

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pembuatan Alat

Alat pengontrol suhu pada tanur temperatur tinggi yang telah dibuat terdiri atas rangkaian elektronik yang dikemas dalam *box* dan SSR (*solid state relay*) seperti ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2 berikut.



Gambar 4.1 *Box* rangkaian elektronik.



Gambar 4.2 *Solid State Relay* dengan *heatsink* dan kipas pendingin.

Pemasangan SSR terpisah dari rangkaian elektronik dilakukan agar panas pada SSR dapat dengan cepat ditransfer ke lingkungan, sehingga suhu SSR tetap terjaga dan tidak mengalami panas yang berlebih (*overheat*). Selain itu, dilakukan pula pemasangan *heatsink* dan kipas pendingin pada SSR untuk menjaga SSR tetap stabil pada suhu kerjanya. Perlakuan-perlakuan tersebut dilakukan agar SSR dapat bekerja secara optimal dalam mengontrol tegangan suplai yang dihubungkan pada elemen pemanas. Karena jika terjadi panas yang berlebih (*overheat*), maka materi semikonduktor pada suhu tinggi dapat berperilaku sebagai konduktor yang mengakibatkan tegangan keluaran yang tidak terkontrol.

Berdasarkan hasil pengujian alat, penggunaan SSR sebagai elemen pensaklaran terbukti tidak menghasilkan suara bising dan percikan api (*spike*) dibandingkan penggunaan relay mekanik.

4.2 Pengujian Alat

4.2.1 Pengujian Catu daya

Pengujian catu daya dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerja dari rangkaian catu daya yang telah dibuat. Langkah pengujiannya yaitu rangkaian catu daya dihubungkan ke sumber tegangan AC (PLN), kemudian tegangan keluaran catu daya diukur dengan menggunakan multimeter digital. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai uji tegangan keluaran catu daya.

Pengukuran ke-	Tegangan keluaran (volt)			
	Untuk mikrokontroler	Untuk rangkaian pengkondisi sinyal		Untuk kipas pendingin
1	+5,05	+15,02	-15,24	+12,22
2	+5,05	+15,02	-15,23	+12,22
3	+5,05	+15,01	-15,23	+12,22
4	+5,05	+15,02	-15,24	+12,22
5	+5,05	+15,02	-15,23	+12,22
Rata-rata	+5,05	+15,018	-15,234	+12,22

Dari tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian tegangan keluaran catu daya adalah stabil pada 5,05 volt untuk tegangan mikrokontroler, +15,02 volt dan -15,23 volt untuk rangkaian pengkondisi sinyal dan +12,22 volt untuk kipas pendingin. Hasil tersebut telah sesuai dengan kebutuhan tegangan mikrokontroler, pengkondisi sinyal dan kipas pendingin. Oleh karena itu catu daya ini dapat digunakan untuk mencatu ketiga rangkaian tersebut.

4.2.2 Pengujian *keypad*

Pengujian *keypad* dilakukan untuk mengetahui susunan pin-pin yang terhubung saat salah satu tombol *keypad* ditekan. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam menghubungkan *keypad* pada port mikrokontroler. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui apakah semua tombol dapat berfungsi dengan baik atau tidak.

Pengujian *keypad* dilakukan berdasarkan adanya hambatan yang muncul saat suatu pin pada *keypad* terhubung. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat ukur multimeter digital untuk mengukur nilai hambatan pada pin-pin *keypad* yang terhubung saat tombol ditekan. Namun saat tombol tidak ditekan maka nilai hambatannya bernilai nol. Tabel 4.2 adalah hasil pengujian *keypad* yang menunjukkan bahwa semua tombol pada *keypad* dapat berfungsi dengan baik.

Tabel 4.2 Hasil pengujian tombol *keypad* 4x4.

Tombol	Pin yang terhubung	
	Masukan	Keluaran
1	1	5
2	1	6
3	1	7
4	2	5
5	2	6
6	2	7
7	3	5

8	3	6
9	3	7
0	4	6
COR	1	8
MEN	2	8
CAN	4	5
ENT	4	7
↑	3	8
↓	4	8

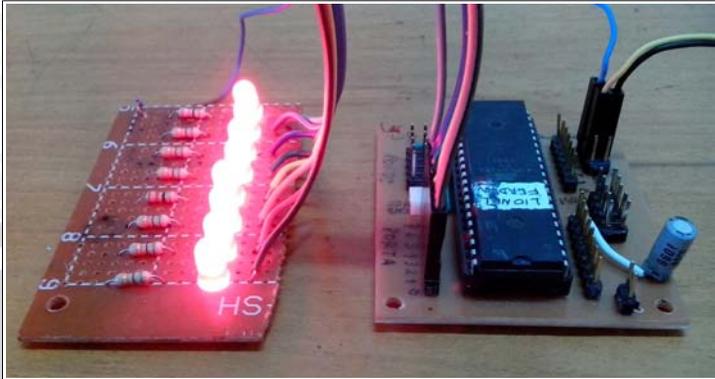
4.2.3 Pengujian Port Sistem Minimum ATmega16A

