

Sistem Kontrol Suhu dan Laju Pemanasan Alat Pirolisis

Muhammad Amiruddin¹, Bambang Sutopo², Rochmadi³

Abstract— In the process of pyrolysis, heating rate and temperature is an important parameter to be controlled, because it affects the results of the process. Temperature of the heating process in the heating chamber dimensions 35cm × 20cm × 20cm, monitored with a thermocouple type K that have a measurement range of -200°C to 1300°C. Setting the heating element uses AC voltage control TRIAC phase control method. Control system using fuzzy logic control with input variable E (error), CE (change of error), the delay time of TRIAC trigger and temperature process to produce a variable output of delay time change of TRIAC trigger involving fuzzy rules. The results of this study have produced a system of control ranges from 0° to 700°C, and is able to provide maximum heating rate of 9.9°C/min over a temperature range of 100°C to 200°C and heating rate of a minimum of 4, 4°C/min over a temperature range of 600°C to 700°C. In descriptive statistics, temperature control has a maximum temperature range in 8.9°C at 700°C setpoint and the maximum standard deviation of 2.2 at 500°C setpoint

Intisari— Dalam proses pirolisis, laju pemanasan dan suhu merupakan parameter yang penting untuk dikendalikan, karena berpengaruh dalam hasil proses tersebut. Suhu proses pemanasan dalam ruang pemanasan berdimensi 35cm × 20cm × 20cm, dimonitor dengan termokopel jenis K yang mempunyai rentang pengukuran -200°C sampai dengan 1300°C. Pengaturan elemen pemanas menggunakan TRIAC dengan pengendalian tegangan AC metode kontrol fasa. Sistem pengendalian menggunakan kendali logika fuzzy dengan variabel input E (error), CE (perubahan error), waktu tunda picuan TRIAC dan suhu proses untuk menghasilkan variabel output berupa perubahan waktu tunda picuan TRIAC yang melibatkan aturan fuzzy. Hasil penelitian ini menghasilkan sistem yang mempunyai rentang pengendalian dari 0° sampai dengan 700°C, dan mampu memberikan laju pemanasan maksimal sebesar 9,9°C/menit pada rentang suhu 100°C sampai dengan 200°C dan laju pemanasan minimum sebesar 4,4°C/menit pada rentang suhu 600°C sampai dengan 700°C. Secara statistik deskriptif, pengendalian suhu mempunyai rentang suhu maksimal sebesar 8,9°C pada setpoint 700°C dan standar deviasi maksimal 2,2 pada setpoint 500°C.

Kata Kunci— pirolisis, termokopel, kendali logika fuzzy, TRIAC, kontrol sudut fasa, *microcontroller*.

¹ Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: amiruddin.muhammad@yahoo.com)

^{2, 3} Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: bsutopo@te.ugm.ac.id, rochmadi@chemeng.ugm.ac.id)

I. PENDAHULUAN

Industri makanan, farmasi, pengolahan air, minyak dan gas alam dalam pengolahannya menggunakan proses adsorpsi. Adsorpsi digunakan untuk pemisahan campuran gas atau cairan berdasarkan perbedaan karakteristik kesetimbangan dan kemampuan mendifusi melalui pori-pori media pemisahannya. Karbon berpori dapat digunakan sebagai adsorben (penjerap) dalam proses adsorpsi, material tersebut dapat menjerap berbagai zat dengan menarik molekul tersebut ke permukaan internal. Luas permukaan karbon berpori merupakan salah satu karakteristik yang mempengaruhi besarnya kapasitas adsorpsi dan kemampuan penjerapan adsorbat (zat yang dijerap). Semakin luas permukaan maka makin banyak zat yang teradsorpsi. Proses yang dapat menghasilkan karbon berpori adalah pirolisis.

