BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Teknologi *Thick Film* (Film Tebal)

Teknologi film tebal merupakan salah satu bagian dari teknologi proses mikroelektronika untuk fabrikasi komponen-komponen elektronika secara screen printing. Teknologi film tebal telah banyak digunakan secara luas dalam industri komponen hibrid mikroelektronika dan diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti ototmotif, telekomunikasi, medis, dan pengembangan sensor dan aktuator.[1]

Teknologi film tebal telah mengalami tranformasi yang luar biasa sebagian didorong oleh fleksibelitas, adaptasi dan kecepatan perubahan desain. Kulitas inheren dari film tebal ini telah menyebabkan produsen sirkuit ingin menghasilkan lebih cepat. Memang setiap aspek teknologi untuk film kualitas tinggi diarahkan pada biaya yang lebih rendah dan keandalan yang lebih besar. Teknologi film tebal mendapatkan penerimaan yang luas karena fluksitas dan desain yang ekonomis.

Dengan ketebalan yang sangat tipis untuk teknologi thin film menyebabkan pengurangan biaya yang sangat menguntungkan. Adapun konsekuensi yang diakibatkan dari penggunaan skala untuk teknologi film tipis adalah kenaikan arus bocor, kritikitas penundaan RC walaupun perangkat memiiki kualitas yang baik hanya saja sering kali tejadi penundaan RC tidak

pada tingkat yang sama dan batas frekuensi operasional chip. Selain dari pada itu menambah jumlah pin I/O dan meningkatkan ouput daya termal.[2]

Proses pembuatan sensor pH harus dan memerlukan tingkat akurasi sensitivitas yang mendekati ideal. Sensitivitas yang harus dimiliki oleh sensor pH harus mendekati dari persamaan Nerst itu sendiri atau setidaknya tingkat akurasinya mendekati nilai yang terbaca oleh sensor pH komersial saat ini. Dengan begitu pembuatan sensor pH dengan menggunakan teknologi film tebal diharapkan mampu memeperbaiki kekurangan atau dapat menggantikan sensor pH komersial saat ini. pH komersial saat ini yang berada sangat rentan mengalami kerusakan, dan juga sulitnya melakukan perawatan larutan elektrolit pada bagian elektroda referensi.

Pada dasarnya pengembangan sensor pH dengan menggunakan teknologi Film Tebal telah dilakukan. Dimana elektroda referensi yang digunakannya berbahan Ag/AgCl. Hanya saja penelitian ini memiliki sedikit kekurangan untuk tingkat sensitivitas dan akurasi pengukuran. Sensitivitas dan akurasi pengukuran yang dimiliki pada penelitian teknolgogi Film Tebal berkisar 50,85 %. Tingkat akurasi tersebut masih dirasakan sangat kurang mengingat sensor pH komersial saat ini jauh memiliki tingkat akurasi yang lebih baik. Untuk itu dapat disimpukan bahwa kurang tepat jika fabrikasi sensor pH dengan menggunakan teknolgi Film Tebal dilakukan.

Proses fabrikasi sensor pH dengan menggunakan Teknologi Film Tebal khususnya pada bagian Elektroda Referensi memerlukan cara dan metode yang khusus. Metode yang dimaksud adalah proses pelapisan elektrolit KCl pada

bagian elektroda referensi. Proses pelapisan elektroleit KCl bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas yang ideal dan juga tingkat akurasi yang baik pada sensor dengan begitu fabrikasi sensor pH dengan menggunakan Teknologi Film Tebal diharapkan mampu memperbaiki kekurangan dari sensor pH komersial saat ini. Sulitnya pengisian cairan elektrolit KCl jenuh pada tabung yang berfungsi menghasilkan elektroda referensi adalah salah satu faktor yang mendorong untuk menggantikan sensor komersial saat ini.

Proses pengujian sensor pH harus memperhatikan temperatur yang dimiliki larutan terukur. Dengan memperhatikan temperatur yang tedpata pada larutan uji akan menghasilkan tingkat akurasi pada proses pengukuran menjadi lebih baik jika dibandingkan dengan proses pengukuran tanpa memperhatikan suhu yang terukur. [3]

2.2 Sensor Elektrokimiawi

Seperti kita tahu bahwa pada dasarnya air tidak memiliki bau, asam, dan rasa. Jika dalam air terdapat zat tertentu maka air tersebut dapat berubah rasanya yang sebelumnya terasa tawar bisa saja menjadi berasa asin, asam, pahit dan sebagainya. Bukan hanya itu saja jika dalam air terdapat zat tertentu maka warnanya pun dapat berubah yang asalnya tidak berwarna atau bening. Setiap cairan dengan rasa tertentu tentu memiliki nama tersendiri seperti cairan yang memiliki rasa asam disebut larutan asam, sedangkan larutan yang memiliki rasa asin disebut larutan garam, dan yang sifatnya licin dan pahit disebut larutan basa. Cara yang paling umum digunakan untuk menentukan sifat larutan biasanya dengan cara mencelupkan kertas lakmus kedalam larutan uji, hal

tersebut dilakukan karena kertas lakmus memiliki adaptasi yang berbeda dari kertas pada umumnya yaitu memiliki sifat sensitive terhadap zat yang bersifat asam ataupun basa. Sifatnya tersebut ditandai dengan berubahnya warna pada kertas lakmus baik itu memperlihatkan warna merah ataupun warna biru. Biasanya kertas lakmus akan berubah menjadi warna merah jika disekitarnya dikelilingi oleh zat yang bersifat asam dan kertas lakmus akan berubah menjadi warna biru jika zat disekelilingnya mempunyai sifat yang basa. Namun saat ini penggunaan kertas lakmus sudah jarang digunakan semenjak ditemukannya sensor yang dapat menentukan pH pada sebuah zat yang ingin diketahui tingkat keasamannya.[4]

Jika berbicara mengenai air, pada tahun 2016 yang lalu LIPI sebagai Lembaga Penelitian terbesar di Indonesia telah berhasil menemukan teknologi nanobuble. Dimana teknologi nanobuble ini menjelaskan tentang cara mempercepat pertumbuhan ikan hingga 40 %. Salah satu dari konsep teknologi nanobuble ini adalah memperbanyak kandungan oksigen dalam air yang dipakai sebagai habitat ikan. Maka dari itu dalam melakukan penambahan oksigen dalam air yang sesuai diperlukan alat yang dapat mengetahui kandungan oksigen didalamnya supaya tidak melewati batas kandungan oksigen yang telah ditentukan[5]. Selain dari pada kandungan oksigen yang terdapat pada air organisme laut seperti ikan akan terjamin kehidupannya jika tingkat keasamannya memiliki rentang antara 6,5 sampai dengan 8,5[6].

Tabel 2. 1 Parameter Kimia dalam Standar Baku Mutu Kesehatan Limgkungan untuk Media Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi[7]

No	Parameter	Satuan	Standar Baku Mutu

1	pH	Mg/l	6,5 – 8,5
2	Besi	Mg/l	1
3	Flourida	Mg/l	1,5
4	Kesadahan ($CaCO_3$)	Mg/l	500
5	Mangan	Mg/l	0,5
6	Nitrat, Sebagian N	Mg/l	10
7	Nitrit, Sebagian N	Mg/l	1
8	Sianida	Mg/l	0,1
9	Deterjen	Mg/l	0,05
10	Pestisida Total	Mg/l	0,1
11	Oksigen Terlarut	Mg/l	≥4

Kandungan bahan-bahan kimia yang ada di dalam air berpengaruh terhadap kesesuaian penggunaan air. Secara umum karakteristik kimiawi air meliputi pH, alkalinitas, kation dan anion terlarut dan kesadahan[8]. pH, menyatakan intensitas kemasaman atau alkalinitas dari suatu cairan encer, dan mewakili konsentrasi hidrogen ionnya. pH merupakan parameter penting dalam analisis kualitas air karena pengaruhnya terhadap proses-proses biologis dan kimia di dalamnya. Air yang diperuntukkan sebagai air minum sebaiknya memiliki pH netral (+7) karena nilai pH berhubungan dengan efektifitas klorinasi. pH pada prinsipnya dapat mengontrol keseimbangan proporsi kandungan antara karbon dioksida, karbonat dan bikarbonat[9]. Bahkan menurut BMKG pada bulan mei 2018 tingkat keasaman air hujan di Indonesia bersifat asam yaitu sebesar 5,6. Itu artinya air hujan tidak dapat langsung dikonsumsi karena tidak sesuai standar kebutuhan manusia[10].

Sensor adalah benda yang dapat mendeteksi suatu perubahan baik itu perubahan fisik maupun kimiawi. Jika dibandingkan dengan cara tradisional seperti pada penggunaan kertas lakmus untuk pH, sensor memiliki kelebihan tersendiri yaitu dapat menunjukkan perubahan secara parsial yang

diterjemahkan kedalam sebuah ukuran yang lebih analitis. Salah satu sensor yang dapat mendeteksi perubahan secara kimia adalah penggunaan sensor pH dan sensor DO. Seperti yang telah saya jelaskan diatas bahwa informasi yang didapat dari kedua sensor tadi yaitu pH dan DO akan diterjemahkan menjadi lebih analitis dengan menggunakan rangkaiaaian elektronika. Untuk lebih jelasnya dibawah ini telah dipaparkan beberapa penjelsan mengenai prinsip kerja sensor pH dan DO sebagai berikut: [11]

2.2.1 Sensor pH

Sejak zaman dahulu penemuan mengenai sifat larutan asam dan juga basa telah lama ditemukan. Istilah asam sendiri asalnya dari Bahasa latin yaitu (acid) atau acentum yang artinya adalah cuka. Sedangkan istilah basa asal katanya dari Bahasa arab yang artinya adalah abu. Karena basa memiliki sifat yang licin maka biasanya zat ini lebih banyak ditemui dalam sabun. Sudah lama sekali kita ketahui bahwa asam dan basa saling mentralkan satu sama lain. Di alam sendiri, asam ditemukan dalam buah-buahan, misalnya asam sitrat dalam buah jeruk berguna untuk memberikan rasa limun yang tajam. Kandungan dalam cuka sendiri terdapat asam asetat dan asam tanak. Dimana kedua asam tadi berasal dari kulit pohon yang biasanya digunakan untuk menyamak kulit. Pada abad pertengahan dubuatlah sebuah asam mineral yang lebih kuat dari asam-asam sebelumnya yang berfungsi untuk memisahkan emas dan perak. Asam yang telah dibuat ini salah satunya adalah aqua forti atau lebih dikenal dengan asam nitrat. [12]

Kandungan bahan-bahan kimia yang yang ada dalam air berpengaruh terhadap kesesuaiaan penggunaaan air. Secara umum karakteristik kimiawi air meliputi pH, alkalinitas, kation, dan anion terlarut dalam kesadahan.

