

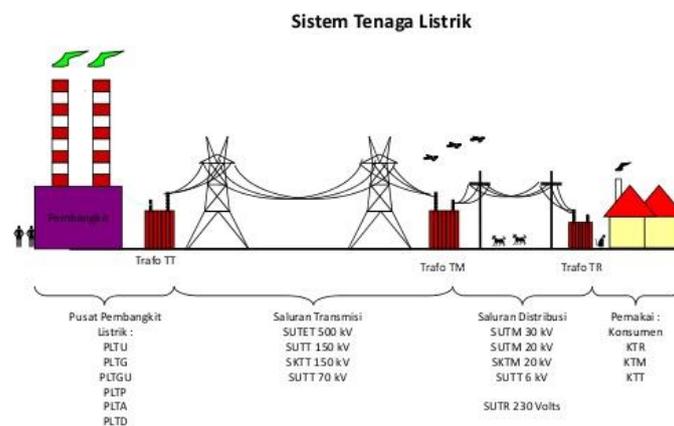
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

2.1.1 Pengertian sistem tenaga listrik

Secara umum sistem tenaga listrik terdiri atas komponen tenaga listrik yaitu pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi dan sistem distribusi. Ketiga bagian ini merupakan bagian utama pada suatu rangkaian sistem tenaga listrik yang bekerja untuk menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Rangkaian sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah berikut :



Gambar 2.1 Rangkaian Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi akan sampai ke konsumen. Berikut ini penjelasan mengenai bagian utama pada sistem tenaga listrik pada umumnya, yaitu :

¹ Eirene, H., & Sau, M. (2019). *Buku Ajar Energi Dan Operasi Tenaga Listrik Dengan Aplikasi ETAP*, Sleman : CV. Budi Utama.

1. Pusat pembangkit listrik (*power plant*)

Pusat pembangkit listrik merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak awal (*PrimeMover*) dan generator yang membangkitkan listrik dengan mengubah tenaga turbin menjadi energi listrik. Biasanya di pusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi atau tegangan tinggi dan juga peralatan pengamanan dan pengatur. Secara umum, jenis pusat pembangkit dibagi kedalam dua bagian besar yaitu pembangkit hidro yaitu PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dan pembangkit thermal diantaranya yaitu PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTGU (Pusat Listrik Tenaga Gas Uap).

2. Transmisi tenaga listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya dapat tersalurkan pada pengguna listrik. (Joko et al, 2010:1-3)

3. Sistem distribusi

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi

2.1.2 Operasi sistem tenaga listrik

Pada bagian sebelumnya bisa dilihat pada gambar bagaimana sistem tenaga listrik yang mendeskripsikan hubungan antara masing-masing sistem listrik. Pembangkit-pembangkit listrik memiliki lokasi yang saling berjauhan satu sama

lain dan terhubung satu sama lain melalui sistem transmisi yang luas untuk mendistribusikan tenaga listrik pada beban yang tersebar. Ini bisa dapat dikatakan sebagai sistem interkoneksi. Melalui adanya sistem interkoneksi tersebut menyebabkan :

1. Keandalan sistem yang semakin tinggi
2. Efisiensi pembangkitan tenaga listrik dalam sistem meningkat
3. Mempermudah penjadwalan pembangkit

Sebuah sistem tenaga listrik merupakan sebuah unit usaha dimana selain faktor teknis, faktor ekonomis juga diperhatikan karena pengaruhnya sangat dominan.

Dalam pengeoperasian sistem tenaga listrik ini, pendapatan dan pengeluaran harus dijaga agar tercipta kondisi yang seimbang sehingga dapat mencapai keuntungan yang layak. Sedangkan pengeluaran dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik ini meliputi : belanja pegawai, belanja barang dan jasa, pemeliharaan dan penyusutan, penelitian atau pengembangan, pajak, bahan baku energi (BBM, Batubara, Nuklir, Air, dsb), *Losses*, dan lain-lain. Dalam pembangkitan tenaga listrik ada empat komponen biaya yang biasanya harus diperhitungkan, yaitu:

1. Komponen A merupakan *fixed cost*, yakni biaya yang harus tetap dikeluarkan terlepas dari pembangkit listrik tersebut dioperasikan atau tidak, misalnya: pekerjaan sipil, biaya pembelian turbin, generator, dan lain-lain.

2. Komponen B merupakan *fixed cost*, yakni biaya yang tetap dikeluarkan untuk operasi dan pemeliharaan pembangkit, seperti gaji pegawai, biaya pemeliharaan, dan lain-lain.

3. Komponen C merupakan *fuel cost* atau biaya bahan bakar yakni biaya bahan bakar yang berubah-ubah tergantung dari beberapa faktor. Beberapa faktor yang mempengaruhi harga komponen ini misalnya banyaknya konsumsi bahan bakar yang diperlukan, jenis bahan bakarnya, lama waktu penyalaan pembangkit, dan beberapa hal lainnya.

4. Komponen D merupakan *variable cost* yakni biaya dapat berubah-ubah. Misalnya, biaya untuk pelumas. Semakin sering dan berat kerja suatu pembangkit, semakin juga dibutuhkan banyak pelumas. Maka, biaya komponen D ini akan meningkat.

