BAB II
DASAR TEORI

2.1 Pengertian Korosi

Korosi merupakan proses atau reaksi elektrokimia yang bersifat alamiah dan berlangsung dengan sendirinya pada logam yang berada dalam suatu lingkungan korosif baik itu berbentuk gas maupun cairan / elektrolit. Oleh karena itu korosi tidak dapat dicegah atau dihentikan sama sekali, tetapi proses korosi dapat dikendalikan, sehingga akan memperlambat proses perusakannya [2].

Korosi adalah kerusakan atau degradasi logam akibat adanya reaksi oksidasi-reduksi antara suatu logam dengan berbagai zat di lingkungannya dan menghasilkan senyawa-senyawa / residu yang tidak dikehendaki yaitu karat, sehingga dalam bahasa sehari-hari proses korosi biasa disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling umum adalah perkaratan pada logam besi atau baja [4].

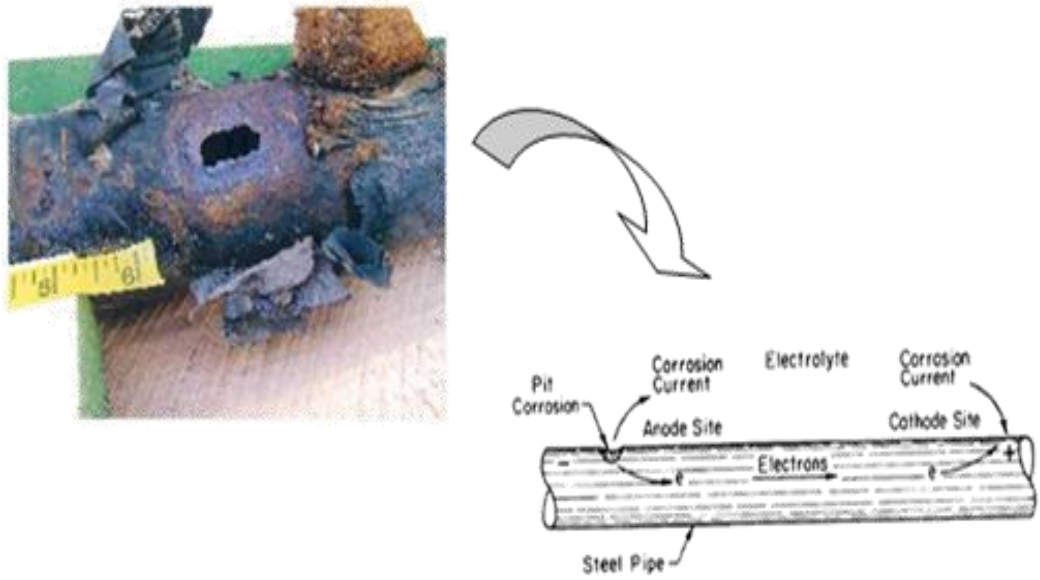
Korosi dapat juga diartikan sebagai serangan yang merusak logam karena logam bereaksi secara kimia dengan lingkungannya. Ada definisi lain mengatakan bahwa korosi adalah kebalikan proses ekstraksi logam dari bijih materialnya. Contohnya, bijih material logam besi di alam bebas ada dalam bentuk senyawa besi oksida (FeO) atau besi sulfida (FeSO), setelah diekstraksi dan diolah, akan dihasilkan besi yang digunakan untuk pembuatan baja atau besi paduan. Selama pemakaian, besi atau baja tersebut akan bereaksi dengan lingkungan yang menyebabkan korosi dan kembali menjadi senyawa besi oksida [4].

2.1.1 Proses Korosi

Suatu proses korosi pada logam dapat terjadi karena terpenuhinya empat syarat yaitu, ada yang bertindak sebagai anoda, sebagai katoda, adanya elektrolit, dan adanya jalur listrik (e*lectrical circuit*) yang menghubungkan antara anoda dan katoda [1], ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.1., dengan kehadiran empat komponen tersebut maka suatu bentuk proses elektrokimia yang disebut dengan

sel korosi (*corrosion cell*) akan terjadi pada logam, dan menyebabkan logam menjadi terdegradasi / terkorosi.

Proses korosi juga terjadi dikarenakan adanya kecenderungan suatu logam untuk berubah menjadi keadaan yang lebih stabil melalui reaksi oksidasi, dimana kecenderungan oksidasi suatu logam bervariasi tergantung pada potensial reduksinya.



Gambar 2.1. Proses korosi yang terjadi pada pipa [1]

Degradasi logam terjadi pada wilayah permukaan yang bertindak sebagai anoda, dimana elektronnya tereksitasi dan mengalir melalui elektrolit sampai ke katoda. Pada anoda akan terbentuk residu hasil proses korosi berupa oksida atau karbonat yang disebut dengan karat. Rumus kimia karat besi adalah $Fe_2O_3.nH_2O$, yaitu suatu zat padat yang berwarna coklat kemerahan [4].

Bentuk reaksi umum pada anoda adalah reaksi peluruhan logam menjadi ion, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.1 di bawah ini.

$$M \rightarrow M^{n+} + e^{n-} \tag{2.1}$$

Keterangan: M = Logam yang terlibat

n = Valensi logam terkorosi

e = Elektron

Contoh pada besi (Fe) yang mengalami reaksi oksidasi / peluruhan, reaksi yang terjadi adalah:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2^{e-} \quad (2.2)$$

Elektron yang dibebaskan di anoda kemudian mengalir ke bagian lain dari besi yang bertindak sebagai katoda, di mana oksigen akan tereduksi dengan reaksi pada persamaan 2.3 berikut:

$$O_2 \rightarrow 2H_2O^+ + 4^{e-} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.2 dapat juga disebut sebagai persamaan untuk reaksi anodik, sedangkan persamaan 2.3 disebut dengan persamaan katodik, sehingga hasil keseluruhan persamaan reaksi oksidasi-reduksinya adalah sebagai berikut:

$$2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^-. \quad (2.4)$$

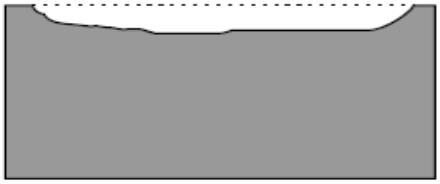
Setelah proses peluruhan, ion besi (Fe^{2+}) akan secara merata teroksidasi menjadi Fe^{3+} dan akan bergabung dengan ion hidroksida (OH^-) pada katoda membentuk produk yang disebut karat (FeOOH atau $Fe_2O_3.nH_2O$). yang perlu diperhatikan adalah bahwa proses peluruhan logam yang terjadi pada anoda berlangsung secara elektrokimia, sedangkan produk karat dihasilkan dari reaksi kimia kedua [4].

