



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

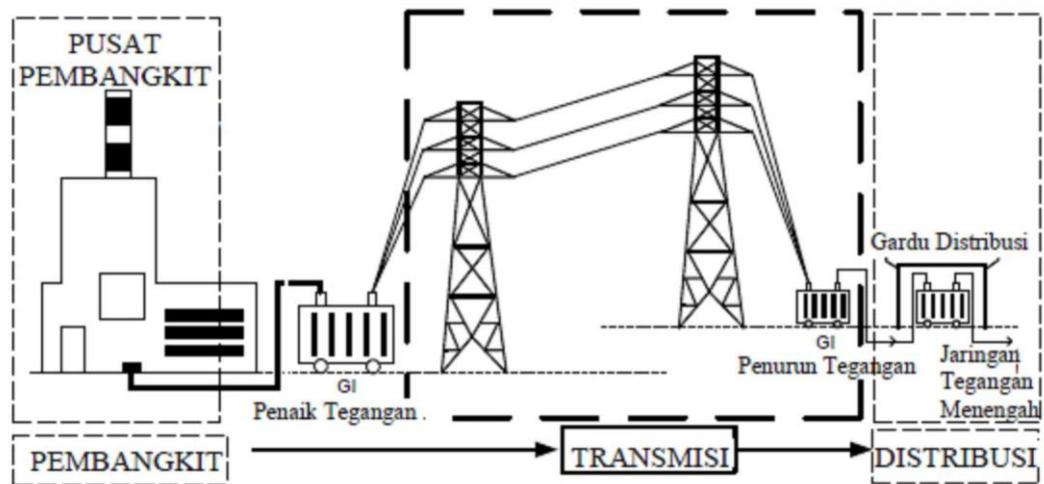
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Awalnya tenaga listrik dihasilkan dari pusat-pusat pembangkit listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP, PLTD. Pada umumnya pusat pembangkit tenaga listrik, untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pembangkit ini, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi 150/70 kV atau tegangan ekstra tinggi 500 kV. Tegangan yang lebih tinggi ini diperoleh dengan transformator penaik tegangan (step up transformator). Pemakaian tegangan tinggi ini diperlukan untuk berbagai alasan efisiensi, antara lain, penggunaan penampang penghantar jadi lebih efisien, karna arus yang mengalir akan menjadi lebih kecil, ketika tegangan tinggi diterapkan.

Setelah saluran transmisi mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu daerah industri atau suatu kota, tegangan melalui gardu induk diturunkan menjadi tegangan menengah 20 kV. Setiap GI sesungguhnya merupakan pusat beban untuk suatu daerah pusat pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga daya yang dibangkitkan dalam pusat listrik harus selalu berubah. Perubahan daya yang dilakukan di pusat pembangkit ini bertujuan untuk mempertahankan tenaga listrik tetap pada frkuensi 50 Hz. Proses perubahan ini dikoordinasikan dengan pusat pengaturan beban (P3B).

Tegangan menengah dari GI ini melalui saluran distribusi primier, untuk disalurkan ke gardu-gardu distribusi atau TM. Dari saluran distribusi premier tegangan menengah diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V melalui gardu distribusi.

Tegangan rendah dari gardu distribusi disalurkan melalui saluran tegangan rendah ke konsumen tegangan rendah. Penjelasan di atas ditunjukkan seperti pada gambar 2.1.



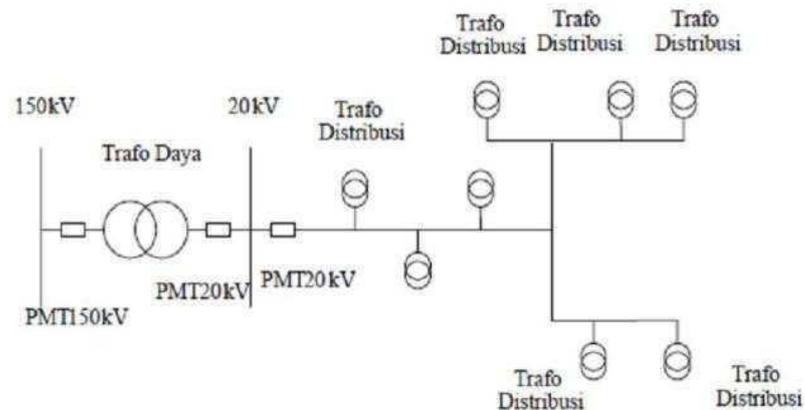
Gambar 2.1 Distribusi Tenaga Listrik

2.2 Jaringan Tegangan Menengah

Jaringan tegangan menengah adalah jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk menghubungkan gardu induk sebagai suplay tenaga listrik dengan gardu-gardu distribusi. Sistem tegangan menengah yang digunakan pada umumnya adalah 20 kV. Jaringan ini mempunyai struktur sedemikian rupa sehingga dalam pengoperasiannya mudah dan handal. Jaringan pada sistem distribusi tegangan menengah dikelompokkan menjadi 5 model:

2.2.1 Sistem Radial

Pola ini yang paling sederhana dan paling banyak dipakai, terdiri dari feeders atau rangkaian tersendiri yang seolah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial. Feeder itu dapat juga dianggap terdiri atas suatu bagian utama dari saluran samping bersumber dan dihubungkan dengan transformator distribusi sebagaimana terlihat pada gambar 2.2. Saluran samping sering disambung pada feeder dengan skring. Dengan demikian maka gangguan pada saluran samping tidak akan mengganggu seluruh feeder.

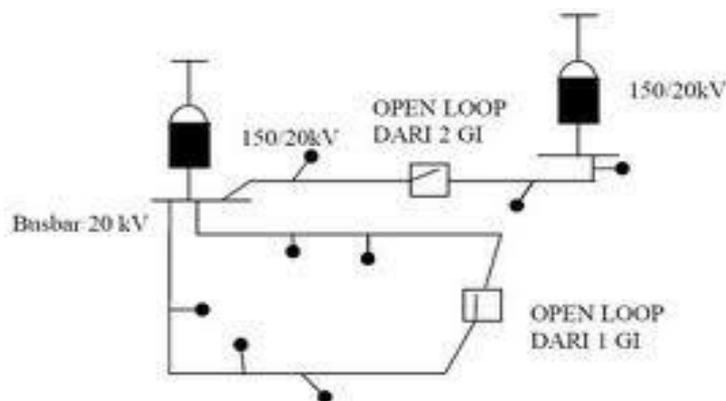


Gambar 2.2 Sistem Radial

2.2.2 Sistem Open Loop

Pada pola ini bagian feeder tersambung melalui alat pemisah dan kedua ujung feeder tersambung pada sumber energi. Pada suatu tempat tertentu pada feeder, alat pemisah sengaja dibiarkan terbuka. Pada dasarnya, sistem ini terdiri atas dua feeder yang dipisahkan oleh suatu pemisah yang berupa skring, alat pemisah atas daya. Bila terjadi gangguan, bagian saluran dari feeder yang terganggu dapat dilepas dan menyambung pada feeder yang tidak terganggu. Sistem demikian biasanya dioperasikan secara manual dan dipakai pada jaringan yang relatif kecil.

