

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman yang semakin modern saat ini mobilitas manusia semakin tinggi sehingga kebutuhan akan energi juga semakin tinggi. Salah satu sumber energi yang banyak digunakan yaitu minyak bumi. Menurut para ahli yang tergabung dalam sebuah proyeksi dari *International Energy Agency* (IEA), bahan bakar fosil yang digunakan sebagai minyak bumi diperkirakan akan habis 30 tahun lagi. Data dari IEA menunjukkan bahwa permintaan akan minyak bumi naik 1,6% setiap tahunnya dan 80% kebutuhan energi dunia tersebut dipasok oleh bahan bakar fosil. Oleh karena itu diperlukan sumber bahan bakar alternatif untuk menyaingi hal tersebut.

Semakin berkurangnya cadangan minyak mentah yang selama ini masih menggunakan bahan bakar dari fosil maka diperlukan suatu alternatif pengembangan dari bahan bakar nonfosil atau dikenal dengan *biofuel* yang terbarukan dan ramah lingkungan. Dengan menggunakan energi yang terbarukan maka kebutuhan energi akan senantiasa terpenuhi dan lingkungan akan tetap terjaga. *Biofuel* yang dimaksud adalah bioetanol sebagai pengganti bahan bakar bensin. Bioetanol adalah bahan bakar pengganti bensin yang prospektif yang didapat dari proses fermentasi bahan-bahan organik yang mengandung gula seperti tebu, singkong, kentang, kayu dan sebagainya (Jamilatun, 2010).

Pada umumnya hasil dari fermentasi adalah bioetanol dengan kadar kemurnian 7% - 9%. Supaya dapat mencapai kadar kemurnian hingga 95% maka bioetanol hasil fermentasi harus melalui proses distilasi bertingkat atau dengan beberapa kali pengulangan. Proses distilasi dilakukan dengan tujuan memisahkan etanol dengan air dengan memperhitungkan perbedaan titik didih kedua bahan tersebut. Secara teori proses distilasi tidak menghasilkan bioetanol dengan kadar kemurnian di atas 95%. Fenomena azeotrop dari air dan etanol merupakan penyebab hal tersebut bisa terjadi. Peningkatan kadar kemurnian bioetanol hingga 99.5% biasanya dilakukan dengan penambahan zat pengabsorpsi air yang dapat memakan waktu hingga 2 - 3 hari. Cara lain mengatasi lamanya waktu pengabsorpsi ini adalah dengan mengatur tekanan sampai mendekati kondisi vakum saat proses distilasi. Namun hal ini tidaklah mudah karena suhu dan tekanan saling berpengaruh. Maka dari itu dibutuhkan pengendalian suhu pada kondisi

vakum (tekanan dibawah 1 atm) untuk proses distilasi agar bisa menjaga suhu sesuai dengan keadaan yang diinginkan.

Kontroler PID merupakan gabungan dari kontroler proporsional, integral dan diferensial. Metode kendali PID yang digunakan akan mengendalikan elemen pemanas pada proses distilasi hingga mencapai suhu yang diinginkan (*setpoint*). Gabungan dari ketiga kontroler ini diharapkan bisa mendapatkan keluaran yang diinginkan (*setpoint*) dan tidak terjadi *overshoot*.

Akan tetapi jika terdapat gangguan berupa perubahan tekanan pada tabung evaporator, maka akan terjadi perubahan titik didih etanol sehingga diperlukan penyesuaian antara tekanan dan suhu yang diinginkan (*setpoint*). Hal ini mengakibatkan pentingnya penggunaan komparator *setpoint* untuk menyesuaikan antara tekanan yang terbaca oleh sensor dengan *setpoint* yang digunakan.

Berdasarkan hal tersebut dibuatlah suatu pengendalian suhu pada proses distilasi menggunakan kontroler PID dengan kompensator *setpoint*, sehingga nantinya didapatkan *setpoint* yang sesuai berdasarkan pembacaan tekanan. Dalam skripsi ini suhu merupakan *manipulated variable* (diubah-ubah besarnya oleh kontroler) dan tekanan merupakan variabel beban (*load*) yang dianggap sebagai *disturbance*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan maka rumusan masalah yang didapat yaitu:

1. Bagaimana merancang kontroler PID dengan kompensator *setpoint* pada sistem pengendalian suhu pada proses distilasi vakum bioetanol?
2. Bagaimana respon yang dihasilkan pada proses distilasi vakum bioetanol menggunakan kontroler PID dengan kompensator *setpoint*?

1.3 Batasan Masalah

1. *Vacuum Distiller* yang digunakan adalah *prototype* dengan desain sendiri.
2. Pembahasan ditekankan pada pengendalian suhu pada sistem.
3. Variabel beban (*load*) yang dianggap sebagai *disturbance* berupa tekanan udara pada tabung evaporator.
4. *Range* tekanan yang digunakan sebesar 0,5 - 1 atm.
5. Pengendalian yang dilakukan adalah pengendalian untuk memanaskan bahan baku melalui media pada lapisan jaket menggunakan elemen pemanas.

6. Bahan baku yang digunakan sebanyak 15 liter tetes tebu yang sudah difermentasi.
7. Media pemanas di dalam lapisan jaket adalah minyak goreng sebanyak 15 liter.
8. Digunakan 4 buah elemen pemanas dengan tipe yang sama dengan daya total 1200W untuk memanaskan 15 liter minyak goreng di dalam jaket.
9. *Setpoint* suhu bervariasi sesuai dengan tekanan yang terbaca.
10. Sensor suhu yang digunakan adalah *Thermocouple Type K*.
11. Sensor tekanan yang digunakan adalah MPX5100AP.
12. Kinerja *driver* dan elektronika tidak dibahas secara mendalam.
13. Mekanisme terjadinya bioetanol tidak dibahas secara mendalam.

1.4 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk merancang sistem pengendalian suhu pada proses distilasi vakum bioetanol menggunakan kontroler PID dengan kompensator *setpoint*. Sehingga nantinya diharapkan *output* yang dihasilkan sesuai dengan *setpoint* tanpa adanya *overshoot*.

1.5 Sistematika Pembahasan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang uraian latar belakang, tujuan, batasan masalah, rumusan masalah, manfaat serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisi dasar teori penunjang penelitian. Pustaka yang diambil adalah pustaka yang relevan dan sesuai serta mendukung penelitian, seperti buku-buku ilmu pengetahuan, identifikasi, dan lain-lain. Selain dari buku pustaka juga akan diambil dari jurnal, internet, dan sumber pengetahuan yang lain.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode yang digunakan dalam pengerjaan alat seperti perancangan dan pembuatan rangkaian *interface*, pengujian alat, pengambilan data dan analisis data yang digunakan dalam skripsi ini.

