

Perancangan Sistem Pengendalian Suhu Pada *Plant Dry Heat Sterilizer* Menggunakan Metode PID

Munawar A Riyadi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Semarang, Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP
Tembalang, Semarang 50275, Indonesia.
)E-mail: munawar@elektro.undip.ac.id

Budi Setiyono

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Semarang, Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP
Tembalang, Semarang 50275, Indonesia.

Florian Destito Putra

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Semarang, Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP
Tembalang, Semarang 50275, Indonesia.

Abstrak

Sterilisasi merupakan tahapan penting untuk menghilangkan mikroorganisme yang dapat mengkontaminasi peralatan maupun bahan tertentu. Salah satu teknik sterilisasi yaitu *dry heat sterilization* yang membutuhkan suhu tinggi dan waktu pemaparan lama. *Dry heat sterilization* seharusnya dikendalikan dengan pemantauan untuk memastikan kestabilan suhu dan waktu minimal sterilisasi terpenuhi. Pada penelitian ini, dirancang sistem pengendalian suhu pada *Plant Dry Heat Sterilizer* dengan kendali Proportional, Integral, dan Derivative (PID). Dari hasil perancangan dengan melalui *bump test* ($\Delta CO=10\%$) pada proses *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) didapatkan parameter PID ($K_p=11,23$, $T_i=120$, dan $T_d=30$). Dari hasil pengujian sesuai referensi ($170^\circ C$), diketahui parameter PID menghasilkan waktu naik ($T_r=1004$ detik) serta waktu penetapan ($T_s=1354$ detik) pada *plant* (Tanpa Beban) dan waktu naik ($T_r=1193$ detik) serta waktu keadaan tunak ($T_s=1580$ detik) pada *plant* (Dengan Beban) dengan presentasi *steady error* keduanya dibawah 2%. Uji gangguan waktu sesaat (300 detik) baik untuk tanpa beban maupun dengan beban didapatkan waktu keadaan tunak (T_s) selama 617 detik dan 800 detik dengan nilai akhir *steady error* dibawah 2%. Dengan demikian, system ini menunjukkan kinerja yang sesuai keperluan untuk sterilisasi

Kata kunci: dry heat sterilization, pengendalian suhu, kendali PID, beban

Abstract

Equipments sterilization is an important procedure to remove microorganisms which contaminate equipment or substances. One of sterilization methods is dry heat sterilization which requires high temperature in a long periods of time. Dry heat sterilization should be controlled and monitored to ensure stable temperature and reach its minimum sterilization duration. In this research, temperature control system for dry heat sterilizer using PID controller is designed. The bump test ($\Delta CO=10\%$) on FOPDT resulting PID parameter ($K_p=11,23$, $T_i=120$, and $T_d=30$). The test result for reference signal $170^\circ C$ shows the obtained PID parameters could provide rise time ($T_r = 1004$ seconds) and settling time ($T_s = 1354$ seconds) for unloaded plant operation and rise time ($T_r = 1193$ seconds) and settling time ($T_s = 1580$ seconds) for loaded plant operation with steady state error less than 2%. Momentary disturbance test result for both loaded and unloaded condition shows each condition reaches the settling time of 617 seconds and 800 seconds for steady state error less than 2%. As a result, the control system shows acceptable performance that fits with the sterilization requirement.

Keywords: dry heat sterilization, Temperature control, PID control, temperature mapping, load

1. Pendahuluan

Salah satu tugas institusi pelayanan kesehatan adalah berupaya untuk mencegah terjadinya infeksi bagi pasien dan petugas kesehatan [1], karena segala prosedur yang bersifat invasif melibatkan kontak langsung antara peralatan medis dengan penggunaannya [2]. Kegagalan dalam menjaga kebersihan peralatan tersebut dapat meningkatkan resiko munculnya mikroba patogen sehingga mengakibatkan infeksi. Keberadaan bakteri kontaminan sebagai penyebab infeksi sangat berpengaruh pada area yang seharusnya terjaga kesterilannya seperti ruang operasi dan laboratorium serta peralatan medis yang ada. Sterilisasi diperlukan untuk menghilangkan semua mikroorganisme sehingga dapat membahayakan kesehatan [3]. Berdasarkan pada pedoman teknik dasar untuk laboratorium kesehatan sterilisasi di laboratorium medis dilakukan menggunakan pemanasan kering (*dry heat sterilization*) yang memiliki tiga tujuan yaitu sebagai persiapan pengambilan spesimen, untuk men-disinfeksi peralatan terkontaminasi, dan untuk menyiapkan peralatan yang akan digunakan untuk kultur bakteriologis [4]. Metode ini lebih efektif dan digunakan untuk bahan tahan panas dan tidak berair yang tidak bisa disterilkan menggunakan metode uap. Bahan tersebut yaitu *glassware*, bubuk, minyak dan beberapa injeksi berbasis minyak. Persiapan sterilisasi untuk suatu alat dilakukan dengan menyegel atau menutup sementara unit yang akan disterilisasi. Proses pengeringan ini akan melakukan denaturasi protein (kejadian dimana protein atau asam nukleat kehilangan struktur tersier). Metode *hot air oven* diperkenalkan oleh Louis Pasteur dimana sterilisasi membutuhkan suhu tinggi (160°C) dengan durasi satu jam dalam pemanasan oven elektrikal [5]. Kondisi spesifik untuk setiap produk dengan suhu dan waktu tertentu yang telah ditentukan ditunjukkan pada Tabel 1 [3].