Kita tahu bahwa air murni memiliki sifat yang netral oleh karena itu air murni tidak dapat menghantarkan arus listrik. Dialam air murni sangat sulit ditemukan, hampir seluruhnya zat dialam ini membentuk suatu ikatan. Oleh karena itu air yang sering kita jumpai saat ini dapat menghantarkan arus listrik karena berikatan dengan zat yang sifatnya konduktor. Untuk mendapatkan air murni memerlukan usaha ekstra dan alat yang hanya mengenali air murni air murni adalah alat yang sangat peka terhadap perubahan karena daya hantar listrik yang hampir tidak ada. Artinya, molekul-molekul yang terdapat pada air murni hanya sebagian kecil saja yang dapat terionisasi menajdi ion H+ dan OH-. Dibawah ini dijelaskan bagaimana peroses ionisasi berlangsung dengan menggunakan persamaan.

$$H_2(l) = H^+ + OH^-(aq) \quad \text{..... (2.1)}$$

Harga tetapan air:

$$K = \left(\frac{[H^+][OH^-]}{H_2O}\right) \quad \text{..... (2.2)}$$

$$K[H_2O] = [H^+][OH^-] \quad \text{..... (2.3)}$$

Konsentrasi yang terjadi pada air atau sering disebut senyawa H_2O selanjutnya akan terionisasi menjadi ion H^+ dan ion OH^-. Proses perubahan ionisasi tersebut sangatlah kecil jika dibandingkan dengan konsentrasi H_2O

sebelum terionisasi. Oleh karena itu konsentrasi H_2O dapat dianggap tidak berubah atau tetap, untuk itu harga $K[H_2O]$ juga tidak berubah atau dapat dikatakan tetap, hal tersebut disebut sebagai tetapan kesetimbangan air atau dapat disimbolkan sebagai K_w. Dapat dismpulkan bahwa,

$$K_w = [H^+][OH^-] \quad \text{..... (2.4)}$$

Jika proses ionisasi dilakukan pada suhu 25 ^{0}C, maka harga K_w yang akan dihasilkan dari percobaan adalah $1{,}0 \times 10^{-14}$. Harga K_w sendiri tergantung dari suhu yang terdapat pada larutan uji. Bukan hanya itu saja untuk percobaan yang memiliki suhu berada pada kisaran 25 ^{0}C, dengan demikian harga K_w itu dianggap tetap.

$$K_w = [H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad \text{..... (2.5)}$$

Berdasarkan persamaan 2.5 maka dapat disimpulkan bahwa $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$, dan nilai dari ion $[H^+] = 10^{-7}$. Hal tersebut menunjukan bahwa terjadi kesetimbangan yang terdapat pada air murni. Dimana asumsinya adalah dalam 1 liter air murni tersusun atas ion H^+ dan ion OH^- yang masing-masing berjumlah 10^{-7} mol.

Proses kesetimbangan kimiawi yang terjadi pada air terjadi adalah proses berkurang dan bertambahnya ion H^+ dan ion OH^-. Ion H^+ akan bertambah jika kedalam air murni diberikan larutan asam dan begitupun sebaliknya. Oleh karena itu hasil perkalian antara $[H^+]$ dan $[OH^-]$ akan menghasilkan Kw. Hal tersebut terjadi karena kesetimbangan yang terjadi pada larutan bergeser kekiri sehingga menyebabkan perbandingan jumlah ion antara H^+ lebih banyak dibandingkan dengan OH^-. Dan kesetimbangan

pada percobaan pun akan melakukan pergesaran jika pada larutan ditambahkan larutan basa. Berdasarkan sifat kesetimbangan tersebut dapat disimpukan bahwa :

Dalam larutan berair	= $[H^+][OH^-]$	= K_w
Dalam air murni (larutan netral)	= H^+	= [OH-]
Dalam larutan asam	=$[H^+]$	> [OH-]
Dalam larutan basa	=[H+]	< [OH-][12]

Kita tahu dasar dari pengertian pH sebenarnya selanjutnya adalah bagaimana pH dapat kita ketahui dengan kasat mata. Untuk mengetahui berapa besar pH dalam suatu zat terukur salah satunya adalah dengan menggunakan teknik pengukuran. Secara mendasar pengukuran elektroda pH dilakukan dengan membandingkan pembacaan dalam sampel dengan pembacaan standar pH-nya yang telah ditetapkan. Ketika sebuah elemen elektroda pH berhubungan dengan zat yang diukur, maka potensial dipermukaan membran di elektroda akan berubah-ubah terhadap pH. Elektroda referensi menunjukkan nilai standar normalnya yang selanjutnya akan dibandingkan terhadap elektroda yang sangat sensitive terhadap perubahan pH larutan tersebut. Pada batang elektroda pH inilah kombinasi yang baik diletakan anatar elektroda yang sangat sensitive terhadap perubahan parsial dalam zat terukur dengan elektroda yang memiliki harga normal. Dengan kombinasi tersebut maka sensor diaharapkan dapat memberikan selektivitas dan daya respon yang baik. Dikatakan suatu sensor memiliki respon dan selektivitas yang baik jika dalam suatu batang tertentu

terjadi sebuah aktivitas pertukaran zat dan disisi lain dapat memepertahankan harga normalnya sebagai titik acuan. Hasil dari perubahan tersebut selanjutnya akan diterjemahkan kedalam suatu ukuran yang berfungsi sebagai jarum penunjuk atau perubahan angka yang dapat menghitung dan membaca kemiringan suatu larutan dari harga normalnya. Hasil pembacaan tersebut kemudian akan ditampilkan dalam bentuk unit-unit pH yang dapat dilihat dalam display. Rumus yang digunakan untuk menghitung perubahan elektroda sendiri menggunakan persamaan Nerst yaitu:

$$E = Eo + (RT/nF)\, log\, a\, H^{+} \quad \text{..... (2.6)}$$

E adalah energy potensial yang terukur dari perubahan batang elektroda, Eo adalah harga normal yang terbaca sebagai nilai referensi, $(2{,}3\ R\,T/nF)$ adalah factor Nernst dan $\log a\, H^{+}$ adalah pH. Pada factor Nernst sendiri terdapat beberapa symbol yang terdiri dari $(2{,}3\ R\,T/nF)$. R adalah konstanta yang digunakan pada hukum ketetapan gas, F adalah konstantan yang terdapat pada hukum faraday, T adalah suhu dengan satuan internasional yaitu kelvin, dan n adalah muatan ion itu sendiri. Oleh karena itu untuk pH sendiri muatan ion telah diketahui bernilai satu, dan pada factor Nernst terdapat R dan juga F sebagai konstanta, maka dapat disimpulkan bahwa factor perubahan elektroda tergantung pada suhu zat terukur.

Perubahan elektroda yang terjadi adalah bentuk ukuran analitis yang berasal dari respon elektroda yang sifatnya sangat sensitive terhadap perbandingan jumlah ion yang terdeteksi. Perubahan elektroda tersebut

berbanding lurus dengan factor Nernst. Seperti pada percoabaan bahwa jika dalam larutan uji diberikan suhu sekitar 25 ^{0}C, maka perubahan parsial Nernst secara teoritis adalah 59,16 mV untuk setiap kenaikan pH. Untuk mengukur perubahan kenaikan pH sendiri bernama Thermos Scientific pH atau sekarang lebih dikenal dengan pH meter. Alat pengukur pH berfungsi menampilkan perubahan parsial sebagai refresentasi dari nilai teoritis yang terbaca. Itu artinya jika perubahan parsial yang terjadi sekitar 98,5 % maka untuk kenaikan pH per unit sendiri jika dilihat dari sudut pandang tegangan yang diukur akan merefresentasikan nilai sebesar 58, 27 mV untuk setiap kenaikan pH yang dilakukan. Pada prosesnya pH meter mendeteksi sinyal dari elektroda yang sangat sensitive terhadap perubahan pH, hasil deteksi tersebut merupakan hasil dari pengukuran sinyal referensi dan sinyal suhu yang digunakan sebagai nilai untuk menghitung pH dengan menggunakan persamaan Nernst. Alat pengukur pH meter sendiri mengandung nilai pH dan suhu pada larutan penyanggah yang sering digunakan. Hal ini memungkinkan alat pengukur pH dapat mengenali larutan penyanggah yang benar terhadap suhu yang terukur.[13]

Prinsip kerja pH meter komersial yang berbahan dasar glas kaca terletak pada desain prob dari sensor tersebut. Prob yang dimiliki sensor ini memiliki elektroda-elektroda berbahan dasar kaca atau dapat disebut glass electrode. Prinsip kerjanya adalah dengan cara menghitung jumlah ion H3O+ yang terkandung di dalam larutan uji. Desain yang terdapa pada sensor ini adanya lapisan kaca dengan ketebalan 0,1 mm pada lapisan ujung elektroda. Desain pada sensor ini memiliki bentuk yang bulat atau kita

namakan sebagai (*bulb*). *Bulb* ini selanjutnya dipasangkan dengan silinder kaca yang berisafat isolator yaitu plastic memanjang. *Bulb* tersebut selanjutnya diisi dengan larutan HCl sebesar 0,1 mol/dm^3. Dimana sensor ini merendam sebuah kawat electode yang panjang dan juga berbahan perak di dalam larutan HCl. Permukaan dari sensor ini memiliki kesetimbangan senyawa AgCl. Dengan begitu jumlah larutan HCl ini akan membentuk konstanta yang mana potensial yang dimiliki oleh Ag/AgCl akan mendekati stabil.

Inti dari stuktur sensor pH yang menggunakan glass kaca sendiri terletak pada permukaan *bulb* yang mampu melakukan pertukaran ion positif yang direfresentasikan sebagai ion H^+. Kaca pada sensor ini tersusun atas molekul silicon dioksida dan perpaduan sejumlah ikatan logam alkali. Pada saat *bulb* kaca dikelilingi oleh air, maka ikatan SiO pada glass kaca akan terprontonasi membentuk membran tipis yang membentuk senyawa $HSiO^+$ seperti uraiaan persamaan dibawah ini.

$$SiO + H_3O^+ \rightarrow HSiO^+ + H_2O \quad (2.7)$$

Pada permukaan *bulb* terbentuk sebuah lapisan gel yang berfungsi sebagai tempat pertukaran ion H^+. Jika suatu larutan memiliki sifat asam, makan ion H^+ akan berpindah dan akan terikat pada permukaan *bulb*. Hal tersebut menimbulkan muatan positif terakumulasi pada lapisan gel. Sedangkan untuk sebaliknya jika pada sebuah larutan memiliki sifat basa, maka ion H+ pada dinding *bulb* tadi akan terlepas dan akan bereaksi dengan

larutan disekitarnya. Hal demikianlah yang menimbulkan kelebihannya muatan negative pada dinding *bulb*.