Bagian terbesar dari pembiayaan dalam pembangkitan tenaga listrik adalah komponen C atau biaya bahan bakar yang mencakup hampir 70% dari total pembiayaan. Naik atau turunnya biaya bahan bakar tergantung pada penggunaan listrik oleh konsumen. Oleh karena itu, sangat diperlukan cara pengoperasian yang optimal. (Nadjamuddin, 2011:141)²

2.1.3 Tujuan operasi sistem tenaga listrik

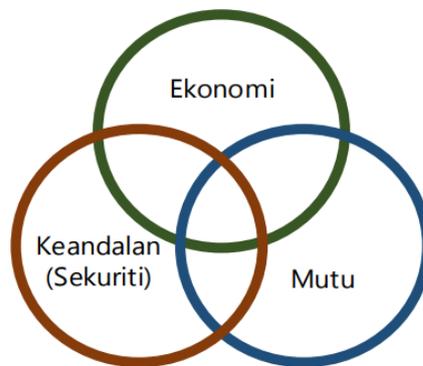
Tujuan utama dari operasi sistem tenaga listrik ini adalah untuk memenuhi kebutuhan beban listrik secara efisien (beban terpenuhi dengan biaya yang minimum), dengan mempertimbangkan sasaran operasi tenaga listrik yaitu sistem harus dapat memenuhi standar dalam keamanan lingkungan, memiliki keandalan yang baik, dan dapat melayani permintaan secara berkala dari waktu ke waktu (Nadjamuddin, 2011:142).

Dalam mencapai tujuan dari operasi sistem tenaga listrik maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu :

1. Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.
2. Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Jika terjadi gangguan pada pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.
3. Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan (Wikarsa, 2010:4).

Sebagai gambaran dari tujuan operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada gambar 2.2 dibawah ini.

² Najamuddin. (2011). *Bahan Ajar Perancangan Pembangkitan Tenaga Listrik, Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Elektro, Fakultas Teknik Hasanuddin, Makassar.*



Gambar 2.2 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik

2.1.4 Kondisi operasi Sistem tenaga listrik

Kondisi-kondisi yang mungkin terjadi dalam menjalankan sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut :

1. Normal adalah seluruh konsumen dapat dilayani, kendala operasi teratasi dan keamanan sistem dapat dipenuhi
2. Siaga adalah seluruh konsumen dapat dilayani, kendala operasi dapat dipenuhi, tetapi keamanan sistem tidak dapat dipenuhi.
3. Darurat adalah konsumen tidak dapat dilayani, kendala operasi tidak dapat dipenuhi.
4. Pemulihan adalah adalah peralihan kondisi darurat tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan. (Wikarsa,2010:6)³

2.1.5 Karakteristik pembangkit listrik

Sangat penting untuk mengenal karakteristik pembangkit listrik yang berguna untuk meminimalisir pembiayaan bahan baku energi. Ketika sudah mengenal karakteristik pembangkit listrik maka pengaturan output pembangkit dapat diatur dengan baik. Berdasarkan karakteristik pembangkit listrik, dapat

³ Wikarsa. (2010). *Sistem Tenaga Listrik Secara Umum*, www.lontar.ui.ac.id/

dibuat model secara matematis untuk proses optimasi agar dihasilkan biaya pembangkitan yang ekonomis.

Ada berbagai macam jenis pembangkit listrik yaitu Pembangkit Listrik Tenaga air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Alam (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).

Pembangkit listrik tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian besar berdasarkan karakteristiknya yaitu pembangkit hidro (PLTA) dan pembangkit thermal (PLTU, PLTG, PLTP, PLTD, PLTGU). Pengoptimasian pada kedua klasifikasi pembangkit tersebut sangatlah penting untuk memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum.

2.1.6 Pembangkit listrik

Mengoperasikan suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa pusat pembangkit listrik memerlukan suatu koordinasi yang tepat dalam melakukan penjadwalan pembebanan besarnya daya listrik yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit listrik, sehingga diperoleh biaya pembangkit yang minimum.

Terdapat dua pokok permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi ekonomis pembangkitan pada sistem tenaga listrik yaitu :

1. Pengaturan unit pembangkit (*unit commitment*)

Penanganan biaya operasi pembangkit tenaga listrik bisa diminimalkan dengan cara mencari kombinasi yang tepat dari unit pembangkit yang ada. Hal ini dikenal dengan pengaturan unit pembangkit. Pada pengaturan unit akan dibuat skema urutan prioritas, yaitu metode pengoperasian unit pembangkit berdasarkan total biaya rata-rata bahan bakar yang paling murah.

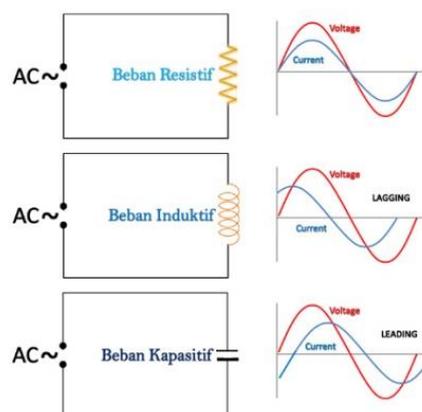
Pengaturan unit ini dilakukan untuk menentukan unit mana saja yang beroperasi dan tidak beroperasi pada jam tertentu sehingga dapat dibuat kombinasi operasi dari unit-unit yang ada. Dalam mengatur unit-unit tersebut digunakan pertimbangan teknis dan ekonomis.