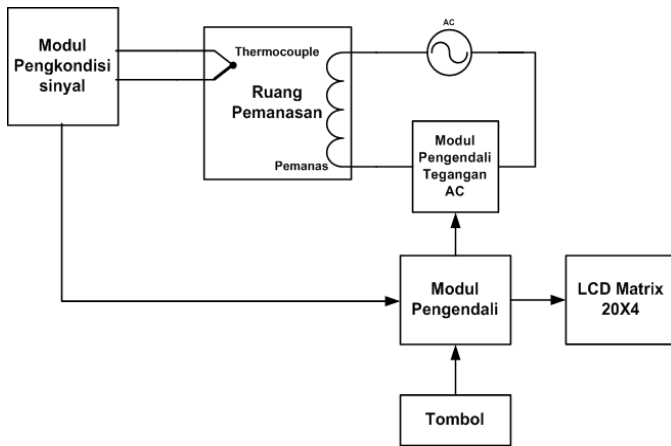
Pirolisis adalah suatu proses penguraian bahan kimia yang hanya menggunakan energi panas. Pirolisis yang menghasilkan karbon disebut dengan karbonisasi. Parameter yang berpengaruh pada proses karbonisasi adalah laju pemanasan (*ramprate*), suhu dan waktu proses karbonisasi (*holding time*).

Penelitian pembuatan karbon berpori menyimpulkan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis maka luas permukaan karbon berpori akan semakin besar. Semakin lambat laju pemanasan/*ramprate* maka luas permukaan karbon berpori akan semakin besar. Lamanya *holding time/thermal soak time* (waktu proses pirolisis) akan berpengaruh pada proses pembentukan dan pematapan pori.

Karena pentingnya laju pemanasan, suhu dan waktu proses pirolisis dalam proses pirolisis, maka proses kendali dan pemantauan suhu dan laju pemanasan sangat diperlukan, agar peneliti dapat mengendalikan besar suhu dan laju pemanasan dalam menghasilkan produk dengan proses pirolisis. Diharapkan dengan teknologi di bidang elektronika mampu untuk merealisasikannya.

II. DESAIN SISTEM

Sistem dirancang untuk mengendalikan parameter suhu dan laju pemanasan dengan metode *fuzzy logic controller* yang diimplementasikan pada sebuah mikrokontroler. Untuk mempermudah penggunaannya, maka sistem dilengkapi dengan LCD Matrix 20X4 untuk penampil menu kerja. Desain keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Diagram blok sistem pengendalian suhu dan laju pemanasan alat pirolisis

A. Desain Perangkat Keras

1) *Ruang Pemanasan*: Ruang pemanasan yang digunakan untuk proses pirolisis berukuran 35cm×20cm×20cm. Untuk mengetahui nilai parameter suhu dan laju pemanasan digunakan *thermocouple* tipe K yang mempunyai rentang pengukuran -200°C sampai dengan 1300°C. *Thermocouple* mempunyai keluaran berupa beda tegangan pada kedua terminal keluarannya. Sensitivitas *thermocouple* jenis K adalah sebesar $\pm 41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [1]. Sesuai ketentuan ASTM (*American Society for Testing and Materials*), pengukuran keluaran *thermocouple* hanya didapat apabila suhu pada terminal keluarannya (*reference junction*) 0 °C[5]. Konversi suhu terukur menjadi tegangan keluaran dapat menggunakan (1). Untuk konversi tegangan keluaran menjadi suhu terukur dapat menggunakan (2).

$$E_{0j}(T) = b_0 + b_1T_j + b_2T_j^2 + \dots + b_nT_j^n + a_0e^{(a_1(T-a_2)^2)} \quad (1)$$

$$T_j = c_0 + c_1E_j + c_2E_j^2 + \dots + c_nE_j^n \quad (2)$$

(1) dan (2) menggunakan koefisien yang tiap jenis *thermocouple* mempunyai nilai yang berbeda. Pada prakteknya, sukar untuk mempertahankan suhu *reference junction* 0 °C, maka keluaran tegangan *thermocouple* dapat dihitung dengan (3)[1][5].

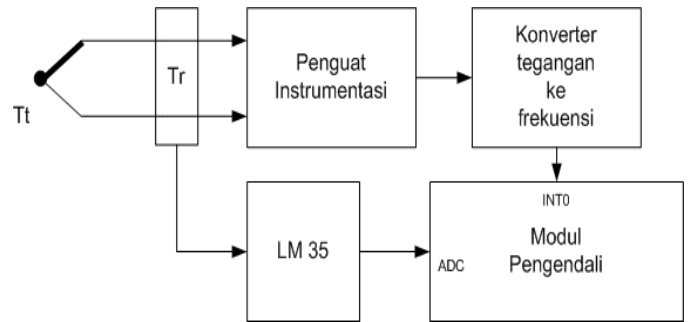
$$E_{0j} = E_{jr} + E_{0r} \quad (3)$$

E_{0j} = tegangan *thermocouple* dengan *reference junction* 0 °C.

