

Rancang Bangun Kontrol Waktu Otomatis dan Monitoring Suhu *Autoclave* Berbasis ATmega328

Rizal Nurhudan^{1*}, Setyo Adi Nugroho², Fitri Anindyahadi³

^{1,2,3}DIV Teknologi Rekayasa Elektro-medis/Fakultas Sains Teknologi, ITS PKU Muhammadiyah Surakarta

*Email : 012021050019@students.itspku.ac.id

Kata kunci:

*Autoclave,
Atmega 328,
MAX6675, PID
Controller,
Thermocouple*

Abstrak

Infeksi akibat mikroorganisme pada peralatan medis menjadi salah satu penyebab meningkatnya angka Healthcare Associated Infection (HAIs) di Indonesia yang mencapai 15,74%, lebih tinggi dibanding negara maju. Sterilisasi dengan autoclave merupakan metode efektif pada suhu 121°C dan tekanan 1,5 psi selama 15 menit. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun autoclave dengan kontrol waktu otomatis dan monitoring suhu berbasis Atmega 328. Metode penelitian menggunakan Research and Development (R&D) melalui tahapan studi literatur, perancangan sistem, perakitan prototipe, pemrograman, desain LCD Nexion, serta pengujian alat. Rancangan meliputi pemanfaatan sensor Thermocouple type K dengan modul MAX6675, kontrol pemanas menggunakan Robotdyn AC Dimmer dengan algoritma PID, LCD Nexion sebagai antarmuka, serta buzzer sebagai penanda akhir proses. Hasil pengujian sensor MAX6675 terhadap IR thermometer dan timer terhadap stopwatch menunjukkan alat mampu mempertahankan suhu 121°C dengan rata-rata selisih ±2,05°C dan error timer rata-rata 0,33 detik. Selain itu, indikator autoclave tape menunjukkan perubahan warna sempurna setelah 15 menit sterilisasi. Kesimpulannya, autoclave dengan kontrol waktu otomatis dan monitoring suhu berhasil dirancang dan dibangun serta bekerja efektif menjaga suhu dan waktu sterilisasi.

Design And Construction Of Automatic Time Control And Temperature Monitoring Of Wet Sterilizer (Autoclave) Based On ATmega328

Keywords:

*Autoclave,
Atmega 328,
MAX6675, PID
Controller,
Thermocouple*

Abstract

Infections caused by microorganisms on medical equipment are one of the main factors contributing to the increase in Healthcare Associated Infections (HAIs) in Indonesia, which has reached 15.74%, higher than in developed countries. Sterilization using an autoclave is an effective method at a temperature of 121°C and a pressure of 1.5 psi for 15 minutes. This study aims to design and develop an autoclave with automatic time control and temperature monitoring based on the ATmega328 microcontroller. The research method applied is Research and Development (R&D), which includes several stages such as literature review, system design, prototype assembly, programming,

Nextion LCD design, and device testing. The system design consists of a type-K thermocouple with the MAX6675 module, heater control using a Robotdyn AC Dimmer with a PID algorithm, Nextion LCD as the user interface, and a buzzer as a process completion indicator. The test results of the MAX6675 sensor compared with an IR thermometer and the timer compared with a stopwatch showed that the device was able to maintain a temperature of 121°C with an average deviation of ±2.05°C and an average timer error of 0.33 seconds. Furthermore, the autoclave tape showed a complete color change after 15 minutes of sterilization. In conclusion, the autoclave with automatic time control and temperature monitoring was successfully designed and built, and it effectively maintained sterilization temperature and time indikator.