BAB IV PERANCANGAN DAN PEMBUATAN SISTEM

Bab ini berisi tentang perancangan keseluruhan sistem baik *hardware* maupun *software*. Setelah itu, bagaimana menerapkannya ke dalam modul Arduino Mega 2560 dan *software* di komputer sehingga sistem dapat bekerja dengan baik.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

Bab ini berisi tentang hasil pengujian sistem yang telah dibuat, serta analisis hasil yang diperoleh.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini, maka semua hal yang telah dikerjakan pada bab sebelumnya, dianalisis dan diambil kesimpulan. Serta rekomendasi dan saran untuk pengembangan alat.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

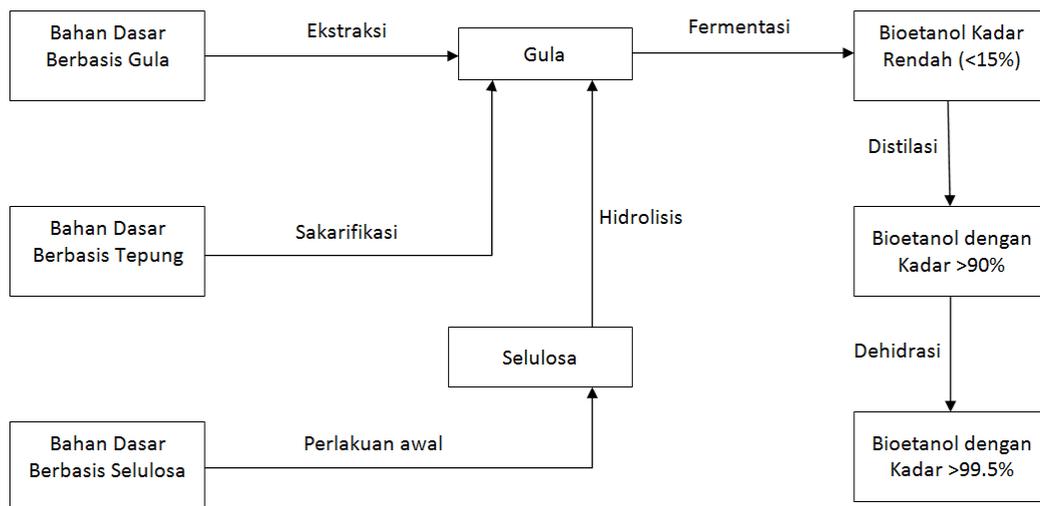
2.1 Bioetanol

Bioetanol merupakan salah satu sumber energi alternatif yang sangat prospektif untuk dikembangkan sebagai pengganti bahan bakar fosil yang digunakan selama ini. Selain dapat diperbarui, bioetanol juga bersifat ramah terhadap lingkungan. Bioetanol sebagai pengganti bensin memiliki keunggulan antara lain kandungan oksigen lebih tinggi (35%) sehingga terbakar lebih sempurna, bernilai oktan tinggi (118) sehingga emisi gas karbom monoksida lebih rendah 19% - 25% dibandingkan BBM (Jamilatun, 2010). Gambar 2.1 menunjukkan proses dasar pembuatan bioetanol.

Bahan dasar pembuatan bioetanol adalah biomassa yang memiliki kandungan gula. Ada 3 jenis bahan dasar yang memiliki kandungan gula yaitu bahan dasar berbasis gula (seperti tebu dan *sweet sorghum*), bahan dasar berbasis tepung/pati (seperti jagung, kentang, singkong dsb.), dan bahan dasar berbasis selulosa (seperti kayu, rumput dan sisa hasil panen). Ketiga bahan dasar tersebut kemudian diproses supaya terbentuk gula dan kemudian menjalani proses fermentasi dan distilasi untuk menjadi bioetanol. Tabel 2.1 menunjukkan konversi biomassa ke bioetanol.

Tabel 2.1 Konversi Biomassa ke Bioetanol (Priandika, 2013)

Biomassa	Jumlah biomassa (kg)	Kandungan gula (kg)	Jumlah hasil bioetanol (liter)	Biomassa : Bioetanol
Ubi Kayu	1.000	250-300	166,6	6,5 : 1
Ubi Jalar	1.000	150-200	125	8 : 1
Jagung	1.000	600-700	400	2,5 : 1
Sagu	1.000	120-160	90	12 : 1
Tetes	1.000	500	250	4 : 1



Gambar 2.1 Proses Dasar Pembuatan Bioetanol (Firsyari, 2013)

2.2 Distilasi

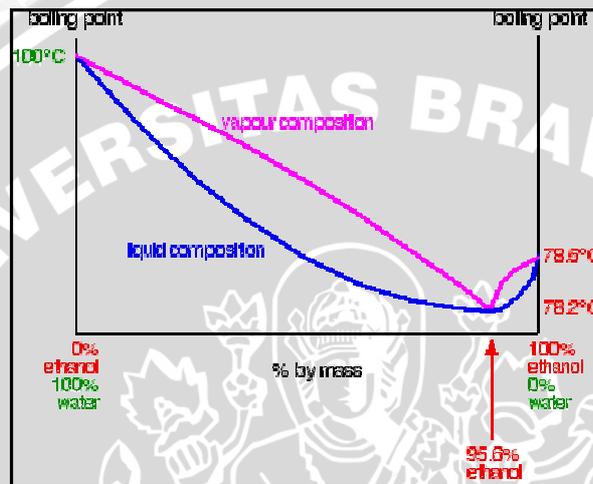
Distilasi atau penyulingan adalah suatu metode pemisahan bahan kimia berdasarkan perbedaan kecepatan atau kemudahan menguap (*volatilitas*) bahan. Dalam penyulingan, campuran zat dididihkan sehingga menguap, dan uap ini kemudian didinginkan sehingga kembali ke dalam bentuk cairan (kondensasi). Zat yang memiliki titik didih lebih rendah akan menguap lebih dulu. Metode ini merupakan termasuk operasi kimia jenis perpindahan massa. Penerapan proses ini didasarkan pada teori bahwa pada suatu larutan, masing-masing komponen akan menguap pada titik didihnya.

Macam-macam distilasi:

1. Distilasi Sederhana, prinsipnya memisahkan dua atau lebih komponen cairan berdasarkan perbedaan titik didih yang jauh berbeda.
2. Distilasi Fraksionasi (bertingkat), sama prinsipnya dengan distilasi sederhana, hanya distilasi bertingkat ini memiliki rangkaian alat kondensor yang lebih baik sehingga mampu memisahkan dua komponen yang memiliki perbedaan titik didih yang berdekatan.
3. Distilasi Azeotrop, memisahkan campuran azeotrop (campuran dua atau lebih komponen yang sulit dipisahkan). Biasanya dalam prosesnya digunakan senyawa lain yang dapat memecah ikatan azeotrop tersebut, atau dengan menggunakan tekanan tinggi.
4. Distilasi Kering, memanaskan material padat untuk mendapatkan fasa uap dan cairnya. Biasanya digunakan untuk mengambil cairan bahan bakar dari kayu atau batu bata.

