

## **PERBANDINGAN METODE PID, MPC, DAN LQR PADA SISTEM PEMANAS AIR BOTTLE WASHER BERBASIS MATLAB**

**Almira Budiyanto<sup>1,\*</sup>, Afifa Intan Ekaputri Supriyo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

\*Corresponding E-mail : [almira.budiyanto@uii.ac.id](mailto:almira.budiyanto@uii.ac.id)

### **ABSTRAK**

Sistem pengendalian menjadi sangat penting terutama pada dunia industri untuk membantu meningkatkan kinerja atau performa sebuah sistem yang diaplikasikan di industri tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan beberapa metode kendali pemanas air yang diaplikasikan pada sistem bottle washer dan membandingkan metode-metode yang digunakan berdasarkan pada kriteria-kinerja pengendalian yang terdiri dari settling time, rise time, persentase overshoot dan steady state error. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah PID (Proportional, Integral and Derivative), MPC (Model Predictive Control) dan LQR (Linear Quadratic Regulator). Simulasi dan eksperimen pada penelitian ini seluruhnya menggunakan MATLAB/Simulink sebagai software dan Arduino Mega 2560 sebagai sistem akuisisi data yang menghubungkan antara prototipe dan komputer. Hasil simulasi sistem kendali tiga metode yang digunakan seluruhnya masih memerlukan adanya proses tuning ulang agar didapatkan hasil respon yang lebih baik. Hasil pengujian pada sistem kendali PID secara real time memiliki respon output sistem dengan dengan nilai settling time sebesar 768 detik, nilai rise time sebesar 624 detik dengan nilai overshoot sebesar 0,3% dan memiliki nilai steady state error sebesar  $-0,16^{\circ}\text{C}$  di atas set point. Pada sistem kendali LQR secara real time memiliki respon output sistem dengan dengan nilai settling time sebesar 777 detik, nilai rise time sebesar 647 detik dengan nilai overshoot sebesar 0,5% dan memiliki nilai steady state error sebesar  $0,006^{\circ}\text{C}$ . Pada sistem kendali MPC secara real time memiliki respon output sistem dengan dengan nilai settling time sebesar 705 detik, nilai rise time sebesar 578 detik dengan nilai overshoot sebesar 2,3% dan memiliki nilai steady state error dengan rentang nilai  $0-1,03^{\circ}\text{C}$  berupa osilasi konstan. Dari hasil pengujian sistem secara simulasi dan real time dapat disimpulkan bahwa keduanya memiliki hasil respon sistem yang berbeda. Hal ini dipengaruhi dengan adanya perbedaan nilai parameter yang digunakan dan waktu yang berbeda antara simulasi dan real time.

**Keywords:** PID, LQR, MPC, MATLAB, Arduino Mega 2560, Bottle washer, Pemanas Air

### **ABSTRACT**

*Control system is important, especially in the industrial world to improve the system performance that is applied in the industry. This study aims to compare several water heater control methods applied to the bottle washer system and compare the methods used based on control performance criteria consisting of settling time, rise-time, overshoot percentage, and steady-state error. The methods used in this research were PID (Proportional, Integral, and Derivative), MPC (Model Predictive Control), and LQR (Linear Quadratic Regulator). The Simulations and experiments in this study were using MATLAB/Simulink. An Arduino Mega 2560 used as a data acquisition system that connects the prototype system to the computer. The simulation results concluded that the three methods require a tuning process to obtain better response results. The PID's output system response produces 768 seconds of settling time, 624 seconds of rise-time with an overshoot value and steady-state error are 0,3% and  $-0,16^{\circ}\text{C}$  above the set point. The LQR's output system responses yield 777 seconds of settling time, 647 seconds of rise-time, 0,5% of overshoot value, and  $0,006^{\circ}\text{C}$  steady-state error. Lastly, the MPC's output system response produces 705 seconds of*

setting time, 578 seconds of rise-time with an overshoot value is 2,3%, and a constant oscillate steady-state error with the value range between 0 and 1,03°C. These results concluded that both have different system response results. We believed that it was influenced by the differences in the parameters used. Also, the time difference between the simulation and real-time implementation could be the other causes.

**Keywords:** PID, LQR, MPC, MATLAB, Arduino Mega 2560, Bottle washer, Water heater

## 1. Pendahuluan

Sebuah sistem pengendalian menjadi sangat penting terutama pada dunia industri untuk membantu meningkatkan kinerja atau performa sebuah sistem yang digunakan. Keuntungan menggunakan sistem pengendalian juga dapat mengefisienkan waktu dan mengurangi human error yang biasanya dilakukan oleh manusia [1].

