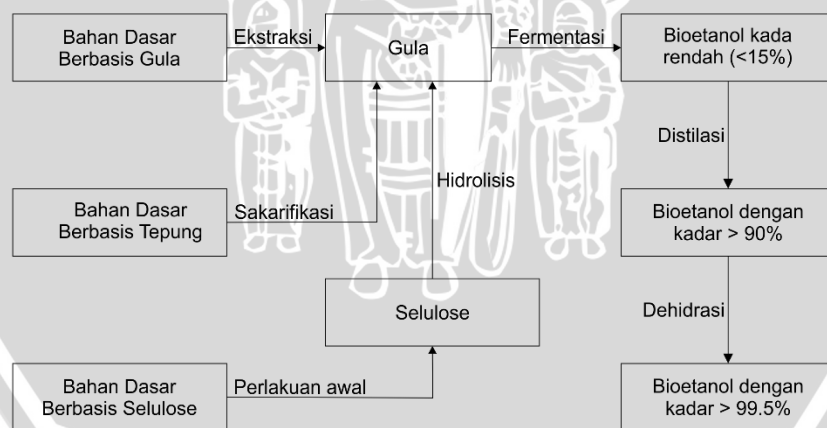


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Bioetanol

Bioetanol adalah nama lain dari etanol yang dibuat dari bahan baku yang berasal dari makhluk hidup atau biomassa. Rumus molekul etanol adalah  $C_2H_5OH$ . Secara teknis, bioetanol dengan kadar 70-94% dapat dibuat melalui proses distilasi (Henley dkk., 1981). Bioetanol dapat diproduksi dari bahan-bahan nabati yang memiliki kandungan gula. Gambar 2.1 memperlihatkan 3 bahan dasar untuk memproduksi bioetanol. Bahan dasar yang pertama adalah bahan dasar yang berbasis gula. Bahan – bahan yang termasuk dalam kategori ini adalah tebu dan sweet sorghum. Selain tebu itu sendiri, hasil sampingan dari proses produksi gula, yaitu tetes tebu (molase) dan bagasse. Bahan dasar yang kedua adalah berbasis tepung. Pada umumnya bahan makanan pokok manusia (jagung, kentang, singkong, .dsb) masuk dalam kategori ini. Bahan dasar yang ketiga berbasis selulosa. Masuk dalam kategori ini adalah kayu, rumput dan sisa hasil panen. Dari ketiga bahan dasar tersebut, setelah terbentuknya gula akan menjalani proses yang sama untuk menjadi bioetanol, yaitu fermentasi dan distilasi.



**Gambar 2.1.** Proses Dasar Pembuatan Bioetanol

(Sumber: Wyman, C.,E. dkk. 1996)

Fermentasi alkohol merupakan proses pembuatan alkohol dengan memanfaatkan aktivitas ragi. Alkohol pada intinya dapat dibuat dari bahan-bahan yang mengandung gula atau dari bahan-bahan yang dapat dijadikan gula. Untuk



bahan-bahan yang dapat dijadikan gula, diperlukan proses pendahuluan yang dikenal dengan proses sakarifikasi. Dalam fermentasi, molekul yang kompleks (seperti gula) dipecah menjadi lebih sederhana (Nixon dan Gaw, 2001). Reaksi yang terjadi dalam fermentasi alkohol adalah sebagai berikut (Dias dan Clark, 2009):

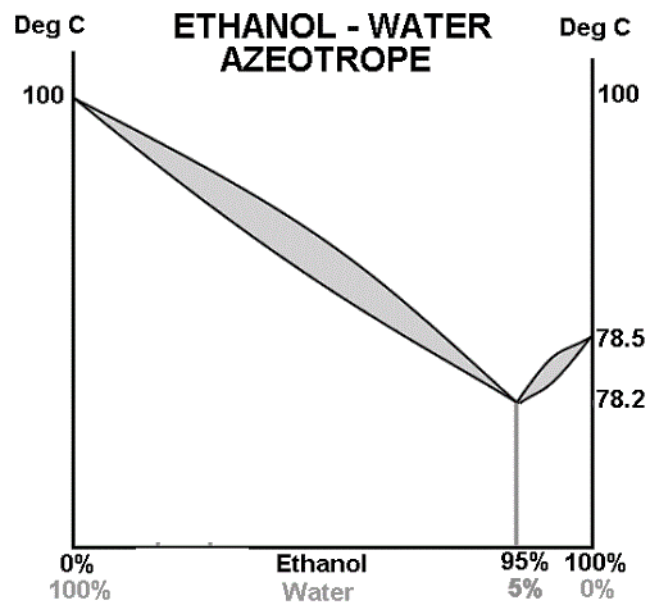


## 2.2. Distilasi

Distilasi atau penyulingan adalah suatu metode pemisahan bahan kimia berdasarkan perbedaan kecepatan atau kemudahan menguap (volatilitas) bahan. Dalam penyulingan, campuran zat di didihkan sehingga menguap dan uap ini kemudian di dinginkan kembali dalam bentuk cairan. Zat yang memiliki titik didih lebih rendah akan menguap lebih dulu.