2.1.2 Bentuk-Bentuk Korosi

Hampir semua masalah yang berhubungan dengan korosi dapat dikategorikan ke dalam delapan bentuk serangan korosi pada logam, yaitu korosi merata, korosi galvanik, korosi sumuran, korosi celah, korosi retak tegang, korosi intergranular, *selective leaching*, dan korosi erosi [2].

Bentuk-bentuk serangan korosi yang terjadi pada logam:

1. Korosi Merata (*Uniform Corrosion*), adalah korosi yang terjadi secara serentak di seluruh permukaan logam, oleh karena itu pada logam yang mengalami korosi merata akan terjadi pengurangan dimensi yang relatif besar per satuan waktu, bentuk serangan korosi merata dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah.



Gambar 2.2. Bentuk serangan korosi merata

2. Korosi Galvanik (*Galvanic Corrosion*), adalah korosi yang terjadi apabila dua logam yang tidak sama dihubungkan dan berada di lingkungan korosif. Salah satu dari logam tersebut akan mengalami korosi, sedangkan logam lainnya akan terlindung dari serangan korosi. Logam yang mengalami korosi adalah logam yang memiliki potensial yang lebih rendah.



Gambar 2.3. Bentuk serangan korosi galvanik

3. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*), adalah korosi lokal yang terjadi akibat pecahnya lapisan pasif. Bentuk korosi ini sangat berbahaya karena lokasi terjadinya sangat kecil tetapi dalam, ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.4.



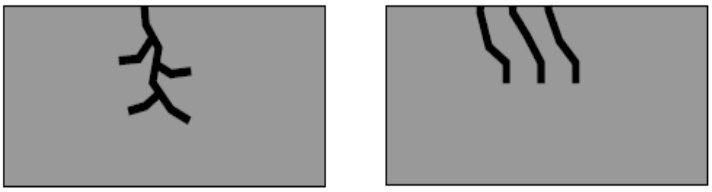
Gambar 2.4. Bentuk serangan korosi sumuran

4. Korosi Celah (*Concentration-Cell (Crevice) Corrosion*), adalah korosi lokal yang terjadi pada celah diantara dua komponen.



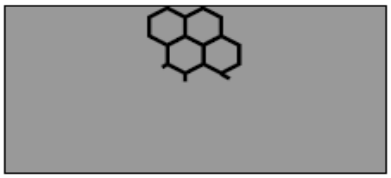
Gambar 2.5. Bentuk serangan korosi celah

5. Korosi Retak Tegang (*Stress Corrosion Cracking*), adalah bentuk korosi dimana material mengalami keretakan akibat pengaruh lingkungannya.



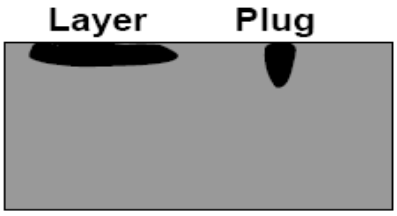
Gambar 2.6. Bentuk serangan korosi retak tegang

6. Korosi Intergranular (*Intergranular Corrosion*), adalah bentuk korosi yang terjadi pada paduan logam akibat terjadinya reaksi antar unsur logam tersebut di batas butirnya. Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.7.



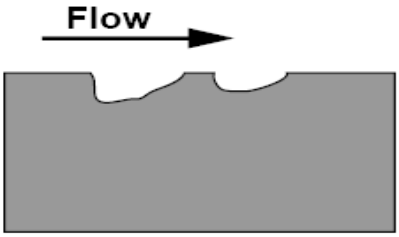
Gambar 2.7. Bentuk serangan korosi intergranular

7. *Selective Leaching*, adalah korosi yang terjadi pada paduan logam karena pelarutan salah satu unsur paduan yang lebih aktif, seperti yang biasa terjadi pada paduan tembaga-seng.



Gambar 2.8. Bentuk serangan korosi selective leaching

8. Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*), adalah korosi yang terjadi karena adanya kombinasi antara fluida yang korosif dan kecepatan aliran yang tinggi, ilustrasinya diperlihatkan pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9. Bentuk serangan korosi erosi

2.1.3 Metode Pencegahan Korosi

Ada banyak metode yang telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan korosi. Dimana pada masing-masing metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya, sehingga suatu metode yang efektif akan diterapkan dengan melihat kondisi lingkungannya. Akan tetapi perlindungan dengan metode apapun itu tidak berarti selalu aman. Kesalahan-kesalahan fatal dapat terjadi jika dalam operasinya tidak dilaksanakan sesuai dengan prosedur yang ditetapkan.

Berikut adalah metode-metode yang banyak digunakan sebagai langkah untuk pencegahan korosi [2]:

1. Seleksi Bahan Material (*Material Selection*)

   Dari sudut pandang teknis, jawaban paling tepat untuk mengatasi korosi adalah dengan menggunakan material yang lebih resistan terhadap serangan korosi. Akan tetapi permasalahan akan muncul ketika pemilihan material / bahan yang kebal terhadap korosi tetapi tidak dapat digunakan untuk menjalankan proses utama. Sehingga pada akhirnya pemilihan material akan mempertimbangkan antara faktor ekonomi dan kompetensi secara teknis.

2. Pelapisan (*Protective Coatings*)

   Metode ini digunakan untuk menyediakan perlindungan jangka panjang pada rentang waktu tertentu. Metode ini tidak menambah kekuatan struktur tapi dapat mempertahankan kekuatan dan integritas struktur. Inti dari metode ini adalah mengisolasi struktur aktif dari lingkungan yang bersifat korosif.

3. *Corrosion Inhibitors*

   Inhibitor adalah bahan kimia yang bereaksi dengan permukaan logam, atau lingkungan tempat logam berada, membawa permukaan logam ke level tertentu untuk perlindungan korosi. Inhibitor biasanya bekerja dengan mengadsorpsi dirinya ke permukaan logam dan membentuk lapisan tipis untuk melindungi logam dari korosi.

4. Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*)

   Proteksi katodik adalah suatu metode yang bersifat elektrik yang digunakan untuk pencegahan korosi pada struktur logam yang berada pada suatu lingkungan korosif berupa elektrolit seperti tanah atau air. Terdapat dua metode dasar untuk pengendalian korosi dengan proteksi katodik. Salah satunya adalah yang menggunakan arus yang dihasilkan dari

penggabungan dua logam yang berbeda secara elektrokimia, metode ini dikenal sebagai metode Anoda Tumbal (*Sacrificial* atau *Galvanic Cathodic Protection Systems*). Metode lainnya dari proteksi katodik adalah yang melibatkan penggunaan sumber arus searah atau DC (*Direct Current*) dari luar sistem yang dikenal sebagai metode Arus Paksa (*Impressed Current Cathodic Protection Systems*).

5. Proteksi Anodik (*Anodic Protection*)

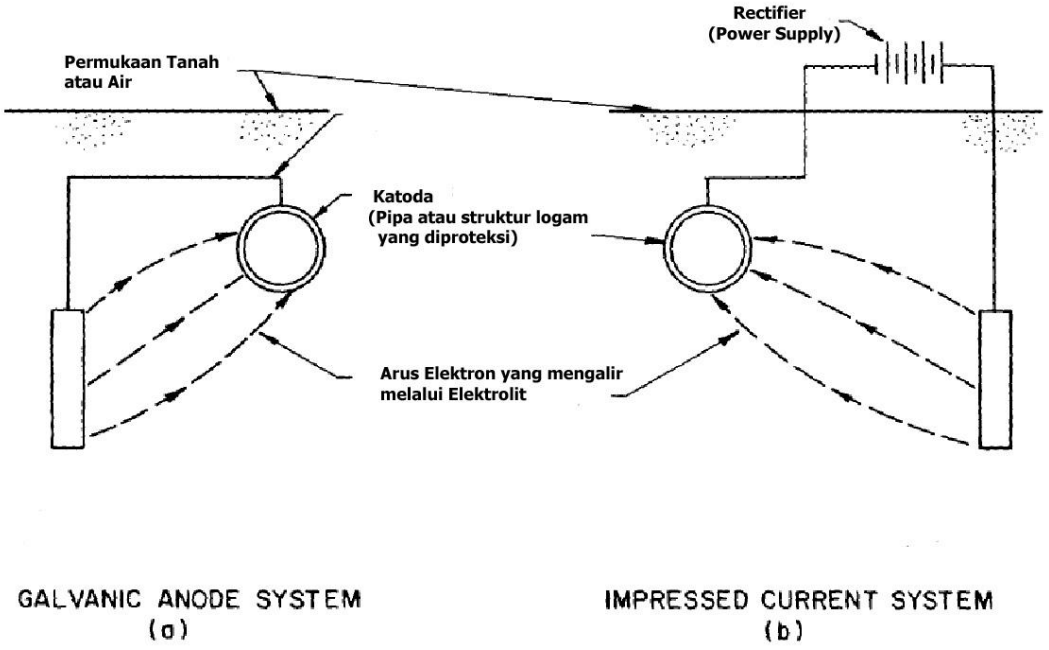
   Metode ini dikembangkan menggunakan prinsip kinetika dari elektroda. Secara sederhana, proteksi anodik bekerja berdasarkan susunan lapisan pelindung pada logam yang dihasilkan dari arus anodik yang dialirkan dari luar. Proteksi anodik mempunyai kelebihan yang unik, contohnya adalah arus yang dialirkan biasanya sebanding dengan laju korosi dari sistem yang dilindungi. Sehingga proteksi anodik tidak hanya melindungi tapi juga memberikan nilai langsung laju korosi untuk monitoring sistem. Proteksi anodik ini biasa digunakan untuk melindungi peralatan yang digunakan untuk menyimpan dan menanggani asam sulfat (H_2SO_4).

2.2 Proteksi Katodik Arus Paksa

Proteksi katodik arus paksa atau dikenal dengan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) merupakan salah satu metode proteksi katodik (*Cathodic Protection*) dimana kebutuhan arus elektronnya disuplai dari luar sistem [4].

Proteksi katodik biasa diaplikasikan ke struktur yang telah dilapisi dengan pelapisan (*coating*) yang menyediakan bentuk primer dalam perlindungan korosi. Sedangkan untuk sistem yang tidak terlapisi kebutuhan arus proteksi katodik biasanya selalu berlebih. Metode ini biasa digunakan untuk perlindungan pipa-pipa dan tangki yang dikubur, struktur di dalam perairan laut dan besi-besi penunjang [2]. Contoh implementasi dua jenis sistem proteksi katodik dapat dilihat pada gambar 2.10.

Pada tipe anoda tumbal / korban atau dikenal juga dengan anoda galvanik, proteksi logam dilakukan dengan memanfaatkan perbedaan potensial reduksi untuk logam yang berbeda. Jika tanpa proteksi katodik maka salah satu area pada struktur logam akan lebih negatif dibanding area yang lainnya, sehingga akan menyebabkan terjadinya korosi [4]. Jadi pada metode ini intinya adalah menghubungkan logam yang akan dilindungi ke logam yang lebih reaktif, sehingga proses korosi akan teralihkan ke logam tersebut.



Gambar 2.10. Tipe pencegahan korosi dengan metode proteksi katodik [1]

Untuk struktur yang lebih besar, sistem anoda tumbal tidak dapat menyediakan kebutuhan arus yang cukup untuk perlindungan secara menyeluruh, dan juga tidak ekonomis. Sistem proteksi katodik arus paksa dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut.

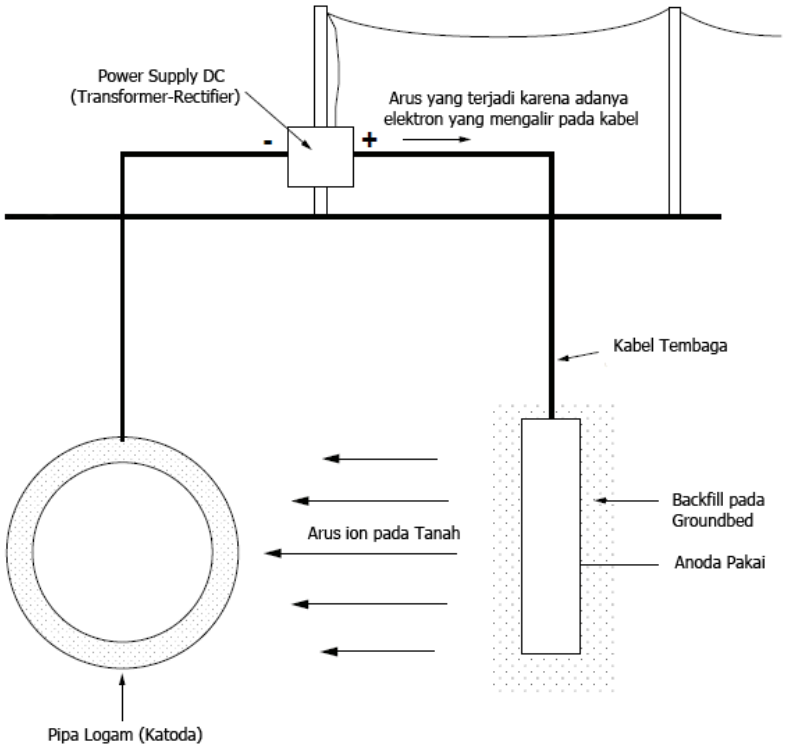
2.2.1 Prinsip Dasar Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa

Pada prinsipnya sistem proteksi katodik arus paksa sama dengan anoda tumbal, hanya saja kebutuhan arus elektronnya disuplai dari luar sistem yaitu dari anoda yang dihubungkan ke sumber arus DC. Sumber arus DC dapat dihasilkan

dari berbagai sumber seperti baterai, solar sel, dan generator. Idenya adalah dengan membanjiri struktur logam yang akan dilindungi dengan sumber elektron dari luar sistem sehingga membuat struktur logam tersebut menjadi bersifat katodik dan membuat struktur logam imun terhadap korosi.

Komponen dasar yang membentuk sistem proteksi katodik arus paksa terdiri dari katoda yaitu logam yang akan dilindungi, sumber arus DC (*Rectifier*), anoda *inert* (*Ground Bed* atau *Anode Bed*), dan kawat penghubung (*Metallic Circuit*) antara anoda dan katoda [2], seperti yang terlihat pada gambar 2.11.

Pada sistem ini, anoda dipasang di dalam tanah tempat logam yang akan diproteksi berada dan dihubungkan ke terminal positif dari output *rectifier*. Sedangkan logam yang akan dilindungi dihubungkan ke terminal negatif dari output *rectifier*. Aliran arus akan mengalir dari anoda melalui elektrolit di dalam tanah dan sampai ke logam. Sistem proteksi katodik arus paksa dapat memiliki banyak konfigurasi anoda yang tergantung pada elektrolit dan logam yang akan dilindunginya.



Gambar 2.11. Contoh Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) [2]

Dengan menggunakan metode ini ada beberapa keuntungan yang tidak dapat dicapai dengan metode-metode lain [3], yaitu:

1. Besarnya tegangan dan arus dapat di desain untuk range yang lebih luas dan sesuai kebutuhan.
2. Area yang luas dapat di proteksi dengan hanya satu buah instalasi sistem proteksi katodik arus paksa.
3. Keluaran tegangan dan arus yang bervariasi dan dapat diatur.
4. Dapat diaplikasikan untuk lingkungan dengan tingkat resistivitas yang tinggi.
5. Efektif untuk melindungi struktur yang dilapisi maupun yang tidak.

Selain memiliki kelebihan yang menguntungkan, metode ini juga memiliki kelemahan-kelemahan yang membatasi dalam penggunaannya [3], yaitu:

1. Dapat menimbulkan masalah interferensi katodik.
2. Dapat mengalami kegagalan suplai energi / power.
3. Memerlukan inspeksi dan *maintenance* secara berkala.
4. Memerlukan sumber daya dari luar, yang menyebabkan tambahan pengeluaran bulanan.
5. Proteksi yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan dari pelapisan.

Perlindungan korosi dengan metode arus paksa secara efektif dapat mencegah terjadinya proses korosi. Selama proses perlindungan, logam secara terus menerus menerima suplai arus negatif untuk mempertahankan potensialnya dibawah potensial korosi bebasnya [5]. Sistem perlindungan ini adalah perlindungan yang paling unggul dibandingkan dengan sistem perlindungan yang lain, terutama dari segi nilai ekonomis dan kemudahan instalasinya.

2.2.2 Komponen-Komponen ICCP

Komponen-komponen yang membentuk sistem proteksi katodik arus paksa ini terdiri dari 4 komponen utama, dimana komponen tersebut pada dasarnya sama dengan komponen pembentuk sistem proteksi katodik anoda tumbal, yaitu mengikuti syarat terjadinya suatu proses korosi seperti yang telah disebutkan

diatas. Perlindungan korosi dengan sistem proteksi katodik hanyalah memanipulasi proses alamiah yang terjadi pada logam ketika kontak dengan lingkungan yaitu proses korosi, agar berjalan sesuai dengan yang diinginkan, atau dengan kata lain suatu metode dalam pengendalian korosi.

Empat komponen utama yang membentuk sistem proteksi katodik arus paksa tersebut adalah:

1. Anoda (*Auxiliary Anodes*)

   Anoda yang digunakan tidak harus lebih reaktif daripada struktur logam yang akan dilindungi, anoda yang digunakan biasanya bersifat *inert* dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap serangan korosi. Anoda dapat terbuat dari material seperti *graphite*, logam paduan, dan *mixed-metal oxide-coated titanium (MMO)*. Bentuk dan ukurannya bermacam-macam, bisa berbentuk kawat, tabung, lempengan, batangan, dan piringan. Kriteria yang ideal untuk anoda menurut Shreir dan Hayfield [2]:

   - Laju konsumsi yang rendah
   - Tingkat polarisasi yang rendah
   - Konduktifitas listrik yang tinggi
   - Kemudahan dalam instalasi
   - Kuat secara fisik, sehingga tidak mudah mengalami kerusakan
   - Tahan terhadap abrasi dan erosi
   - Mudah dibentuk
   - Biaya yang rendah

2. Katoda

   Komponen katoda yang dimaksud disini adalah logam yang akan dilindungi, logam tersebut dibuat supaya bertindak sebagai katoda sehingga potensialnya berada pada daerah imun yang tahan terhadap serangan korosi. Dalam sistem proteksi katodik arus paksa / ICCP, logam yang dibuat menjadi katoda dinamakan sebagai elektroda kerja. Material

pembentuk katoda dapat berupa besi, baja atau logam paduan, oleh karena itu metode ICCP biasa digunakan untuk pipa-pipa yang dikubur dalam tanah dan air laut.

