

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut merupakan rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan skripsi ini, diantaranya:

- Thomas Ackermann, Göran Andersson, Lennart Söder (2001) melakukan penelitian mengenai Distribution Generation. Berdasarkan penelitian ini disimpulkan bahwa Distributed Generation dapat didefinisikan sebagai pembangkit energi listrik dalam jaringan distribusi atau pada jaringan dekat pengguna.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 JARINGAN DISTRIBUSI

Jaringan distribusi adalah suatu sistem jaringan yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat listrik hingga kerumah-rumah dan konsumen lainnya (pelanggan). Dalam istilah lain dijelaskan bahwa sistem distribusi adalah keseluruhan komponen dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan secara langsung antara sumber daya yang besar (seperti pada gardu transmisi) dengan konsumen tenaga listrik. Secara umum yang termasuk ke dalam sistem distribusi antara lain:

1. Gardu Induk

Gardu Induk merupakan unit di dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menerima daya dari sistem transmisi untuk kemudian diteruskan sistem distribusi. Di dalam Gardu Induk ini tegangan dari sistem transmisi (150kV-500kV) akan diubah menjadi tegangan untuk distribusi (20kV).

2. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari GI menuju gardu distribusi. Namun jaringan subtransmisi belum tentu ada di seluruh sistem distribusi, karena jaringan subtransmisi merupakan jaringan dengan tegangan peralihan. Seandainya pada jaringan transmisi tegangan yang dipakai adalah 500 kV, maka setelah masuk GI tegangan menjadi 150 kV (belum termasuk tegangan distribusi). Sehingga jaringan ini dinamakan subtransmisi karena masih bertegangan tinggi.

3. Gardu Distribusi Utama

Gardu distribusi merupakan unit dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari GI atau jaringan subtransmisi untuk kemudian disalurkan kepada penyulang primer atau langsung kepada konsumen.

4. Saluran Penyulang Utama

Saluran penyulang utama merupakan saluran atau rangkaian yang berfungsi untuk menghubungkan antara gardu distribusi utama dengan gardu transformator distribusi atau menghubungkan GI dengan gardu transformator distribusi.

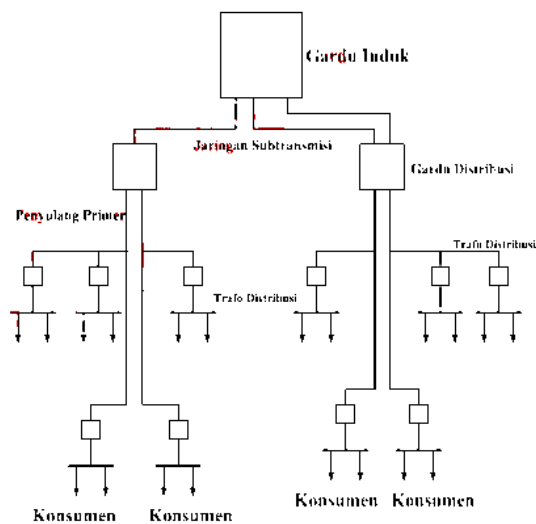
5. Transformator Distribusi

Transformator distribusi berada di dalam gardu gardu distribusi. Berfungsi untuk mengubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380

V). Kemudian daya dengan tegangan rendah tersebut disalurkan kepada konsumen.

6. Rangkaian Sekunder

Rangkaian sekunder merupakan rangkaian yang berasal dari gardu-gardu distribusi yang berfungsi untuk melayani konsumen yang tersebar di sepanjang simpul – simpul distribusi. Gambar 2.1 merupakan contoh dari komponen penyusun sistem distribusi.



Gambar 2.1 Komponen Penyusun Sistem Distribusi
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.2 STRUKTUR JARINGAN DISTRIBUSI

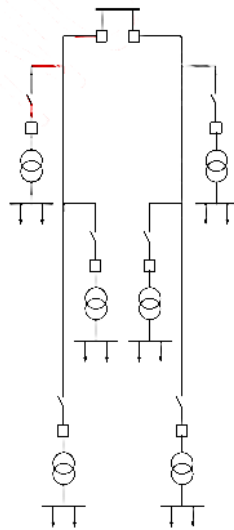
Pada umumnya struktur jaringan distribusi dapat dibagi menjadi empat jenis, antara lain:

1. Jaringan radial
2. Jaringan lingkaran
3. Jaringan spindel

4. Jaringan anyaman

2.2.2.1 Struktur Jaringan Radial

Struktur jaringan distribusi radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik ditinjau dari perencanaannya maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu titik akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.

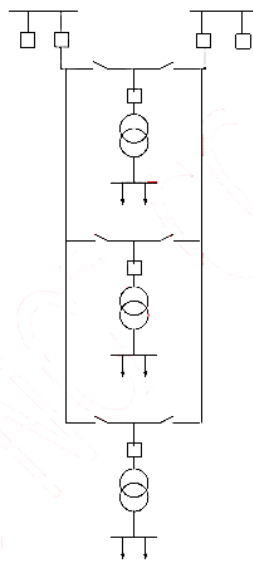


Gambar 2.2 Struktur Jaringan Radial

(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Untuk kontinuitas penyaluran yang lebih baik, maka struktur jaringan pada gambar 2.2 dikembangkan menjadi struktur jaringan radial ganda. Pada struktur jaringan radial ganda, setiap gardu distribusi mendapat suplai dari dua penyulang radial yang

berasal dari GI atau dari gardu distribusi lainnya. Dalam keadaan operasi normal, maka gardu hanya mendapat suplai tenaga listrik dari satu penyulang saja. Namun apabila terjadi gangguan, maka jaringan akan dipindahkan ke penyulang lainnya. Sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat diperbaiki. Gambar 2.3 merupakan contoh struktur jaringan radial ganda.

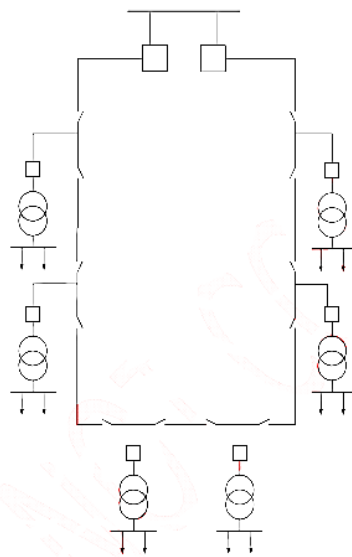


Gambar 2.3. Struktur Jaringan Radial Ganda
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.2.2 Struktur Jaringan Lingkaran

Struktur jaringan distribusi lingkaran merupakan struktur jaringan distribusi tertutup yang dimulai dari sumber daya besar (GI) kemudian melewati beberapa gardu gardu distribusi kemudian kembali lagi menuju sumber semula sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.4. Kelebihan utama dari struktur jaringan distribusi ini adalah apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak mengganggu jaringan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi

karena pada struktur jaringan distribusi lingkaran ini terdapat dua titik yang dapat disambungkan secara bergantian atau secara bersamaan. Sehingga kontinuitas penyalurannya sudah cukup baik. Meskipun jika terjadi gangguan pada banyak titik pada rangkaian / serentak, maka keseluruhan jaringan dapat terganggu juga.

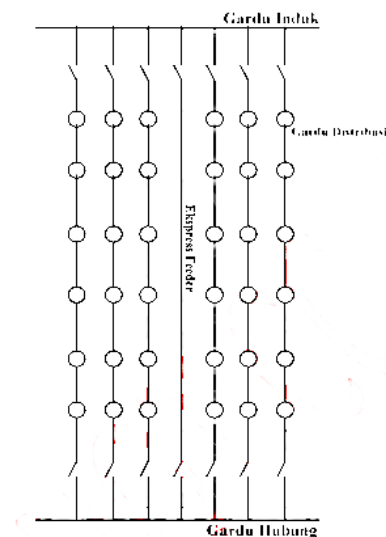


Gambar 2.4. Struktur Jaringan Lingkaran / *Loop*
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.2.3 Struktur Jaringan Spindel

Struktur jaringan spindel merupakan hasil pengembangan dari struktur jaringan distribusi radial dan struktur jaringan distribusi lingkaran. Pada struktur jaringan spindel ini penyulang utama yang dipakai bertambah banyak jumlahnya serta memiliki penyulang cadangan. Konfigurasi yang umum dipakai untuk struktur jaringan distribusi spindel adalah tujuh buah penyulang utama dan satu buah penyulang cadangan. Seluruh penyulang ini bertemu pada satu titik yang menghubungkan seluruh penyulang utama dengan penyulang cadangan. Penyulang

cadangan merupakan saluran khusus yang dilengkapi pemutus dan pemisah daya. Titik temu penyulang penyulang utama dengan penyulang cadangan berada pada sebuah gardu hubung. Penyulang cadangan berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik darurat apabila saluran penyulang utama ada yang mengalami gangguan. Dalam keadaan operasi normal, maka penyulang cadangan tidak terhubung dengan beban. Gambar 2.5 merupakan contoh struktur jaringan spindel.