Salah satu sistem pengendalian yang sangat penting dalam dunia industri adalah sistem pengendalian temperatur. Alat produksi yang banyak digunakan dengan menggunakan pengendalian temperatur adalah sistem pemanas. Banyak perindustrian yang menggunakan sistem pemanas sebagai alat untuk memproses dan memproduksi produknya. Sistem pemanas ini harus dikendalikan dengan temperatur yang tepat sesuai dengan *set point* agar tidak terjadi panas dan tekanan yang berlebih yang dapat membuat produksi gagal. *Set point* temperatur pada sistem bottle washer adalah sebesar 90°C. Pemilihan *set point* disesuaikan dengan kebutuhan temperatur dari sistem *bottle washer*, sehingga dapat membersihkan botol dengan optimal tanpa merusak botol [2].

Penelitian ini akan membahas salah satu aplikasi sistem produksi yang menggunakan sistem pemanas yaitu *bottle washer*. *Bottle washer* digunakan pada perindustrian yang memproduksi botol minuman seperti pabrik Teh Botol Sosro, Coca Cola dan lain-lain. *Bottle washer* memiliki fungsi yaitu memastikan botol yang akan diproduksi telah terjamin kebersihan dan kelayakannya sebelum digunakan. Beberapa pabrik minuman menggunakan botol daur ulang sebagai produk yang akan diproduksi. Maka dari itu, sistem *bottle washer* ini sangat penting untuk memastikan bahwa botol yang sudah dipakai berulang-ulang kali tersebut masih layak dan aman untuk dipakai kembali [3,4].

## 2. Studi Literatur

Penelitian terkait *bottle washer* yang digunakan di dunia industri sudah pernah

dilakukan oleh beberapa peneliti. Salah satunya Ankur dkk. yang membahas tentang pentingnya sistem *bottle washer* pada perindustrian terutama pada industri minuman yang menggunakan botol sebagai bahan produksi utama [5]. Mesin *bottle washer* ini merupakan bagian penting dari sebuah proses pengisian dan pengemasan produk minuman untuk wadah RGB atau *Returnable Glass Bottle* yang menggunakan botol daur ulang. Mereka membuat desain mesin *bottle washer* lengkap dengan aspek mekanik dan listrik untuk industri minuman berskala kecil bersama dengan urutan logika kendali dan simulasi kendali temperatur PID.

Penelitian [5] menggunakan tangki pemanas air yang digunakan sebagai bagian dari perawatan mesin *bottle washer*. Temperatur yang dikendalikan pada tangki pemanas air tersebut menggunakan metode kendali PID. Selain itu, mereka juga menggunakan sebuah metode yang baru dengan menggunakan implementasi MPC dan hasilnya menunjukkan bahwa MPC memberikan respons kendali dan kinerja yang lebih baik dibandingkan PID.

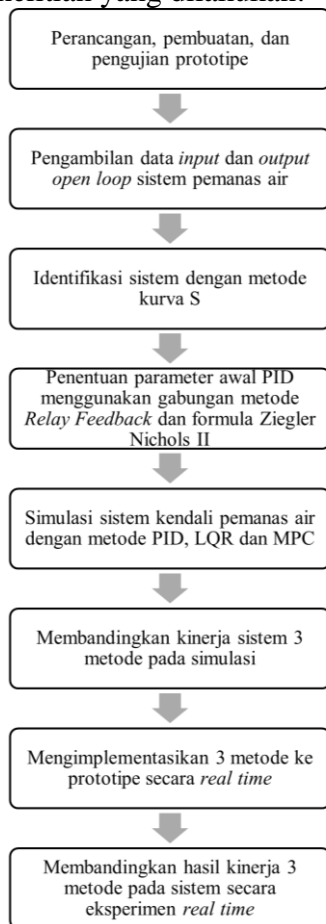
Ankur dkk. juga membahas tentang pembuatan desain dan pengembangan mesin *bottle washer* untuk industri minuman berskala kecil [6]. Mesin *bottle washer* hanya bisa digunakan pada industri minuman berskala menengah atau besar. Maka dari itu, mereka membuat penelitian mengenai desain dan pengembangan mesin *bottle washer* yang dapat digunakan pada industri minuman berskala kecil. Penelitian ini memberi usulan desain dan otomasi mesin *bottle washer* yang ekonomis tanpa mengurangi kemampuan pengendaliannya.

Penelitian [6] menggunakan mesin *bottle washer* yang sudah disambungkan dengan menggunakan PLC dan telah diprogram dengan menggunakan diagram ladder SIMATIC Manager. Perbandingan hasil skema pengendalian menunjukkan bahwa kendali temperatur PID merupakan skema kendali yang paling efektif untuk pengendalian temperatur.

Masing-masing penelitian mendapatkan hasil yang berbeda pada setiap percobaan. Kedua penelitian yang telah dibahas menunjukkan bahwa setiap metode yang digunakan akan menghasilkan respon yang berbeda. Berdasarkan referensi yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian pengendalian temperatur dengan PID dan MPC menjadi basis perancangan dalam penelitian ini. Pada penelitian ini, ditambahkan metode LQR untuk mengetahui performa yang lebih baik diantara ketiga metode.

### 3. Metodologi

Gambar 1 menunjukkan diagram alir dari alur penelitian yang dilakukan.