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sistem minimum ATmega16A dapat bekerja sesuai fungsinya atau tidak. Pengujian dilakukan dengan menjalankan program I/O pada empat port yang dimiliki oleh mikrokontroler ATmega16A dengan LED sebagai indikatornya. LED dihubungkan ke pin-pin pada setiap port secara bergantian untuk mengetahui apakah pin-pin mikrokontroler ATmega16A telah berfungsi atau belum. Berikut adalah kode program yang ditulis dalam bahasa C dengan *compiler* WinAVR-GCC:

```
# include <avr/io.h>

int main()
{
    DDRA=0xFF; // Set PORT A sebagai keluaran
    DDRB=0xFF; // Set PORT B sebagai keluaran
    DDRC=0xFF; // Set PORT C sebagai keluaran
    DDRD=0xFF; // Set PORT D sebagai keluaran

    PORTA=0x00; //Keluaran PORT A berlogika rendah
    PORTB=0x00; //Keluaran PORT B berlogika rendah
    PORTC=0x00; //Keluaran PORT C berlogika rendah
    PORTD=0x00; //Keluaran PORT D berlogika rendah
    while(1) {;}
}
```



Gambar 4.3 Pengujian port sistem minimum ATmega16A.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1, dapat diketahui bahwa pot-port yang tersedia pada sistem minimum ATmega16A dapat berfungsi dengan baik. Hal tersebut dapat dilihat dari semua lampu LED yang menyala saat dihubungkan pada setiap port.

4.2.4 Pengujian LCD

Pengujian LCD dilakukan untuk mengetahui kelayakan rangkaian LCD yang telah dibuat untuk digunakan. Pengujian awal dilakukan dengan menghubungkan pin 2 dan 15 pada LCD dengan catu daya +5 volt. Perlakuan tersebut hanya akan membuat LCD menyala tanpa ada karakter yang ditampilkan pada LCD. Pengujian tersebut masih belum mengindikasikan apakah LCD dapat bekerja dengan baik atau tidak, oleh karena itu dilakukan pengujian selanjutnya dengan menjalankan program yang telah ditanamkan pada mikrokontroler ATmega16A untuk menampilkan suatu karakter pada LCD melalui PORT C. Berikut adalah kode program yang akan menampilkan tulisan “PENGUJIAN LCD SUKSES” yang ditulis pada editor AVR Studio 4.16 dengan *compiler* WinAVR-GCC:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include "lcd.h"

int main()
{
    lcd_init(LCD_DISP_ON);
```

```

lcd_clrscr();
lcd_gotoxy(1,0); lcd_puts("PENGUJIAN LCD");
lcd_gotoxy(4,1); lcd_puts("SUKSES");

while(1) {;}
}

```



Gambar 4.4 Tampilan hasil pengujian LCD 16x2.

4.2.5 Pengujian ADC

Pengujian ADC dilakukan untuk mengetahui apakah proses konversi sinyal analog dari pengkondisi sinyal menjadi sinyal digital telah bekerja dengan baik. Proses konversi berhasil apabila diperoleh nilai digital yang mewakili sinyal analog yang masuk ke *channel* ADC mikrokontroler, artinya nilai digital yang dihasilkan sebanding dengan masukan tegangan relatif terhadap tegangan referensi. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan tegangan analog dari pengkondisi sinyal pada masukan channel 0 ADC (pin A0). Hasil konversi berkisar antara 0 sampai 1023 (ADC 10-bit) akan ditampilkan pada LCD 16x2.

Berikut ini adalah kode program untuk mengkonversi sinyal analog menjadi sinyal digital yang ditampilkan pada LCD 16x2 dalam bahasa C menggunakan *compiler* WinAVR-GCC:

```

#include <stdlib.h>
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include "lcd.h"

char sensor[4];
unsigned char rendah;
unsigned int tenbitvalue;

```

```

int main()
{
    ADMUX = 0b01100000;
    ADCSRA = 0b10000111;

    lcd_init(LCD_DISP_ON);

    while(1)
    {
        ADCSRA |= (1<<ADSC);
        while(ADCSRA & (1<<ADSC)) {;}
        rendah = ADCL;
        tenbitvalue= ADCH << 2 | rendah >> 6 ;
        itoa(tenbitvalue, sensor, 10);