3. Elektrolit

   Elektrolit merupakan suatu larutan yang bersifat konduktif atau dapat menghantarkan arus listrik. Elektrolit terdiri dari ion-ion bebas yang memungkinkan terjadinya perpindahan elektron antara katoda ke anoda, sehingga elektrolit dapat bertindak sebagai jalur listrik yang merupakan medium perpindahan elektron. Karena ion-ion yang dimilikinya, elektrolit menjadi bersifat korosif, elektrolit banyak terkandung dalam tanah dengan kedalaman tertentu dan air laut, sehingga ketika suatu logam tanpa perlindungan berada dalam lingkungan tersebut maka logam tersebut akan terkorosi.

4. Sumber Arus DC

   Sumber arus DC merupakan sumber listrik arus searah (*Direct Current*), yang biasanya berupa *transformer-rectifier*. Alat ini menggunakan arus bolak-balik / AC (*Alternating Current*) sebagai sumber listrik utamanya dan mengubahnya menjadi arus searah, sehingga alat ini banyak digunakan sebagai sumber energi (*Power Supply*) dalam menyediakan tegangan dan arus DC. Untuk melengkapi rangkaian listrik pada sistem ICCP, Terminal positif *power supply* dihubungkan ke anoda sedangkan terminal negatif dihubungkan ke katoda, sehingga arus DC akan mengalir dari *power supply* ke anoda melewati elektrolit hingga sampai ke katoda dan akhirnya kembali lagi ke *power supply*.

2.2.3 Kriteria Perlindungan

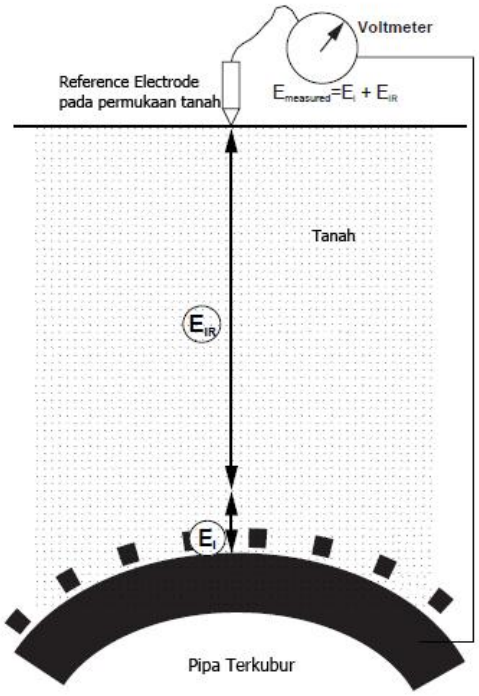
Pada prakteknya, suatu keputusan harus dibuat mengenai level arus proteksi katodik yang digunakan. Arus yang terlalu sedikit akan membawa pada kerusakan korosi yang berlebihan, dan arus yang berlebihan (*over protective*) dapat membuat

kerusakan pada lapisan pelindung (*coating*) dan pembentukan *hydrogen* yang berlebih [2].

Struktur logam yang terkorosi tidak mempunyai potensial yang sama dengan potensial kebutuhan proteksi di seluruh permukaan strukturnya. Kriteria proteksi yang praktis perlu memasukkan perubahan lingkungan sebagai pertimbangan. Kriteria-kriteria berikut yang merupakan kriteria perlindungan yang telah diaplikasikan untuk struktur yang terkubur yang telah distandarkan oleh NACE International [2].

1. Potensial struktur ≤ -850 mV terhadap elektroda acuan $Cu/CuSO_4$ (pada kondisi aerobic)
2. Potensial struktur ≤ -950 mV terhadap elektroda acuan $Cu/CuSO_4$ (pada kondisi anaerobic dimana korosi mikrobiologi mungkin terjadi)
3. Pergeseran potensial negatif ≥ 300 mV ketika dialiri arus
4. Pergeseran potensial positif ≥ 100 mV ketika arus diinterupsi

Kriteria yang pertama adalah yang paling banyak dikenal dan digunakan di industri karena kemudahan penerapan aplikasinya. Menggunakan persamaan Nernst dan konsentrasi ion Fe. 10^{-6} M (kriteria yang biasa digunakan untuk menentukan korosi yang terjadi secara termodinamika) potensial besi sebesar -950 mV terhadap elektroda acuan $Cu/CuSO_4$ dapat diukur. Kinerja yang memuaskan untuk kebutuhan potensial yang lebih sedikit tergantung pada formasi pelindung *ferrous hydroxide* pada permukaan. Kriteria potensial perlindungan berdasarkan pada potensial struktur terhadap potensial lingkungan (permukaan tanah), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12. pengukuran secara nyata dilakukan dengan menempatkan elektroda acuan (*Reference Electrode*) dengan jarak tertentu dari struktur.



Gambar 2.12. Ilustrasi skematik pengukuran potensial struktur pipa terhadap tingkatan tanah [2]

Kriteria proteksi yang berbeda diperlukan untuk kombinasi material dan lingkungan yang berbeda. Material konstruksi lainnya yang biasa digunakan untuk aplikasi yang dikubur dalam tanah, seperti tembaga, alumunium dan timah hitam, memiliki kriteria potensial yang berbeda dengan kriteria logam besi seperti yang telah disebutkan di atas.

Besarnya laju korosi pada pipa yang tidak diproteksi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$r = \frac{ArL\,x\,i}{n\,x\,F\,x\,\rho} \tag{2.5}$$

Keterangan: r = Laju korosi (cm/tahun)

ArL = Berat atom logam (gr)

i = Arus proteksi yang dibutuhkan (mA/cm^2)

n = Jumlah elektron yang ditransfer

F = Konstanta Faraday (96500 cb)

ρ = Berat jenis (gr/cm^3)

Laju korosi dapat juga dihitung berdasarkan kehilangan berat, persamaannya dapat dilihat pada persamaan 2.6.

$$Laju\ Korosi = \frac{w}{(A.t.\rho)} \tag{2.6}$$

Keterangan: w = Selisih berat a-b (gr)

A = Luas permukaan (cm^2)

t = Waktu perendaman

ρ = Masa jenis logam (gr/cm^3)

Berdasarkan persamaan perhitungan laju korosi, hasilnya dikonversikan ke satuan mm/y atau (mpy = *mills per year*).

2.2.4 Kebutuhan Arus

Bagian paling penting dalam pertimbangan desain sistem proteksi katodik adalah besarnya kebutuhan arus per luas area (biasanya disebut dengan rapat arus / *current density*) struktur yang akan diproteksi untuk diubah potensialnya menjadi -850 mV. Besarnya rapat arus yang diperlukan untuk menggeser potensialnya tersebut mengindikasikan keadaan permukaan struktur.

