

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Sudah sejak lama studi dan penelitian tentang magnet menghasilkan berbagai produk yang bermanfaat bagi umat manusia. Produk-produk seperti motor listrik, generator listrik, satelit, sistim pemantau radar, *central lock* pintu mobil, lampu, perangkat pengangkat dan penarik benda logam pada pesawat angkat, hingga kereta api cepat adalah beberapa contoh penerapan magnet. Produk di bidang kesehatan juga telah banyak dihasilkan yang memanfaatkan prinsip kemagnetan ini yaitu MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) dan gelang/kalung *bio-magnet* yang membanjiri Indonesia produksi China maupun Jepang yang berupa magnet tetap yang diklaim bisa membantu melancarkan peredaran darah dan memperbaiki syaraf yang terjepit.

Penelitian tentang magnet elektrik untuk motor listrik adalah yang paling banyak dilakukan khususnya motor listrik yang bisa menghasilkan torsi besar, ukurannya yang semakin kecil, mudah dalam pemanfaatan dan pengontrolannya, serta efisien dalam penggunaan energi listriknya. Produk-produk tersebut seluruhnya buatan luar negeri dan banyak diimpor oleh perguruan tinggi dan industri di Indonesia.

Metode pelayangan magnet (*magnetic levitation*) adalah termasuk hal baru yang hasil penelitiannya banyak diterapkan di sektor industri dan transportasi karena dapat mengurangi gesekan mekanis secara berarti. Meski penelitian-penelitian tersebut masih terus dilakukan dan terbukti sukses diterapkan pada kereta api cepat *maglev* serta pengembangan bantalan magnet tak berfriksi, prinsip dasar pelayangan magnet dengan magnet elektrik ini masih terus dipelajari di banyak perguruan tinggi di dunia[1,2]. Tujuannya terutama adalah melihat fenomena pelayangan benda melalui pengontrolan kuat medan magnet elektrik serta rentang kestabilan tinggi benda yang dilayangkan. Pemahaman ini menurut mereka penting karena “suatu benda yang melayang apabila diberi gaya dorong sedikit saja akan bisa bergerak dengan cepat karena tidak adanya

gesekan mekanis (kecuali gesekan udara) yang timbul sebagai hasil kontak antara benda satu dan lainnya seperti pada kereta api konvensional”.

Cara termudah untuk melayangkan obyek elektromagnetik dilihat dari sistem kontrol adalah magnetik suspensi. Obyek yang akan dilayangkan ditempatkan di bawah sebuah elektromagnet, dengan kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet yang dikendalikan dengan tepat akan melawan gaya gravitasi ke bawah pada obyek akibat beratnya. Di Indonesia para peneliti masih jarang mengkaji pelayangan magnet ini, baik dengan magnet elektrik maupun dengan magnet tetap[3]. Para peneliti kebanyakan masih tertarik pada pemanfaatan dan/atau pengontrolan motor listrik di bidang mekatronika dan robotik. Atas dasar itulah tugas akhir ini dibuat.

Hasil akhir yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah terbuatnya sebuah alat peraga pendidikan yang mampu menggambarkan fenomena pelayangan magnet dengan objek pelayangan bola baja atau dengan magnet permanen. Pengontrolan dalam tugas akhir ini merupakan pengontrolan dalam keadaan yang sangat tidak stabil. Gaya gravitasi bumi yang bekerja pada obyek pelayangan menyebabkan pengontrolan harus dilakukan secara maksimal dan berkesinambungan agar tidak memberikan celah bagi obyek pelayangan untuk jatuh mengikuti arah gaya gravitasi bumi. Di sisi lain, gaya magnet yang terlalu besar akan menyebabkan obyek pelayangan melekat pada kumparan yang juga sangat tidak diinginkan. Sehingga diperlukan perangkat pengontrol yang dapat merespon dan mengaktualisasikan aksi kontrolnya secepat mungkin. Perancangan suspensi magnetik ini terdiri dari solenoida, sensor posisi, obyek pelayangan, dan rangkaian pengontrol.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Membuat suatu alat peraga *magnetic levitation system*.
- Membuat sistem pengontrol yang mampu melayangkan obyek pelayangan pada sistem *magnetic levitation*.
- Melakukan pengujian baik terhadap solenoida dan pengujian alat peraga *magnetic levitation system* secara keseluruhan.

### 1.3. Batasan Masalah

Pembatasan masalah yang diterapkan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah:

1. Sistem kontrol yang digunakan adalah sistem *close loop* dengan kontrol PID.
2. Mikrokontroler yang digunakan adalah jenis ATmega 8.
3. Sensor posisi yang digunakan adalah *hall effect* sensor.
4. Obyek pelayangan yang digunakan adalah magnet permanen jenis *neodymium magnet*.

### 1.4. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan untuk menganalisis adalah:

1. Studi pustaka dan literatur  
Mengumpulkan serta mempelajari referensi-referensi yang berhubungan dengan penelitian tugas akhir ini baik data yang didapat dari perpustakaan maupun internet.
2. Bimbingan  
Langkah ini dilakukan dengan cara konsultasi mengenai materi tugas akhir dengan Dosen Pembimbing tugas akhir. Bertujuan untuk mendapatkan tambahan pengetahuan dan masukan dari Dosen Pembimbing serta koreksi terhadap kesalahan-kesalahan yang terjadi dalam penelitian tugas akhir dan penyusunan laporan.
3. Data Penelitian  
Pada tahapan ini kegiatan yang dilakukan adalah proses penyiapan alat pengujian dan tinjauan data secara umum yang termasuk didalamnya adalah membuat alat peraga *magnetic levitation system* sebagai sarana pengujian.
4. Pengolahan dan Analisa Data  
Menganalisa perhitungan dan melakukan kajian lanjut berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil pengujian alat peraga.

### **1.5. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Bab I berisi latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

Bab II berisi tentang gambaran umum solenoida, penjelasan secara lebih detail tentang pembuatan solenoida serta pengukuran besarnya medan magnet. Dilanjutkan dengan pembahasan tentang model *magnetic levitation system*, kemudian dibahas mengenai pemilihan dan penggunaan *power supply* yang sesuai dengan atau dapat memenuhi sistem.

Bab III berisikan tentang penjelasan perangkat sistem pengontrol digunakan pada pembuatan sistem *magnetic levitation*.

Bab IV berisi tentang pengujian alat peraga yang dibuat dan menganalisa data-data dari hasil pengujian serta mengetahui besarnya gaya magnet dengan variasi arus listrik dan jarak pelayangan.

Bab V berisi tentang kesimpulan dan saran yang diambil dari proses penelitian pada bab sebelumnya.

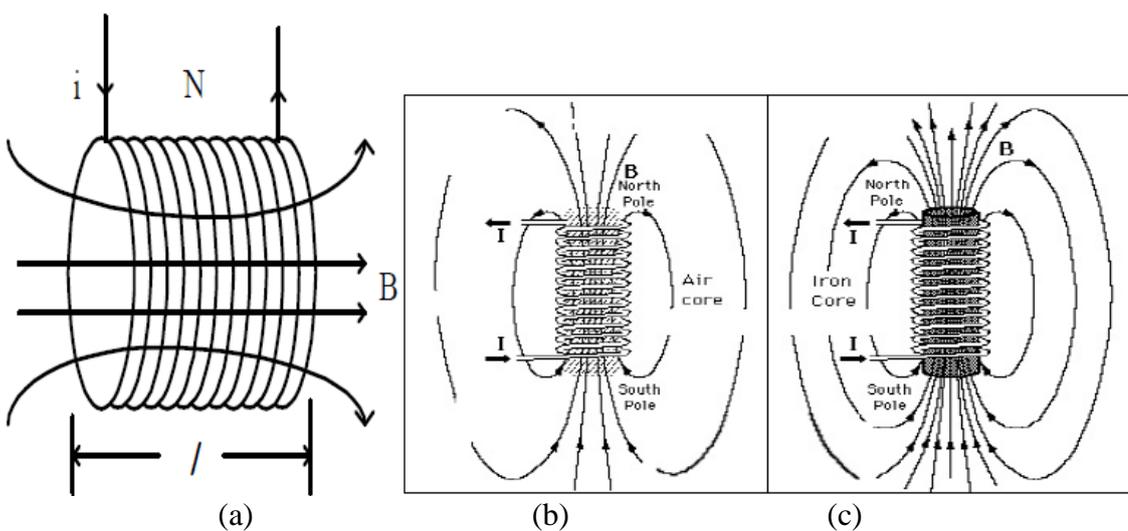
## BAB II

### SOLENOIDA DAN PARAMETER MAGNETIK

Pada bab ini akan menguraikan tentang perencanaan magnet elektrik yaitu solenoida yang terdiri dari inti baja yang dililit kawat tembaga dengan diameter kawat dan jumlah lilitan tertentu. Selain itu pada bab ini akan diuraikan mengenai model *magnetic levitation system*. Pada bab ini juga membahas tentang perencanaan sumber daya (*power supply*) yang dipakai sebagai catu daya solenoida.

#### 2.1. Solenoida

Sebuah elektromagnetik pada bentuk paling sederhana merupakan sebuah kawat berarus listrik yang digulung menjadi satu *loop* atau lebih yang biasanya dililitkan pada inti dari besi sehingga menghasilkan medan magnet. Medan magnet yang seragam dihasilkan pada pusat solenoida, sedangkan medan magnet yang terbentuk diluar solenoida lebih lemah dan divergen. Ilustrasi garis gaya magnet pada solenoida tampak pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Solenoida dan Ilustrasi Garis Gaya Magnet[4]

(a). Kumparan solenoida.

(b). Garis Medan Magnet Solenoida Tanpa Inti.

(c). Garis Medan Magnet pada Solenoida Berinti Besi.

Jika solenoida dialiri arus listrik maka akan menghasilkan medan magnet sepanjang kumparan. Garis-garis gaya magnet pada solenoida merupakan gabungan dari garis-garis gaya magnet dari kawat melingkar. Gabungan itu akan menghasilkan medan magnet yang sama dengan medan magnet sebuah magnet batang yang panjang. Kumparan seolah-olah mempunyai dua kutub, yaitu ujung yang satu merupakan kutub utara dan ujung kumparan yang lain merupakan kutub selatan. Medan magnet yang dihasilkan solenoida berarus listrik bergantung pada kuat arus listrik dan banyaknya kumparan.