Berdasarkan tekanan operasi yang digunakan, distilasi dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu distilasi atmosferik, distilasi vakum, dan distilasi tekanan tinggi (lebih dari 1 atm). Distilasi vakum biasanya digunakan jika senyawa yang ingin didistilasi tidak stabil, dengan pengertian dapat terdekomposisi sebelum atau mendekati titik didihnya atau campuran yang memiliki titik didih di atas 150°C. Distilasi vakum memisahkan dua komponen yang titik didihnya sangat tinggi, metode yang digunakan adalah dengan menurunkan tekanan permukaan lebih rendah dari 1 atm, sehingga titik didihnya juga menjadi rendah, dalam prosesnya suhu dan tekanan yang digunakan untuk mendistilasinya tidak perlu terlalu tinggi.

Secara teori proses distilasi tidak akan dapat menghasilkan bioetanol dengan kadar diatas 95%. Hal ini dikarenakan fenomena terbentuknya azeotrope dari air dan etanol. Azeotrop dapat diartikan sebagai suatu kondisi di mana konsentrasi antara air dan etanol tidak dapat dibedakan. Pada tekanan 1 atm, azeotrop terjadi pada suhu 78,5 °C. Berikut merupakan gambar titik didih campuran etanol - air pada tekanan 1 atmosfer.

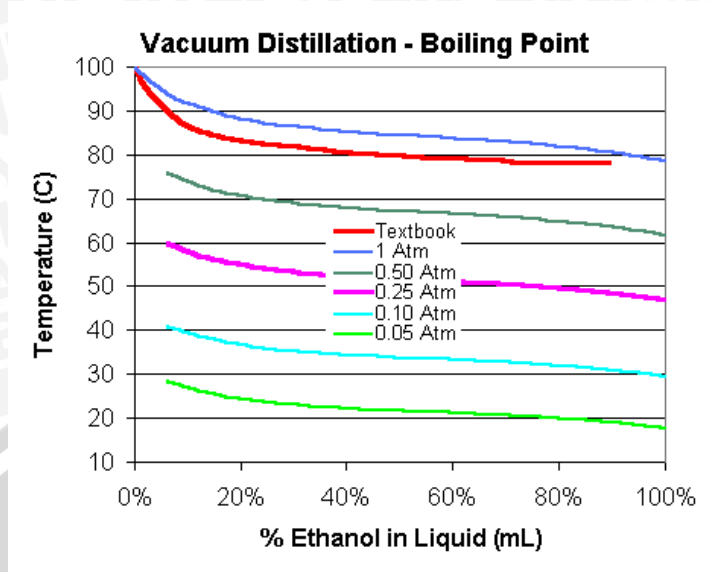


**Gambar 2.2.** Titik Didih Campuran Etanol-Air pada Tekanan 1 Atmosfer.

(Sumber: Nixon dan Gaw, 2001)

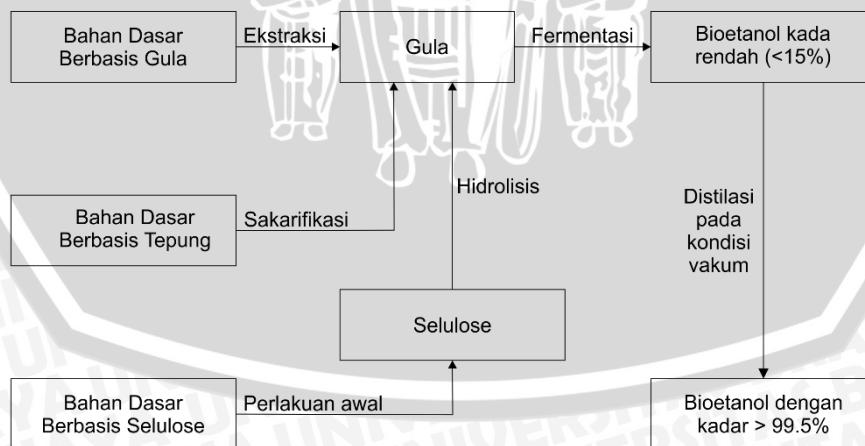
Untuk menghasilkan bioetanol dengan kadar sampai 100%, pada umumnya dilakukan dengan proses dehidrasi menggunakan zat pengabsorpsi air, seperti zeolit dan garam, namun proses ini akan memakan waktu 2 sampai 3 hari. Hasil konsentrasi bioetanol pada proses distilasi tekanan dibawah 1 atmosfer dapat dilihat pada Gambar 2.3. Pada tekanan kurang dari 1 atm, titik didih air murni dan alkohol akan turun dari kondisinya normalnya. Pada gambar tersebut diperlihatkan bahwa pada tekanan 0,5 atm Etanol murni (100%) akan didapatkan pada suhu sekitar 60°C (T. Ackland, 2012).