Tabel 1. Kondisi spesifik suhu dan waktu minimum sterilisasi [3]

Suhu (°C)	Waktu Minimum Proses Sterilisasi (menit)
160	180
170	160
180	30

Alat sterilisasi secara umum yang ada di pasaran masih menggunakan sistem kendali *on-off* dimana digunakan *relay* mekanik sebagai elemen penyalurnya. Aksi pengendalian secara *on-off* dapat menimbulkan respon osilasi terus-menerus di sekitar nilai referensi [6]. Respon osilasi dapat mempengaruhi kualitas hasil produk dan tidak sesuai dengan yang diinginkan. Untuk alternatifnya bisa menggunakan tiga kondisi kendali yang diketahui sebagai kendali PID. Banyak sistem kendali menggunakan PID menghasilkan hasil yang bagus serta

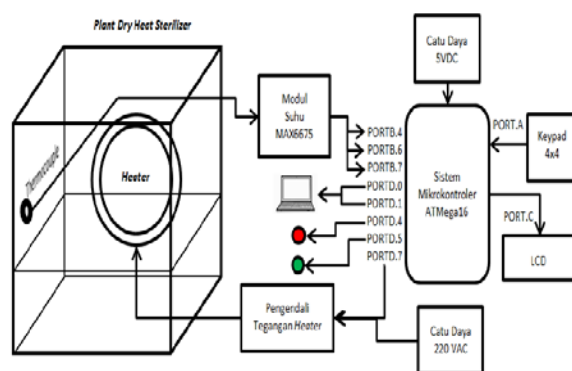
dapat melakukan tuning parameter kendali untuk mengoptimalkan nilainya baik untuk sistem regulator (sistem kendali dengan referensi konstan dan beban cenderung berubah-ubah) maupun servo (sistem kendali dengan referensi yang berubah dan beban cenderung konstan) [7]. Kinerja dari kendali PID bergantung pada nilai K_p (penguatan proporsional), K_i (penguatan integral) dan K_d (penguatan derivatif). Untuk metode tuning mencari penguatan parameter PID metode klasik *Ziegler-Nichols* adalah metode paling diketahui dan sering digunakan [6].

Di dalam penelitian ini dirancang sistem kendali pada plant *dry heat sterilizer* untuk mengatur besar *Pulse Width Modulation* (PWM) sebagai pemicu pada rangkaian pengendali tegangan. Metode sistem kendali yang digunakan adalah PID dengan penalaan Parameter PID dihasilkan dari eksperimen *bump test* pada proses *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) dengan tuning kendali menggunakan metode *Ziegler and Nichols*. Kendali PID diharapkan dapat mengendalikan agar sistem memiliki respon yang cepat dan stabil sesuai referensi dalam waktu minimum proses sterilisasi sesuai yang diharapkan.

2. Metode

2.1. Perancangan Hardware Plant Dry Heat Sterilizer

Perancangan perangkat-keras meliputi sistem minimum ATmega16, unit masukan, penampil LCD, pengendali tegangan *heater*, dan sensor *thermocouple* k type MAX6675. Perangkat-keras sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat-keras plant dry heat sterilizer

Perangkat keras pada sistem pengendalian suhu memiliki beberapa bagian. *Plant dry heat sterilizer* sebagai plant utama untuk menaruh benda atau bahan yang akan disterilisasi. *Heater* sebagai sumber energi panas memiliki spesifikasi daya 672 Watt, tegangan 220 Volt, frekuensi 50 Hz, dan arus 3 A. Mikrokontroler ATmega16 digunakan sebagai unit pengendali. Terdapat

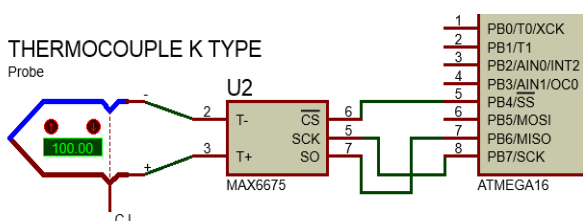
keypad yang digunakan sebagai pengaturan dan pemilihan menu-menu proses, pengesetan referensi, penentuan nilai timer. LCD berfungsi sebagai media tampilan selama proses pengendalian berlangsung.

Suhu Digital (°C)	Output (Binary) Digital	Output (Hex)
0	0000 0000 0000 0000	0000h
30	0000 0011 1100 1111	03CFh
60	0000 0111 1001 1110	079Eh
120	0000 1111 0011 1100	0F3Ch
160	0001 0100 0101 0000	1450h
170	0001 0101 1001 0101	1595h
180	0001 0110 1101 1010	16DAh
200	0001 1001 0110 0011	1963h
230	0001 1101 0011 0010	1D32h

Pengendali tegangan heater adalah rangkaian yang berfungsi untuk mengendalikan tegangan beban. Komponen utama pengendali tegangan heater berupa MOSFET dan optocoupler 4N35. Sensor thermocouple adalah sensor pendeteksi suhu plant dry heat sterilizer. Light Emitting Diode (LED) berfungsi sebagai penanda kondisi proses pengendalian tertentu. Sementara itu, laptop sebagai unit pemantauan yang akan menampilkan data suhu berupa grafik respon sistem.