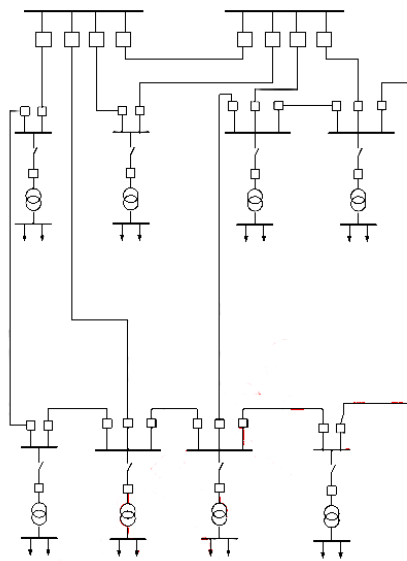


Gambar 2.5. Struktur Jaringan Spindel
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.2.4 Struktur Jaringan Anyaman

Struktur jaringan distribusi anyaman merupakan bentuk jaringan yang paling rumit apabila dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Untuk setiap gardu distribusi akan mendapat suplai tenaga listrik dari dua atau lebih penyulang, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listriknya jauh lebih baik dibandingkan struktur jaringan distribusi yang lain. Namun struktur jaringan distribusi jenis ini memiliki biaya investasi yang lebih mahal dibandingkan dengan

struktur jaringan distribusi lainnya. Struktur ini biasanya dipakai untuk daerah yang memerlukan tingkat kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang tinggi seperti pada daerah industri yang memerlukan suplai secara konstan. Gambar di bawah yaitu gambar 2.6 merupakan contoh struktur jaringan anyaman.



Gambar 2.6. Struktur Jaringan Anyaman
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.3 DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Terdapat dua cara dalam distribusi tenaga listrik ke daerah pemukiman, antara lain melalui gardu distribusi atau penyaluran setempat.

2.2.3.1 Gardu Distribusi

Penyaluran daya dengan menggunakan gardu distribusi yaitu menggunakan sistem tiga fasa untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) dengan transformator tiga fasa dengan kapasitas yang cukup besar. Jaringan tegangan rendah ditarik dari sisi sekunder transformator untuk kemudian

disalurkan kepada konsumen. Sistem tiga fasa tersedia untuk seluruh daerah pelayanan distribusi, walaupun sebagian besar konsumen mendapat pelayanan distribusi tenaga listrik satu fasa. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa tiga kawat. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa empat kawat dengan netral.

2.2.3.2 Penyaluran Setempat

Penyaluran daya dengan menggunakan penyaluran setempat umumnya digunakan pada daerah-daerah dengan kondisi beban perumahan tidak terlalu besar, atau pada suatu daerah dengan tingkat pertumbuhan beban yang tinggi. Untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem tiga fasa dengan percabangan satu fasa. Sementara untuk jaringan tegangan rendahnya menggunakan sistem satu fasa. Transformator yang digunakan memiliki kapasitas yang kecil dan cenderung dekat dengan konsumen. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa empat kawat dengan netral. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa tiga kawat dengan netral.

2.2.4 TEGANGAN DISTRIBUSI

Berikut adalah beberapa jenis dari tegangan distribusi, yaitu:

2.2.4.1 Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20

kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu – gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

2.2.4.2 Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu – gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyalurannya dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Tegangan rendah di Indonesia adalah 380/220 V. 380 V merupakan besar tegangan antar fasa sementara tegangan 220 V merupakan tegangan fasa dengan netral.

2.2.4.3 Tegangan Pelayanan

Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik kepada pelanggan – pelanggannya. Di Indonesia besarnya tegangan pelayanan pada umumnya sebagai berikut:

- a. 380/220 V tiga fasa empat kawat
- b. 220 V satu fasa dua kawat
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- e. 20 kV tiga fasa tiga kawat

Selama beberapa tahun terakhir ini sistem distribusi mengarah kepada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi. Dengan tegangan sistem distribusi yang lebih tinggi, maka sistem dapat membawa daya lebih besar dengan nilai arus yang sama.

Arus yang lebih kecil berarti jatuh tegangan (*drop voltage*) yang lebih kecil, rugi – rugi yang lebih sedikit dan kapasitas membawa daya lebih besar.

Tabel 2.1. Perbandingan Keuntungan Kerugian Tegangan Tinggi pada Jaringan Distribusi

Keuntungan	Kerugian
Jatuh tegangan akan lebih kecil pada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi	Rangkaian yang lebih panjang, maka akan lebih sering terdapat gangguan pada pelanggan
Untuk daya yang tetap, sistem dengan tegangan yang lebih tinggi memiliki rugi – rugi saluran yang lebih kecil	Perbaikan dan pemeliharaan dilakukan pada sistem bertegangan tinggi lebih berbahaya
Dengan jarak tegangan yang lebih kecil dan kapasitas yang lebih besar, maka sistem dengan tegangan yang lebih kecil dapat menjangkau daerah yang lebih luas	Biaya perlengkapan untuk sistem dengan tegangan yang lebih tinggi, seperti isolasi kabel sampai pada transformatornya, akan lebih mahal
Karena jangkauan yang lebih luas, maka pada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi, gardu – gardu yang digunakan akan lebih sedikit	

(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Sistem distribusi dengan tegangan yang lebih besar membutuhkan regulator tegangan dan kapasitor untuk pendukung tegangan yang lebih sedikit. Perlengkapan yang digunakan juga membutuhkan konduktor yang lebih kecil atau dapat membawa daya yang lebih besar untuk konduktor yang berukuran sama pada sistem

distribusi dengan tegangan yang lebih tinggi. Keuntungan sistem distribusi dengan tegangan lebih tinggi dapat dilihat pada persamaan berikut:

1. Daya

Untuk arus yang sama, daya akan berbanding lurus dengan tegangan.

$$P_2 = \frac{V_2}{V_1} P_1 \quad (2.1)$$

Ketika $I_1 = I_2$

2. Arus

Untuk daya yang sama, peningkatan tegangan akan berbanding lurus dengan penurunan besarnya arus.

$$I_2 = \frac{V_1}{V_2} I_1 \quad (2.2)$$

Ketika $P_2 = P_1$

3. Jatuh Tegangan

Untuk daya yang dihantarkan sama, maka persentase jatuh tegangan berubah sesuai dengan perbandingan tegangan dikuadratkan. Rangkaian dengan tegangan 20 kV memiliki persentase jatuh tegangan lebih besar daripada rangkaian dengan tegangan 40 kV dengan beban yang sama.

$$V_{\%2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 V_{\%1} \quad (2.3)$$

4. Luas Area Pelayanan

Untuk kepadatan beban yang sama, ruang lingkup akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan tegangan. Sistem 440 V dapat mencakup wilayah dua kali daripada wilayah yang dapat dicakup oleh 220 V.

$$A_2 = \frac{V_2}{V_1} A_1 \quad (2.4)$$

Dimana

V_1, V_2 = Tegangan pada rangkaian 1 dan 2

P_1, P_2 = Daya pada rangkain 1 dan 2

I_1, I_2 = Arus pada rangkaian 1 dan 2

$V\%_1, V\%_2$ = Jatuh tegangan / panjang unit (persen) pada rangkaian 1 dan 2

A_1, A_2 = Ruang lingkup dari rangkaian 1 dan 2

2.2.5 JENIS-JENIS PERMASALAHAN KUALITAS DAYA LISTRIK

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah (Roger C.Dugan,1996):

1. Gejala Peralihan (*Transient*), yaitu suatu gejala perubahan variabel (tegangan, arus dan lain-lain) yang terjadi selama masa transisi dari keadaan operasi tunak (*steady state*) menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Pendek (*Short-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 (satu) menit.
3. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (*Long-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 (satu) menit.
4. Ketidakseimbangan Tegangan, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.

5. Distorsi Gelombang, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
6. Fluktuasi Tegangan, adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.
7. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik.

2.2.6 BESARAN LISTRIK DASAR

Terdapat tiga buah besaran listrik dasar yang digunakan di dalam teknik tenaga listrik, yaitu beda potensial atau sering disebut sebagai tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi. Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan di dalam masalah-masalah sistem tenaga listrik. Selain ketiga besaran tersebut, masih terdapat satu faktor penting di dalam pembahasan sistem tenaga listrik yaitu daya dan faktor daya.

2.2.6.1 Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik, dan dinyatakan dalam satuan *volt*.

Berikut rumus persamaanya:

$$V = I.R \quad (2.5)$$

Keterangan:

V = Beda potensial pada kedua ujung rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *volt* (V).

I = Kuat arus listrik yang mengalir pada suatu rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *Ampere* (A).

R = Besarnya hambatan dalam suatu rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *Ohm*.

2.2.6.2 Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konvensi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik diukur dalam satuan *Ampere* (A), adalah satu *Coulomb* per detik. Arus listrik dirumuskan:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.6)$$

Keterangan:

I = arus listrik (A)

dq = sejumlah muatan (C)

dt = waktu (detik)

2.2.6.3 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan, satuan frekuensi dinyatakan dalam hertz (Hz) yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali

per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti rumus di bawah ini:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

Di setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika berlaku frekuensi 60 Hz.