E_{jr} = tegangan *thermocouple* dengan *reference junction* yang terukur r °C.

E_{0r} = tegangan *thermocouple* pada suhu r °C dengan *reference junction* 0 °C.

2) *Modul Pengkondisi Sinyal Thermocouple*: Modul ini berfungsi untuk mengolah keluaran analog *thermocouple* menjadi data digital. Modul ini terdiri dari 3 bagian yaitu : pengkompensasi tegangan keluaran *thermocouple* (LM35), penguat instrumentasi dan konverter tegangan ke frekuensi. Diagram blok modul pengkondisi sinyal seperti pada Gbr. 2.



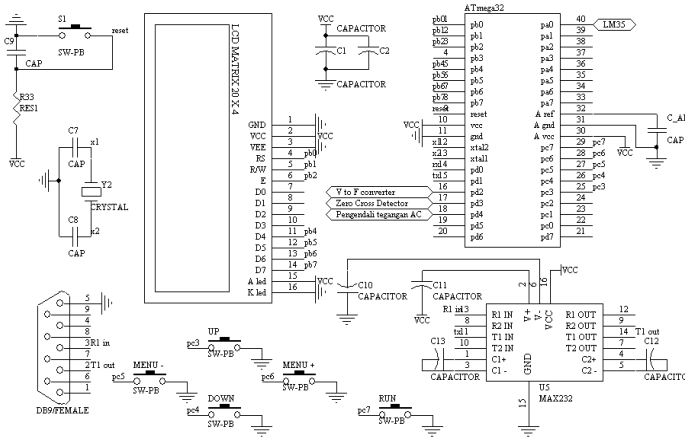
Gbr. 2 Diagram blok modul pengkondisi sinyal *thermocouple*

Pengkompensasi tegangan keluaran *thermocouple* berfungsi untuk mengukur suhu *reference junction* (T_r) menggunakan sensor LM35 yang mempunyai sensitivitas 10 mV/°C[2]. Keluaran dari LM35 akan dihubungkan ke port ADC kanal 0 pada modul pengendali. Apabila suhu *reference junction* (T_r), maka nilai E_{0r} dapat dihitung dengan (1).

Penguat instrumentasi terdiri dari 3 buah OPAMP yang berfungsi untuk menguatkan sinyal keluaran *thermocouple* yang besarnya hanya dalam orde mV. Kemudian keluaran dari penguat instrumentasi dihubungkan dengan konverter tegangan ke frekuensi.

Konverter tegangan ke frekuensi berfungsi untuk mengkonversi tegangan keluaran penguat instrumentasi menjadi gelombang kotak dengan frekuensi berbanding lurus dengan besar tegangan masukan, menggunakan IC XR4151 yang mempunyai range tegangan masukan 0 – 10 Volt dan waktu respon sebesar 135 ms[7]. Keluaran dari konverter tegangan ke frekuensi berupa gelombang kotak dengan level TTL, dihubungkan port INT0 mikrokontroler pada modul pengendali untuk dicacah. Frekuensi atau banyaknya cacahan pulsa (gelombang kotak) dalam 1 detik dapat dikonversi menjadi nilai E_{jr} , Sehingga nilai E_{0j} dapat dihitung dengan (3) dan dapat dikonversi menjadi nilai suhu ruang pemanasan (T_j) dengan (2).

3) *Modul Pengendali*: Modul pengendali berupa sistem minimum mikrokontroler ATmega32 yang didukung oleh perangkat lunak berfungsi sebagai elemen pengukuran, pembandingan dan kontrol. Sebagai elemen pengukuran dan pembandingan, port INT0 (port D.2) dihubungkan dengan keluaran modul pengkondisi sinyal *thermocouple*. Sebagai elemen kontrol, pada port INT1 (port D.3) dihubungkan dengan modul *zero cross detector* dan pada port D.4 dihubungkan dengan modul pengendali tegangan AC untuk memicu TRIAC. Pada modul pengendali dihubungkan dengan LCD Matrix 20X4 untuk menampilkan menu kerja alat. Untuk pengaturan parameter *setpoint*, *ramprate* dan *holding time* disediakan 5 buah tombol yang berfungsi untuk menaik/turunkan nilai parameter, mengganti menu dan eksekusi pengendalian. Skematik modul pengendali dapat dilihat pada Gbr. 3.