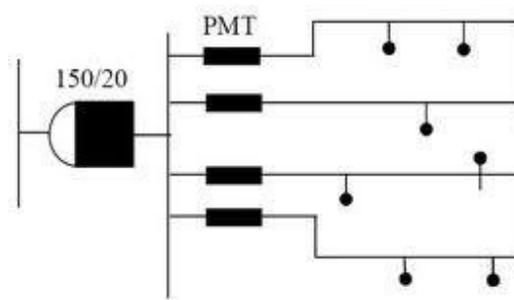
Gambar sistem open loop ditunjukkan pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Sistem Open Loop

2.2.3 Sistem Close Loop

Sistem close loop diperoleh suatu tingkat keandalan lebih tinggi. Pada sistem ini alat pemisah biasanya berupa saklar daya yang lebih mahal. Saklar daya itu digerakkan oleh relai yang membuka saklar daya pada tiap ujung dari bagian saluran yang terganggu sehingga feeder sisa berada dalam keadaan berenergi. Pengoperasian relai yang baik diperoleh dengan menggunakan kawat pilot yang menghubungkan semua saklar daya. Kawat pilot ini cukup mahal dipasang dan dioperasikan. Kadang-kadang rangkaian telepon yang disewa dapat dipakai sebagai pengganti kawat pilot. Gambar 2.4 menunjukkan sistem close loop:



Gambar 2.4 Sistem Close Loop

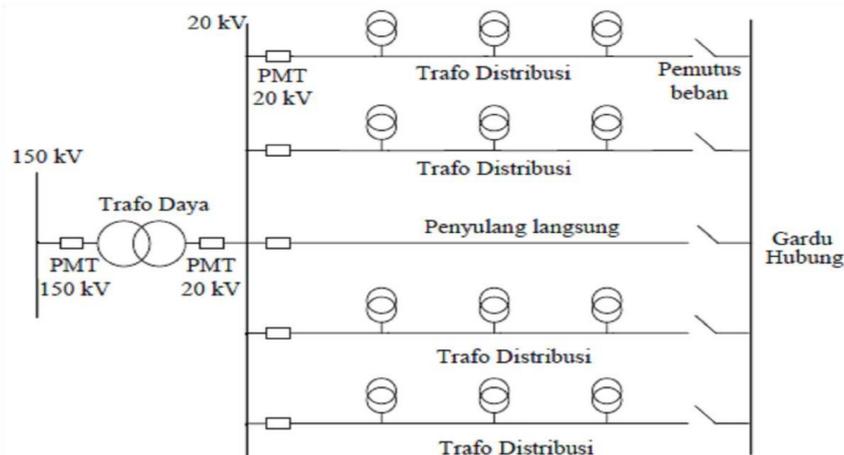
2.2.4 Sistem Jaringan Primer

Walaupun di indikasikan bahwa pada kondisi tertentu sistem jaringan primer lebih murah dan lebih andal daripada sistem radial, secara relatif tidak banyak sistem jaringan primer yang kini dioperasikan. Sistem ini terbentuk dengan menyambung saluran saluran utama atau feeder yang terdapat pada sistem radial sehingga merupakan suatu kisi-kisi atau jaringan. Kisi-kisi ini diisikan dari beberapa sumber atau gardu induk. Sebuah saklar daya antara transformator dan jaringan yang dikendalikan oleh relai-relai arus balik (*reverse currents*) dan relai-relai penutup kembali otomatis (*automatic reclosing relays*). Untuk melindungi jaringan terhadap terjadinya arus-arus gangguan bila hal ini terjadi pada sisi pengisian dari gardu induk. Bagian-bagian jaringan yang terganggu akan dipisahkan oleh saklar daya dan sekring.

2.2.5 Sistem Spindel

Sistem ini adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola radial dan ring. Sistem ini terdiri dari beberapa penyulang (feeder) yang tegangannya diberikan dari gardu induk (GI) dan tegangan tersebut berakhir di gardu hubung (GH). Pada sistem ini terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan. Pola spindel biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah yang menggunakan kabel tanah (SKTM).

Namun pada pengoperasiannya, sistem spindel berfungsi sebagai sistem radial. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan konsumen baik konsumen tegangan rendah ataupun konsumen tegangan menengah. Sistem / pola spindel di tampilan pada gambar 2.5 di bawah ini.

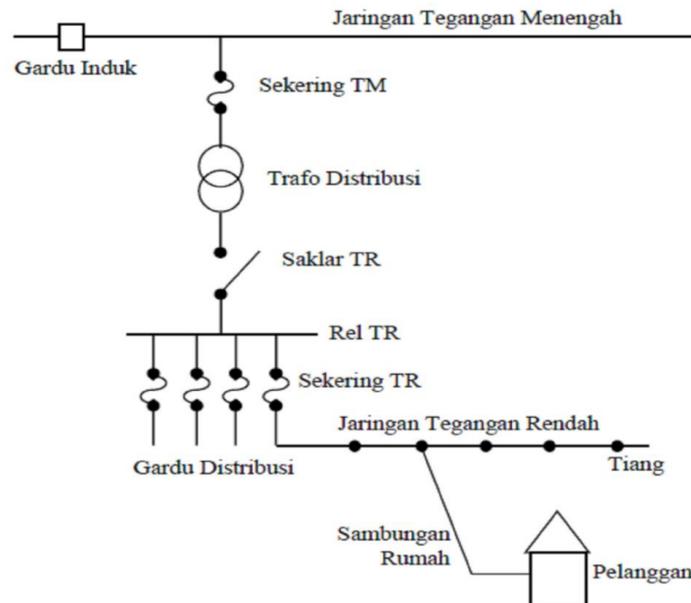


Gambar 2.5 Sistem Spindel

2.3 Jaringan Tegangan Rendah

Jaringan tegangan rendah adalah salah satu bagian dari sistem distribusi yang bermula dari gardu distribusi sampai pada pemakaian akhir yaitu konsumen. Sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini selain menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke

konsumen. Hubungan JTM ke JTR dan konsumen ditunjukkan pada gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Hubungan JTM ke JTR dan Konsumen

Berikut ini adalah sistem pendistribusian tenaga listrik berdasarkan penempatan jaringan, jaringan tegangan rendah dibedakan menjadi dua:

2.3.1 Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Saluran ini merupakan penghantar yang ditempatkan di atas tiang (di udara). Ada dua jenis penghantar yang digunakan, yaitu penghantar tak berisolasi (kawat) dan penghantar berisolasi (kabel). Penghantar tak berisolasi mempunyai berbagai kelemahan, seperti rawan pencurian dan rawan terjadi gangguan fase-fase maupun fase-netral. Tetapi memiliki keunggulan harga yang relatif murah dan mudah dalam hal pengusutan gangguan. Sedangkan penghantar berisolasi memiliki keuntungan dan kerugian yang saling berlawanan dengan penghantar tak berisolasi. Pada umumnya PT. PLN, menggunakan SUTR NFA2X dengan isolasi (kabel pilin), dengan inti aluminium. Standar ukuran kabel yang digunakan adalah $3 \times 70 + 50 \text{ mm}^2$, dengan resistansi pada kabel penghantar fasa $0,44 \Omega$ dan untuk resistansi kabel penghantar netralnya adalah $0,69 \Omega$.

