

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

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



Disusun oleh:

Afifa Intan Ekaputri Supriyo

16524133

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

2020

LEMBAR PENGESAHAN

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

TUGAS AKHIR

ISLAM

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

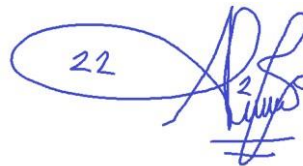
Disusun oleh:

Afifa Intan Ekaputri Supriyo
16524133

Yogyakarta, 23 September 2020

Menyetujui,

Pembimbing



Almira Budiyanto S.Si., M.Eng.
155240103

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

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

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Afifa Intan Ekaputri Supriyo

16524133

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 06 Oktober 2020

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Almira Budiyanto, S.Si., M.Eng. 

Anggota Penguji 1: Sisdarmanto Adinandra, S.T., M.Sc., Ph.D. 

Anggota Penguji 2: Firdaus, S.T., M.T., Ph.D. 

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 06 Oktober 2020

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut di atas.



Yogyakarta, 23 September 2020

Afifa Intan Ekaputri

Afifa Intan Ekaputri Supriyo

KATA PENGANTAR

AssalamualaikumWarahmatullahiWabarakatuh

Alhamdulillah dengan segala puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya, serta tak lupa shalawat dan salam kita panjatkan pada Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing umatnya dari zaman kegelapan hingga zaman yang terang seperti saat ini. Pada akhirnya atas izin Allah, penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Perbandingan Metode PID, LQR, dan MPC pada Sistem Pemanas Air *Bottle Washer* Berbasis MATLAB” sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia.

Laporan ini dapat diselesaikan dengan adanya dukungan dari banyak pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah banyak membantu dan memberikan dukungan. Antara lain:

1. Bapak Yusuf Aziz Amirullah, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bu Almira Budiyanto, S.Si., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing yang sangat sabar dan teliti dalam memberikan saran serta dukungan dalam pelaksanaan skripsi dan penyusunan laporan skripsi ini.
3. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia atas seluruh bantuan dan pengetahuan yang telah diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan hingga saat ini.
4. Saudara tidak sedarah Teknik Elektro angkatan 2016 yang banyak ini memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.
5. Keluarga yang selalu memberikan doa dan semangat yang diberikan untuk kelancaran kegiatan ini.

Harapannya, laporan skripsi ini dapat memberi pengetahuan dan dapat memberi manfaat bagi siapapun yang membacanya termasuk untuk penulis sendiri. Amin Ya Rabbal’Alamin.

WassalamualaikumWarahmatullahiWabarakatuh.

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Arti Singkatan:

PID = <i>Proportional, Integral and Derivative</i>	MPC = <i>Model Predictive Control</i>
LQR = <i>Linear Quadratic Regulator</i>	LQR = <i>Linear Quadratic Regulator</i>
RGB = <i>Returnable Glass Bottle</i>	PAP = Pompa Air Panas
PAS = Pompa Air Sumur	PA = Pemanas Air
SS = Sensor Suhu	SALA = Sensor Air Level Atas
SALB = Sensor Air Level Bawah	SPAPB = Sensor Posisi Atas Pengisi Botol
SPBPB = Sensor Posisi Bawah Pengisi Botol	MSPP = Motor Servo Penggerak Palang
MPPB = Motor Penggerak Pengisi Botol	MK = Motor Konveyor
SBLP = Sensor Botol Lewat Palang	SBSP = Sensor Botol Sentuh Palang
SDB = Sensor Deteksi Botol	SP = <i>Set Point</i>

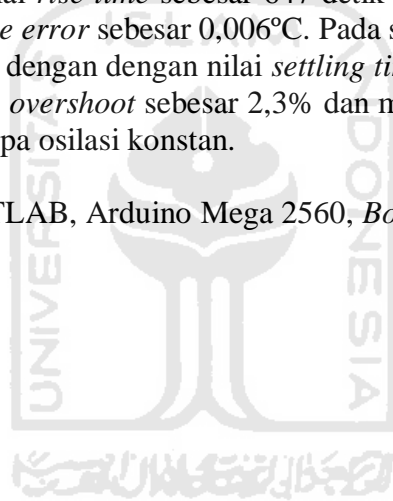
Arti Lambang:

$u(t)$ = sinyal <i>output</i> kendali PID	K_P = <i>Proportional gain</i>
K_I = <i>Integral gain</i>	\dot{x} = Turunan <i>state space</i>
K_D = <i>Derivative gain</i>	A = Matriks <i>state</i>
B = Matriks <i>input</i>	J = <i>Cost function</i>
K = <i>Gain</i>	Q = Matriks optimasi <i>state</i>
R = Matriks optimasi <i>input</i>	T = <i>Time constant</i>
r = <i>Set point</i>	L = <i>Time delay</i>
K_C = <i>Critical gain</i>	T_i = Waktu integral
T_d = Waktu derivatif	K_r = <i>Gain Set Point</i>
C = <i>Gain state output</i>	

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.

Kata kunci: PID, LQR, MPC, MATLAB, Arduino Mega 2560, *Bottle Washer*, Pemanas Air



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Studi Literatur	3
2.2 Tinjauan Teori	4
2.2.1 <i>Proportional, Integral, and Derivative (PID)</i>	4
2.2.2 <i>Model Predictive Control (MPC)</i>	5
2.2.3 <i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i>	6
BAB 3 METODOLOGI	9
3.1 Alur Penelitian	9
3.2 Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe	10
3.3 Desain Pemodelan Sistem Kendali	12

3.3.1 Pengambilan Data <i>Open Loop</i> Temperatur Pemanas Air.....	12
3.3.2 Identifikasi Sistem dengan Kurva S	13
3.3.3 Perancangan Desain Model PID	15
3.3.4 Perancangan Desain Model LQR.....	17
3.3.5 Perancangan Desain Model MPC	18
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	19
4.1 Hasil Simulasi Sistem Identifikasi Kurva S	19
4.1.1 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode PID.....	19
4.1.2 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode LQR	20
4.1.3 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode MPC.....	20
4.2 Hasil Pengujian Sistem Secara <i>Real Time</i>	21
4.2.1 Hasil Pengujian Sistem <i>Real Time</i> Kendali PID.....	21
4.2.2 Hasil Pengujian Sistem <i>Real Time</i> Kendali LQR	22
4.2.3 Hasil Pengujian Sistem <i>Real Time</i> Kendali MPC.....	23
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	24
5.1 Kesimpulan	24
5.2 Saran	24
DAFTAR PUSTAKA.....	26
LAMPIRAN.....	1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Pengendali MPC	6
Gambar 2.2 Konsep Dasar MPC [11].....	6
Gambar 2.3 Diagram Blok LQR	7
Gambar 3.1 Diagram Alir Alur Penelitian.....	9
Gambar 3.2 Skema Perancangan Prototipe.....	10
Gambar 3.3 Alat dan Bahan Prototipe	11
Gambar 3.4 Blok Diagram <i>Simulink Open Loop</i> Sistem.....	12
Gambar 3.5 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur <i>Open Loop</i>	13
Gambar 3.6 Blok Diagram <i>Simulink</i> Identifikasi Kurva S	13
Gambar 3.7 Grafik Perbandingan Hasil T_a , T_{a1} dan T_{a2}	14
Gambar 3.8 Grafik Hasil Pengukuran dan Simulasi Temperatur	14
Gambar 3.9 Blok Diagram <i>Simulink</i> Metode <i>Relay Feedback</i>	15
Gambar 3.10 Grafik <i>Output Plant</i> Osilasi pada <i>Relay Feedback</i>	15
Gambar 3.11 Grafik <i>Output Relay Feedback</i>	16
Gambar 3.12 Blok Diagram <i>Simulink</i> Metode PID.....	17
Gambar 3.13 Blok Diagram <i>Simulink</i> Metode LQR.....	17
Gambar 3.14 Blok Diagram <i>Simulink</i> Metode MPC.....	18
Gambar 4.1 Grafik Hasil Simulasi Metode PID	19
Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Metode LQR.....	20
Gambar 4.3 Grafik Hasil Simulasi Metode MPC	20
Gambar 4.4 Grafik Respon Sistem Kendali PID <i>Real Time</i>	21
Gambar 4.5 Grafik Respon Sistem Kendali LQR <i>Real Time</i>	22
Gambar 4.6 Grafik Respon Sistem Kendali MPC <i>Real Time</i>	23