Pada sebuah solenoida, besar medan magnet yang dihasilkan oleh jumlah lilitan  $N$ , besar arus  $I$  (Ampere), permeabilitas bahan inti kumparan  $\mu$  (Tm/A) dan panjang kumparan  $L$  (m) dapat dituliskan:

$$B = \frac{\mu NI}{L} \quad (2.1)$$

Pada solenoida berinti udara atau sering disebut dengan solenoida tak berinti, besar nilai permeabilitas bahan inti kumparannya = 1 atau besarnya  $\mu = \mu_0$ . Sedangkan pada solenoida berinti, besarnya  $\mu$  berbeda-beda tergantung dengan jenis bahan inti kumparan yang digunakan. Besarnya permeabilitas inti kumparan dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.2)$$

Dimana  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif bahan inti dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa  $4\pi \times 10^{-7}$  Tm/A.

Gaya magnet  $F$  (Newton) yang dapat dihasilkan sebuah solenoida dengan medan magnet  $B$  (Tesla) dan luas penampang inti kumparan  $A$  (m<sup>2</sup>) dapat dituliskan:

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu} \quad (2.3)$$

Subtitusikan persamaan (2.1) dan (2.3) maka akan didapatkan persamaan yang baru, yaitu:[4]

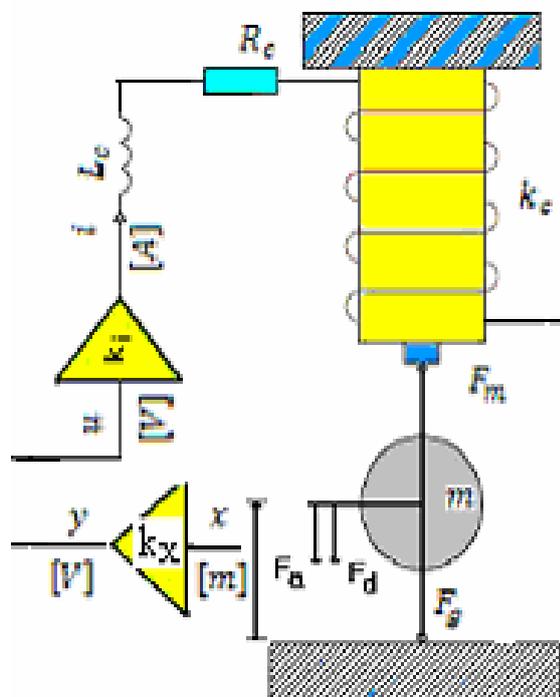
$$F = \frac{\mu N^2 I^2 A}{2L^2} \quad (2.4)$$

Berdasarkan persamaan (2.4) diketahui bahwa untuk mendapatkan gaya magnet yang kuat dibutuhkan jumlah lilitan yang banyak, arus yang besar, kumparan yang pendek dan permeabilitas bahan inti yang tinggi. Pada tugas akhir ini jumlah lilitan, luas penampang, panjang dan bahan inti kumparan sudah ditentukan, maka dianggap sebagai konstanta. Sehingga persamaan (2.4) dapat dituliskan menjadi:

$$F = KI^2 \quad (2.5)$$

## 2.2. Model *Magnetic Levitation System*

Pada bagian ini akan menjelaskan mengenai sistem fisik *magnetic levitation* dan komponennya serta menyajikan persamaan sistem model nonlinier dan liniernya. Skema dari sistem *magnetic levitation* dapat dilihat seperti Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Sistem *Magnetic Levitation Ball*[5].

Sebuah distribusi medan magnet yang ideal ditandai oleh medan magnet yang seragam di atas obyek pelayangan, kepadatan fluks magnet merupakan fungsi dari jarak pada arus tetap. Gambaran hubungan antara besarnya gaya elektromagnetik, arus dan jarak yang dibutuhkan untuk melayangkan bola baja dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$F_a = F_m - F_g - F_d \quad (2.6)$$

Dimana:

$F_a$  = gaya percepatan (N)

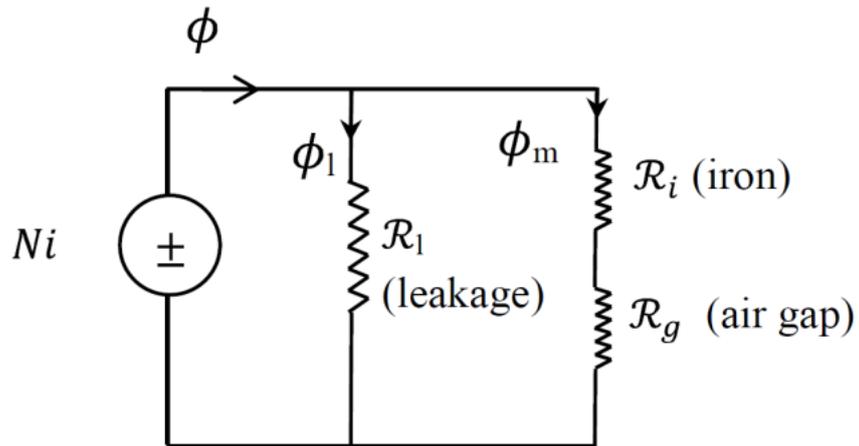
$F_m$  = gaya elektromagnetik (N)

$F_g$  = gaya gravitasi (N)

$F_d$  = gaya peredam (N)

Dari Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa sistem *magnetic levitation* ini terdiri kedalam 3 komponen utama yaitu sistem magnetik, sistem elektrikal dan sistem mekanik.

#### a. Sistem Magnetik



Gambar 2.3 Skema Sistem Magnetik.

Dari Gambar 2.3 di atas dapat diperoleh:

$$Ni = \Phi_l \mathcal{R}_l + \Phi_m (\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_g) \quad (2.7)$$

Dimana iron path  $\mathcal{R}_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i} = \frac{l_i}{\mu_r \mu_0 A_i}$

$$\text{Air gap } \mathcal{R}_g = \frac{2x}{\mu_g A_i} = \frac{l_i}{\mu_0 A_i}; \mu_g \approx \mu_0$$

Magnetik fluks

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \frac{Ni}{\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_g} = \frac{Ni}{\mathcal{R}_m} \text{ dan } \Phi_l = \frac{Ni}{\mathcal{R}_l} \\ \Phi &= \Phi_m + \Phi_l = \frac{Ni}{\mathcal{R}_m} + \frac{Ni}{\mathcal{R}_l} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Total reluktansi dari Gambar 2.3 dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut[6]:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_m(x) &= (\mathcal{R}_i + \mathcal{R}_g) \\ &= \frac{l_i}{\mu_r \mu_0 A_i} + \frac{l_i}{\mu_0 A_i} \\ \mathcal{R}_m(x) &= \frac{1}{\mu_0 A_i} \left( \frac{l_i}{\mu_r} + 2x \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Dimana:

$\Phi_m$  = fluks magnet

$\mathcal{R}_i$  = reluktansi pada besi

$\mathcal{R}_g$  = reluktansi *air gap*

$l_i$  = panjang inti besi

$A_i$  = diameter inti besi

$N$  = lilitan solenoida

$i$  = arus listrik

$\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa

$\mu_r$  = permeabilitas relatif

### b. Sistem Elektrikal

Persamaan elektrik dari *magnetic levitation* diasumsikan bahwa elektromagnetik koil merupakan model dari rangkaian seri antara resistor-induktor. Sistem elektrik ditunjukkan oleh gambar dibawah. Dengan menggunakan KVL (*Kirchhoff's Voltage Law*) maka untuk hubungan tegangan dan arus listrik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_t = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.10)$$

Dimana:  $V_t$  = tegangan listrik

$R$  = hambatan listrik

$i$  = arus listrik

$\lambda = N\Phi$

Sehingga,

$$\lambda = N \left( \frac{Ni}{\mathcal{R}_i} + \frac{Ni}{\mathcal{R}_m(x)} \right)$$

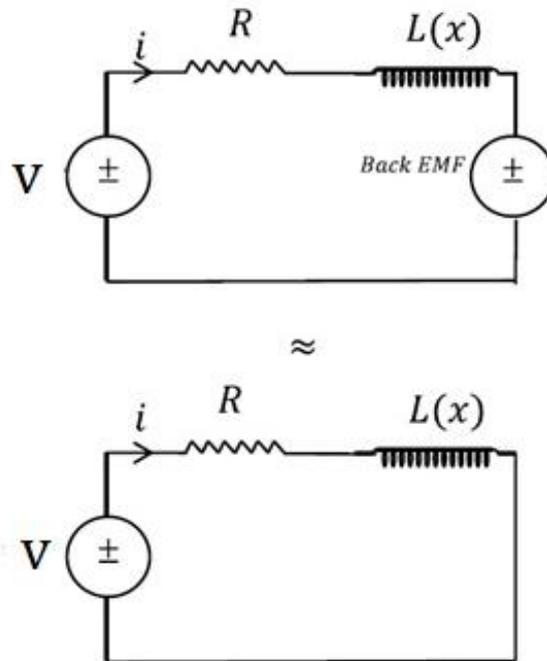
$$\lambda = \left( \frac{N^2}{\mathcal{R}_i} + \frac{N^2}{\mathcal{R}_m(x)} \right) i = (L_l + L_m(x))i \quad (2.11)$$

$$\lambda(i, x) = L(x)i$$

$L(x)$  adalah induktansi elektromagnetik solenoida jika  $L_l$  adalah induktansi tanpa bola,  $L_m(x)$  adalah peningkatan induktansi dengan adanya bola. Maka induktansi elektromagnetik solenoida dapat dituliskan:

$$L(x) = L_l + L_m(x) \quad (2.12)$$

Gambar 2.4 berikut ini merupakan skema dari sistem elektrikalnya:



Gambar 2.4 Skema Sistem Elektrikal.