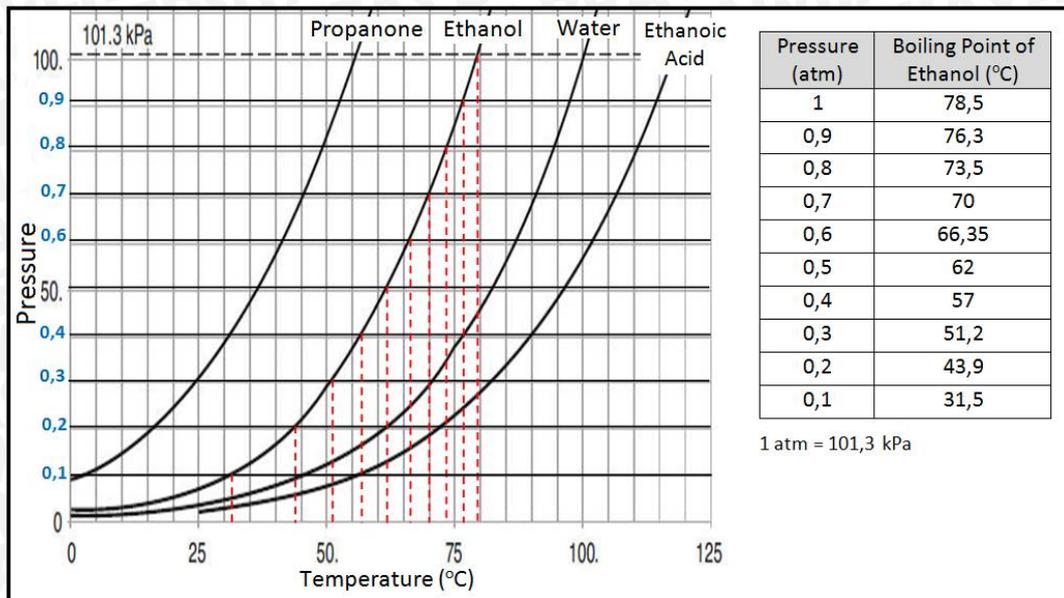
5. Distilasi Vakum, memisahkan dua komponen yang titik didihnya tinggi. Metode yang digunakan adalah dengan menurunkan tekanan permukaan lebih rendah dari 1 atm, sehingga titik didihnya juga menjadi rendah, dalam prosesnya suhu yang digunakan untuk mendistilasinya tidak perlu terlalu tinggi.

Secara teori proses distilasi tidak dapat menghasilkan bioetanol dengan kadar di atas 95%. Hal ini dikarenakan fenomena terbentuknya azeotrop dari air dan etanol (Gambar 2.2). Campuran ini memiliki titik didih yang lebih rendah dari titik uap air murni (100 °C pada tekanan 1 atm) dan titik didih etanol murni (78,5 °C pada tekanan 1 atm).

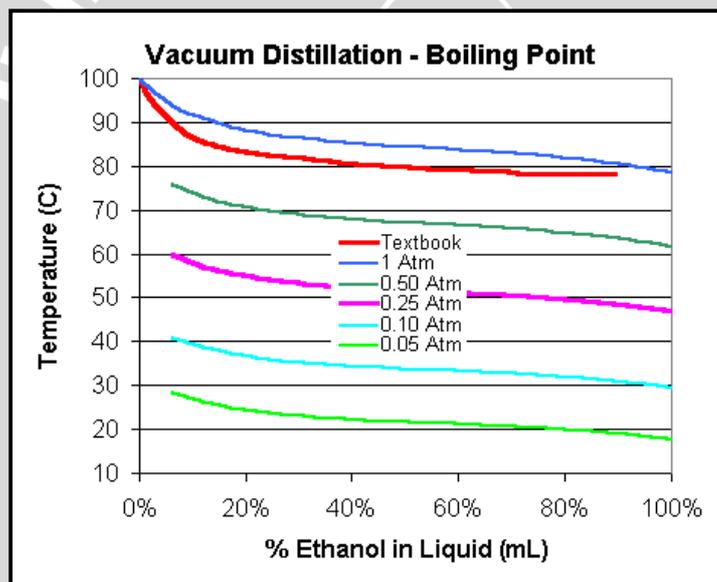


Gambar 2.2 Titik Didih Campuran Etanol-Air pada Tekanan 1 atm (Clark, 2005)

Bioetanol dengan kadar hingga 100% pada umumnya didapatkan melalui proses dehidrasi menggunakan zat pengabsorpsi air seperti zeolit dan garam, namun proses ini akan memakan waktu yang lama yaitu sekitar 2 - 3 hari. Pada tekanan kurang dari 1 atm, titik didih air murni dan etanol akan turun dari kondisi normalnya. Penurunan titik didih etanol pada kondisi vakum dapat dilihat pada Gambar 2.3. Sedangkan pada Gambar 2.4 memperlihatkan bahwa pada tekanan di bawah 1 atm akan memberikan hasil konsentrasi bioetanol yang berbeda. (T. Ackland, 2012).

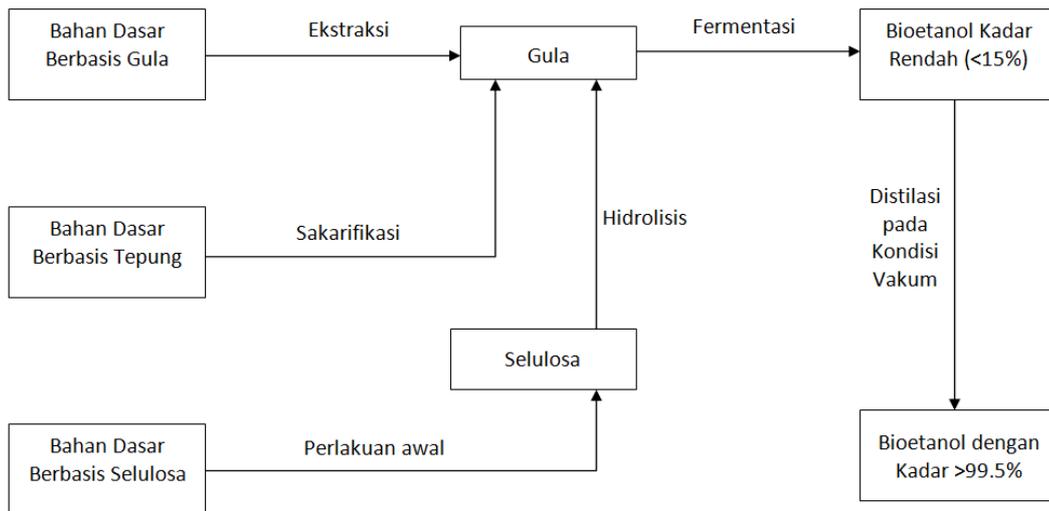


Gambar 2.3 Titik Didih Etanol di Bawah Tekanan 1 atm (Kent, 2015)



Gambar 2.4 Distilasi Etanol pada Tekanan di Bawah 1 atm (T.Ackland, 2012)

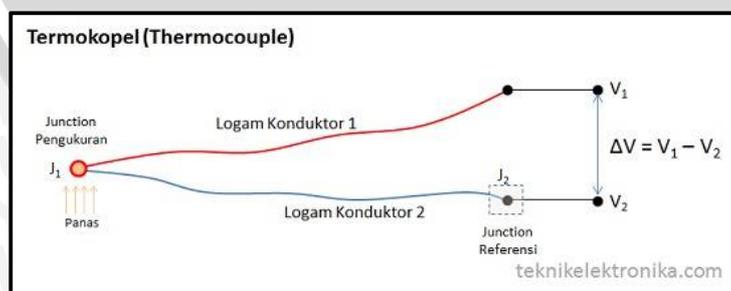
Skripsi ini akan fokus pada proses distilasi dari hasil fermentasi, yaitu distilasi atas bioetanol dengan kadar rendah (<15%). Proses distilasi akan dilakukan pada kondisi yang mendekati vakum, sehingga proses dehidrasi etanol tidak diperlukan lagi. Keuntungan dari sistem ini adalah dapat menghemat waktu dehidrasi yang cukup lama dan perbaikan kualitas etanol yang dihasilkan (kadar > 95%). Langkah-langkah proses distilasi vakum bioetanol dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Proses Pembuatan Bioetanol dengan Distilasi Vakum (Firsyari, 2013)