Proses pertukaran ion hydronium atau lebih sering disebut dengan perpindahan ion H^+ inilah yang terjadi antara permukaan *bulb* kaca dengan larutan sekitarnya yang dapat menjadi kunci pengukuran jumlah ion H_3O^+ di dalam larutan uji. Proses ini terjadi karena kesetimbangan pertukaran ion yang terjadi antara fase dinding kaca *bulb* dengan larutan sekitarnya. Proses ini pula yang mempengaruhi perubahan potensial pada dinding keduanya yang dijelaskan seperti pada persamaan dibawah ini.

$$E_{dinding\ kaca/larutan} = |RT/2{,}303F\ log\ a\ (H_3O^+) \quad \text{..... (2.8)}$$

Perhitungan nilai aktivitas ion hydronium $\left(a(H_3O^+)\right)$ pada persamaan diatas memiliki rentang yang sangat lebar yakni antara 10 hingga 10-15 mol/dm^3. Sehingga untuk meringkas persamaan diatas, maka lahirlah pH dengan persamaan berikut:

$$pH = -log\ a(H_3O^+) \quad \text{..... (2.9)}$$

Penggunaan tanda negative pada rumus tersebut berfungsi untuk membuat nilai pH dari berbagai larutan. Pada larutan yang bersifat sangat ekstrim asam sendiri maka nilai pH akan berubah tanda menjadi positif.

Seperti yang telah kita bahas diatas bahwa *bulb* kaca yang berisi larutan HCl akan merendam sebuah larutan elektroda perak. Larutan HCl ini memiliki pH yang konstan karena larutan ini berada pada sistem yang

terisolasi dari larutan sekitarnya. Karena pH yang konstan ini pula sensor tersebut dapat menciptakan beda potensial yang konstan pada temperature yang konstan pula. Dengan menyimbolkan potensial tersebut sebagai E', maka kedua persamaan diatas menghasilkan persamaan beda potensial total sebagai berikut:

$$E_{elekttroda\ kaca} = E' - RT/2{,}303F\ pH \quad \text{..... (2.10)}$$

Sesungguhnya pada sebuah rangkiaan pH meter, selain terdapat stuktur elektroda kaca pada stuktur pH meter ini juga terdapat lapisan yang berfungsi sebagai elektroda referensi. Kedua elektroda tersebut sebenarnya sama-sama terendam ke dalam media ukur yang sama. Untuk elektroda referensi sendiri memiliki fungsi khusus yaitu untuk menciptakan pH yang beanar-benar dapat dikatakan valid. Bukan hanya itu saja pada elektroda referensi sendiri harus memiliki nilai potensial yang dikatakan stabil dan tidak terpengaruh oleh larutan yang diukur.

Seperti halnya elektroda kaca, didalam elektroda referensi juga digunakan sebuah larutan HCl sebagai elektrolit. Larutan elektrolit tersebut akan merendam elektroda Ag/AgCl. Pada ujung elektroda referensi terdapat sebuah liquid junction yang berupa bahan keramik. Liquid junction tersebut berfungsi sebagai tempat dan juga proses pertukaran ion elektrolit dengan larutan disekitarnya. Pertukaran ion ini diperlukan untuk menciptakan aliran listrik sehingga pengukuran dengan bantuan potensiometer ini pada pH meter sendiri dapat dilakukan.

Elektroda referensi yang memiliki nilai potensial yang konstan akan menghasilkan persamaan yang dipengaruhi oleh rangkaiaan potensiometer. Secara keselutuhan persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$E = E_{elektroda\ referensi} + E_{elektroda\ kaca} \quad (2.11)$$

Dengan memasukan persamaan (2.10) kedalam persamaan diatas, maka didapatkan persamaan dasar perhitungan pH sebagai berikut:

$$E = E_{elektroda\ referensi} + E' - RT/2{,}303\ F\ pH \quad (2.12)$$

Pada proses pengukuran pH sangat dipengaruhi oleh temperature pada larutan uji. Oleh karena itu diperlukan sensor temperature (thermoprobe) pada rangkaiaan pH meter. Yang mana proses pembacaan temperature tersebut menjadi input perhitungan pH yang dilakukan oleh microprocessor.[14]

Kita tahu bahwa pH adalah satuan derajat yang keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan yang dimiliki oleh suatu larutan. pH sendiri didefinisikan sebagai kologaritma aktivitas ion hidrogen (H^+) yang terlarut. Nilai koefisien dari aktivitas ion hidrogen dalam suatu larutan tidak dapat diukur berdasarkan hasil eksperimen, oleh sebab itu nilai pH mengacu perhitungan yang teoretis. Skala yang digunakan untuk menentukan pH suatu larutan uji bukanlah skala yang absolut. pH sendiri sifatnya relative terhadap beberapa larutan standar yang mana pH-nya ditentukan berdasarkan persetujuan internasional. Dimana persetujuan tersebut mengacu pada suatu angka pasti yang dapat membedakan sifat

asam dan basa. Angka tersebut ialah, bila pH < 7 maka larutan bersifat asam, dan jika pH > 7 maka larutan bersifat basa. [12]

Ion-ion hidronium yang terdapat pada suatu larutan sangat memperngaruhi tingkat keasaman atau kebasaan. Larutan yang memiliki ion-ion hidronium H3O+ akan memiliki kelebihan konsentrasi ion H+. Dengan begitu pengarunya terhadap ion OH- akan terjadi sebaliknya. Pada sebuah larutan tingkat konsentrasi ion hidronium sangatlah kecil. Untuk itu dalam menetukan tingkat keasaman pada suatu larutan perlu perhitungan yang khusus.

Nilai logaritma yang menjadi perhatian utama pada pengukuran tingkat keasaman suatu larutan direfresentasikan dalam bentuk matematis. Refresentasi nilai konsentrasi ion yang terkandung dalam suatu larutan adalah x yang berasal dari bentuk matematis 10 x. Nilai matematis tersebut didapat dari perubahan fluktuasi yang terjadi pada konsentrasi ion hidronium yang memiliki rentang antara 10^{0}-10^{-14}. [15]

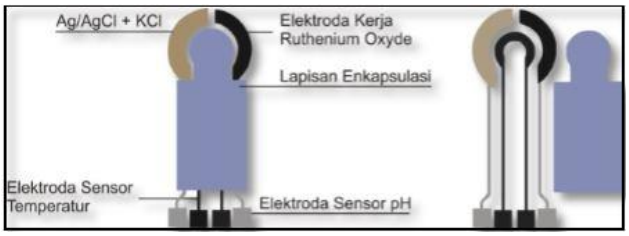
Sebelumnya sensor yang telah dibuat dengan menggunakan teknologi film tebal atau lebih dikenal sebagai *thick film* adalah sensor pH dan sensor temperature. Pada sensor tersebut sensor dibuat dalam alumina (Al_2O_3) yang berukuran 5 x 5 cm. Untuk ukuran terkecil dalam pembuatan sensor tersebut terletak pada jalur konduktor yaitu lapisan Silver Palladium AgPd yang besarnya sekitar 0,3 mm, sedangkan jarak dari jalur konduktor

terhadap tepi substrat yaitu sekitar 0,8 mm. Kemudian untuk lebar PAD sebagai tempat penyolderan sendiri adalah berjarak 2 mm. Lapisan yang berfungsi sebagai jalur resistor atau yang digunakan untuk jalur elektroda sensor temperature adalah senyawa ruthenium. Selain itu untuk ukuran terkecil dari jalur resistor pada desain ini memiliki jarak 0,3 mm dengan panjang dari ujung tepi ke ujung tepi adalah sekitar 20,65 mm.

Bahan-bahannya sendiri yang digunakan dalam pembuatan sensor ini antara lain adalah Silver Palladium yang digunakan untuk lapisan konduktor dan senywa Ruthenium kompleks yang digunakan untuk lapisan resistor. Selain kedua senyawa diatas elektroda kerjanya sendiri dengan menggunakan senyawa Ruthenium oksida, yang berfungsi sebagai bahan logam oksida yang tujuannya adalah sebagai logam yang dapat berinteraksi dengan ion-ion H^+ dalam larutan yang akan dideteksi oleh konsenstrasi ion H^+ tersebut. Pada lapisan elektroda referensi Ag di bagian sisi kiri dari elektroda konduktor, Ag dicelupkan kedalam sebuah larutan $FeCl_3$ sebesar 0,05 M selama 50 detik yang tujuannya adalah agar menghasilkan Ag/AgCl sebagai lapisan elektroda referensi melalui proses yang namanya klorinasi.

Elektroda referensi yang tersusun atasa AgCl dibuat dengan cara memanfaatkan proses klorinasi. Besi klorida yang telah disiapkan akan dimasukan Ag sehingga proses ini akan menghasil senyawa AgCl. Dengan proses ini senyawa akan terbentuk lebih cepat dan lebih seragam (homogeny). Dan jika ingin menggunakan air maka bisa dilakukan memlalui proses deonisasi.

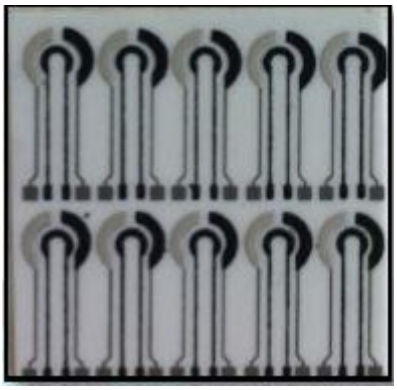
Setelah itu, di bagian atas lapisan elektroda referensi yaitu senyawa Ag/AgCl kemudian dilapisi kembali dengan menggunakan larutan KCl sebesar 3,5 M atau sekitar 7 %. Bukan hanya itu saja pada proses ini pula ditambahkan gelatin sebanyak 9% yang berfungsi sebgai zat perekat terhadap lapisan Ag/AgC.



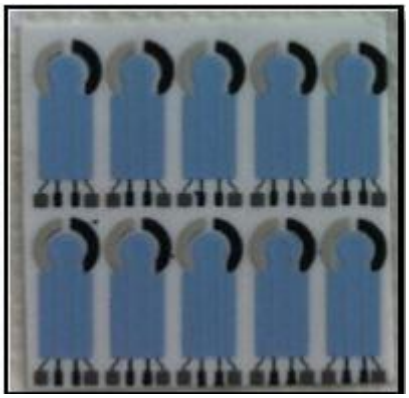
Gambar 2.1 Desain Elektroda Sensor pH dan Temperature[16]

Selanjutnya pada pembuatan elektroda untuk lapisan substrat alumina yang meliputi proes pembuatan film pada screen dengan ukuran 325 mesh, proses pencetakan material pasta pada sebuah substrat dengan menggunakan printer de Haart, dan juga proses pembakaran yang memerlukan suhu ekstrim yaitu sekitar 850 ^{0}C yang biasanya proses tersebut dilakukan dengan menggunakan mesin *firing* RTC. Semua proses tersebut merupakan proses fabrikasi sensor dengan menggunakan film tebal dengan teknik *screen printing*. Untuk proses pembuatan pola pada *screen* sendiri meliputi beberapa proses mulai dari proses pembersihan *screen*, pelapisan emulsi pada *screen*, dan juga proses pelapisan material pasta pada *screen* sesuai dengan pola film yang telah dibentuk pada *screen* yang berukuran 325 mesh. Gambar 2.2 substrat sebelum enkapsulasi menunjukkan substrat setelah proses pembakaran 850 ^{0}C sebelum

enkapsulasi, dan substrat setelah enkapsulasi ditunjukan pada Gambar 2.3 substrat setelah enkapsulasi.