Tegangan yang melewati induktansi

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial \lambda(i,x)}{\partial t} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda(i,x)}{\partial x} \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = L(x) \frac{di}{dt} + \frac{\partial L(x)}{\partial x} i \frac{dx}{dt} \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} L_m(x) ; \text{ tanpa induktansi } \textit{leakage}.$$

Dari persamaan (2.11) akan didapat persamaan dibawah ini

$$L_m(x) = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m(x)}$$

$$L_m(x) = \frac{N^2}{\frac{1}{\mu_0 A_i} (\frac{l_i}{\mu_r} + 2x)}$$

$$L_m(x) = \frac{\frac{N^2 \mu_0 A_i}{2}}{(\frac{l_i}{\mu_r} + x)}$$

$$L_m(x) = \frac{c}{(k_0 + x)} \approx \frac{c}{x} \text{ karena } x \gg k_0$$

Dimana,  $c = \frac{N^2 \mu_0 A_i}{2}$  dan  $k_0 = \frac{l_i}{2\mu_r}$

Dari persamaan (2.10) dan (2.13) akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$V_t = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + \frac{\partial L(x)}{\partial x} i \frac{dx}{dt} \quad (2.14)$$

Dimana  $\frac{\partial L(x)}{\partial x} i \frac{dx}{dt}$  adalah *counter electromotive force* atau *back emf* yang dihasilkan dari perubahan gaya *electromotive*. Karena fluks leakage dalam kasus ini sangat kecil, maka *back emf* dapat abaikan[6]. Sehingga persamaan (2.14) dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_t = Ri + L(x) \frac{di}{dt} \quad (2.15)$$

### c. Sistem Mekanik

Gaya elektromagnetik pada objek pelayangan ditentukan menggunakan konsep coenergi untuk menghasilkan posisi objek pelayangan sebagai fungsi dari arus sebagai masukan[7]. Gaya elektromagnet itu sendiri didefinisikan dari *electrical input* dikurangi coenergi. *Coenergy* didefinisikan sebagai berikut:

$$W_{fl} = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (2.16)$$

$$F_m dx = dW_e - dW_{fl}$$

$$F_m = \frac{dW_e}{dx} - \frac{dW_{fl}}{dx} \quad (2.17)$$

Dimana  $dW_e$  adalah perubahan *electrical input* dan  $dW_{fl}$  adalah perubahan *stored energy (coenergy)*. Dalam sistem linier,  $dW_e$  diasumsikan nol sehingga dari persamaan (2.17) didapat[8]:

$$F_m = - \frac{dW_{fl}}{dx} \quad (2.18)$$

Substitusikan persamaan (2.16) dan (2.18)

$$\begin{aligned} F_m &= - \left( \frac{1}{2} L(x) i^2 \right) \frac{d}{dx} \\ &= - \frac{1}{2} (L_l + L_m(x) i^2) \frac{d}{dx} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{2} \left( L_l + \frac{c}{x} i^2 \right) \frac{d}{dx} \\
&= \frac{1}{2} c \left( \frac{i}{x} \right)^2
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Karena  $\frac{1}{2}c$  adalah konstanta maka dapat dimisalkan sebagai  $k$  menjadi persamaan dibawah ini:

$$F_m = k \left( \frac{i}{x} \right)^2 \tag{2.20}$$

Hubungan antara gaya elektromagnetik, arus dan jarak dari persamaan (2.6) dapat digambarkan sebagai berikut:

$$m\ddot{x} = k \left( \frac{i}{x} \right)^2 - mg - F_d \tag{2.21}$$

Dalam beberapa kasus, gaya redaman nilainya sangat kecil, sehingga dalam persamaan pemodelan akan dipertimbangkan menjadi dua kasus. Persamaan pertama dengan adanya gaya redaman dan yang kedua gaya redaman akan diabaikan. Persamaan ini ditunjukkan oleh persamaan (2.21) dan (2.22).

$$m\ddot{x} = k \left( \frac{i}{x} \right)^2 - mg \tag{2.22}$$

### 2.2.1. Linierisasi

Pada persamaan 2.22 merupakan persamaan gerak nonlinier. Model persamaan 2.22 tersebut dalam kasus ini keseimbangan antara gaya elektromagnetik tidak stabil, oleh karena itu untuk memudahkan sistem pengontrolan maka persamaan ini harus dilinierkan. Agar mendapatkan model matematika yang linier dari suatu sistem nonlinier, kita anggap bahwa variabel hanya mengalami deviasi yang kecil dari titik kerjanya. Persamaan nonlinier dengan bantuan deret *taylor* dapat dinyatakan seperti persamaan 2.23[9].

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \left[ \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, \bar{x}_1) + \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_2, \bar{x}_2) \right]$$

$$+ \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} (x_1, \bar{x}_1)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} (x_1, \bar{x}_1)(x_2, \bar{x}_2) + \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} (x_2, \bar{x}_2)^2 \right] + \dots \quad (2.23)$$

Turunan parsial dihitung pada  $x_1 = \bar{x}_1$ ,  $x_2 = \bar{x}_2$  di dekat titik kerja normal, bentuk-bentuk orde tinggi diabaikan. Model matematika linier dari sistem nonlinier ini di sekitar kondisi kerja normal selanjutnya diberikan oleh persamaan 2.24.

$$y - \bar{y} = K_1(x_1, \bar{x}_1) + K_2(x_2, \bar{x}_2) \quad (2.24)$$

Dengan,

$$\ddot{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$$

$$K_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_1=x_1, x_2=x_2}$$

$$K_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_1=x_1, x_2=x_2}$$

Dari sistem persamaan (2.19) kita ambil titik kerja pada  $\tilde{x}_1 = i_0$  ;  $\tilde{x}_2 = x_0$ . Dengan memperhatikan diagram benda bebas massa dan koil magnet maka kondisi awal operasi massa yaitu pada  $i_0 = i_0$ ;  $x_0 = 0$ . Dengan mensubstitusikan kondisi awal pada persamaan gaya magnet yang dideretkan seperti persamaan (2.20) maka:

$$F_m \approx F(i_0, x_0) + \left. \frac{\partial F(i, x)}{\partial x} \right|_{i_0, x_0} (x - x_0) + \left. \frac{\partial F(i, x)}{\partial i} \right|_{i_0, x_0} (i - i_0) \quad (2.25)$$

$$F_0 = F(i_0, x_0) = k \left( \frac{i_0}{x_0} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$K_1 = \left. \frac{\partial F(i, x)}{\partial x} \right|_{i_0, x_0} = -2k \left( \frac{i_0^2}{x_0^3} \right) \quad (2.27)$$

$$K_2 = \left. \frac{\partial F(i, x)}{\partial i} \right|_{i_0, x_0} = 2k \left( \frac{i_0}{x_0^3} \right) \quad (2.28)$$

Maka persamaan gaya magnet linear adalah:  $F_m \approx F_0 + K_1 \tilde{x} + K_2 \tilde{i}$

$$F_m = k \left( \frac{i_0}{x_0} \right)^2 - 2k \left( \frac{i_0^2}{x_0^3} \right) \tilde{x} + 2k \left( \frac{i_0}{x_0^3} \right) \tilde{i} \quad (2.29)$$

Pada saat keadaan setimbang statik akselerasi sama dengan nol

$$m\ddot{x} = F_m - mg$$

$$m\ddot{x} = k \left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2 - 2k \left(\frac{i_0^2}{x_0^3}\right) + 2k \left(\frac{i_0}{x_0^3}\right) - mg \quad (2.30)$$

$$mg = k \left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2 = F_0$$

Seperti yang sudah dijelaskan dalam sub bab sebelumnya, hubungan antara massa, arus, lilitan dan posisi bola dapat diketahui dari ketiga sistem diatas yaitu sistem magnetik, sistem elektrik dan sistem mekanik. Maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$\frac{N^2 \mu_0 A_i I^2}{4 x^2} = m \cdot g \quad (2.31)$$

Dimana:  $N$ = lilitan

$\mu_0$ = permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \times 10^{-7}$  Tm/A)

$A_i$ = luas permukaan inti besi ( $m^2$ )

$I$  = arus listrik (A)

$x$  = posisi bola (m)

$m$  = massa bola (kg)

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Subtitusikan persamaan (2.29) dan (2.30)

$$m\ddot{x} = K_1 \tilde{x} + K_2 \tilde{v} \quad (2.32)$$

### 2.3. Pembuatan Solenoida

Dalam perencanaan pembuatan elektromagnetik, yaitu solenoida yang terdiri dari inti baja yang dililiti kawat tembaga dengan diameter kawat dan jumlah lilitan tertentu akan disesuaikan dengan dimensi dan massa objek yang akan dilayangkan pada sistem *magnetic levitation*.

Pada sistem *magnetic levitation* ini, jumlah kumparan solenoida yang dibuat sebanyak 1700 lilitan. Besarnya medan magnet sangat dipengaruhi oleh besarnya kuat arus yang digunakan. Semakin besar arus, semakin besar pula medan magnet yang

dihasilkan. Tetapi dengan penggunaan arus listrik yang semakin besar, maka diperlukan diameter kawat yang semakin besar juga. Apabila penggunaan arus tidak sesuai dengan kawat yang digunakan, kawat akan cepat panas dan terbakar.

Dari Tabel 2.1 kemampuan kawat email dilalui arus listrik, kita dapat menentukan berapa besar arus listrik dan diameter kawat email yang akan digunakan untuk membuat solenoida.

Tabel 2.1 Kemampuan Kawat Email Dilalui Arus Listrik[10].

Tabel kemampuan kawat email dilalui arus listrik

DKE (mm)	KA (Ampere)
0,1	0,016 - 0,024
0,2	0,064 - 0,094
0,3	0,141 - 0,212
0,4	0,251 - 0,377
0,5	0,390 - 0,588
0,6	0,566 - 0,849
0,7	0,770 - 1,16
0,8	1,01 - 1,51
0,9	1,27 - 1,91
1,0	1,57 - 2,36
1,5	3,53 - 5,3
2,0	6,28 - 9,42
2,5	9,82 - 14,73
3,0	14,14 - 21,20
3,5	19,24 - 28,86
4,0	25,14 - 37,71

Ket: DKE = Diameter Kawat Email, KA = Kuat Arus

Dari Tabel 2.1 ditentukan diameter kawat email yang digunakan 0,6 mm dengan kisaran arus listrik yang mengalir 0,566-0,849 Ampere. Kawat tembaga yang digunakan

sebagai solenoida adalah kawat jenis AWG 22 GA atau kawat dengan ukuran diameter 0,6 mm seperti pada Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Kawat AWG 22 GA.



Gambar 2.6 Selongsong dan Inti Solenoida.

Kawat tembaga dililitkan pada sebuah selongsong plastik berdiameter 5,5 cm dan panjangnya 6 cm. Didalamnya diletakkan baut berdiameter 1 cm dengan panjang 7 cm yang terbuat dari bahan ferromagnetik yang digunakan sebagai inti solenoida seperti pada Gambar 2.6. Solenoida yang dibuat tampak pada Gambar 2.7. Sedangkan rangka untuk menyangga solenoida, dibuat dari bahan alumunium.

