah reaktansi kapasitif X_C dengan sudut -90° dari sumbu nyata.



Gambar 2.16. Diagram Impedansi R-C Seri

2.1.1.1.6. Impedansi R-L-C Seri

Pada rangkaian R-L-C seri arus bolak-balik, analisa rangkaian yang digunakan sama dengan analisa pada rangkaian arus searah, tetapi perlu diperhatikan adanya pengaruh fasor pada komponen reaktif (L atau C) gambar 2.17.



Gambar 2.17. Rangkaian R-L-C Seri

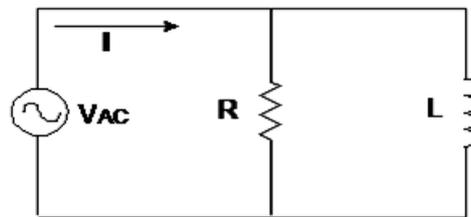
Maka nilai impedansi dari R-L-C seri adalah $Z = R + j(X_L - X_C)$

dengan magnitudo impedansi total dan sudut fase :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \theta^\circ = \operatorname{tgn}^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$$

2.1.1.1.7. Impedansi R-L Paralel

Untuk menganalisa rangkaian paralel pada tegangan bolak-balik seperti *gambar 2.18.*, perlu adanya pengetahuan mengenai analisis rangkaian paralel pada tegangan searah. Pada rangkaian paralel, tegangan yang jatuh pada masing-masing beban sama dengan tegangan sumber, sedangkan arus yang mengalir pada masing-masing beban tergantung pada nilai hambatannya.



Gambar 2.18. Rangkaian R-L Paralel

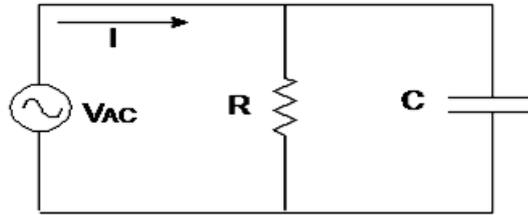
Untuk komponen resistif, hambatannya adalah harga resistansi. Untuk komponen induktif, hambatannya adalah harga reaktansi induktif dan untuk komponen kapasitif hambatannya adalah reaktansi kapasitif. Untuk nilai impedansi dari rangkaian R-L paralel :

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} + \frac{1}{X_L\angle 90^\circ} \quad \text{atau} \quad Z = \frac{R\angle 0^\circ \cdot X_L\angle 90^\circ}{R\angle 0^\circ + X_L\angle 90^\circ}$$

2.1.1.1.8. Impedansi R-C Paralel

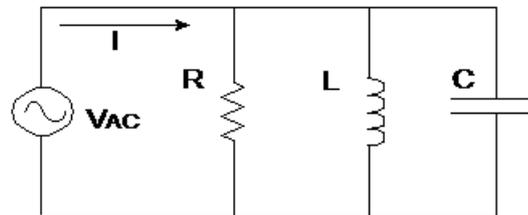
Untuk nilai impedansi dari rangkaian R-C paralel *gambar 2.19.:*

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R\angle 0^\circ} + \frac{1}{X_C\angle -90^\circ} \quad \text{atau} \quad Z = \frac{R\angle 0^\circ \cdot X_C\angle -90^\circ}{R\angle 0^\circ + X_C\angle -90^\circ}$$



Gambar 2.19. Rangkaian R-C Paralel

2.1.1.1.9. Impedansi R-L-C Paralel



Gambar 2.20. Rangkaian R-L-C Paralel

Untuk impedansi total rangkaian R-L-C paralel gambar 2.20. dapat diselesaikan dengan menyelesaikan terlebih dahulu komponen induktif dan kapasitif yang dimisalkan dengan Z_1 . Didapatkan

$$Z_1 = \frac{X_L \angle 90^\circ \cdot X_C \angle -90^\circ}{X_L \angle 90^\circ + X_C \angle -90^\circ}$$

$$\text{Maka impedansi total rangkaian adalah } Z = \frac{R \angle 0^\circ \cdot Z_1 \angle \theta^\circ}{R \angle 0^\circ + Z_1 \angle \theta^\circ}$$

2.1.1.2. Jenis-Jenis Daya pada Tegangan Bolak-Balik

2.1.1.2.1. Daya Aktif

Daya aktif (*Active Power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya¹⁴. Bentuk gelombang tegangan dan arus bolak-balik adalah

¹⁴ Alto Belly dkk, *Op-Cit*, 2

sinusoida, sehingga besarnya daya setiap saat tidak sama. Daya yang merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt. Daya aktif membentuk energi aktif per satuan waktu, dan dapat diukur dengan KWh Meter serta merupakan daya aktif yang digunakan oleh beban untuk melakukan usaha tertentu. Daya aktif digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja. Misalnya energi panas, energi cahaya, dan energi mekanik.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{watt})$$