2.3.2 Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR)

Saluran ini menempatkan kabel di bawah tanah, tujuan utama penempatan di bawah tanah pada umumnya karena alasan estetika, sehingga pengguna SKTR umumnya adalah kompleks perumahan dan daerah industri. Keuntungan pengguna kabel ini adalah estetika yang lebih indah, tidak terganggu pengaruh cuaca. Kelemahan kabel ini adalah jika terjadi gangguan, sulit menemukan lokasi nya dan jika terjadi pencurian dengan suntikan di bawah tanah petugas P2TL kesulitan mengungkapkannya.

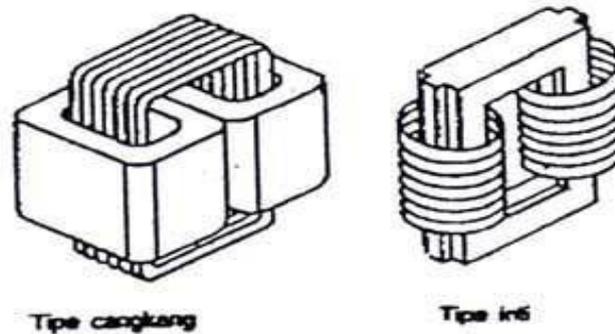
2.4 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sisten tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk setiap keperluan, misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator Daya
2. Transformator Distribusi
3. Transformator Pengukuran: yang terdiri atas transformator arus dan tegangan.

Berdasarkan bentuk lilitan kumparan pada inti trafo, dikenal dua macam trafo, seperti pada gambar 2.7, yaitu tipe inti dan tipe cangkang:



Gambar 2.7 Tipe cangkang (kiri), Tipe Inti (kanan)

2.4.1 Tranformator Daya

Transformator ini merupakan suatu alat listrik statis yang dipergunakan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain dengan mengubah tegangan tanpa mengubah frekuensi.

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$I_{N1} = \frac{S}{V_p \cdot \sqrt{3}} \quad (2.1)$$

Ket: I_{N1} = Arus nominal transformator daya sisi primer

S = Daya pada transformator

V_p = Tegangan pada sisi primer

Arus nominal pada sisi sekunder:

$$I_{N2} = \frac{S}{V_s \cdot \sqrt{3}} \quad (2.2)$$

Ket: I_{N2} = Arus nominal transformator daya sisi sekunder

S = Daya pada transformator

V_s = Tegangan pada sisi sekunder

Dalam bentuk yang paling sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya dan kumparan sekunder terhubung ke beban. Kedua kumparan di belit pada satu inti yang terdiri atas material magnetik berlaminasi.

Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual (timbang balik) antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika satu kumparan disambung pada suatu sumber tegangan bolak-balik, suatu fluks bolak-balik terjadi didalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (GGL) sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik faraday, yaitu:

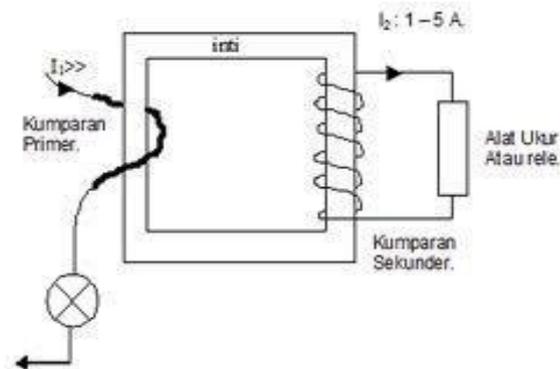
$$e = M \cdot di/dt \quad (2.3)$$

Dengan: e = gaya gerak listrik yang diinduksikan

M = induktansi mutual

2.4.2 Transformator Arus / Current Transformer (CT)

Transformator arus digunakan untuk mengukur arus beban suatu rangkaian, dengan menggunakan transformator arus, maka arus beban yang besar dapat diukur hanya dengan menggunakan alat ukur (Amperemeter) yang tidak terlalu besar. Rangkaian transformator arus di tunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian Transformator Arus

Dengan mengetahui perbandingan transformasi N_1/N_2 dan pembacaan amperemeter arus beban dapat dihitung. Bila transformator dianggap ideal maka arus beban :

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1 \times I_2} \quad (2.4)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah, maka perlu diperhatikan agar rangkaian sekunder selalu tertutup. Dalam keadaan rangkaian terbuka, ggl $N_2 I_2$ akan sama dengan nol (karena $h = 0$) sedangkan ggl $N_1 I_1$ tetap ada sehingga fluks normal akan terganggu.

2.4.3 Transformator Tegangan / Potensial Transformer (PT)

Transformator tegangan digunakan untuk mengukur tegangan. Dengan mengetahui N_1 , N_2 membaca tegangan V_2 serta menganggap transformator ideal maka tegangan V_1 adalah:

$$V_1 = \frac{N_2}{N_1 \times V_2} \quad (2.5)$$

Pentanahan rangkaian sekunder diperlukan untuk mencegah adanya beda potensial yang besar antara kumparan primer dan sekunder pada saat isolasi kumparan primer rusak.