2.2.6.4 Daya dan Faktor Daya

Daya adalah suatu ukuran terhadap penggunaan energi dalam suatu waktu tertentu, di mana:

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.8)$$

Keterangan:

P = daya (*Watt*)

E = energi (*Joule*)

t = waktu (detik)

Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu. Daya nyata atau daya aktif adalah daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan *Watt* (Sanjeev Sharma, 2007), di mana:

$$P = I^2 R \quad (2.9)$$

Keterangan:

P = daya (*Watt*)

I = arus listrik (*Ampere*)

R = tahanan (*Ohm*)

Daya reaktif dinyatakan dengan satuan VAR (Volt Amper Reaktan) adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang bisa digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, *lift*, escalator, kompresor, konveyor dan lain-lain. Beban-beban yang bersifat kapasitif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi di mana (Sanjeev Sharma, 2007):

$$Q = I^2 X \quad (2.10)$$

$$X = X_L - X_C \quad (2.11)$$

Keterangan:

Q = daya (VAR)

X = reaktansi total (*Ohm*)

X_L = reaktansi induktif (*Ohm*)

X_C = reaktansi kapasitif (*Ohm*)

Daya semu adalah penjumlahan secara vector antara daya aktif dan daya reaktif, di mana:

$$S = P + jQ \quad (2.12)$$

Daya semu dinyatakan dengan VA (*Volt Ampere*) adalah hasil kali antara tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban, di mana:

$$S = VI \quad (2.13)$$

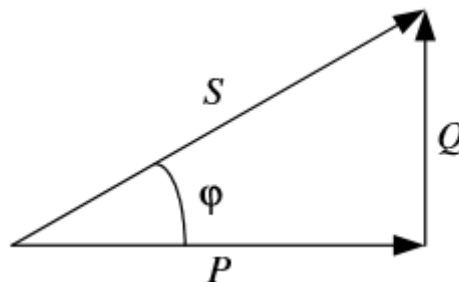
Keterangan:

S = daya semu (VA)

V = tegangan (*Volt*)

I = arus (A)

Hubungan ketiga buah daya listrik yaitu daya aktif P, daya reaktif Q, serta daya semu S, dinyatakan dengan sebuah segitiga, yang disebut segitiga daya (B. L. Theraja, 1984) Berikut gambar 2.7 yang menjelaskan tentang segitiga daya.



Gambar 2.7. Segitiga Daya

(Sumber: file:///C:/Users/alfarobi/Downloads/Documents/jtptunimus-gdl-noviariant-5926-3-bab2.pdf)

Dari gambar segitiga daya tersebut, hubungan antara ketiga daya listrik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.14)$$

$$P = S \cos \varphi \quad (2.15)$$

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.16)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (2.17)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.18)$$

$$\cos \varphi = pf = \frac{P}{S} \quad (2.19)$$

φ adalah sudut antara daya aktif dan daya semu S , sehingga $\cos \varphi$ didefinisikan sebagai faktor daya (*power factor, pf*). Untuk beban yang bersifat induktif, *pf lagging* di mana arusnya tertinggal dari tegangannya. Sementara untuk beban yang bersifat kapasitif, *pf leading* di mana arusnya mendahului tegangannya.

2.2.7 PENYUSUTAN ENERGI PADA JARINGAN DISTRIBUSI

Rugi-rugi atau biasa dikatakan sebagai susut energi merupakan fenomena yang umum terjadi dimana suatu sistem tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100 %. Artinya selalu ada bagian dari daya yang hilang ketika disalurkan, sehingga tidak seluruh daya yang dikirimkan dapat sampai pada konsumen. Daya yang hilang dalam jumlah waktu tertentu dikatakan sebagai energi yang hilang. Penyusutan energi pada jaringan distribusi ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain:

1. Penyusutan energi pada penyulang
2. Penyusutan energi pada transformator distribusi
3. Penyusutan energi pada persambungan (*jointing*)

2.2.7.1 Penyusutan Energi Pada Penyulang

Penyulang merupakan bagian dari sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan antara Gardu Induk (GI) dengan gardu gardu distribusi yang tersebar di seluruh wilayah pelayanan. Penyulang sendiri dapat dipisahkan menjadi beberapa bagian, antara lain:

2.2.7.1.1 Konduktor Fasa

Pada bagian penyulang ini konduktor fasa merupakan bagian dari penyulang yang terbuat dari bahan logam. Umumnya bahan yang digunakan berupa aluminium dan tembaga. Karena terbuat dari bahan logam, maka konduktor yang dipakai memiliki nilai resistansi (R) tertentu. Resistansi dari konduktor pada kabel merupakan bagian penting dari impedansi yang digunakan untuk studi kegagalan dan studi aliran daya. Resistansi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kapasitas arus yang dapat dibawa oleh kabel. Variabel umum yang mempengaruhi resistansi adalah suhu dari konduktor tersebut, dapat dikatakan bahwa resistansi meningkat seiring dengan peningkatan suhu sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{M+t2}{M+t1} \quad (2.20)$$

Dimana

R_{t2} = Resistansi pada saat suhu t_2 , °C

R_{t1} = Resistansi pada saat suhu t_1 , °C

M = Koefisien *temperature* untuk material tertentu

= 228.1 untuk aluminium

= 245.5 untuk tembaga

Untuk jangkauan suhu yang luas, resistansi akan meningkat hampir linier terhadap suhu baik pada aluminium maupun pada tembaga. Efek dari suhu terhadap kenaikan resistansi dapat disederhanakan sebagai persamaan linier sebagai berikut:

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (2.21)$$

Dimana

α = Koefisien *temperature* dari resistansi

= 0.00404 untuk 61.2 % aluminium IACS pada suhu 20 °C

= 0.00347 untuk 6201-T81 aluminium *alloy* pada suhu 20 °C

= 0.00383 untuk tembaga *hard-drawn* pada suhu 20 °C

= 0.0036 untuk aluminium-*clad steel* pada suhu 20 °C

Sehingga dari persamaan (2.20) dan (2.21) diatas di dapat hubungan bahwa $\alpha = \frac{1}{M}$

Yang perlu diperhatikan dalam permasalahan ini adalah ketika jaringan transmisi masuk ke dalam GI, maka tegangan sistem akan diturunkan dari tegangan tinggi untuk transmisi (150 kV) menjadi tagangan menengah (20 kV) sehingga dengan besar daya yang sama, maka penurunan tegangan akan sejalan dengan kenaikan arus pada sistem. Arus yang besar pada konduktor dapat menimbulkan rugi-rugi daya yang besar pada konduktor tersebut karena fungsi arus merupakan fungsi kuadrat pada persamaan daya yang hilang, sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut:

$$P_{losses} = I^2 R \quad (2.22)$$

Dimana

P_{losses} = Daya yang hilang pada rangkaian, *Watt*

I = Arus yang mengalir pada rangkaian, *Ampere*

R = Hambatan pada rangkaian, *Ohm*

Arus dengan besar 4 *ampere* membuat daya yang hilang 16 kali lebih besar dibandingkan arus sebesar 1 *ampere* pada konduktor dengan hambatan yang sama. Sementara total energi yang hilang akibat terjadinya susut daya ini dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut:

$$W_{\text{losses}} = P_{\text{losses}} \cdot t \quad (2.23)$$

Dimana

W_{losses} = Energi yang hilang, *Joule*

P_{losses} = Daya yang hilang pada rangkaian, *Watt*

t = Waktu, detik

2.2.7.1.2 Kabel Distribusi

Pada umumnya kabel yang digunakan untuk distribusi terdiri atas konduktor fasa, kemudian terdapat pelindung yang terbuat dari semikonduktor, isolasi kabel tersebut, pelindung isolator yang terbuat dari semikonduktor, kawat netral atau pelindung, dan selubung penutup bagian terakhir atau luarnya. Sebagian besar kabel distribusi merupakan kabel dengan konduktor tunggal. Terdapat dua jenis kabel, yaitu kebel dengan netral yang tersusun secara konsentrik yang terbuat dari alumunium, isolasi padat, dan netral yang tersusun secara konsentrik. Netral konsentrik terbuat dari beberapa kawat tembaga yang dililit mengitari isolasi.

Netral yang konsentrik merupakan netral yang sesungguhnya. Artinya kawat netral tersebut dapat membawa arus balik pada sistem pentanahan. Kabel distribusi bawah tanah untuk kawasan perumahan umumnya memiliki netral yang konsentrik. Kabel yang dilengkapi netral konsentrik juga digunakan untuk aplikasi

saluran utama tiga fasa dan penyaluran daya tiga fasa untuk kebutuhan industri dan kebutuhan komersial lainnya. Gambar 2.8 contoh penampang kabel distribusi.