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nama Alat dan Bahan Prototipe	11
Tabel 3.2 <i>Output Relay Feedback</i>	16
Tabel 3.3 Parameter Kendali PID dan Formula Ziegler Nichols	16
Tabel 4.1 Parameter Kinerja Sistem Kendali PID <i>Real Time</i>	21
Tabel 4.2 Parameter Kinerja Sistem Kendali LQR <i>Real Time</i>	22
Tabel 4.3 Parameter Kinerja Sistem Kendali MPC <i>Real Time</i>	23



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi yang pesat pada saat ini membuat hampir seluruh sistem yang digunakan menggunakan sistem pengendalian. Sistem pengendalian menjadi sangat penting untuk membantu berjalannya sebuah kehidupan baik pada kehidupan sehari-hari maupun pada dunia industri. Pada kehidupan sehari-hari kita bisa menemukan sistem pengendalian yaitu pada rumah atau gedung yang sudah berbasis *smart home*. Sistem pengendalian akan banyak ditemukan pada dunia industri seperti contoh kita akan menemukan konveyor, tangki pengaduk otomatis, dan tangki pemanas air.

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 mengefisiensikan waktu dan mengurangi *human error* yang biasanya dilakukan oleh manusia. Hal ini dapat membantu meningkatkan efektifitas kerja manusia agar lebih baik dan berkualitas [1].

Salah satu sistem pengendalian yang sangat penting dalam dunia industri adalah sistem pengendalian temperatur. Pengendalian temperatur dapat dikategorikan pada berbagai macam jenis yaitu temperatur pada ruangan maupun pada sistem alat produksi industri yang digunakan. 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 [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].

Pada tanggal 30 Januari 2013 data persentase mengenai produk yang tidak memenuhi syarat telah melebihi batas standar yang telah ditentukan oleh perusahaan PT. Sinar Sosro yaitu 0,9%

dari nilai standar yaitu 0,2%. Penyebab terjadinya lonjakan persentase kualitas produk tidak layak berada pada pos III yaitu pada sistem produksi. Pada sistem produksi terdapat beberapa kriteria yang menyebabkan produk ditolak oleh konsumen, beberapa diantaranya adalah adanya benda asing pada botol, botol masih kotor, dan temperatur yang tidak standar. Maka dari itu, untuk mempertahankan kepercayaan konsumen perusahaan harus menjaga mutu dan kualitas produk [4].

Berdasarkan beberapa penelitian yang sudah dibahas dapat membuktikan bahwa sistem pemanas pada dunia perindustrian sangat penting untuk menjaga dan meningkatkan kualitas dari produk sebuah perusahaan terutama pada industri minuman. Pada industri minuman yang menggunakan botol daur ulang, proses pembersihan dan *bottling* ini penting untuk diperhatikan karena botol yang digunakan merupakan penentu produk akan diterima atau ditolak oleh konsumen.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara untuk mengendalikan temperatur air sesuai *set point* dengan *settling time* dan *rise time* tercepat dengan *overshoot* dan *steady state error* yang rendah?
2. Bagaimana cara untuk menentukan kinerja terbaik dari metode sistem kendali yang digunakan?

1.3 Batasan Masalah

1. Prototipe sistem menggunakan *heater* 600 watt 220 volt.
2. Temperatur air konstan sebesar 90°C.

1.4 Tujuan Penelitian

Merancang dan membuat prototipe sistem pengendalian temperatur sebesar 90°C menggunakan metode kendali PID, MPC, dan LQR.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mengetahui kinerja pengendalian temperatur dan level air pada sistem *bottle washer* menggunakan metode PID, MPC dan LQR.
2. Prototipe yang dibuat dapat digunakan sebagai alat peraga praktikum kendali sistem pemanas dan level air terutama untuk penggunaan metode PID, MPC, dan LQR.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Penelitian terkait *bottle washer* yang digunakan di dunia industri sudah pernah dilakukan oleh beberapa peneliti. Salah satunya Ankur dan tim [5] yang membahas tentang pentingnya sistem *bottle washer* pada perindustrian terutama pada industri minuman yang menggunakan botol sebagai bahan produksi utama. 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 dan tim [6] juga membahas tentang pembuatan desain dan pengembangan mesin *bottle washer* untuk industri minuman berskala kecil. Mesin *bottle washer* hanya bisa digunakan pada industri minuman berskala menengah atau besar. Maka dari itu, mereka akan 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 respons yang berbeda.