2.2. Perancangan Sistem Sensor Suhu

Rangkaian sensor suhu yang ditunjukkan pada Gambar 2 membutuhkan sumber tegangan 0,6 - 6 VDC. Rangkaian ini terdiri dari sebuah sensor thermocouple type K yang dihubungkan dengan IC MAX6675 [8].



Gambar 2. Rangkaian sensor thermocouple tipe K dengan modul MAX6675

MAX6675 bekerja berdasar tiga protokol (\overline{CS} , SCK, dan SO). Jalur *Chip Select* (\overline{CS}) adalah jalur data untuk mengirimkan data perintah dari mikrokontroler ke sensor dan menerima hasil pengukuran dari sensor dalam bentuk digital. Pengiriman data akan berlangsung setelah sinyal *Chip Select* (\overline{CS}) diberikan oleh mikrokontroler, apabila posisi *low* maka proses konversi dimulai dan posisi *high* maka proses konversi berhenti. *Serial Clock Input* (SCK) digunakan membaca hasil konversi tiap siklus *clock* pada *Serial Output* (SO). Pengiriman *bit* perintah akan berlangsung selama *Chip Select* (\overline{CS}) dalam keadaan logika rendah. Pengiriman berakhir saat DATA berubah

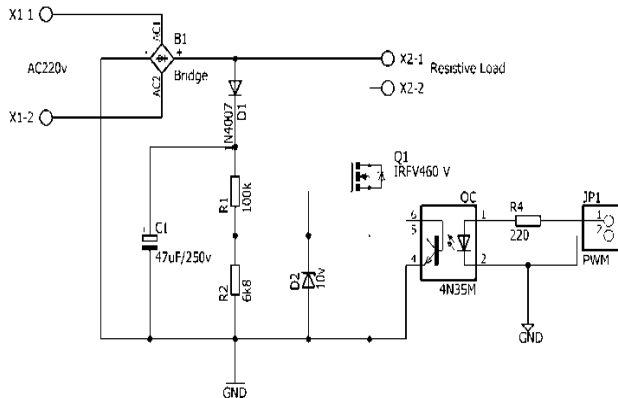
keadaan dari logika rendah ke logika tinggi dan SCK diberi logika tinggi. Pembacaan dengan *Chip Select* (\overline{CS}) posisi *low* akan menghasilkan pembacaan *bit* pertama pada pin *Serial Output* (SO). Pada modul MAX6675 pembacaan serial interface yang lengkap membutuhkan 16 siklus *clock* yaitu dari D0 sampai D15. D1 dan D5 adalah selalu *low* dan D2 akan *low* bila ujung probe sensor tersambung dengan modul MAX6675. Pembacaan suhu adalah 12-bit yaitu pada D3-D14 (LSB-MSB). Setiap data digital yang dikirimkan sensor *thermocouple* tipe K dengan modul MAX6675 mengidentifikasi suhu tertentu yang ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Konversi suhu digital modul MAX6675

2.3. Perancangan Pengendali Heater

Pada rangkaian pengendali tegangan heater ditunjukkan pada Gambar 3, dioda bridge digunakan untuk menyearahkan tegangan 220 Volt AC dari sumber tegangan satu fasa. Heater merupakan beban resistif yang tidak terpengaruh oleh frekuensi sehingga dapat diberikan catu daya DC osilasi. Agar tidak membahayakan bagian yang mempunyai level tegangan rendah, maka digunakan optocoupler. Kapasitor 47 μ F/250V digunakan sebagai penghilang ripple (riak) dari tegangan DC osilasi. Dioda IN4007 berfungsi sebagai pengaman dari tegangan feedback, karena tegangan keluaran diode bridge belum berupa DC murni. Resistor 6k8 Ω dan 100k Ω yang diseri agar tegangan masukan ke optocoupler (maksimal 70 Volt) dan terminal gate pada MOSFET (maksimal 30V) tidak melebihi batas tegangan maksimum yang diperbolehkan. Dioda zener digunakan antara kanal drain dan source sebagai pembatas tegangan ketika terjadi kelebihan tegangan pada MOSFET yang menyebabkan MOSFET menjadi panas. Masukan nilai PWM mikrokontroler ATMEGA16 untuk menghidupkan LED optocoupler 4N35. Photodiode dalam optocoupler 4N35 ini akan menerima cahaya yang dipancarkan oleh LED, kemudian dirubah kembali menjadi energi listrik. Saat tegangan dari mikrokontroler bernilai maksimum (5 Volt) maka kondisi saturasi pada MOSFET dilakukan. Ketika tegangan mikrokontroler bernilai minimum (0 Volt) maka kondisi *cut-off* MOSFET dilakukan, yaitu tidak ada arus drain (I_D) yang mengalir pada heater. Ketika tegangan mikrokontroler bernilai minimum (0 Volt) maka kondisi *cut-off* MOSFET dilakukan, yaitu tidak ada arus drain (I_D) yang mengalir pada heater. Untuk pemicuan tegangan PWM dari mikrokontroler dengan nilai tegangan diantara 0 Volt dan 5 Volt, berdasarkan karakteristik MOSFET terdapat daerah linear yaitu daerah dimana arus drain berbanding lurus dengan perubahan nilai tegangan kanal drain dan source. Pada kondisi tersebut, MOSFET berfungsi sebagai penguat, ketika tegangan V_{GS} memiliki

nilai lebih kecil dibandingkan tegangan *threshold* tetapi lebih besar dari 0 Volt maka kondisi MOSFET termasuk daerah *cut off* akan tetapi MOSFET tidak sepenuhnya mati dan juga tidak dapat dikatakan sepenuhnya menyala.