Keterangan :

P = Daya Aktif dalam *watt*

V = Tegangan dalam *volt*

I = Arus Listrik dalam *amper*

2.1.1.2.2. Daya Reaktif

Pada instalasi jaringan listrik lingkup industri, terdapat beban seperti motor listrik yang memerlukan bentuk lain dari daya, yaitu daya reaktif (var). Daya reaktif dibutuhkan oleh motor listrik untuk membuat medan magnet. Pengertian *daya reaktif* adalah daya yang dapat terjadi karena induktansi maupun kapasitansi. Induktansi disebabkan komponen yang berbentuk kumparan seperti motor listrik maupun transformator step down pada adaptor. Sedangkan kapasitansi diakibatkan oleh komponen kapasitor. Pengertian lain *daya reaktif* adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan fluks magnetik yang akan menimbulkan magnetisasi¹⁵. Daya reaktif dikembalikan ke sistem tenaga listrik karena efek induksi elektromagnetik, sehingga daya reaktif sebenarnya merupakan beban (kebutuhan) pada suatu sistem tenaga listrik.

¹⁵ Alto Belly dkk, *Op-Cit*, 2

Satuan daya reaktif adalah *volt-ampere reaktif* atau *var*. Disimbolkan dengan huruf Q dan diberikan tanda negative (-) atau tidak ada tanda (artinya positif) untuk membedakan daya reaktif induktor atau kapasitor.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad (\text{var})$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif dalam *Var*

V = Tegangan dalam *Volt*

I = Arus Listrik dalam *Amper*

2.1.1.2.3. Daya Semu

Dalam segitiga daya, penggabungan antara daya aktif (w) dan daya reaktif (var) disebut *daya semu* dengan satuan *volt-ampere* atau *va*. Pengertian lain daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan *rms* dengan arus *rms* dalam suatu jaringan listrik¹⁶. Daya semu menyatakan kapasitas beban seperti yang tertera pada peralatan generator, transformator dan bahkan pada KWh Meter. Daya semu merupakan perkalian dari hasil pembacaan voltmeter (V_{rms}) dan amperemeter (I_{rms}) serta disimbolkan dengan huruf S .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V \cdot I \quad (\text{va})$$

Keterangan :

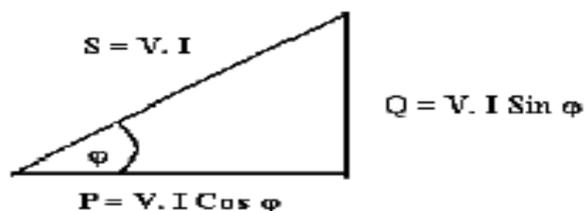
S = Daya Semu dalam *Va*

P = Daya Aktif dalam *Watt*

Q = Daya Reaktif dalam *Var*

¹⁶ Alto Belly dkk, *Op-Cit*, 3

Jika digambarkan dalam bentuk segitiga daya, maka seperti *gambar 2.21*. yaitu daya semu (va) digambarkan oleh sisi miring dan daya aktif (w) maupun daya reaktif (var) digambarkan oleh sisi-sisi segitiga yang saling tegak lurus. Perbandingan antara daya aktif (w) dengan daya semu (va) sering disebut dengan istilah *faktor daya* ($\cos \varphi$). Daya aktif diperoleh dari perkalian antara daya semu dengan $\cos \varphi$, sedangkan daya reaktif diperoleh dari perkalian antara daya semu dengan $\sin \varphi$.



Gambar 2.21. Hubungan Daya Aktif, Reaktif dan Semu

2.1.1.3. Faktor Daya

Faktor daya didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam sirkuit arus bolak-balik atau beda sudut fasa antara tegangan (V) dan arus (I) yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \varphi$, dan nilainya selalu lebih kecil atau sama dengan satu ($\cos \varphi \leq 1$)¹⁷.

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor Daya} &= \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Semu (S)}} \\
 &= \frac{\text{Watt}}{\text{Volt Amper}} \\
 &= \frac{V \cdot I \cdot \cos \varphi}{V \cdot I} = \cos \varphi
 \end{aligned}$$

¹⁷ Alto Belly dkk, *Op-Cit*, 5.