Struktur yang terlapisi dengan baik (contoh: pipa terkubur dengan lapisan cat *coal-tar epoxy*) akan membutuhkan jumlah arus yang sangat kecil (sekitar 0.005 mA/ft^2), sedangkan struktur yang tidak dilapisi akan membutuhkan jumlah arus yang besar. Rapat arus rata-rata yang dibutuhkan untuk proteksi katodik adalah sekitar 2 mA/ft^2 [4].

Untuk menghitung besarnya arus yang dibutuhkan untuk melindungi logam dapat dilihat pada persamaan 2.7.

$$IP = AP \; x \; i \tag{2.7}$$

Keterangan: IP = Arus proteksi untuk melindungi logam (mA)

AP = Luas permukaan logam (m^2)

i = Densitas arus proteksi yang diperlukan (mA/m^2)

2.3 Elektroda Acuan

Elektroda Acuan (*Reference Electrode*) adalah suatu elektroda yang mempunyai potensial elektroda stabil dan diketahui nilainya. Potensial elektroda yang mempunyai tingkat stabilitas yang tinggi biasanya dicapai dengan menerapkan sistem *Redoks*, dimana konsentrasi setiap partisipannya dibuat konstan (*buffered* atau *saturated*) [6].

Terdapat banyak jenis elektroda acuan yang biasa digunakan tergantung keperluannya, dan yang biasa digunakan pada sistem proteksi katodik adalah Cu/CuSO3, Ag/AgCL dan *Zinc Reference Electrode*. Berikut adalah beberapa jenis elektroda acuan beserta potensialnya [7]:

- *Standard Hydrogen Electrode* (SHE) (E=0.000 V) aktifitas ion H^+=1
- *Normal Hydrogen Electrode* (NHE) (E ≈ 0.000 V) konsentrasi ion H^+=1
- *Reversible Hydrogen Electrode* (RHE) (E=0.000 V - 0.0591*pH)
- *Saturated Calomel Electrode* (SCE) (E=+0.242 V saturated)
- *Copper-Copper(II) Sulfate Electrode* (E=+0.314 V)
- *Silver Chloride Electrode* (E=+0.197 V saturated)
- *Ph-Electrode*
- *Palladium-Hydrogen Electrode*
- *Dynamic Hydrogen Electrode* (DHE)

Silver/Silver Chloride Reference Electrode (Ag/AgCl) adalah jenis elektroda acuan yang paling banyak digunakan karena sederhana, murah, sangat stabil dan tidak beracun. Elektroda acuan ini biasa digunakan dengan elektrolit KCl jenuh sebagai *buffer*-nya, dan dapat juga digunakan dengan konsentrasi yang rendah seperti 1M KCL bahkan dapat juga secara langsung menggunakan air laut [8].

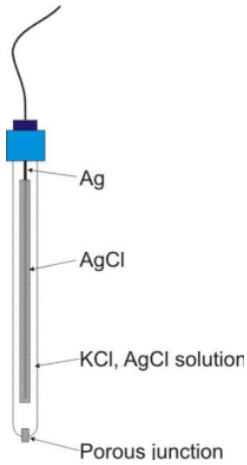
Elektroda Ag/AgCl umumnya terbuat dari kawat *silver*/perak (Ag) yang dilapisi dengan lapisan tipis perak klorida (AgCl). Ketika elektroda ditempatkan ke dalam larutan potasium klorida jenuh (KCL) maka akan menghasilkan potensial 197 mV vs. SHE. Potensial dari reaksi setengah selnya ditentukan oleh konsentrasi klorida dalam larutan [8].

Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:

$$AgCl_S + e^- \leftrightarrow Ag + Cl^- \quad E^0_{red} = 0{,}2224\ vs.SHE \tag{2.8}$$

$$E_{Ag/AgCl} = E^0_{Ag/AgCl} - 0{,}059 \log_{10} a_{Cl^-}. \tag{2.9}$$

Elektroda acuan Ag/AgCl menghasilkan potensial yang sebanding dengan konsentrasi ion klorida, baik itu dari sodium klorida, potasium klorida, amonium klorida atau beberapa garam klorida lainnya, dan nilainya akan selalu konstan selama konsentrasi ion kloridanya juga konstan. Gambar yang mengilustrasikan elektroda acuan Ag/AgCl dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13. Ag/AgCl Reference electrode [8]

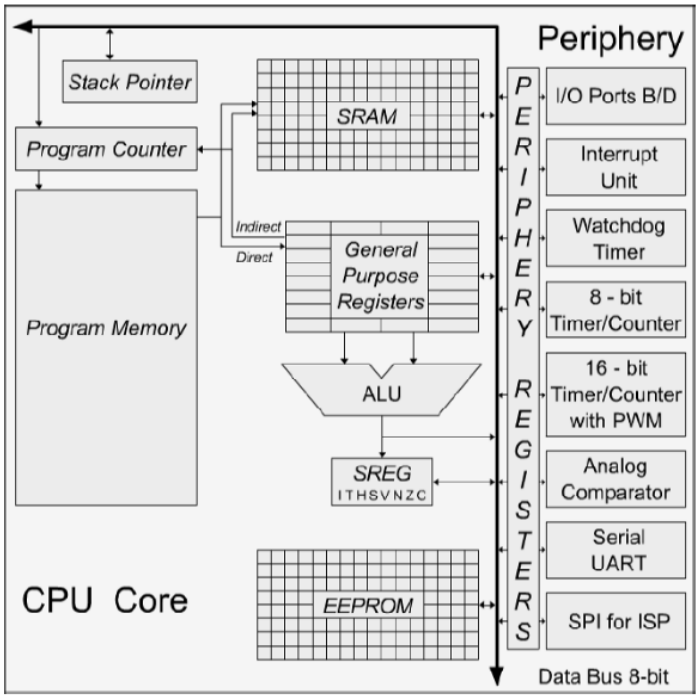
2.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler, sebagai suatu terobosan teknologi mikrokontroler dan mikrokomputer, hadir memenuhi kebutuhan pasar (*market need*) dan teknologi baru. Sebagai teknologi baru, yaitu teknologi semikonduktor dengan kandungan transistor yang lebih banyak namun hanya membutuhkan ruang yang kecil serta dapat diproduksi secara masal membuat harganya lebih murah dibandingkan mikrokontroler. Sebagai kebutuhan pasar, mikrokontroler hadir untuk memenuhi selera industri dan para konsumen akan kebutuhan dan keinginan alat-alat bantu bahkan mainan yang lebih baik dan canggih [9].