2.4.4 Arus Beban Penuh

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.6)$$

Dimana:

S = Daya transformator (VA)

V = Tegangan sisi primer transformator (V)

I = Arus (A)

Sehingga menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.7)$$

Dimana: I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (VA)

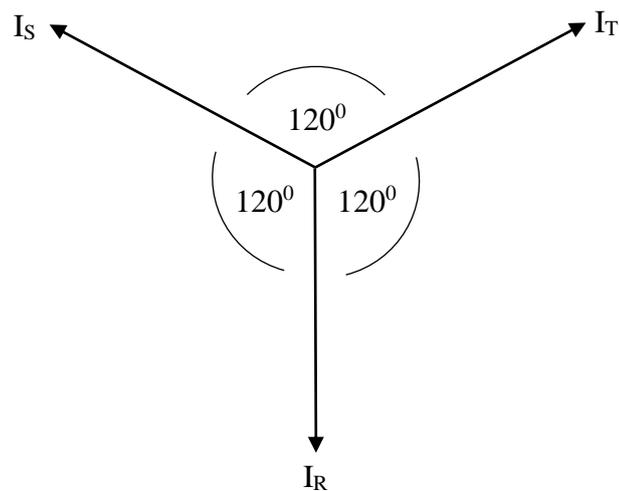
V = Tegangan sisi sekunder transformator (V)

2.5 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan beban seimbang adalah suatu keadaan di mana ketiga vektor arus / tegangan sama besar atau ketiga vektor saling membentuk sudut 120° . Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.9 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

Gambar 2.9 menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N).

Di mana arus yang berlaku pada hubungan Y tersebut berlaku:

$$\left. \begin{aligned} I_R &= \frac{V_{<0^\circ}}{z_{<\theta}} = I_{<-\theta} \\ I_S &= \frac{V_{<120^\circ}}{z_{<\theta}} = I_{<-\theta - 120^\circ} \\ I_T &= \frac{V_{<240^\circ}}{z_{<\theta}} = I_{<-\theta - 240^\circ} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Disubstitusikan dari persamaan 2.10:

$$\begin{aligned} I_N &= I_R + I_S + I_T \\ &= I_{<-\theta} + I_{<-\theta - 120^\circ} + I_{<-\theta - 240^\circ} \\ &= I \cos(-\theta) + j I \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + j I \sin(-\theta - 120^\circ) + \\ &\quad I \cos(-\theta - 240^\circ) + j I \sin(-\theta - 240^\circ) \\ &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + \cos(-\theta - 240^\circ)] + j I[\sin(-\theta) + \\ &\quad \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha - \beta) &= \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \\ \sin(\alpha - \beta) &= \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta \end{aligned} \quad (2.11)$$

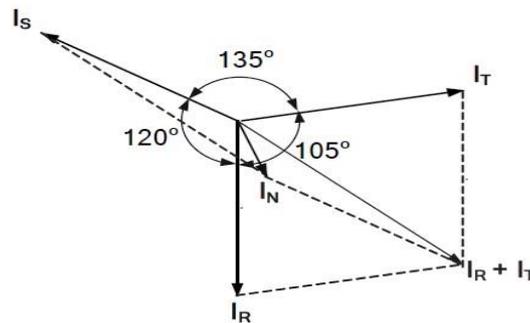
Masukkan identitas trigonometri ke persamaan:

$$\begin{aligned} I_N &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta) \cos(120^\circ) + \sin(-\theta) \sin(120^\circ) + \\ &\quad \cos(-\theta) \cos(240^\circ) + \sin(-\theta) \sin(240^\circ)] + j I[\sin(-\theta) + \\ &\quad \sin(-\theta) \cos(120^\circ) - \cos(-\theta) \sin(120^\circ) + \sin(-\theta) \cos(240^\circ) - \\ &\quad \cos(-\theta) \sin(240^\circ)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_N &= I[\cos(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) + \\ &\quad j I[\sin(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta)] \end{aligned}$$

$$I_N = 0 \text{ A (pada saat keadaan beban seimbang).}$$

Sedangkan pada gambar 2.10 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehinggamuncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.



Gambar 2.10 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang

2.5.1 Penyaluran Daya Pada Keadaan Seimbang

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3 \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \varphi \quad (2.12)$$

Dimana:

P = Daya pada ujung kirim (Watt)

I = Arus kirim (A)

V = Tegangan pada ujung kirim (Volt)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal terlihat seperti pada gambar 2.11. Model ini dibuat dengan asumsi bahwa arus bemuatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus di ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor daya pada ujung terima beturut-turut adalah V' dan $\cos \varphi'$, daya pada ujung terima adalah:

$$P' = 3 \cdot [V'] \cdot [I] \cdot \cos \varphi' \quad (2.13)$$

Dimana:

P' = Daya pada ujung terima (Watt)

I = Arus terima (A)

V' = Tegangan pada ujung terima (Volt)

$\cos \varphi' =$ Faktor daya ujung terima

Selisih antara P pada persamaan (2.12) dan P' pada persamaan (2.13) memberikan susut daya saluran, yaitu:

$$P_1 = P - P'$$

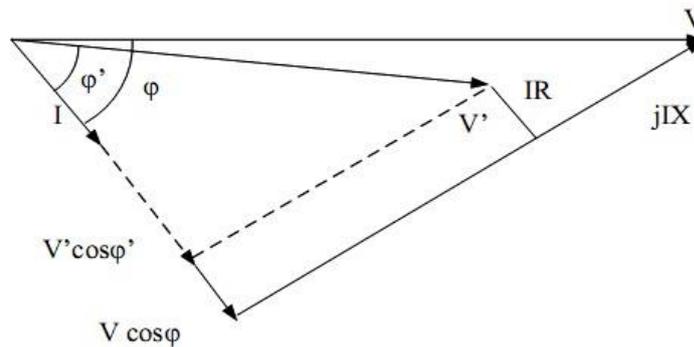
$$P_1 = 3 \cdot I [V \cdot \cos \varphi - V' \cdot \cos \varphi'] \quad (2.14)$$

Sementara itu gambar 2.11 memperlihatkan bahwa:

$$[V \cdot \cos \varphi - V' \cdot \cos \varphi'] = I \cdot R$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa. Oleh karena itu persamaan (2.12) berubah menjadi:

$$P_1 = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.15)$$



Gambar 2.11 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa

2.5.2 Penyaluran Daya Pada Keadaan Tidak Seimbang

Jika $[I]$ adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a , b dan c sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} [I_R] &= a[I] \\ [I_S] &= b[I] \\ [I_T] &= c[I] \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Dengan I_R , I_S , dan I_T berturut-turut adalah arus di fasa R , S dan T . Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai:

$$P = (a + b + c) \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos\varphi \quad (2.17)$$

Apabila persamaan (2.17) dan persamaan (2.12) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a , b dan c yaitu:

$$a + b + c = 3$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$, maka untuk mencari % ketidakseimbangan digunakan persamaan:

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{[|a-1|+|b-1|+|c-1|]}{3} \times 100\% \quad (2.18)$$

2.5.3 Rugi-rugi Akibat Adanya Arus Netral Pada Saluran Netral Sekunder Transformaator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo menyebabkan rugi-rugi. Rugi-rugi pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.19)$$

Dimana:

P_N = Rugi-rugi pada penghantar netral trafo (Watt)

I_N = Arus yang mengalir pada netral trafo (A)

R_N = Tahanan penghantar trafo (Ω)