**Gambar 2.3.** Distilasi Alkohol pada Tekanan dibawah 1 Atmosfer  
(Sumber:T. Ackland, 2012)

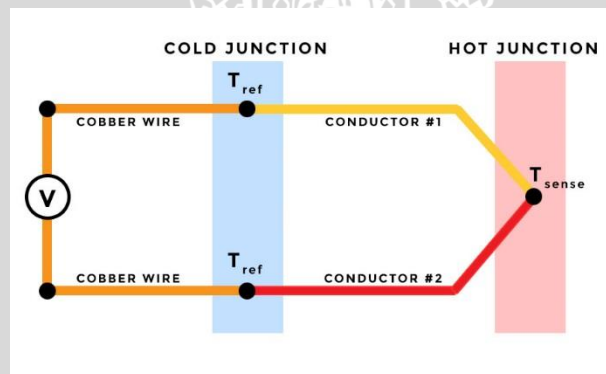
Penelitian ini akan fokus pada proses distilasi dari hasil hasil fermentasi, yaitu distilasi atas bioetanol dengan kadar rendah (<15%). Proses distilasi akan dilakukan pada kondisi yang mendekati vakum (Gambar 2.4.), sehingga proses dehidrasi alkohol tidak diperlukan lagi. Keuntungan dari sistem ini adalah efisiensi dari sisi waktu (menghemat waktu dehidrasi selama 2-3 hari) dan perbaikan kualitas etanol yang dihasilkan (prosentase bioetanol mendekati 100%).



**Gambar 2.4.** Proses Pembuatan Bioetanol dengan Distilasi Vakum  
(Sumber: Wyman, C.,E. dkk. 1996)

### 2.3. Sensor Suhu

Untuk mengetahui perubahan panas yang terjadi di dalam tungku digunakan Termokopel tipe K. Termokopel adalah salah satu jenis alat ukur temperatur yang menggunakan prinsip termoelektris pada sebuah material. Termokopel 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 termokopel adalah berupa voltase listrik berukuran milivolt. Penjelasan mengenai prinsip kerja termokopel dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2.5.** Prinsip kerja Termokopel tipe K  
(Sumber: [www.plcacademy.com](http://www.plcacademy.com))

Termokopel yang dipakai pada tugas akhir ini adalah termokopel tipe K. Dimana termokopel tersebut mempunyai bahan logam konduktor positif: Nickel – Chromium dan bahan logam konduktor negatif: Nickel – Alumunium. Termokopel tipe K mempunyai rentang suhu antara  $-200^{\circ}\text{C}$  –  $1250^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 2.6.** Termokopel tipe K  
(Sumber: <http://www.elec freaks.com/>)

#### 2.4. Elemen Pemanas (*Heater*)

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

Persyaratan elemen pemanas antara lain :

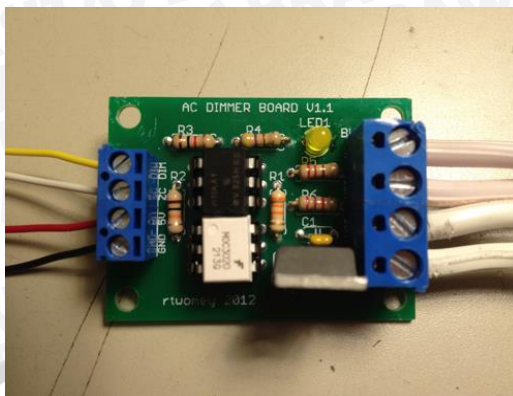
- Harus tahan lama pada suhu yang dikehendaki.
- Sifat mekanisnya harus kuat pada suhu yang dikehendaki.
- Koefisien muai harus kecil, sehingga perubahan bentuknya pada suhu yang dikehendaki tidak terlalu besar.

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.

#### 2.5. Rangkaian *Dimmer*

Diperlukan sebuah rangkaian yang bisa digunakan untuk melakukan pengendalian AC, rangkaian tersebut rangkaian *dimmer* yang di dalamnya terdiri dari rangkaian TRIAC dan rangkaian *Zero Cross Detector*. Gambar 2.7 menunjukkan contoh modul rangkaian *dimmer* AC.