Faktor daya mempunyai nilai *range* antara 0 – 1 dan dapat juga dinyatakan dalam persen. Faktor daya yang baik apabila bernilai mendekati satu.

$$\begin{aligned}\tan \varphi &= \frac{\text{Daya Reaktif } (Q)}{\text{Daya Aktif } (P)} \\ &= \frac{\text{VAR}}{\text{Watt}}\end{aligned}$$

Karena komponen daya aktif umumnya konstan (komponen VA dan VAR berubah sesuai dengan faktor daya), maka dapat ditulis:

$$\text{Daya Reaktif } (Q) = \text{Daya Aktif } (P) \times \tan \varphi$$

Sebuah contoh, rating kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya: *Daya reaktif pada pf awal* = *Daya Aktif (P) x Tan φ₁*

$$\text{Daya reaktif pada pf diperbaiki} = \text{Daya Aktif } (P) \times \tan \varphi_2$$

Sehingga rating kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya adalah: *Daya reaktif (VAR) = Daya Aktif (W) x (Tan φ₁ - Tan φ₂)*

Dengan pemasangan kapasitor, disamping memperbaiki faktor daya juga didalam sistem transmisi daya listrik akan memperbaiki pengaturan tegangan dan menaikkan penyaluran daya¹⁸. Beberapa keuntungan meningkatkan faktor daya :

- 1) Untuk sektor industri, tagihan listrik akan menjadi kecil karena PT. PLN akan memberikan denda jika *pf* < 0,85.
- 2) Kapasitas distribusi sistem tenaga listrik akan meningkat
- 3) Mengurangi rugi – rugi daya pada sistem
- 4) Adanya peningkatan tegangan karena daya meningkat.

¹⁸ T.S. Hutaeruk M.Sc, 1996, *Transmisi Daya Listrik*, (Bandung: PT. Gelora Aksara Pratama), 119

Jika $pf < 0,85$ maka kapasitas daya aktif (*Watt*) yang digunakan akan berkurang. Kapasitas daya aktif akan terus menurun seiring dengan menurunnya faktor daya sistem kelistrikan. Akibat menurunnya faktor daya maka akan timbul beberapa persoalan diantaranya :

- 1) Membesarnya penggunaan energi listrik kWh karena rugi – rugi.
- 2) Membesarnya penggunaan daya reaktif listrik VAR
- 3) Mutu listrik menjadi rendah karena jatuh tegangan (*voltage drops*)

Dengan memperbaiki $\cos \phi$, maka arus yang dipasok PT. PLN akan lebih kecil. Karena perbandingan antara $\cos \phi$ dengan arus adalah berbanding terbalik (daya aktif tetap). Nilai $\cos \phi$ yang mendekati ideal akan menghasilkan arus yang kecil sedangkan nilai $\cos \phi$ yang menjauhi ideal ($pf < 1$) akan menghasilkan arus yang besar. Dengan pasokan arus dari PT. PLN yang besar, maka akan menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya pada saluran listrik (rugi daya = $I^2 \cdot R$).

Untuk menghitung nilai faktor daya ($\cos \phi$) dalam sebuah jaringan instalasi listrik digunakan rumus:

$$\mathbf{\cos \phi = \frac{P}{S}}$$

Keterangan :

$\cos \phi$ = Faktor Daya

P = Daya Aktif dalam watt

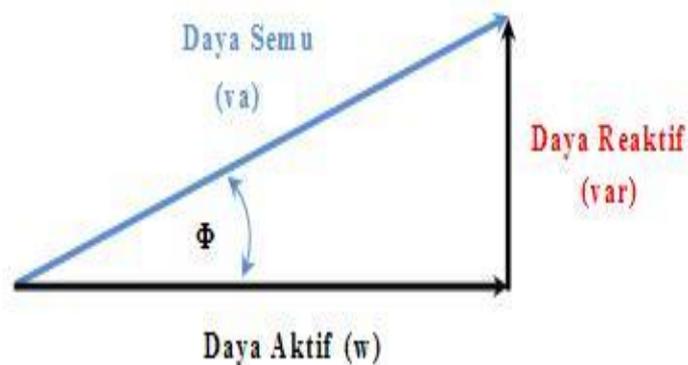
S = Daya Semu dalam *volt-ampere*

Faktor daya yang buruk dapat diperbaiki dengan menambahkan beban lain yang berlawanan dengan daya reaktifnya. Tujuannya adalah untuk membatalkan

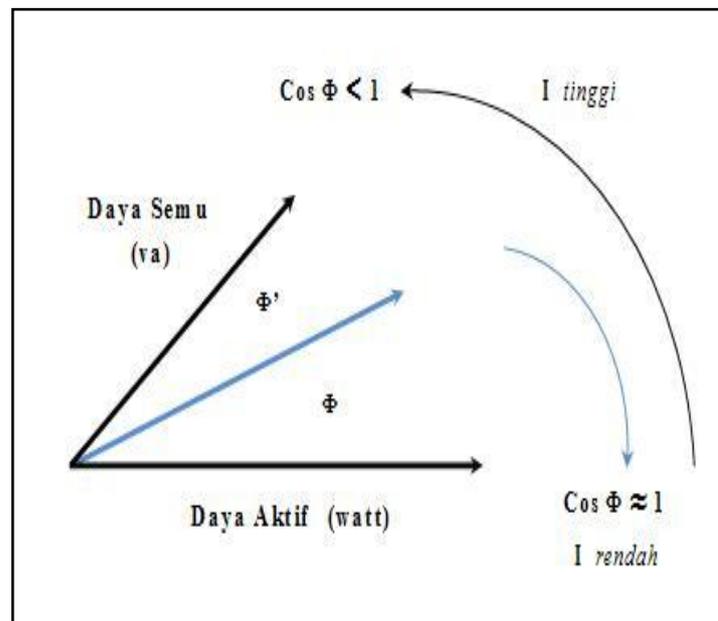
efek dari beban reaktansi yang dihasilkan. Misalnya jenis bebannya adalah reaktansi induktif maka hanya dapat dibatalkan oleh reaktansi kapasitif, sehingga harus dilakukan pemasangan jenis beban yang bersifat kapasitif dan dipasang secara paralel pada jaringan instalasi listrik. Efek dari dua beban paralel yang berlawanan reaktansinya adalah untuk membuat total impedansi instalasi sama dengan total resistansi murni, atau untuk menyamakan sudut phasa impedansi ($\cos \varphi = 1$), atau lebih mendekati titik ideal.