2. Penjadwalan ekonomis (*economic dispatch*)

Penjadwalan ekonomis merupakan suatu usaha untuk menentukan besar daya yang harus disuplai dari tiap unit generator untuk memenuhi beban tertentu dengan cara membagi beban tersebut pada unit-unit pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomis dengan tujuan meminimumkan biaya operasi pembangkitan. (Nadjamuddin, 2011:186-187)

2.2 Beban Listrik⁴

Beban listrik adalah suatu alat atau benda yang dapat bekerja atau berfungsi apabila dialiri arus listrik yang berpotensi. Dalam perhitungan arus dan tegangan, beban listrik (load) digambarkan sebagai “hambatan” listrik, artinya beban listrik ini menghambat arus yang mengalir sehingga tidak terjadi hubung singkat. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Reaktansi induktif (X_L) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan short circuit. Reaktansi kapasitif (X_C) akan menjadi tak berhingga yang berarti bahwa kapasitif tersebut akan open circuit. Maka pada sumber DC, beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian.



Gambar 2.3 Grafik Beban Resistif, Induktif, dan Kapasitif

⁴ Belly, Alto dkk. (2010). *Daya Aktif, Reaktif, & Nyata*, Depok : Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

2.2.1 Jenis-jenis beban listrik

Pada sumber listrik AC beban dibedakan menjadi 3 yaitu, resistif (R), beban induktif (L), dan beban kapasitif (C).

1. Beban resistif (R)

Beban resistif yang merupakan suatu resistor murni, contoh : lampu pijar, pemanas. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus se-fasa.

Beban resistif hanya mengkonsumsi daya aktif dan tidak menyebabkan perubahan nilai faktor daya sehingga nilai faktor daya tetap, yaitu sama dengan satu ($\cos\phi = 1$). Karena beban listrik resistif tidak mempengaruhi faktor daya, maka rumus daya pada beban resistif adalah :

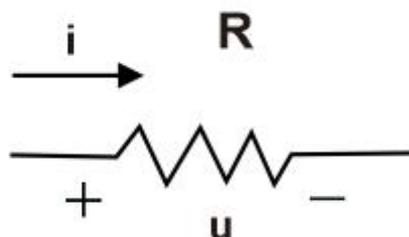
$$P = V \cdot I \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

P = Daya (Watt)

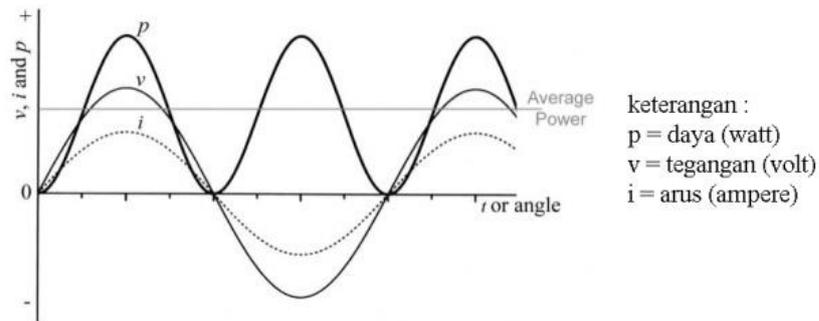
V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)



Gambar 2.4 Simbol Resistansi

Gelombang arus dan tegangan listrik yang melewati resistor akan selalu bersamaan membentuk bukit dan lembah. Dengan kata lain, beban resistif tidak akan menggeser posisi gelombang arus maupun tegangan listrik AC.



Gambar 2.5 Gelombang Sinusoidal Beban Resistif Listrik AC

Nampak pada grafik di atas, karena gelombang tegangan dan arus listrik berada pada fase yang sama maka nilai dari daya listrik akan selalu positif. Inilah mengapa beban resistif murni akan selalu ditopang oleh 100% daya nyata.

2. Beban induktif (L)

Beban induktif adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti biasanya inti besi, contoh : motor–motor listrik, induktor dan transformator. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 – 1 “lagging”. Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR). Tegangan mendahului arus sebesar ϕ° .

Karena beban induktif dapat mengakibatkan penurunan nilai faktor daya (Cos ϕ), maka rumus daya pada beban induktif yaitu :

Untuk beban 1 fasa :

$$P = V \cdot I \cdot \text{Cos}\phi \dots\dots\dots(2.2)$$

Untuk beban 3 fasa :

$$P = V \cdot I \cdot \text{Cos}\phi \cdot \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.3)$$

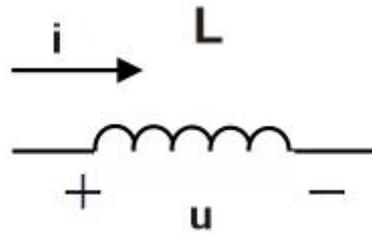
Keterangan :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

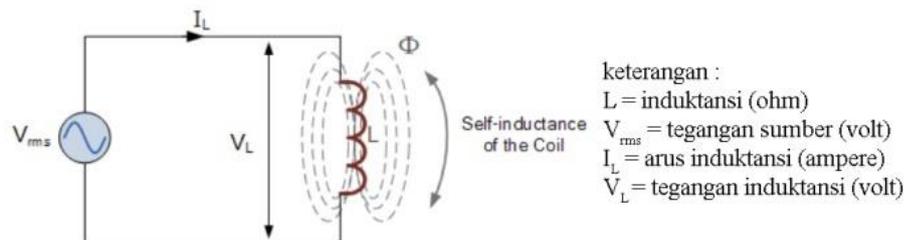
I = Arus (Ampere)