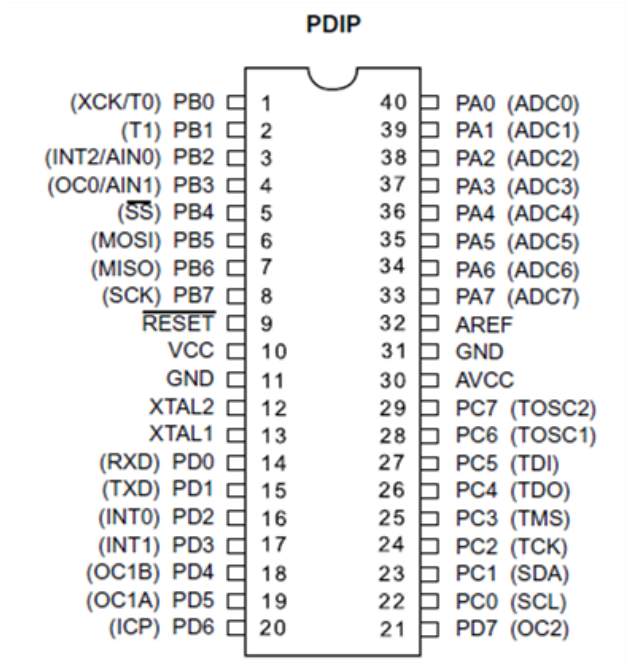
Mikrokontroller adalah piranti elektronik berupa IC (*Integrated Circuit*) yang memiliki kemampuan manipulasi data (*information*) berdasarkan suatu urutan instruksi (*algorithm)* tertentu. Salah satu arsitektur mikrokontroler yang terdapat di pasaran adalah jenis AVR (*Advanced Virtual RISC*). Arsitektur mikrokontroler jenis AVR ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1996 oleh dua orang mahasiswa *Norwegian Institute of Technology* yaitu Alf-Egil Bogen dan Vegard Wollan. Mikrokontroler AVR kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Atmel, seri pertama AVR yang dikeluarkan adalah mikrokontroler 8 bit AT90S8515.

Pada AVR dengan arsitektur RISC 8 bit, semua instruksi berukuran 16 bit dan sebagian besar dieksekusi dalam 1 siklus *clock*. Berbeda dengan mikrokontroler MCS-51 yang instruksinya bervariasi antara 8 bit sampai 32 bit dan dieksekusi selama 1 sampai 4 siklus mesin, dimana 1 siklus mesin membutuhkan 12 periode *clock* [10].

Pada perkembangannya, AVR dibagi menjadi beberapa varian yang diantaranya yaitu AT90Sxx, ATmega, dan AT86RFxx, walaupun pada dasarnya yang membedakan masing-masing varian hanyalah dari segi kapasitas memori dan beberapa fitur tambahan saja.



Gambar 2.14. Arsitektur dasar mikrokontroler AVR [11]



Gambar 2.15. Konfigurasi Pin-Out ATmega16 [11]

Fitur yang tersedia pada ATmega16 adalah :

- ✓ Frekuensi *clock* maksimum 16 MHz
- ✓ Jalur I/O 32 buah, yang terbagi dalam PortA, PortB, PortC dan PortD
- ✓ *Analog to Digital Converter* 10 bit sebanyak 8 input, 4 *channel* PWM
- ✓ *Timer/Counter* sebanyak 3 buah
- ✓ CPU 8 bit yang terdiri dari 32 *register*
- ✓ *Watchdog Timer* dengan osilator internal
- ✓ SRAM sebesar 1K *byte*
- ✓ Memori *Flash* sebesar 16 Kbyte dengan kemampuan *read while write*
- ✓ *Interrupt* internal maupun eksternal
- ✓ Port komunikasi SPI
- ✓ EEPROM sebesar 512 *byte* yang dapat diprogram saat operasi
- ✓ *Analog Comparator*
- ✓ Komunikasi serial standar USART dengan kecepatan maksimal 2,5 Mbps

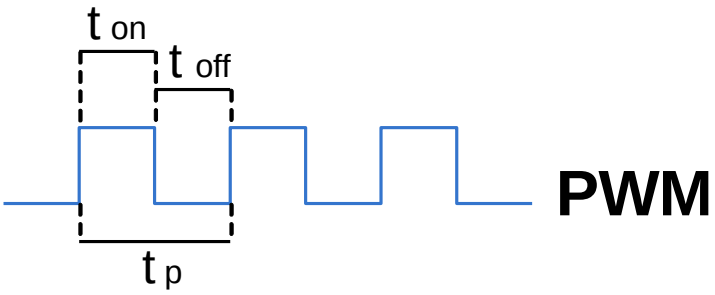
Software Pendukung:

- ✓ Programmer : AVRprog, AVR OSPII, AVR dude, PonyProg.
- ✓ Program *Editor* dan *Compiler* : WinAVR, CodeVision AVR, AVR Studio, BASCOM-AVR.

2.4.1 PWM (Pulse Width Modulation)

Pulse Width Modulation disingkat PWM adalah salah satu fitur yang sudah terintegrasi dalam *chip* mikrokontroler AVR, yaitu dengan memanfaatkan fungsi timer yang dapat mencacah sumber pulsa / *clock* untuk membuat generator gelombang PWM [12].

PWM sendiri merupakan suatu bentuk gelombang *digital* / pulsa yang bisa diatur *duty cycle*-nya, dimana *duty cycle* adalah perbandingan antara lama pada saat 1 atau ON dan lama periode satu gelombang pulsa.



Gambar 2.16. Pulsa PWM

Sedangkan untuk menghitung besarnya *duty cycle* yang dihasilkan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$Duty\,Cycle = \frac{t_{ON}}{t_P}\ x\ 100\% \qquad (2.10)$$

Timer/Counter 0 dan 2 dalam mode PWM digunakan untuk mengendalikan lama t ON dan t OFF melalui isi *register* pembanding OCR yang akan berakibat kepada besar nilai *duty cycle* yang dihasilkan.

2.4.2 ADC (Analog to Digital)

ADC (*Analog to Digital*) adalah konverter yang sudah terintegrasi di dalam *chip* mikrokontroler AVR yang berfungsi untuk mengubah besaran *analog* ke besaran *digital*. ADC yang sudah terintegrasi dalam *chip* mikrokontroler keluarga AVR memiliki fitur-fitur yang tidak kalah dan jauh berbeda dengan modul ADC dari luar *chip* [12].