Gambar 2.2 Substrat Sebelum Enkapsulasi[16]



Gambar 2.3 Substrat Setelah Enkapsulasi[16]

Pada proses pembakaran sebenarnya tidak dilakukan untuk semua lapisan pasta, melainkan proses pembakaran hanya dilakukan pada bahan material tertentu saja yang mampu bertahan pada suhu ekstrim yaitu 850 ^{0}C. Salah satu bahan yang mampu dan harus dibakar pada suhu tersebut diantaranya lapisan pasta AgPd, Ruthenium kompleks dan Ruthenium Oksida sebagai elektroda kerja. Hal tersebut dilakukan karena sifat bahan material yang digunakan pada proses pembuatan sensor tidak semua memerlukan dan tahan pada suhu yang sangat ekstrim yatu 850 ^{0}C. Jika

proses pembakaran pada temperature 850 ^{0}C telah selesai, Selanjutnya adalah substrat yang telah dilapisi dengan menggunakan pasta konduktor AgPd, pasta resistor, dan juga lapisan Ruthenium oksida sebagai lapisan elektroda kerja telah selesai selanjuutnya proses enkapsulasi. Proses enkapsulasi ini memerlukan temperature sebesar 100 ^{0}C dalam kurun waktu 5 menit. Untuk proses pelapisan elektrolit dan gelatin sendiri dilakukan setelah selesai proses pembakaran dan proses pemanasan pasta pada substrat yang telah selesai.

Pengujian yang dilakukan pada proses mikrofabrikasi meliputi beberapa pengujian. Pengujian tersebut diantaranya adalah pengujian nilai tahanan temperature yang dilakukan pada sensor temperature dan juga pengujian pH yang dilakukan pada beberapa sampel larutan. Untuk pengujian sampel larutan pH sendiri dilakukan pada ambang 2.5, 5.5, 9.5 dan juga 11.5. Setiap informasi yang didapat dari proses pengujian selanjutnya akan dibandingkan dengan pH meter komersial Lutron YK-2005WA.[16]

2.2.2 Sensor DO *(Dysolve Oxygen)*

Kian hari perkembangan teknologi sensor semakin berkembang sebelum dikembangkannya teknologi film tebal sensor DO dibuat dengan cara O_2-H_2 dari elektroda-elektroda Pt metal komposit. Pada pembuatannya pun menggunakan dua cara yaitu yang pertama lembaran foil Zr murni ditutupi oleh lapisan ZrHx dengan cara memanaskannya dalam hidrogen pada suhu 600 ^{0}C selama 3-4 jam yang kemudian dilapisi lapisan tipis

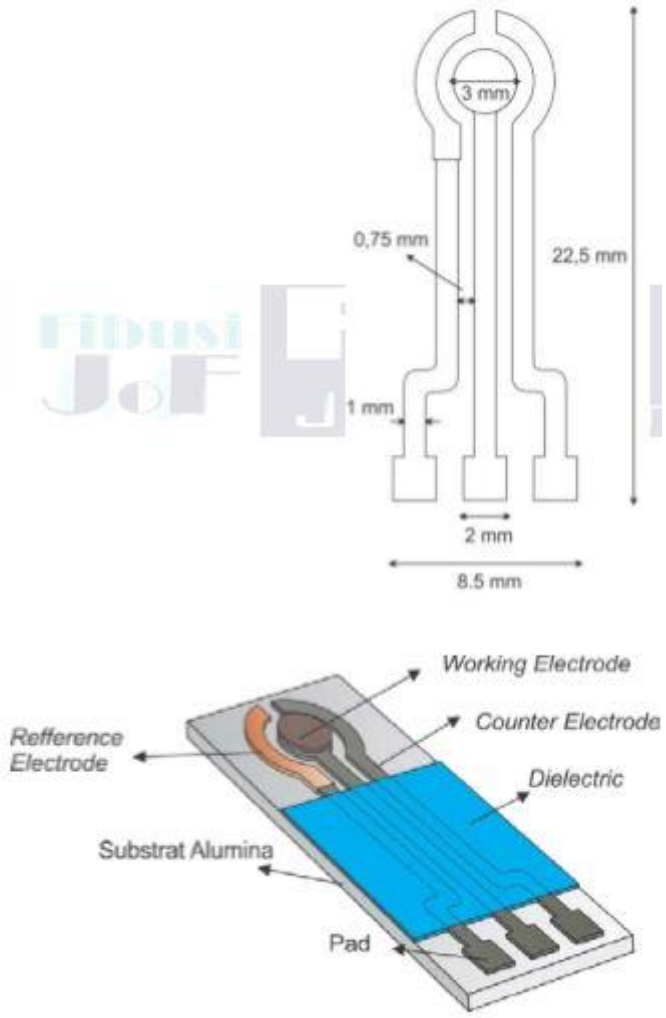
platinum. Yang kedua adalah bubuk hibrida stokiometri di tekan sedikit sampai berukuran 1cm yang kemudian diatasnya diletakan kawat tipis untuk ditekan kembali. Dimana konduktornya sendiri menggunakan membran fosfat a-zirkonium setelah proses penyaringan koloid ct-Zr (HPO_4). Begitulah kira-kira uraian singkat mengenai pembuatan sensor DO sebelum dikembangkannya teknologi film tebal.[17]

Pada penelitian sebelumnya penggunaan teknologi film tebal atau sering disebut sebagai *thick film* telah dilakukan khususnya untuk penggunaan pada sensor DO sendiri. Pada proses pembuatanya sensor yang tergolong kedalam sensor elektrokimia ini memiliki beberapa tahapan. Alasan sensor DO tergolong kedalam jenis sensor elektrokimiawi adalah karena bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan sensor tersebut memiliki kemampuan bereaksi terhadap proses perubahan konsenstrasi oksigen terlarut. Pada proses pembuatanya pun sensor ini telah dirancang sedemikian rupa menjadi sistem elektrokimiawi. Setelah perancangan tersebut sensor ini kemudian akan dilakukan proses analisis secara elektris yang tujuannya adalah agar dapat dipelajari setiap karakter serta unjuk kerjanya. Untuk lebih jelasnya proses pembuatan sensor DO dilakukan sebagai berikut:

a. Desain dan Fabrikasi Sensor

Pada proses Desain dan Fabrikasi ini proses penelitian dilakukan secara eksperimen yang terlebih dahulu melakukan perancangan desain komponen-komponen sensor dengan menggunakan aplikasi CorelDraw X7.

Setelah proses perancangan selesai kemudian desain sensor dicetak kedalam sebuah ortho film negative. Pada penelitian sebelumnya dijelaskan bahwa sensor DO tersusun atas 3 buah elektroda yang terlebih dahulu diminiaturasi kedalam sebuah substrat alumina yang berukuran 1 x 2.5 cm. Elektroda kerja yang digunakan pada pembuatan sensor DO ini dengan menggunakan logam RuO_2 . Penggunaan logam oksida seperti RuO_2, MnO_2, dan V_2O_5 dalam pembatan sensor sebenarnya mulai banyak dikembangkan. Hal tersebut dikarenakan logam-logam tersebut memiliki nilai konduktivitas yang baik. Bukan hanya itu saja logam-logam ini juga memiliki tingkat kesetabilan terhadap perubahan suhu jika dibandingkan dengan logam-logam lain seperti Au, Pt, maupun Ag. Larutan Ag/AgCl berfungsi sebagai elektroda pembanding dan AgPd berfungsi sebagai elektroda bantu yang juga dapat digunakan sebagai jalur konduktivitas pada substrat. Ketiga komponen elektroda tersebut dihubungkan oleh larutan tipis yang bersifat elektrol it jenuh yaitu KCl sebanyak 3.5 M. Sebagai perekat sendiri digunakan gelatin serta bagian luar dilapisi dengan lapisam TiO_2 yang berfungsi sebagai membran. Selain berguna sebagai perekat, gelatin pada elektrolit digunakan sebagai gelling agent yang berguna meningkatkan tingkat adhesitas antara lapisan elektrolit dan substrat. Desain sensor oksigen yang dibuat pada penelitian ini ditunjukan pada Gambar 3.4 Desain Sensor Oksigen Terlarut.



Gambar 2.4 Desain Sensor Oksigen Terlarut[18]

Dari setiap komponen sensor DO dicetak pada sebuah permukaan substrat dengan menggunakan teknik *screen printing*. *Screen* yang berukuran 325 mesh tadi digunakan sebagai masker. Proses pembentukan masker sendiri untuk setiap komponen sensor dilakukan dengan cara fotoresistif. Mesin yang digunakan untuk fotoresistif ini adalah mesin Richmond 3000T. Jika setiap masker berhasil dibuat, maka langkah selanjutnya adalah proses pencetakan pasta untuk tiap-tiap komponen sensor. Proses pencetakan dilakukan secara bertahap dengan menggunakan

mesin *screen* printer de haart. Untuk tiap-tiap proses pencetakan dilakukan proses pengeringan sekitar 15 menit dengan menggunakan oven yang berada di laboratorium. Oven tersebut di set pada suhu 150 ^{0}C yang berguna untuk mengeringkan pasta-pasta yang telah dicetak dan juga berfungsi untuk menghilangkan pengotor-pengotor yang terdapat pada substrat. Jika setiap komponen sensor telah berhasil dicetak maka tahap selanjutnya adalah proses pembakaran atau sering kita sebut sebagai proses *firing*. Pada proses *firing* ini substrat akan dibakar dengan menggunakan mesin RTC selama 45 menit pembakran dengan suhu puncak sekitar 800 ^{0}C. Hal tersebut dilakukan berguna untuk mengembangkan struktur pasta dan meningkatkan kerekatan antara pasta dan substrat.