Cos ϕ = Faktor Daya



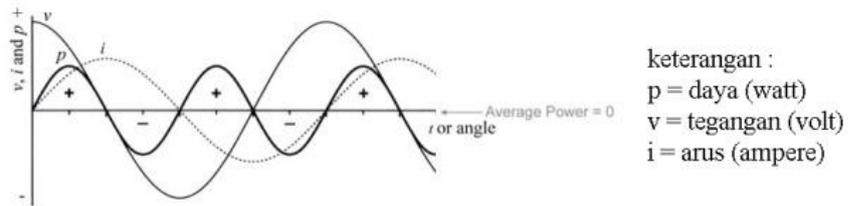
Gambar 2.6 Simbol Induktansi

Kumparan pada beban induktif menyebabkan terhambatnya laju arus, sehingga terjadi pergeseran posisi gelombang arus menjadi tertinggal (lagging) dari gelombang tegangan.



Gambar 2.7 Rangkaian Listrik AC Dengan Beban Induktif

Kumparan memiliki sifat untuk menghalangi terjadinya perubahan nilai arus listrik. Listrik AC memiliki nilai arus yang naik turun membentuk gelombang sinusoidal. Perubahan arus listrik yang naik turun inilah yang dihalangi oleh komponen kumparan di dalam sebuah rangkaian listrik AC. Terhalangnya perubahan arus listrik ini mengakibatkan arus listrik menjadi tertinggal beberapa derajat oleh tegangan listrik pada grafik sinusoidal arus dan tegangan listrik AC.



Gambar 2.8 Gelombang Listrik AC dengan Beban Induktif Murni

Nampak pada gelombang sinusoidal listrik AC di atas, bahwa jika sebuah sumber listrik AC diberi beban induktif murni, maka gelombang arus listrik akan tertinggal sejauh 90° oleh gelombang tegangan. Atas dasar inilah beban induktif dikenal dengan istilah beban lagging (arus tertinggal tegangan).

Nampak pula bahwa dikarenakan pergeseran gelombang arus listrik di atas, maka nilai daya listrik menjadi bergelombang sinusoidal. Pada seperempat gelombang pertama daya diserap oleh beban induktif, namun pada seperempat gelombang kedua daya dikembalikan lagi ke sumber listrik AC. Hal ini menunjukkan bahwa beban induktif murni tidak mengkonsumsi daya nyata sedikitpun, beban induktif murni hanya memakai daya reaktif saja.

3. Beban kapasitif (C)

Beban kapasitif adalah beban yang mengandung suatu rangkaian kapasitor. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 – 1 “leading”. Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan mengeluarkan daya reaktif (kVAR). Arus mendahului tegangan sebesar ϕ° . Karena beban kapasitif dapat mengakibatkan perubahan nilai faktor daya ($\cos\phi$) lebih kecil dari 1 maka rumus daya pada beban kapasitif yaitu:

Untuk beban 1 fasa :

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk beban 3 fasa :

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.5)$$

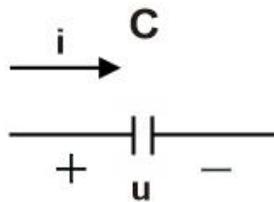
Keterangan :

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

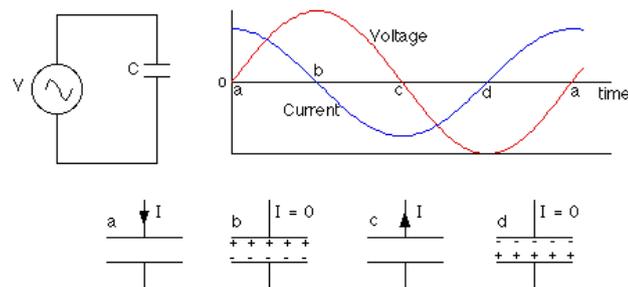
I = Arus (Ampere)

$\text{Cos}\phi$ = Faktor Daya



Gambar 2.9 Simbol Kapasitansi

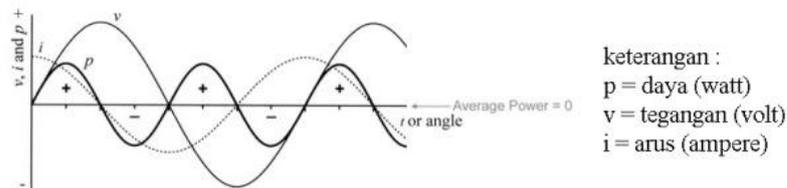
Beban kapasitif merupakan kebalikan dari beban induktif. Jika beban induktif menghalangi terjadinya perubahan nilai arus listrik AC, maka beban kapasitif bersifat menghalangi terjadinya perubahan nilai tegangan listrik. Sifat ini menunjukkan bahwa kapasitor bersifat seakan-akan menyimpan tegangan listrik sesaat.



Gambar 2.10 Rangkaian Listrik AC dengan Beban Kapasitif

Gambar di atas merupakan ilustrasi rangkaian listrik AC dengan beban kapasitor murni. Mendapatkan supply tegangan AC naik dan turun, maka kapasitor akan menyimpan dan melepaskan tegangan listrik sesuai dengan

perubahan tegangan masuknya. Fenomena inilah yang mengakibatkan gelombang arus AC akan mendahului (leading) tegangannya sejauh 90° .