PENDAHULUAN

Infeksi oleh *mikroorganisme* merupakan salah satu permasalahan besar yang sering muncul dalam bidang kesehatan, khususnya pada institusi pelayanan kesehatan. Salah satu penyebab tingginya angka *Healthcare Associated Infections* (HAIs) di Indonesia adalah penggunaan alat-alat kesehatan yang tidak sepenuhnya steril, seperti alat bedah berukuran kecil seperti pinset, pisau bedah, dan gunting (Nengah Suarmayasa, 2023). *Sterilisasi* merupakan salah satu cara untuk menjaga peralatan kesehatan agar tidak terkontaminasi. Proses mensterilkan peralatan medis melibatkan penghancuran bakteri, jamur, atau virus yang mungkin ada di permukaannya. Suhu tinggi dapat digunakan untuk sterilisasi agar berhasil membasmi *mikroorganisme* (Tri Hardono & Kuat Supriyadi, 2020). Metode *sterilisasi* populer yang menggunakan panas tinggi dan tekanan uap adalah *Autoclave*. *Autoclave* bekerja sangat baik pada suhu 121°C dan tekanan 1.5psi selama sekitar 15 menit. Selain itu, peralatan medis yang perlu ditempatkan di dalam *Autoclave* juga tidak banyak agar uap yang dihasilkan dapat menjangkau seluruh permukaan peralatan (Winarsih, 2020). Seiring perkembangan teknologi, *Autoclave* mengalami inovasi signifikan melalui integrasi sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler, seperti ATMEGA328, yang mampu mengatur suhu dan tekanan secara presisi serta dilengkapi dengan sistem pembuangan uap otomatis untuk meningkatkan efisiensi proses *sterilisasi* (Tri Hardono & Kuat Supriyadi, 2020). Pengembangan lebih lanjut dilakukan oleh (Nugraha dkk., 2022) dengan merancang *Autoclave* berbasis Arduino Nano yang dilengkapi sensor *thermocouple*, memungkinkan pemantauan suhu secara *real time* dan mempercepat pencapaian suhu sterilisasi ideal dalam waktu 20 menit. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini akan merancang dan membangun sebuah alat *autoclave* dengan sistem kontrol waktu otomatis dan monitoring suhu menggunakan sensor *thermocouple* yang dikendalikan oleh mikrokontroler ATMEGA328. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi terhadap keterbatasan alat *sterilisasi* manual dan meningkatkan efektivitas serta efisiensi proses sterilisasi di fasilitas pelayanan kesehatan.

1. *Sterilisasi*

Proses menghilangkan atau menghilangkan *mikroorganisme* bergerak (seperti bakteri, virus, dan jamur) secara efektif dari permukaan peralatan dikenal sebagai *sterilisasi*. Ada beberapa metode untuk mengendalikan, atau menghambat atau membunuh, *mikroorganisme*. Ada dua kategori besar teknik *sterilisasi* kimia dan fisik. Meskipun beberapa bahan kimia dapat digunakan untuk melakukan *sterilisasi*, pendekatan fisik seringkali lebih dapat diandalkan (Risky Ramadhani Algifahri dkk., 2024).

2. Indikator *Tape Autoclave*

Steam indikator *tape* atau *Autoclave tape* adalah pita perekat yang digunakan dalam *Autoclave* (pemanas dibawah tekanan tinggi dengan uap untuk *sterilisasi*) untuk menunjukkan apakah suhu tertentu tercapai. *Steam indikator tape* bekerja dengan mengubah warna setelah paparan untuk suhu yang biasa digunakan dalam proses *sterilisasi*, biasanya 121°C *Autoclave* uap (Zainal Arifin & Rizal Thalib, 2020).



Gambar 1. Indikator *Tape Autoclave*

(Sumber : Rakhmatullah dkk., 2020)

3. *Autoclave*

Autoclave adalah alat yang menggunakan uap dan tekanan tinggi (121°C, 1,5 Psi) selama sekitar 15 menit untuk mensterilkan suatu benda. Karena *endospora* adalah sel bakteri yang resisten, suhu tinggi ini akan membunuh *mikroorganisme*, terutama *mikroorganisme* yang membuatnya (Nugraha dkk., 2022).



Gambar 2. *Autoclave*

(Sumber : Trapsilo Rochim dkk., 2023)

4. ATMEGA328

Mikrokontroler yang biasanya terdiri dari CPU (*Central Procesing Unit*), memori, I/O (*input/output*), dan komponen pendukung tambahan merupakan sebuah *chip* yang berfungsi sebagai pengontrol rangkaian elektronik yang mempunyai kapasitas untuk menyimpan program. Mikrokontroler adalah perangkat elektronik digital dengan kemampuan *input* dan *output* serta kontrol melalui program yang dikembangkan dan dihapus secara tepat (Nugroho dkk., 2025).