Larutan elektrolit KCl sebanyak 3.5 M digunakan sebagai penghubung elektris pada lapisan elektroda yang telah disintesa dalam bentuk gel. Proses sintesa dalam bentuk gel tersebut memerlukan penambahan gelatin sebagai gelling agent. Proses pembentukan gelling agent sendiri memerlukan bantuan magnetic stirrer yang kemudian akan ditempelkan pada area kerja elektroda. Proses pembentukan larutan elektrolit dalam bentuk gel ini dilakukan untuk memudahkan pengoprasian sensor. Hal tersebut dilakukan karena media cetak yang dalam hal ini berupa alumina tidak dapat mengkomodir komponen sensor dalam bentuk cairan seperti halnya sensor oksigen terlarut konvensional. Gelatin sendiri memiliki sifat kimiawi yang netral oleh karena itu gelatin ini tidak akan mempengaruhi fungsional dari larutan elektrolit. Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Suhanda, H. dinyatakan bahwa

penggunaan larutan elektrolit jenuh sebanyak 3.5 M menghasilkan nilasi arus difusi yang lebih stabil. Variasi proses penambahan gelatin sebanyak 5 %, 7% dan 9% pada lapisan elektrolit KCl sebesar 3.5 M dan lapisan elektrolit KCl sebanyak 3.5 M tanpa gelatin dilakukan untuk mengetahui penggunaan gelatin pada elektrolit yang nilainya optimum untuk operasional sensor. Pada proses fabrikasi ini sensor oksigen terlarut diakhiri dengan pemasangan pasta TiO_2 yang berguna sebagai membran pada proses *screen printing*.

b. Pengujian dan Karakterisasi

Pada proses pengujian dan karakterisasi ada beberapa hal yang perlu diperhatikan. Yang pertama adalah karena sensor pengukur kadar oksigen terlarut termasuk kedalam sel elektrolisis yang mengkibatkan dalam proses kerjanya dibutuhkan pemantik berupa tegangan luar konstan. Hal tersebut dilakukan karena agar pada proses reaksi yang diinginkan pada elektroda sensor dapat tercipta dengan sempurna. Yang kedua adalah pemberian tegangan dari luar sendiri haruslah tepat agar didapatkan performa sensor yang lebih baik. Untuk itu pengujian awal terhadap pemilihan tegangan dari luar atau potensial kerja diperlukan sebelum proses pengkarakterisasian sensor dilakukan. Pemilihan potensial kerja yang optimum dilakukan dengan membuat profil polerogram arus terhadap tegangan dalam rentang potensial antara 0.1 V sampai 1.6 V. Pemilihan tegangan harus dari wilayah batas atas arus (limiting current) maksudnya adalah wilayah rentang tegangan yang memberikan arus yang relative stabil terhadap potensial kerja setelah peningkatan arus yang sangat tajam.

Jika proses pemilihan potensial kerja optimum telah dilakukan, maka untuk selanjutnya adalah pengujian terhadap setiap substrat. Pengujian pada substrat sendiri memiliki rentang yang berbeda-beda yaitu mulai dari rentang kadar oksigen 3.0 mg/L sampai dengan 11.7 mg/L. Setelah proses tersebut selesai maka selanjutnya dilakukanlah kalibrasi yang tujuannya adalah mendapatkan karakteristik-karakteristik dari sensor tersebut. Bukan hanya itu saja pengujian performa sensor pun harus dilakukan. Dengan menggunakan metoda berulang maka pengujian performa sensor dikatakan selesai sehingga dari proses pengujian sensor tersebut kita dapat mengetahui unjuk kerja sensor yang telah dibuat. [18]

2.3 Mikrokontroler Arduino



Gambar 2.5 Arduino[19]

Arduino adalah sebauah kit elektronik atau dapat kita sebut sebagai rangkaiaan elektronik yang didalamannya telah tertanam komponen utama yaitu sebuah chip mikrokontroler dengan jenis AVR dari perusahaan yang bernama Atmel. Pada kenyataannya Mikrokontroler sendiri yaitu terbentuk dari bebrapa transistor yang digabungkan menjadi sebuah IC (Integrated Circuit)

yang mana kelebihannya adalah dapat di sisipkan program melalui pemrograman komputer. Tujuan ditanamakannya program pada mikrokontroler adalah untuk menjalankan perintah algoritma sesuai dengan apa yang telah dibuat oleh rogramer itu sendiri. Algoritma nya sendiri biasanya terdiri atas input, proses, dan output.[20]

Dalam pemrograman Arduino harus memiliki dua fungsi yang disebut dengan subrutin yaitu rutin *setup* dan rutin *loop*. Rutin *setup* akan dijalankan satu kali pada saat program Arduino dijalankan *(running)* dan rutin *loop* akan dijalankan setelah rutin *setup* selesai dijalankan. Rutin *loop* ini akan dijalankan terus-menerus sampai dengan daya dimatikan.

Pada pemrograman Arduino tentunya ada sebuah komentar yang digunakan. Komentar ini bersifat opsional namun sangat bermanfaat untuk memperjelas setiap baris intruksi yang dibuat bagi programmer dan sangat bermanfaat pada saat *maintance* program sehingga programmer dapat dengan mudah mencari prosedur ataupun baris data yang diperlukan. Untuk komentar satu baris dapat digunakan "//" (dua buah garis miring), sedangkan untuk komentar yang lebih dari satu baris *(multi line comment)* dapat diawali dengan symbol "/*" (garis miring dan bintang) dan diakhiri dengan symbol "*/" (bintang dan garis miring).

Symbol-simbol yang digunakan dalam pemrograman Arduino berbeda-beda dan memiliki fungsi masing-masing sesuai dengan karakterisasinya. Symbol-simbol tersebut diantaranya *Curly Bracket, Semicolon,* dan Variabel. Symbol "{" dan "}" (*bracket)* digunakan untuk menentukan awal dan akhir

dari sebuah blok kode program. Symbol ini biasanya digunakan pada fungsi dan juga *loop*. Symbol ";" (titik koma) digunakan untuk mengakhiri setiap baris program. Setiap intruksi harus diakhiri dengan titik koma, sehingga tidak adanya symbol ini dapat menyebabkan gagalnya kompilasi program. Variable adalah tempat untuk menyimpan atau memindahkan angka maupun karakter di dalam program. Variable merpakan sebuah cara untuk menamai dan menyimpan sebuah nilai yang akan digunakan pada program, seperti data dari sensor atau sebuah nilai sementara pada sebuah perhitungan. Varibel yang akan digunakan harus dideklarasikan terlebih dahulu. Ketika mendeklarasikan sebuah variable berarti mendefinisikan tipe varibel dan mungkin saja dapat juga memeberikan inisialisasi nilai dari varibel tersebut. Varibel tidak harus diberikan inisialisasi nilai ketika dideklarasikan tapi hal tersebut juga sering berguna jika dilakukan. Seorang *programmer* harus mempertimbangkan rentang nilai tipe varibel sebelum menyimpan sebuah nilai. Pada variable akan terjadi *roll over* ketika nilai yang disimpan melebihi rentang nilai yang diberikan untuk menyimpan pada tipe data tersebut. Ketika terjadi *roll over* maka varibel akan kembali ke kapasitas minimum varibel dari rentang yang ada. Dalam memberikan nama variable adalah kita dapat memberikan nama varibel sesuai keinginan kita, namun hindari pemberian nama variable diawali dengan angka dan hindari *keyword* (kata kunci) yang digunakan oleh Aeduino.

Varibel dalam Bahasa C yang digunakan oleh Arduino memiliki property yang disebut dengan *scope*. Hal ini tentu sangat berbeda dengan Bahasa BASIC, karena semua varibelnya adalah varibel global. Varibel global adalah varibel yang dapat digunakan oleh semua fungsi di dalam pemrograman.

Varibel local adalah varibel yang hanya dapat digunakan di dalam satu fungsi tempat varibel tersebut dideklarasikan. Dalam ruang lingkup Arduino, semua varibel yang dideklarasikan di luar suatu fungsi (misalnya *setup(), loop()* dan fungsi-fungsi lainnya) adalah variable global. Ketika program semakin besar dan kompleks, maka varibel local sangat bermanfaat karena varibel local pasti hanya dapat diakses oleh suatu fungsi yang memilikinya. Hal tersebut mencegah kesalahan pada pemrograman yang dikarenakan suatu fungsi mengubah isi atau nilai dari suatu variable yang digunakan oleh fungsi lain.[21]

2.3.1 Tipe Data

Beberapa contoh tipe data pada pemrograman Bahasa C yang digunakan untuk Arduino adalah sebagai berikut

1. **Int (integer)**: tipe data ini memiliki rentang antara -32.786 sampai dengan +32.786. Tipe data ini menghabiskan 2 byte (16 bit) dari RAM.
2. **Long :** tipe data ini digunakan ketika terdapat varibel yang tidak dapat diakomodasikan oleh tipe data integer. Tipe data ini menghabiskan 4 byte (32bit) dari RAM dengan rentang nilai antara -2,147,648 sampai dengan 2,147,483,648.
3. **Boolean:** tipe data sederhana dengan nilai *True* dan *False.* Tipe data ini menghabiskan 1 bit dari RAM.
4. **Float:** tipe data ini digunakan untuk bilangan *floating point.* Tipe data ini menghabiskan 4 byte (32 bit) dari RAM dengan rentang nilai antara -32.4028235E+38 sampai dengan -3.4028235E+38.

5. **Char:** tipe data karakter menggunakan kode ASCII misalnya ‘A’ = 65. Tipe data ini menghabiskan 1 byte RAM. Arduino dapat menangani *string* sebagai array karakter.

2.3.2 Operator

Terdapat dua jenis operator pada Arduino, yaitu operator matematika yang digunakan untuk operasi matematika dan operator pembanding yang biasanya digunakan pada operasi percabangan untuk membandingkan dua nilai varibel. Operator matematik digunakan untuk memanipulasi angka. Adapun operator matematika yang digunakan adalah operator sama dengan (“=”), modulo (“%”), penjumlahan (“+”), pengurangan (“-“), perkalian (“*”), dan pembagian(“/”).

Operator pembanding digunakan untuk operasi logika perbandingan antara dua nilai atau antara dua varibel. Operator yang digunakan adalah sama dengan (“==”), tidak sama dengan (“!=”), lebih kecil (“<”), dan lebih besar(“>”).

Bitwise Operator digunakan untuk melakukan kalkulasi varibel pada level bit. Operator yang digunakan adalah *and, or, xor, not, left,* dan *right.* Selain operator-operator yang digunakan diatas ada juga operator *Boolean* yaitu and, or, dan not.

2.3.3 Struktur Kondisi

Struktur kondisi biasa digunakan untuk menyeleksi apa yang akan dieksekusi selanjutnya oleh program berdasarkan kondisi yang terpenuhi pada ekspresi yang diberikan. Ada beberapa struktur kondisi diantaranya

adalah struktur kondisi IF, kondisi IF-ELSE, kondisi IF.ELSE IF.ElSE, dan struktur kondisi *switch case*.

2.3.4 Perulangan

Perulangan digunakan untuk mengulang satu pernyataan atau beberapa pernyataan yang terdapat di dalam blok perulangan selama kondisi yang diberikan dalam ekspresinya terpenuhi. Pada bagian ini akan dibahas perulangan menggunakan perulangan For dan perulangan while. Perulangan *For* digunakan untuk mengulang suatu blok pernyataan yang berada pada blok perulangan. *Counter* penjumlah biasanya digunakan untuk menaikan (*increment)* dan menghentikan perulangan. Pernyataan *For* sangat berguna untuk operasi yang berulang dan sering digunakan dalam kombinasi terkait *array* untuk mengoprasikan kumpulan data ataupun pin.