Gambar 2.8 Penampang Kabel Distribusi
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Sementara itu kabel daya memiliki konduktor fasa yang terbuat dari tembaga atau alumunium, isolasi padat, dan umumnya pita pelindung tipis yang terbuat dari tembaga. Untuk keperluan rangkaian distribusi, kabel daya digunakan untuk aplikasi penyulang saluran utama, penyulang rangkaian dan untuk aplikasi tiga fasa dengan arus besar lainnya. Selain dua jenis kabel utama tersebut, juga terdapat kabel untuk keperluan aplikasi dengan tegangan menengah, seperti kabel daya tiga konduktor fasa, kabel yang tahan terhadap api, kabel dengan fleksibilitas tinggi, dan kabel bawah laut.

Bagian yang perlu mendapat perhatian utama dari suatu kabel adalah isolasinya. Beberapa hal kunci yang perlu mendapat perhatian di dalam isolasi kebel adalah sebagai berikut:

- a. Konstanta Dielektrik (Permitivitas)

Faktor ini mempengaruhi kapasitas dari kabel. Konstanta dielektrik merupakan perbandingan dari kapasitansi dengan material isolasi terhadap kapasitansi dengan konfigurasi yang sama di ruang hampa. Kabel dengan kapasitansi yang lebih besar dapat menarik arus *charging* yang lebih besar.

b. Resistivitas Volume

Arus bocor yang melalui isolasi merupakan fungsi dari resistivitas isolasi terhadap arus searah (DC). Resistivitas isolasi menurun seiring dengan kenaikan suhu. Isolasi pada saat ini memiliki resistivitas yang sangat tinggi sehingga hanya sedikit sekali arus resistif yang dapat mengalir dari konduktor menuju isolasi.

c. Rugi Dielektrik

Seperti pada kapasitor, kabel memiliki rugi dielektrik. Kerugian ini diakibatkan oleh pergerakan dipol-dipol di dalam polimer atau sebagai akibat dari pergerakan muatan pembawa di dalam lokasi. Rugi dielektrik memiliki kontribusi terhadap arus resistif bocor pada kabel.

d. Faktor Disipasi (*loss angle*, *loss tangent*, $\tan \delta$, dan pendekatan nilai PF)

Faktor disipasi merupakan perbandingan dari arus resistif yang muncul oleh kabel terhadap arus kapasitif yang muncul (I_R / I_X). Karena arus bocor umumnya kecil, maka faktor disipasi dapat digunakan sebagai pendekatan nilai faktor daya, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$pf = I_R / |I| = I_R / \sqrt{I_R^2 + I_X^2} \approx I_R / I_X = \text{faktor disipasi} \quad (2.24)$$

Beberapa faktor kunci untuk kabel dengan isolasi yang berbeda beda ditunjukkan oleh tabel berikut:

Tabel 2.2 Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel

	Konstanta Dielektrik 20°C	LossAngle Tan δ 20°C	Resistansi Volume 20°C	Rugi Dielektrik tahunan W/1000 ft	Kekuatan Impuls V/mil	Penyerapan air ppm
PILC	3.6	0.003	10 ¹¹	N / A	1000-2000	25
PE	2.3	0.0002	10 ¹⁴	N / A		100
XLPE	2.3	0.0003	10 ¹⁴	8	3300	350
TR- XLPE	2.4	0.001	10 ¹⁴	10	3000	<300
EPR	2.7-3.3	0.005- 0.008	10 ¹³ - 10 ¹⁴	28-599	1200-2000	1150-3200

Pada kabel, nilai kapasitansi yang muncul lebih signifikan dibandingkan nilai kapasitansi pada kawat saluran udara. Nilai kapasitansi dari kabel dengan konduktor tunggal ditunjukkan oleh persamaan berikut ini:

$$C = \frac{0.00736 \varepsilon}{\log_{10} \frac{D}{d}} \quad (2.25)$$

Dimana

C = Kapasitansi, μF/1000 ft

0.00736 = Konstanta dielektrik ruang hampa (ε₀)

ε = Konstanta dielektrik bahan (2.3 untuk XLPE, 3 untuk EPR)

d = Diameter bagian dalam dari isolasi

D = Diameter bagian luar dari isolasi

Pengaruh dari adanya nilai kapasitansi dari kabel akan menimbulkan daya reaktif pada sistem, sebagaimana dijelaskan dalam bersamaan berikut ini:

$$Q_{\text{var}} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_{\text{LG,kV}}^2 \quad (2.26)$$

Dimana

Q_{var} = var / 1000ft / fasa

f = frekuensi dari sistem, Hz

C = kapasitansi, $\mu\text{F}/1000 \text{ ft}$

$V_{\text{LG,kV}}$ = tegangan saluran ke tanah, kV

Pada kabel untuk distribusi terdapat nilai hambatan yang muncul selain hambatan resistif yang berasal dari konduktor fasanya. Nilai hambatan yang lain ini akan menentukan impedansi total dari kabel yang digunakan. Hal yang mempengaruhi nilai impedansi total tersebut adalah nilai reaktansi yang berasal dari rangkaian yang bersifat induktif dan bagian rangkaian yang bersifat kapasitif.

Nilai reaktansi proporsional terhadap induktansi dan dari rangkaian induktansi akan menyebabkan tegangan yang berlawanan dengan perubahan aliran arus. Arus bolak balik (AC) selalu berubah, sehingga nilai reaktansi akan selalu menciptakan tegangan sebagai akibat dari aliran arus. Jarak antar konduktor akan menentukan komponen eksternal dari nilai reaktansi tersebut. Nilai induktansi berdasarkan oleh wilayah yang dipengaruhi oleh lingkaran arus, sehingga wilayah yang lebih besar (jarak antar konduktor yang lebih lebar) akan menimbulkan nilai induktansi yang besar juga. Pada kawat saluran udara, nilai reaktansi induktif terutama berdasarkan jarak pemisahan antar konduktor dan bukan ukuran dari konduktor tersebut, bukan pula jenis logam yang digunakan untuk konduktor

tersebut, serta bukan kemampuan regang dari konduktor tersebut. Dengan adanya reaktansi pada jaringan maka dapat timbul daya reaktif. Daya reaktif dapat menimbulkan jatuh tegangan pada sisi penerima.

Adanya jatuh tegangan di sisi penerima merupakan indikator adanya susut energi pada jaringan. Karena untuk beban-beban dengan kebutuhan suplai daya yang tetap, seperti pada motor-motor listrik, penurunan tegangan akan menyebabkan terjadinya peningkatan arus. Sedangkan telah dibahas diawal bahwa dengan adanya arus yang besar, maka rugi-rugi saluran akibat arus (I^2R) juga akan semakin besar, sehingga energi yang hilang pada jangka waktu tertentu juga akan besar. Hubungan antara tegangan dengan arus pada beban yang membutuhkan suplai daya tetap dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P = V I \cos \theta \quad (2.27)$$

Dimana

P = daya yang dibutuhkan oleh motor motor (besarnya tetap)

V = tegangan operasi, *Volt*

I = arus pada rangkaian, *Ampere*

$\cos \theta$ = faktor daya

Ketika daya yang dibutuhkan konstan, maka penurunan tegangan akan diikuti dengan kenaikan arus.

2.2.7.2 Penyusutan Energi Pada Transformator Distribusi

Transformator merupakan komponen dalam jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik dari suatu tingkat tegangan ke suatu

tingkat lainnya. Sebuah transformator terdiri atas dua pasang kumparan yang terhubung oleh medan magnetik. Medan magnetik akan menghantarkan seluruh energi (kecuali pada autotransformator). Pada transformator yang ideal, tegangan pada sisi masukan dan keluaran berhubungan dengan perbandingan lilitan dari transformator tersebut, sebagaimana dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (2.28)$$

Dimana N_1 dan N_2 merupakan jumlah lilitan dan V_1 dan V_2 adalah tegangan pada kumparan 1 dan kumparan 2. Pada transformator yang sesungguhnya, tidak semua *fluks* berada diantara dua kumparan tersebut disalurkan. *Fluks* yang bocor tersebut akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan diantara kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga besarnya tegangan akan lebih akurat ditunjukkan oleh persamaan berikut:

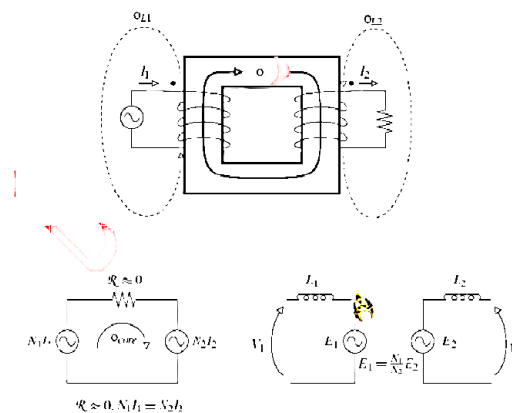
$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 - X_L I_1 \quad (2.29)$$