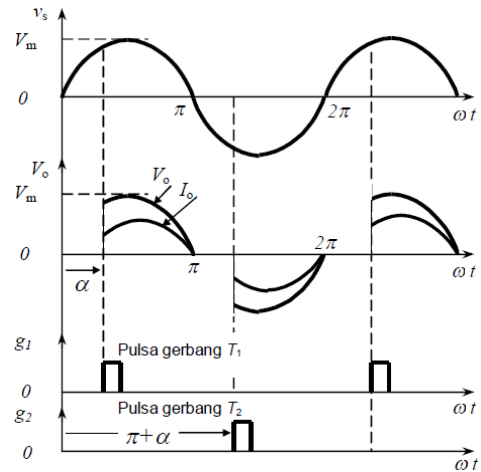
Gbr. 3 Skematik modul pengendali

4) *Modul Zero Cross Detector*: Modul ini berfungsi untuk mendeteksi pergantian siklus antara siklus positif dan negatif pada tegangan AC. Pergantian siklus yang terjadi pada titik nol digunakan untuk acuan pemucuan TRIAC. Keluaran modul berupa gelombang kotak dengan level TTL, yang berfrekuensi sama dengan input sinyal AC untuk membangkitkan interupsi Eksternal 1 mikrokontroler pada modul pengendali.

5) *Modul Pengendali Tegangan AC*: Modul ini berfungsi sebagai elemen koreksi, mengatur aliran panas ke dalam ruang pemanasan dengan cara mengatur tegangan AC pemanas metode kontrol sudut fasa. Metode kontrol sudut fasa adalah pengontrolan tegangan AC dengan cara memberikan waktu tunda (α) pada picuan TRIAC[4] seperti pada Gambar 4. Dengan tegangan AC sumber (V_s), maka besar tegangan hasil pengontrolan (V_o) adalah sesuai dengan (4). Arus maksimal yang mengalir pada pemanas adalah sebesar 21,56 Ampere. TRIAC yang digunakan untuk mengatur tegangan pemanas adalah BTA41-600B yang mampu mengalirkan arus maksimal 41 Ampere dengan tegangan maksimal kedua terminal sebesar 600 Volt. IC MOC3021 digunakan untuk mengisolasi level tegangan AC dan level tegangan mikrokontroler. Dalam penelitian ini, modul pengendali tegangan AC dihubungkan dengan port D.4 mikrokontroler pada modul pengendali.

$$V_o = V_s \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

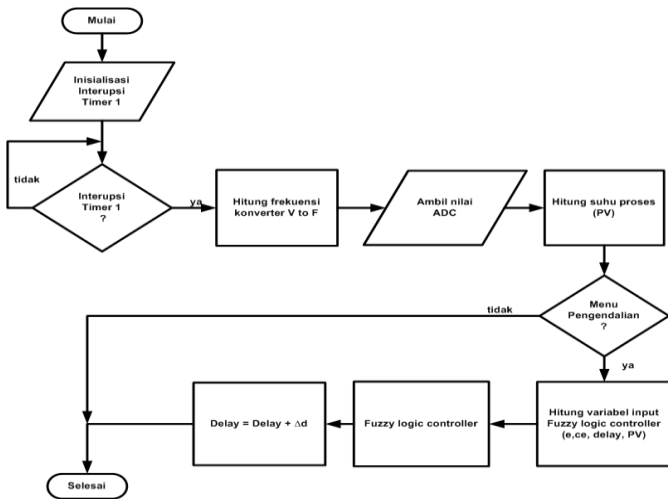
Diketahui dari Persamaan 2, bahwa hubungan waktu tunda (α) picuan TRIAC dan besar tegangan hasil pengendalian tegangan AC (V_o) adalah berbanding terbalik.