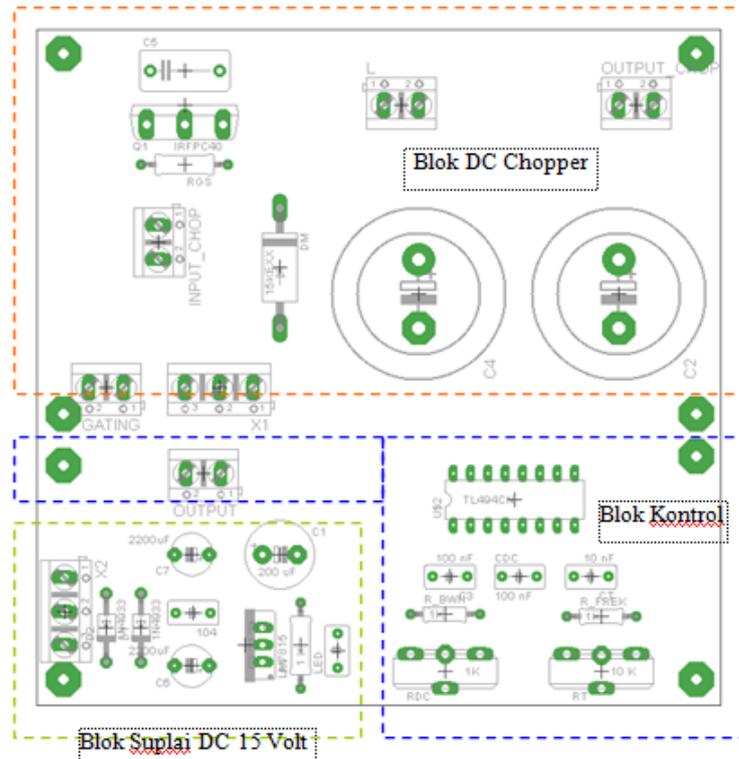


Gambar 2.7 Solenoida yang Dibuat.

#### **2.4. Rangkaian Catu Daya (*Power Supply*)**

Rangkaian penyuplai daya yang dipakai adalah menggunakan rangkaian *DC Chopper Tipe Buck (Step Down Chopper)*. Rangkaian ini dipilih karena dapat memvariasikan hambatan menggunakan potensiometer, sehingga keluaran arus yang dihasilkan juga dapat bervariasi. Dimana arus listrik merupakan daya input ke solenoida. Rangkaian ini mampu menghasilkan keluaran arus listrik 0,15 – 4 Ampere dan tegangannya 1,5-40 Volt. Dari hasil keluaran tersebut, dapat dikatakan bahwa rangkaian power supply ini mampu menyuplai arus ke solenoida dengan range 0,566-0,849 Ampere sesuai dengan kemampuan kawat email yang digunakan.

Rangkaian ini terdiri dari tiga blok utama yaitu blok penyearah, blok kontrol dan blok *DC Chopper Tipe Buck* seperti tampak pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Blok Skematik *DC Chopper Tipe Buck (Step Down Chopper)*.

**a. Blok Penyearah 15 VDC (*Rectifier*)**

Blok ini berfungsi untuk menghasilkan tegangan searah 15 Volt DC yang digunakan untuk memberi catu daya pada rangkaian kontrol. Prinsip kerja penyearah yaitu sebagai berikut, Tegangan Sumber 220VAC dari PLN diturunkan (*Step Down*) menggunakan Trafo CT 1A menjadi tegangan 12VAC. Tegangan 12 VAC ini disearahkan menggunakan 2 buah dioda IN4001 di filter oleh Kapasitor Polar C1 2200uF dan Kapasitor Non Polar 100nF (104) kemudian tegangan diregulasi oleh LM 7815 agar didapat tegangan DC yang ideal.

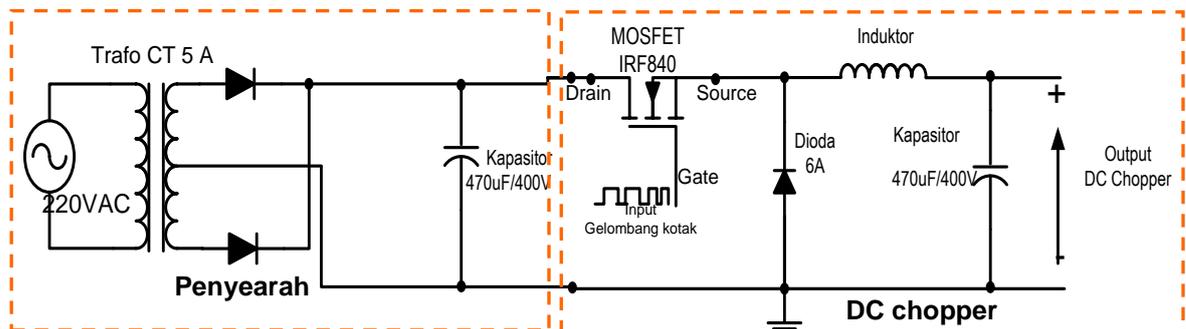
**b. Blok Kontrol Gelombang Kotak untuk Pemicuan**

Pada blok ini terdapat komponen utama dari *DC Chopper* yaitu IC TL 494. IC ini berfungsi untuk menghasilkan gelombang pulsa pemicuan yang dapat diatur frekuensi dan *duty cycle* nya. Pengaturan frekuensi dan *duty cycle* dilakukan dengan

mengatur nilai R dan C eksternal. Dalam hal ini digunakan R variabel (Potensiometer 1 K dan 10 K). Output rangkaian kontrol inilah yang digunakan untuk memicu MOSFET pada blok *DC Chopper*.

**c. Blok Penyearah untuk Suplai *DC Chopper* dan Blok *DC Chopper Tipe Buck***

DC Chopper BUCK

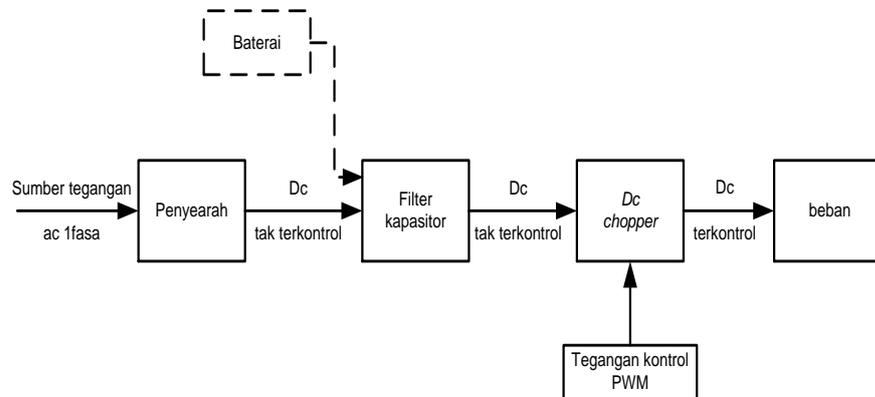


Gambar 2.9 Blok Penyearah untuk Suplai *DC Chopper* dan Blok *DC Chopper Tipe Buck*.

Gambar 2.9 menunjukkan bagian blok penyearah dari *DC Chopper*. Salah satu aplikasi elektronika daya adalah konverter DC-DC atau yang lazim di sebut *DC Chopper*. Konverter DC-DC berfungsi untuk mengkonversi tegangan masukan searah konstan menjadi tegangan keluaran searah yang dapat divariasikan berdasarkan perubahan *duty cycle* rangkaian kontrol *chopper*-nya.

*DC chopper* digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC yang tetap menjadi tegangan DC yang variabel dengan mengatur kondisi *on-off* (*duty cycle*) rangkaian *DC chopper* melalui rangkaian kontrol PWM, komponen yang digunakan untuk menjalankan fungsi penghubung tersebut tidak lain adalah *switch* (*solid state electronic switch*) seperti misalnya Thyristor, MOSFET, IGBT, GTO.

Sumber tegangan DC dapat diperoleh dari baterai, atau dengan menyearahkan sumber tegangan AC yang kemudian dihaluskan dengan *filter* kapasitor untuk mengurangi riak. Kelebihannya terutama pada pengubah daya secara jauh lebih efisien dan pemakaian komponen yang ukurannya lebih kecil. Blok diagram *dc chopper* dapat dilihat pada Gambar 2.10 di bawah ini.



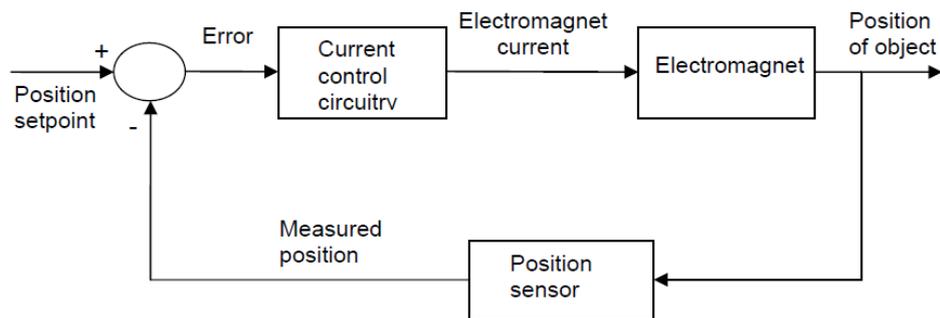
Gambar 2.10 Blok Diagram Sistem *DC Chopper*.

### BAB III PERANGKAT SISTEM PENGONTROL

*Magnetic levitation* adalah proses pelayangan sebuah benda dengan memanfaatkan medan magnet. Gaya elektromagnetik digunakan untuk melawan efek dari gaya gravitasi. *Magnetic levitation ball* dapat didefinisikan sebagai proses menanggulangi obyek/benda di ruang bebas dengan menangkali gaya gravitasi yang bekerja padanya. Secara sederhana ini dapat disebut sebagai suspensi stabil dari suatu obyek melawan gravitasi.

Cara termudah untuk melayangkan obyek elektromagnetik dilihat dari sistem kontrol adalah magnetik suspensi. Obyek yang akan dilayangkan ditempatkan di bawah sebuah elektromagnet, dengan kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh

elektromagnet yang dikendalikan dengan tepat akan melawan gaya gravitasi ke bawah pada obyek akibat beratnya. Metode ini disebut teorema *Circumvents Earnshaw* dengan membuat penggunaan umpan balik. Sehingga sistem hanya akan melawan gaya gravitasi, sistem ini bekerja pada gaya tarik antara gaya elektromagnetik dan benda. Selain itu objek yang akan dilayangkan bisa magnet permanen atau benda baja biasa. Agar mencegah obyek menempel pada elektromagnet, maka posisi benda harus bisa diperhitungkan. Posisi benda dapat diperhitungan/diketahui dengan menggunakan sensor posisi. Informasi dari sensor akan masuk pada rangkaian kontrol yang akan mengatur arus dalam elektromagnet. Jika benda terlalu dekat dengan elektromagnet maka benda akan menempel maka arus yang masuk di elektromagnet harus dikurangi, tetapi jika obyek terlalu jauh maka arus pada elektromagnet harus ditambah. Hal ini menghasilkan suatu sistem umpan balik dasar seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kontrol Dasar Umpan Balik Suspensi Magnetik[11].