Dimana X_L merupakan reaktansi bocor dalam satuan ohm yang dilihat dari sisi kumparan primer, dan I_1 merupakan arus yang keluar dari kumparan primer. Arus pada transformator juga dipengaruhi oleh jumlah lilitan yang ada pada transformator tersebut, seperti pada persamaan berikut:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ atau } N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.30)$$

Transformator memiliki inti yang bersifat megnetik yang berfungsi untuk membawa medan magnetik yang besar. Baja yang dipergunakan sebagai inti di dalam transformator memiliki permeabilitas lebih dari 1000 kali dari permeabilitas udara. Apabila pada sisi primer (sisi sumber, sisi tegangan tinggi) diberikan suatu

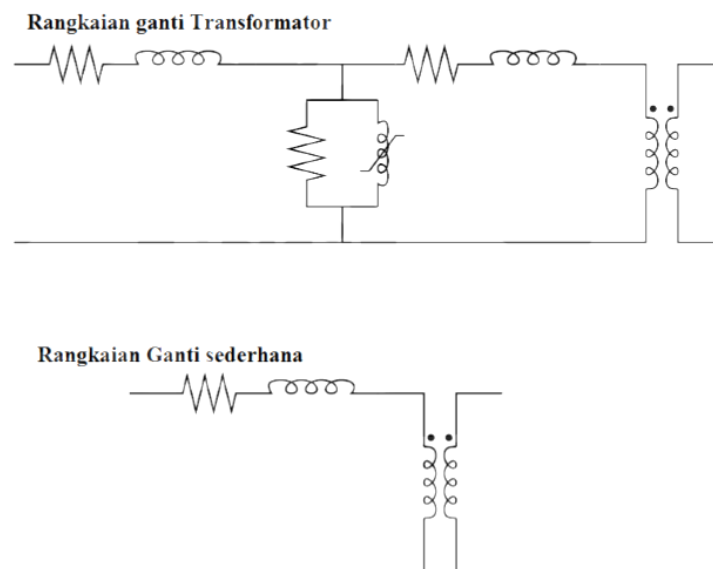
nilai tegangan tertentu dan pada sisi sekunder (sisi beban, sisi tegangan rendah) tidak ada beban yang terpasang. Maka kumparan akan menarik arus eksitasi dari sistem yang menimbulkan medan magnetik sinusoidal di inti transformator. *Fluks* yang muncul pada lilitan akan menyebabkan ggl (gaya gerak listrik) balik pada kumparan yang akan membatasi arus yang masuk ke dalam transformator. Transformator tanpa beban (*no load*) pada sisi sekundernya akan menarik arus yang kecil sekali (hanya berupa arus eksitasi) yang besarnya sekitar 0.5 % dari total arus yang mengalir pada transformator pada saat berbeban penuh. Pada sisi sekunder yang tidak berbeban, maka *fluks* sinusoidal akan menciptakan tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*) yang nilainya sama dengan nilai tegangan pada sisi primer dikalikan dengan perbandingan jumlah lilitan. Ketika kita tambahkan beban pada sisi sekunder dari transformator, maka beban akan menarik arus melalui kumparan sekunder. Umumnya pada rangkaian yang bersifat induktif, arus yang semakin besar akan menciptakan *fluks* yang lebih banyak, tetapi tidak pada transformator. Peningkatan gaya pada arus pada satu kumparan yang lainnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram *Fluks* yang dibangkitkan pada Transformator
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Fluks pada bagian inti transformator yang sedang dibebani besarnya sama dengan *fluks* pada bagian inti transformator yang tidak dibebani, walaupun arus pada transformator yang sedang dibebani lebih besar. Tegangan pada kumparan primer akan menentukan jumlah *fluks* pada transformator. Sementara *fluks* pada bagian inti menentukan tegangan pada sisi keluaran dari transformator.

Gambar 2.10 menunjukkan model dengan nilai impedansi tertentu pada sebuah transformator. Model yang mendetail menunjukkan serangkaian impedansi yang terdiri atas resistansi dan reaktansi. Serangkaian resistansi pada transformator sebagian besar merupakan resistansi kawat pada setiap kumparan. Sementara nilai reaktansi menunjukkan adanya impedansi bocor. Percabangan *shunt* merupakan cabang termagnetisasi, arus yang mengalir akan membuat inti pada transformator menjadi bersifat magnetic.



Gambar 2.10 Rangkaian Ganti Transformator
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Sebagian besar arus magnetisasi merupakan daya reaktif, tetapi tetap memiliki unsur daya *real*. Daya pada transformator dapat mengalami penyusutan pada bagian inti transformator melalui beberapa hal, antara lain:

1. Histersis

Karena dipol-dipol magnet berubah arah, maka terjadi peningkatan panas pada inti transformator sebagai akibat adanya tumbukan antar dipol-dipol megnetik tersebut. Rugi histersis merupakan fungsi dari volume inti, fekuensi, dan kepadatan *fluks* maksimum sebagaimana dituliskan pada persamaan berikut:

$$P_h \propto V_e f B^{1.6} \quad (2.31)$$

Dimana

V_e = volume dari inti

f = frekuensi

B = kepadatan *fluks* maksimum

2. Arus *Eddy*

Arus *Eddy* pada bahan penyusun inti transformator akan menyebabkan rugi-rugi resistir (I^2R). *Fluks* dari inti akan menginduksi arus *Eddy* sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan *fluks* pada transformator. Rugi arus *Eddy* merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan *fluks*, ketebalan lempeng, resistivitas dari material penyusun inti sebagaimana dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P_e \propto V_e B^2 f^2 t^2 / r \quad (2.32)$$

Dimana

t = ketebalan lempeng

r = resistivitas dari material inti

Inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan secara signifikan mengurangi susut pada bagian inti, kurang lebih menjadi $\frac{1}{4}$ dari susut yang terjadi pada inti yang terbuat dari bahan baja-silikon, antara 0.005 % sampai 0.01 % dari *rating* transformator. Inti dari bahan *amorphous* memiliki rugi hystersis yang rendah. Rugi arus *Eddy* juga sangat rendah karena material memiliki resistivitas yang tinggi dan ketebalan lempeng yang sangat tipis (ketebalannya mencapai 1 mm). Transformator dengan inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan memiliki ukuran yang lebih besar daripada transformator biasa pada *rating* yang sama dan memiliki biaya pengadaan yang lebih tinggi. Rugi pada susut tranformator dibebani, rugi ada saat transformator tanpa beban, dan harga semuanya memiliki hubungan. Ketika kita ingin mengurangi rugi-rugi saat transformator berbeban maka akan meningkatkan rugi saat transformator tidak berbeban dan begitu pula kebalikannya. Tabel 2.3 menunjukkan hubungan tersebut.

Tabel 2.3 Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi-ruginya

Untuk menurunkan <i>no load losses</i>	<i>No load Losses</i>	<i>Load Losses</i>	Biaya
Menggunakan material dengan rugi lebih rendah	Lebih rendah	Tidak berubah	Lebih tinggi

Lanjutan Tabel 2.3 Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi-ruginya

Mengurangi kepadatan <i>fluks</i> dengan cara:			
1. Memperbesar CSA (<i>cross-section area</i>)	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
2. Menurunkan tegangan/jumlah lilitan	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
Untuk menurunkan <i>no load losses</i>			
Menggunakan material konduktor yang memiliki rugi-rugi rendah	Tidak berubah	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan arus dengan cara memperbesar CSA (<i>cross-section area</i>)	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi panjang daerah yang dilewati arus dengan cara:	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih rendah
1. Mengurangi CSA inti			
2. Meningkatkan tegangan / jumlah lilitan			

(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.2.7.3 Penyusutan Energi Pada Sambungan (*Jointing*)

Persambungan merupakan salah satu hal yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Sambungan ini sedikit banyak menentukan keefisienan sistem atau peralatan listrik tersebut. Kontaktor seperti saklar dan rele merupakan peralatan yang harus dapat mengalirkan arus dengan baik apabila dalam kondisi rangkaian tertutup. Dalam kondisi ideal, arus akan mengalir pada rangkaian tertutup dan akan langsung terputus apabila rangkaian terbuka. Pada kenyataannya, kondisi ideal merupakan hal yang mustahil untuk dicapai. Banyak faktor-faktor lain yang menyebabkan kondisi di lapangan berbeda dengan teori yang ada. Busur listrik (*arching*) merupakan fenomena yang muncul pada persambungan. Busur listrik memiliki beberapa efek negatif yang harus diperhatikan seperti munculnya interferensi elektromagnetik, merusak permukaan kontak pada saklar, panas yang dihasilkan dapat menyebabkan permukaan kontak meleleh, dan yang paling berbahaya ialah dapat mencederai atau menyebabkan kematian pada manusia akibat kontak fisik secara langsung.

Busur listrik merupakan fenomena dimana arus bisa melewati celah antara permukaan elektrik seperti dua permukaan kontak pada konektor terpisah. Busur listrik dapat muncul pada kontak yang tertutup, yaitu ketika kedua permukaan saling mendekati sebelum keduanya benar-benar bersentuhan. Busur listrik juga bisa muncul pada kontak yang terbuka, yaitu pada saat permukaan kontak terpisah antara satu dengan lain.