2.3 Sensor Suhu *Thermocouple Type K*

Untuk mengetahui perubahan panas yang terjadi di dalam tabung evaporator digunakan *Thermocouple* tipe K. *Thermocouple* adalah salah satu jenis alat ukur temperatur yang menggunakan prinsip termoelektris pada sebuah material. *Thermocouple* tersusun atas dua konduktor listrik dari material yang berbeda yang dirangkai membentuk sebuah rangkaian listrik. Jika salah satu dari konduktor tersebut dijaga pada temperatur yang lebih tinggi daripada konduktor lainnya sehingga ada diferensial temperatur, maka akan timbul efek termoelektris yang menghasilkan tegangan listrik. Besar tegangan listrik yang terbentuk tergantung dari jenis material konduktor yang digunakan, serta besar perbedaan temperatur antara dua konduktor tersebut. Sinyal yang keluar dari *thermocouple* adalah berupa voltase listrik berukuran milivolt. Penjelasan mengenai prinsip kerja *thermocouple* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Prinsip Kerja *Thermocouple* (Dickson, 2015)

Thermocouple yang dipakai pada skripsi ini adalah *Thermocouple Type K* dimana *thermocouple* tersebut mempunyai bahan logam konduktor positif : *Nickel – Chromium*

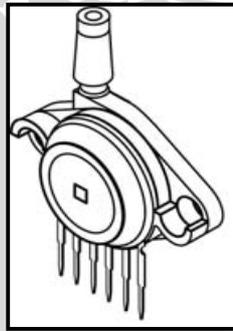
dan bahan logam konduktor negatif : *Nickel – Alumunium*. *Thermocouple Type K* mempunyai rentang suhu antara -200°C sampai 1250°C . Bentuk sensor suhu *Thermocouple Type K* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sensor Suhu *Thermocouple Type K* (elecfreaks.com, 2013)

2.4 Sensor Tekanan MPX5100AP

Untuk mengetahui besar tekanan yang ada pada proses distilasi maka diperlukan sensor tekanan udara. Sensor tekanan MPX5100AP merupakan sensor berjenis Absolut (hasil pengukuran telah ditambah tekanan atmosfer) yang dapat digunakan untuk mengukur besar tekanan udara dengan range $0 - 100 \text{ kPa}$ ($0 - 0,9869 \text{ atm}$). Untuk dapat bekerja sensor ini memerlukan catu daya sebesar 5 VDC . Keluaran dari sensor ini berupa tegangan dengan range $0,2 - 4,7 \text{ VDC}$. Bentuk sensor tekanan MPX5100AP dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Sensor Tekanan MPX5100AP (*Datasheet*)

2.5 Elemen Pemanas

Elemen pemanas merupakan piranti yang mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui *Joule Heating*. Prinsip kerja elemen pemanas adalah arus listrik yang mengalir pada elemen bertemu resistansinya, sehingga menghasilkan panas pada elemen.

Persyaratan elemen pemanas antara lain :

1. Sifat mekanisnya harus kuat terhadap suhu yang dikehendaki.

2. Koefisien muai harus kecil, sehingga perubahan bentuknya pada suhu yang dikehendaki tidak terlalu besar.
3. Tahanan jenisnya harus tinggi.
4. Koefisien suhunya harus kecil, sehingga arus kerjanya sedapat mungkin konstan.

Panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas listrik ini bersumber dari kawat ataupun pita bertahanan listrik tinggi (*Resistance Wire*). Biasanya bahan yang digunakan adalah niklin yang dialiri arus listrik pada kedua ujungnya dan dilapisi oleh isolator listrik yang mampu meneruskan panas dengan baik hingga aman jika digunakan.

Ada 2 macam jenis utama pada elemen pemanas listrik yaitu :

1. Elemen Pemanas Listrik Bentuk Dasar

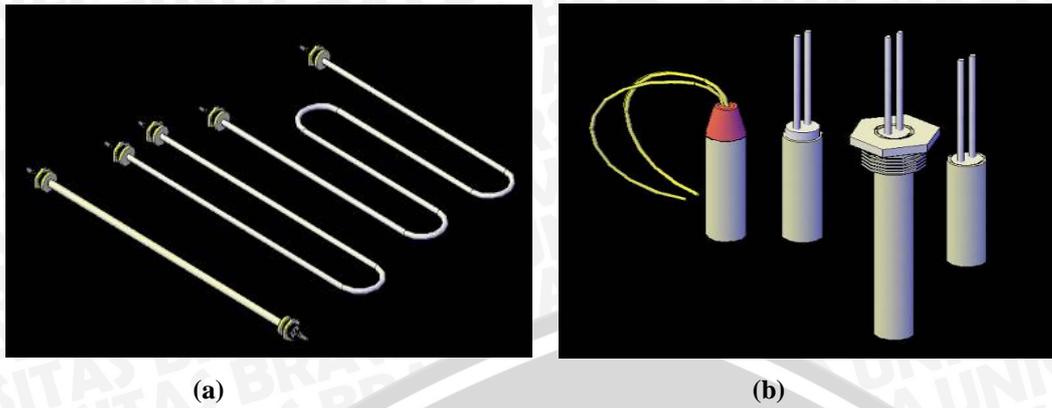
Yaitu elemen pemanas dimana *Resistance Wire* hanya dilapisi oleh isolator listrik. Macam-macam elemen pemanas bentuk ini adalah : *Ceramic Heater*, *Silica and Quartz Heater*, *Bank Channel Heater*, *Black Body Ceramic Heater*. Elemen pemanas bentuk dasar dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Elemen Pemanas Listrik Bentuk Dasar (a) *Coil Heater* (b) *Silica dan Ceramic Heater* (Woodford, 2015)

2. Elemen Pemanas Listrik Bentuk Lanjut

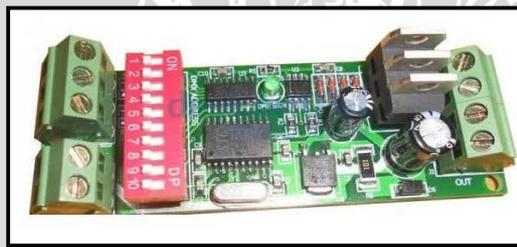
Yaitu elemen pemanas dari bentuk dasar yang dilapisi oleh pipa atau lembaran plat logam untuk maksud sebagai penyesuaian terhadap penggunaan dari elemen panas tersebut. Bahan logam yang biasa digunakan adalah : *Mild Steel*, *Stainless Steel*, tembaga dan kuningan. Elemen pemanas bentuk lanjut dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Elemen Pemanas Listrik Bentuk Lanjut (a) *Tubular Heater* (b) *Cartridge Heater* (Woodford, 2015)

2.6 Rangkaian *Dimmer*

Diperlukan sebuah rangkaian yang bisa digunakan untuk melakukan pengendalian AC. Rangkaian tersebut adalah rangkaian *dimmer* yang didalamnya terdiri dari rangkaian TRIAC dan rangkaian *Zero Cross Detector*. Modul *dimmer* dapat dilihat pada gambar 2.11.