2.2 Tinjauan Teori

Pada bagian tinjauan teori ini akan membahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Pembahasan ini akan memuat hal-hal mengenai dasar teori dibuatnya penelitian, aplikasi sistem yang digunakan, dan pengertian tentang landasan penelitian yang dibuat.

2.2.1 *Proportional, Integral, and Derivative (PID)*

Proportional, Integral, and Derivative atau yang biasa disebut dengan PID merupakan sebuah metode yang sangat umum digunakan untuk memperoleh nilai bagi sebuah pengendalian. Metode PID ini merupakan metode yang mudah difahami dengan adanya beberapa rumus yang digunakan dalam pencarian masing-masing parameter yang dibutuhkan seperti K_p (*proportional gain*), K_i (*integral gain*), dan K_d (*derivative gain*). Parameter awal PID tersebut dapat dicari dengan menggunakan metode percobaan *Relay Feedback* dan formula Ziegler Nichols. Metode PID sering digunakan pada sistem pengendalian karena PID merupakan sebuah metode yang layak dan mudah untuk diimplementasikan secara *real time*. Kendali ini biasa digunakan pada proses pengendalian kecepatan motor DC, pengaturan temperatur *oven* dan masih banyak lagi.

PID merupakan penjumlahan dari tiga kendali yaitu kendali Proportional (P), kendali Integral (I) dan kendali Derivative (D) secara serentak. Kendali PID merupakan kendali sistem *closed loop* yang mengaplikasikan K_p pada *error*, K_i pada *integral error* dan K_d pada *derivative error* untuk mengatur *input* sistem proses agar *error* tersebut dapat diminimalkan secara kontinyu. *Error* merupakan perbedaan nilai antara *set point* dengan *output* proses yang dikendalikan. Secara umum kendali PID tidak bergantung pada model proses dan pada pemilihan nilai parameter (K_p , K_i dan K_d) yang tepat dihasilkan dari proses *tuning* untuk kondisi tertentu yang stabil. Kendali PID tidak mempunyai algoritma untuk pengaturan parameter PID secara optimal, sehingga sangat rentan terhadap adanya perubahan gangguan (*disturbance*) yang tidak menentu atau perubahan parameter pada sistem proses yang dikendalikan. Selain itu, kendali PID akan memberikan respon yang kurang memuaskan bila digunakan untuk *set point* yang berbeda, karena parameter PID mempunyai nilai konstan yang di *tuning* dengan baik hanya untuk nilai *set point* tertentu saja dengan kondisi parameter dan gangguan (*disturbance*) yang tidak berubah-ubah.

PID banyak digunakan pada dunia industri selama beberapa dekade karena memiliki hasil respons yang cepat walaupun terkadang memiliki *overshoot* yang sangat tinggi. Namun, pada pengimplementasian PID pada sistem level cairan terkadang PID tidak mudah untuk adaptif terutama bila terdapat gangguan atau lingkungan yang berubah. Persamaan (2.1) merupakan respons sinyal PID [7]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

$u(t)$ = sinyal *output* kendali PID

K_p = *Proportional gain*

K_I = *Integral gain*

K_D = *Derivative gain*

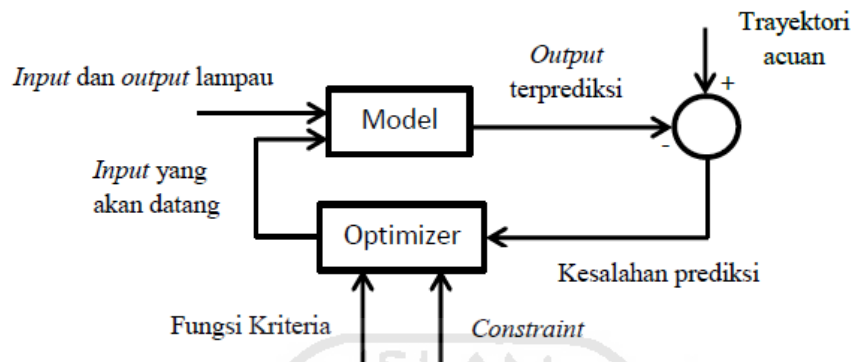
Sistem yang baik adalah sistem yang memiliki performa dan respons yang memenuhi kriteria. Kriteria yang digunakan untuk mengetahui bahwa sistem tersebut optimal adalah memiliki nilai *settling time* dan *rise time* yang cepat disertai dengan nilai *overshoot*, dan *steady state error* yang rendah [8].