Gambar 3. ATmega328

(Sumber : Chandra dkk., 2022)

5. LCD *Nexion*

LCD (*Liquid Crystal Display*) *Nextion* adalah *display* atau *user interface* yang digunakan sebagai indikator atau monitoring alat yang akan dibuat. LCD *Nextion* HMI (*Human Machine Interface*) ini dilengkapi dengan bantuan *software Nextion editor* berbasis GUI WYSIWYG (*What You See Is What You Get*). Layar sebesar 2.4 inch *Enhanced Models*, modul *touchscreen* ini bisa menampilkan banyak data dan *interface* dengan sangat bagus. Keunggulan *Enhanced Models* sudah memiliki memori EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) sendiri, dimana memori tidak terhapus yang digunakan dalam *computer* dan peralatan elektronik lain (Tri Harsoyo dkk., 2024).



Gambar 4. LCD *Nextion*
(Sumber : Purnami dkk., 2023)

6. *Thermocouple Type K* Max6675

Termocouple type K dapat digunakan di sebagian besar aplikasi karena terbuat dari nikel dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang luar biasa. Diperlukan modul untuk mengkompensasi sambungan dingin *Thermocouple Type K* agar dapat melakukan pengumpulan data suhu menggunakan *Thermocouple Type K*. MAX6675 adalah salah satu dari beberapa modul yang kompatibel dengan *arduino* yang dapat memantau suhu antara 0°C dan +1024°C dan mengkompensasi sambungan dingin *Thermocouple Type K*. Karena IC MAX6675 sudah dilengkapi pengolah data *Analog to Digital Converter*, maka dapat mengolah data dari sensor suhu *thermocouple analog* dan mengubahnya menjadi data digital (Pandu Prayudha, Muhammad Fadhil, Novianto, 2022).



Gambar 5. MAX6675 Type K
(Sumber : Kuncoro dkk., 2023)

7. *Buzzer*

Buzzer adalah alat elektronik yang mengubah getaran listrik menjadi getaran suara. Prinsip dasar *Buzzer* mirip dengan pengeras suara itu terdiri dari kumparan yang dipasang pada diafragma dan kemudian dialiri listrik menjadi *elektromagnet*. Bergantung pada arah arus dan polaritas magnet, kumparan akan ditarik masuk atau keluar. Karena kumparan dipasang pada diafragma, setiap gerakan kumparan akan menyebabkan diafragma bergerak maju mundur sehingga menimbulkan suara (Muksin dkk., 2024).



Gambar 6. *Buzzer*

(Sumber : Nisa Az Zahro & Rahmadewi,
2023)

8. Robotdyn AC Dimmer

Dimmer untuk arus AC (*Alternating Current*) Mikrokontroler seperti *arduino* dan *Raspberry Pi* dapat mengoperasikan modul *Robotdyn AC Dimmer*. Mikrokontroler dapat memutuskan kapan harus mengirimkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) berkat detektor persilangan *pin* nol pada modul ini. *Dimmer* juga merupakan rangkaian elektronik yang memecah sinyal AC murni menjadi sinyal terbagi untuk mengontrol daya keluaran. Pemotong sinyal AC (*Alternating Current*) ini antara lain dapat digunakan untuk mengontrol pemanas dan pencahayaan redup. *Dimmer* yang lebih rumit dapat dikontrol melalui PWM (*Pulse Width Modulation*). PWM (*Pulse Width Modulation*) dapat dihasilkan oleh mikrokontroler, rangkaian SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), atau *chip/IC* (*Integrated Circuit*) PWM (*Pulse Width Modulation*). *Dimmer* PWM (*Pulse Width Modulation*) ini memiliki kemampuan menghasilkan tingkat daya rendah untuk meningkatkan presisi kontrol (Tambing, 2024).



Gambar 7. *Robotdyn AC Dimmer*

(Sumber : Mujahid Ahmad dkk., 2021)

9. *Switching Power Supply*

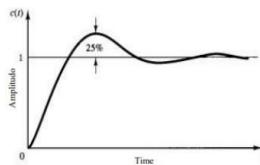
Switching Power Supply atau yang lebih dikenal dengan SMPS (*Switched Mode Power Supply*) adalah catu daya elektronik yang terdiri dari sebuah regulasi *switching* yang disediakan sesuai kebutuhan pada tagangan keluaran. Tugas *konverter* adalah menyediakan tegangan keluaran yang lebih tinggi daripada tegangan masukan. *Regulator linier* menghilangkan kelebihan daya pada kerugian resistansi (seperti pada *resistor* atau *kolektor-emitor transistor* mode aktif) untuk mempertahankan tegangan keluaran yang dibutuhkan (M. Aditya & Dwiprima Elvanny Myori, 2020).