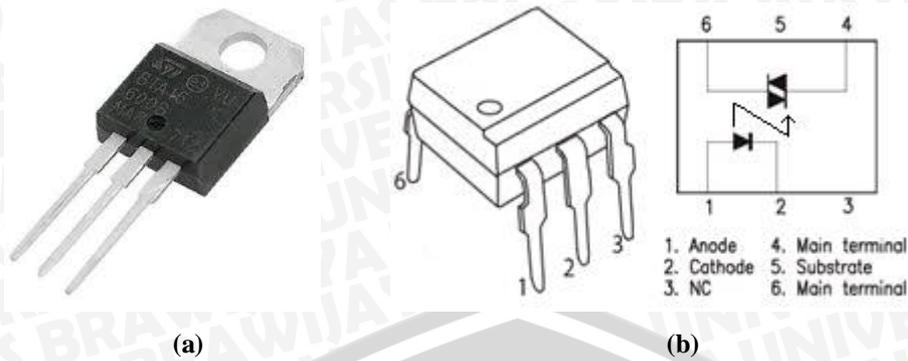


Gambar 2.11 *Dimmer Module* (Merino, 2012)

2.6.1 Rangkaian TRIAC

TRIAC atau *Triode for Alternating Current* adalah sebuah komponen elektronik yang ekuivalen dengan dua SCR yang disambungkan antiparalel dan kaki gerbangnya (*gate*) disambungkan bersama. Nama resmi untuk TRIAC adalah *Bidirectional Triode Thyristor*. Ini menunjukkan saklar 2 arah yang dapat mengalirkan arus listrik ke kedua arah ketika dipicu. TRIAC dapat dinyalakan baik dengan tegangan positif ataupun negatif pada elektrode gerbang (*gate*). Konfiguarsi tersebut membuat TRIAC dapat digunakan untuk mengatur tegangan AC. (Bejo, 2013)

TRIAC dalam penggunaannya membutuhkan DIAC sebagai *driver*. Dibutuhkan juga komponen yang mampu berfungsi sebagai isolator antara tegangan 220V dan 5V untuk melindungi mikrokontroler dari tegangan balik. Sehingga komponen yang sesuai dengan spesifikasi di atas adalah *optocoupler*. *Optocoupler* yang komponen utamanya berupa DIAC adalah MOC3022 . TRIAC dan MOC3022 dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 (a) TRIAC BT138 dan (b) MOC3022 (Datasheet)

2.6.2 Rangkaian Zero Cross Detector

Zero crossing detector adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus AC 220 volt saat melewati titik tegangan nol. Seberangan titik nol yang dideteksi adalah peralihan dari positif menuju negatif dan peralihan dari negatif menuju positif. Seberangan-seberangan titik nol ini merupakan acuan yang digunakan sebagai awal pemberian nilai waktu tunda untuk pemicuan TRIAC.

Metode ini berfungsi untuk menentukan frekuensi suatu gelombang dengan cara mendeteksi banyaknya *zero point* pada suatu rentang waktu. *Zero crossing detector* berfungsi untuk mendeteksi perpotongan gelombang sinus pada tegangan AC dengan *zero point* tegangan AC tersebut, sehingga dapat memberikan sinyal acuan saat dimulainya pemicuan sinyal PWM. Dengan menggunakan rangkaian *zero crossing detector* ini dapat mendeteksi *zero point* sekaligus mengubah suatu sinyal sinusoidal menjadi sinyal kotak. Sinyal keluaran rangkaian *zero crossing detector* ini akan dimasukkan ke mikrokontroler, oleh karena itu dibutuhkan juga komponen yang mampu memisahkan tegangan 5V dan 220V. Rangkaian ini menggunakan komponen optocoupler 4N25 (Gambar 2.13).

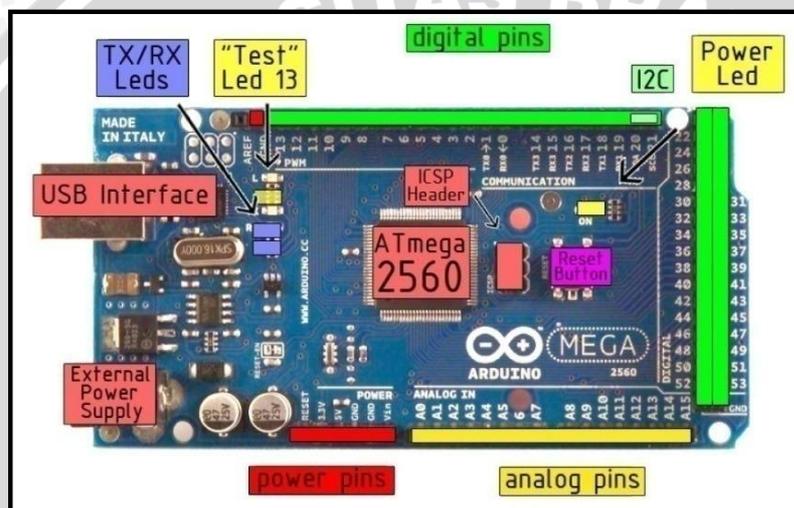


Gambar 2.13 Optocoupler 4N25 (Datasheet)

2.7 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah *board* mikrokontroler berbasis ATmega 2560. Memiliki 54 pin *input* dan *output* digital, dimana 14 pin diantara pin tersebut dapat digunakan sebagai *output* PWM dan 16 pin *input* analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack power, ICSP header, dan tombol reset. Untuk mendukung agar mikrokontroler dapat digunakan, cukup hanya menghubungkan *board* Arduino Mega 2560 ke komputer dengan menggunakan kabel USB atau dengan adaptor AC-DC untuk menjalankannya.

Secara fisik, ukuran Arduino Mega 2560 hampir kurang lebih 2 kali lebih besar dari Arduino Uni, ini untuk mengakomodasi lebih banyaknya pin digital dan analog pada *board* Arduino Mega 2560 tersebut. *Board* Arduino Mega 2560 dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Arduino Mega 2560 (Datasheet)

2.8 Kontroler

Sistem pengendalian dirancang untuk melakukan dan menyelesaikan tugas tertentu. Syarat utama sistem pengendalian adalah harus stabil. Disamping kestabilan mutlak, maka sistem harus memiliki kestabilan secara relatif, yakni tolok ukur kualitas kestabilan sistem dengan menganalisis sampai sejauh mana batas-batas kestabilan sistem tersebut jika dikenai gangguan (Ogata K., 1997). Selain itu analisis juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana kecepatan sistem merespon *input*, dan bagaimana peredaman terhadap adanya lonjakan (*overshoot*)

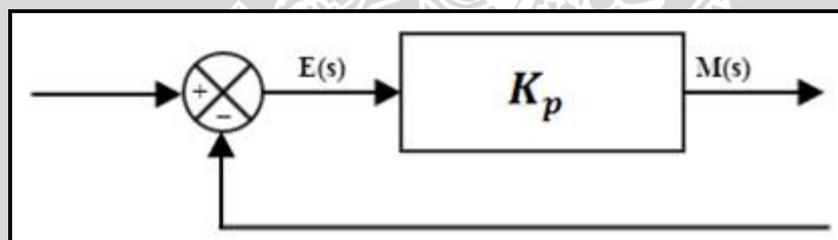
Suatu sistem dikatakan stabil jika diberi gangguan maka sistem tersebut akan kembali ke keadaan *steady state* dimana *output* berada dalam keadaan tetap seperti tidak ada gangguan. Sistem dikatakan tidak stabil jika *output* nya beresilasi terus menerus ketika dikenai suatu gangguan. Karena suatu sistem pengendalian biasanya melibatkan

penyimpanan energi maka *output* sistem ketika diberi suatu *input*, tidak dapat mengikuti *input* secara serentak, tapi menunjukkan respon transien berupa suatu osilasi teredam sebelum mencapai *steady state*.

Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai aktual keluaran plan dengan nilai referensi. Kemudian kontroler menentukan nilai kesalahan dan akhirnya menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan kesalahan. (ogata K., 1997)

2.8.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding atau proporsional dengan besarnya nilai kesalahan yaitu selisih antara besaran yang diharapkan dengan nilai sebenarnya. Memiliki sebuah konstanta pengali yang menyebabkan perubahan pada sinyal masukan akan secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya tersebut. Kontroler proporsional ini masih meningkatkan *error* yang diperoleh yang disebabkan oleh sifat dasar kontroler proporsional yang masih membentuk *error* untuk menghasilkan keluaran. Diagram blok kontroler proporsional dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Diagram Blok Kontroler Proporsional (Ogata K., 1997)

Untuk kontroler dengan kontrol proporsional hubungan antara masukan yang dilambangkan dengan $m(t)$ dengan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ adalah :

$$m(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2-1)$$

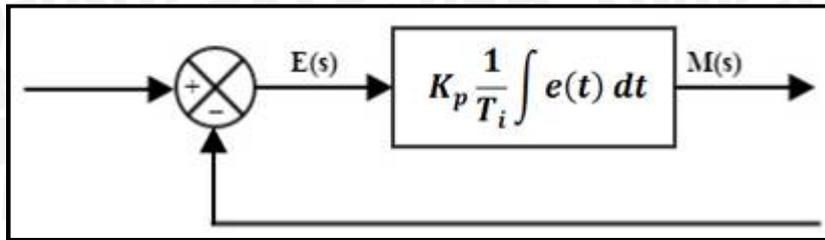
atau dalam Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (2-2)$$

Dengan K_p adalah konstanta penguat proporsional.

2.8.2 Kontroler Integral

Dengan kontroler integral, respon yang dihasilkan dapat diperbaiki. Keluaran kontroler sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Diagram blok kontroler integral dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Diagram Blok Kontroler Integral (Ogata K., 1997)

Nilai masukan kontroler $m(t)$ diubah pada laju proporsional dari sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ sehingga didapat :

$$m(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2-3)$$

atau dalam Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{T_i s} \quad (2-4)$$

Karakteristik kontroler integral

1. Keluaran kontroler membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respon.
2. Jika sinyal *error* adalah nol, maka keluaran kontroler akan bertahan pada nilai sebelumnya. Jika nilai *error* tidak nol, maka keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
3. Konstanta integral yang besar akan menghilangkan *offset* namun akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran kontroler.

2.8.3 Kontroler Diferensial

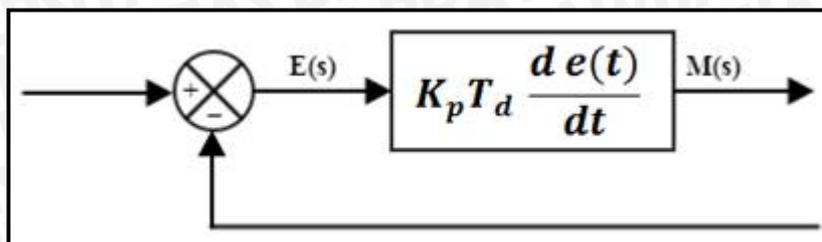
Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon transien sebuah sistem kontrol dengan cara memperbesar *phase lead* terhadap penguatan kontrol dan mengurangi *phase lag* penguatan tersebut (Ogata K., 1997). Kontroler diferensial tidak dapat mengeluarkan *output* bila tidak ada perubahan *input*, selain itu kontroler differensial tidak dapat digunakan untuk proses yang mengandung *noise*. Hubungan antara keluaran kontroler $m(t)$ dan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ adalah :

$$m(t) = K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-5)$$

atau dalam Laplace

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \cdot T_d \cdot s \quad (2-6)$$

Diagram blok kontroler diferensial dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Diagram Blok Kontroler Diferensial (Ogata K., 1997)

Karakteristik kontroler diferensial :

1. Tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya yang berupa sinyal *error*
2. Jika sinyal *error* berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan kontroler tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal *error*.
3. Kontroler ini dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem.

2.8.4 Kontroler Proporsional Integral Diferensial (PID)

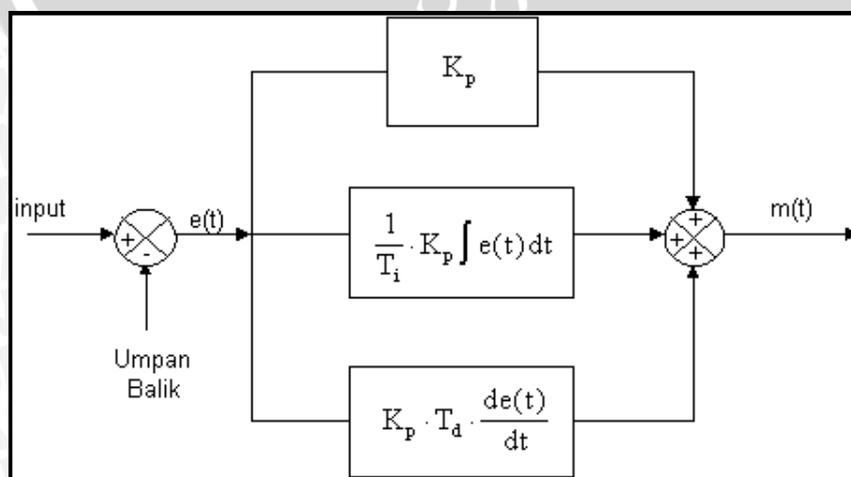
Gabungan aksi kontrol proporsional, integral, dan diferensial mempunyai keunggulan dapat saling menutupi kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler. Persamaan kontroler PID ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot e(t) dt + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-7)$$

Dalam transformasi Laplace dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (2-8)$$

dengan T_i adalah waktu integral, dan T_d adalah waktu derivatif. Diagram blok kontroler PID dapat dilihat pada Gambar 2.18.

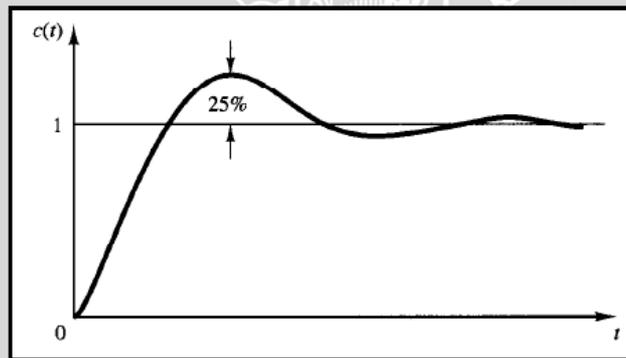


Gambar 2.18 Diagram Blok Kontroler PID (Ogata, 1997)

2.9 Tuning PID Metode Ziegler-Nichols

Tuning kontroler PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*plant*). Dengan demikian bagaimanapun rumitnya suatu *plant*, perilaku *plant* tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum *tuning* PID itu dilakukan. Karena penyusunan model matematik *plant* tidak mudah, maka dikembangkan suatu mode eksperimental. Metode ini didasarkan pada reaksi *plant* yang dikenai suatu perubahan. Dengan menggunakan metode itu model matematika perilaku *plant* tidak diperlukan lagi, karena dengan menggunakan data yang berupa kurva keluaran, *tuning* kontroler PID telah dapat dilakukan. Dalam hal ini, *tuning* bertujuan untuk mendapatkan kinerja sistem sesuai spesifikasi perancangan.