Faktor daya merupakan gambaran dari sudut phasa antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Sehingga daya aktif yang terpakai pun akan tinggi pula yang berakibat pada pemborosan daya.

Hubungan daya aktif dengan daya semu dapat diperlihatkan oleh *gambar 2.22.* dan *gambar 2.23.*



Gambar 2.22. Segitiga Daya

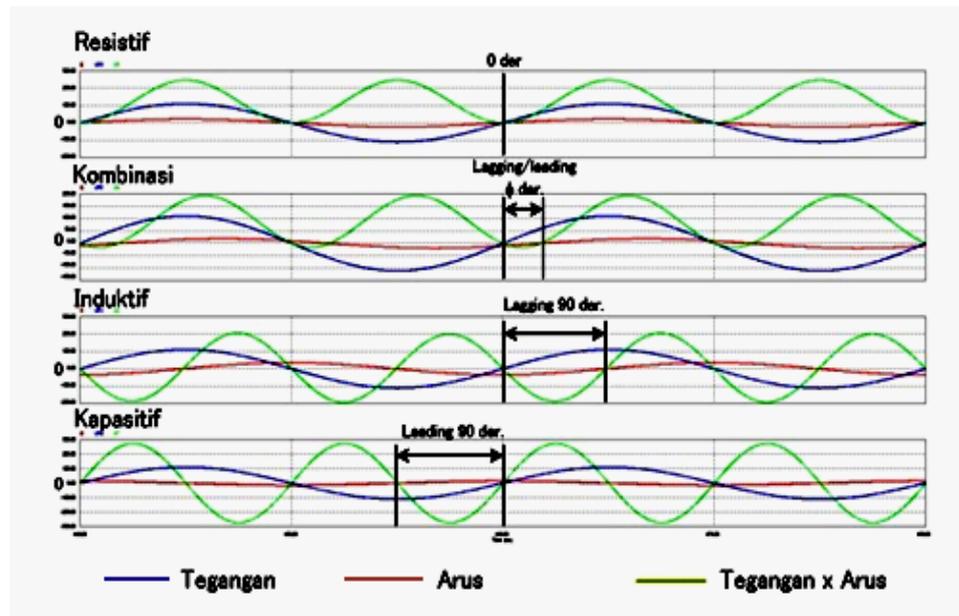


Gambar 2.23. Hubungan Nilai pf dengan I

Menurut Sam Rasosia, bahwa faktor daya terdahulu (leading) atau faktor daya tertinggal (lagging) akan tergantung pada jenis bebannya. Faktor daya akan menjadi terdahulu jika beban memberikan daya reaktif (var), faktor daya tertinggal jika beban menerima/memerlukan daya reaktif¹⁹. Berarti bahwa faktor daya yang baik adalah mengacu pada jenis beban resistif ($pf = 1$). Sehingga, ketika arus tertinggal 90° oleh tegangan (lagging) maka beban akan menarik daya reaktif dari sumber listrik supaya mendekati ideal. Begitu juga sebaliknya, ketika arus beban mendahului tegangan sebesar 90° (leading), maka beban akan memberikan daya reaktif kepada sumber listrik.

Faktor daya terdahulu (leading) maupun tertinggal (lagging) akan diperlihatkan oleh gambar 2.24.

¹⁹ Sam Rasosia, 1978, *Penggunaan Kapasitor Shunt pada Jaringan Listrik*, (Jakarta: Universitas Indonesia), 6



Gambar 2.24. Leading & Lagging Beban

Ada beberapa faktor yang menyebabkan rendahnya faktor daya pada sistem jaringan listrik, diantaranya²⁰ :

- 1) Pemakaian motor induksi dengan jumlah yang banyak
- 2) Motor induksi yang beroperasi pada beban yang rendah
- 3) Kondensor sinkron dengan penguatan yang kurang
- 4) Pemakaian pemanas induksi, lampu TL dan peralatan lain yang membutuhkan daya reaktif.