Gambar 8. *Switching Power Supply*
(Sumber : Aditya, M., Myori, D. E., 2020)

10. Metode *Ziegler Nichols*

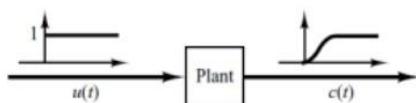
Parameter kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) untuk *plant* yang tidak diketahui model matematisnya dapat ditentukan dengan menerapkan tuning *Ziegler Nichols*. Metode *Ziegler Nichols* dipublikasikan pada tahun 1942 oleh *John G Ziegler* dan *Nathaniels B Nichols* yang keduanya bekerja di *Taylor Instruments*. Menurut keduanya metode ini merupakan metode simpel yang dapat digunakan untuk memudahkan kalibrasi ulang pada sistem kontrol PID. Nilai parameter PID didapatkan dari kurva *output* yang dihasilkan dari sebuah sistem kerja ataupun mesin tunggal. Kurva ini nantinya digunakan untuk mengetahui besarnya nilai parameter PID yang dicari dengan cara menggambarkan garis singgung pada daerah transisi yang terlihat pada kurva. Metode ini terdiri atas 2 metode yaitu *open-loop* dan *close-loop* (Ardhi dkk., 2023).



Gambar 9. Kurva Respon
(Sumber : Wahyu Raka dkk., 2020)

a. Metode pertama

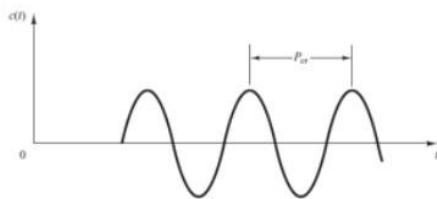
Pada metode pertama, tanggapan atau respon sistem atau *plant* terhadap masukan satu satuan fungsi *step* ditentukan secara eksperimental. Jika respon yang dihasilkan melalui eksperimen atau pun dari simulasi dinamik sistem menunjukkan kurva berbentuk S, maka metode ini dapat diterapkan (Hamid dkk., 2021).



Gambar 10. Respon Sistem
(Sumber : Hamid dkk., 2021)

b. Metode kedua

Pada metode kedua *Ziegler Nichols*, mula-mula diatur $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$, sehingga sistem hanya bekerja dengan pengendali proporsional. Nilai K_p ditingkatkan dari 0 ke nilai kritis K_{cr} sehingga diperoleh keluaran yang mulai berosilasi dengan amplitudo yang konstan secara terus menerus. Nilai penguat kritis K_{cr} dan periode P_{cr} yang bersesuaian ditentukan secara eksperimental. Tabel 2 menunjukkan rumusan yang diajukan *Ziegler Nichols* untuk digunakan dalam menentukan parameter K_p , T_i , dan T_d (Hamid dkk., 2021).



Gambar 11. Periode PCR dari Isolasi
 (Sumber : Hamid dkk., 2021)

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Gambar 12. Ziegler Nichols Metode 2
 (Sumber : Hamid dkk., 2021)

METODE

Penelitian dan pengembangan, atau R&D (*Research And Development*), adalah metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini untuk menciptakan barang tertentu dan mengevaluasi kemanjurannya. Penelitian digunakan dalam proses analisis kebutuhan untuk menciptakan produk tertentu dan mengevaluasi kemanjurannya sehingga dapat digunakan pada populasi yang lebih besar (Okpatrioka Okpatrioka, 2023).

Sterilisasi peralatan kesehatan dilakukan dengan sebanyak 6 kali dengan waktu 10, 13, 15, 18, 25, 30 menit, menggunakan *tape Autoclave* sebagai indikator *steril* atau tidak *steril*. *Tape Autoclave* akan menunjukkan *steril* jika berwarna coklat kehitaman, sedangkan jika tidak *steril* garis coklat kehitaman itu terlihat samar-samar.