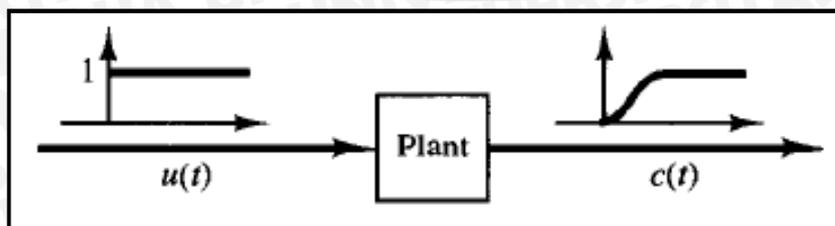
Ziegler-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. Metode ini memiliki dua cara, metode kurva reaksi dan metode osilasi. Kedua metode ditujukan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25% (Gambar 2.19).



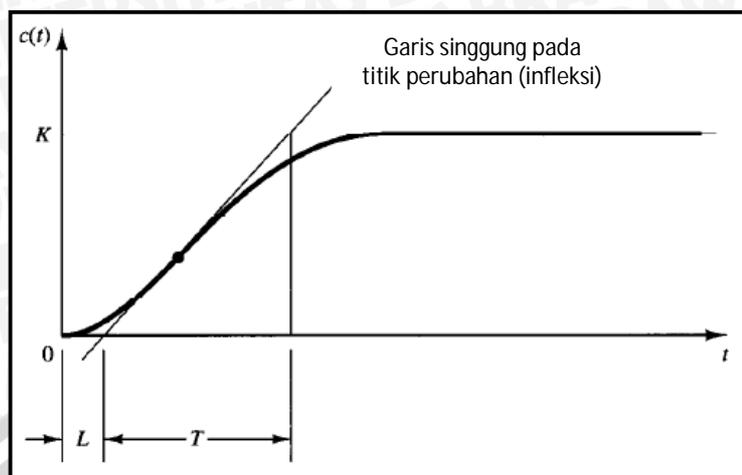
Gambar 2.19 Kurva Respon *Unit Step* yang Menunjukkan 25% Lonjakan Maksimum (Ogata K., 1997)

2.9.1 Metode Kurva Reaksi

Metode ini didasarkan terhadap reaksi sistem *open loop*. *Plant* sebagai *open loop* dikenai sinyal fungsi tangga satuan (*unit step*). Jika *plant* minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun pole-pole kompleks, reaksi sistem akan berbentuk S. Gambar 2.20 menunjukkan kurva berbentuk S tersebut. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk *plant* integrator maupun *plant* yang memiliki pole kompleks.



Gambar 2.20 Respon *Unit Step* Suatu *Plant* (Ogata K., 1997)



Gambar 2.21 Kurva Respon Berbentuk S (Ogata K., 1997)

Kurva berbentuk S tersebut dapat dikarakteristikan menjadi dua konstanta yaitu waktu tunda L dan konstanta waktu T . Waktu tunda dan konstanta waktu ditentukan dengan menggambar sebuah garis tangen pada titik pembelokan dari kurva S, dan menentukan perpotongan antara garis tangen dengan sumbu waktu t dan sumbu $c(t) = K$, seperti yang telah ditunjukkan dalam Gambar 2.21. Fungsi alih $C(s)/U(s)$ dapat dilakukan pendekatan dengan sistem orde satu dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2-9)$$

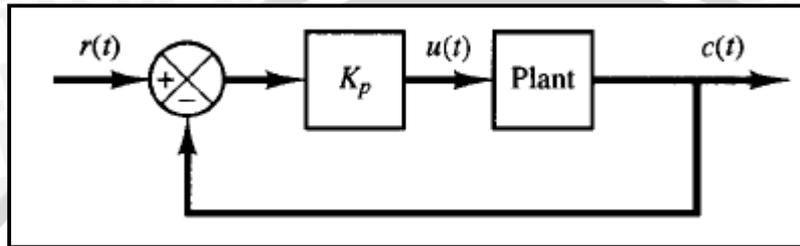
Penalaan parameter PID didasarkan perolehan kedua konstanta itu. Zeigler dan Nichols melakukan eksperimen dan menyarankan parameter penyetelan nilai K_i , T_i , dan T_d dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut. Tabel 2.2 merupakan rumusan penalaan parameter PID berdasarkan cara kurva reaksi.

Tabel 2.2 Tuning Parameter PID dengan Metode Kurva Reaksi (Ogata K., 1997)

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

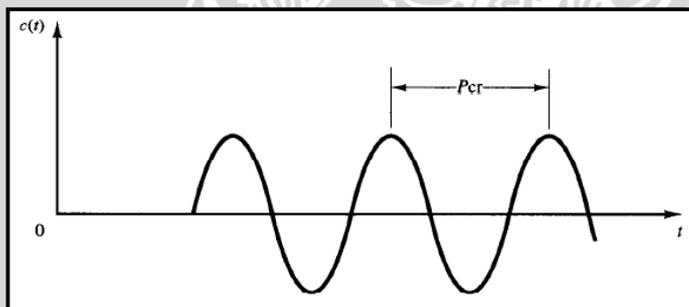
2.9.2 Metode Osilasi

Metode ini didasarkan pada reaksi sistem untaian tertutup. *Plant* disusun serial dengan kontroler PID. Semula parameter-parameter integrator disetel tak berhingga dan parameter diferensial disetel nol ($T_i = \infty$; $T_d = 0$). Parameter proporsional kemudian dinaikkan bertahap, mulai dari nol hingga mencapai nilai yang mengakibatkan reaksi sistem berosilasi dengan *magnitude* tetap (*sustain oscillation*). Gambar 2.22 menunjukkan rangkaian untaian tertutup pada cara osilasi.



Gambar 2.22 Sistem *Close Loop* dengan Kontroler Proporsional (Ogata K., 1997)

Nilai penguatan proporsional pada saat sistem mencapai kondisi *sustain oscillation* disebut *critical gain* K_{cr} . Periode dari *sustained oscillation* disebut *corresponding period* P_{cr} . Gambar 2.23 menggambarkan kurva reaksi untaian tertutup ketika berosilasi.



Gambar 2.23 Kurva *Sustained Oscillation* dengan Periode P_{cr} (Ogata K., 1997)

Penalaan parameter PID didasarkan terhadap kedua konstanta hasil eksperimen, K_{cr} dan P_{cr} . Ziegler dan Nichols menyarankan penyetelan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d berdasarkan rumus yang diperlihatkan pada Tabel 2.3.