2.1.1.4. Kompensator Daya

Kompensator daya adalah suatu alat yang dirancang untuk dapat mengkompensasi rugi daya akibat beban reaktif yang dihasilkan oleh jenis beban induktif atau kapasitif.

²⁰ *Ibid*, 10

Kompensator daya pada dasarnya merupakan sebuah peralatan listrik yang berguna untuk meningkatkan/memperbaiki faktor daya atau $\cos \phi$ dan akan mempengaruhi besarnya arus yang mengalir ke beban. Keuntungan yang bisa didapat dari pemasangan kompensator daya antara lain :

- 1) mengurangi besarnya nilai tegangan yang turun (drop voltage)
- 2) meningkatkan kualitas daya dalam jaringan listrik
- 3) mengurangi kenaikan arus yang bisa menyebabkan panas pada penghantar, sehingga bisa meminimalisir kerugian daya
- 4) mengoptimalisasi daya listrik

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh PT. PLN Litbang bahwa terdapat dua jenis kompensator daya yang beredar di pasaran, yaitu kompensator yang terpasang paralel dengan beban listrik dan kompensator yang terpasang seri dengan beban listrik²¹. *Kompensator yang pertama*, terpasang paralel dengan beban listrik adalah kompensator yang komponen utamanya adalah kapasitor, yaitu komponen yang dapat menyimpan muatan listrik dan dapat melepaskan kembali muatannya pada keadaan tertentu. Bila kapasitor dihubungkan dengan suatu sumber listrik bolak-balik, maka akan menghasilkan daya reaktif kapasitif (leading). Besarnya daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor dapat dihitung menggunakan rumus²²:

²¹ Pranyoto dan Prastiwo, *Op-Cit*, 5

²² *Ibid*, 10

$$KVAR = \frac{E^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-6}}{1000}$$

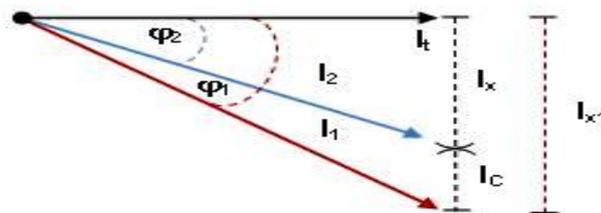
Keterangan :

- E = Tegangan Nominal dalam *Volt*
 f = Frekwensi dalam *Hertz*
 C = Kapasitansi dalam μf

Dikarenakan komponen kapasitor memberikan daya reaktif (kvar) atau arus reaktif pada jaringan listrik, maka fungsi dari pemasangan komponen kapasitor pada jaringan listrik adalah untuk meminimalisir besar arus reaktif induktif yang dihasilkan oleh beban induktor²³.

Untuk beban induktif, bila pada jaringan listrik dipasang komponen kapasitor, maka arus reaktif yang dibangkitkan oleh sumber listrik menjadi berkurang/lebih kecil, yang mengakibatkan arus aktif yang melalui saluranpun menjadi lebih kecil. Arus aktif bernilai kecil akan menguntungkan jaringan instalasi karena rugi-rugi pada sistem saluran listrik akan menjadi berkurang.

Gambar 2.25. memperlihatkan arus aktif menjadi lebih kecil akibat penambahan daya reaktif oleh kapasitor yang direpresentasikan oleh vektor diagram arus, dengan mengasumsikan bahwa arus aktif dari sumber (I_1) tetap²⁴.



Gambar 2.25. Segitiga Arus Pemasangan Kompensator

²³ Frank D. Petruzella, 2001, *Elektronik Industri*, Yogyakarta: ANDI, 131

²⁴ Pranyoto dan Prastiwo. *Op-cit*, 15

Dari *gambar 2.25.*, bahwa I_1 adalah arus semu sebelum pemasangan kompensator dan I_2 adalah arus semu sesudah pemasangan kompensator. I_2 mengalami kompensasi oleh arus reaktif I_C yang diberikan oleh kompensator menjadi I_x (arus reaktif setelah pemasangan kompensator) dan I_{xI} adalah arus reaktif sebelum pemasangan kompensator, yang merupakan penjumlahan dari I_C dengan I_x .

Secara sederhana, cara kerja dari kompensator daya adalah menggunakan konsep keseimbangan. Ketika beban bersifat kapasitif yang berarti lagging (sudut fasa tertinggal 90^0) maka supaya terjadi keseimbangan adalah dengan memasang beban induktor pada jaringan listrik dan dipasang secara seri, sedangkan untuk beban yang bersifat induktif yang berarti leading (sudut fasa mendahului 90^0) maka supaya terjadi keseimbangan adalah dengan memasang kapasitor pada jaringan listrik dan dipasang secara paralel. Sehingga dengan konsep perlawanan diharapkan faktor daya lebih mendekati ideal ($\cos \varphi \approx 1$).