1. Nilai Error

$$\text{Nilai Error} = \left(\frac{\text{Nilai IR Thermo} - \text{Nilai Sensor}}{\text{Nilai IR Thermo}} \right) \times 100\%$$

2. Nilai Rata-rata

$$\text{Rata-rata Error} = \left(\frac{\text{Jumlah Error}}{\text{Jumlah Data}} \right)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

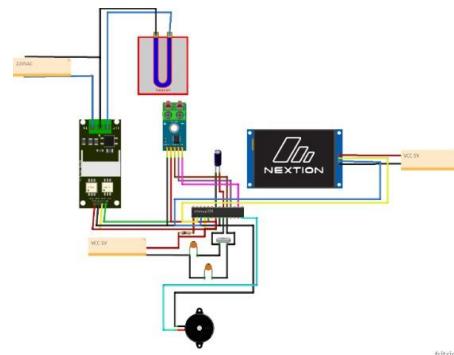
Modifikasi alat ini terdiri dari beberapa komponen, yakni sensor suhu *MAX6675* dengan *Thermocouple type k*, modul *Robotdyn AC Dimmer*, *Buzzer*, *LCD Nextion*, *switching power supply*, dan rangkaian mikrokontroler *Atmega 328P*. Sensor *MAX6675* digunakan untuk membaca suhu aktual di dalam ruang *Sterilisasi* secara akurat. Modul *Robotdyn AC Dimmer* berfungsi sebagai pengendali elemen pemanas berdasarkan hasil kontrol PID (*Propotional Integral Derivative*) dari suhu yang diatur. *LCD Nextion* digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk mengatur suhu, *timer*, serta menampilkan

data suhu secara *real time*. Buzzer akan berbunyi sebagai notifikasi saat waktu *Sterilisasi* selesai.



Gambar 13. Hasil Rancangan Awal Autoclave

Perancangan ini berisi tentang skema rangkaian secara keseluruhan yang menggabungkan seluruh komponen. Berikut adalah flowchart dari alat sterilisator basah dengan kontrol waktu otomatis seperti gambar dibawah ini.

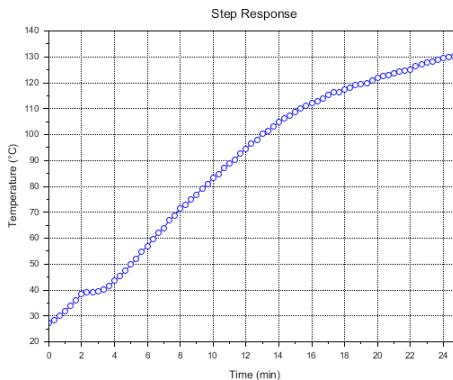


Gambar 14. Skema Rangkaian

Proses *tuning parameter* PID pada *Scilab* dilakukan dengan cara memanfaatkan data respon langkah (*step response*) dari sistem terbuka.

Gambar 15. *Code Tuning* Parameter PID

Kemudian pada gambar 16 menampilkan respon langkah sistem terbuka (*open-loop step response*) yang diperoleh dari data suhu pemanas *full power*.



Gambar 16. Respon Sistem Kondisi *Open Loop*

Kemudian pada gambar grafik diatas memperlihatkan respon sistem tertutup (*closed-loop step response*) setelah diterapkan pengendali PID dengan parameter yang dihitung menggunakan metode *Ziegler-Nichols*



Gambar 17. Step Respon Kondisi *Close Loop*

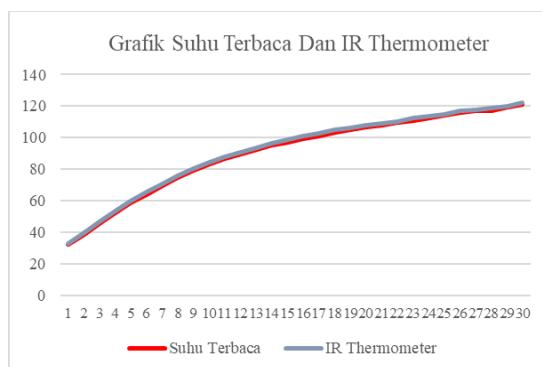
Pengujian ini dilakukan dengan mengukur temperatur tabung *Autoclave* dengan menggunakan IR *Thermometer* sebagai pembanding.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor MAX6675