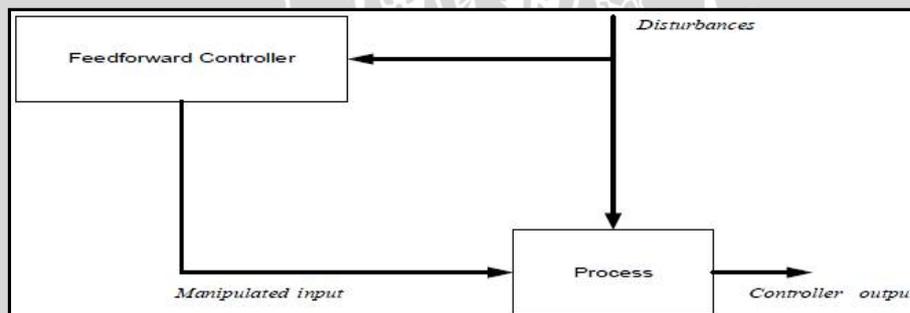
Tabel 2.3 *Tuning Parameter PID* dengan Metode Osilasi (Ogata K., 1997)

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

2.10 Kompensator *Setpoint*

Pada proses distilasi vakum bioetanol terdapat 2 variabel yang saling berpengaruh, yaitu suhu dan tekanan. Tekanan di dalam sistem akan mempengaruhi besar titik didih dari etanol di mana titik didih tersebut merupakan *setpoint* yang digunakan pada proses pengontrolan. Maka dari itu diperlukan adanya kompensator *setpoint* untuk menyesuaikan *setpoint* yang digunakan berdasarkan tekanan yang terbaca. Prinsip kerja kompensator *setpoint* hampir sama dengan *feedforward control* yang sama-sama mendeteksi *disturbance* yang terjadi dan kemudian dikompensasikan.

Feedforward control adalah pengendalian yang memakai variabel masukan untuk mempengaruhi variabel masukan lain dalam sistem. Konfigurasi *feedforward control* dibuat untuk mengatasi adanya gangguan pada beban (*load*) dan mengompensasikan sebelum melalui proses umpan balik (*feedback*). Variabel beban (*load*) menentukan besarnya energi yang dibutuhkan oleh suatu sistem. Pada situasi yang ideal, *feedforward control* secara keseluruhan dapat mengeliminasi efek dari *disturbance*. (Purnomohadi, 2006).

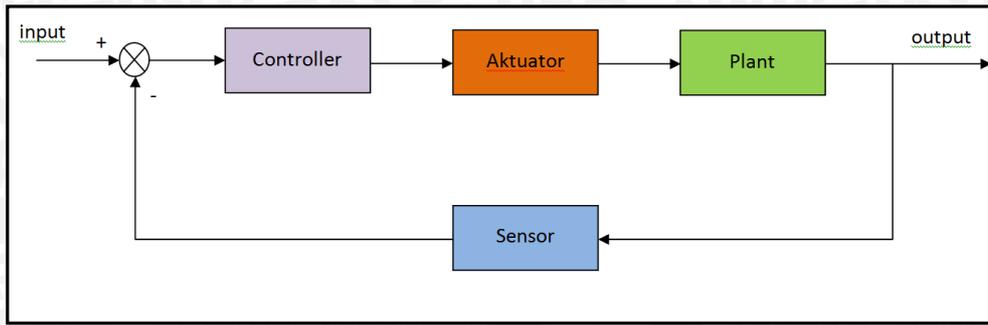


Gambar 2.24 Blok Diagram *Feedforward Control* (Prihantoro, 2013)

Berdasarkan Gambar 2.24 konfigurasi *feedforward control* mengukur *disturbance* secara langsung dan mengambil aksi kontrol untuk mengeliminasi dampak gangguan tersebut terhadap keluaran (*output* proses).

2.11 *Feedback Control* (Kontrol Umpan Balik)

Feedback Control adalah sistem pengendalian dimana *output* nya dikendalikan menggunakan sinyal *feedback*. Sinyal *feedback* akan dibandingkan dengan sinyal referensi untuk menghasilkan sinyal *error* yang kemudian akan diumpan balik dan diolah lagi oleh *controller* hingga mencapai *setpoint*. Blok diagram *Feedback Control* dapat dilihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Blok Diagram *Feedback Control*



BAB III METODOLOGI

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian yang terdapat di bab pendahuluan maka diperlukan langkah-langkah untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode yang digunakan diuraikan sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan agar dapat memahami komponen penyusun sistem. Studi literatur yang dilakukan tentang pemahaman mengenai sensor suhu, sensor tekanan, elemen pemanas, kontroler PID dan Arduino Mega 2560.

3.2 Perancangan Alat

Tujuan dari perancangan alat adalah sebagai langkah awal sebelum terbentuknya sistem beserta rangkaian elektronik dan programnya. Hal tersebut dimaksudkan agar sistem distilasi vakum bioetanol dapat berjalan sesuai dengan rencana. Perancangan sistem yang dilakukan meliputi:

1. Pemilihan komponen mekanik seperti elemen pemanas, motor, pompa, dan komponen lainnya.
2. Penentuan rangkaian elektronik yang meliputi:
 - Rangkaian Mikrokontroler
 - Rangkaian *dimmer* sebagai pengontrol elemen pemanas
 - Rangkaian catu daya (catu daya masing-masing komponen maupun keseluruhan sistem)
 - Rangkaian pengondisi sinyal
 - Rangkaian LCD
3. Perancangan program kontroler PID dengan kompensator *setpoint* pada software Arduino.



3.3 Realisasi Pembuatan Alat

Setelah melakukan perancangan alat, kemudian dilakukan realisasi pembuatan alat yang meliputi pembuatan perangkat keras dan pembuatan perangkat lunak.

3.3.1 Pembuatan Perangkat Keras

Beberapa hal yang dilakukan untuk pembuatan perangkat keras agar alat tersebut dapat bekerja dengan baik antara lain:

- Pembuatan dan perakitan mekanik sistem distilasi vakum secara keseluruhan yang meliputi perakitan elemen pemanas, sensor, motor, pompa dan komponen lainnya.
- Pembuatan rangkaian elektronika meliputi pengondisi sinyal sensor suhu *Thermocouple Type K*, rangkaian *dimmer*, rangkaian catu daya, dan rangkaian LCD.

3.3.2 Pembuatan Perangkat Lunak

Untuk pembuatan perangkat lunak hal pertama yang dilakukan adalah mengetahui karakteristik elemen pemanas setelah itu dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai parameter Proporsional (P), Integral (I) dan Diferensial (D). Selain itu juga perlu dibuat fungsi matematis dari kompensator *setpoint* yang diperoleh dari besar pembacaan tekanan. Setelah didapatkan nilai parameternya, kemudian dilakukan pemrograman pada modul Arduino.

3.4 Pengujian dan Analisa Data

Setelah semua komponen dirancang sesuai dengan blok diagram sistem yang telah direncanakan dan perangkat lunak telah diprogram supaya bisa mendukung sistem yang telah dibuat, maka diadakan pengujian dan analisa alat. Metode pengujiannya adalah sebagai berikut:

1. Pengujian sensor suhu *Thermocouple Type K*
2. Pengujian sensor tekanan MPX5100AP
3. Pengujian LCD
4. Pengujian sudut penyalaan TRIAC
5. Pengujian rangkaian *Dimmer*
6. Pengujian kompensator *setpoint*
7. Pengujian sistem keseluruhan

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian sistem secara keseluruhan. Jika hasil yang didapatkan telah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya, maka sistem kendali tersebut telah berhasil memenuhi tujuan. Sedangkan saran diberikan untuk pengembangan skripsi ini sebagai penyempurnaan.