        lcd_clrscr();
        lcd_gotoxy(3,0); lcd_puts("ADC = ");
        lcd_puts(sensor); lcd_gotoxy(9,0);
        _delay_ms(500);
    }
}

```



(a) 0,2 mV



b) 2,45 V



(c) 5,02 V

Gambar 4.5 Tampilan hasil konversi ADC.

Tegangan minimum = 0 V

Tegangan referensi = 5,02 V

$$\text{Resolusi ADC} = \frac{5,02 \text{ V}}{1024} = 0,0049 \text{ V} = 4,9 \text{ mV}$$

Tegangan masukan saat nilai digital ADC 0

$$V_0 = \frac{0}{1023} \times 5,02 = 0 \text{ V}$$

Tegangan masukan saat nilai digital ADC 500

$$V_{500} = \frac{500}{1023} \times 5,02 = 2,45 \text{ V}$$

Tegangan masukan saat nilai digital ADC 1023

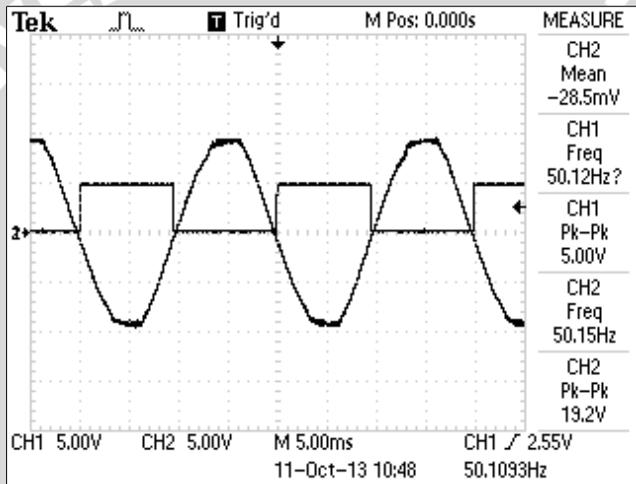
$$V_{1023} = \frac{1023}{1023} \times 5,02 = 5,02 \text{ V}$$

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan pada gambar 4.3.a dengan saat nilai digital ADC yang ditampilkan adalah nol, hasil pengukuran terhadap tegangan masukan ADC diperoleh sebesar 0,2 mV, sedangkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan yang masuk pada masukan ADC adalah 0 volt. Hasil pengukuran yang diperoleh memiliki selisih 4% dari level dasar nilai ADC yaitu 0. Jadi nilai tegangan masukan ADC yang terukur tersebut dapat dikuantisasi pada level 0 nilai ADC. Sedangkan hasil pengujian untuk nilai digital ADC 500 dan 1023 yang ditunjukkan pada gambar

4.3.b dan 4.3.c menunjukkan bahwa hasil pengukuran tegangan masukan ADC telah sesuai dengan nilai tegangan masukan ADC hasil perhitungan.

4.2.6 Pengujian Rangkaian *Zero Crossing Detector*

Pengujian rangkaian *zero crossing detector* dilakukan untuk memastikan bahwa keluaran dari rangkaian ini berbentuk pulsa dengan frekuensi sama dengan frekuensi tegangan jala-jala dari PLN. Pengujian ini dilakukan dengan melihat bentuk masukan gelombang jala-jala dari PLN dan gelombang keluaran dari rangkaian *zero crossing detector* melalui osiloskop digital.



Gambar 4.6 Tampilan sinyal masukan dan keluaran dari rangkaian *zero crossing detector* pada osiloskop digital.

Rangkaian *zero crossing detector* pada penelitian ini menggunakan sebagai *comparator* dengan masukan pada *inverting input*. Saat sinyal jala-jala PLN melewati titik nol menuju negatif, maka pulsa keluaran dari rangkaian *zero crossing detector* akan mulai berlogika tinggi sampai sinyal jala-jala PLN melewati titik nol kembali menuju positif, dimana pulsa keluaran dari rangkaian *zero crossing detector* akan kembali berlogika rendah seperti ditunjukkan pada gambar 4.4. Proses tersebut akan terus berlangsung selama sinyal jala-jala PLN terus masuk ke rangkaian *zero crossing detector* dan catu daya ke IC komparator tetap aktif.

4.2.7 Pengujian PWM

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sinyal keluaran mikrokontroler pada pin yang bersesuaian berbentuk sinyal PWM atau tidak. Pengujian dilakukan dengan menjalankan program yang akan membuat mikrokontroler memberikan keluaran berupa sinyal PWM pada pin D6 dan D7. Untuk mengetahui bentuk sinyal yang dihasilkan oleh mikrokontroler, maka pin D6 dan D7 dihubungkan dengan *probe* osiloskop digital. Pada osiloskop digital dilakukan pengaturan *volts/div* sebesar 5 V dan *time/div* sebesar 5 ms.

Berikut adalah kode program pembangkit sinyal PWM yang ditulis dalam bahasa C dengan *compiler* WinAVR-GCC:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

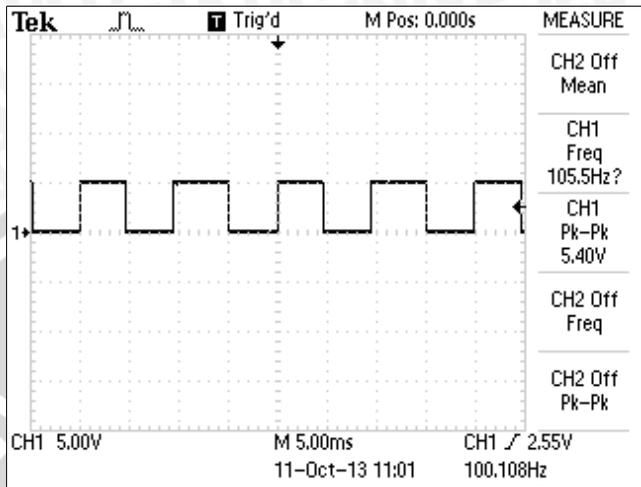
ISR(INT0_vect)
{
    PORTD = 0b00111111;
    TCCR1B = 0b00000010;
}
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    TCCR1B = 0b00000000;
    PORTD = 0b11111111;
    TCNT1 = 0;
}

int main()
{
    DDRD = 0b11000000;
    PORTD = 0b00111111;

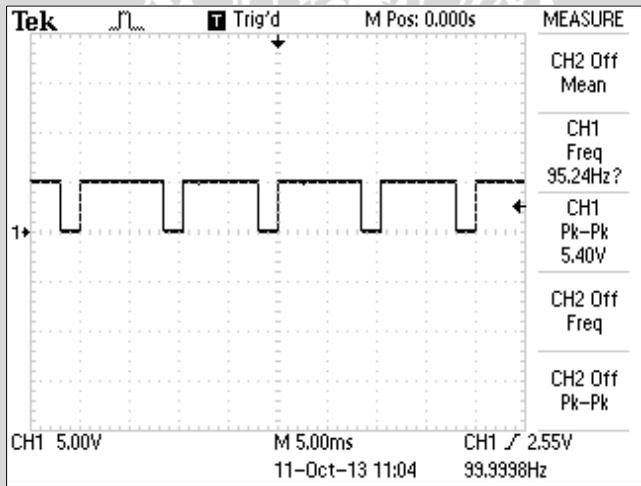
    GICR = (1<<INT0);
    MCUCR = 0b00000011;

    TCCR1A = 0b00000000;
    TIMSK = 0b00010000;
    OCR1A = 5000;

    while(1) {;}
}
```