Sedangkan rugi-rugi yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (ground) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut:

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.20)$$

Dimana:

P_G = Rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)

I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah (A)

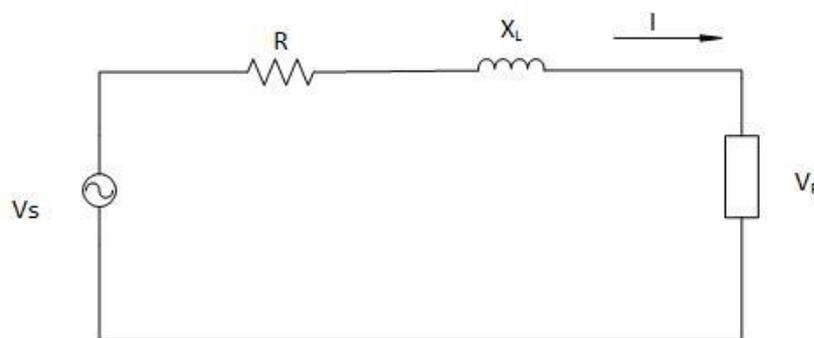
R_G = Tahanan pembumian netral trafo (Ω)

2.6 Drop Tegangan

Drop tegangan (*drop voltage*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Drop tegangan di trafo distribusi di sisi sekunder pada saat beban maksimum dibolehkan sebesar 3 % dari tegangan kerja (sesuai SPLN 72 : 1987). Pada gambar 2.12 ditunjukkan rangkaian ekuivalen saluran.

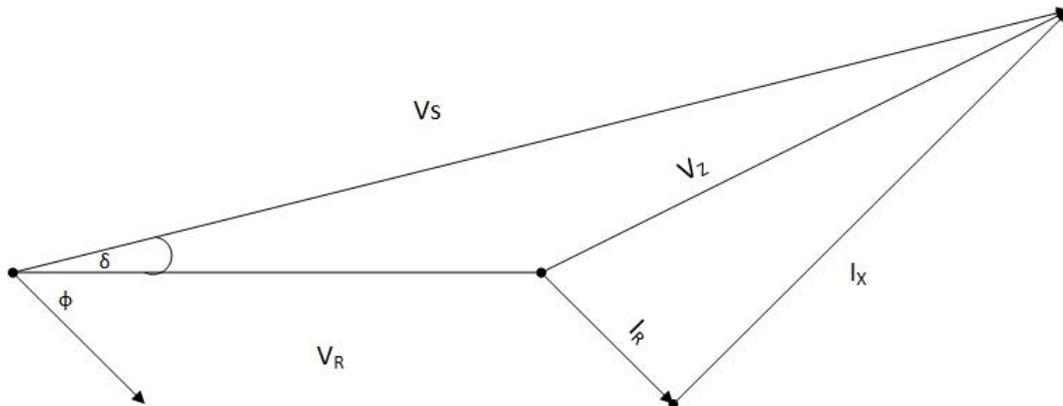
Adapun penyebab drop tegangan adalah:

1. Panjang jaringan, jauhnya jaringan dari trafo
2. Rendahnya tegangan yang diberikan dari trafo distribusi
3. Jenis penghantar yang digunakan
4. Sambungan penghantar atau konektor yang tidak baik
5. Arus yang dihasilkan terlalu besar



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Saluran

Berdasarkan rangkaian ekuivalen saluran pada gambar (2.12) dan uraian persamaan dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.13 Diagram Fasor Saluran Distribusi

Besarnya drop tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan:

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \quad (2.21)$$

Untuk mendapatkan susut tegangan seperti diagram fasor diatas dengan mengasumsikan bahwa V_s dan V_r berhimpitan.

Pada gambar 2.13 dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah:

$$V_s = V_r + I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.22)$$

Karena faktor $I (R \cos \theta + X \sin \theta)$ sama dengan I_z , maka persamaan menjadi:

$$V_s = V_r + I_z \text{ atau } V_s - V_r = I_z \quad (2.23)$$

Sehingga, $\Delta V = I_z$

$$\Delta V_{1\phi} = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.24)$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 phasa adalah:

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot \Delta V_{1\phi} \quad (2.25)$$

Dimana:

$$\cos \theta = 0,85 \text{ (standar PLN)}$$

$$\sin \theta = \text{Arc cos } \theta = 0,53$$

Tegangan pada sisi penerima:

$$V_r = V_s - \Delta V \quad (2.26)$$

Drop tegangan dalam persentase:

$$\% V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100 \% \quad (2.27)$$

Keterangan:

ΔV = Drop tegangan (V)

I = Arus saluran (A)

V_s = Tegangan awal (V)

I_R = Komponen arus aktif

V_r = Tegangan akhir (V)

I_X = Komponen arus reaktif

R = Resistansi saluran (Ω)

pf = power factor (faktor daya)

X = Reaktansi saluran (Ω)

qf = power factor reaktif

2.7 Beban Lebih

Transformator daya akan bekerja secara kontinyu apabila transformator tersebut berada pada beban nominalnya. Namun apabila beban yang dilayani lebih besar dari 100%, maka transformator tersebut akan mendapat pemanasan lebih dan berbeda dengan arus lebih. Namun batas overload yang di gunakan PT. PLN (Persero) Rayon Mariana Palembang adalah 90% dari nominal transformator distribusi. Pada beban lebih, besar arus hanya kira-kira 10% di atas nominal dan dapat diputuskan setelah berlangsung beberapa puluh menit. Sedangkan pada arus lebih, besar arus mencapai beberapa kali arus nominal dan harus di putuskan secepat mungkin.

2.8 Kenaikan Suhu Pada Transformator

Sebagai akibat dari pembebanan, maka pada belitan transformator akan terjadi kenaikan suhu yang ditimbulkan oleh panas (kalor) yang terjadi. Hal ini dikarenakan arus listrik yang mengalir pada belitan mesin dan induksi / kemagnetan pada besi.

Terjadinya panas yang terlalu tinggi akan dapat merubah sifat konstruksi bagian-bagian transformator. Setiap kenaikan sekitar 9°C dari batas yang diizinkan akan mengakibatkan berkurangnya umur. Oleh karena itu, kenaikan suhu ini harus dibatasi. Isolasi dari penghantar (*conductor*) pada belitan transformator akan mengakibatkan kerusakan jika dikenai suhu yang tinggi. Batas kenaikan suhu yang di standarkan adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1. Klasifikasi Batas Suhu

Kelas	Kenaikan suhu tertinggi (°C)	Batas suhu tertinggi (°C)
O	40	90
A	50	105
E	60	120
B	70	130
F	85	155
H	95	180

Sumber : Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Transformator harus dirancang untuk bekerja pada suhu keliling (t_a) yang tidak melebihi dari 40°C dan tidak melebihi nilai-nilai $+30^{\circ}\text{C}$ rata-rata bulanan dan $+20^{\circ}\text{C}$ rata-rata tahunan.