Konektor elektrik atau saklar harus dapat melewatkan arus antara kedua permukaan kontak apabila dalam posisi tertutup. Hal ini menandakan adanya

tegangan pada permukaan kontak. Apabila konektor tidak terhubung, atau saklar dalam posisi terbuka, arus akan berhenti mengalir tetapi tegangannya diputus. Pada keadaan yang tepat, tegangan ini akan menyebabkan munculnya busur pada celah antara kedua permukaan kontak.

Busur dapat muncul baik pada permukaan kontak yang terbuka maupun yang tertutup. Dalam kondisi tertutup, tegangan minimum busur turun sebagaimana kedua permukaan kontak saling mendekati. Apabila sumber tegangan terlalu rendah, tidak akan terbentuk busur dan arus hanya akan mulai mengalir apabila kedua permukaan saling bersentuhan. Dengan sumber tegangan yang cukup, busur penutupan akan muncul dimana tegangan minimum busur turun sampai di bawah tegangan sumber.

Busur penutupan diawali dengan elektron meninggalkan katoda dan berpindah melewati celah kontak menuju anoda. Selama perjalanan, elektron akan bertabrakan dengan molekul ionisasi gas di udara. Cahaya yang muncul dari busur berasal dari energi molekul gas. Elektron akan menuju anoda dan memanaskannya sehingga dapat melepaskan ion-ion positif ke celah tersebut. Ion-ion positif ini bersamaan dengan campuran gas yang terjadi juga akan terbombardir dan memanaskan katoda. Pemanasan ini bisa menguapkan bagian dari katoda. Elektron, ion, metal, ion gas dan metal yang menguap semua membentuk kolom busur.

Busur listrik juga dapat muncul bila kedua permukaan kontak terpisah yang menyebabkan terputusnya arus pada rangkain. Hal ini terjadi bila arus dan tegangan beban yang besar terganggu sebagaimana sering ditemukan pada saklar atau rele. Busur terbuka dapat terjadi dengan cara berbeda. Ada nilai yang pasti dan resistansi

elektrik sebagaimana arus ditekan melewati jalur yang kecil melewati permukaan. Dengan permukaan kontak yang mulai terpisah, tekanan berkurang baik dari jumlah maupun ukurannya. Hal ini mendorong nilai arus yang semakin besar yang melewati sisa jalurnya dan resistansi elektrik bertambah. Sementara nilai resistansi yang besar akan menyebabkan penyusutan energi karena rugi saluran resistif juga akan semakin besar.

2.2.8 DISTRIBUTED GENERATION (PEMBANGKIT TERDISTRIBUSI)

2.2.8.1 Pengertian Distributed Generation

Distributed Generation (DG) adalah sebuah sumber energi listrik yang terhubung langsung pada jaringan distribusi atau jaringan dekat konsumen / pengguna (Ackermann, 2001).

Berdasarkan kapasitasnya, *Distributed Generation* dibagi menjadi empat kategori:

- a. *Micro distributed generation*: 1 Watt < 5 kW
- b. *Small distributed generation* : 5 kW < MW
- c. *Medium distributed generatin* : 5 MW < 50 MW
- d. *Large distributed generation* : 50 MW < 300 MW

Berdasarkan teknologinya, *Distributed Generation* dibagi menjadi tiga kategori:

- a. *Renewable distributed generation*
- b. *Modular distributed generation*
- c. *Combined Production of Heat and Power (CHP) distributed generation*

Teknologi DG dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan sumber energinya, terbarukan dan tidak terbarukan. Bagian dari teknologi terbarukan adalah energi matahari, cahaya atau termal, angin, geothermal, dan lautan. Kemudian untuk bagian dari teknologi tidak terbarukan adalah pembakaran internal pada mesin, es, siklus gabungan, turbin pembakaran, turbin mikro, dan *fuel cell*. Kebanyakan sumber energi DG didesain menggunakan energi hijau yang diasumsikan bebas polusi (Rao, 2012).

Pada tahun-tahun sebelumnya, instalasi DG menunjukkan peningkatan jumlah pertumbuhannya pada jaringan distribusi di seluruh dunia diakibatkan peningkatan promosi utilisasi dari sumber energi terbarukan dan pengembangan sistem pembangkit terbantu. Seperti yang kita ketahui DG memberikan efek pada aliran daya dari sistem yang terasosiasi pada jaringan distribusi, rugi-rugi daya pada jaringan tersebut juga akan terpengaruhi (Sulaiman, 2012).

DG pada jaringan distribusi berfungsi untuk berbagai tujuan: mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan profil tegangan pada penyulang, dan meningkatkan jumlah maksimum daya yang dialirkan pada kabel dan transformator (Nadhir, 2013).

Berikut adalah beberapa hal yang menjadi perhatian ketika DG dipasang:

a. Sekuritas Daya

Ketika gangguan hubung singkat terjadi, arus gangguan disuplai dari sistem kelistrikan dan DG menuju titik gangguan. Jika total arus gangguan melebihi kapasitas dari *circuit breaker* penyulang, gangguan tidak dapat dipisahkan dan hal tersebut akan terus berlangsung.

b. Kualitas Daya

Tegangan dari sistem saluran lokal cenderung fluktuatif jika keluaran dari DG berubah untuk waktu yang singkat, dan fluktuasi ini dapat menyebabkan *over voltage* atau *under voltage* pada sisi pengguna. Hal inilah yang menjadi perhatian ketika sistem pembangkitan yang bergantung pada kondisi alam, seperti pembangkit listrik tenaga angin atau sel surya, terinterkoneksi pada sistem jaringan lokal.

c. Keandalan (*Reliability*)

Unit-unit DG dapat memiliki dampak positif pada sistem distribusi jika secara benar dikoordinasikan pada jaringan yang tersisa. Contoh umum dari penggunaan DG adalah ketika DG beroperasi pada kasus gangguan suplai utama. Ketika DG dioperasikan paralel dengan sistem, pertimbangan baru diperkenalkan pada prosedur operasi dan perencanaan jaringan. Cara alternatif sederhana untuk memodelkan DG adalah dengan memberikan nilai konstan pada injeksi daya aktif dan reaktif independen terhadap tegangan sistem pada terminal bus unit. Model DG dari beban negatif dapat memiliki dampak positif pada keandalan sistem jika model evaluasi keandalannya mempertimbangkan batasan kapasitas saat pemulihan sistem setelah gangguan terjadi. Cara lainnya adalah memodelkan unit-unit DG sebagai sumber pengontrol tegangan dimana tegangan terminal dipertahankan pada nilai konstan dengan injeksi daya reaktif. Untuk keandalannya pertama menerapkan *Flower Pollination Algorithm*.

Kemudian menerapkan *Multi Objective Optimization* (MOO), tujuannya adalah untuk mengoptimasi sistem DG.

d. Rugi-rugi Daya dan Profil Tegangan

Tegangan sistem distribusi diatur oleh transformator distribusi pada gardu induk, pegatur tegangan dan kapasitor pada penyulang. Bentuk pengaturan tegangan ini diasumsikan sebagai aliran daya dari gardu induk ke beban. DG memperkenalkan aliran daya terbalik yang secara praktis mengubah aturan lama. Hal ini diakibatkan penempatan DG yang tidak tepat dapat menyebabkan *over voltage* atau *under voltage* pada jaringan. Instalasi DG memiliki dampak positif pada jaringan distribusi dengan mengadakan kompensasi reaktif, pegatur tegangan, pengurangan rugi-rugi daya, selain berkontribusi pada pengaturan frekuensi dan sebagai *back up* saat kasus sistem utama gagal.

Unit-unit DG harus diletakkan dimana pengurangan rugi-rugi daya paling tinggi terjadi. DG dan kapasitor berfungsi untuk mengurangi rugi-rugi daya. Perbedaan utama dari DG berpengaruh hanya pada daya aktif, hanya pada daya reaktif, atau daya aktif dan reaktif, sedangkan kapasitor hanya mempengaruhi daya reaktif. Sangat disayangkan, utilitas energi listrik tidak memiliki kontrol pasti terhadap penempatan instalasinya (Rao, 2012).

2.2.9 Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) diperkenalkan oleh Dr. Eberhart dan Dr. Kennedy pada tahun 1995, merupakan algoritma optimasi yang meniru proses yang terjadi dalam kehidupan populasi burung (*flock of bird*) dan ikan (*school of fish*) dalam bertahan hidup. Sejak diperkenalkan pertama kali, algoritma PSO berkembang cukup pesat, baik dari sisi aplikasi maupun dari sisi pengembangan metode yang digunakan pada algoritma tersebut (Haupt, R.L. & Haupt, S.E. 2004). Oleh sebab hal tersebut, mereka mengategorikan algoritma sebagai bagian dari kehidupan rekayasa/buatan *Artificial Life*.