Faktor daya yang kurang baik pada sirkuit arus bolak-balik dapat dikoreksi ke suatu nilai yang mendekati 1 (satu) dengan menambahkan komponen reaktansi kapasitif dengan nilai yang disesuaikan dan dipasang secara paralel, sehingga menimbulkan efek perlawanan terhadap reaktansi induktif, yang selanjutnya mengakibatkan perbaikan pada faktor daya ($\text{Cos } \varphi$)²⁵.

Karena umumnya peralatan yang digunakan dalam lingkungan perumahan bersifat induktif, maka kompensator untuk mengeliminasi daya reaktif adalah pemasangan berupa kapasitor yang dipasang secara paralel pada jaringan listrik.

²⁵ Wordpress, 2010, *Koreksi Faktor Daya*, (Dikutip dari website: <http://jonpurba.wordpress.com/2010/01/19/koreksi-faktor-daya.html>, update halaman tanggal 5 September 2011)

Jenis kompensator yang kedua adalah kompensator yang terpasang seri dengan beban. Komponen utamanya adalah induktor, dengan prinsip mengurangi catu tegangan ke beban. Dengan mengurangi catu tegangan ke beban, secara otomatis energi yang terpakai pun akan berkurang dibandingkan pada keadaan normal. Hasil keluaran dari pemasangan kompensator jenis seri adalah penurunan pemakaian daya aktif (watt), tetapi tegangan catu ke peralatan listrik juga menurun. Memang terjadi penghematan pemakaian energi listrik, tetapi sesungguhnya kinerja peralatan listrik menurun dan dapat berakibat mengurangi umur peralatan listrik.

Faktor daya yang rendah bisa mengakibatkan arus beban tinggi. Karena pada beban, nilai tegangan dan daya adalah tetap. Yang akan berubah adalah nilai arusnya, karena $P = V \times I \times \cos \phi$. Untuk mengatasi faktor daya yang rendah, PT. PLN pun sudah memasang kapasitor-kapasitor daya pada sistem distribusinya.

2.1.2. Penghematan Energi Listrik

Definisi *Penghematan* menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia adalah proses, cara, perbuatan menghemat²⁶. Sedangkan *Energi listrik* diartikan sebagai energi akhir yang dibutuhkan bagi peralatan listrik untuk menggerakkan motor, lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan ataupun untuk menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi yang lain²⁷. Maka, *Penghematan Energi Listrik* dapat diartikan

²⁶ Kemdiknas, *Kamus Besar Bahasa Indonesia Daring*, (Dikutip pada tanggal 21 Desember 2011 dari website <http://bahasa.kemdiknas.go.id/kbbi/index.php>, 2008).

²⁷ Wikipedia, 2011, *Energi Listrik*, (Dikutip dari http://id.wikipedia.org/wiki/Energi_listrik, update halaman tanggal 5 september 2011)

proses atau cara menghemat energi listrik yang dibutuhkan oleh suatu peralatan listrik untuk beroperasi.

Definisi lain dari energi adalah kuantitas listrik (kWh) yang digunakan selama satu periode waktu²⁸. Energi listrik merupakan perkalian antara daya listrik dengan waktu. Sedangkan daya adalah hasil perkalian antara tegangan dengan arus listrik. Sehingga, dalam menentukan besar energi listrik harus melibatkan besaran tegangan, besaran arus listrik serta besaran waktu.

$$W = Q \times V$$

Keterangan : W = Energi Listrik dalam *Joule*

Q = Muatan Listrik dalam *Coulomb*

V = Tegangan Listrik dalam *Volt*

Karena $I = \frac{Q}{t}$, maka nilai energi listrik bisa dihitung dengan rumus :

$$W = V \times I \times t$$

Keterangan :

W = Energi Listrik dalam *Joule*

I = Arus Listrik dalam *Coulomb*

V = Tegangan Listrik dalam *Volt*

t = Waktu dalam *sekon*

Apabila persamaan energi listrik dihubungkan dengan Hukum Ohm $V = I \times R$, maka diperoleh perumusan:

$$W = I \times R \times I \times t$$

$$= I^2 \times R \times t$$

²⁸ Frank D. Petruzella, *Op-Cit*, 133

2.1.2.1. Pemanfaatan Energi Listrik

Pemanfaatan energi listrik sudah semakin luas. Dari pemanfaatan energi listrik yang sangat sederhana yaitu lingkup rumah tangga sampai pemanfaatan energi listrik dalam jumlah yang cukup besar, yaitu kebutuhan energi listrik untuk industri. Sejalan dengan semakin luasnya pemanfaatan energi listrik, aplikasi dari pemanfaatan energi listrik pun semakin berkembang. Dikarenakan sifat dari energi listrik yang dapat diubah-ubah menjadi berbagai bentuk energi yang lain. Misalnya saja perubahan energi listrik menjadi energi kalor, yaitu terdapat pada setrika listrik, ceret listrik, dan kompor listrik. Perubahan energi listrik menjadi energi cahaya terdapat pada lampu pijar, dan lampu neon. Sedangkan perubahan energi listrik menjadi energi gerak terdapat pada kipas angin, motor listrik, pompa air, dan penghisap debu (*vacuum cleaner*).