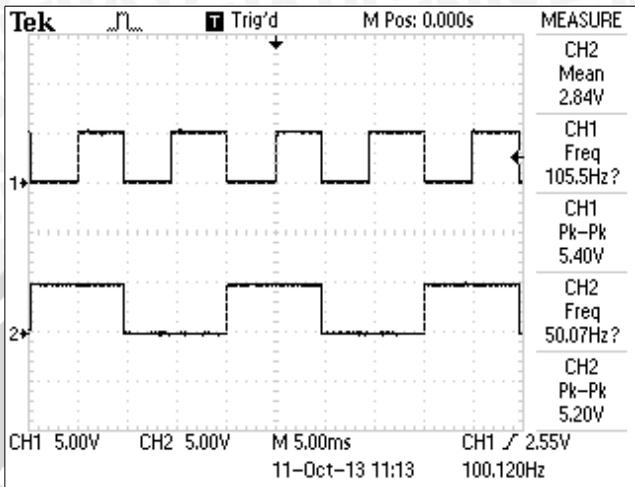


(a) Duty cycle 50%



(b) Duty cycle 80%

Gambar 4.7 Tampilan sinyal PWM pada osiloskop digital.



Gambar 4.8 Tampilan sinyal PWM dan pulsa keluaran dari rangkaian *zero crossing detector*.

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan pada gambar 4.7 terbentuk suatu pulsa yang memiliki lebar pulsa yang dapat diatur pada frekuensi yang tetap. Pulsa tersebut tidak lain adalah sinyal PWM. Pada gambar 4.7.(a) dan 4.7.(b) menunjukkan sinyal PWM dengan *duty cycle* yang berbeda. Besarnya *duty cycle* yang dihasilkan oleh mikrokontroler ditentukan oleh nilai yang diberikan pada register OCR1A. Pada gambar 4.7.(a) diberikan nilai register OCR1A sebesar 5000 dan dihasilkan sinyal PWM dengan *duty cycle* 50% dan pada gambar 4.7.(b) diberikan nilai register OCR1A sebesar 2000 dan dihasilkan sinyal PWM dengan *duty cycle* sebesar 80%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem minimum mikrokontroler telah dapat membangkitkan sinyal PWM dengan nilai *duty cycle* yang dapat diatur dari nilai register OCR1A.

Gambar 4.8 menunjukkan proses pemicuan terbentuknya sinyal PWM oleh pulsa yang dihasilkan rangkaian *zero crossing detector*. Sinyal PWM dibangkitkan setiap terjadi perubahan kondisi dari logika tinggi ke logika rendah atau dari logika rendah ke logika tinggi pada pulsa dari rangkaian *zero crossing detector*. Secara teori, frekuensi sinyal PWM yang dihasilkan nilainya akan sebesar dua kali frekuensi pulsa pemicunya. Berdasarkan informasi dari pembacaan osiloskop digital seperti ditunjukkan pada gambar 4.5, pulsa pemicu memiliki frekuensi 50,07 Hz, sedangkan frekuensi sinyal diperoleh

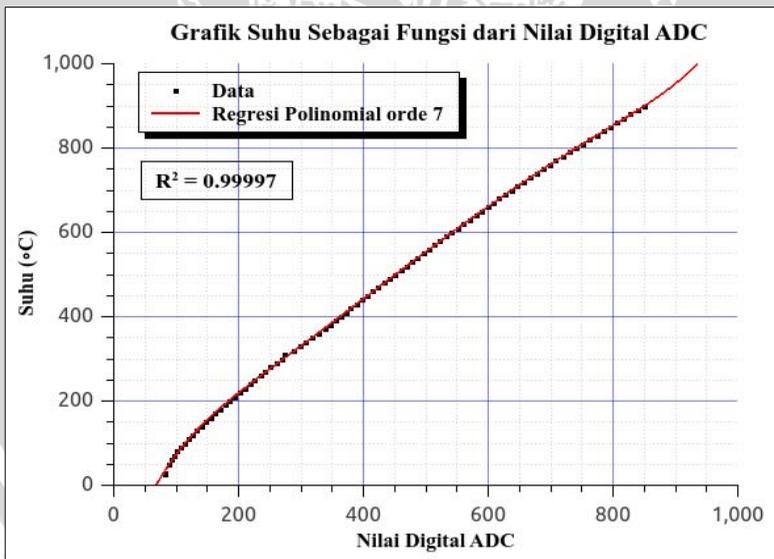
PWM sebesar 105,5 Hz.

4.3 Kalibrasi Termokopel

Kalibrasi termokopel dilakukan untuk mengetahui hubungan antara suhu pada tanur temperatur tinggi terhadap tegangan yang dihasilkan oleh termokopel yang telah dikonversikan ke dalam nilai digitalnya. Rentang pengukuran suhu dilakukan pada suhu ruangan yaitu sekitar 24 °C hingga 900 °C. Hasil lengkap pengukuran suhu yang diperoleh dapat dilihat pada lampiran 2.

Susunan alat saat kalibrasi termokopel ditunjukkan pada lampiran 4. Pada susunan tersebut, posisi ujung pengindra termokopel tanur dan ujung pengindra termokopel digital Omega HH12A diletakkan pada posisi yang sama. Perlakuan tersebut dilakukan untuk membandingkan suhu pada posisi tersebut dengan nilai hasil konversi ADC yang berasal dari termokopel pada tanur.

Dari hasil pengukuran suhu dan nilai digital ADC yang diperoleh dapat diketahui bahwa nilai ADC tidak sama dengan suhu yang terukur. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi agar sistem pengukuran suhu yang dibuat dapat digunakan sebagai alat ukur suhu pada tanur temperatur tinggi.