**Gambar 1.** Diagram Alir Alur Penelitian

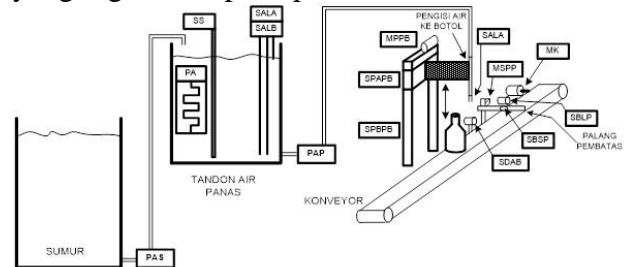
Alur penelitian dimulai dengan tahap perancangan, pembuatan dan pengujian prototipe. Setelah dilakukan uji coba, maka dilanjutkan dengan melakukan pengambilan data temperatur sistem pemanas air untuk mendapatkan data sistem *input* dan *output open loop*. *Input* yang diberikan merupakan tegangan 5V yang akan menghidupkan sistem pemanas air sampai dengan temperatur maksimal yaitu 100°C. Pengambilan

data *open loop* ini dilakukan dengan sekali proses pengambilan. Data temperatur sistem *open loop* yang didapatkan akan digunakan untuk proses mencari identifikasi sistem dengan menggunakan metode kurva S. Penggunaan metode kurva S ini dilakukan berdasarkan sistem pemanas air yang merupakan sistem orde I.

Melalui proses identifikasi sistem tersebut, didapatkan hasil berupa persamaan model matematis sistem yang akan digunakan untuk melakukan proses simulasi sistem kendali. Proses simulasi sistem kendali dimulai dengan metode PID yang menggunakan metode *Relay Feedback* dan formula *Ziegler Nichols* untuk menentukan parameter awal PID. Setelah itu dilanjutkan dengan melakukan simulasi metode kendali LQR dengan menggunakan formula dasarnya dan simulasi metode kendali MPC dengan menggunakan *toolbox* sistem MPC pada *Simulink* MATLAB.

#### 3.1. Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe

Berikut ini merupakan skema perancangan prototipe yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 dan merupakan gambar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian.

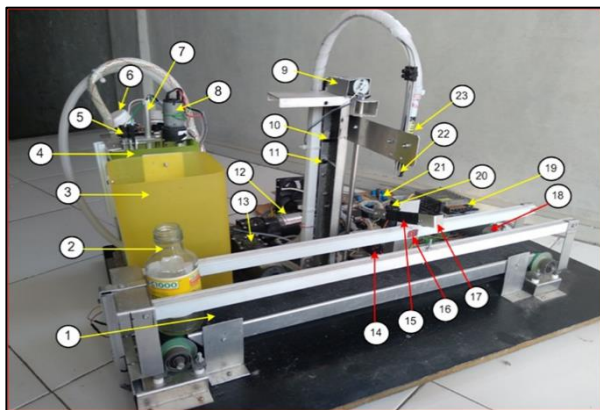


**Gambar 2.** Skema Perancangan Prototipe

Pada kondisi awal sistem tangki air panas masih kosong, konveyor tidak diaktifkan, dan palang pembatas dalam keadaan tertutup. Pengisian air pada tangki air panas dilakukan dengan memompa air dari sumur secara otomatis sampai tangki penuh. Setelah itu, dilanjutkan dengan proses memanaskan air pada tangki sehingga mencapai temperatur *set point* yaitu 90°C secara konstan dengan menggunakan metode kendali yang sudah ditentukan. Setelah temperatur mencapai 90°C konveyor mulai aktif dan botol yang terletak di atas konveyor akan

bergerak maju sampai ke sistem pengisian air panas.

Konveyor akan berhenti apabila botol menyentuh palang pembatas dan pada saat itu pipa pengisi air akan bergerak turun masuk ke dalam botol lalu mengisi botol dengan air panas sampai penuh. Apabila botol sudah terisi penuh, pipa air akan mati dan bergerak kembali keatas lalu palang pembatas terbuka. Setelah itu, botol akan mulai bergerak setelah konveyor kembali aktif. Apabila botol sudah melewati palang pembatas, maka palang pembatas akan menutup kembali. Proses ini akan terus berjalan dan akan berhenti apabila level air panas pada kondisi minimum atau sistem dimatikan secara paksa melalui program di komputer.



Gambar 3. Alat dan Bahan Prototipe

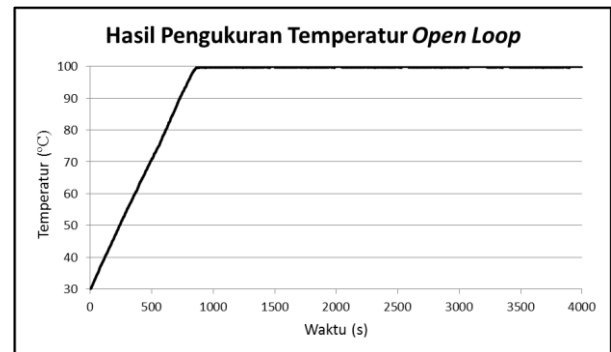
Setelah dilakukan pembuatan prototipe, maka dilanjutkan dengan melakukan pengujian dengan menggunakan input tegangan sebesar 5V. Pengujian prototipe dikatakan berhasil apabila sistem pemanas air menyala pada saat diberikan input tegangan sebesar 5V dan temperatur air naik sampai temperatur maksimal yaitu 100°C.