Gbr. 4 Bentuk gelombang pengendalian tegangan AC

B. *Desain Perangkat Lunak*

1) *Modul Pengendali*: Modul pengendali berupa sistem minimum mikrokontroler ATmega32 yang didukung oleh perangkat lunak berfungsi sebagai elemen pengukuran, pembanding dan kontrol. Sebagai elemen pengukuran, melakukan perhitungan nilai suhu ruang pemanas. Sebagai elemen pembanding, melakukan perhitungan nilai *error* dari target. Sebagai elemen kontrol, melakukan perhitungan dengan metode *fuzzy logic controller* yang menghasilkan perubahan waktu tunda picuan TRIAC dan melakukan picuan TRIAC untuk mengatur tegangan pemanas. ADC diaktifkan untuk mengkonversi keluaran analog LM35 pada port ADC kanal 0. Interupsi yang diaktifkan yaitu Eksternal 0 untuk mencacah gelombang kotak keluaran dari modul pengkondisi sinyal. Eksternal 1 untuk mendeteksi perubahan logika keluaran modul *zero cross detector*. *Timer 0* untuk pengatur waktu tundaan picuan TRIAC, yang dipengaruhi nilai *register TCNT0*. *Timer 1* sebagai pengatur interupsi dengan periode 1 detik, didalam interupsi ini terdapat rutin perhitungan dengan metode *fuzzy logic controller* yang menghasilkan perubahan waktu tunda picuan TRIAC untuk mengendalikan daya pemanas. Diagram alir rutin kerja dalam interupsi *Timer 1* seperti pada Gbr. 5. *Timer 2* untuk pengatur rutin kerja tampilan menu pada LCD dan kerja tombol, Komunikasi serial digunakan untuk berkomunikasi dengan PC, interupsi dibangkitkan apabila ada penerimaan data (RX) dari PC.

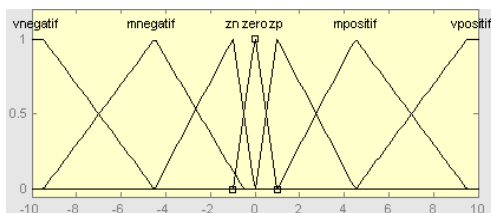


Gbr. 5 Diagram alir interupsi Timer 1

2) *Fuzzy Logic Controller*: Sistem kendali ini mempunyai 4 variabel input yaitu *E* (*error*), *CE* (*change of error*), *Delay* (nilai *register TCNT0* pada mikrokontroler) dan suhu ruang pemanasan .

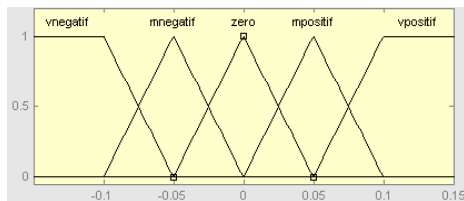
Tahap pertama kendali logika *fuzzy* adalah fuzzifikasi, yaitu pemetaan masing – masing variable input untuk menghasilkan derajat keanggotaannya. Untuk itu, perlu ditentukan besar semester pembicaraan dan pembagian himpunan *fuzzy* untuk masing – masing variabel input.

Keseluruhan semesta pembicaraan variabel *E* (*error*) dan 7 pembagian himpunan *fuzzy* adalah seperti Gbr. 6.



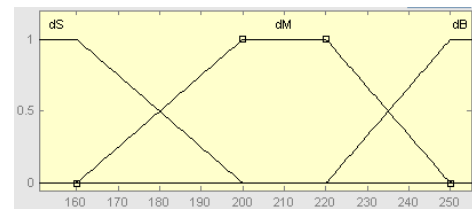
Gbr. 6 Variabel input E

Keseluruhan semesta pembicaraan variabel *CE* (*change of error*) dan 5 pembagian himpunan *fuzzy* adalah seperti Gbr. 7.



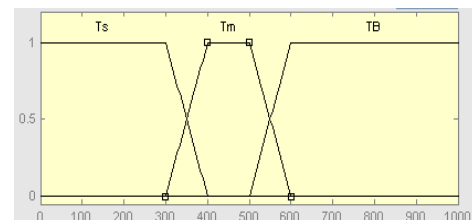
Gbr. 7 Variabel input CE

Keseluruhan semesta pembicaraan variabel *delay* dan 3 pembagian himpunan *fuzzy* adalah seperti Gbr. 8.