Gambar 4.9 Hubungan antara nilai digital ADC dengan suhu yang terukur pada tanur.

Proses kalibrasi dilakukan dengan mencari hubungan antara nilai digital ADC dengan suhu dalam tanur. Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara nilai digital ADC terhadap suhu dalam tanur. Dimana sumbu x adalah nilai digital ADC dan sumbu y adalah suhu pada tanur. Titik-titik berwarna hitam pada grafik tersebut adalah data hasil pengukuran dan garis berwarna merah merupakan kurva pendekatan regresi polinomial orde 7 yang menyatakan hubungan antara nilai digital ADC terhadap suhu pada tanur.

Hasil uji determinasi terhadap regresi polinomial orde 7 diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99997. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa estimasi garis regresi yang telah dibuat sangat mendekati data yang sesungguhnya atau hampir semua titik pengamatan berada pada garis regresi. Persamaan garis regresi polinomial orde 7 yang diperoleh adalah

$$y = 3.817202276828943e-17 x^7 - 1.409672414273094e-13 x^6 + 2.197922040247904e-10 x^5 - 1.86926986198894e-07 x^4 + 9.273748250583457e-05 x^3 - 0.0265674320652608 x^2 + 5.150181417216007 x - 252.4879377007044 \quad (4.1)$$

dimana x adalah nilai digital hasil konversi ADC dan y adalah suhu dalam tanur.

Dalam penelitian ini ADC yang digunakan adalah ADC 10-bit yang memiliki nilai mulai dari nol sampai $2^{10}-1$ atau 1023. Maka kemungkinan suhu yang ditampilkan adalah mulai dari -252 °C sampai 1212 °C. Dari hasil pengujian kalibrasi termokopel, suhu minimum yang terukur adalah 24 °C. Sehingga pada sistem pengukuran suhu, suhu minimum yang dapat ditampilkan adalah 24 °C.

4.4 Pengujian Sistem Kontrol

Pengujian sistem kontrol dilakukan untuk mengetahui performansi masing-masing sistem kontrol yang dipilih pada penelitian ini. Parameter-parameter respon sistem yang dijadikan acuan untuk menentukan performansi sistem kontrol antara lain waktu tunda (*delay time*), waktu naik (*rise time*), waktu penetapan

(*settling time*), lewatan maksimum (*maximum overshoot*) dan kesalahan keadaan tunak (*steady state error*). Menurut Ogata (1994), spesifikasi parameter respon transien sistem kontrol didefinisikan sebagai berikut.

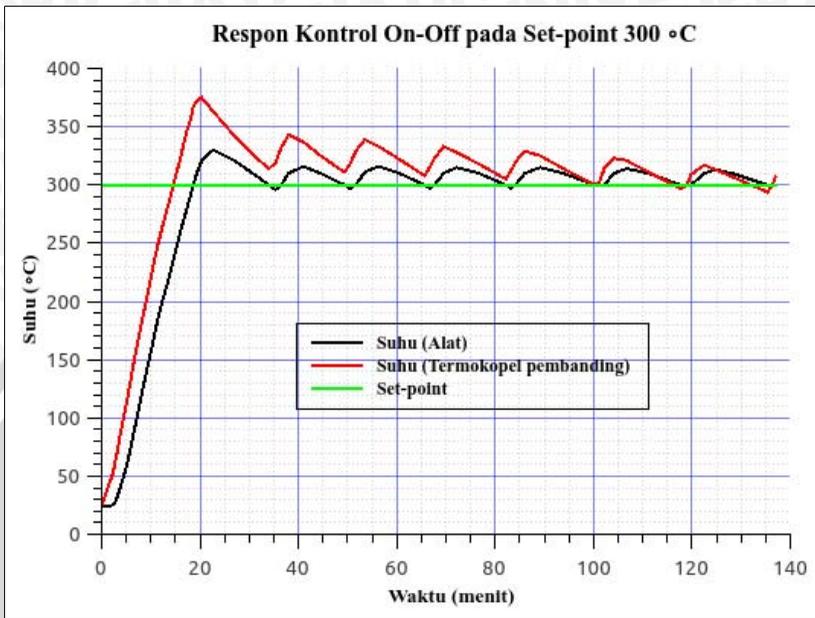
1. Waktu tunda (*td*) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
2. Waktu naik (*tr*) adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100%.
3. Persen lewatan maksimum (*Mp*) adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka bisa digunakan persen lewatan maksimum.
4. Waktu penetapan (*ts*) adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%).

Performansi sistem kontrol yang baik memiliki waktu tunda, waktu naik dan waktu mencapai keadaan tunak yang yang relatif cepat serta memiliki nilai lonjakan maksimum dan kesalahan keadaan tunak yang kecil. Sistem kontrol dengan performansi yang terbaik akan digunakan pada sistem pengontrol suhu pada tanur temperatur tinggi.