720	121	92,50	93,7	1,28	1,20	T	SS	SR	IRT	E	SLS
780	121	95,00	96,50	1,55	1,50	(s)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)
840	121	97,00	98,75	1,77	1,75	00	121	32,50	32,75	0,76	0,25
900	121	99,00	100,8	1,79	1,80	60	121	38,25	39,5	3,16	1,25
960	121	101,00	102,50	1,46	1,50	120	121	45,50	46,8	2,78	1,30
1020	121	103,00	104,75	1,67	1,75	180	121	52,00	53,5	2,80	1,50
1080	121	105,00	106,25	1,18	1,25	240	121	58,50	59,50	1,68	1,0
1140	121	106,50	107,8	1,21	1,30	300	121	64,00	65,25	1,92	1,25
1200	121	108,00	109,25	1,14	1,25	360	121	69,50	70,7	1,69	1,20
1260	121	109,50	110	0,45	0,50	420	121	74,50	75,7	1,59	1,20
1320	121	111,00	112,5	1,33	1,50	480	121	79,00	80,3	1,62	1,30
1380	121	112,50	113,5	0,88	1,0	540	121	83,00	84,4	1,66	1,40
1440	121	114,25	115	0,65	0,75	600	121	86,50	87,75	1,43	1,25
1500	121	115,75	117	1,07	1,25	660	121	89,50	90,75	1,38	1,25
1560	121	116,75	117,75	0,85	1,0						
1620	121	117,00	118,5	1,27	1,50						
1680	121	119,50	120	0,42	0,50						
1740	121	121,00	122	082	1,0						

Keterangan :

E adalah nilai error, T(s) adalah timer second, SS adalah suhu setting, SR adalah suhu read, IRT adalah IR Thermometer, SLS adalah selisih suhu.



Gambar 18. Grafik suhu MAX6675 dan IR Thermometer

Pada tabel hasil pengujian sensor *MAX6675* telah dilakukan perhitungan rata-rata kesalahan error antara pembacaan sensor *MAX6675* dan nilai pembanding *IR Thermometer* maka didapat nilai error 41,64. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai rata-rata *error* dari seluruh pengukuran sebagai berikut :

$$\text{Nilai Error (\%)} = \left(\frac{\text{Nilai IR T} - \text{Nilai Sensor}}{\text{Nilai IR Thermometer}} \right) \times 100$$

Maka didapat hasil:

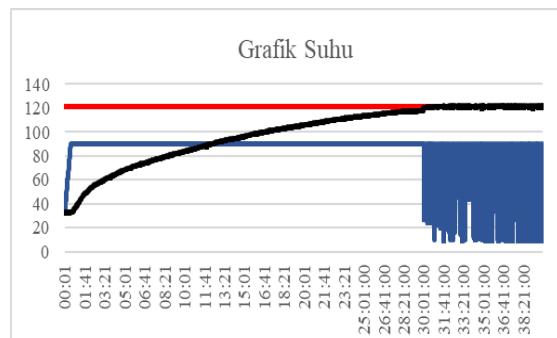
$$\text{Rata-rata Error (\%)} = \frac{\text{Jumlah Error}}{\text{Jumlah Data}} = \frac{41,64}{30} = 1,39 \%$$

Dengan demikian, rata-rata error pembacaan sensor *MAX6675* terhadap *IR Thermometer* adalah sebesar $\pm 1,39\%$. Nilai ini menunjukkan bahwa sensor *MAX6675* memiliki tingkat akurasi pembacaan yang cukup baik karena rata-rata kesalahan berada di bawah 2%.