Dalam *Particle Swarm Optimization* (PSO), kawanan diasumsikan mempunyai ukuran tertentu dengan setiap partikel posisi awalnya terletak disuatu lokasi yang acak dalam ruang multidimensi. Setiap partikel diasumsikan memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang atau *space* tertentu dan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui atau ditemukan terhadap sumber makanan atau nilai fungsi objektif. Setiap partikel menyampaikan informasi atau posisi terbaiknya kepada partikel yang lain dan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima mengenai posisi yang bagus tersebut. *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah salah satu dari teknik komputasi *evolutioner*, yang mana populasi pada PSO didasarkan pada penelusuran algoritma dan diawali dengan suatu populasi yang random yang disebut dengan *particle*. Berbeda dengan teknik komputasi *evolutioner* lainnya, setiap *particle* di dalam PSO juga berhubungan dengan suatu *velocity*. Partikel-partikel tersebut bergerak melalui penelusuran ruang dengan *velocity* yang dinamis

yang disesuaikan menurut perilaku historisnya. Oleh karena itu, partikel-partikel mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke area penelusuran yang lebih baik setelah melewati proses penelusuran. *Particle Swarm Optimization* (PSO) mempunyai kesamaan dengan *genetic algorithm* (GA) yang mana dimulai dengan suatu populasi yang random dalam bentuk matriks. Namun PSO tidak memiliki operator evolusi yaitu *crossover* dan mutasi seperti yang ada pada GA. Baris pada matriks disebut *particle* atau dalam GA sebagai kromosom yang terdiri dari nilai satu variabel. Setiap partikel berpindah dari posisinya semula ke posisi yang lebih baik dengan suatu *velocity*.

Pada algoritma PSO vector *velocity* di *update* untuk masing-masing partikel kemudian menjumlahkan vector *velocity* tersebut ke posisi *particle*. *Update velocity* dipengaruhi oleh kedua solusi yaitu *global best* yang berhubungan dengan biaya yang paling rendah yang pernah diperoleh dari suatu partikel dan solusi *local best* yang berhubungan dengan biaya yang paling rendah pada populasi awal. Jika solusi *local best* mempunyai suatu biaya yang kurang dari biaya solusi *global* yang ada, maka solusi *local best* menggantikan solusi *global best*. Kesederhanaan algoritma dan performansinya yang baik, menjadikan PSO telah menarik banyak perhatian di kalangan para peneliti dan telah diaplikasikan dalam berbagai persoalan optimasi. PSO telah populer menjadi optimasi *global* dengan sebagian besar permasalahan dapat diselesaikan dengan baik dimana variabel-variabelnya adalah bilangan riil. Menurut Wati (2011), beberapa istilah umum yang biasa digunakan dalam *Particle Swarm Optimization* dapat didefinisikan sebagai berikut:

1. *Swarm*: populasi dari suatu algoritma.

2. *Particle*: anggota (individu) pada suatu *swarm*. Setiap *particle* merepresentasikan suatu solusi yang potensial pada permasalahan yang diselesaikan. Posisi dari suatu *particle* adalah ditentukan oleh representasi solusi saat itu,
3. *Pbest (Personal best)*: posisi *Pbest* suatu *particle* yang menunjukkan posisi *particle* yang dipersiapkan untuk mendapatkan suatu solusi yang terbaik.
4. *Gbest (Global best)*: posisi terbaik *particle* pada *swarm* atau posisi terbaik diantara *Pbest* yang ada.
5. *Velocity (v)*: vector yang menggerakkan proses optimasi yang menentukan arah dimana suatu *particle* diperlukan untuk berpindah (*move*) untuk memperbaiki posisinya semula atau kecepatan yang menggerakkan proses optimasi yang menentukan arah dimana *particle* diperlukan berpindah dan memperbaiki posisinya semula.
6. *Inertia weight (Θ)*: *inertia weight* disimbolkan w , parameter ini digunakan untuk mengontrol dampak adanya *velocity* yang diberikan oleh suatu *particle*.
7. *Learning Rates (c1 dan c2)*: suatu konstanta untuk menilai kemampuan *particle* ($c1$) dan kemampuan sosial *swarm* ($c2$) yang menunjukkan bobot dari *particle* terhadap memorinya.

Menurut Chen & Shih (2013) posisi dari tiap partikel dapat dianggap sebagai calon solusi (*candidate solution*) bagi suatu masalah optimisasi. Tiap-tiap partikel diberi suatu fungsi *fitness* merancang sesuai dengan menunjuk masalah

yang bersesuaian. Ketika masing-masing partikel bergerak ke suatu posisi baru didalam ruang pencarian, itu akan mengingat sebagai *personal best* (*Pbest*). Sebagai tambahan terhadap ingatan informasi sendiri, masing-masing partikel akan juga menukar informasi dengan partikel yang lain dan mengingat *global best* (*Gbest*). Kemudian masing-masing partikel akan meninjau kembali arah dan percepatannya sesuai dengan *Pbest* dan *Gbest* untuk bergerak ke arah yang optimal dan menemukan solusi yang optimal. Menurut Kennedy & Eberhart (1995) Algoritma PSO dikembangkan dengan berdasarkan pada model berikut:

1. Ketika seekor burung mendekati target atau makanan (atau bisa minimum atau maksimum suatu fungsi tujuan) secara cepat mengirim informasi kepada burung-burung yang lain dalam kawanan tertentu.
2. Burung yang lain akan mengikuti arah menuju ke makanan tetapi tidak secara langsung.
3. Ada komponen yang tergantung pada pikiran setiap burung, yaitu memorinya tentang apa yang sudah dilewati pada waktu sebelumnya.

Model Algoritma PSO ini akan disimulasikan dalam ruang dengan dimensi tertentu dengan sejumlah iterasi sehingga di setiap iterasi, posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju (minimasi atau maksimasi fungsi). Ini dilakukan hingga maksimum iterasi dicapai atau bisa juga digunakan kriteria penghentian yang lain. Hal ini disebabkan, PSO merupakan algoritma optimasi yang mudah dipahami, cukup sederhana, dan memiliki unjuk kerja yang sudah terbukti handal. Algoritma PSO dapat digunakan pada berbagai masalah optimasi baik kontinyu maupun diskrit, linier maupun nonlinier. PSO memodelkan aktivitas

pencarian solusi terbaik dalam suatu ruang solusi sebagai aktivitas terbangnya kelompok partikel dalam suatu ruang solusi tersebut. Dengan demikian, awal penelusuran pada algoritma PSO dilakukan dengan populasi yang random (acak) yang disebut dengan partikel dan jika suatu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju sumber makanan, maka sisa kelompok yang lain juga akan segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh di kelompok tersebut. Posisi partikel dalam ruang solusi tersebut merupakan kandidat solusi yang berisi variabel-variabel optimasi. Setiap posisi tersebut akan dikaitkan dengan sebuah nilai yang disebut nilai objektif atau nilai fitness yang dihitung berdasarkan fungsi objektif dari masalah optimasi yang akan diselesaikan.

2.2.9.1 Proses Algoritma PSO

Menurut Chen & Shih (2013) untuk memulai algoritma PSO, kecepatan awal (*velocity*) dan posisi awal (*position*) ditentukan secara *random*. Kemudian proses pengembangannya sebagai berikut:

1. Asumsikan bahwa ukuran kelompok atau kawanan (jumlah partikel) adalah N . Kecepatan dari posisi awal pada tiap partikel dalam N dimensi ditentukan secara *random* (acak).
2. Hitung kecepatan dari semua partikel. Semua partikel bergerak menuju titik optimal dengan suatu kecepatan. Awalnya semua kecepatan dari partikel diasumsikan sama dengan nol, set iterasi $I = 1$.

3. Nilai *fitness* setiap partikel ditaksir menurut fungsi (*objective function*) yang ditetapkan. Jika nilai *fitness* setiap partikel pada lokasi saat ini lebih baik dari *Pbest*, maka *Pbest* diatur untuk posisi saat ini.
4. Nilai *fitness* partikel dibandingkan dengan *Gbest*. Jika yang terbaik *Gbest* maka *Gbest* yang diupdate.
5. Persamaan (2.33) dan (2.34) ditunjukkan di bawah ini untuk memperbaharui (*update*) kecepatan (*velocity*) dan posisi (*position*) setiap partikel.

$$Vid_{k+1} = w \times Vid_k + c1 \times rand1 \times (Pid - Xid) + c2 \times rand2 \times (Gid - Xid) \quad (2.33)$$

$$Xid_{k+1} = Xid_k + Vid_{k+1} \quad (2.34)$$

Dimana:

Vid : komponen kecepatan individu ke i pada d dimensi

Xid : posisi individu i pada d dimensi

ω : parameter inertia weight

$c1$ $c2$: konstanta akselerasi (*learning rate*), nilainya antara 0 sampai 1

$rand1, rand2$: parameter random antara 0 sampai 1

Pid : *Pbest (local best)* individu i pada d dimensi

Gid : *Gbest (global best)* pada d dimensi

6. Cek apakah solusi yang sekarang sudah konvergen. Jika posisi semua partikel menuju satu nilai yang sama, maka ini disebut konvergen. Jika belum konvergen maka langkah 2 diulang dengan memperbarui iterasi $i = i + 1$, dengan cara menghitung nilai baru dari *Pbest* dan *Gbest*. Proses iterasi ini dilanjutkan sampai semua partikel menuju ke satu titik solusi

yang sama. Biasanya akan ditentukan dengan kriteria penghentian (*stopping criteria*), misalnya jumlah selisih solusi sekarang dengan solusi sebelumnya sudah sangat kecil.