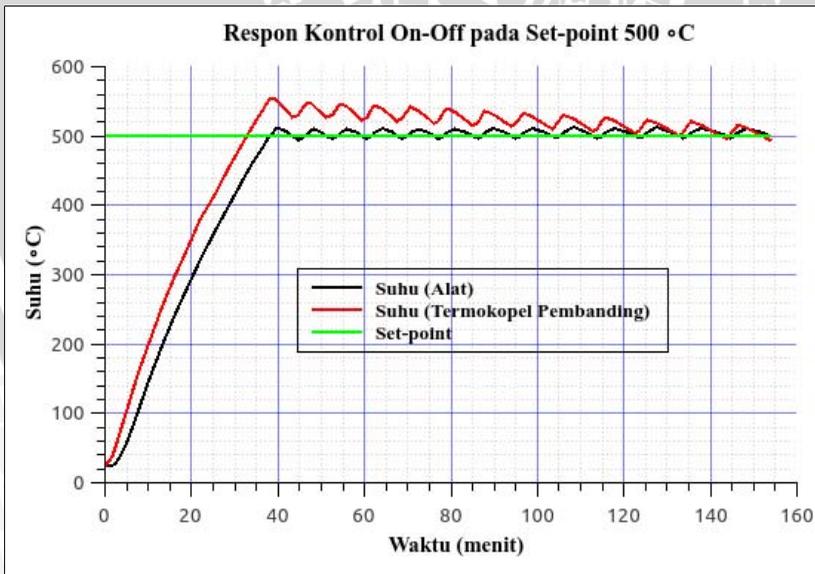
4.4.1 Pengujian Kontrol On-Off

Pengujian kontrol on-off dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon sistem kontrol on-off pada *set-point* yang telah ditentukan. *Set-point* yang dipilih pada pengujian ini ada 3 titik, yakni pada 300 °C, 500 °C dan 800 °C. Pemilihan *set-point* pada suhu 300 °C bertujuan untuk mewakili rentang suhu rendah pada tanur, suhu 500 °C bertujuan untuk mewakili rentang suhu sedang pada tanur, dan suhu 800 °C bertujuan untuk mewakili rentang suhu tinggi pada tanur.

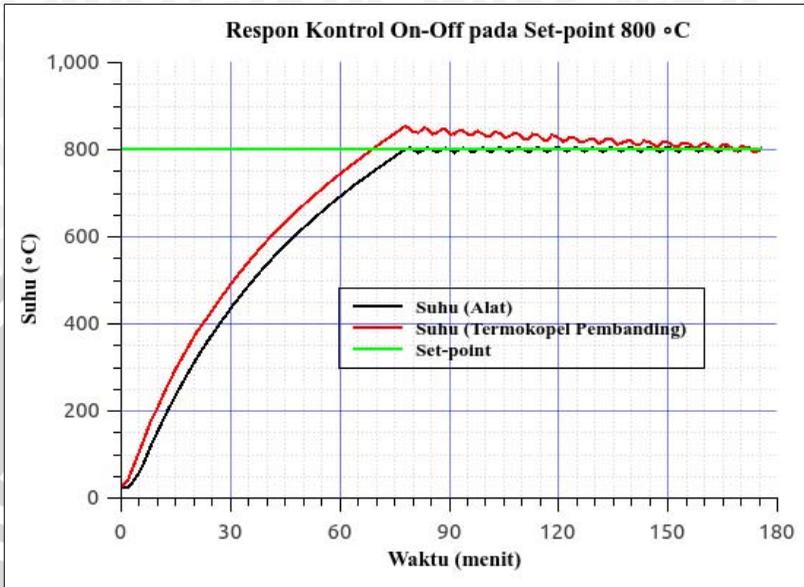
Hasil lengkap pengujian kontrol on-off terdapat pada lampiran 3. Untuk mempermudah analisa data, maka data pengujian kontrol on-off yang diperoleh disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.10.



(a) *Set-point 300 °C*



(b) *Set-point 500 °C*



(c) *Set-point* 800 °C

Gambar 4.10 Respon sistem kontrol on-off.

Pada pengujian kontrol on-off, suhu awal untuk semua *set-point* ditetapkan pada suhu 24 °C. Waktu tunda diukur dari awal pengamatan hingga mencapai 50% dari *nilai set-point*. Waktu naik diukur mulai 5% hingga mencapai 95% dari *set-point*. Waktu penetapan diukur mulai dari awal ($t=0$) hingga respon sistem mulai menetap pada $\pm 2\%$ dari *set-point*. Hasil analisa data untuk parameter-parameter respon kontrol on-off dirangkum pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Parameter respon kontrol on-off untuk *set-point* 300 °C, 500 °C dan 800 °C.

Parameter respon sistem kontrol	<i>Set-point</i>		
	300 °C	500 °C	800 °C
Suhu awal	24 °C	24 °C	24 °C
Waktu tunda	10,27 menit	17,59 menit	28,00 menit
Waktu naik	14,15 menit	31,40 menit	65,83 menit
Waktu penetapan	> 137 menit	> 154 menit	75,07 menit

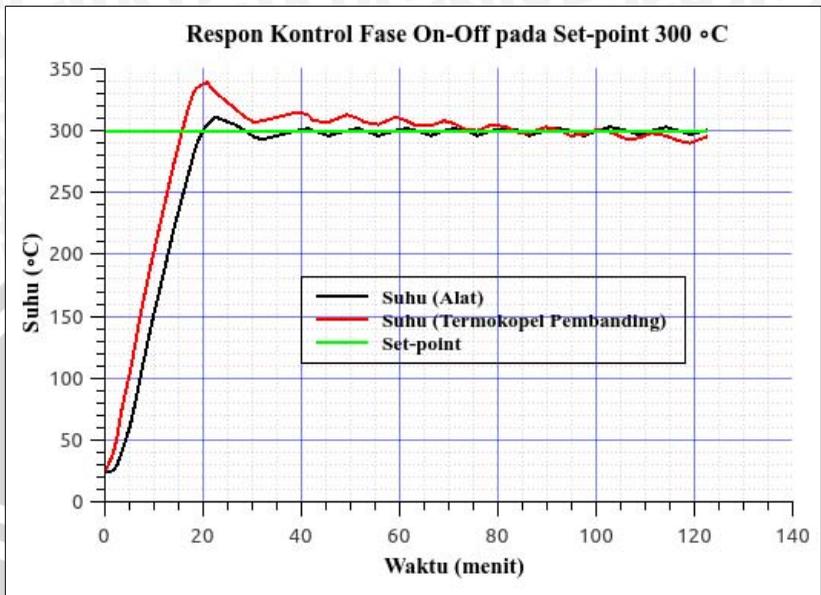
Lewatan maksimum	10,87%	2,73%	0,77%
Kesalahan keadaan tunak	4,71%	2,31%	0,52%