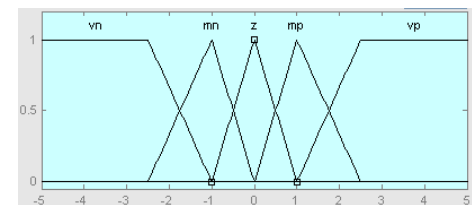
Gbr. 8 Variabel input delay

Keseluruhan semesta pembicaraan variabel suhu ruang pemanasan dan 3 pembagian himpunan *fuzzy* adalah seperti Gbr. 9.



Gbr. 9 Variabel input suhu ruang pemanasan

Sebagai output kendali *fuzzy* adalah perubahan nilai *register TCNT0* pada mikrokontroler yang mempengaruhi besar waktu tunda picuan TRIAC. Keseluruhan semesta pembicaraan variabel output dan 5 pembagian himpunan *fuzzy* adalah seperti Gbr. 10.



Gbr. 10 Variabel output

Setelah proses fuzzifikasi yang menghasilkan nilai derajat keanggotaan dari semua variabel input, dilanjutkan dengan proses implikasi yaitu pengambilan nilai terkecil dengan operasi *fuzzy min* dari variabel input yang terlibat dalam aturan *fuzzy*. Aturan *fuzzy* dirancang berdasarkan pengetahuan tentang keluaran sistem yang akan dikendalikan dalam format *IF THEN*. Dalam penelitian ini melibatkan 59 aturan *fuzzy*, maka proses implikasi menghasilkan 59 keluaran nilai terkecil dari variabel input dalam setiap aturan *fuzzy*.

Setelah implikasi, dilanjutkan dengan proses agregasi yaitu proses penggabungan keluaran implikasi berupa nilai terkecil dari variabel input dalam setiap aturan *fuzzy*, untuk mendapatkan nilai derajat keanggotaan terbesar dengan operasi *fuzzy max*.

Tahap akhir adalah proses defuzzifikasi untuk mendapatkan keluaran tegas dari keluaran proses agregasi berupa nilai derajat keanggotaan terbesar (maksimal) dari setiap proses implikasi sebanyak 59 aturan *fuzzy*. Metode yang dipakai untuk defuzzifikasi pada penelitian ini adalah *centroid* dengan (5),

$$Z_{COA} = \frac{\sum_{i=0} u_A(x) x}{\sum_{i=0} u_A(x)} \tag{5}$$

dengan x adalah nilai titik – titik pada sumbu x *fuzzy set* tunggal hasil agregasi, sedangkan $uA(x)$ adalah nilai derajat keanggotaan dari masing titik – titik x tersebut. Dengan rumus tersebut, maka akan didapat hasil pusat masa kurva tertutup *fuzzy set* tunggal. Hasil tersebut akan digunakan sebagai keluaran tegas dalam pengendalian dalam penelitian ini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

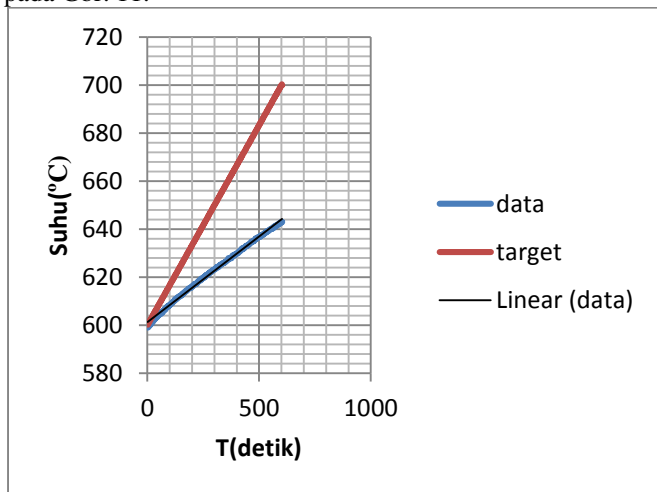
A. Pengujian Laju Pemanasan Maksimal.