**Gambar 2.7.** AC Dimmer Module

(Sumber: [www.seeedstudio.com](http://www.seeedstudio.com))

### 2.5.1. Rangkaian TRIAC

TRIAC atau *Triode for Alternating Current* (Trioda untuk arus bolak-balik) adalah komponen yang tersusun atas dua buah *thyristor* antiparalel dengan terminal *gate* yang sama. Nama resmi untuk TRIAC adalah *Bidirectional Triode Thyristor*. Ini menunjukkan sakelar dwiarah yang dapat mengalirkan arus listrik ke kedua arah ketika dipicu (dihidupkan). Konfigurasi tersebut membuat TRIAC merupakan komponen yang digunakan untuk mengatur tegangan AC sehingga pemicuan dari *gate* TRIAC juga dapat dilakukan dengan pulsa negatif atau pulsa positif (sesuai tegangan AC) (Ardhito, 2013).

Dalam penggunaannya dibutuhkan DIAC sebagai *driver* dari TRIAC. Selain itu 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.

### 2.5.2. 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 (Ardhito, 2013).

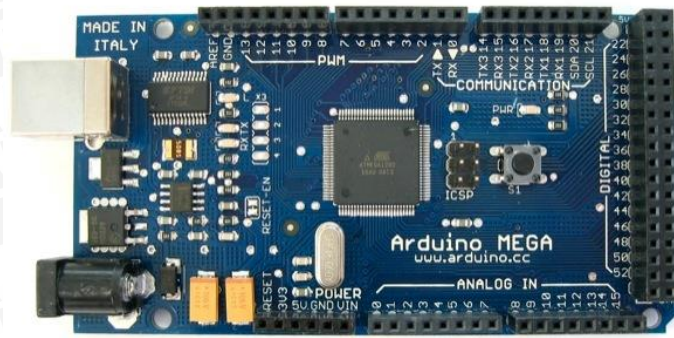
Pada rangkaian *zero cross detector* dibutuhkan rangkaian yang bisa mendeteksi persimpangan antara gelombang tegangan bolak-balik dengan titik nol agar pengaturan fasa dapat dilakukan pada titik nol gelombang tegangan bolak-balik. Metode ini berfungsi untuk menentukan frekuensi suatu gelombang dengan 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 *Pulse Width Modulation* (PWM). Dengan rangkaian *zero crossing detector*, bisa dilakukan pendeteksian *zero point* sekaligus mengubah suatu sinyal sinusoidal menjadi sinyal kotak. Sinyal keluaran rangkaian *zero cross detector* ini akan dimasukkan ke mikrokontroler, oleh karena itu dibutuhkan juga komponen yang mampu memisahkan tegangan 5V dan 220V. Untuk rangkaian ini digunakan komponen optocoupler 4N25.

## 2.6. Arduino Mega

Arduino Mega adalah board mikrokontroler berbasis Atmega1280. 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 mikrokontroler agar dapat digunakan, cukup hanya menghubungkan Board Arduino Mega ke komputer dengan menggunakan kabel USB atau dengan adaptor AC-DC untuk menjalankannya.

Secara fisik, ukuran Arduino Mega hampir kurang lebih 2 kali lebih besar dari Arduino Uno, ini untuk mengakomodasi lebih banyaknya pin Digital dan Analog pada board Arduino Mega tersebut. Tampilan Arduino Mega dapat dilihat pada gambar di bawah ini.





**Gambar 2.8.** Arduino Mega

(Sumber: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega>)

## 2.7. Catu Daya

Arduino mega dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber catu daya akan dipilih secara otomatis. Eksternal (non-USB) catu daya dapat berasal baik dari adaptor AC-DC atau baterai. Adaptor ini dapat dihubungkan dengan menancapkan sebuah 2.1mm konektor pusat-positif ke konektor listrik pada board. Baterai dapat dimasukkan ke dalam header pin Gnd dan Vin dari konektor catu daya.

Board dapat beroperasi pada pasokan eksternal 7 sampai 12 volt. apabila dicatu kurang dari 7V, pin 5V dapat menyediakan kurang dari 5V dan board bisa menjadi tidak stabil. Jika menggunakan lebih dari 12V, regulator tegangan bisa panas dan merusak board. Kisaran yang disarankan adalah 7 sampai 12 volt.

Pin untuk catu daya adalah sebagai berikut:

- a. VIN: Adalah *input* tegangan untuk *board* Arduino ketika menggunakan sumber catu daya eksternal.
- b. 5V: Sebuah pin yang mengeluarkan tegangan ter-regulator 5 Volt. Dari pin ini tegangan sudah diatur (ter-regulator) dari regulator yang tersedia (built-in) pada *board*. Arduino dapat diaktifkan dengan sumber catu daya baik berasal dari jack power DC (7-12 Volt), konektor USB (5 Volt), atau pin VIN pada board (7-12 Volt). Memberikan tegangan melalui pin 5V atau 3.3V secara langsung tanpa melewati regulator dapat merusak *board* Arduino.

- c. 3.3V: Sebuah pin yang menghasilkan tegangan 3,3 Volt. Tegangan ini dihasilkan oleh regulator yang terdapat pada papan (on-board). Arus maksimum yang dihasilkan adalah 50 mA.
- d. GND: Pin Ground.