Untuk negara yang mempunyai beberapa musim dengan beda suhu yang cukup besar, misalnya 0°C pada musim dingin selama 2 bulan, 10°C pada musim gugur selama 4 bulan, 20°C pada musim semi selama 4 bulan dan 30°C pada musim panas selama 2 bulan, didapatkan nilai rata-rata = 15°C .

Perubahan suhu keliling yang terjadi sepanjang tahun tidak besar, rata-rata adalah 24°C pada musim hujan dan 27°C pada musim kemarau, maka diperoleh rata-rata = $25,5^{\circ}\text{C}$; hal ini menjadikan transformator buatan negara 4 musim bila digunakan di Indonesia daya efektifnya hanya 96, 25% pada musim dingin (24°C) dan 94% pada musim kemarau (27°C) serta rata-rata 95,25% pada suhu $25,5^{\circ}\text{C}$. *International Electrotechnical Commission (IEC)* menetapkan umur transformator 20 tahun atau setara 7300 hari, sehingga susut umur normal adalah 0,0137% per hari. Susut umur karena suhu titik panas dapat dilihat pada tabel 2 berikut :

Tabel 2.2 Susut Umur Transformator Distribusi

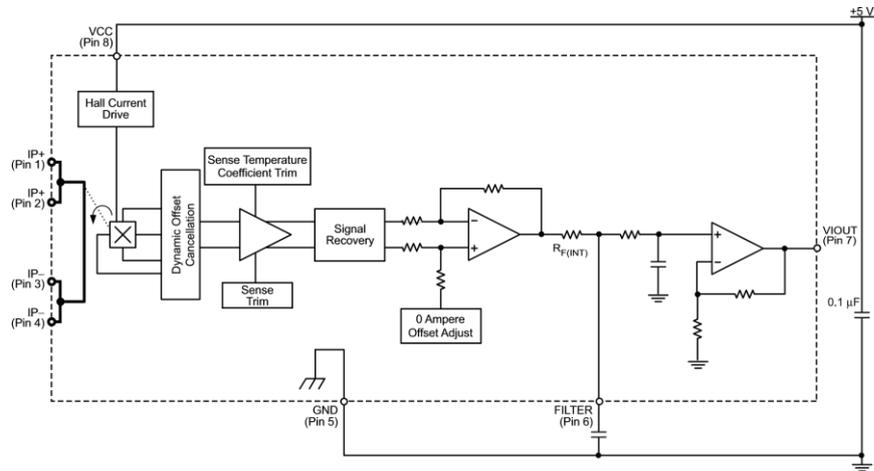
θ_c (°C)	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
-----------------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Susut umur (hari)	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
-------------------------	-------	------	-----	---	---	---	---	----	----	----	-----

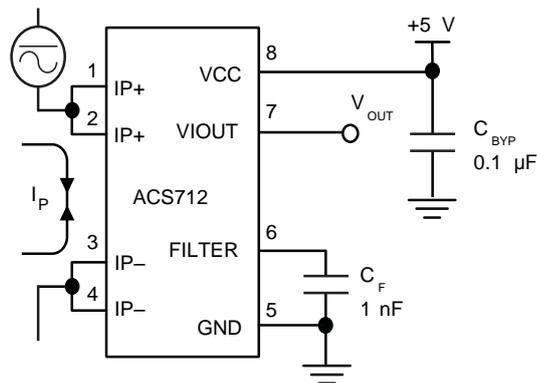
Sumber : Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.9 Sensor Arus ACS712

Sensor arus dari keluarga ACS712 adalah solusi untuk pembacaan arus didalam dunia industri, otomotif, komersil dan sistem-sistem komunikasi. Sensor ini biasanya digunakan untuk mengontrol motor, deteksi beban listrik, switched-mode power supplies dan proteksi beban berlebih. Sensor ini memiliki pembacaan dengan ketepatan yang tinggi, karena didalamnya terdapat rangkaian low-offset linear Hall dengan satu lintasan yang terbuat dari tembaga. Cara kerja sensor ini adalah arus yang dibaca mengalir melalui kabel tembaga yang terdapat didalamnya yang menghasilkan medan magnet yang di tangkap oleh integrated Hall IC dan diubah menjadi tegangan proporsional. Ketelitian dalam pembacaan sensor dioptimalkan dengan cara pemasangan komponen yang ada didalamnya antara penghantar yang menghasilkan medan magnet dengan hall transducer secara berdekatan. Persisnya, tegangan proporsional yang rendah akan menstabilkan Bi CMOS Hall IC yang didalamnya yang telah dibuat untuk ketelitian yang tinggi oleh pabrik. Dimana titik tengah output sensor sebesar $>V_{CC}$ (2,5 volt) saat peningkatan arus pada penghantar arus yang digunakan untuk pendeteksian. Hambatan dalam penghantar sensor sebesar $1,5m\Omega$ dengan daya yang rendah. Ketebalan penghantar arus didalam sensor sebesar 3x kondisi overcurrent. Sensor ini telah dikalibrasi oleh pabrik. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Blok Diagram Sensor Arus ACS712



Gambar 2.15 Konfigurasi Pin Dari IC ACS712

Berikut ini adalah karakteristik dari sensor arus ACS712:

- Memiliki sinyal analog dengan sinyal-gangguan rendah (low-noise)
- Ber-banwidth 80 kHz
- Total output error 1.5% pada $T_a = 25^0 C$
- Memiliki resistansi dalam 1.2 mΩ
- Tegangan sumber operasi tunggal 5.0 volt
- Sensitivitas keluaran: 66 s/d 185 mV/A
- Tegangan keluaran proporsional terhadap arus AC ataupun DC
- Pabrikasi kalibrasi
- Tegangan offset keluaran yang sangat stabil

- Histerisis akibat medan magnet mendekati nol
- Rasio keluaran sesuai tegangan sumber

Tabel 2.3 Tipe-Tipe IC ACS712

Part Number	Ta (°C)	Jangkauan	Sensitivitas mV / A
ACS712ELCTR-O5B-T	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	-40 to 85	±30	66

Sumber : ACS712 Datasheet

2.10 CodeVision AVR

CodeVisionAVR merupakan sebuah cross-compiler C, Integrated Development Environment (IDE), dan Automatic Program Generator yang di desain untuk mikrokontroler buatan Atmel seri AVR. CodeVisionAVR dapat di jalankan pada sistem operasi Windows 95, 98, Me, NT4, 2000, dan XP.

Cross-compiler C mampu menerjemahkan hampir semua perintah dari bahasa ANSI C, sejauh yang diijinkan oleh arsitektur dari AVR, dengan tambahan beberapa fitur untuk mengambil kelebihan khusus dari arsitektur AVR dan kebutuhan pada sistem embedded.