2.2.2 Model Predictive Control (MPC)

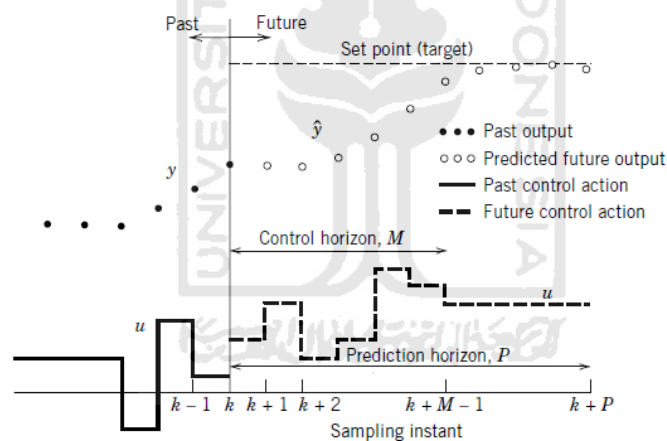
Model Predictive Control atau yang disingkat dengan MPC merupakan salah satu metode selain PID yang digunakan dalam sistem pengendalian. Metode MPC sering digunakan pada sistem pengendalian kecepatan motor DC. MPC dikenal juga sebagai metode yang mempunyai dasar pemahaman yang sistem pengendaliannya menggunakan prediksi. Pengendalian dengan metode prediksi ini muncul didasari dari proses *output* sebuah sistem yang nilainya dapat diketahui setelahnya dan masing-masing *output* dari sistem sebelumnya akan masuk menjadi *output* yang baru pada setiap perhitungan selanjutnya. Dikatakan bahwa MPC ini adalah metode yang berbasis dengan perhitungan iteratif atau berulang dengan mengoptimalkan *infinite-horizon* pada sistem [9].

Kendali MPC juga dapat diartikan sebagai metode kontrol prediktif yang bergantung pada model dinamis yang umumnya diperoleh melalui proses sistem identifikasi. Model proses secara eksplisit digunakan untuk memprediksi *output* proses yang akan datang dalam rentang waktu tertentu (*horizon*). Kendali ini melakukan perhitungan sinyal kendali agar *output* proses semakin mendekati *set point* dengan cara meminimumkan suatu fungsi kriteria yang berupa fungsi kuadrat. Pada setiap waktu pencuplikan (pada waktu k) *horizon* dipindahkan menuju waktu pencuplikan berikutnya (pada waktu $k+1$) dengan memakai sinyal kendali yang pertama (yaitu $u(k)$) untuk mengendalikan proses dan prosedur ini dilakukan secara berulang menggunakan informasi terakhir. MPC juga mengantisipasi adanya batasan-batasan (*constrains*) pada *input* proses dan *output* proses perhitungan sinyal kendali. Dengan mengandalkan proses prediksinya, MPC mampu mengantisipasi kejadian yang akan datang dan dapat memberikan tindakan pengendalian yang sesuai. MPC mempunyai aturan proses perhitungan sinyal kendali yang cukup kompleks dan memerlukan model yang akurat. Keberhasilan kendali MPC tergantung pada keakuratan model dan kecepatan waktu proses prediksi untuk menghasilkan sinyal kendali yang sesuai.

Selain PID, MPC juga merupakan metodologi yang sering digunakan pada dunia industri dan memiliki pengaruh besar dibandingkan dengan penggunaan kendali konvensional. Kendali konvensional memiliki beberapa batasan yang tidak dapat dikendalikan terutama apabila terjadi perubahan secara mendadak. Hal ini dapat dihindari oleh MPC karena pada dasarnya MPC memiliki konsep pengendalian yang dapat memprediksi *output* yang akan datang dengan tetap memperhatikan batasan yang diberikan [10].