## 2.8. Sensor Tekanan MPX5100AP

Sensor tekanan MPX5100AP merupakan seri Manifold Absolute Pressure (MAP) yaitu sensor tekanan yang dapat membaca tekanan udara dalam suatu manifold. Pada dasarnya sensor tekanan MPX5100AP adalah sebuah sensor tekanan yang sudah dilengkapi dengan rangkaian pengkondisi sinyal dan temperatur kalibrator yang membuat sensor ini stabil terhadap perubahan suhu.



**Gambar 2.9.** Sensor Tekanan MPX5100AP

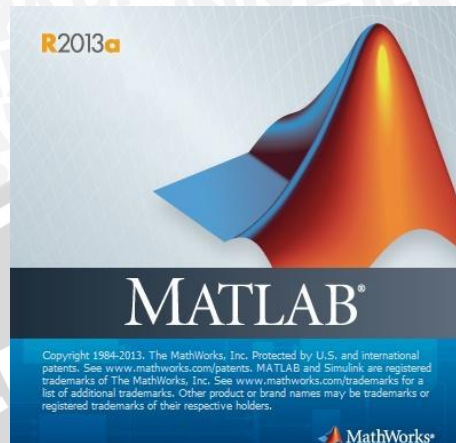
(Sumber: [www.freescale.com](http://www.freescale.com).)

## 2.9. Matlab

Matlab singkatan dari MATrix LABoratory, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork.Inc (<http://www.mathwork.com>). Bahasa pemrograman ini banyak digunakan untuk perhitungan numerik keteknikan, komputasi simbolik, visualisasi, grafis, analisis data matematis, statistika, simulasi, pemodelan, dan desain *Graphical User*



Interface (GUI) (Thomas W. D. H., 2004). Dalam penelitian ini aplikasi matlab dipergunakan sebagai alat bantu dalam mencari fungsi alih dan estimasi sistem.

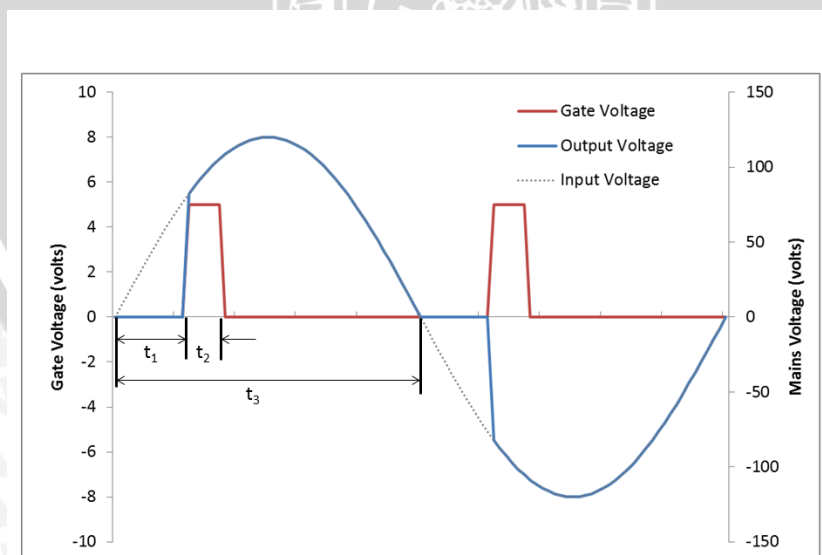


**Gambar 2.10.** Tampilan *Software* Matlab.

(Sumber: <http://www.mathworks.com/>)

## 2.10. PWM

PWM (*Pulse Width Modulation*) digunakan untuk mengatur tegangan yang masuk pada heater. Gambar 2.11 menunjukkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur tegangan AC yang masuk pada heater.



**Gambar 2.11.** Pengaturan Tegangan AC dengan PWM

(Sumber: <http://playground.arduino.cc>)



Dalam Gambar 2.11, setelah persimpangan nol gelombang terdeteksi, triac akan off dalam waktu ( $t_1$ ). Saat triac off maka tegangan AC juga masih off. Setelah triac aktif (ditampilkan dalam warna merah), gelombang AC juga akan keluar hingga saat gelombang melewati persimpangan nol. Walaupun triac sudah tidak aktif ( $t_2$ ), gelombang AC akan tetap aktif sampai persimpangan nol. Hal ini akan terus berulang saat gelombang melewati persimpangan nol yang selanjutnya ( $t_3$ ).