### 3.2. Desain Pemodelan Sistem Kendali Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe

Desain pemodelan sistem merupakan sebuah proses pencarian persamaan model matematis sistem masing-masing metode. Model matematis sistem akan menghasilkan parameter yang digunakan sebagai acuan dalam mencari respon yang terbaik sesuai dengan kriteria kinerja sistem.

#### 3.2.1. Pengambilan Data *Open loop* Temperatur Pemanas Air

Pengambilan data sistem input dan *output open loop* pemanas air dilakukan dengan menggunakan *Simulink* MATLAB yang tersambung dengan prototipe sistem dengan Arduino Mega 2560 sebagai sistem akuisisi. Data *open loop* temperatur pemanas air yang sudah didapatkan memiliki grafik seperti pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik Hasil Pengukuran Temperatur *Open loop*

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa temperatur pemanas air mulai mengalami kenaikan pada temperatur 30°C. Temperatur air mencapai derajat maksimal yaitu 100°C pada waktu kurang lebih selama 1000 detik. Setelah itu temperatur stabil pada kondisi tersebut.

#### 3.2.2. Identifikasi Sistem dengan Kurva S

Identifikasi sistem dengan kurva S bertujuan untuk mendapatkan pemodelan dari sistem. Identifikasi sistem pemanas air menggunakan data yang telah diambil dengan sistem *open loop* untuk mendapatkan data sistem *input* dan *output plant*. Metode ini cukup sederhana dan sering digunakan karena metode ini hanya memerlukan informasi *input* dan *output*. Pemodelan matematis sistem dilakukan dengan menggunakan persamaan model matematis sistem kurva S seperti persamaan (1) berikut [7,8]:

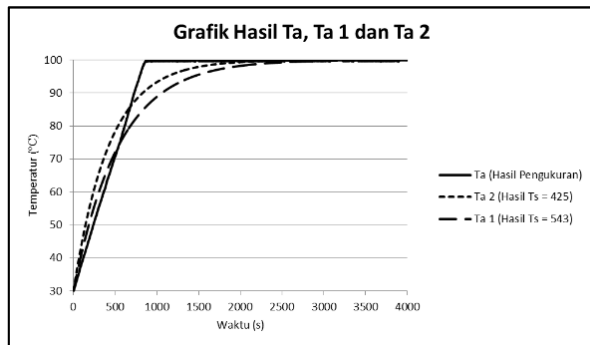
$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} \quad (1)$$

K = *Steady state gain*

T = *Time constant*

L = *Time delay*

Parameter yang diperhitungkan pada identifikasi ini adalah *magnitude* dari perubahan *input* dan *steady state output*. Kemudian waktu sinyal *output* mencapai 28% dan 63% dari kondisi *steady state* akhir. Simulasi identifikasi kurva S dilakukan dengan menggunakan *Simulink*. Berdasarkan data yang telah didapatkan dan melalui proses perhitungan, hasil yang didapatkan memiliki *error* yang terlalu jauh dengan hasil pengukuran sistem. Maka dari itu, dilakukan proses *tuning* ulang. Gambar 5. merupakan hasil dari tiga percobaan yang telah dilakukan untuk mendapatkan nilai *error* yang paling kecil.

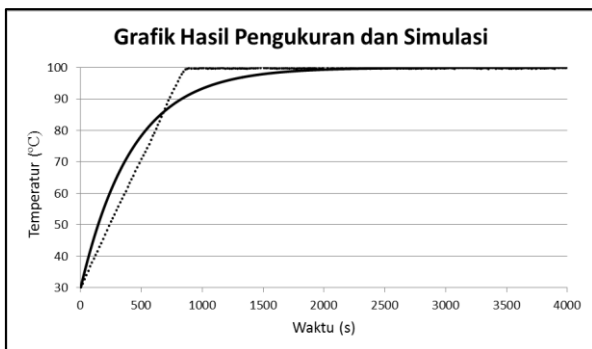


**Gambar 5.** Grafik Perbandingan Hasil Ta, Ta 1 dan Ta 2

Setelah melakukan perbandingan tersebut, maka didapatkan model matematis sistem pemanas air dengan *nilai error* terkecil. Berikut ini merupakan persamaan model matematis sistem yang dipilih dan dapat dilihat pada persamaan (2).

$$G_{(s)} = \frac{70}{425s + 1} \quad (2)$$

Grafik perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi persamaan (2) dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Grafik Hasil Pengukuran dan Simulasi Temperatur