Hasil analisa data untuk parameter waktu penetapan pada *set-point* 300 °C dan 500 °C menunjukkan nilai yang tidak pasti, yaitu waktu penetapannya diatas 137 menit untuk *set-point* 300 °C dan diatas 154 menit untuk *set-point* 500 °C. Faktor yang menyebabkan hal tersebut terjadi adalah waktu penetapan pada penelitian ini diukur mulai dari awal ($t=0$) hingga respon sistem mulai menetap pada $\pm 2\%$ dari *set-point*. Hingga pengujian selesai dilakukan selama waktu tertentu, respon sistem kontrol belum sampai menetap pada $\pm 2\%$ dari *set-point*. Oleh karena itu nilai waktu penetapan untuk respon sistem kontrol on-off pada kedua *set-point* tersebut tidak dapat dipastikan. Namun demikian, yang dapat dipastikan adalah nilai waktu penetapannya lebih besar dari lama waktu pengujian yang telah dilakukan.

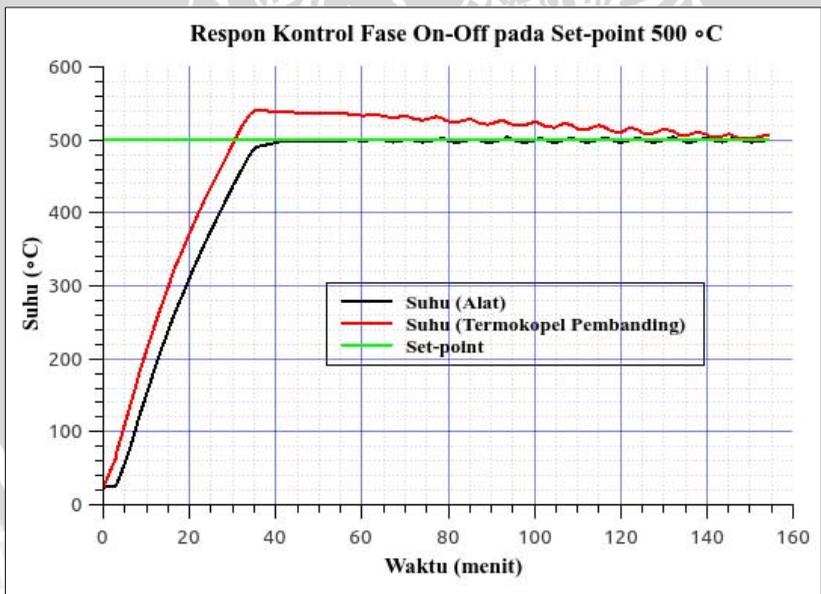
4.4.2 Pengujian Kontrol Fase On-Off

Pengujian kontrol fase on-off dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon sistem kontrol fase on-off pada *set-point* yang telah ditentukan. *Set-point* yang dipilih pada pengujian ini sama dengan *set-point* yang dipilih pada pengujian kontrol on-off. Hal ini dilakukan agar performansi kedua sistem kontrol tersebut dapat dibandingkan pada tiap *set-point* yang diujikan. Pada pengujian ini kecepatan pada tahap pemanasan yang digunakan sebesar 100%, artinya tegangan yang diberikan pada elemen pemanas adalah tegangan maksimum dari tegangan PLN.

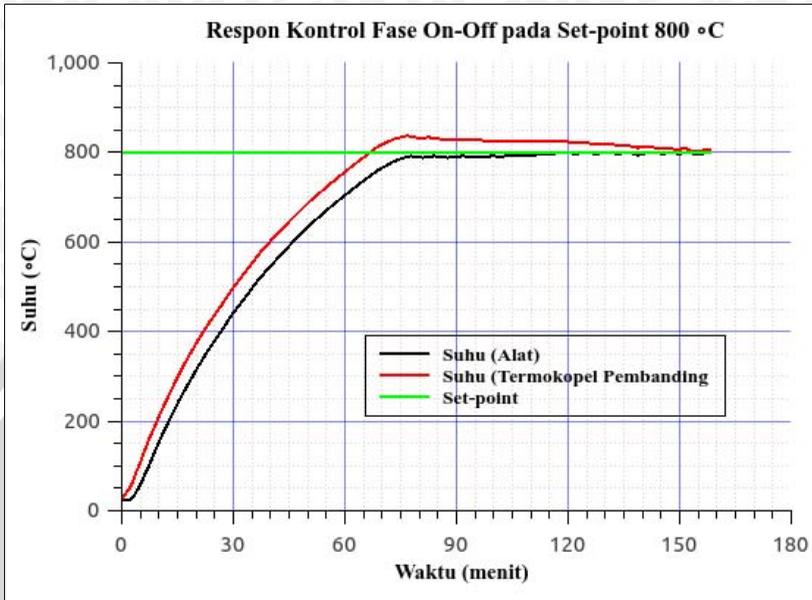
Hasil lengkap pengujian kontrol fase on-off terdapat pada lampiran 3. Untuk mempermudah analisa data, maka data hasil pengujian yang diperoleh untuk kontrol fase on-off disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.11.