Pada suatu sistem suspensi magnetik, ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengatur posisi obyek levitasi. Salah satu cara adalah dengan sensor optik/cahaya. Sebuah sinar cahaya bersinar di bagian bawah elektromagnet dan dideteksi pada sisi lain. Sebagai objek mengaburkan semakin banyak cahaya (menunjukkan bahwa obyek tersebut semakin dekat dengan elektromagnet) pengontrol elektromagnet dibatasi lagi. Selanjutnya jika obyek levitasi jauh dari elektromagnet, semakin banyak cahaya yang terkena sensor, dan saat itu elektromagnet ditingkatkan. Sistem ini dapat menunjukkan sulitnya untuk mengatur, dengan benar keselarasan dari sumber cahaya dan sensor cahaya sangat penting. Selanjutnya yang tidak kalah penting

adalah bentuk objek levitasi, karena tingkat di mana cahaya dikaburkan atau terkena harus linier untuk menunjukkan obyek levitasi yang naik dan turun.

Posisi obyek levitasi ini juga dapat diatur dengan sensor *hall effect*. Pada solusi ini, satu sensor *hall* dapat ditempatkan pada kutub utara elektromagnet, dan yang lainnya di kutub selatan. Sensor *hall* adalah perangkat yang memiliki linier untuk meningkatkan tegangan respon agar fluks magnet meningkat. Hal ini dapat mendeteksi kedua kutub utara dan kutub selatan, dengan baik meningkatkan tegangan *output* di atas tegangan *output* mula-mula, atau menurunkan tegangan *output* di bawah tegangan *output* mula-mula nya. *Output* dari kedua sensor dapat dikirim ke *input* dari diferensial op-amp untuk menentukan perbedaan antara tegangan *output* akhir dengan tegangan *output* mula mula.

Ketika tidak ada obyek untuk dilevitasikan, *output* dari kedua sensor akan sama. Dengan demikian, tidak akan ada dua medan magnet di kedua sisi sensor *hall* di bagian bawah elektromagnet. Penyebabnya mungkin disebabkan oleh elektromagnet dan sebab yang lain karena medan magnet di obyek levitasi. Hal ini akan menyebabkan sensor *hall* bawah mendeteksi medan magnet, sementara sensor *hall* atas masih akan mendeteksi medan magnet dari elektromagnet saja. Diferensial op-amp kemudian akan mengeluarkan sinyal yang dapat digunakan untuk mengontrol arus untuk elektromagnet. Sensor *hall* memiliki respon linier, *output* op-amp diferensial akan naik dan turun secara linier sebanding dengan naik dan turunnya obyek[12].

Dari dua contoh untuk mengatur posisi obyek levitasi diatas, maka pada Tugas Akhir ini untuk penentuan posisi obyek levitasi dipilih menggunakan *hall effect sensor*.

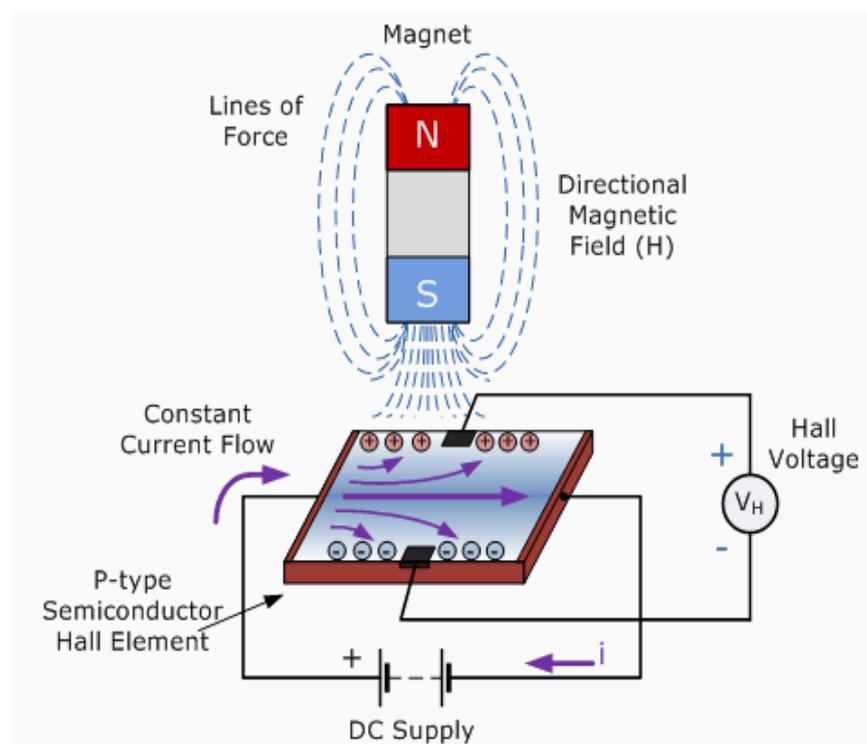
### **3.1 Sensor Posisi**

*Hall effect* sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. *Hall Effect* sensor akan menghasilkan sebuah tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut. Pendeteksian perubahan kekuatan medan magnet cukup mudah dan tidak memerlukan apapun selain sebuah induktor yang berfungsi sebagai sensornya.

Kelemahan dari detektor dengan menggunakan induktor adalah kekuatan medan magnet yang statis (kekuatan medan magnetnya tidak berubah) tidak dapat dideteksi.

Oleh sebab itu diperlukan cara yang lain untuk mendeteksinya yaitu dengan sensor yang dinamakan dengan 'hall effect' sensor. Sensor ini terdiri dari sebuah lapisan silikon yang berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dan dua buah elektroda pada masing-masing pada sisi silikon.

Hal ini akan menghasilkan perbedaan tegangan pada outputnya ketika lapisan silikon ini dialiri oleh arus listrik. Tanpa adanya pengaruh dari medan magnet maka arus yang mengalir pada silikon tersebut akan tepat ditengah-tengah silikon dan menghasilkan tegangan yang sama antara elektrode sebelah kiri dan elektrode sebelah kanan sehingga menghasilkan tegangan beda tegangan 0 volt pada *outputnya*. Pada medan positif (kutub selatan), semakin besar medan maka tegangan keluarannya juga semakin besar dan untuk medan negatif (kutub utara), semakin besar medan maka tegangan keluarannya akan semakin kecil.



Gambar 3.2 Gambaran Pembacaan *Hall Effect* Sensor[13].

Ketika terdapat medan magnet mempengaruhi sensor ini maka arus yang mengalir akan berbelok mendekati/menjauhi sisi yang dipengaruhi oleh medan magnet.

Hal ini menghasilkan beda potensial diantara kedua elektroda dari *hall effect* sensor, dimana beda potensial tersebut sebanding dengan kuat medan magnet yang diterima oleh *hall effect* sensor ini. Ketika arus yang melalui lapisan silikon tersebut mendekati sisi silikon sebelah kiri maka terjadi ketidak seimbangan tegangan output dan hal ini akan menghasilkan sebuah beda tegangan di outputnya seperti terlihat pada Gambar 3.2.

Semakin besar kekuatan medan magnet yang mempengaruhi sensor ini akan menyebabkan pembelokan arus di dalam lapisan silikon ini akan semakin besar dan semakin besar pula ketidakseimbangan tegangan antara kedua sisi lapisan silikon pada sensor. Semakin besar ketidakseimbangan tegangan ini akan menghasilkan beda tegangan yang semakin besar pada output sensor ini.

Arah pembelokan arah arus pada lapisan silikon ini dapat digunakan untuk mengetahui polaritas kutub medan *hall effect* sensor ini. Sensor *hall effect* ini dapat bekerja jika hanya salah satu sisi yang dipengaruhi oleh medan magnet. Jika kedua sisi silikon dipengaruhi oleh medan magnet maka arah arus tidak akan dipengaruhi oleh medan magnet tersebut. Oleh sebab itu jika kedua sisi silikon dipengaruhi oleh medan magnet yang mempengaruhi magnet maka tegangan outputnya tidak akan berubah[14].

Pada penelitian tugas akhir ini menggunakan *hall effect* sensor tipe A1302EUA-T seperti tampak pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Hall Effect* Sensor Tipe A1302EUA-T.

Perangkat ini memiliki tegangan output diam 50% dari tegangan suplai. Output sensitivitasnya sebesar 1,3 mV/G. Rangkaian *hall-effect* terintegrasi dalam masing-masing perangkat meliputi *Hall sensing element*, *linear amplifier*, *CMOS Class A output structure*. Menggabungkan *Hall sensing element* dan amplifier pada satu *chip*

meminimalkan banyak masalah biasanya terkait dengan tingkat sinyal tegangan analog rendah. Fitur-fitur ini yang membuat A1302EUA-T ideal untuk digunakan untuk sensor posisi.

### 3.2 Mikrokontroler

Sistem pengontrol dapat dikatakan sebagai pengganti sistem manual/mekanik. Kerja pengontrol umumnya mengacu pada variabel keluaran dari sebuah sistem yang dapat dipengaruhi dengan menyesuaikan beberapa variabel masukan. Pada dasarnya sebuah pengontrol akan melakukan serangkaian tindakan dalam sebuah *loop* kontrol, baik *loop* kontrol terbuka maupun tertutup. Pada *loop* kontrol tertutup, serangkaian tindakan tersebut adalah:

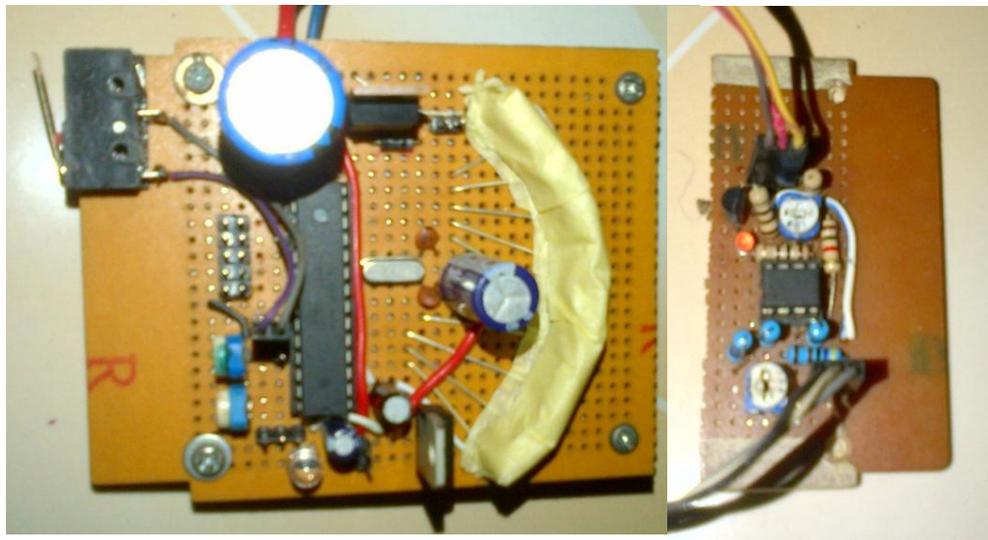
- Mengukur menggunakan sensor yang terhubung dengan sistem yang dikontrol.
- Mengolah data dari sensor dan mengambil keputusan pada elemen pengontrol.
- Mentransfer sinyal kontrol dari pengontrol ke dalam sinyal yang dapat dibaca perangkat keluaran pada sebuah sistem.
- Melakukan tindakan melalui perangkat keluaran pada sebuah sistem.