Gambar 2.1 Struktur Pengendali MPC



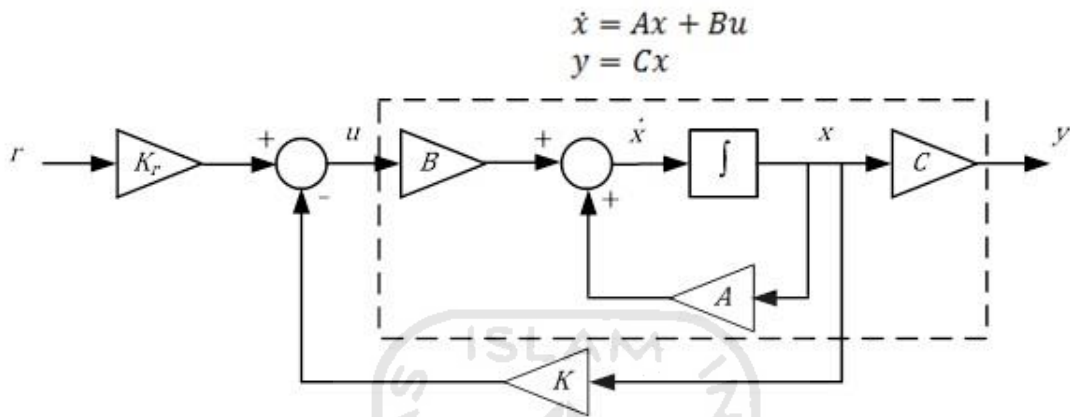
Gambar 2.2 Konsep Dasar MPC [11]

2.2.3 Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator atau disingkat LQR merupakan sebuah metode yang dikenal sebagai metode yang dapat memberikan *feedback* atau umpan balik yang dikendalikan secara optimal dan baik. Kendali LQR juga dapat dijelaskan sebagai sistem pengendalian yang bergantung pada *state feedback* yang menghasilkan pengendalian pada sistem *closed loop* secara optimal. Kendali ini mengaplikasikan *state feedback gain* (K) untuk mengatur sinyal kendali pada *input* proses agar *output* proses dapat mencapai *set point* secara tepat. Keberhasilan kendali LQR tergantung pada keakuratan model proses dan penentuan *state feedback gain* (K) secara optimal dengan cara meminimalkan *quadratic objective*

function melalui proses pemilihan faktor pembobotan yang tepat pada *state* (Q) dan *input* (R). Dengan demikian keberhasilan kendali LQR tergantung pada ketepatan pemilihan nilai *state feedback gain* (K) yang didasarkan pada keakuratan model proses dan pemilihan faktor pembobot Q dan R.

LQR merupakan salah satu metode yang memungkinkan untuk dapat merancang sebuah pengendali *close loop* atau *feedback* untuk sistem linier yang memiliki *cost function* kuadratik seminimal mungkin pada waktu apapun. Maka dari itu LQR bisa dikatakan merupakan metode yang lebih baik daripada PID [12].



Gambar 2.3 Diagram Blok LQR

LQR merupakan sebuah kendali optimal yang membandingkan *output* sistem dengan *set point* dan *feedback* yang dihasilkan akan kembali ke sistem melalui penguatan dari nilai *gain* (K). Persamaan (2.2) dan (2.3) menunjukkan bentuk dari *state* variabel LQR dengan metode kendali LQR sebagai *set point tracker* dan kendali LQR untuk mengendalikan *output* (y) proses agar mengikuti *set point* (r) mempunyai sinyal kendali untuk *input* proses (u) seperti pada Persamaan (2.4) [13]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.2)$$

$$y = Cx \quad (2.3)$$

$$u = -Kx + K_r r \quad (2.4)$$

\dot{x} = Turunan state space

A = Matriks state

B = Matriks input

C = Gain state output

K = Gain state input

K_r = Gain set point

r = Set point

Indeks performa atau *cost function* yang perlu dikendalikan agar mendapatkan nilai yang optimal memiliki persamaan seperti pada Persamaan (2.5):