File object COFF hasil kompilasi dapat digunakan untuk keperluan debugging pada tingkatan C, dengan pengamatan variabel, menggunakan debugger Atmel AVR Studio.

IDE mempunyai fasilitas internal berupa software AVR Chip In-System Programmer yang memungkinkan Anda untuk melakukan transfer program kedalam chip mikrokontroler setelah sukses melakukan kompilasi/assembly secara otomatis. Software In-System Programmer didesain untuk bekerja dengan Atmel STK500/AVRISP/AVRProg, Kanda Systems STK200+/300, Dontronics DT006, Vogel Elektronik VTEC-ISP, Futurlec JRAVR dan MicroTronics ATCPU/Mega2000 programmers/development boards.

Untuk keperluan debugging sistem embedded, yang menggunakan komunikasi serial, IDE mempunyai fasilitas internal berupa sebuah Terminal.



Selain library standar C, CodeVisionAVR juga mempunyai library tertentu untuk:

- Modul LCD alphanumeric
- Bus I2C dari Philips
- Sensor Suhu LM75 dari National Semiconductor
- Real-Time Clock: PCF8563, PCF8583 dari Philips, DS1302 dan DS1307 dari Maxim/Dallas Semiconductor
- Protokol 1-Wire dari Maxim/Dallas Semiconductor
- Sensor Suhu DS1820, DS18S20, dan DS18B20 dari Maxim/Dallas Semiconductor
- Termometer/Termostat DS1621 dari Maxim/Dallas Semiconductor
- EEPROM DS2430 dan DS2433 dari Maxim/Dallas Semiconductor
- SPI
- Power Management
- Delay
- Konversi ke Kode Gray

CodeVisionAVR juga mempunyai Automatic Program Generator bernama CodeWizardAVR, yang mengujikan Anda untuk menulis, dalam hitungan menit, semua instruksi yang diperlukan untuk membuat fungsi-fungsi berikut:

- Set-up akses memori eksternal
- Identifikasi sumber reset untuk chip
- Inisialisasi port input/output
- Inisialisasi interupsi eksternal
- Inisialisasi Timer/Counter
- Inisialisasi Watchdog-Timer
- Inisialisasi UART (USART) dan komunikasi serial berbasis buffer yang digerakkan oleh interupsi
- Inisialisasi Pembanding Analog
- Inisialisasi ADC
- Inisialisasi Antarmuka SPI
- Inisialisasi Antarmuka Two-Wire
- Inisialisasi Antarmuka CAN

- Inisialisasi Bus I2C, Sensor Suhu LM75, Thermometer/Thermostat DS1621 dan Real-Time Clock PCF8563, PCF8583, DS1302, dan DS1307
- Inisialisasi Bus 1-Wire dan Sensor Suhu DS1820, DS18S20
- Inisialisasi modul LCD

CodeVisionAVR merupakan hak cipta dari Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.

2.11 Modem Wavecom

Wavecom M1306B (Q2403A) adalah sebuah modul yang dapat digunakan sebagai komunikasi via wireless GSM. Dengan alat ini kita dapat dengan mudah mengirimkan data berupa SMS, atau data GPRS. Wavecom dapat dihubungkan dengan computer dengan menggunakan komunikasi data serial RS 232, dengan menggunakan AT-command sebagai perintah untuk mengirimkan data. AT Command adalah perintah/instruksi yg diterima / dikenali oleh modem GSM agar mau menjalankan fungsinya. Salah satu contoh dari modem wavecom terlihat pada gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.16 Modem Wavecom

2.12 SMS Gateway

SMS Gateway adalah suatu platform yang menyediakan mekanisme untuk EUA menghantar dan menerima SMS dari peralatan mobile (HP, PDA phone, dll)

melalui SMSGateway's shortcode (sebagai contoh 9221). Di bawah ini disertakan sedikit ilustrasi mengenai penjelasan di atas.

SMS Gateway membolehkan UEA untuk berkomunikasi dengan Telco SMSC (telkomsel, indosat, dll) atau SMS platform untuk menghantar dan menerima pesan SMS dengan sangat mudah, Karena SMS Gateway akan melakukan semua proses dan koneksi dengan Telco. SMS Gateway juga menyediakan UEA dengan interface yang mudah dan standar.

UEA dapat berupa berbagai aplikasi yang memerlukan penggunaan SMS. Seperti berbagai aplikasi web yang telah banyak menggunakan SMS (free sms, pendaftaran, konfirmasi melalui SMS, aplikasi perkantoran, dsb), CMS, acara pengundian di televisi, dll.UEA melakukan komunikasi dengan SMS Gateway melalui Internet menggunakan standard HTTP GET atau HTTPS (untuk komunikasi yang aman).

Telco SMSC akan menghantar pesan (SMS) tersebut kepada perusahaan SMS Gateway (sesuai dengan nomor yang telah disewa) dengan menggunakan protokol yang khusus. Dan berdasarkan keyword yang telah dituliskan pada SMS, maka sistem SMS Gateway akan menghantar SMS tersebut ke URL yang telah ditentukan. UEA dapat menghantar SMS reply kepada pelanggan melalui SMS Gateway tersebut. Dan UEA dapat menentukan besarnya biaya (charging) yang akan dikenakan kepada pelanggan. Biasanya telah ditentukan regulasi biayanya (microcharging mechanism), contoh Rp 0 (gratis); Rp 500,- ; Rp 1000,- ; Rp2000,- dst. Suatu perusahaan SMS Gateway biasanya support untuk pesan yang berupa teks, unicode character, dan juga smart messaging (ringtone, picture message, logo operator, dll).

2.13 Microcontroller AVR Atmega 16

AVR merupakan seri mikrocontroler CMOS 8-bit buatan Atmel, berbasis arsitektur RISC (Reduced Instruction Set Computer). Hampir semua instruksi dieksekusi dalam satu siklus clock. AVR mempunyai 32 register general-purpose, timer/counter fleksibel dengan mode compare, interrupt internal dan eksternal, serial UART, programmable Watchdog Timer, dan mode power saving, ADC dan

PWM internal. AVR juga mempunyai In-System Programmable Flash on-chip yang memungkinkan memori program untuk diprogram ulang dalam sistem menggunakan hubungan serial SPI. ATmega16. ATmega16 mempunyai throughput mendekati 1 MIPS per MHz membuat disainer sistem untuk mengoptimasi konsumsi daya versus kecepatan proses.