Gambar 3. Rangkaian pengendali tegangan heater

2.4. Penalaan PID

Untuk mengetahui karakteristik proses dari sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* dapat dilakukan dengan menganalisis respon sistem *open loop*. Pada awalnya *plant* diberikan masukan sinyal control (*co*) pada heater sebesar 65%, setelah sistem stabil sinyal kendali (*co*) dinaikkan 10% menjadi 75%. Respon sistem terhadap *bumt test* 65-75% yang dihasilkan oleh *plant dry heat sterilizer* ditunjukkan pada Gambar 4.

Jenis Kendali	K_p	T_i	T_d
PID	$1,2T$	$2L$	$0,5L$
	$\frac{KL}{1,8 * 60}$	$=2 * 60$	$=0,5 * 60$
	$= 11,23$	$= 120$	$= 30$

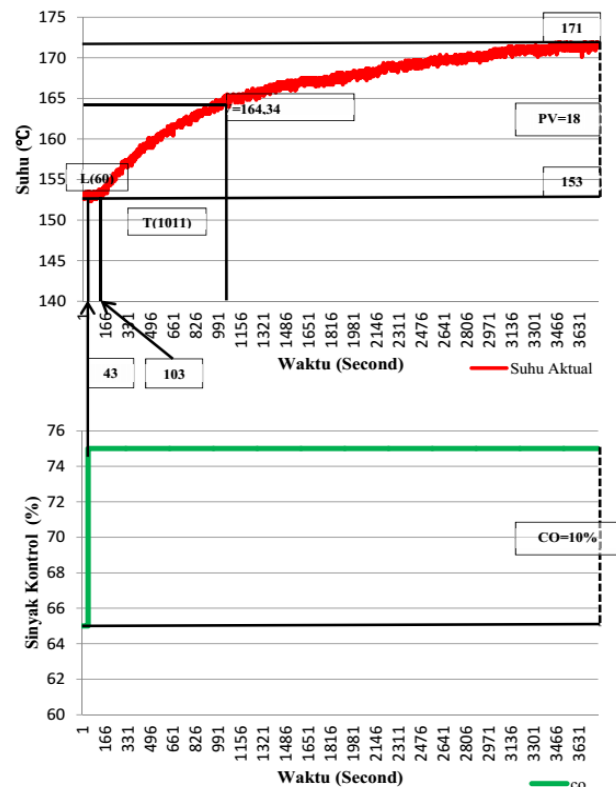
Berdasarkan grafik pada Gambar 4, parameter proses dapat ditentukan dalam persamaan (1), (2), dan (3).

$$L = 103 - 43 = 60 \quad (1)$$

$$T = 63\% * 18 = 11,34 \quad (2)$$

$$T_{suhu\ 164,34^\circ C} = 1071 - 60 = 1011$$

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{171 - 153}{75 - 65} = \frac{18}{10} = 1,8 \quad (3)$$



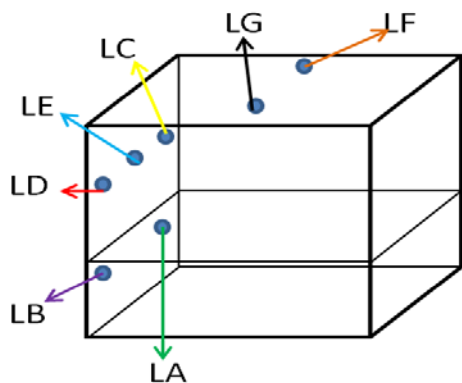
Gambar 4. Grafik respon sistem *open loop* 10%

Tabel 3. Konversi suhu digital sensor *thermocouple* tipe K modul MAX6675

Dari parameter-parameter proses diatas maka dapat dihitung parameter *Proportional, Integral, Derivative* (PID) dari *plant dry heat sterilizer* dengan menggunakan metode penalaan *Ziegler Nichols* sesuai pada Tabel 3.