Gambar 2.11 Gelombang Listrik AC dengan Beban Kapasitif Murni

Gambar di atas adalah gelombang sinusoidal tegangan dan arus listrik AC pada beban kapasitor murni. Nampak jika kita plot daya listrik yang dibutuhkan untuk menanggung beban kapasitor juga berbentuk sinusoidal. Daya listrik bernilai positif (daya diserap kapasitor) pada setengah pertama gelombang sinusoidal daya, serta negatif (daya dikeluarkan kapasitor) pada setengah gelombang kedua.

2.2.2 Karakteristik beban listrik reaktansi

Reaktansi merupakan perlawanan bahan bersifat reaksi terhadap perubahan tegangan atau arus. Reaktansi diukur dalam satuan Ohm. Ketika tegangan bolak-balik diberikan pada kapasitor atau induktansi, magnitudo dari arus yang mengalir akan bergantung pada nilai kapasitansi atau induktansinya dan juga pada frekuensi dari tegangan.

Reaktansi terdapat dalam dua bentuk yaitu reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif. Reaktansi suatu kapasitor berbanding terbalik terhadap kapasitansi dan frekuensi tegangan. Reaktansi kapasitif melemah seiring meningkatnya frekuensi sedangkan reaktansi induktif naik secara linier seiring naiknya frekuensi. Reaktansi dari induktor ini berbanding lurus dengan nilai induktansinya dan frekuensi dari tegangan yang diberikan.⁵

⁵ Septia, Arini E. (2015). *Karakterisasi Kelistrikan Membran Selulosa Mikrobial dari Limbah Kulit Pisang Kepok*, Bogor : Institut Pertanian Bogor.

1. Reaktansi induktif

Reaktansi induktif dimana peralatan induktif adalah lilitan kawat, disebut induktor atau solenoid. Ketika lilitan kawat ditempatkan pada rangkaian ac, perubahan medan magnet pada kawat induktor menginduksi suatu arus untuk mengalir melalui kawat tersebut. Karena medan magnet berubah secara kontinu maka akan menginduksi arus yang lain di dalam kawat. Arus induksi ini proportional dengan perubahan medan magnet. Arah arus induksi ini berlawanan dengan arus yang memproduksi medan magnet. Akibatnya akan membuat arus tertinggal (lagging) dibelakang tegangan sejauh seperempat siklus atau 90°. Efek dari induktor pada rangkaian ac diekpresikan oleh reaktansinya, ditulis X_L .⁶

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(2.6)$$

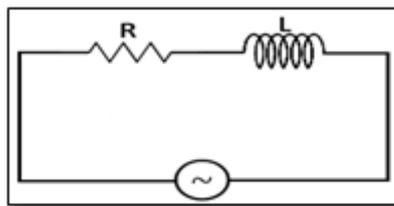
Keterangan :

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

π = 3,14 atau 22/7

L = Nilai induktansi induktor (H)



Gambar 2.12 Rangkaian Resistor Dirangkai Seri Dengan Induktor Pada Arus Bolak-balik

Apabila suatu induktor dirangkai secara seri dengan resistor pada rangkaian arus bolak-balik maka, untuk mengetahui nilai impedansi dapat menggunakan persamaan berikut :

⁶ Cahyadi, Novian D. (2009). *Sistem Otomatis Pengukuran Impedansi Bahan Menggunakan Alat Ukur Impedansi Meter Fluke PM6306*, Depok : FMIPA Universitas Indonesia.

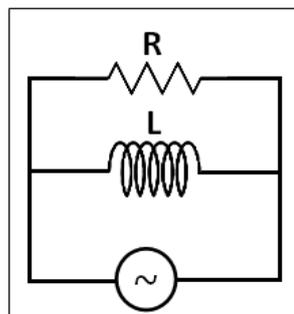
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Hambatan resistor atau resistansi (Ω)

X_L = Reaktansi Induktif (Ω)



Gambar 2.13 Rangkaian Resistor Dirangkai Paralel Dengan Induktor Pada Arus Bolak-balik

Apabila suatu induktor dirangkai paralel dengan resistor pada rangkaian arus bolak-balik maka, untuk mengetahui nilai impedansi dapat menggunakan persamaan berikut :

$$Z = \frac{R \times X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Hambatan resistor atau resistansi (Ω)

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

2. Reaktansi kapasitif

Reaktansi kapasitif adalah hambatan yang timbul pada kapasitor yang dilewati oleh arus bolak-balik. Jika sebuah kapasitor dihubungkan dengan sumber arus searah, maka arus searah yang dapat mengalir hanya sesaat saja dan waktu yang pendek, yaitu pada saat kapasitor dalam keadaan diisi (charged). Kemudian arus searah didalam kapasitor akan menjadi nol kembali. Hal tersebut membuktikan bahwa kapasitor tidak dapat dilalui arus searah atau dikatakan kapasitor memblokir arus searah.