### 3.2.3. Perancangan Desain Model PID

Perancangan model sistem PID dilakukan dengan pencarian parameter awal PID dengan menggunakan metode gabungan *Relay Feedback* dan formula *Ziegler Nichols*. Metode *Relay Feedback* disebut juga kendali *on-off* yang mana *output* dari pengendali memiliki 2 kendali yaitu maksimum dan minimum. Penggunaan metode gabungan ini dilakukan sesuai dengan bentuk hasil respon dari *plant* sistem pemanas air yang digunakan. Berdasarkan model matematis sistem yang sudah didapatkan, maka dilakukan proses simulasi untuk melakukan simulasi metode *Relay Feedback*. Hasil *output* dari simulasi sistem metode *Relay Feedback* dengan nilai amplitudo osilasi (*a*), ketinggian level *relay* (*h*), dan periode osilasi (*T<sub>C</sub>*). Nilai *output relay* dapat dilihat pada Tabel 1 [9].

**Tabel 1.** Output Relay Feedback

<i>a</i>	<i>T<sub>C</sub></i>	<i>h</i>
0,17	8	5

Mengacu pada hasil *output relay* tersebut, maka didapatkan nilai parameter PID dengan menggunakan formula *Ziegler Nichols* seperti pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Parameter Kendali PID dan Formula *Ziegler Nichols*

<i>K<sub>C</sub></i>	<i>K<sub>P</sub></i>	<i>K<sub>i</sub></i>	<i>K<sub>d</sub></i>	<i>T<sub>i</sub></i>	<i>T<sub>d</sub></i>
$\frac{4h}{\pi a}$	$= \frac{K_C}{5}$	$= \frac{(2/5)K_C}{T_C}$	$= \frac{K_C T_C}{15}$	$= \frac{T_C}{2}$	$= \frac{T_C}{3}$
$= 37,47$	$= 7,5$	$= 1,87$	$= 19,98$	$= 4$	$= 2,6$

*K<sub>C</sub>* = Critical gain

*K<sub>P</sub>* = Proportional gain

*K<sub>i</sub>* = Integral gain

*K<sub>d</sub>* = Derivative gain

*T<sub>i</sub>* = Waktu integral

*T<sub>d</sub>* = Waktu derivative

Setelah didapatkan nilai parameter kendali PID, parameter tersebut akan menjadi sistem *input* PID yang akan disimulasikan dengan menggunakan *Simulink* MATLAB. Indikator sistem pengendalian sudah cukup baik karena semua parameter sudah dapat ditentukan.

### 3.2.4. Perancangan Desain Model LQR

Pada perancangan desain model untuk metode LQR akan menggunakan model sistem *plant* dan *transfer function* seperti berikut:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0,0337}{s + 0,002403} \quad (3)$$

Selanjutnya, bentuk *transfer function* tersebut diubah menjadi bentuk *state space* dengan parameter *state space*  $A = -0,0024$ ,  $B = 1$ ,  $C = 0,0337$ , dan  $D = 0$ .

Pada sistem kendali LQR berupa *set point tracker*, *output* ( $y$ ) akan dibuat agar dapat mengikuti nilai *set point* ( $r$ ) yang diberikan. Tujuan dari sistem kendali LQR saat ini adalah untuk membuat nilai  $y - r = 0$  dimana *output* ( $y$ ) dari sistem *plant* merupakan *error* atau selisih antara *output* ( $y$ ) dengan *set point* ( $r$ ). Proses selanjutnya dilanjutkan dengan menggunakan blok diagram *Simulink* untuk metode kendali LQR. Indikator sistem pengendalian sudah cukup baik karena semua parameter sudah dapat ditentukan.

### 3.2.5. Perancangan Desain Model MPC

Perancangan sistem untuk metode MPC akan menggunakan *toolbox* sistem MPC yang tersedia pada *Simulink* MATLAB. Sistem ini akan secara otomatis mendeteksi nilai prediksi yang akan datang dengan menggunakan nilai yang sudah di *input* kedalam *plant*. Nilai *input* yang digunakan pada sistem MPC ini menggunakan persamaan diskrit yang sama digunakan pada dua metode sebelumnya. Indikator sistem pengendalian sudah cukup baik karena semua parameter sudah dapat ditentukan.

## 4. Hasil Dan Pembahasan

### 4.1. Hasil Simulasi Sistem Identifikasi Kurva S

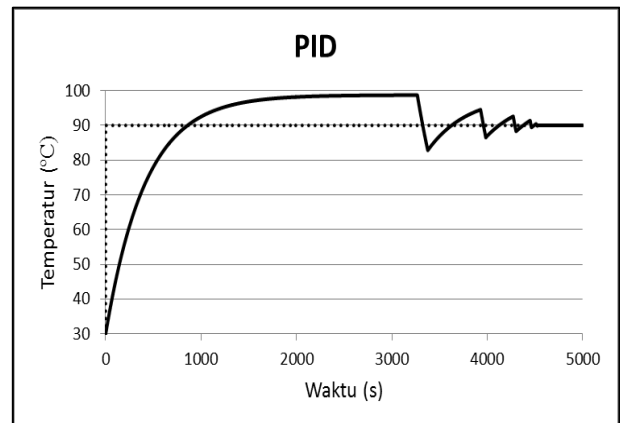
Pada pembahasan ini membahas tentang hasil simulasi sistem pemanas air dengan menggunakan parameter awal yang telah didapatkan dari persamaan model matematis identifikasi kurva S. Pada tahap ini seluruh hasil simulasi sistem belum dilakukan proses *tuning* ulang. Gambar 7(a) merupakan gambar keseluruhan sistem kendali yaitu PID, LQR dan MPC.