Tabel 2. Hasil Uji Sterilisasi

No	Timer	Hasil	Gambar	Tekanan
1	10 menit	Belum		0,8psi
2	13 menit	Belum		1,0psi
3	15 menit	Steril		8,1psi
4	18 menit	Steril		11,1psi
5	25 menit	Steril		14,2psi
6	30 menit	Steril		14,2psi

Dari data tabel uji *sterilisasi* didapat hasil bahwa pada proses *sterilisasi* selama 10 menit, terlihat garis tidak berubah warna. Ketika pada proses *sterilisasi* 13 menit garis pada *tape Autoclave* terlihat berwarna kecoklatan namun belum bisa dinyatakan bahwa sudah *steril*. Pada proses *sterilisasi* 15 menit garis pada *tape Autoclave* terlihat berwarna coklat kehitaman. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa peralatan kesehatan akan *steril* dengan waktu 15 sampai 20 menit, jika waktu kurang dari itu belum bisa dikatakan *steril*.



Gambar 19. Grafik suhu pada proses *sterilisasi*

Grafik yang menggambarkan hubungan antara tiga parameter setpoint, PID, dan suhu read dalam grafik diatas, power PID berwarna biru berada pada nilai awal 40,53 , suhu read hitam berada pada titik awalnya yaitu 32°C, dan setpoint garis biru berada pada suhu nilai konstan 121°C.

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan perancangan alat autoclave dengan kontrol waktu otomatis dan monitoring suhu autoclave dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Pada *tuning parameter PID (Proportional-Integral-Derivative)*, sistem menunjukkan respons yang lebih stabil dan setelah implementasi pengendali PID (*Proportional- Integral-Derivative*) dibandingkan saat sistem masih dalam kondisi *open-loop*. Hal ini ditunjukkan dengan waktu naik yang cepat dan *overshoot* yang kecil serta tercapainya *steady state* tanpa *error* signifikan.
- b. Hasil pengujian sensor suhu MAX6675 terhadap IR *Thermometer* memperlihatkan adanya kecenderungan pembacaan sensor yang sedikit lebih rendah dibandingkan alat pembanding. Rentang perbedaan yang diperoleh berada antara 0,25°C hingga 2,5°C dengan rata-rata selisih sebesar $\pm 2,05^{\circ}\text{C}$. Variasi tersebut masih dalam batas yang dapat ditoleransi karena nilai suhu yang dihasilkan tetap mendekati standar yang diperlukan untuk proses *Sterilisasi*.
- c. Pada pengujian *Sterilisasi* dengan indikator *tape Autoclave*, proses *Sterilisasi* mulai tercapai pada menit ke- 15 yang ditandai dengan perubahan warna *tape* menjadi coklat kehitaman. Hasil ini sejalan dengan teori bahwa pada suhu 121°C *Sterilisasi* dapat berlangsung efektif dalam kurun waktu 15 menit. Grafik kenaikan suhu menunjukkan bahwa sistem pemanas bekerja secara bertahap hingga mencapai suhu *setpoint*, kemudian pengendali PID (*Proportional- Integral-Derivative*) menjaga kestabilan suhu untuk mencegah terjadinya *overshoot*.

REFERENSI

- Ardhi, S., Gunawan, T. P., & Tjandra, S. (2023). Pengendalian Suhu dan Kelembaban Budidaya Jamur Kuping dengan Kendali PID Penalaan Ziegler- Nichols. *Journal of Intelligent System and Computation*. 5(2): 83–95. <https://doi.org/10.52985/insyst.v5i2.309>.
- Chandra, Y. I., Irfan, I., Kosdiana, K., & Riastuti, M. (2022). Penerapan Metode Prototype Dalam Merancang Purwarupa Pengaman Pintu Kandang Ternak Otomatis Berbasis Mikrokontroler ATMEGA 328P. *Innovation in Research of Informatics (INNOVATICS)*. 4(1). <https://doi.org/10.37058/innovatics.v4i1.4888>.
- Hamid, N., Mansur, A., Dan, P., Mesin, P., & Soroako, A. T. (2021). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) 2021 Makassar*.
- Kuncoro, W., Maulindar, J., & Indah, R. P. (2023). Monitoring Peringatan Dini Kebakaran Pada Sistem Smart Home Menggunakan NodeMcu Berbasis IoT. Dalam *Generation Journal*. 7(2).