Pada bagian inisialisasi akan dieksekusi sekali dan pertama kali. Setiap kali masuk ke dalam perulangna maka kondisi akan diperiksa, jika *true* maka *statement* akan dieksekusi kemudian bagian *increment* juga akan dieksekusi, selanjutnya kembali pada bagian pemeriksaan kondisi. Ketika kondisi *false* maka proses perulangan berakhir.

Perulangan *while* biasanya digunakan untuk perulangan yang terus berulang tanpa henti sampai dengan ekspresi yang berada di dalam bagian kondisi menjadi *false*. Bagian inisialisasi pin I/O merupakan bagian penting, karena pengturan ini akan menetukan apakah pin yang digunakan sebagai pin input atau pin output atau pin yang akan digunakan harus membaca sinyal analog. Pengaturan digital pin pada baris pertama. Pin digital 2

arduino diatur menjadi pin input sedangkan pada baris kedua, pin digital 3 arduino diatur menjadi pin output. Untuk mengatur keadaan suatu pin yang telah diatur sebagai pin OUTPUT pada Arduino, misalnya keadaan HIGH, atau LOW pada suatu pin dapat digunakan sintaks sebagai berikut.

Pin analog Arduino digunakan untuk membaca masukan sinyal analog dari suatu pin dan menuliskan sinyal analog pada suatu pin. Untuk menuliskan sinyal analog pada suatu pin yang telah di setting sebagai pin OUTPUT dapat digunakan baris perintah *int analogWrite(pin, value)*. Beberapa pin Arduino mendukung PWM *(Pulse Width Modulation)* dengan nilai keluaran antara 0 dan 255. Untuk membaca masukan input dapat digunakan baris perintah *int analogRead(pin)*. Pada baris perintah tersebut kita dapat membaca nilai tegangan antara 0 dan 1024.[21]

2.4 Display LCD

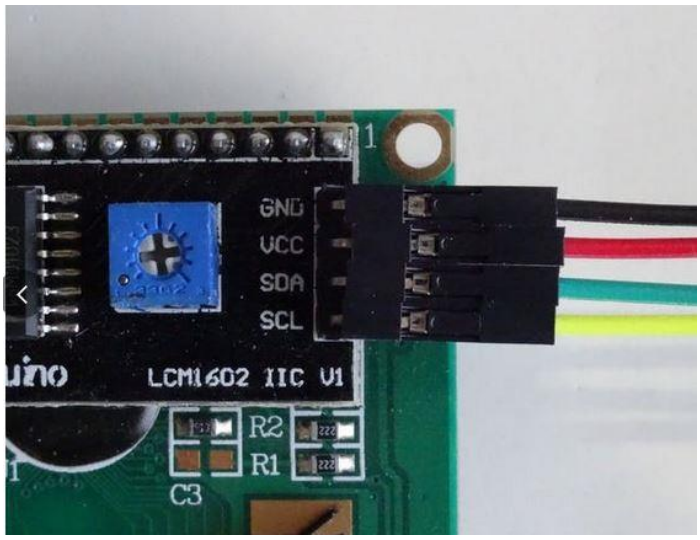


Gambar 2.6 LCD 16 x 2[22]

LCD yang digunakan adalah LCD 16x2 yang berarti 16 kolom dan 2 baris. Untuk dapat melakukan pemrograman dengan menggunakan Arduino anda perlu menambahkan *library* yang bernama *LiquidCrystal.h.* adapun

langkah-langkah dan rangkaiaan jika anda hendak melakukan pemrograman adalah menghubngkan VSS dengan GND, hubungkan VCC LCD dengan VCC, hubungkan VEE LCD dengan pin output dari potensiometer, hubungkan pin paling kanan dari potensiometer dengan GND, hubungkan pin paling kiri dari potensiometer dengan VCC, hubungkan pin RS LCD dengan pin digital 8 arduino, hubungkan pin (R/W) LCD dengan GND, hubungkan pin E LCD dengan pin 9 digital Arduino, hubungkan DB4 LCD dengan pin digital 7 Arduino, hubungkan DB5 LCD dengan pin digital 6 arduino, hubungkan pin DB6 LCD dengan pin digital 5 arduino, hubungkan pin 14 DB7 LCD dengan pin digital 4 arduino, hubungkan pin BPL LCD dengan kaki katode dari diode yang kemudian kaki anode dari diode dengan VCC. Setelah selesai membuat rangkaiaan selanjutnya adalah membuat sketch pada Arduino IDE yang anda bisa dapatkan di internet atau di situs resmi pemrograman Arduino. [21][23]

2.5 Serial dan I2C



Gambar 2.7 I2C[24]

Komunikasi transfer data pada elektronika yang paling banyak digunakan adalah komunikasi serial. Penggunaan komunikasi serial dilatarbelakangi oleh lebih sedikitnya memerlukan penggunaan hardware dibandingkan serial sehingga dianggap lebih efisien. Pada mulanya komunikasi serial berjenis I2C dikembangkan oleh Philips pada era tahun 1980-an. Penganbangan transfer datanya tersebut memiliki kecepatan yang sangat kecil. Berbeda dengan saat ini kecepatan transfer data berjenis I2C telah mencapai 4 Mbps. Kecepetan tersebut lebih dari cukup untuk memenui kebutuhan saat ini. Yang diperlukan dalam melakukan komunikasi serial I2C adalah penggunaan dua kabel saluran. Penggunaan dua kabel saluran tersebut menjadikan penyebutan dalam komunikasi ini menjadi TWI atau disebut Two Wire Interface. Yang menjadi kelebihan utama dari sistem komunikasi I2C adalah penggunaan salurannya hanya cukup dengan menggunakan 2 saluran. Jika dibandingkan dengan komunikasi lain yang memerlukan penyetelan *baudrate* komunikasi jenis ini dirasa lebih mudah. Komunikasi ini juga dapat melakukan komunikasi lebih dari dua perangkat elektronika dalam dua bus yang berfungsi untuk membedakan setiap slave yang digunakan. Pengalammatan yang berbeda-beda memungkinkan kesalahan informasi yang dikirim menjadi lebih kecil. Selain itu untuk melakukan komunikasi ini diperlukan master yang selalu terhubung ke slave pada setiap komunikasi.

SCL dan SDA digunakan dalam komunikasi serial ini yang menjadi bus-bus saluran. SCL atau disebut dengan Serial Clock pada komunikasi ini berfungsi untuk menyelaraskan data yang ada baik yang terdapat pada master maupun slave. Sedangkan SDA atau disebur Serial Data berfungsi sebagai

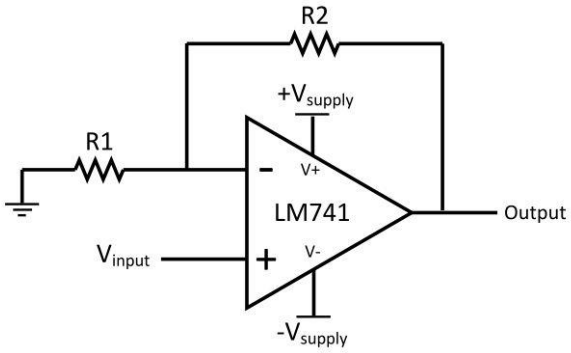
saluran data. Proses pengiriman yang dilakukan oleh master dengan cara memberikan sinyal berupa tanda *stop* yang kemudian diikuti proses transfer data 8 bit. Dan jika proses tersebut telah selesai maka master pada komunikasi tersebut akan mengirimkan sinyal kembali bahwa proses komunikasi data telah selesai.

Selain sinyal yang bertanda stop ada juga sinyal *acknowledge* atau disingkat ACK. Sinyal ini memiliki karakteristik pengiriman yang dilakukan oleh *slave*. Hal tersebut bertujuan untuk memberikan tanda bahwa 8 bit data sudah semuanya diterima dari master. Pada proses komunikasi sinyal ACK harus bernilai Low yang menunjukkan bahwa slave siap untuk menerima 8 bit data selanjutnya. Jika terjadi nilai High pada komunikasi ini maka yang akan terjadi adalah *slave* akan mengirim sinyal stop yang menandakan proses transfer data yang terjadi telah berakhir.

Biasanya dalam suatu sistem perancangan terdapat beberapa mikrokontroler untuk melakukan komunikasi serial. Prinsip untuk melakukan komunikasi ini adalah dengan menggunakan salah satu dari mikrokontroler tersebut sebagai *master* dan yang lainnya sebagai *slave*. Clock yang digunakan dalam komunikasi ini berasal dari *master* yang digunakan untuk singkronisasi data. Biasanya kendala utam yang terjadi pada proses ini adalah pengiriman data yang dilakukan oleh *slave* tidak dapat melakukan proses pengiriman secara langsung. Hal tersebut terjadi karena slave juga memerlukan alamat data yang diminta oleh mikrokontroler yang digunakan sebagai *master*. Beberapa proses tersebut memerlukan waktu tertentu, dan jika proses tersebut tetap berlangsung maka haslinya data yang diterima dari *slave* akan eror. Dengan demikian

singkronisasi antara mikrokontroler yang berfungsi sebagai *slave* dan *master* diperlukan. Untuk melakukan singkronisasi tersebut dilakukan dengan cara menambah SCl pada keadaan *Low* ketika pertama kali menerima perintah untuk menyiapkan data yang akan diminta. Setelah bagian dari *slave* siap maka selanjutnya SCL akan kembali lagi menjadi *high*. Dan untuk bagian mikrokontroler yang berfungsi sebagai *master* akan melakukan perintah clock pada SCL. Hal tersebut dilakukan agar *master* dapat membaca *slave* yang diikuti dengan pengecekan berulang pada SCL untuk mengetahui posisi *low* atau *high.* [25]

2.6 Rangkaiaan Penguat OP-AMP



Gambar 2.8 Rangkaian Penguat[26]

Istilah penguat operasional sebenarnya adalah gambaran umum tentang sebuah penguat yang dirasa sangat penting. Hal tersebut berdasar atas karena penguat ini terbentuk dari rangkaiaan-rangkaiaan penguat audio, video, penyaring atau sering disebut tapis, *buffer*, penggerak-penggerak saluran, penguat instrumentasi, komparator(pembanding tegangan), osilator, dan berbagai macam rangkaiaan analog lainnya. Biasanya penguat operasional ini memiliki nama umum yang sangat singkat atau disingkatkan dari bahasa inggris

yaitu Op-Amp. Meskipun rangkaiaan penguat operasional ini sering dirancang dari rangkiaan dan komponen-komponen yang bersifat diskrit, namun hampir seluruhnya selalu digunakan dalam bentuk rangkaiaan yang terintegrasi.