Hambatan aliran elektron ketika melewati kapasitor pada rangkaian AC disebut sebagai 'Reaktansi Kapasitif', reaktansi kapasitif dihitung dalam satuan Ohm (Ω) sama hal-nya seperti resistansi dan reaktansi induktif. Simbol reaktansi induktif adalah ' X_L ', pada rangkaian AC sederhana, reaktansi kapasitif dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.⁷

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \dots\dots\dots(2.9)$$

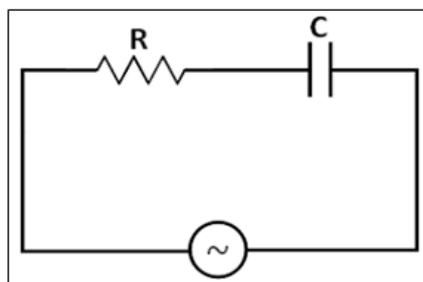
Keterangan :

X_C = Reaktansi Kapasitif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

π = 3,14 atau 22/7

C = Nilai kapasitas kapasitor (F)



Gambar 2.14 Rangkaian Seri Resistor Dengan Kapasitor Pada Arus Bolak-balik

⁷ Tobi, Markus D., & Harling, Vina N. (2019). *Analisis Percobaan Karakteristik Beban Nol Generator Induksi 1 Fasa*, Sorong : Politeknik Saint Paul.

Apabila suatu kapasitor dirangkai secara seri dengan resistor pada rangkaian arus bolak-balik maka, untuk mengetahui nilai impedansi dapat menggunakan persamaan berikut :

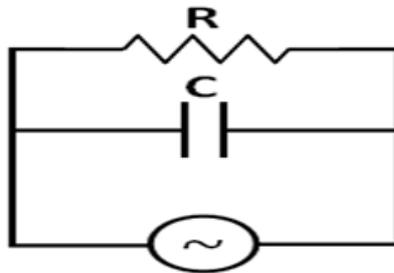
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Hambatan resistor atau resistansi (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)



Gambar 2.15 Rangkaian Paralel Resistor Dengan Kapasitor Pada Arus AC

Apabila suatu kapasitor dirangkai secara paralel dengan resistor pada rangkaian arus bolak-balik maka, untuk mengetahui nilai impledansi dapat menggunakan persamaan berikut :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Hambatan resistor atau resistansi (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

2.3 Daya Listrik⁸

Daya ialah banyaknya perubahan energi terhadap waktu dalam besaran tegangan dan arus. Daya listrik dapat dibagi menjadi 3 yaitu daya nyata (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S).

Daya nyata merupakan daya sebenarnya yang dibutuhkan oleh beban-beban listrik/peralatan rumah tangga. Satuan daya nyata adalah watt (W).

Daya reaktif adalah daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif. Satuan dari daya reaktif adalah volt ampere reaktif (VAR).

Daya semu merupakan resultan antara daya nyata dan daya reaktif. Satuan dari daya semu adalah volt ampere (VA).

Faktor daya ($\cos \phi$) merupakan suatu konstanta pengali dengan nilai 0 sampai 1, yang menunjukkan seberapa besar daya nyata yang diserap oleh beban resistif dari daya semu yang ada pada suatu beban total.

2.3.1 Jenis-jenis daya listrik

Daya listrik memiliki 3 jenis daya yaitu :

1. Daya semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus listrik. Daya semu merupakan daya yang disediakan oleh sumber listrik kepada konsumen. Satuan daya semu adalah VA (*Volt.Ampere*).

Untuk 1 fasa :

$$S = V \times I \dots\dots\dots(2.12)$$

Untuk 3 fasa :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus (Ampere)

⁸ Cekdin, C., & Barlian, T. (2013). *Transmisi Daya Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset.

2. Daya Aktif

Daya aktif (daya nyata) merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Secara sederhana, daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif. Daya nyata menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit listrik ke jaringan beban untuk dapat dikonversikan menjadi energi lain.

Daya listrik pada arus listrik DC, dirumuskan sebagai perkalian arus listrik dengan tegangan.

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.14)$$

Namun pada listrik AC perhitungan daya menjadi sedikit berbeda karena melibatkan faktor daya ($\cos \varphi$).

Untuk 1 fasa :

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.15)$$

Untuk 3 fasa :

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan :

P = Daya nyata (Watt)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Ampere)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

3. Daya Reaktif

Daya reaktif (daya imajiner) merupakan hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya. Satuan daya reaktif adalah VAR (*Volt.Amper Reaktif*).

Secara sederhana, daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet di kumparan-kumparan beban induktif. Seperti pada motor listrik induksi misalnya, medan magnet yang dibangkitkan oleh daya reaktif di kumparan stator berfungsi untuk menginduksi rotor sehingga tercipta medan magnet induksi pada komponen rotor. Pada trafo, daya reaktif berfungsi untuk membangkitkan medan magnet pada kumparan primer, sehingga medan magnet primer tersebut menginduksi kumparan sekunder.

Persamaan daya reaktif sebagai berikut :

Untuk 1 fasa :

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.17)$$

Untuk 3 fasa :

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (VAR)

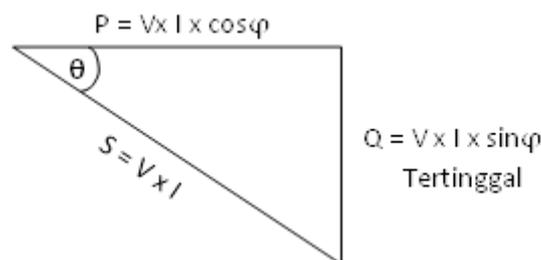
V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Ampere)

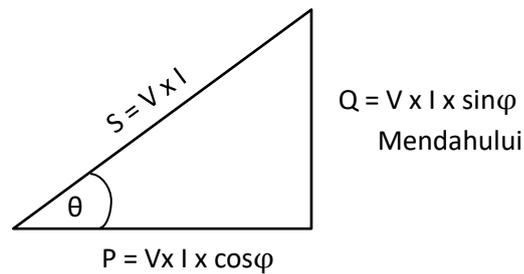
$\sin \varphi$ = Faktor daya (tergantung nilai φ)

2.3.2 Segitiga daya

Segitiga daya adalah sketsa dari daya semu, daya reaktif dan daya aktif. Gambar 2.12 adalah sketsa dari segitiga daya yang bersifat induktif dengan sudut antara daya semu dan daya aktif adalah θ .