2.1.2.2. Sistem Penghematan Energi Listrik

Secara garis besar, cara penghematan pemakaian energi listrik dapat dikelompokkan dalam 5 kategori, yaitu:

- 1. Peninjauan ulang sistem teknis dan perbaikan arsitektur bangunan.*

Fokus penghematan energi listrik dalam sebuah gedung, diarahkan pada sistem pendinginannya. Misalnya, memilih atau mengganti unit AC dengan system pendinginan yang mempunyai EER rendah, memperbaiki sistem aliran refrigerant agar bisa lebih hemat listrik, mengurangi beban pendingin dengan mengatur suhu yang telah dianjurkan pemerintah. Faktor lain yang cukup mempengaruhi beban pendinginan adalah sinar matahari yang masuk ke dalam ruang,

terutama pada pukul 10.00 – 15.00 WIB. Dengan memasang penghalang sinar matahari pada sisi timur dan sisi barat luar gedung, akan bisa mengurangi beban pendinginan. Perambatan panas matahari melalui dinding juga dapat dikurangi dengan pemakaian batako press yang terdapat rongga udara di bagian tengah atau pemakaian dinding dobel dengan jarak antar dinding sekitar 10 cm. Pemasangan pintu tutup otomatis atau pintu putar dapat mengurangi kebocoran udara dingin dengan udara panas dari luar gedung, sehingga dapat menghemat beban pendinginan.

2. *Perbaiki prosedur operasional secara manual*

Beberapa prosedur operasional yang dapat dengan mudah dilaksanakan antara lain: mewajibkan kepada para pemakai gedung untuk selalu mematikan lampu atau AC jika sedang tidak ada orang di dalam ruangan, mematikan lampu yang dekat dengan jendela kaca pada siang hari, tidak menyalakan pompa air pada pukul 18.00 – 23.00 WIB karena harga listrik lebih mahal, selalu menutup pintu dan jendela yang memisahkan ruang berpendingin dengan yang tidak berpendingin, selalu memeriksa lampu jalan dan lampu taman yang sering terlupakan untuk dimatikan pada siang hari.

3. *Perbaiki prosedur operasional secara otomatis*

Untuk gedung-gedung yang berukuran besar, perbaikan prosedur operasional secara manual cukup mengalami kesulitan. solusinya adalah

dengan sistem sensor dan aktuator untuk berbagai keperluan. Sensor level cahaya, sensor pintu sedang terbuka/tertutup, sensor keberadaan seseorang di dalam ruangan, dan pengatur waktu otomatis dapat dirangkai dan dikombinasikan untuk mencapai tujuan penghematan energi listrik. Konfigurasi jaringan sensor juga bisa direncanakan dengan teknologi "*addressable*" sensor, actuator dan monitor. Setiap unit bisa diberi address, dan hubungan antar unit cukup dimonitoring sebagai antar address. Selama addressnya sama, dimanapun keberadaannya selalu bisa saling berhubungan. Semua koneksi komunikasi dilakukan secara paralel dengan cukup menggunakan 2 kabel telepon biasa. Misalnya sensor keberadaan orang di ruang rapat lantai-17 diberi address nomor 34, maka jika terdapat orang di dalam ruangan rapat, maka lampu ruang (address=34) akan menyala, AC ruang rapat (address=34) akan menyala, lampu tanda minta kopi di pantry (address=34) menyala, lampu tanda monitor di ruang kontrol di basement (address=34) juga menyala. Jika ruang rapat kosong dalam waktu 10 menit, maka semua yang berhubungan dengan address=34 akan mati.

4. *Pemasangan alat penghemat listrik di seluruh instalasi listrik*

Pada prinsipnya, semua jenis beban (peralatan yang memakai listrik), selalu bisa dilakukan penghematan listriknya, walaupun hanya bernilai sedikit. Diperlukan kejelian dan keahlian untuk menentukan serta memilih jenis beban dan alat yang sesuai untuk penghematan. Beban

lampu pijar, lampu neon, alat pemanas, unit AC, dan motor listrik adalah mempunyai alat penghemat yang spesifik berdasarkan kinerja beban atau berdasarkan jadwal pemakaian beban.