Pengujian dilakukan dengan pengaturan *ramprate* (target laju pemanasan) yang sama yaitu 10°C/ menit, untuk setiap kenaikan suhu sebesar 100°C. Setelah didapat hasil pengujian, dilanjutkan dengan perhitungan rata-rata *error* antara data hasil pengendalian dan garis target *ramprate*. Pengujian memberikan hasil pada Tabel 1.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN LAJU PEMANASAN

Suhu(°C)	Ramprate (°C/menit)	Rata-rata error
28 - 100	10	2,08
100 - 200	10	0,54
200 - 300	10	2,90
300 - 400	10	3,55
400 - 500	10	8,38
500 - 600	10	16,25
600 - 700	10	27,53

Dari hasil pengujian pada Tabel 1, rata-rata *error* yang cenderung semakin besar dan bernilai positif membuktikan nilai laju pemanasan lebih kecil atau lebih lambat dari garis target *ramprate* seiring naiknya suhu ruang pemanasan. Untuk mengetahui laju pemanasan maksimal untuk setiap tingkatan suhu, dilakukan perhitungan *curve fitting* regresi linear dari data hasil pengujian laju pemanasan. Sebagai contoh adalah pengujian laju pemanasan pada suhu 600 sampai dengan 700°C pada Gbr. 11.



Gbr. 11 Pengujian laju pemanasan suhu 600°C sampai dengan 700°C

Dari hasil perhitungan *curve fitting* regresi linear, didapat persamaan garis linear,

$$y = 0,074x + 600 \tag{6}$$

Dari Persamaan 6, dapat diketahui besar laju pemanasan maksimal pada rentang suhu 600°C - 700°C adalah 0,074°C/detik (4,44°C/menit). Hasil perhitungan *curve fitting* untuk semua rentang suhu tercantum pada Tabel 2.

TABEL II
LAJU PEMANASAN MAKSIMAL

Rentang suhu (°C)	Laju pemanasan maksimal (°C/menit)
28 - 100	9,78
100 - 200	9,90
200 - 300	9,48
300 - 400	9,42
400 - 500	8,40
500 - 600	6,54
600 - 700	4,44

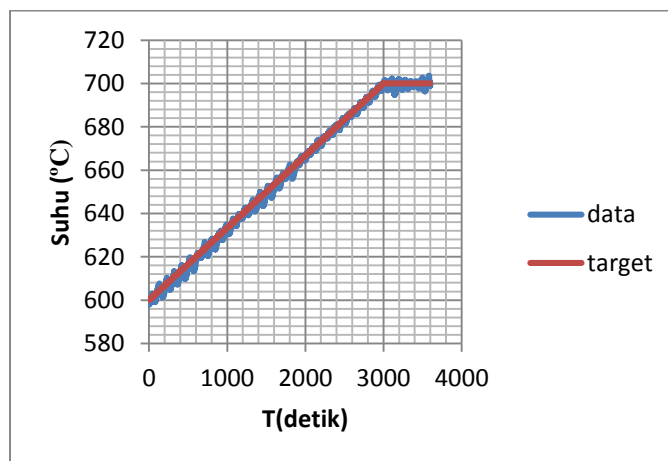
B. Pengendalian Laju Pemanasan dan Suhu

Pengujian hasil pengontrolan laju pemanasan dan suhu dilakukan dengan melakukan pengaturan *setpoint*, *holding time* dan *ramprate* seperti pada Tabel 3 berikut.

TABEL III
PENGUJIAN LAJU PEMANASAN DAN SUHU

Set point (°C)	Holding time (menit)	ramprate (°C/menit)
100	10	5
200	10	5
300	10	5
400	10	5
500	10	5
600	10	2
700	10	2

Sebagai contoh adalah grafik hasil pengendalian laju pemanasan dan suhu dengan suhu awal 600°C , nilai *setpoint* 700°C dan *holding time* selama 10 menit seperti pada Gbr. 12.



Gbr. 12 Pengendalian laju pemanasan dan suhu 600°C sampai dengan 700°C

1) *Pengendalian laju pemanasan*: Pengujian terhadap laju pemanasan untuk mengetahui kemampuan pengendalian kenaikan suhu secara bertahap sesuai dengan garis target *ramp rate*. Hasil pengujian pengontrolan laju pemanasan pada tiap tingkatan suhu dapat dilihat pada Tabel 4. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa pengendalian laju pemanasan berjalan dengan baik, dapat mengikuti garis target *ramprate* dengan rata-rata *error* yang kecil.