Fitur-fiturnya ADC adalah:

- ✓ Resolusi mencapai 10-bit
- ✓ 0,5 LSB *Integral Non-linearity*
- ✓ Akurasi mencapai ± 2 LSB
- ✓ Waktu konversi 13 - 260 µs
- ✓ 8 saluran ADC yang dapat digunakan secara bergantian
- ✓ *Optional Left Adjustment* untuk pembacaan hasil ADC
- ✓ 0 – VCC *Range input* ADC

- ✓ Disediakan 2,56 V tegangan referensi internal ADC
- ✓ Mode konversi kontinyu (*free running*) atau mode konversi tunggal (*single conversion*)
- ✓ Interupsi ADC *complete*
- ✓ *Sleep mode Noise Canceler*

Sinyal *input* dari pin ADC akan dipilih oleh *multiplexer* (*register* ADMUX) untuk diproses oleh ADC, karena konverter ADC dalam *chip* hanya satu buah sedangkan saluran *input*-nya ada delapan maka dibutuhkan *multiplexer* untuk memilih *input* pin ADC secara bergantian.

Operasi ADC membutuhkan tegangan referensi VREF dan *clock fade* (*register* ADCSRA). Tegangan referensi eksternal pada pin AREF tidak boleh melebihi AVCC. Tegangan referensi eksternal dapat di-*decouple* pada pin AREF dengan kapasitor untuk mengurangi derau. Atau dapat menggunakan tegangan referensi internal sebesar 2,56 V (pin AREF diberi kapasitor secara eksternal untuk menstabilkan tegangan referensi internal).

ADC mengkonversi tegangan *input analog* menjadi bilangan *digital* selebar 10-bit. GND (0 Volt) adalah nilai minimum yang mewakili ADC dan nilai maksimum ADC diwakili oleh tegangan pada pin AREF minus 1 LSB. Hasil konversi ADC disimpan dalam *register* pasangan ADCH:ADCL.

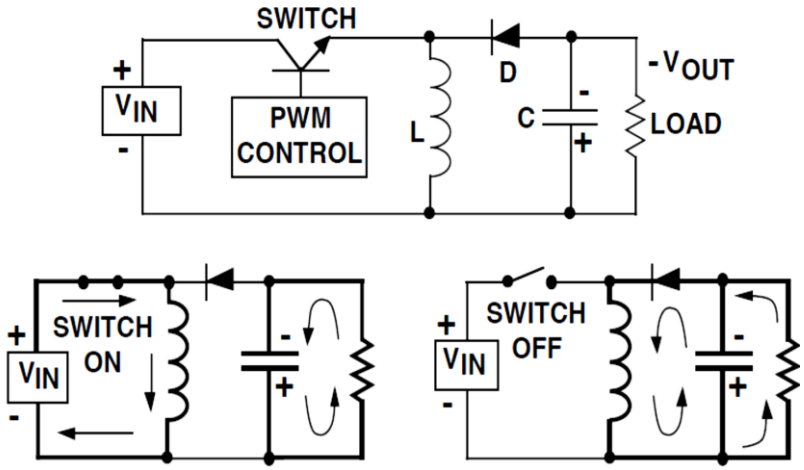
Sinyal *input* ADC tidak boleh melebihi tegangan referensi. Oleh karena itu untuk menghitung nilai *digital* sinyal *input* ADC dapat penggunakan persamaan 2.11 dibawah ini.

Untuk resolusi 8-bit (256) adalah:

$$Kode\,Digital = \frac{V_{INPUT}}{V_{ref}}\ x\ 256 \qquad (2.11)$$

2.5 Buck-Boost Converter

Buck-Boost Converter adalah suatu rangkaian dengan *input* berupa tegangan DC dan menghasilkan *output* berupa tegangan dengan polaritas yang berlawanan dengan tegangan *input* (polaritas negatif). Keluaran tegangan negatif yang dihasilkan dapat lebih besar atau lebih kecil dari tegangan masukannya [13]. Topologi dari rangkaian *buck-boost* juga dikenal sebagai *fly-back* atau *inverting regulator* [14]. Prinsip kerja dari rangkaian *buck-boost* dapat dilihat pada gambar 2.17 berikut.



Gambar 2.17. Buck-boost inverting regulator [14]

Ketika *switch* tertutup / ON, tegangan masukan dipaksa untuk melewati induktor, sehingga menyebabkan meningkatnya aliran arus yang melaluinya. Pada saat yang bersamaan, satu-satunya sumber untuk arus beban adalah dari kapasitor.

Ketika *switch* terbuka / OFF, terjadi penurunan aliran arus pada induktor yang menyebabkan tegangan pada dioda berubah menjadi negatif. Proses ini menyebabkan dioda aktif dan membolehkan arus pada induktor untuk mengalir dan mengisi kapasitor dan juga beban. Arus beban disuplai dari induktor ketika *switch* OFF dan dari kapasitor ketika *switch* ON [14].

Tegangan *output* dari rangkaian *buck-boost converter* merupakan fungsi dari tegangan *input* dan *duty cycle* [13]. Rumus perhitungannya seperti pada persamaan 2.12.

$$V_{OUT} = -V_{IN} \cdot \left(\frac{k}{1-k} \right) \quad (2.12)$$

Keterangan : k = *Duty Cycle*

V_{IN} = Tegangan *input* (V)

V_{OUT} = Tegangan *output* (V)

Persamaan 2.13 dibawah ini dapat digunakan untuk merelasikan arus *ripple* pada induktor terhadap tegangan *input*, *duty cycle*, nilai induktor dan frekuensi *switching* [13].

$$\Delta I = \frac{V_{IN}.k}{f.L} \quad (2.13)$$

Keterangan: ΔI = *Ripple* arus

k = *Duty Cycle*

V_{IN} = Tegangan *input* (V)

f = Frekuensi *switching* (Hz)

L = Induktor (H)

Persamaan untuk merelasikan *ripple* tegangan *output* dengan arus *output*, *duty cycle*, nilai kapasitor dan frekuensi *switching* [13].

$$\Delta V_{OUT} = \frac{I_{OUT}.k}{f.C} \quad (2.14)$$

Keterangan: ΔV_{OUT} = *Ripple* tegangan

I_{OUT} = Arus *output* (A)

k = *Duty Cycle*

f = Frekuensi *switching* (Hz)

C = Kapasitor (F)