- M. Aditya, & Dwiprima Elvanny Myori. (2020). Sistem_Sterilisator_Otomatis_Berbasis _Ar. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*. 1 (2).
- Mujahid Ahmad, A., Syariffuddien Zuhrie, M., Wanarti Rusimamto, P., & Kholis, N. (2021). *Rancang Bangun Sistem Kontrol Intensitas Cahaya Rumah Kaca Menggunakan Metode PID*. www.microtron.be
- Muksin, A. H., Hamza, S., & Hamid, M. (2024). Perancangan Sistem Akses Pintu Ruangan Menggunakan Rfid Berbasis Kartusmart Info Dilaboratorium Basis Data Teknik Informatika. *Jurnal Teknik*. 17. www.jurnal.ummu.ac.id/dintek.
- Nengah Suarmayasa. (2023). Pola Kuman Pada Manset Sphygmomanometer : Studi Deskriptif Di RSD Mangusada. *Jurnal Riset Kesehatan Nasional*. 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.37294>.
- Nisa Az Zahro, F., & Rahmadewi, R. (2023). Prototype Pendekripsi Asap Kebakaran Dan Kebocoran Gas Berbasis Arduino Uno Dengan Menggunakan Sensor Gas MQ-5. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 9(10): 161–171. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7983528>.
- Nugraha, A., Priyulida, F., & Putra, E. (2022). *Perancangan Autoclave Berbasis Sistem Monitoring*. 4 (1).
- Nugroho, S. A., Aprilia, S., Anindyahadi, F., & Budi, N. S. (2025). Perancangan Alat Ukur Kadar Ph Dan Suhu Air Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*. 13(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.639> 8
- Okpatrioka Okpatrioka. (2023). Research And Development (R&D) Penelitian Yang Inovatif Dalam Pendidikan. *Dharma Acariya Nusantara: Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*. 1(1): 86–100. <https://doi.org/10.47861/jdan.v1i1.154>
- Purnami, D., Syah, K., & Teknik Elektro Politeknik Negeri Bengkalis, J. (2023). *Politeknik Negeri Bengkalis*.
- Rakhmatullah, M. Y., Welina, I., Kawitana, R., & Rakhmatillah, A. (2020). *Rancang Bangun Sistem Sterilisasi Alat-alat Kedokteran secara Otomatis*.
- Risky Ramadhani Algifahri, Patrisius Kusi Olla, & Bayu Wahyud. (2024). Rancang Bangun Autoklaf Untuk Proses. *Journal of Health Technology and Public Health*. (1).
- Tambing, Y. (2024). Prototype Sistem Kontrol Lampu Berbasis Internet Of Things (Iot) Menggunakan Nodemcu. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*. 12(1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i1.370> 2
- Hardono, T., Supriyadi, K. (2020). Modifikasi Autoclave Berbasis Atmega328 (Suhu). *Medika Teknika : Jurnal Teknik Elektromedik Indonesia*. 1(2). <https://doi.org/10.18196/mt.010210>
- Harsoyo, T. I., Ulin, N. A. M., Wahyudi, B., Dennis Aji Firmansyach, dan, Teknik Elektromedik, J., & Tinggi Ilmu Kesehatan Semarang, S. (2024). Hotplate Magnetic Stirrer Dilengkapi Pengatur Waktu, Suhu dan Kecepatan Melalui LCD Nextion. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. 12 (01).
- Adzani, R. W., Zuhrie, S. M. (2020). Perancangan Kontroler PID Tyreus-Luyben Untuk Kendali Vibrasi Pada Robot Single Link Flexible Joint Manipulator.
- Winarsih, L. (2020). Mencari Media Pemanas Autoclave yang Murah dan Bersih. *Indonesian Journal of Laboratory*. 3(1): 34.<https://doi.org/10.22146/ijl.v3i1.61628>
- Wishnu, P. Y., Fadhil, M., Novianto, S. (2022). Rancang Bangun Sistem Pengukuran Alat Thermobath sebagai Alat Kalibrasi Temperatur dengan Sistem Arduino Uno Informasi artikel. 4, 25–34.
- Rochim, Y. T., Rintyarna, H. S. B. S., & Fitriana. (2023). Prototype Optimalisasi suhu Pada Autoclave berbasis Outseal Programmable Logic Control (PLC) Dengan Menggunakan Human Machine Interface (HMI). 5(1).
- Arifin, Z., Thalib, R., (2020). Rancang Bangun Autoclave Menggunakan Sensor Suhu Ds18b20 Dengan Kontrol Relay Berbasis Arduino. 4(1).