Op-Amp pada dasarnya merupakan sebuah blok komponen yang sederhana. Yang mana Op-Amp ini akan memiliki dua buah terminal masukan. Salah satu masukan dari keduanya disebut sebagai masukan pembalik yang diberi tanda minus (-) sementara satu masukan lagi disebut sebagai masukan non-pembalik yang biasannya diberi tanda postif (+). Pada umumnya Op-Amp memiliki satu buah keluaran atau hasil keluarannya adalah tunggal. Akan tetapi beberapa jenis Op-Amp khusus yang umumnya digunakan pada rangkiaan-rangkaiaan frekuensi radio dapat memiliki dua buah terminal keluaran. Namun dalam laporan ini saya hanya akan menggunakan Op-Amp yang memiliki keluaran tunggal.

Sebuah Op-Amp juga memiliki dua buah saluran yang dihubungkan pada catu daya yang mana masing-masing dari saluran tersebut memiliki hubungan positif dan hubungan negative. Namun, banyak sekali terdapat Op-Amp yang memiliki saluran catu daya tengah. Yang mana saluran tersebut terhubung dengan pertanahan meskipun Op-Amp itu sendiri tidak memiliki hubungan saluran catu daya tengah saluran yang bersifat khususus. Beberapa jenis Op-Amp yang lainnya lagi, dirancang secara khsusu untuk operasi dengan suplai atau catu daya tunggal.

Op-Amp adalah merupakan sebuah penguat arus searah yang mana garis gainnya memiliki besar lebih dari 100.000 atau lebih besar dari 100 dB. Dengan

menggunakan kopling kapasitif yang tepat, Op-Amp dapat duganakan dan diaplikasikan pada berbagai macam rangkaiaan-rangakaiaan penguat arus bolak-balik. Tegangan keluaran dari terminal Op-Amp merupakan hasil perkalian antara selisih tegangan diantara masukan pembalik dan non-pembalik yang mana besarnya gain yang dimiliki. Dengan demikian Op-Amp dapat dikatakan sebuah penguat yang dikategorikan kedalam penguat diferensial. Jika masukan pembalik (yang memiliki tanda -) memiliki potensial yang lebih besar maka tegangan keluaran dari hasil pemerosesan akan memiliki nilai yang lebih negatif. Dan juga demikian pula sebaliknya jika masukan non pembalik (yang memiliki tanda +) memiliki potensial yang lebih tinggi maka tegangan keluaran Op-Amp akan memiliki nilai yang lebih positif. Hal tersebut terjadi karena gain yang dimiliki dari Op-Amp pada umumnya sangatlah tinggi maka tegangan diferensial di terminal-terminal masukannya biasanya sangat kecil.

Untuk dapat menjalankan fungsinya secara baika, maka Op-Amp harus disipkan umpan balik dalam setiap rangkaiaanya. Hampir seluruh rancangan rangkaiaan yang ada pada umunya menggunakan umpan balik negatif untuk mengendalikan besarnya penguatan serta memperoleh operasi kerja yang dapat dikatakan linier pada Op-Amp itu sendiri. Umpan balik negatif dapa tdiperoleh melalui penggunaaan komponen-komponen rangkaiaan, misalnya pada resistor yang dihubungkan di antara terminal dari keluaran Op-Amp dan masukan pembalik Op-Amp yaitu terminal masukan yang memiliki tanda negatif (-). Rangkaiaan-rangkiaan lain yang bersifat non-linier adalah komarator (pembanding tegangan) dan juga osilator, menggunakan umpan balik positif yang dapat diperoleh dengan cara menghubungkan antar komponen, mislanya

resistor diantara terminal keluaran Op-Amp dan masukan non-pembaliknya, yaitu masukan terminal yang memiliki tanda positif (+).

Terkait dengan penggunaan Op-Amp ini, sebenarnya tidaklah terlalu penting bagi para pengguna untuk mengenal dan mengetahui secara detail rangkaiaan internal dari Op-Amp yang bersangkutan. Namun demikian, sedikit pengetahuan mengenai rangkaiaan internal ini akan jauh lebih baik dan juga dapat membantu pemahaman kita sebagai pengguna khsusunya. Adapun mengenai hal-hal yang terkait dengan rangkaiaan-rangkaiaan masukan dan hasil keluaran Op-Amp harus difpahami agar dalam perancangan tidak salah kaparah. Para pengguna juga sebaiknya memahami dan mengerti betul-betul fungsi dari masing-masing terminal eksternal yang mana informasinya dapat diperoleh dari pembuatnya. Untuk dapat memilih jenis penguat terbaik yang cocok untuk suatu aplikasi tertentu yang dinginkan, pengguna harus dapat paham dan juga mengenal secara baik istilah-istilah yang sring digunakan dalam menspesifikasikan kinerja dari sebuah Op-Amp.

2.6.1 Umpan balik dan Op-Amp Ideal

Terdapat dua macam dasar untuk memberikan umpan balik (*feedback)* pada Op-Amp. Pada sebuah rangkaiaan dasar, sinyal yang diumpanbalikan dari terminal keluaran ke terminal masukan Op-Amp adalah berbanding lurus terhadap tegangan keluarannya. Umpan balik terjadi melalui resistor yang terhubung diantara terminal keluaran dan terminal masukan pembalik Op-Amp. Pembalikan fasa pada penguat ini

memberikan jaminan bahwa umpan balik yang diperoleh adalah umpan balik negative.

Prinsip kerja rangkaiaan dasar Op-Amp dapat dipahami dengan baik jika diasumsikan bahwa terdapat suatu tegangan positif e_ε yang cukup kecil di antara terminal-terminal diferensial masukan penguat. Tegangan keluaran Op-Amp akan sama dengan suplai negative karena gain Op-Amp adalalah tak berhingga. Sinyal umpan balik yang diperoleh akan berlawanan dengan e_ε sehingga memaksa tegangan masukan diferensial menuju nol. Misalkan e_ε adalah suatu tegangan negative yang cukup kecil. Tegangan keluaran yang diperoleh adalah berlawanan dengan e_ε. Dengan demikian, sekali lagi akan kita proleh bahwa umpan balik ini akan memaksa tegangan masukan diferensial menuju nol.

Konsep yang dijelaskan diatas meunjukan salah satu hal yang amat penting sehingga perlu untuk dinyatakan kembali kedalam bentuk atau ungkapan yang lain. Jika keluaran Op-Amp diumpanbalikan ke terminal masukan pembalik maka tegangan keluaran akan selalu mengambil nilai tersebut yang dibutuhkan untuk membuat tegangan masukan diferensial menjadi nol. Untuk Op-Amp ideal yang memiliki gain (penguatan) tak berhingga, tegangan kesalahan e_ε, adalaha sama dengan nol.

Pada kasus-kasus Op-Amp rill atau nyata yang kita temui dalam penggunaan sehari-hari yang memimiliki gain (penguatan) cukup besar tetapi berhingga, tegangan kesalahan, e_ε, akan bernilai sangat kecil tetapi tidak sama dengan nol.

Aspek dasar yang kedua dari rangkaiaan ideal diperoleh dari pengasumsian yang kita lakukan terhadap impedansi masukan penguat yang diasumsikan tak berhingga. Dalam rangkaiaan dasar ideal tidak akan terdapat arus listrik yang mengalir kedalam Op-Amp shingga setiap arus yang menuju titik x, sebagai hasil dari pemberian sinyal masukan, harus mengalir melalui lintasan umpan balik R_2.

Jika selain daripada resistor R_1 yang dihubungkan dengan terminal masukan pembalik terdapat beberapa alternative lintasan sinyal lain, jumlah dari beberapa arus yang menuju titik x tetaplah harus mengalir melalui lintasan umpan balik. Oleh karena itu alasan ini, terminal masukan pembalik fasa dari sebuah penguat operasional seringkali disebut sebagai titik penjumlahan dari penguat.

Dua aspek mendasar dari kinerja Op-Amp ideal ini disebut sebagai batas-batas titik penjumlahan, yang mana keduanya sangatlah penting untuk dipahami sehingga dipandang perlu untuk dirumuskan kembali kedalam poin-poin sebagai berikut:

1. Apabila umpan balik negative diberikan pada sebuah penguat ideal, tegangan masukan diferensial adalah sama dengan nol.
2. Tidak ada arus yang mengalir pada kedua terminal masukan sebuah penguat ideal

Kedua pernyataan diatas merupakan prinsip-prinsip dasar yang digunakan dalam melakukan analisis yang disederhanakan untuk rangkaiaan-rangkaaian umpan balik operasional. Kita akan menggunakan

kedua dasar aspek ini dalam menurunkan ungkapan-ungkapan untuk gain penguat dari rangkaiaan dasar ideal. Masukan non-pembalik terhubung dengan titik pentanahan. Akan tetapi seperti dijelaskan sebelumnya bahwa dengan adanya umpan balik negative maka tegangan masukan diferensial menjadi nol sehingga masukan pembalik Op-Amp akan dikenal juga sebagai titik pentanahan virtual. Arus I_i yang mengalir pada resistor R_1 dapat ditentukan besarnya dengan membagi tegangan masukan dengan nilai resistansi R_1. Atau dalam bentuk ungkapan yang lain, tegangan masukan Op-Amp adalah sama dengan besarnya arus I_i dikalikan dengan besarnya nilai resistansi R_1. Oleh karena tidak ada arus yang mengalir pada terminal-teminal masukan Op-Amp maka arus yang mengalir pada resistor R_1 akan sama dengan besar arus yang mengalir pada R_2. Tegangan keluaran Op-Amp adalah negative dari hasil perkalian antara I_i dan R_2. Gain atau penguatan (disimbolkan dengan cara huruf A kata *amplication* yang bermakna penguatan) dapat diperoleh dengan cara membagi tegangan keluaran dengan tegangan masukan Op-Amp sebagai berikut:

$$A = -\frac{I_i R_2}{I_i R_1} \quad \text{..... (2.13)}$$

Dengan saling membagi suku sama , I_i dapat diperoleh:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{..... (2.14)}$$

Jika nilai R_2 lebih kecil daripada R_1 maka akan diperoleh gain yang merupakan nilai pecahan yang kurang dari 1.

Untuk kasus penguatan non-pembalik tegangan pada kedua terminal masukan Op-Amp haruslah sama besar untuk membuat tegangan masukan difeensial sama dengan nol. Pada kedua terminal masukan Op-Amp ini tidak akan ada arus yang mengalir sehingga resistor-reisot pembagi tegangan R_1 dan R_2 akan menetukan besarnya nilai tegangan yang akan diberikan pada masukan pembaliknya. Dengan demikian, tegangan $e_i = e_A$ akan dikenakan pada terminal masukan non-pembalik yang akan menyebabkan tegangan keluaran Op-Amp menjadi bernilai positif sampai diperoleh fraksi tegangan pada terminal masukan pembalik yang memiliki nilai yang dapat memaksa agar potensial $e_B = e_A$.