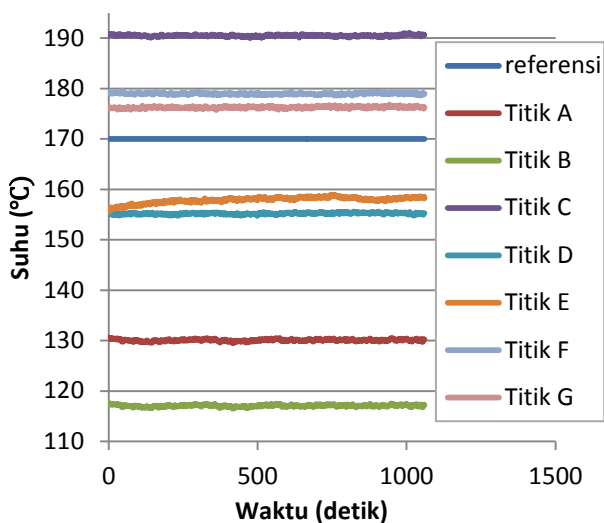
2.5. Perancangan Pemetaan Suhu

Perancangan pemetaan suhu dilakukan untuk menentukan posisi sensor suhu diletakkan pada titik dimana suhu aktual *chamber plant dry heat sterilizer* bersuhu sama atau lebih besar dari suhu yang diindikasi pada sistem pengendalian suhu [9]. Sehingga perancangan pemetaan suhu dilakukan untuk mencari titik terendah dari beberapa titik pengamatan pada suhu dan waktu tertentu. Peletakan sensor metode *temperature mapping of hot air oven (dry heat sterilizer)* berdasarkan ref. [5].



Gambar 5. Skematik lokasi sensor pemetaan suhu

Gambar 5 menunjukkan representasi skematik posisi sensor. Pada perancangan penelitian untuk penentuan titik dari *temperature mapping* dengan lokasi titik dibawah rak tidak digunakan karena melalui pengujian diketahui adanya perbedaan suhu yang sangat jauh saat dibandingkan dengan pembacaan termometer digital yang diletakkan diatas rak. Pengujian *temperature mapping* yang dilakukan menggunakan metode kendali PID pada sensor nomor TC1 dengan referensi suhu 130°C.



Gambar 6. Grafik pemetaan suhu *plant* tanpa beban

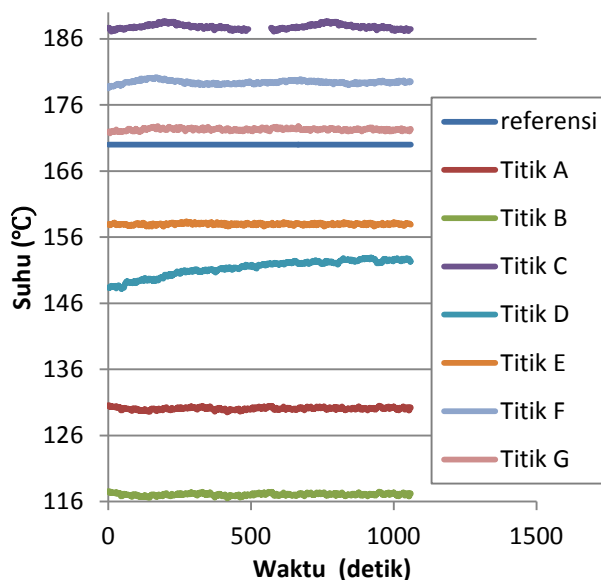
2.5.1. Tanpa Beban

Berdasarkan pada pengujian *temperature mapping* pada suhu 170°C untuk *plant dry heat sterilizer* tanpa beban maka didapat hasil suhu terendah dipantau pada sensor nomor TC4 sebesar 154,79°C, suhu maksimum pada sensor nomor TC3 sebesar 188,68°C, sedangkan rata-rata suhu terendah pada sensor nomor TC4 yaitu 155,2°C.

Sehingga didapatkan hasil posisi sensor LD dengan sensor nomor TC4 mencapai kriteria dalam pengujian *temperature mapping* dengan tanpa beban. Pengujian tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 6.

2.5.2. Dengan Beban

Berdasarkan pada pengujian *temperature mapping* pada suhu 170°C untuk *plant dry heat sterilizer* tanpa beban maka didapat hasil suhu terendah dipantau pada sensor nomor TC4 sebesar 148,14°C, suhu maksimum pada sensor nomor TC3 sebesar 191,03°C, sedangkan rata-rata suhu terendah pada sensor nomor TC4 yaitu 151,34°C. Sehingga didapatkan hasil posisi sensor LD dengan sensor nomor TC4 mencapai kriteria dalam pengujian *temperature mapping* dengan beban. Pengujian dengan beban ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik pemetaan suhu *plant* dengan beban

3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengujian Sensor

Pengujian sensor *thermocouple* tipe k modul MAX6675 dilakukan dengan cara mengukur suhu pada *plant dry heat sterilizer* yang dibandingkan dengan pembacaan termometer digital tipe K. Pembacaan suhu pada *plant dry heat sterilizer* dalam pengujian ini dibatasi pada kisaran suhu 30°C sampai dengan 180°C ditunjukkan pada Tabel 4. Pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa suhu yang terdeteksi sensor *thermocouple* tipe K dengan modul MAX6675 sudah sesuai dengan standardisasi dengan nilai *galat*

0,95°C [9]. Dari Tabel 4, dapat dilihat bahwa suhu yang terdeteksi sensor *thermocouple* tipe K dengan modul MAX6675 sudah sesuai dengan standardisasi dengan nilai galat 0,95°C [9].