Gambar 2.16 Segitiga Daya Yang Bersifat Induktif



Gambar 2.17 Segitiga Daya Yang Bersifat Kapasitif

Dari segitiga daya tersebut maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\text{Cos}\phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\text{Sin}\phi = \frac{Q}{S} \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan :

S = Daya Semu (VA)

P = Daya Aktif (Watt)

Q = Daya Reaktif (VAR)

2.4 Efisiensi Pemakaian Daya Listrik

Efisiensi merupakan suatu ukuran dari tingkat keberhasilan sebuah kegiatan atau aktivitas yang dinilai dengan berdasarkan besarnya sumber daya yang digunakan untuk mencapai hasil yang diinginkan.

Menurut salah satu ahli yaitu, SP.Hasibuan (1984;233-4) mengutip pernyataan dari H. Emerson yang mengatakan bahwa “Efisiensi merupakan perbandingan yang terbaik antara sebuah input (masukan) dan output (hasil antara keuntungan dengan sumber-sumber yang dipergunakan), seperti halnya juga hasil optimal yang telah dicapai dengan penggunaan sumber yang terbatas.

Maka dari itu efisiensi pemakaian daya listrik dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.21)$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)

P_{out} = Daya Beban terpakai (Watt)

P_{in} = Daya Sumber tersedia (Watt)

Dengan persamaan tersebut kita dapat mengetahui seberapa besar persentase keefisienan pemakaian daya listrik dari sistem kelistrikan yang terpasang. Apabila keefisienan suatu sistem kelistrikan dinyatakan kurang baik, maka kita dapat memperbaiki efisiensi tersebut dengan cara memasang kapasitor untuk memperbaiki faktor daya.

2.5 Perbaikan Faktor Daya

2.5.1 Pengertian faktor daya

Faktor daya (*power factor*) atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu/daya total, atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Umumnya faktor daya listrik ini disebut juga cosinus phi. ($\cos \phi$). Berikut persamaan faktor daya :

$$\text{Cos}\phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

$\text{Cos}\phi$ = Faktor Daya

P = Daya Aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistem pendistribusian. Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5 maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).

Faktor daya menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya unity, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem.

2.5.2 Perbaikan faktor daya dengan memasang kapasitor⁹

Sebagaimana sudah dikenal sebelumnya, karakteristik motor induksi adalah faktor dayanya yang kurang dari satu, menyebabkan efisiensi keseluruhan yang lebih rendah (dan biaya operasi keseluruhan yang lebih tinggi) untuk seluruh sistem listrik pabrik.

Kapasitor yang disambung secara paralel (shunt) dengan motor kadangkala digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor tidak akan memperbaiki faktor daya motor itu sendiri akan tetapi terminal starternya dimana tenaga dibangkitkan atau didistribusikan. Manfaat dari koreksi faktor daya meliputi penurunan kebutuhan kVA (jadi mengurangi biaya kebutuhan utilitas), penurunan kehilangan IR pada kabel di bagian hulu kapasitor (jadi mengurangi biaya energi), berkurangnya penurunan tegangan pada kabel (mengakibatkan pengaturan tegangan meningkat), dan kenaikan dalam efisiensi keseluruhan sistem listrik pabrik.

⁹ Daryanto. (2016). *Konsep Dasar Teknik Elektronika Kelistrikan*, Bandung : Alfabeta.

Besarnya rating kapasitor daya dapat ditentukan setelah didapat data-data dari peralatan listrik, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan rating kapasitor daya tersebut.

Rating kapasitor daya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Q_c = P (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \dots\dots\dots(2.23)$$

Atau

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan :

Q_c = Daya Reaktif Kapasitor (Var)

Q_1 = Daya Reaktif Sebelum Perbaikan $\cos\phi$ (Var)

Q_2 = Daya Reaktif Setelah Perbaikan $\cos\phi$ (Var)

P = Daya Aktif (Watt)

$\tan\phi_1$ = diperoleh dari $\cos\phi$ awal

$\tan\phi_2$ = diperoleh dari $\cos\phi$ yang diinginkan

Faktor daya dapat diperbaiki dengan memasang kapasitor pengkoreksi faktor daya pada sistim distribusi listrik/instalasi listrik di pabrik/industri. Kapasitor bertindak sebagai pembangkit daya reaktif dan oleh karenanya akan mengurangi jumlah daya reaktif, juga daya semu yang dihasilkan oleh bagian utilitas. Berikut persamaan untuk menghitung kapasitas kapasitor yang akan dipasang untuk memperbaiki faktor daya :

$$Q_c = I^2 \cdot X_c \text{ atau } V^2 / X_c \dots\dots\dots(2.25)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$C = \frac{1}{2\pi X_c} \dots\dots\dots(2.27)$$



Keterangan :