Pada tugas akhir ini, pengontrol berfungsi mengatur besarnya arus listrik yang dialirkan ke solenoida. Sebagai contoh sebuah sensor infra merah berfungsi sebagai elemen yang merekam pergerakan posisi benda, dimana sinyal yang dihasilkan akan di umpan balikkan kepada pengontrol untuk disesuaikan dengan nilai acuan.

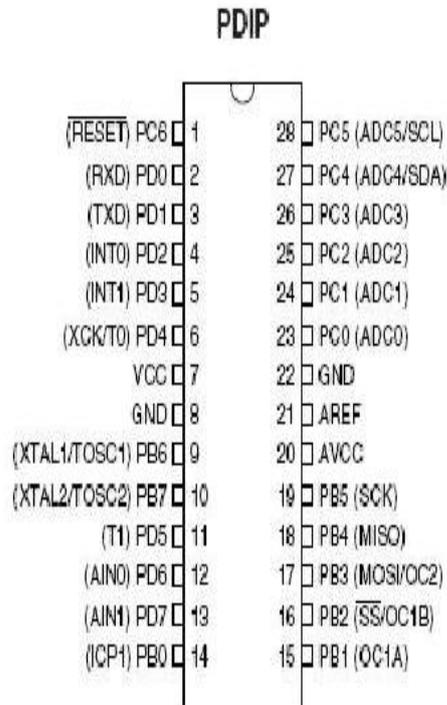
Sedangkan mikrokontroler adalah otak dari suatu sistem elektronika seperti halnya mikroprosesor sebagai otak komputer. Namun mikrokontroler memiliki nilai tambah karena didalamnya sudah terdapat memori dan sistem input/output dalam suatu kemasan IC. Mikrokontroler AVR (*Alf and Vegard's RISC processor*) standar memiliki arsitektur 8-bit, dimana semua instruksi dikemas dalam kode 16-bit dan sebagian besar instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*. Perbedaan dengan mikro yang pada umumnya digunakan seperti MCS 51 adalah pada AVR tidak perlu menggunakan oscillator eksternal karena di dalamnya sudah terdapat internal oscillator. Selain itu kelebihan dari AVR adalah memiliki Power-On Reset, yaitu tidak perlu adanya tombol reset dari luar karena cukup hanya dengan mematikan supply, maka secara otomatis

AVR akan melakukan reset. Pada beberapa jenis AVR terdapat beberapa fungsi khusus seperti ADC, EEPROM sekitar 128-512 bytes.

Dalam penelitian ini digunakan mikrokontroler jenis AVR ATmega8, perbedaannya dengan AVR ATmega8L hanyalah terletak pada besarnya tegangan yang diperlukan untuk bekerja. ATmega8L dapat bekerja pada tegangan antara 2,7-5,5 Volt. Sedangkan ATmega8 hanya dapat bekerja pada tegangan 4,5-5,5 Volt. Gambar rangkaian mikrokontroler ATmega8 tampak pada Gambar 3.4. Sedangkan untuk gambar skema dari rangkaian mikrokontroler ATmega8 akan dilampirkan.



Gambar 3.4 Rangkaian Mikrokontroler ATmega8



Gambar 3.5 Pin Configuration ATmega8

Gambar 3.5 merupakan gambar *pin configuration* ATmega8. ATmega8 memiliki 28 pin yang masing-masing pin-nya memiliki fungsi yang berbeda-beda baik sebagai port ataupun sebagai fungsi yang lain. Berikut akan dijelaskan tentang kegunaan dari masing-masing kaki pada ATmega8.

- **VCC**  
Merupakan *supply* tegangan untuk digital.
- **GND**  
Merupakan *ground* untuk semua komponen yang membutuhkan *grounding*.
- **Port B**  
Didalam *port B* terdapat XTAL1, XTAL2, TOSC1, TOSC2. Jumlah *Port B* adalah 8 buah pin mulai dari pin B.0 sampai dengan pin B.7. tiap pin dapat digunakan sebagai *input* dan juga *output*. *Port B* merupakan sebuah 8-bit *bi-directional I/O port* dengan internal *pull-up* resistor diaktifkan. Jika ingin menggunakan tambahan kristal, maka cukup menghubungkan kaki dari kristal ke kaki pada pin *port B*. Namun jika tidak digunakan, maka cukup dibiarkan

saja. Penggunaan kegunaan dari masing-masing kaki ditentukan dari *clock fuse setting*-nya.

- *Port C*

*Port C* merupakan sebuah 7-bit *bi-directional I/O port* yang masing-masing pin terdapat *pull-up* resistor. Jumlah pin-nya hanya 7 buah mulai dari pin C.0 sampai dengan pin C.6. sebagai *output*, *port C* memiliki karakteristik yang sama dalam hal kemampuan menyerap arus (*sink*) ataupun mengeluarkan arus (*source*).

- Reset/PC6

Jika RSTDISBL *Fuse* diprogram, maka PC6 akan berfungsi sebagai pin I/O. Diperhatikan juga bahwa pin ini memiliki karakteristik yang berbeda dengan pin-pin yang terdapat pada port C. Namun jika RSTDISBL *Fuse* tidak diprogram, maka pin ini akan berfungsi sebagai input reset. Jika level tegangan yang masuk ke pin ini rendah dan pulsa yang ada lebih pendek dari pulsa minimum, maka akan menghasilkan suatu kondisi reset meskipun *clock*-nya tidak bekerja.

- *Port D*

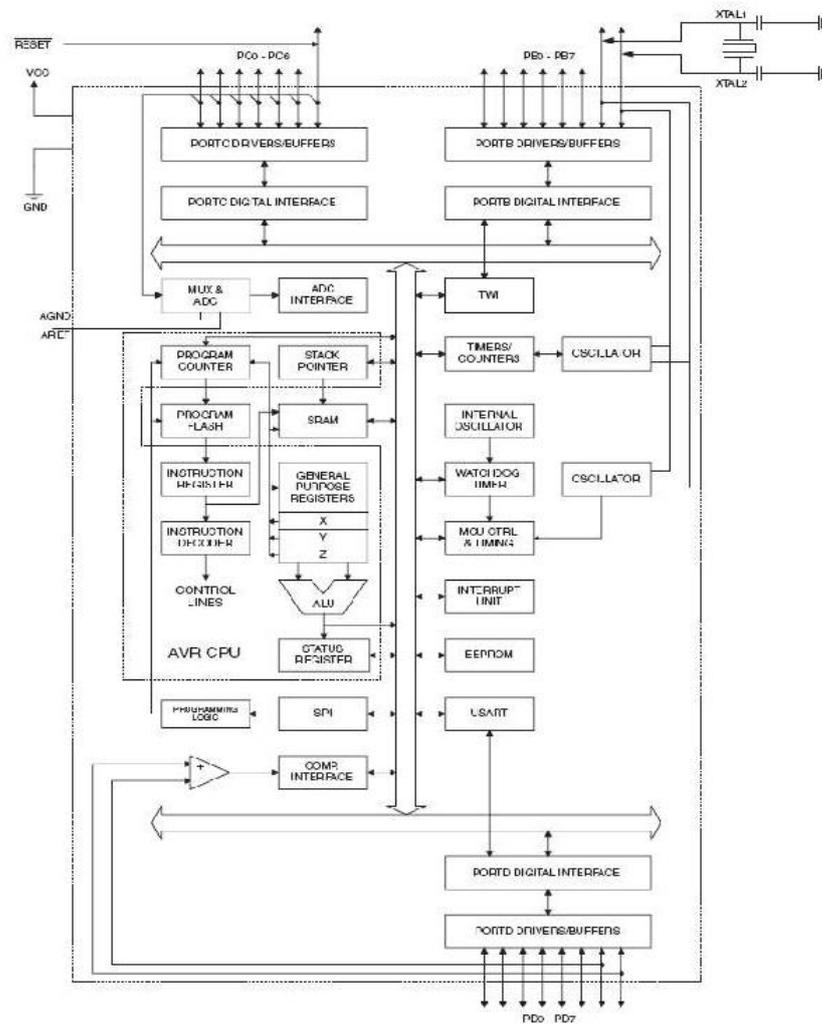
*Port D* merupakan 8-bit *bi-directional I/O* dengan internal *pull-up* resistor. Fungsi dari *port* ini sama dengan *port*-*port* yang lain, hanya saja pada *port* ini tidak terdapat kegunaan-kegunaan yang lain. Pada *port* ini hanya berfungsi sebagai masukan dan keluaran saja atau biasa disebut dengan I/O.

- AVCC

Pada pin ini memiliki fungsi sebagai *supply* tegangan untuk ADC. Pin ini harus dihubungkan secara terpisah dengan VCC karena pin ini digunakan untuk analog saja. Bahkan jika ADC pada AVR tidak digunakan, tetap saja disarankan untuk menghubungkan secara terpisah dengan VCC. Cara menghubungkan AVCC adalah melwati *low-pass filter* setelah itu dihubungkan dengan VCC.

- AREF

Merupakan pin referensi analog jika menggunakan ADC.

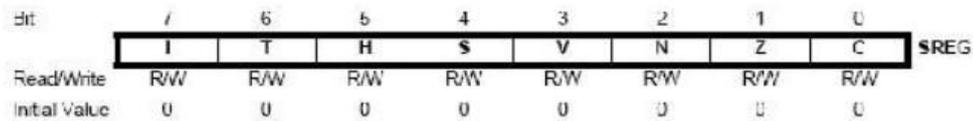


Gambar 3.6 Blok Diagram ATmega8.

Sedangkan Gambar 3.6 merupakan blok diagram ATmega8. Pada AVR status Register mengandung beberapa informasi mengenai hasil dari kebanyakan hasil eksekusi instruksi aritmatik. Informasi ini dapat digunakan untuk altering arus program sebagai kegunaan untuk meningkatkan performa pengoperasian. Perlu diketahui bahwa register ini di-update setelah semua operasi ALU (*Arithmetic Logic Unit*). Hal tersebut seperti yang telah tertulis dalam data sheet khususnya pada bagian *instruction set reference*.