Tabel 3. Hasil pengujian suhu sensor *thermocouple* dibandingkan dengan termometer

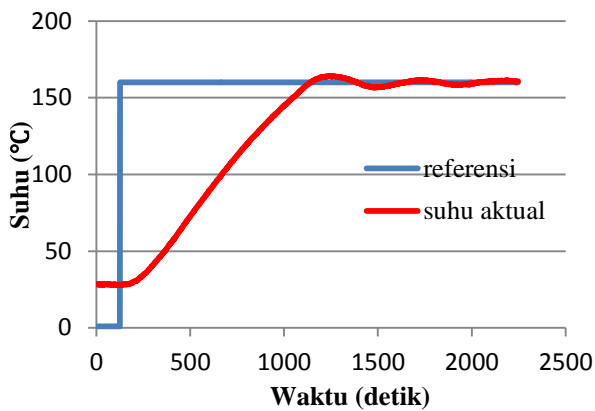
Suhu Termometer (°C)	Sensor Thermocouple Tipe K MAX6675	Galat
30	31,4	-1,4
40	38,75	1,25
50	48,25	1,75
60	57,75	2,25
70	67,75	2,25
80	78	2
90	88,25	1,75
110	108,75	1,25
120	119	1
130	129,15	0,85
140	139,25	0,75
150	149,5	0,5
160	159,59	0,41
170	169,67	0,33
180	179,7	0,3
190	189,73	0,27
200	199,75	0,25
Galat rata-rata	31,4	0,95

3.2. Pengujian Sistem Pengendalian Suhu Terhadap Referensi yang ditentukan

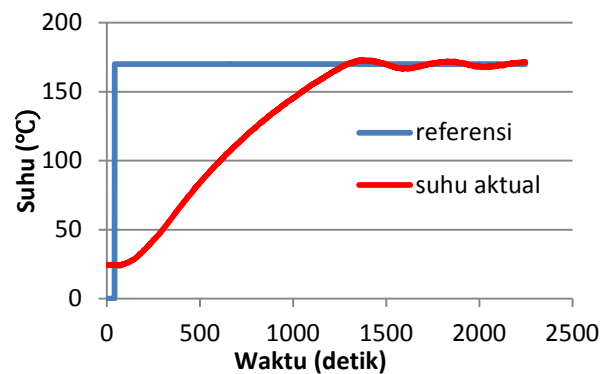
Pengujian kendali PID dilakukan untuk mengetahui respon sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* terhadap nilai referensi suhu yang diberikan. Pada penelitian ini menggunakan kendali PID dengan nilai parameter PID ($K_p = 11,23$, $K_i = 120$, dan $K_d = 30$) didapat dari proses FOPDT dengan metode tuning Zeigler Nichols.

3.2.1. Tanpa Beban

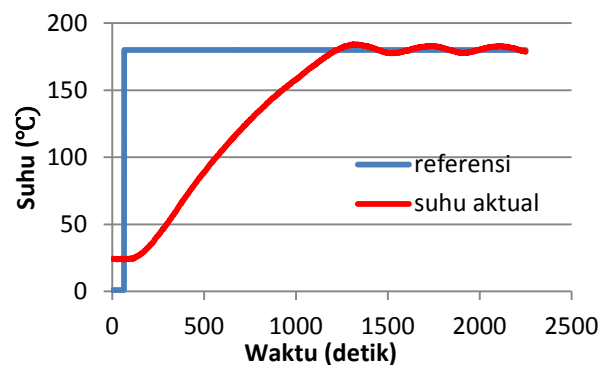
Respon sistem sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* tanpa beban dengan memberikan nilai referensi suhu sterilisasi yaitu 160°C, 170°C, dan 180°C ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10.



Gambar 8. Grafik respon *plant* tanpa beban referensi 160°C



Gambar 9. Respon *plant* tanpa beban referensi 170°C



Gambar 10. Respon *plant* tanpa beban referensi 180°C

Dari ketiga hasil pengujian sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* tanpa beban disimpulkan

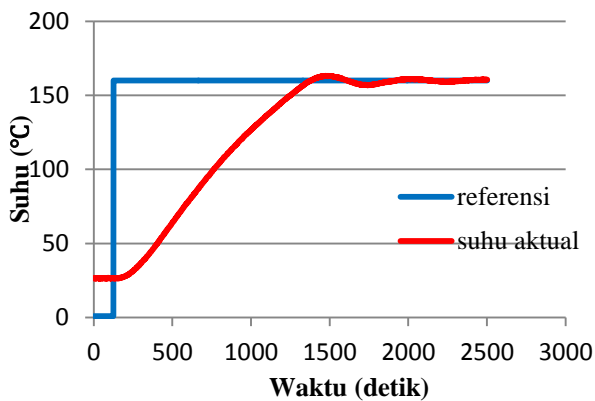
bahwa semakin besar referensi suhu yang diberikan, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan stabil akan semakin lama. Referensi suhu 160°C dengan suhu awal 26°C membutuhkan waktu naik (*Rise Time*) 957 detik, pada referensi suhu 170°C dengan suhu awal 24,5°C membutuhkan waktu naik (*Rise Time*) 1004 detik, pada referensi suhu 180°C dengan suhu awal 26°C membutuhkan waktu naik (*Rise Time*) 1102 detik. Data parameter unjuk kerja pengujian dengan referensi pada *plant* tanpa beban ditunjukkan pada pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik tanggapan sistem pengendalian tanpa beban