7. Beberapa kondisi berhenti yang dapat dipakai dalam PSO menurut Engelbrecht (2006) adalah:

- Berhenti ketika jumlah iterasi telah mencapai jumlah iterasi maksimum yang diperbolehkan.
- Berhenti ketika solusi yang diterima telah ditemukan.
- Berhenti ketika tidak ada perkembangan setelah beberapa iterasi.

2.2.9.2 Menentukan Parameter Algoritma PSO

Menurut Hsieh *et al.* (2007) menentukan kombinasi parameter terbaik

Algoritma PSO dengan kondisi yang berbeda yaitu:

1. Jumlah partikel

Rangennya adalah 20 – 40, tetapi 10 partikel akan mendapatkan hasil yang lebih baik.

2. Kecepatan maksimum

Kecepatan maksimum (v) diatur untuk perpindahan partikel. Jika kecepatan V_{id} diantara -10, 10. Kemudian kecepatan maksimum adalah pada 20

3. *Learning factors*

Learning factor (c_1 dan c_2) pada umumnya mempunyai nilai 2. Rangnya adalah 0 – 4.

4. Kondisi berhenti

Termasuk jumlah iterasi maksimum dari Algoritma PSO dan syarat *error* mencapai minimal. Kondisi berhenti tergantung masalah yang dioptimalkan.

5. *Inertia weight*

Shi & Eberhart (1998) menemukan Algoritma PSO dengan *Inertia weight* (w) dengan *range* antara 0.8 – 1.2.

2.2.10 ARUS DAN TEGANGAN LISTRIK BOLAK-BALIK

Arus dan tegangan bolak-balik (AC) yaitu arus dan tegangan yang besar dan arahnya berubah terhadap waktu secara periodic.

2.2.10.1 Nilai Efektif, Nilai Maksimum dan Nilai Rata-rata

Nilai efektif adalah nilai yang ditunjukkan oleh *voltmeter/ampermeter*. Sedangkan nilai maksimum adalah nilai yang ditunjukkan oleh osiloskop.

Hubungan ketiga jenis nilai tersebut sebagai berikut:

$$V_m = V_{ef} \cdot \sqrt{2} \quad (2.35)$$

$$I_m = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \quad (2.36)$$

$$V_r = \frac{2V_m}{\pi} \quad (2.37)$$

$$I_r = \frac{2I_m}{\pi} \quad (2.38)$$

Keterangan:

V_m = tegangan maksimal (V)

V_{ef} = tegangan efektif (V)

I_m = arus maksimal (A)

I_{ef} = arus efektif (A)

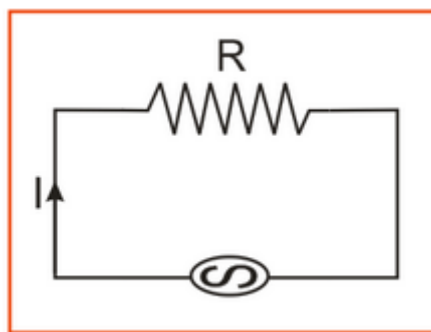
V_r = tegangan rata-rata (V)

I_r = arus rata-rata (A)

2.2.10.2 Rangkaian Resesif, Induktif dan Kapasitif Murni

a) Rangkaian Resesif Murni (R)

Pada rangkaian resesif murni arus dan tegangan sefase, artinya dalam waktu yang sama besar sudutnya sama. Rangkaian resesif murni dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rangkaian Resesif Murni

(Sumber: <http://mediabelajaronline.blogspot.co.id>)

Berikut persamaan tegangan dan arus sesaatnya:

$$V = V_m \cdot \sin \omega t \quad (2.39)$$

$$I = I_m \cdot \sin \omega t \quad (2.40)$$

Hubungan antara V_m dan I_m adalah:

$$V_m = I_m \cdot R \quad (2.41)$$

Keterangan:

V = tegangan sesaat/pada waktu tertentu (V)

I = arus sesaat (A)

R = hambatan (ohm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

t = waktu (s)

f = frekuensi (Hz)

T = periode (s)

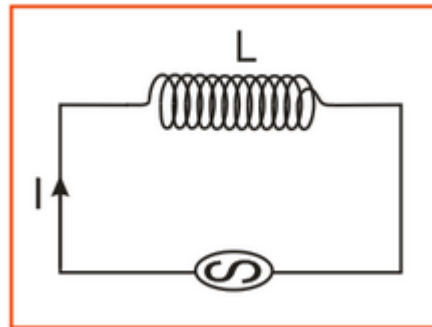
Nilai π dalam rumus $\omega = 180^\circ$

Nilai π dalam rumus V_r dan $I_r = 3,14$ atau $\frac{22}{7}$

$\omega \cdot t = \theta =$ sudut fase

b) Rangkaian Induktif Murni (L)

Pada rangkaian induktif murni arus terlambat 90° dari tegangan atau tegangan mendahului 90° dari arusnya. Rangkaian induktif murni dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rangkaian Resesif Murni

(Sumber: <http://mediabelajaronline.blogspot.co.id>)

Jika persamaan arus sesaat:

$$I = I_m \cdot \sin \omega t \quad (2.42)$$

Maka persamaan tegangan sesaatnya:

$$V = V_m \cdot \sin (\omega t + 90^\circ) \quad (2.43)$$

Atau jika persamaan tegangan sesaatnya:

$$V = V_m \cdot \sin \omega t \quad (2.44)$$

Maka persamaan arus sesaat:

$$I = I_m \cdot \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (2.45)$$

Hubungan antara V_m dan I_m

$$V_m = I_m \cdot X_L \quad (2.46)$$

$$X_L = \omega \cdot L \quad (2.47)$$

Keterangan:

X_L = reaktansi induktif (Ω)

L = induktansi diri (H)

yang perlu diperhatikan di sini:

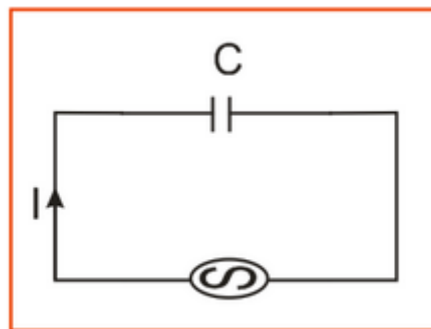
nilai π dalam rumus ω untuk mencari sudut fase (dalam

persamaan \sin) = 180°

nilai π dalam rumus ω untuk mencari $X_L = 3,14$ atau $\frac{22}{7}$

c) Rangkaian Kapasitif Murni (C)

Pada rangkaian kapasitif murni, arus mendahului 90° dari tegangan atau tegangan terlambat 90° dari arusnya. Rangkaian kapasitif murni dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Rangkaian Kapasitif Murni

(Sumber: <http://mediabelajaronline.blogspot.co.id>)

Jika persamaan arus sesaat:

$$I = I_m \cdot \sin \omega t \quad (2.48)$$

Maka persamaan tegangan sesaatnya:

$$V = V_m \cdot \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (2.49)$$

Atau jika persamaan tegangan sesaatnya:

$$V = V_m \cdot \sin \omega t \quad (2.50)$$

Maka persamaan arus sesaat:

$$I = I_m \cdot \sin (\omega t + 90^\circ) \quad (2.51)$$

Hubungan antara V_m dan I_m :

$$V_m = I_m \cdot X_C \quad (2.52)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2.53)$$

Keterangan:

X_C = reaktansi kapasitif (ohm)

C = kapasitas kapasitor (C)

2.2.11 NILAI ROOT MEAN SQUARE (RMS)

Nilai rms (*root mean square*) adalah nilai akar rata-rata kuadrat dari suatu besaran yang berubah sebagai fungsi waktu selama suatu interval waktu T . Dengan kata lain, nilai rata-rata kuadrat suatu fungsi $f(t)$ adalah

$$f^2(t, T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f^2(\tau) d(\tau) \quad (2.54)$$

Jelas bahwa hasilnya berubah sebagai fungsi t dan T . Nilai ini baru mempunyai arti jika gelombangnya periodik dan interval T sama dengan periode gelombangnya. Jika ini kondisinya maka persamaan (2.43) menghasilkan nilai yang tetap. Pada kondisi ini, nilai rms didefinisikan sebagai

$$F = \sqrt{f^2(t, T)} \quad (2.55)$$

Dalam beberapa literatur, simbol $\|f\|$ sering dipakai untuk menyatakan nilai rms. Akan tetapi dalam matematika, simbol $\|\bullet\|$ lebih sering dipakai untuk menyatakan norm, yang mempunyai arti lebih luas lagi.