Dalam hal ini beberapa kasus dapat membuang kebutuhan penggunaan instruksi perbandingan yang telah didedikasikan serta dapat menghasilkan peningkatan dalam hal kecepatan dan kode yang lebih sederhana dan singkat. Register ini tidak secara otomatis

tersimpan ketika memasuki sebuah rutin interupsi dan juga ketika menjalankan sebuah perintah setelah kembali dari interupsi. Namun hal tersebut harus dilakukan melalui *software*. Gambar 3.7 berikut adalah gambar *status register* ATmega8.



Gambar 3.7 *Status Register* ATmega8.

Berikut ini penjelasan dari masing-masing bit pada *status register* ATmega8[15].

- Bit 7(I)  
Merupakan bit *global interrupt enable*. Bit ini harus di-*set* supaya semua perintah interupsi dapat dijelaskan. Fungsi dari interupsi individual akan dijelaskan pada bagian yang lain. Jika bit ini di-*reset*, maka semua perintah interupsi baik yang individual maupun secara umum akan diabaikan. Bit ini akan dibersihkan atau *cleared* oleh *hardware* setelah sebuah interupsi dijalankan dan akan si-*set* kembali oleh perintah RETI. Bit ini juga dapat di-*set* dan di-*reset* melalui aplikasi dengan instruksi SEI dan CLI.
- Bit 6 (T)  
Merupakan bit *copy storage*. Instruksi bit *copy instructions* BLD (*Bit Load*) dan BST (*Bit Store*) menggunakan bit ini sebagai asal atau tujuan untuk bit yang telah dioperasikan. Sebuah bit dari sebuah register dalam *register file* dapat disalin ke dalam bit ini dengan menggunakan instruksi BST dan sebuah bit di dalam bit ini dapat disalin ke dalam sebuah bit di dalam register pada *register file* dengan menggunakan perintah BLD.
- Bit 5 (H)  
Merupakan bit *half carry flag*. Bit ini menandakan sebuah *half carry* dalam beberapa operasi aritmatika. Bit ini berfungsi dalam aritmatika BCD.
- Bit 4 (S)  
Merupakan *sign bit*. Bit ini selalu merupakan sebuah eksklusif diantara *negative flag* (N) dan *two's complement overflow flag* (V).

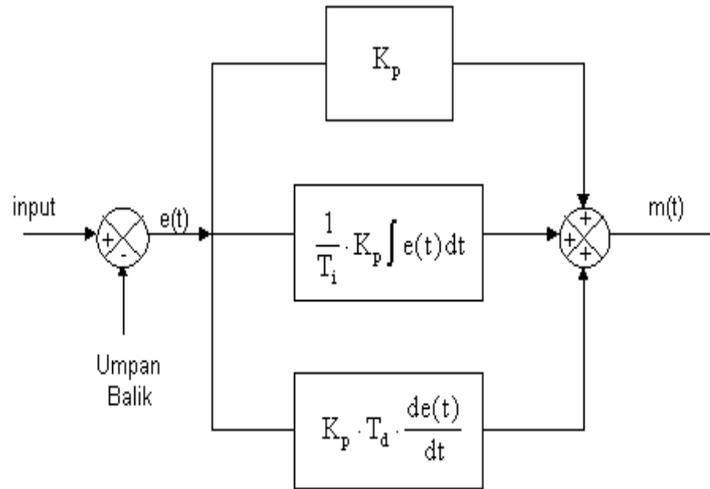
- Bit 3 (V)  
Merupakan bit *two's complement overflow flag*. Bit ini menyediakan fungsi aritmatika dua komplemen.
- Bit 2 (N)  
Merupakan bit *negative flag*. Bit ini mengindikasikan sebuah hasil negatif didalam sebuah fungsi logika aritmatika.
- Bit 1 (Z)  
Merupakan bit *zero flag*. Bit ini mengindikasikan sebuah hasil nol "0" dalam sebuah fungsi aritmatika atau logika.
- Bit 0 (C)  
Merupakan bit *carry flag*. Bit ini mengindikasikan seluruh *carry* atau sisa dalam sebuah fungsi aritmatika atau logika.

### 3.3 Kontroler PID (*Proportional - Integral - Derivative*)

Sistem kendali PID merupakan sistem kendali dengan umpan balik yang digunakan secara luas di dalam sistem kendali industri dan paling banyak digunakan. PID banyak diaplikasikan dalam dunia industri karena kesederhanaan, performa pengendalian yang baik, serta kehandalan dan kestabilan yang baik. Kontroler PID mengkalkulasi nilai kesalahan atau *error value*, yaitu selisih antara variabel proses yang terukur dengan *set point* atau input masukan yang diinginkan. Kontroler PID bertujuan untuk meminimalisir kesalahan (*error*) dengan cara mengubah keluaran agar sesuai dengan input kendali.

Dalam dunia kendali, kontroler PID dalam kapasitas tertentu dapat dikatakan sebagai teknik kendali terbaik. Meskipun begitu, untuk mendapatkan performa pengendalian yang maksimal, parameter-parameter PID yang digunakan dalam kalkulasi harus dilakukan penalaan (*tuning*) berdasarkan karakteristik alami dari sistem yang dikendalikan. Oleh karena itu, setiap sistem memiliki nilai parameter yang berbeda-beda. Metoda penalaan parameter kendali PID berdasarkan langkahnya dibedakan menjadi dua. Pertama adalah penalaan dengan pemodelan matematika kemudian diperoleh fungsi transfernya. Metode yang kedua adalah dengan metode

eksperimen yaitu memberikan input sinyal step pada sistem lalu diukur respon sistemnya.



Gambar 3.8 Blok Diagram Kontroler PID

Blok diagram kontrol PID ditunjukkan pada Gambar 3.8. Algoritma kendali PID melibatkan tiga parameter atau tiga suku kendali yang terpisah yaitu proporsional, integral, dan derivatif yang dinotasikan sebagai P, I, dan D. Definisi dari masing-masing komponen adalah sebagai berikut:

- Nilai konstanta proporsional ( $K_p$ ) didefinisikan sebagai respon kontroler yang sebanding terhadap selisih masukan *set point* dengan hasil pengukuran sensor.
- Nilai konstanta integral ( $K_i$ ) didefinisikan sebagai nilai keluaran kontroler yang didasarkan pada penjumlahan nilai *error* dari waktu ke waktu.
- Nilai konstanta derivative ( $K_d$ ) atau turunan, merupakan suku keluaran kontroler laju perubahan kesalahan atau *error rate change*.

Penjumlahan ketiga suku kontroler dengan memberikan konstanta pembebanan yang digunakan untuk mengendalikan nilai keluaran kontroler, misalnya mengontrol katup, tegangan, elemen pemanas, kestabilan sistem, robot dan lain-lain. Sehingga bisa disimpulkan secara umum, nilai keluaran sangat ditentukan oleh ketiga suku diatas, yaitu P bergantung pada nilai *error* pada waktu t, I yang merupakan akumulasi dari *error* sebelumnya, dan D adalah mengkalkulasi *error* pada waktu t+1 (*error prediction*). Dengan mencari nilai dari ketiga konstanta PID, kontroler mampu memberikan performa yang baik sesuai dengan kebutuhan dari *plant* atau proses. Respon dari

kontroler dapat dijelaskan dari suku yang merepresentasikan tingkat respon kontroler terhadap *error*, nilai *overshoot* respon sistem dari nilai *set point*, dan juga derajat osilasi dari sistem[16].

Dalam pengaplikasian kontroler PID, kebutuhan sistem berbeda-beda keterkaitannya dengan penggunaan mode kendalinya. Beberapa sistem bisa dikendalikan cukup dengan kendali proporsional saja, dan sistem lain mungkin membutuhkan kendali derivatif atau bahkan ketiganya. Elemen-elemen kontroler P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besa

### **3.4 Pemrograman Mikrokontroler**

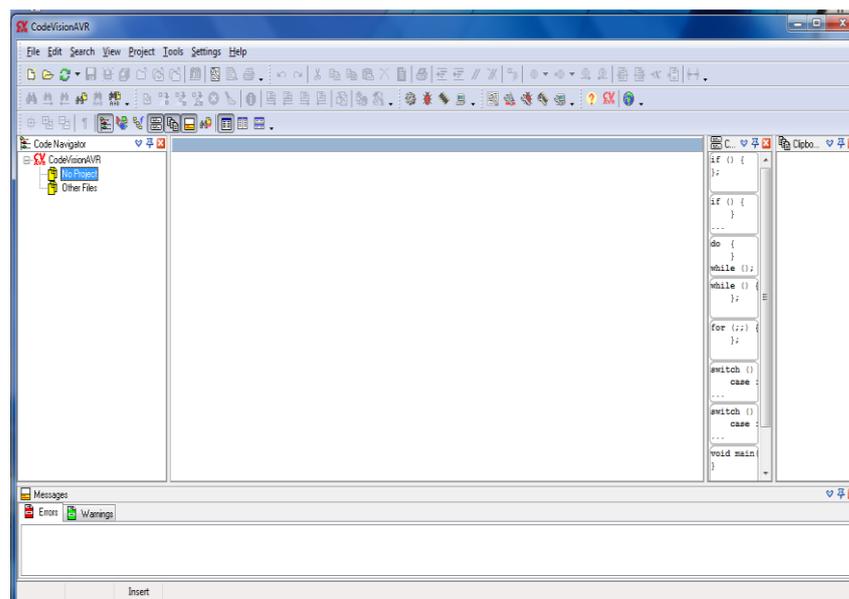
Dewasa ini penggunaan bahasa pemrograman aras tinggi (seperti C, *Basic*, *Pascal*, *Forth* dan sebagainya) semakin populer dan banyak digunakan untuk memprogram sistem mikrokontroler. Berdasarkan sifatnya yang sangat fleksibel dalam pengaksesan perangkat keras, bahasa C merupakan bahasa pemrograman yang paling cocok dibandingkan bahasa-bahasa pemrograman aras tinggi lainnya. Bahasa C merupakan bahasa pemrograman yang sangat fleksibel dan tidak terlalu terikat dengan berbagai aturan yang kaku. Satu-satunya hal yang membatasi penggunaan bahasa C dalam sebuah aplikasi adalah semata-mata kemampuan imajinasi programmer-nya saja.