Beberapa keistimewaan dari AVR ATmega16 antara lain:

1. Advanced RISC Architecture
 - 130 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
2. Nonvolatile Program and Data Memories
 - 8K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - 512 Bytes EEPROM
 - 512 Bytes Internal SRAM
 - Programming Lock for Software Security
3. Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Mode
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four PWM Channels
 - 8-channel, 10-bit ADC
 - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
 - Programmable Serial USART
4. Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection

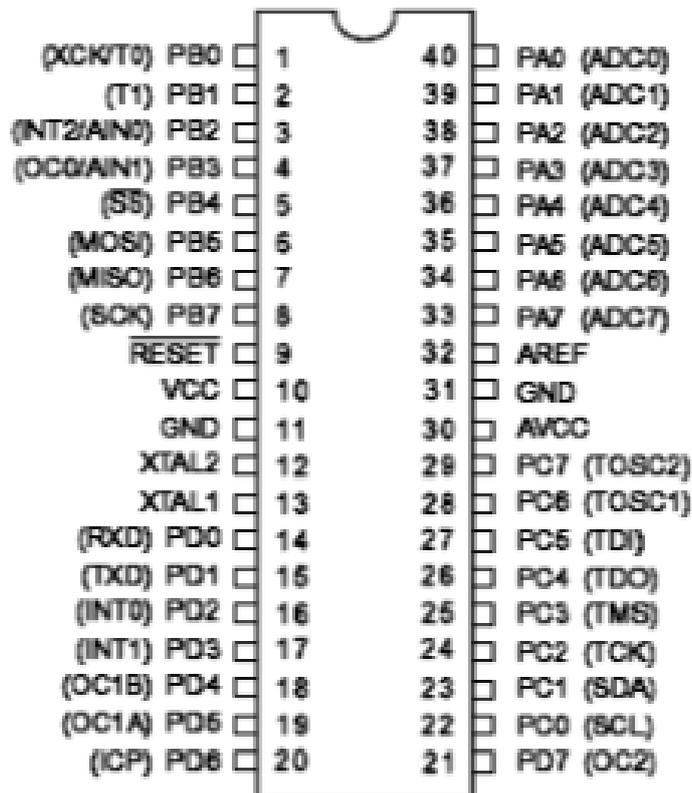
- Internal Calibrated RC Oscillator
- External and Internal Interrupt Sources
- Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Powerdown, Standby and Extended Standby

5. I/O and Package

- 32 Programmable I/O Lines
- 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, 44-lead PLCC, and 44-pad MLF

6. Operating Voltages

- 2.7 - 5.5V for Atmega16L
- 4.5 - 5.5V for Atmega16



Gambar 2.17 Pin-Pin ATmega 16

Pin-pin pada ATmega16 dengan kemasan 40-pin DIP (dual inline package) ditunjukkan oleh gambar 2.17. Guna memaksimalkan performa, AVR

menggunakan arsitektur Harvard (dengan memori dan bus terpisah untuk program dan data).

2.14 LCD (*Liquid Crystal Display*)

LCD (*liquid Crystal Display*) adalah suatu jenis media tampilan yang menggunakan kristal cair sebagai penampil utama. LCD terdiri dari lapisan-lapisan cairan kristal diantara dua pelat kaca. Film transparan yang dapat menghantarkan listrik atau *back plane*, diletakkan pada lembaran belakang kaca. Bagian trasparan dari film yang dapat menghantarkan arus listrik pada bagian luar dari karakter yang diinginkan dilapiskan pada pelat bagian depan. Pada saat terdapat tegangan antara segmen dan *back plane*, bagian yang berarus listrik ini mengubah transmisi cahaya melalui daerah di bawah segmen film. Berdasarkan jenis tampilan, LCD dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis, yaitu :

- *Segment LCD*

LCD jenis ini terbentuk dari beberapa *seven-segment display* atau *sixteen segment display*, namun ada juga yang menggunakan gabungan dari keduanya. LCD jenis ini sering dipakai pada jam digital dan alat ukur digital

- *Dot Matrix Character LCD*

LCD jenis ini terbentuk dari beberapa dot matrix display berukuran 5x7 atau 5x9, yang membentuk sebuah matriks yang lebih besar dengan berbagai kombinasi jumlah kolom dan baris. Kombinasi ini menentukan jumlah karakter yang dapat ditampilkan oleh LCD tersebut, seperti 2 baris x 20 karakter atau 4 baris x 20 karakter.

- *Graphic LCD*

LCD jenis ini masih terus berkembang sampai saat ini. Resolusi LCD jenis ini bervariasi, diantaranya 128x64, 128x128, 240x64, 240x128. Sekarang ini, *graphic LCD* banyak dipakai pada *handycam*, *laptop*, telepon selular (*cellphone*), monitor komputer, dan lain-lain.

Tabel 2.4 Fungsi Pin LCD

Pin No.	Symbol	Level	Description
1	V _{SS}	0V	Ground
2	V _{DD}	5.0V	Supply Voltage for logic
3	VO	(Variable)	Operating voltage for LCD
4	RS	H/L	H: DATA, L: Instruction code
5	R/W	H/L	H: Read(MPU→Module) L: Write(MPU→Module)
6	E	H,H→L	Chip enable signal
7	DB0	H/L	Data bit 0
8	DB1	H/L	Data bit 1
9	DB2	H/L	Data bit 2
10	DB3	H/L	Data bit 3
11	DB4	H/L	Data bit 4
12	DB5	H/L	Data bit 5
13	DB6	H/L	Data bit 6
14	DB7	H/L	Data bit 7
15	A	4.2V-4.6V	LED +
16	K	0V	LED -

2.15 Bahasa Pemrograman

Bahasa C adalah bahasa pemrograman yang dapat dikatakan berada di antara bahasa beraras rendah dan beraras tinggi. Bahasa beraras rendah artinya bahasa yang berorientasi pada mesin, sedangkan beraras tinggi berorientasi pada manusia. Bahasa beraras rendah misalnya, bahasa assembler, ditulis dengan sandi yang hanya dimengerti oleh mesin sehingga hanya digunakan bagi yang memrogram mikroprosesor. Bahasa beraras rendah merupakan bahasa yang membutuhkan kecermatan tinggi bagi pemrogram karena perintahnya harus rinci, ditambah lagi masing-masing pabrik mempunyai sandi perintah sendiri. Bahasa tinggi relatif mudah digunakan karena ditulis dengan bahasa manusia sehingga mudah dimengerti dan tidak tergantung mesinnya. Bahasa beraras tinggi umumnya digunakan pada komputer.

Pencipta bahasa C adalah Brian W. Kernighan dan Denis M. Ritchi sekitar 1972. Penulisan program dalam bahasa C dilakukan dengan membagi dalam blok-blok sehingga bahasa C disebut bahasa terstruktur. Bahasa C dapat digunakan mesin dengan mudah, mulai dari PC sampai *mainframe*, serta menggunakan berbagai sistem operasi misalnya DOS, UNIX, VMS, dan lain-lain.