Berdasarkan grafik hasil dari simulasi sistem dengan menggunakan metode PID, hasil

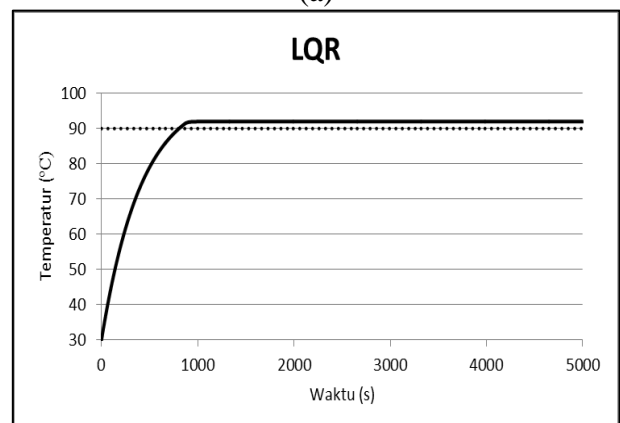
yang didapatkan tidak sesuai dengan *set point* yang diinginkan karena terdapat osilasi dan temperatur tidak konstan. Maka dari itu, diperlukan *tuning* manual pada kendali PID tersebut.

Gambar 7(b) menunjukkan grafik hasil dari respon simulasi sistem kendali dengan menggunakan metode LQR. Dari Gambar 7(b) dapat dilihat bahwa respon *output* temperatur melebihi *set point* 90°C dan memiliki *steady state error* yang konstan yaitu 1,9°C diatas *set point*. Maka dari itu, sistem kendali LQR ini masih memerlukan adanya *tuning* ulang agar didapatkan nilai *output* yang diinginkan.

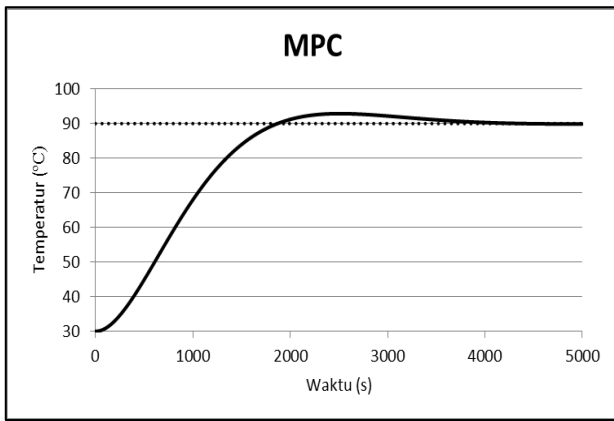
Gambar 7(c) menunjukkan grafik hasil dari respon simulasi sistem dengan menggunakan metode MPC. Hasil respon *output* temperatur oleh metode kendali MPC ini dapat menyentuh *set point* 90°C pada waktu kurang dari 2000 detik namun memiliki *steady state error* sekitar 2,8°C di atas *set point*. Selain itu, respon *output* temperatur tersebut mulai konstan pada waktu mendekati 4000 detik.



(a)



(b)



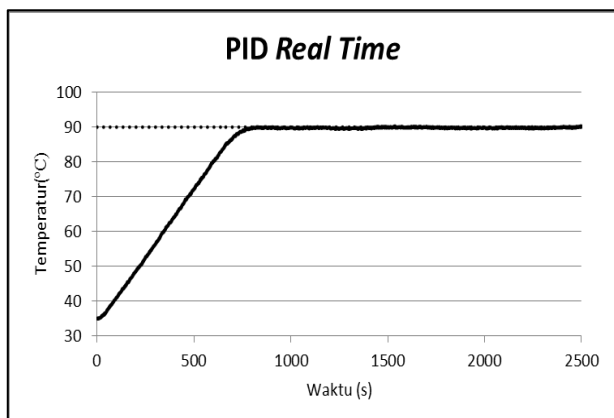
(c)

Gambar 7. Grafik Hasil Simulasi (a) Metode PID, (b) LQR, dan (c) MPC

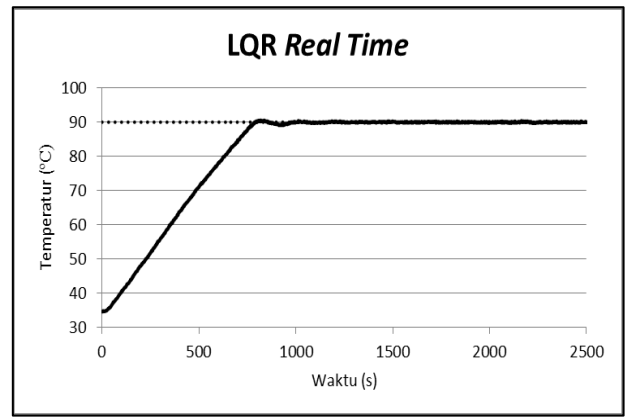
#### 4.2. Hasil Pengujian Sistem Secara Real Time