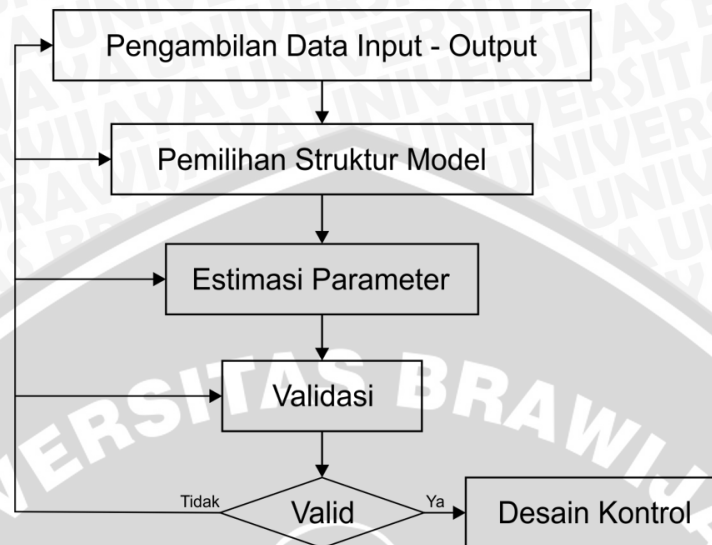
### 2.11. Dasar Identifikasi sistem

Identifikasi sistem adalah suatu pemodelan matematis terhadap suatu sistem atau proses, berdasarkan data-data atau hasil percobaan yang dilakukan. Dengan kata lain identifikasi sistem dapat diartikan sebagai pendekatan secara experimental terhadap proses pemodelan. Secara teknis, identifikasi sistem didefinisikan oleh Zadeh (1962) sebagai penentuan *input* dan *output* pada suatu sistem yang spesifik, yang ekuivalen dengan sistem yang diujikan.

Berdasarkan definisi di atas, terdapat tiga kesatuan dasar yang harus ada pada suatu identifikasi sistem yaitu data, sekumpulan model dan suatu rule atau kriteria untuk estimasi model.

Untuk mendapatkan model matematis dari sebuah sistem fisik dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu melalui pendekatan analisis dan eksperimen. Untuk metode dengan pendekatan analisis, sistem nyata (real system) diwakili oleh sebuah gabungan elemen-elemen pembentuk yang dianggap ideal. Cara untuk memperoleh model sistem tersebut adalah dengan menggunakan persamaan-persamaan dari hukum fisika (seperti: Kirchhoff, Newton, dll) dan komponen-komponen yang terpasang didalam sistem fisik (seperti: resistor, kapasitor, dll). Kelemahan dari metode ini terletak pada pengidealan komponen pembentuk yang tentunya akan mempengaruhi ketepatan model yang akan diperoleh, selain itu kompleksitas persamaan matematis dari hukum fisika yang harus diselesaikan. Semakin rumit dan besar sistem maka tentu akan semakin banyak melibatkan persamaan matematis. Selain kelemahan-kelemahan tersebut biasanya ketidaktersediaan informasi mengenai komponen-komponen yang ada didalam sistem tersebut juga akan mempersulit dalam melakukan pemodelan. Oleh karena kelemahan-kelemahan tersebut, digunakanlah metode yang kedua yaitu dengan metode

pendekatan eksperimen. Didalam proses identifikasi terdapat langkah langkah yang dapat ditunjukkan dalam Gambar 2.12.



**Gambar 2.12.** Bagan Prosedur Identifikasi

Untuk melaksanakan proses identifikasi sistem tersebut diperlukan langkah-langkah sebagai berikut:

- Pengambilan data *input-output*
- Menentukan struktur model
- Estimasi parameter
- Validasi model

### 2.12. Pengambilan Data *Input-Output*

Langkah awal dalam melaksanakan identifikasi sistem adalah pengambilan data *input-output*. Pengujian ini tentu memerlukan sinyal uji tertentu yang akan diberikan kepada sistem fisik yang akan diidentifikasi. Agar diperoleh model yang tepat maka dalam pemilihan sinyal uji ini tidak boleh sembarangan. Syarat pemilihannya adalah suatu sinyal uji harus memiliki cakupan frekuensi yang lebar dan standard yang digunakan adalah sinyal Pseudo Random Binary Sequences (PRBS). (Landau, 2006)

Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) adalah sinyal kotak yang termodulasi pada lebarnya dan berlangsung secara sekuensial. Sinyal ini biasanya



dibangkitkan menggunakan Linear Feedback Shift Register (LFSR). Pada LFSR memiliki 2 parameter dasar yang menentukan sifat sekuensial yang dihasilkan, yaitu: panjang dari shift register dan susunan umpan balik. PRBS memiliki variasi panjang sekuensialnya, tergantung dari panjangnya shift register seperti ditunjukkan Tabel 2.1.

Panjang dari shift register menentukan periode maksimum yang dapat dihasilkan dari sekuensial PRBS dan tidak berulang yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$L_{PRBS} = 2^n - 1 \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana n adalah panjang dari register LFSR (jumlah bit). Panjang maksimum dari PRBS disebut Msequence.