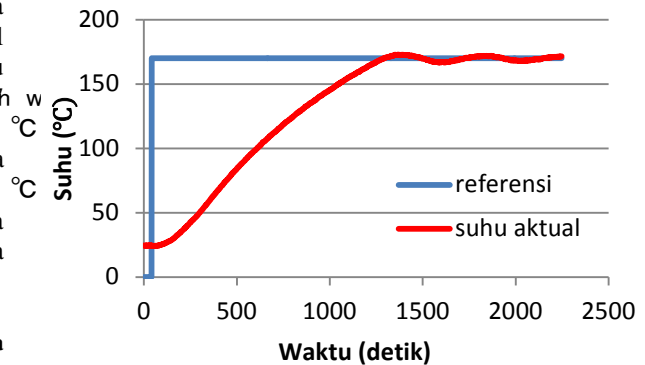
Suhu Awal (°C)	Referensi (°C)	Waktu naik T_r (detik)	Waktu Penetapan T_s (detik)
26	160	957	1359
24	170	1004	1354
24	180	1102	1296

3.2.2. Dengan Beban

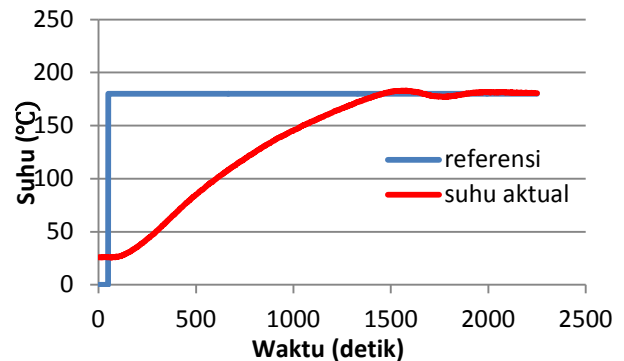
Respon sistem sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* tanpa beban dengan memberikan nilai referensi suhu sterilisasi yaitu 160°C, 170°C, dan 180°C ditunjukkan pada Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13.



Gambar 11. Respon *plant* dengan beban referensi 160°C



Gambar 12. Respon *plant* dengan beban referensi 170°C



Gambar 13. Respon *plant* dengan beban referensi 180°C

Dari ketiga hasil pengujian sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* dengan beban disimpulkan bahwa semakin besar referensi suhu yang diberikan, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai keadaan stabil akan semakin lama. Jika suhu awal sama, maka referensi suhu 160°C dengan suhu awal 26°C membutuhkan waktu naik 1209 detik, pada referensi suhu 170°C dengan suhu awal 24,5°C membutuhkan waktu naik 1193 detik, pada referensi suhu 180°C dengan suhu awal 26°C membutuhkan waktu naik 1348 detik. Data parameter unjuk kerja pengujian dengan referensi pada *plant* tanpa beban ditunjukkan pada pada Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik tanggapan sistem pengendalian dengan beban

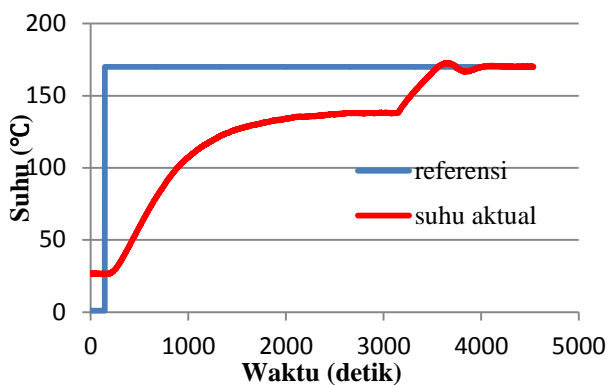
Suhu Awal (°C)	Referensi (°C)	Waktu naik T_r (detik)	Waktu Penetapan T_s (detik)
26	160	1209	1618
24,5	170	1193	1580
26	180	1348	1562

3.3. Pengujian Terhadap Gangguan

3.3.1. Gangguan Kontinyu

Pengujian gangguan kontinyu sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* dengan pemberian referensi suhu 170°C dilakukan dengan cara membuka pintu sedikit (20° dari engsel pintu *plant*) secara terus menerus sampai keadaan suhu *plant* mencapai kondisi *steady state*. Setelah itu, pintu *plant* ditutup untuk menguji kemampuan kendali PID dalam mengikuti referensi suhu yang diberikan pada referensi.

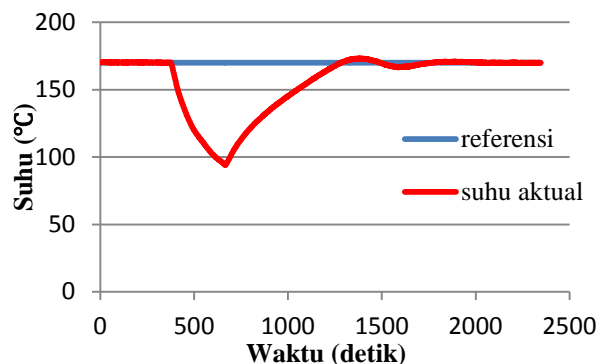
Pada Gambar 14 terlihat bahwa respon suhu sistem pengendalian suhu dengan gangguan terus menerus untuk referensi 170°C sulit untuk mencapai kondisi stabil pada referensi yang diberikan. Saat respon suhu mencapai 138°C pada waktu 3141 detik, maka gangguan diakhiri yaitu dengan menutup pintu *plant*. Setelah pintu ditutup rapat, respon suhu mulai naik mengikuti referensi dan mencapai referensi memerlukan waktu 415 detik, dan pada detik ke 3660 suhu sudah mencapai keadaan *steady state*.