Bagian ini membahas tentang hasil respon *output* dari masing-masing metode kendali dengan menggunakan sistem pemanas air secara *real time*. Proses ini dilakukan dengan melalui proses *tuning* secara manual pada seluruh metode kendali yang digunakan. Proses *tuning* secara manual ini dilakukan agar mendapatkan hasil terbaik dengan memiliki kriteria kinerja yang ideal.

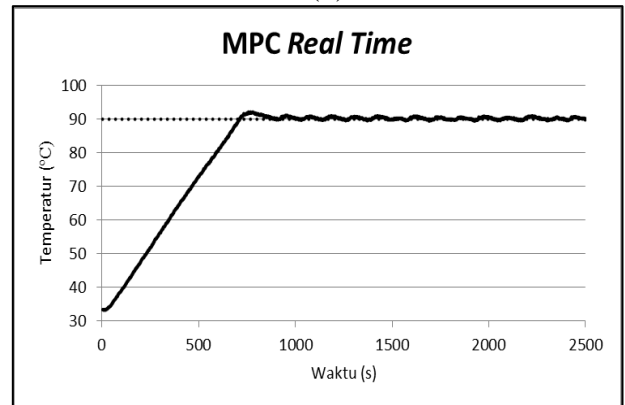
Sistem pengendalian dinyatakan berhasil jika semua pengendalian yaitu PID, LQR, dan MPC memiliki sistem yang stabil ditandai dengan tercapainya *steady state*. Pada penelitian ini, dicari mana yang merupakan sistem kendali yang paling baik dengan kriteria kinerja nilai *settling time* dan *rise time* yang tercepat. Gambar 8(a), 8(b), dan 8(c) secara berturut-turut menunjukkan grafik hasil respon *output* sistem kendali PID, LQR, dan MPC secara *real time*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Grafik Respon Real time Sistem Kendali (a) PIC, (b) MPC dan (c) LQR

Tabel 3 menunjukkan hasil parameter yang didapatkan dari grafik 8(a), 8(b), dan 8 (c).

Tabel 3. Parameter Kinerja Sistem Kendali PID

Sistem Kendali	Settling time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)	Steady State Error (°C)
PID	768	624	0,3	-0,16
LQR	777	647	0,5	0,006
MPC	705	578	2,3	0-1,03 (osilasi)

Berdasarkan Tabel 3 maka dapat dilihat bahwa respon temperatur sistem kendali PID secara *real time* memiliki kriteria kinerja dengan nilai *settling time* sebesar 768 detik dan nilai *rise time* sebesar 624 detik. Selain itu, respon sistem kendali PID ini juga memiliki nilai *overshoot* sebesar 0,3% dan memiliki nilai *steady state error* sebesar -0,16°C diatas *set point*.

Berdasarkan Tabel 3 dapat disimpulkan bahwa respon temperatur sistem kendali LQR secara *real time* memiliki nilai *settling time* sebesar 777 detik, nilai *rise time* sebesar 647 detik dengan nilai *overshoot* sebesar 0,5% dan memiliki nilai *steady state error* sebesar 0,006°C. Parameter kinerja sistem kendali LQR ini memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan nilai parameter kinerja yang dimiliki oleh sistem kendali PID. Meskipun begitu, keduanya memiliki keunggulan yang berbeda pada masing-masing parameter yang ada.

Tabel 3. Menunjukkan bahwa respon temperatur sistem kendali MPC secara *real time* memiliki nilai *settling time* sebesar 705 detik dan nilai *rise time* sebesar 578 detik. Selain itu, terdapat nilai persentase *overshoot* sebesar 2,3 % dan memiliki nilai *steady state error* dengan rentang nilai 0–1,03°C dan memiliki osilasi yang konstan. Parameter kinerja sistem kendali MPC ini memiliki nilai *settling time* dan *rise time* yang lebih baik dibandingkan dengan metode PD dan LQR. Namun begitu, pada sistem ken MPC ini, respon temperatur *output* yang dihasilkan memiliki *overshoot* dan *steady state error* berupa osilasi yang konstan sehingga dapat mempengaruhi kinerja dari sistem yang digunakan

Sistem pengendalian dinyatakan berhasil karena semua pengendalian yaitu PID, LQR, dan MPC memiliki sistem yang stabil ditandai dengan tercapainya *steady state*. Berdasarkan kriteria kinerja nilai *settling time* dan *rise time* yang tercepat, sistem kendali MPC merupakan sistem kendali yang paling baik. Namun adanya osilasi pada keadaan *steady state* membuat metode ini kurang optimal.