Q_c = Daya Reaktif Kapasitor

X_c = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

C = Kapasitor (Farad)

I = Arus (Ampere)

V = Tegangan (Volt)

F = Frekuensi (Hertz)

$\Pi = 3,14$

Adapun keuntungan perbaikan faktor daya melalui pemasangan kapasitor sebagai berikut;

Bagi Konsumen, khususnya perusahaan atau industri:

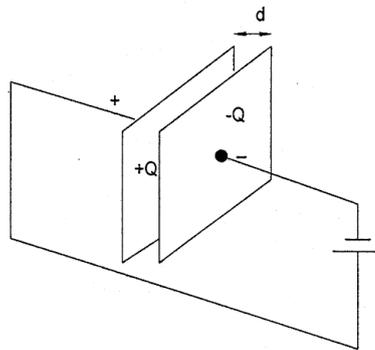
1. Diperlukan hanya sekali investasi untuk pembelian dan pemasangan kapasitor dan tidak ada biaya terus menerus.
2. Mengurangi biaya listrik bagi perusahaan.
3. Mengurangi kehilangan distribusi (kWh) dalam jaringan/instalasi pabrik.
4. Tingkat tegangan pada beban akhir meningkat sehingga meningkatkan kinerja motor.

Bagi utilitas pemasok listrik:

1. Komponen reaktif pada jaringan dan arus total pada sistim ujung akhir berkurang.
2. Kehilangan daya dalam sistim berkurang karena penurunan arus.
3. Kemampuan kapasitas jaringan distribusi listrik meningkat, mengurangi kebutuhan untuk memasang kapasitas tambahan.

2.6 Kapasitor

Pada dasarnya sebuah kapasitor merupakan dua keping konduktor yang dipisahkan oleh suatu isolator. Secara skematis sebuah kapasitor keping sejajar dapat digambarkan seperti gambar 2.19 berikut ini.



Gambar 2.18 Kapasitor Keping Sejajar

Misalkan tegangan DC dikenakan pada kedua keping seperti ditunjukkan pada gambar. Karena kedua keping tersebut dipisahkan oleh suatu isolator, pada dasarnya tidak ada elektron yang dapat menyeberang celah di antara kedua keping. Pada saat baterai belum terhubung, kedua keping akan bersifat netral (belum termuati).

Saat baterai terhubung, titik dimana kawat pada ujung kutub negatif dihubungkan akan menolak elektron, sedangkan titik dimana kutub positif terhubung akan menarik elektron. Elektron-elektron tersebut akan tersebar ke seluruh keping kapasitor. Sesaat, elektron mengalir ke dalam keping sebelah kanan dan elektron mengalir keluar dari keping sebelah kiri; pada kondisi ini arus mengalir melalui kapasitor walaupun sebenarnya tidak ada elektron yang mengalir melalui celah kedua keping tersebut.

Setelah bagian luar dari keping termuati, berangsur-angsur akan menolak muatan baru dari baterai. Karenanya arus pada keping tersebut akan menurun besarnya terhadap waktu sampai kedua keping tersebut berada pada tegangan yang dimiliki baterai. Keping sebelah kanan akan memiliki kelebihan elektron yang terukur dengan muatan $-Q$ dan pada keping sebelah kiri termuati sebesar $+Q$.

Berikut ini persamaan-persamaan kapasitor :

$$Q = CV \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan :

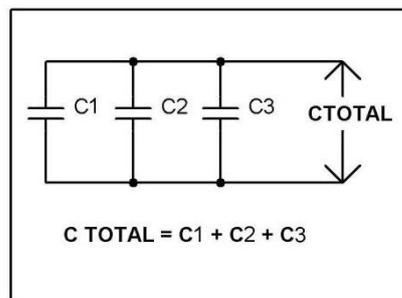
Q = muatan elektron dalam C (coulombs)

C = nilai kapasitansi dalam F (farads)

V = besar tegangan dalam V (volt)

1. Rumus untuk Kapasitor dengan Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel merupakan rangkaian kapasitor dengan menghubungkan kutub sejenis antara kapasitor, seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.19 Rangkaian Paralel Kapasitor

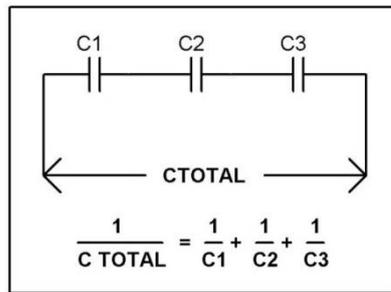
$$C_{\text{total}} = C1 + C2 + C3 + \dots\dots\dots(2.29)$$

$$Q_{\text{total}} = Q1+Q2+Q3 + \dots\dots\dots(2.30)$$

$$V_{\text{total}} = V1=V2=V3= \dots\dots\dots(2.31)$$

2. Rumus untuk Kapasitor dengan Rangkaian Seri

Rangkaian seri pada kapasitor merupakan rangkaian kapasitor dengan menghubungkan kutub tidak sejenis antara kapasitor, seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut ini:



Gambar 2.20 Rangkaian Seri Kapasitor

$$1/C_{\text{total}} = 1/C1 + 1/C2 + 1/C3 + \dots (2.32)$$

$$Q_{\text{total}} = Q1 = Q2 = Q3 = \dots (2.33)$$

$$V_{\text{total}} = V1 + V2 + V3 + \dots (2.34)$$