TABEL IV
HASIL PENGENDALIAN LAJU PEMANASAN

Suhu (°C)	Rata-rata error
... - 100	0,71
100 - 200	0,73
200 - 300	0,99
300 - 400	0,99
400 - 500	1,37
500 - 600	1,24
600 - 700	0,93

2) *Pengendalian suhu*: Pengujian terhadap pengendalian suhu dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem untuk mempertahankan suhu sesuai nilai *setpoint* selama waktu *holding time* yang ditentukan. Dari data hasil pengendalian pada Gbr. 10, besar penyimpangan data dari nilai *setpoint* dapat diketahui dengan perhitungan ukuran penyebaran dengan parameter jarak (*range*), dan standar deviasi (σ). Persamaan jarak dan standar deviasi adalah sebagai berikut.

$$\text{range} = \text{nilai max} - \text{nilai min} \quad (7)$$

$$\text{Standar deviasi } (\sigma) = \sqrt{\frac{\sum(x-u)^2}{N}} \quad (8)$$

dengan:

- X = nilai data hasil pengendalian
 μ = nilai rata-rata hitung
 N = jumlah total data

Dengan parameter jarak (*range*), secara sederhana, dapat diketahui ukuran penyebaran data hasil pengendalian. Semakin besar jarak (*range*) berarti pengendalian semakin tidak presisi karena data hasil pengendalian melebar. Dengan parameter standar deviasi (σ), dapat diketahui keakuratan dan kepresisian dari pengendalian. Dalam perhitungan standar deviasi, melibatkan rata-rata hitung data. Apabila rata-rata

hitung data mendekati dengan nilai *setpoint* maka pengendalian semakin akurat. Semakin kecil standar deviasi, pengendalian semakin presisi, karena selisih data dengan rata-rata hitungnya adalah kecil. Keseluruhan hasil pengujian untuk *setpoint* dari 100 °C sampai dengan 700 °C disajikan pada Tabel 5.

TABEL V
HASIL PENGENDALIAN SUHU

Setpoint (°C)	Suhu maks (°C)	Suhu min (°C)	Range (°C)	rata-rata hitung data (°C)	Standar deviasi
100	101,1	99,0	2,1	99,7	0,41
200	201,1	198,5	2,6	199,6	0,46
300	301,0	297,2	3,8	299,5	0,83
400	402,9	397,1	5,8	399,7	1,35
500	503,5	495,6	7,8	499,2	2,20
600	602,9	595,9	7,0	599,2	1,80
700	703,6	694,7	8,9	699,4	1,66

IV. KESIMPULAN

Kisaran pengendalian yang dapat dicapai oleh sistem kontrol suhu dan laju pemanasan alat pirolisis pada penelitian ini adalah ± 700 °C. Semakin tinggi suhu ruang pemanasan, laju pemanasan akan semakin lambat dengan laju pemanasan maksimal 9,9°C pada rentang suhu 100°C - 200°C dan laju pemanasan minimum 4,4°C pada rentang suhu 600°C - 700°C. Dengan perhitungan statistik deskriptif membuktikan range maksimal hasil pengontrolan suhu sebesar 8,9°C pada setpoint 700°C dan standar deviasi maksimal sebesar 2,2 pada setpoint 500°C.

REFERENSI

- [1] Bolton, W., *Sistem Instrumentasi dan Sistem Kontrol*, Erlangga, 2006.
- [2] LM35/LM35A/LM35B/LM35C/LM35DP Precision Centigrade Temperature Sensors, National Semiconductor, 1994.
- [3] Nhivekar, G.S., S.S. Nirmale, and R.R. Mudholker, "Implementation of Fuzzy Logic Controller in Embedded Microcomputers for Dedicated Applications," International Journal of Engineering, Science and Technology Vol 3, No.4, 2011, pp.276-283, MultiCraft Limited, 2011.
- [4] Rashid, M.H., "Power Electronic Circuit, Device, And Applications Second Edition," Prentice-Hall International Inc, 1993.
- [5] Recktenwald, G., "Conversion of Thermocouple Voltage to Temperature," Mechanical and Materials Engineering Department, Portland State University, Oregon, 2010.
- [6] Widodo, T.S., *Teknik Neuro Fuzzy* Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, 2009.
- [7] XR4151 Voltage to Frequency Converter, EXAR Corporation, 1999.