**Tabel 2.1.** Tabel Variansi Panjang Sinyal PRBS

Panjang Register (N)	Panjang Sekuensial $L=2^N-1$	Posisi Tap Umpan Balik
2	3	1 dan 2
3	7	1 dan 3
4	15	3 dan 4
5	31	3 dan 5
6	63	5 dan 6
7	127	4 dan 7
8	255	2, 3, 4 dan 8
9	511	5 dan 9
10	1023	7 dan 10

Sumber: Landau, 2006

**2.13. Menentukan Struktur Model**

Struktur model linier waktu diskrit dinyatakan oleh:

$$y(t)=G(q,\theta)u(t)+H(q,\theta)e(t)\dots\dots\dots(2.2)$$





Dengan  $y(t)$  merupakan keluaran dari model proses,  $u$  adalah masukan model proses.  $G(q,\theta)$  adalah model proses,  $H(q,\theta)$  adalah model gangguan sedangkan  $e(t)$  menyatakan Gaussian white noise dengan rerata nol dan variansi satu. Operator diwakili oleh  $q$  dimana  $q^{-1}u(t) = u(t-T)$  dan  $\theta$  adalah vektor parameter.

Struktur model yang didapatkan tergantung pada adanya polynomial A, B, C, D, dan F, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Macam - macam Struktur Model

Struktur	Model
B	AR
C	MA
A C	ARMA
A B	ARX
A B C	ARMAX
A B D	ARARX
B F	Output-Error (EO)
B F C D	Box-Jenkins (BJ)

Sumber: Brown and Hwang, 1992.

Dalam penelitian ini struktur model yang digunakan adalah ARMAX (Autoregressive moving average model with exogenous *input*), yang dapat dinyatakan sebagai:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \dots \dots \dots (2.3)$$

Sedangkan polynomial  $A(q)$ ,  $B(q)$  dan  $C(q)$  diberikan oleh:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \dots \dots \dots (2.6)$$

Bagian  $B(q)u(t)$  merupakan bagian yang disebut *input* “exogenous”.

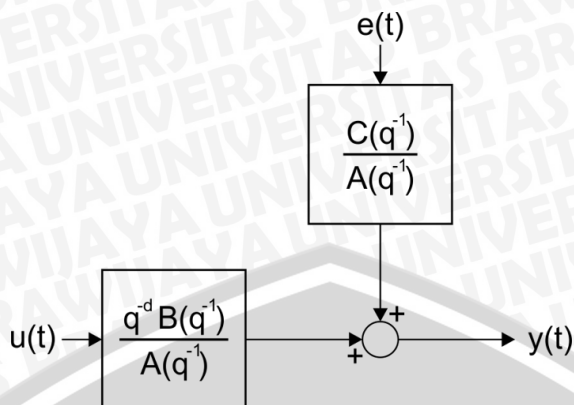
Dari persamaan yang telah disebutkan, diperoleh hubungan:

$$G(q, \theta) = \frac{B(q)}{A(q)} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$H(q, \theta) = \frac{C(q)}{A(q)} \dots \dots \dots (2.8)$$

Diagram struktur model ARMAX ditunjukkan oleh Gambar 2.16.





Gambar 2.13. Diagram Struktur Model ARMAX  
(Sumber: Landau, 2006)

**2.14. Estimasi Parameter**

Metode ini telah digunakan untuk mengidentifikasi “plant + gangguan” dari struktur:

$$A(q^{-1}) y(t) = q^{-d} B(q^{-1}) u(t) + C(q^{-1}) e(t) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$y(t + 1) = -a_1 y(t) + b_1 u(t) + c_1 e(t) + e(t + 1) \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana adalah  $y(t)$  adalah *output* sistem,  $u(t)$  adalah *input* sistem, dan  $e(t)$  adalah white noise. Dari persamaan diatas dapat diasumsikan bahwa “white prediction error” dapat dicari:

$$\hat{y}(t + 1) = -a_1 y(t) + b_1 u(t) + c_1 e(t) \dots\dots\dots (2.11)$$

Selanjutnya prediksi ini meminimalkan varians dari *error* prediksi  $E\{[y(t) - \hat{y}(t)]^2\}$ . *Error* prediksi ditentukan melalui:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = e(t) \dots\dots\dots (2.12)$$

Sehingga persamaan 2.11 dapat ditulis ulang menjadi:

$$\hat{y}(t + 1) = -a_1 y(t) + b_1 u(t) + c_1 \varepsilon(t) \dots\dots\dots (2.13)$$

Bentuk dari prediksi *A posteriori*:

$$\hat{y}(t + 1) = -\hat{a}_1(t+1)y(t) + \hat{b}_1(t+1)u(t) + \hat{c}_1(t+1)\varepsilon(t) = \hat{\theta}(t)^T \varphi(t) \dots\dots\dots (2.14)$$