(a) Set-point 300 °C



(b) Set-point 500 °C



(c) *Set-point* 800 °C

Gambar 4.11 Respon sistem kontrol fase on-off.

Pada pengujian kontrol fase on-off, pengaturan parameter-parameter respon sistem kontrol dibuat sama dengan pengaturan parameter sistem kontrol pada kontrol on-off. Hal ini dilakukan agar performansi kedua sistem kontrol tersebut dapat dibandingkan pada tiap *set-point* yang diujikan. Hasil analisa data untuk parameter-parameter respon kontrol on-off dirangkum pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Parameter respon kontrol fase on-off untuk *set-point* 300 °C, 500 °C dan 800 °C.

Parameter respon sistem kontrol	<i>Set-point</i>		
	300 °C	500 °C	800 °C
Suhu awal	24 °C	24 °C	24 °C
Waktu tunda	10,58 menit	16,50 menit	27,56 menit
Waktu naik	15,01 menit	29,11 menit	63,67 menit
Waktu penetapan	26,50 menit	35,33 menit	74,52 menit
Lewatan maksimum	3,98 %	0,84 %	0,13 %

Kesalahan keadaan tunak	1,09 %	0,63 %	0,39 %
-------------------------	--------	--------	--------

4.5 Pembahasan

Pada seluruh pengujian baik pada kontrol on-off maupun pada kontrol fase on-off yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dan 4.11, garis berwarna hitam menunjukkan pembacaan suhu oleh termokopel dan garis berwarna merah menunjukkan pembacaan suhu oleh termokopel digital sebagai pembanding. Pada saat kenaikan suhu terjadi, pembacaan suhu pada termokopel selalu tertinggal oleh pembacaan suhu pada termokopel digital sebagai pembanding. Hal ini disebabkan karena perbedaan sensitifitas antara keduanya, dimana sensitifitas termokopel pembanding lebih tinggi dari sensitifitas yang dimiliki termokopel pada alat.

Berdasarkan data pada tabel 4.3 dan tabel 4.4 dapat dilihat bahwa untuk waktu tunda dan waktu naik pada respon kontrol on-off dan respon kontrol fase on-off tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini disebabkan karena besarnya tegangan yang diberikan pada elemen pemanas sama saat tahap pemanasan pada kontrol fase on-off dan on pada kontrol on-off. Ini menyebabkan kecepatan kenaikan suhu mulai dari suhu awal (24 °C) hingga suhu 5% sebelum *set-point* relatif tidak jauh berbeda antara kedua jenis sistem kontrol yang diujikan.

Untuk waktu penetapan, pada *set-point* 800 °C, kedua jenis sistem kontrol memiliki waktu penetapan yang tidak jauh berbeda, yaitu 75,07 menit untuk kontrol on-off dan 74,52 menit untuk kontrol fase on-off. Namun untuk *set-point* 300 °C dan 500 °C, kontrol fase on-off memiliki waktu penetapan yang jauh lebih cepat dari kontrol on-off. Lama waktu penetapan untuk respon kontrol on-off sangat besar yaitu masing-masing diatas 137 menit dan 154 menit, sedangkan untuk kontrol fase on-off memiliki waktu penetapan sebesar 26,5 menit dan 35,33 menit.

Pada semua *set-point* yang diuji, kontrol fase on-off memiliki persentase lewatan maksimum dan kesalahan keadaan tunak yang lebih kecil dibandingkan persentase lewatan maksimum kesalahan keadaan tunak dari kontrol on-off. Saat pengujian untuk *set-point* 300 °C, 500 °C dan 800 °C, penggunaan kontrol fase dapat menurunkan lewatan maksimum masing-masing sebesar 6,89%, 1,89% dan 0,64%. Penurunan ini disebabkan karena saat on pada

kontrol fase on-off terbagi menjadi 3 tahap, yakni tahap pemanasan, tahap transisi dan tahap kontrol fase. Jadi saat on pada kontrol fase terjadi penurunan tegangan pada setiap pergantian tahap, sehingga kecepatan naiknya suhu dapat diturunkan secara bertahap sebelum melewati set-point. Inilah yang menyebabkan lewatan maksimum (*maximum overshoot*) pada kontrol fase on-off selalu lebih kecil dari kontrol on-off lewatan maksimum.

Demikian juga untuk parameter kesalahan keadaan tunak, untuk *set-point* 300 °C, 500 °C dan 800 °C, penggunaan kontrol fase dapat menurunkan kesalahan keadaan tunak masing-masing sebesar 3,62%, 1,68% dan 0,13%. Penurunan ini disebabkan oleh besar tegangan saat fase on nilainya proporsional dengan *set-point* yang ingin dicapai, sehingga *gap* antara besar tegangan saat on dan tegangan saat off dapat diperkecil, dan keadaan tersebut dapat mereduksi amplitudo osilasi saat keadaan tunak.

Hal lain yang teramati pada penelitian ini yaitu lewatan maksimum dan kesalahan keadaan tunak semakin menurun saat suhu semakin tinggi. Penurunan tersebut terjadi karena semakin tinggi suhu dalam tanur, maka perbedaan suhu antara ruang dalam tanur dengan lingkungan akan semakin tinggi, sehingga panas dalam tanur akan lebih cepat ditransfer ke lingkungan. Hal tersebut akan menyebabkan suhu dalam tanur akan lebih cepat turun saat tidak ada arus listrik yang melewati elemen pemanas. Hal ini berlaku pada kontrol on-off maupun kontrol fase on-off.