Fraksi tegangan pada masukan pembalik diberikan oleh persamaan berikut ini:

$$e_B = \frac{e_0 R_1}{(R_1+R_2)} \quad \text{(2.15)}$$

Umpan balik yang diberikan akan memaksa kedua masukan untuk memiliki poensial yang sama yaitu $e_B = e_A$ sehingga:

$$e_B = e_A = \frac{e_0 R_1}{(R_1+R_2)} \quad \text{(2.16)}$$

Gain Op-Amp adalah e_0/e_1, sehingga dengan mentransposisi di atas dapat diperoleh:

$$A = \frac{e_0}{e_1} = \frac{R_1+R_2}{R_1} \quad \text{(2.17)}$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{(2.18)}$$

Berdasarkan persamaan terkahir ini dapat kita lihat bahwa gain rangkaiaan Op-Amp tidak akan pernah lebih kecil daripada 1. Hubung singkat di antara terminal keluaran dan masukan pembalik akan menciptakan suatu rangkaiaan yang kita kenal dengan nama "*buffer"* yang memiliki gain sama dengan satu. Secara teori *buffer* akan memiliki impedansi masukan yang tak berhingga serta nilai impedansi keluaran yang sama dengan nol.

Penguat jenis pembalik dan non-pembalik memiliki dua perbedaaan utama. Perbedaan yang pertama adalah tanda dari gain loop tertutupnya. Adapun perbedaan yang kedua dan yang lebih penting untuk dicermati ialah perbedaan pada nilai resistansi masukan efektifnya yang diperlihatkan oleh sinyal sumber e_i.

Resistansi masukan efektif dari inverter ideal yang diukur pada titik penjumlahan penguat adalah sama dengan nol. Rangkaiaan umpan balik dapat mencegah terjadinnya perubahan nilai tegangan pada titik ini, titik ini berlaku sebagai titik pentanhan virtual. Penting untuk dicatat bahwa setiap arus yang disuplaikan ke titik sesungguhnya tidak mengalir ke tanah akan tetapi mengalir pada lintasan umpan balik resistor R_2. Resistor R_1 dengan demikian akan menetukan besarnya arus masukan I_i yang ditunjukan oleh sinyal sumber akan sama dengan nilai resistansi R_1.

Ungkapan untuk rangkaiaan loop tertutup sederhana memperlihatkan bahwa, dalam kasus ideal, gain Op-Amp hanya akan bergantung pada besarnya nilai dari komponen-komponen seri dan umpan

balik dan bukan pada penguat itu sendir. Penguat yang rill yang kita temui dalam penggunaan sehari-hari adalah berbeda dengan penguat ideal yang telah kita bahas sejauh ini. Penyimpangan-penyimpangan dari kondisi ideal ini dikenal sebagai kesalahan-kesalahan (*errors).* Kesalahan-kesalahan ini dapat diusahakan agar bernilai sekecil mungkin sehingga salah satu sifat utama Op-Amp yang dapat digunakan dalam pendekatan perancangan rangkaiaan analog ialah tingkat akurasinya yang tinggi yang memungkinkan kita untuk menetukan nilai gain dan impedansi dengan baik.[27]

2.6.2 Beberapa Contoh Rangkaiaan dengan Op-Amp Ideal

Penggunaan Op-Amp Ideal ini dapat digunakan untuk menetapkan titik awal dalammelakukan analisis rangkaiaan. Ingatlah selalu dengan menetapkan Op-Amp pada masukan diferensial akan menghasilkan umpan balik negative. Dengan kondisi tersebut maka tegangan masukkan diferensial akan selalu terjaga untuk mendekati atau sama dengan nol. Dengan cara mengambil atau memiliki nilai tegangan yang sama besar dengan tegangan yang diperlukan. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan tegangan masukkan diferensial yang selalu mendekati atau sama dengan nol. Dengan begitu semua arus yang menuju masukkan pembalik akan mengalir melewati resistor umpan balik.

1. Op-Amp Ieal sebagai Konversi Arus ke Tegangan

   Sebuah Op-Amp ideal dapat berlaku sebagai converter arus ke tegangan. Untuk rumus di bawah ini penguat ideal akan menjaga potensial dari terminal masukan pembaliknya agar selalu sama dengan

potensial pentanhan dan memaksa setiap arus masukan mengalir melalui resistansi umpan balik (*feedback resistance)*. Jadi, I_{in}=I_f dan e$e_0 = -I_{in}R_f$.

Perhatikan bahwa rangkaiaan untuk rumus ini dapat digunakan sebagai dasar untuk pengukuran arus ideal. Rangkaiaan untuk rumus ini tidak akan mengkibatkan terjadinya jatuh tegangan pada rangkaiaan pengukuran. Impedansi masukan efektif rangkaiaan, yang diukur langsung pada terminal masukan pembalik adalah sama dengan nol.

2. Op-Amp Ideal sebagai Penjumlah Tegangan atau Arus

Perinsip kerja dari Op-Amp ideal sebagai converter arus ke tegangan seperti dijelaskan diatas dapat diperluas lebih lanjut. Pada rangkaiaan Op-Amp ideal untuk rumus dibawah ini terlihat bahwa Op-Amp akan memaksa jumlah dari semua arus-arus yang mengalir menuju terminal masukan pembalik untuk mengalir pada lintasan umpan balik. Selain itu, terminal-terminal pembalik akan dipaksa untuk memiliki potensial yang sama dengan potensial pentanahan. Tegangan output Op-Amp adalah:

$$e_0 = -[I_1 + I_2 + I_3].R_f \quad \text{..... (2.19)}$$

Agar arus masukkan sepenuhnya ditentukan oleh tegangan masukkan maka Op-Amp ideal perlu dan harus terus berusaha menjaga agar terminal masukkan pembalik memiliki potensial yang sama dengan potensial pentanahan. Besar arus yang dihasilkan adalah berbanding terbalik dengan nilai resistansi resistor yang terpasang seri dengan

masing-masing masukkan tegangan. Dengan ini maka arus-arus masukkan akan dipaksa untuk megalir melewati R2 dan nilai tegangan keluaran akan bernilai sama dengan hasil kali antara arus masukkan dengan resitansi ini.

3. Op-Amp Ideal sebagai Konverter Tegangan ke Arus

Perlu adanya masukkan diferensial yang selalu terjaga dalam keadaan nol mengharuskan penguat untuk memaksa sebuah arus $I = e_{in}/R$. Hal tersebut berguna untuk mengalirkan arus melalui beban yang tepasang pada lintasan umpan balik. Dengan begitu maka besarnya arus tidak akan bergantung pada sifat-sifat alami atau terhadap pengaruh bebean yang terpasang.

4. Op-Amp Ideal sebagai *Buffer* yang Sempurna

Rangkaiaan Op-Amp yang berlaku sebagai tegangan keluaran harus mengambil nilai yang sama besar dengan nilai tegangan masukan untuk memaksa agar sinya tegangan masukan diferensial bernilai nol. Rangkaiaan ideal ini memiliki impedansi masukan yang tak berhingga, impedansi keluaran nol dan gain dengan satu.

5. Op-Amp Ideal sebagai Pengurang

Rangkaiaan memberikan gambaran prinsip kerja dari sebuah Op-Amp ideal yang beroprasi secara diferensial sebagai sebuah pengurang. Tegangan pada terminal masukan pembalik (dengan menggunakan prinsip superposisi) dirumuskan oleh persamaan berikut ini:

$$e^- = e_2 \frac{R_1}{(R_1+R_2)} + e_0 \frac{R_1}{(R_1+R_2)} \quad \text{..... (2.20)}$$

pada terminal non-pembalik adalah:

$$e^+ = e_1 \frac{R_1}{(R_1+R_2)} \quad \text{..... (2.21)}$$

Op-Amp akan bekerja untuk memaksa agar $e^- = e^+$

Sehingga $e_2 \frac{R_1}{(R_1+R_2)} + e_0 \frac{R_1}{(R_1+R_2)} = e_1 \frac{R_1}{(R_1+R_2)}$

Atau $e_0 = \frac{R_2}{R_1}[e^- - e^+]$

2.6.3 Batas-batas Masukan dan keluaran Op-Amp

Fungsi sebuah integrator dapat dilakukan oleh sebuah Op-Amp rangkaiaan. Umpan balik negative diperoleh dengan cara memasangkan sebuah kapasitor C di antara terminal keluaran dan terminal masukan pembalik Op-Amp. Tegangan keluaran penguat yang bekerja melalui kapasitor ini akan berusaha menjaga agar potensial dari terminal masukan pembalik selalu sama dengan potensial pentanhan serta memaksa setiap arus yang mengalir menuju terminal masukan pembalik untuk mengalir sebagai arus pengisian kapasitor.

Dengan demikian kita dapat turunkan persamaan:

$$I_{in} = \frac{e_m}{R} = C \frac{dV_c}{dt} \quad \text{..... (2.22)}$$

Tegangan keluaran Op-Amp akan memiliki besar yang sama dengan tegangan kapasitor namun memiliki tanda tau polaritas berlawanan. Oleh karenanya :

$$\frac{e_m}{R} = -C\frac{de_0}{dt} \quad (2.23)$$

$$e_0 = -\frac{1}{CR}\int e_{in}dt \quad (2.24)$$

2.6.4 Batas-batas Gain dan Impedansi Masukan Keluaran Op-Amp

Op-Amp yang nyata atau rill memiliki karakteristik yang mendekati karakteristik dari Op-Amp ideal tetapi tidak persis sama. Op-Amp rill memiliki gain (penguatan) loop terbuka yang sangat besar tetapi tidak tak terhingga. Op-Amp ini juga memiliki impedansi masukan yang besar tetapi berhingga besarnya. Op-Amp riil menarik sejumlah kecil arus pada terminal-terminal masukannya. Op-Amp rill ini memerlukan sebuah tegangan masukan diferensial yang kecil untuk dapat menghasilkan tegangan keluaran sama dengan nol. Tegangan ini dikenal dengan offset masukan. Op-Amp yang nyata tidak sepenuhnya atau tidak benar-benar menolak sinyal-sinyal mode commen mode, dengan kata lain memiliki rasio penolakan mode kommen yang berhingga.

Sifat-sifat dari Op-Amp rill yang disebutkan diatas akan menyebabkan kinerja rangkaiaan yang berbeda dengan kinerja yang diperkirakan akan tampak berdasarkan analisis yang menggunakan dasar-dasar asumsi kinerja dari penguat ideal. Dalam beberapa hal, perbedaan-perbedaan perilaku antara rangkaiaan-rangkaiaan yang rill dan ideal adalah cukup kecil. Akan tetapi dalam beberapa aspek tertentu, terutama yang terkait dengan parameter-parameter kinerja yang bergantung pada besaran frekuensi, perbedaan-perbedaan adalah cukup signifikan.[27]