Gambar 14. Grafik respon *plant* dengan gangguan kontinyu

3.3.2. Gangguan Sesaat Tanpa Beban

Respon sistem pengendalian suhu terhadap gangguan sesaat pada *plant dry heat sterilizer* tanpa beban dengan referensi 170°C ditunjukkan pada Gambar 15. Gangguan sesaat berupa pintu dibuka pada keadaan *steady state* diberikan pada detik ke-377, selama 300 detik suhu sistem berangsur-angsur menurun sampai suhu terendah yaitu 94°C. Setelah pintu *plant* ditutup, maka respon suhu sistem mulai mengikuti referensi dan mencapai referensi (170°C) yang ditentukan oleh operator memerlukan waktu 616 detik, dan pada detik ke-1368 respon sistem pengendali suhu sudah mencapai keadaan *steady state*.

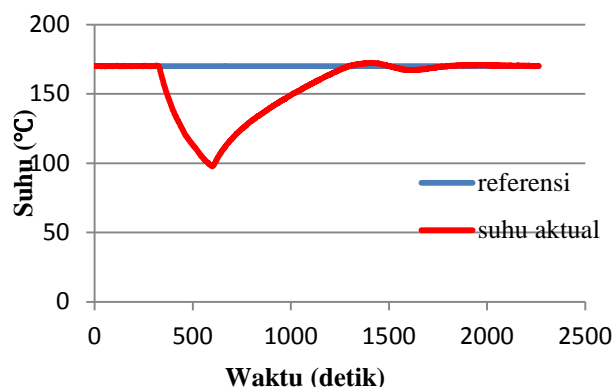


Gambar 15. Grafik respon *plant* tanpa beban dengan gangguan sesaat

3.3.3. Gangguan Sesaat Dengan Beban

Pengujian gangguan sesaat tanpa beban sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* dengan pemberian suhu 170°C, pemberian gangguan sesaat dilakukan dengan cara membuka pintu *plant* selama 300 detik, setelah itu pintu *plant* ditutup kembali.

Gambar 16 menunjukkan respon sistem pengendalian suhu terhadap gangguan sesaat pada *plant* tanpa beban dengan referensi 170°C. Gangguan sesaat diberikan pada detik ke-326, selama 300 detik suhu sistem berangsur-angsur menurun sampai suhu terendah yaitu 97,8°C. Setelah pintu *plant* ditutup, maka respon suhu sistem mulai mengikuti referensi dan mencapai referensi memerlukan waktu 693 detik, dan pada detik ke-1402 respon sistem pengendali suhu sudah mencapai keadaan *steady state*.



Gambar 16. Grafik respon *plant* dengan beban dengan gangguan sesaat

4. Kesimpulan

Telah berhasil dirancang sistem pengendalian suhu pada *plant dry heat sterilizer* dengan metode *Ziegler-Nichols* pada aksi kendali dengan parameter PID ($K_p=11,23$,

$T_i=120$, dan $T_d=30$) dapat bekerja dengan baik dan mampu mempertahankan suhu referensi (160°C , 170°C , dan 180°C) baik pada pengujian tanpa beban maupun pengujian dengan beban.

Referensi

- [1] S. D. Moh. Yamin, R. Basamalah, "Potensi Pemaparan LED Inframerah untuk Fotoinaktivasi Bakteri *Bacillus subtilis*," Bachelor's Projects, Universitas Airlangga, vol. 17, no. 1, 2015.
- [2] W. A. Rutala and D. J. Weber, "Disinfection and Sterilization in Health Care Facilities : What Clinicians Need to Know," *Healthcare Epidemiology invited article*, vol. 39, no. Cdc, 2004.
- [3] G. M. Practice and P. Approximate, *5.8 Methods of sterilization: The International Pharmacopoeia*, 2016.
- [4] M. Biomed, DASAR UNTUK LABORATORIUM · KESEHATAN (*Manual of Basic Techniques for A Health Laboratory*), 2nd ed. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC, 2011.
- [5] I. K. Purohit and N. V. Gupta, "Temperature Mapping of Hot Air Oven (Dry Heat Sterilizer)," *Journal of Pharmacy Research*, vol. 11, no. 2, pp. 120–123, 2017.
- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
- [7] I. Setiawan, KONTROL PID UNTUK PROSES INDUSTRI. Surabaya: PT. Elex Media Komputindo, 2008.
- [8] maxim integrated, "Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple- to-Digital Converter (0°C to $+1024^{\circ}\text{C}$)." Data Sheet Maxim Integrated Products, p. 8, 2014.
- [9] AAMI, "Dry heat (*heater* air) sterilizers." Association for the Advancement of Medical Instrumentation, Arlington, United States of America, p. 43, 2004.