5. *Perbaikan kualitas daya listrik*

Kualitas daya listrik yang buruk akan mengakibatkan pemborosan pemakaian energi listrik. Penyebabnya adalah adanya harmonisa yang timbul dalam jaringan listrik, sehingga mengakibatkan terjadinya *anomaly parameter listrik* seperti: arus netral lebih besar dari arus fasa, alat pemutus daya bekerja walau beban arus terukur masih 60% dari kapasitasnya, motor-motor listrik lebih cepat panas dari biasanya, sambungan-sambungan pada pemutus daya lebih panas, trafo utama lebih panas. Hal yang paling fatal yang mungkin bisa terjadi adalah panas berlebih pada kabel, sambungan kabel dan pada trafo yang mengakibatkan trafo meledak serta dapat mengakibatkan kebakaran. Pemborosan energy listrik juga terjadi pada tegangan dan arus yang tidak seimbang, faktor daya, arus/tegangan surja (surge, impuls), tegangan surut sesaat, kehilangan catu daya sesaat, catu daya hilang 1 fasa.

2.1.2.3. Perhitungan Biaya Energi Listrik

Energi listrik dihitung berdasarkan waktu pemakaian peralatan listrik. Semakin lama peralatan listrik terhubung pada sumber tegangan listrik, maka semakin besar pula energi listrik yang terpakai atau tercatat pada kWh meter.

Besarnya energi listrik kemudian dikalikan dengan harga per kWh yang ditentukan oleh pihak pemasok listrik.

Perhitungan biaya pemakaian energi listrik berdasarkan Tarif Dasar Listrik (TDL) tahun 2004 untuk sektor rumah tangga:

GOL TARIF	DAYA (VA)	BIAYA BEBAN (Rp./kVA)	PEMAKAIAN KWH			RUPIAH / KWH			BIAYA KETELAMBATAN (SE 0.18.K.DIR/2010)	
			BLOK 1	BLOK 2	BLOK 3	BLOK 1	BLOK 2	BLOK 3		
R-1	450	11,000	0 - 30	>30 - 60	>60	169	360	495	Rp	5,000
	900	20,000	0 - 20	>20 - 60	>60	275	445	495	Rp	10,000
	1.300	30,100	0 - 20	>20 - 60	>60	385	445	495	Rp	15,000
	2.200	30,200	0 - 20	>20 - 60	>60	390	445	495	Rp	20,000

Keterangan:
WBP = Waktu Beban Puncak
LWBP = Luar Waktu Beban Puncak
JN = Jam Nyala (kWh per bulan dibagi kVA tersambung)
K = Faktor perbandingan antara harga LWBP dan WBP sesuai dengan karakteristik beban (Sistem Sumber : K = 2)

Gambar 2.26. Tarif Dasar Listrik 2004

Biaya yang harus dibayarkan dihitung dari jumlah pemakaian kWh dikalikan harga per kWh ditambah biaya beban.

$$\begin{aligned} \text{Biaya} &= \text{Biaya Beban} + \text{Biaya Pemakaian total kWh} \\ &= \text{Biaya Beban} + (\text{Jumlah kWh} \times \text{Harga per kWh}) \end{aligned}$$

Misalkan pemakaian energi listrik pada daya 450 VA bulan April tercatat 2500 kWh dan pemakaian 1 bulan berikutnya yaitu bulan Mei tercatat sebesar 2550 kWh. Maka :

$$\begin{aligned} \text{Biaya} &= 11.000 + \{(2550 - 2500) \times 360\} \\ &= 11.000 + \{18.000\} \\ &= \text{Rp } 29.000 \text{ ,-} \end{aligned}$$

2.2. Kerangka Berfikir

Untuk mendapatkan data-data yang diperlukan dalam penelitian, maka akan dilakukan pengujian dan pengukuran kompensator daya secara eksperimen terhadap berbagai jenis beban listrik. Data-data hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan penelitian. Pengujian dan pengukuran kompensator daya dilakukan dengan dua cara, yaitu terhadap beban tunggal dan terhadap beban kelompok.

2.2.1. Pengujian Terhadap Beban Tunggal

Pengujian dan pengukuran terhadap beban tunggal adalah pengujian kompensator daya terhadap sebuah beban yang berbeda jenis-jenisnya dan dilakukan satu per satu, yang kemudian dilakukan pengukuran sesuai dengan prosedur/langkah penelitian. Pengujian terhadap beban tunggal bertujuan untuk mendapatkan karakteristik kompensator daya terhadap berbagai jenis beban listrik (resistif, kapasitif, dan induktif).

2.2.2. Pengujian Terhadap Beban Kelompok

Pengujian dan pengukuran terhadap beban kelompok adalah pengujian kompensator daya terhadap beban campuran, misalnya penggabungan antara jenis beban resistif dengan jenis beban induktif atau penggabungan antara jenis beban resistif dengan jenis beban kapasitif, yang kemudian dari masing-masing beban kelompok/campuran akan dilakukan pengukuran guna mendapatkan data-data yang dibutuhkan. Pengujian terhadap beban kelompok bertujuan untuk mendapatkan karakteristik kompensator daya terhadap beban kelompok/campuran.