Dalam kaitannya dengan pemrograman mikrokontroler, tak pelak lagi bahasa C mulai menggeser penggunaan bahasa aras rendah *assembler*. Dibandingkan dengan bahasa *assembler*, penggunaan bahasa C dalam pemrograman memiliki beberapa kelebihan mempercepat waktu pengembangan, bersifat modular dan terstruktur. Penggunaan bahasa C akan sangat efisien, terutama untuk program mikrokontroler yang berukuran relatif besar. Adapun kelemahannya adalah kode program hasil kompilasi akan relatif lebih besar (dan sebagai konsekuensinya hal ini terkadang akan mengurangi kecepatan eksekusi).

Khusus pada mikrokontroler AVR, untuk mereduksi konsekuensi negatif di atas, perusahaan Atmel merancang sedemikian sehingga arsitektur AVR ini efisien dalam *decoding* serta mengeksekusi instruksi-instruksi yang umum dibangkitkan oleh kompilator C (pada kenyataannya, pengembangan arsitektur AVR ini tidak dilakukan

sendiri oleh perusahaan Atmel tetapi ada kerja sama dengan salah satu vendor pemasok kompilator C untuk mikrokontroler tersebut, yaitu IAR C). Berdasarkan kelebihan-kelebihan yang dimilikinya, saat ini CodeVisionAVR, produk Perusahaan Pavel Haiduc merupakan kompilator C yang relatif banyak digunakan dibanding kompilator-kompilator C lainnya.

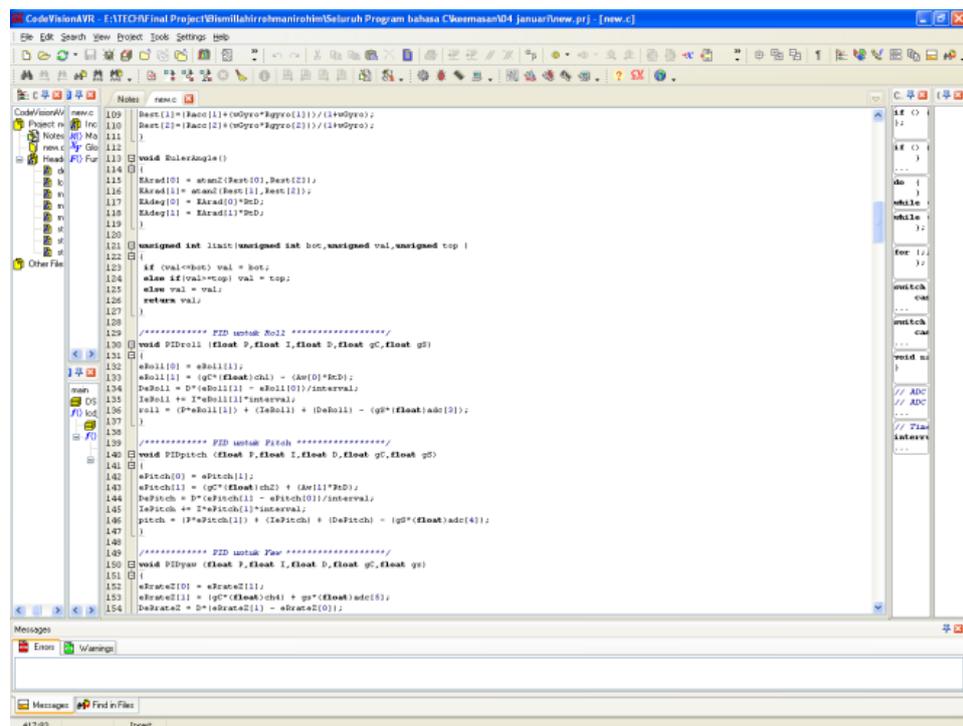
Pada tugas akhir ini perangkat lunak yang digunakan untuk membuat bahasa pemrograman untuk mikrokontroler ATmega8 adalah CodeVisionAVR. Pada dasarnya CodeVisionAVR merupakan perangkat lunak pemrograman mikrokontroler keluarga AVR berbasis bahasa C. Tampilan utama dari CodeVisionAVR seperti pada Gambar 3.9. Ada tiga komponen penting yang telah diintegrasikan dalam perangkat lunak ini, kompilator C, IDE (*Integrated Development Environment*) dan program generator.



Gambar 3.9 Tampilan Utama CodeVision AVR

Berdasarkan spesifikasi yang dikeluarkan oleh perusahaan pengembangnya, kompilator C yang digunakan hampir mengimplementasikan semua komponen standar yang ada pada bahasa C standar ANSI (seperti struktur program, jenis tipe data, jenis operator, dan *library* fungsi standar berikut penamaannya). Meskipun demikian, dibandingkan bahasa C untuk aplikasi komputer, kompilator C untuk mikrokontroler ini memiliki sedikit perbedaan yang disesuaikan dengan arsitektur AVR tempat program C tersebut ditanamkan (*embedded*).

Khusus untuk *library* fungsi, disamping *library* standar (seperti fungsi-fungsi matematik, manipulasi *string*, pengaksesan memori dan sebagainya), CodeVisionAVR juga menyediakan fungsi-fungsi tambahan yang sangat bermanfaat dalam pemrograman antarmuka AVR dengan perangkat. Beberapa fungsi *library* yang penting diantaranya adalah fungsi-fungsi untuk pengaksesan LCD, komunikasi I2C, IC RTC (*Real time Clock*), sensor suhu LM75, SPI (*Serial Peripheral Interface*) dan lain sebagainya.

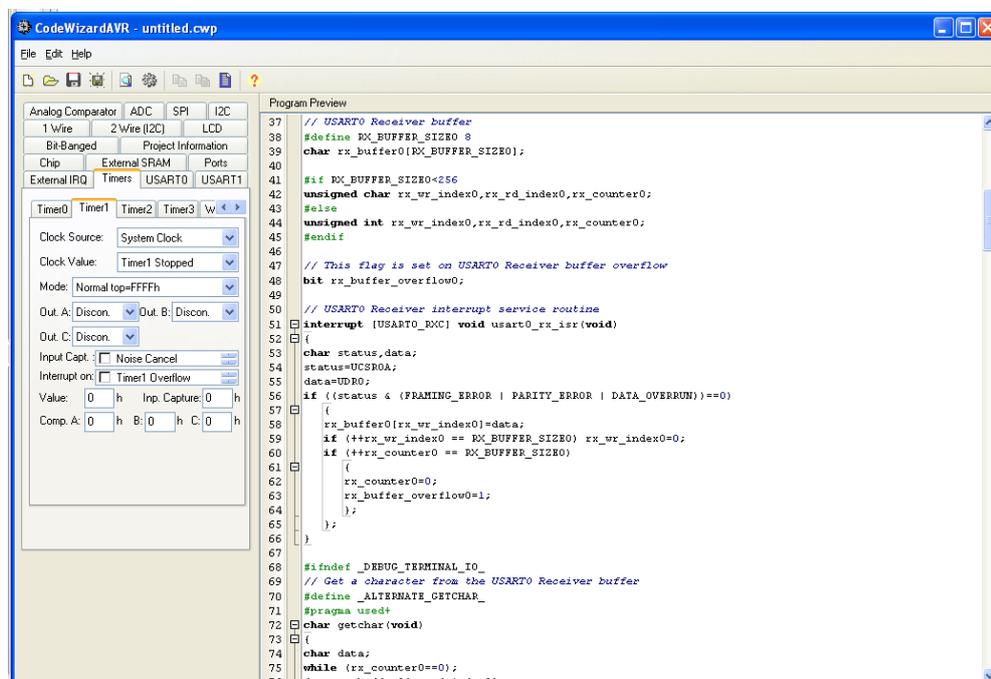


Gambar 3.10 IDE CodeVisionAVR

Agar memudahkan pengembangan program aplikasi, CodeVisionAVR juga dilengkapi IDE yang sangat *user friendly* (Gambar 3.10). Selain menu-menu pilihan yang umum dijumpai pada setiap perangkat lunak berbasis Windows, CodeVisionAVR ini telah mengintegrasikan perangkat lunak *downloader (in system programmer)* yang dapat digunakan untuk mentransfer kode mesin hasil kompilasi ke dalam sistem memori mikrokontroler AVR yang sedang diprogram.

Selain itu, CodeVisionAVR juga menyediakan sebuah *tool* yang dinamakan dengan *Code Generator* atau *CodeWizardAVR* (pada Gambar 3.11). Secara praktis, *tool* ini sangat bermanfaat membentuk sebuah kerangka program (*template*), dan juga

memberi kemudahan bagi programmer dalam inialisasi register-register yang terdapat pada mikrokontroler AVR yang sedang diprogram. Dinamakan *Code Generator*, karena perangkat lunak CodeVision ini akan membangkitkan kode-kode program secara otomatis setelah fase inialisasi pada jendela CodeWizardAVR selesai dilakukan. Gambar 3.11 memperlihatkan beberapa penggal baris kode program yang dibangkitkan secara otomatis oleh *CodeWizardAVR*. Secara teknis, penggunaan *tool* ini pada dasarnya hampir sama dengan aplikasi *wizard* pada bahasa-bahasa pemrograman Visual untuk komputer (seperti Visual C, Borland Delphi dan sebagainya).



Gambar 3.11 *Code Generator* yang dapat digunakan untuk menginisialisasi register-register pada mikrokontroler AVR.

Disamping versi yang komersil, perusahaan Pavel Haiduc juga mengeluarkan CodeVisionAVR versi demo yang dapat didownload dari internet secara gratis (<http://www.hpinfotech.ro>). Dalam versi ini, memori *flash* yang dapat diprogram dibatasi maksimal 2kb, selain itu tidak semua fungsi *library* yang tersedia dapat dipanggil secara bebas.

Fitur-fitur yang dimiliki CodeVisionAVR terbilang lengkap. Program ini menyediakan *interface hyperterminal* didalamnya. *Hyperterminal* ini dapat digunakan

untuk berkomunikasi antara mikrokontroler dengan komputer. Mampu membangkitkan kode program secara otomatis dengan menggunakan fasilitas CodeWizard AVR. Pada proses pengisian program ke dalam mikrokontroler terdapat *tool* tersendiri. Untuk proses *debugger* program ini akan menyediakan *link* pada AVR studio 4 yang memang telah memiliki fitur tersebut. Atau jika ingin, sesudah program C di *compile* oleh CodeVisionAVR maka akan dihasilkan file \*.cof yang dapat disimulasikan langsung di AVR studio 4[17].

#### **BAB IV**

#### **PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT PERAGA**

Pada bab ini akan diuraikan mengenai pengujian terhadap kinerja solenoida dan pengujian terhadap sistem *magnetic levitation* secara keseluruhan. Kinerja solenoida diuji dengan mengukur besar medan magnet yang dihasilkan dengan memvariasikan