Bentuk dari prediksi *error a posteriori*  $\varepsilon(t + 1)$  dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon(t + 1) = y(t + 1) - \hat{y}(t + 1) \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana:



$$\hat{\theta}(t)^T = [\hat{a}_1(t), \hat{b}_1(t), \hat{c}_1(t)] \quad ; \quad \varphi(t)^T = [-y(t), u(t), \varepsilon(t)]$$

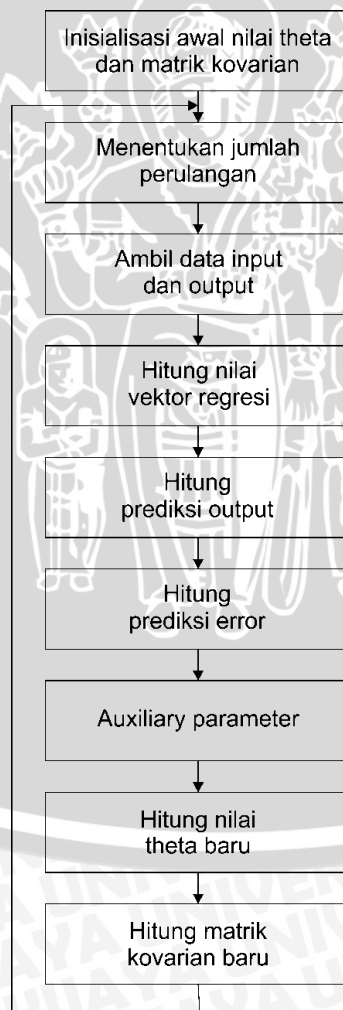
Secara umum, vektor parameter estimasi dan vektor observasi mempunyai bentuk:

$$\hat{\theta}(t)^T = [\hat{a}_1(t) \dots \hat{a}_{nA}(t), \hat{b}_1(t) \dots \hat{b}_{nB}(t), \hat{c}_1(t) \dots \hat{c}_{nC}(t)] \dots \dots \dots (2.16)$$

$$\varphi(t)^T = [-y(t) \dots -y(t-nA+1), u(t-d) \dots u(t-d-nB+1), \varepsilon(t) \dots \varepsilon(t-nC+1)] \dots (2.17)$$

- Dengan:  $\Theta$  = Vektor parameter estimasi                       $\mathcal{E}$  = Error estimasi  
 $y(t)$  = Output sebenarnya                                       $\hat{y}(t)$  = Output estimasi  
 $\varphi$  = Vektor regresi

Secara garis besar, langkah-langkah dalam melakukan estimasi parameter dengan metode *extended least square* dapat ditunjukkan oleh diagram alir seperti pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.14.** Diagram Estimasi *Extended Least Square*





**2.15. Validasi Model**

Validasi model digunakan untuk membedakan model yang benar terhadap model yang kurang benar. Validasi model dapat dilakukan dengan cara uji *Akaike's FPE* dan uji keakurasian.

**2.15.1. Akaike's Final Prediction Error (Akaike's FPE)**

Diketahui persamaan dari  $V_N(\theta, Z^N)$  adalah:

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \varepsilon(t)^2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan:

N: Banyaknya data

$\varepsilon$  : Nilai error

Jika  $d_M$  merupakan banyaknya parameter hasil estimasi berdasarkan N data yang digunakan dalam proses estimasi, maka didapatkan kriteria FPE:

$$FPE = \frac{1+(d_M/N)}{1-(d_M/N)} V_N(\theta, Z^N) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$FPE = \frac{1+(d_M/N)}{1-(d_M/N)} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \varepsilon(t)^2 \dots\dots\dots (2.20)$$

Kriteria ini dikemukakan sebagai error prediksi akhir. Pada kriteria tersebut menunjukkan bagaimana memodifikasi persamaan *loss function* untuk mendapatkan estimasi yang *reasonable* dari informasi estimasi saja. (Ljung, 1999)

**2.15.2. Uji Keakurasian**

Keakurasian model diuji dengan cara membandingkan respon model dengan respon sistem yang sebenarnya terhadap sinyal masukan tertentu seperti sinyal tangga dan PRBS. Angka keakurasian ini dinyatakan dalam prosentase, semakin besar nilainya (maksimal 100%) dapat diartikan bahwa

keluaran model sudah mendekati dengan keluaran sistem yang sesungguhnya. Nilai fitness ini dapat dihitung dengan persamaan:

$$FIT = \frac{1 - \text{norm}(y_{\text{plant}} - y_{\text{model}})}{\text{norm}(y_{\text{plant}} - \text{mean}(y_{\text{plant}}))} \times 100 \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan: FIT = Nilai keakurasian (0-100%)

$y_{\text{plant}}$  = Keluaran sistem yang sebenarnya

$y_{\text{model}}$  = Keluaran model