Setelah dilakukan seluruh proses pengujian sistem secara simulasi maupun *real time*, maka dapat diberikan suatu analisis bahwa keduanya memiliki hasil respon yang berbeda. Menurut hasil pengujian yang sudah didapatkan, hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan parameter yang digunakan pada saat proses pengujian simulasi dan *real time*. Maka respon yang didapatkan oleh keduanya juga berbeda. Selain itu, waktu pada proses simulasi tidak berjalan sesuai dengan waktu saat ini yang mana hal ini berbeda dengan waktu yang berjalan pada saat proses pengujian secara *real time*.

## 5. Kesimpulan

1. Sistem pengendalian dinyatakan berhasil karena semua pengendalian yaitu PID, LQR, dan MPC memiliki sistem yang stabil ditandai dengan tercapainya *steady state*.
2. Berdasarkan kriteria kinerja nilai *settling time* dan *rise time* yang tercepat, sistem kendali MPC merupakan sistem kendali yang paling baik. Namun adanya osilasi pada keadaan *steady state* membuat metode ini kurang optimal.
3. Hasil pengujian sistem secara *real time* dapat disimpulkan seperti berikut :
  - a. Pada sistem kendali PID secara *real time* memiliki respon sistem *output* dengan nilai *settling time* sebesar 768 detik, nilai *rise time* sebesar 624 detik dengan nilai *overshoot* sebesar 0,3% dan memiliki nilai *steady state error* sebesar -0,16°C di atas *set point*.
  - b. Pada sistem kendali LQR secara *real time* memiliki respon sistem *output* dengan dengan nilai *settling time* sebesar 777 detik, nilai *rise time* sebesar 647 detik dengan nilai persentase *overshoot* sebesar 0,5 % dan memiliki nilai *steady state error* sebesar 0,006°C.
  - c. Pada sistem kendali MPC secara *real time* memiliki respon sistem *output* dengan dengan nilai *settling time* sebesar 705 detik, nilai *rise time* sebesar 578 detik dengan nilai persentase *overshoot* sebesar 2,3 % dan memiliki nilai *steady state error* dengan rentang nilai 0–1,03°C berupa osilasi konstan.
4. Dari hasil pengujian sistem secara simulasi dan *real time* dapat disimpulkan bahwa keduanya memiliki hasil respon sistem yang berbeda. Hal ini dipengaruhi dengan adanya perbedaan nilai parameter yang digunakan dan waktu yang berbeda antara simulasi dan *real time*.

## Daftar Pustaka

- [1] D. A. Tyas and R. Sumiharto, "Purwarupa Sistem Kendali PID: Studi Kasus Kendali Suhu Ruang," *Purwarupa Sist. Kendali PID Stud. Kasus Kendali Suhu Ruang*, vol. 3, no. 1, pp. 95–104, 2013.
- [2] A. Riyanto and M. Syafrullah, "Pemantauan Suhu Pada Sistem Pemanas Air Menggunakan Temperatur Kontrol Dengan



- Metode PID Ziegler Nichols Berbasis Web,” in *SENSITEK 2018*, pp. 682–687, 2018.
- [3] A. P. Susitrianni, “Laporan Magang Proses Produksi Teh Botol Sosro PT. Sinar Sosro Ungaran, Jawa Tengah,” *Tugas Akhir, USM*, 2009.
- [4] E. Kenny and A. Susanty, “Analisis Penyebab Ketidaksesuaian pada Produk Teh Botol Sosro dengan Metode Seven Tools dan Pemberian Alternatif Pemecahan Akar Masalahnya dengan Menggunakan Metode 5W+1H pada PT. Sinar Sosro KPB Ungaran,” *Ind. Eng. Online J.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–11, 2013.
- [5] A. G. Gajjar, A. I. Patel, and R. G. Singh, “Real time Implementation of MPC in *Bottle washer* Machine for Small Scale Beverage Industry,” *2017 6th Int. Conf. Comput. Appl. Electr. Eng. - Recent Adv. CERA 2017*, vol. 2018-Janua, no. October, pp. 509–514, 2018.
- [6] A. G. Gajjar, A. I. Patel, and R. G. Singh, “Design and Development of *Bottle washer* Machine for Small Scale Beverage Industry,” *Conf. Proceeding - 2015 Int. Conf. Adv. Comput. Eng. Appl. ICACEA 2015*, vol. 2015-March, no. July, pp. 325–331, 2015.
- [7] J. Babic, G. Takac, I. Petras, and D. Bednarova, “Identification of Model Parameters and Control of Heater on Laboratory Object PCT40,” *12th Int. Carpathian Control Conf.*, no. 1, pp. 11–14, 2011.
- [8] Y. D. S. Pambudi, “Penerapan pemodelan dan metode kurva reaksi proses untuk mengidentifikasi sistem duress,” *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah-Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Proses Bahan*, pp. 230–236, 2011.
- [9] I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Yogyakarta: PT Elex Media Komputindo, 2008.