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2.5)$$

$J = \text{Cost function}$

$Qx = \text{Matriks optimasi state}$

$Ru = \text{Matriks optimasi input}$

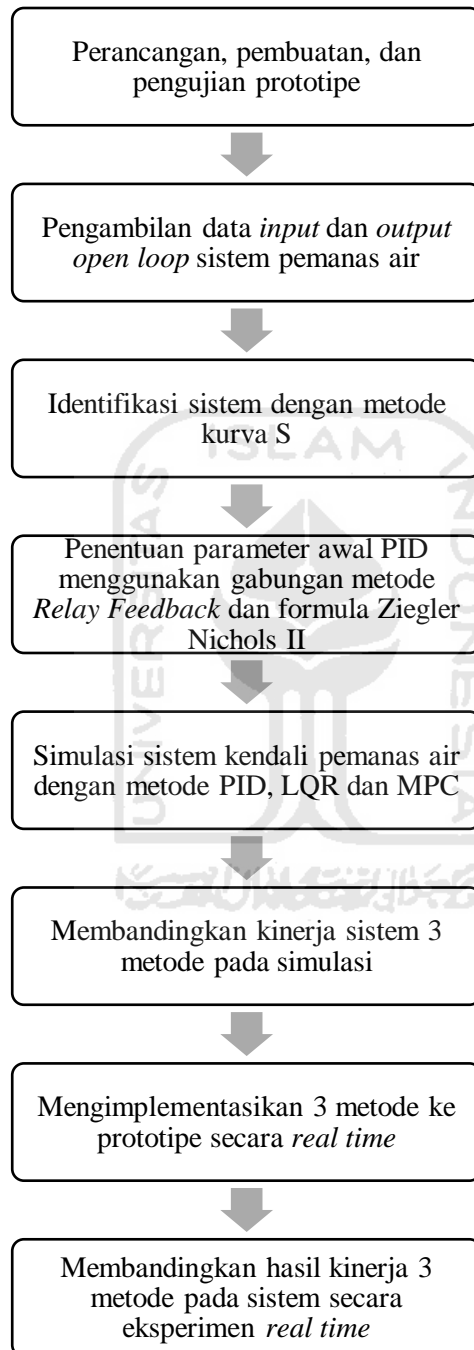


BAB 3

METODOLOGI

3.1 Alur Penelitian

Pada Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir dari alur penelitian yang dilakukan:



Gambar 3.1 Diagram Alir Alur Penelitian

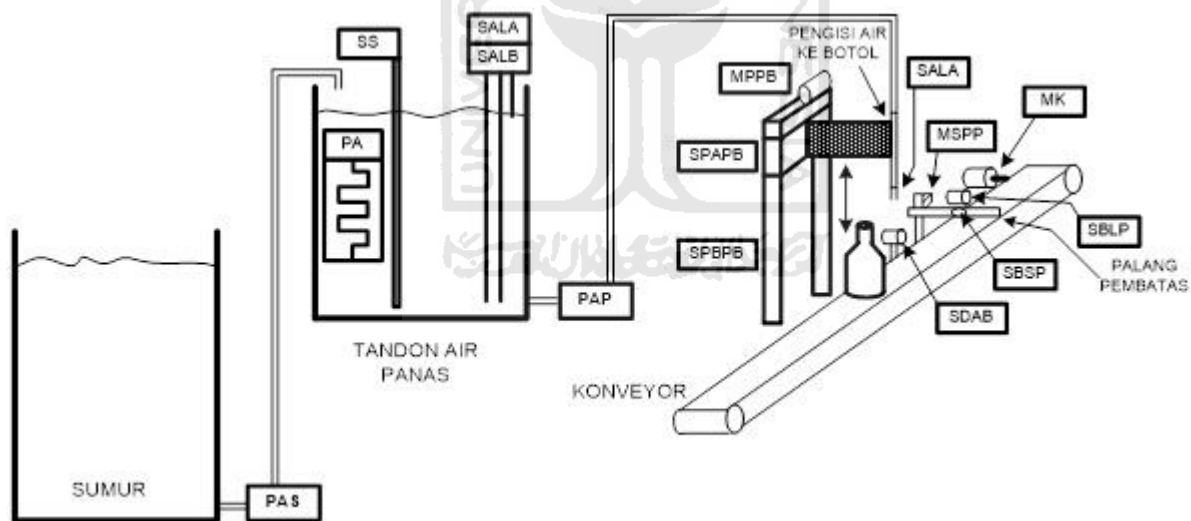
Alur penelitian dimulai dengan tahap perancangan, pembuatan dan pengujian prototipe. Setelah dilakukan uji coba, maka dilanjutkan dengan melakukan pengambilan data temperatur sistem pemanas

air untuk mendapatkan data *input* dan *output open loop* sistem. *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 *open loop* sistem 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 dasar LQR dan simulasi metode kendali MPC dengan menggunakan *toolbox* sistem MPC pada *Simulink* MATLAB.

3.2 Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe

Berikut ini merupakan skema perancangan prototipe yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 merupakan gambar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian:

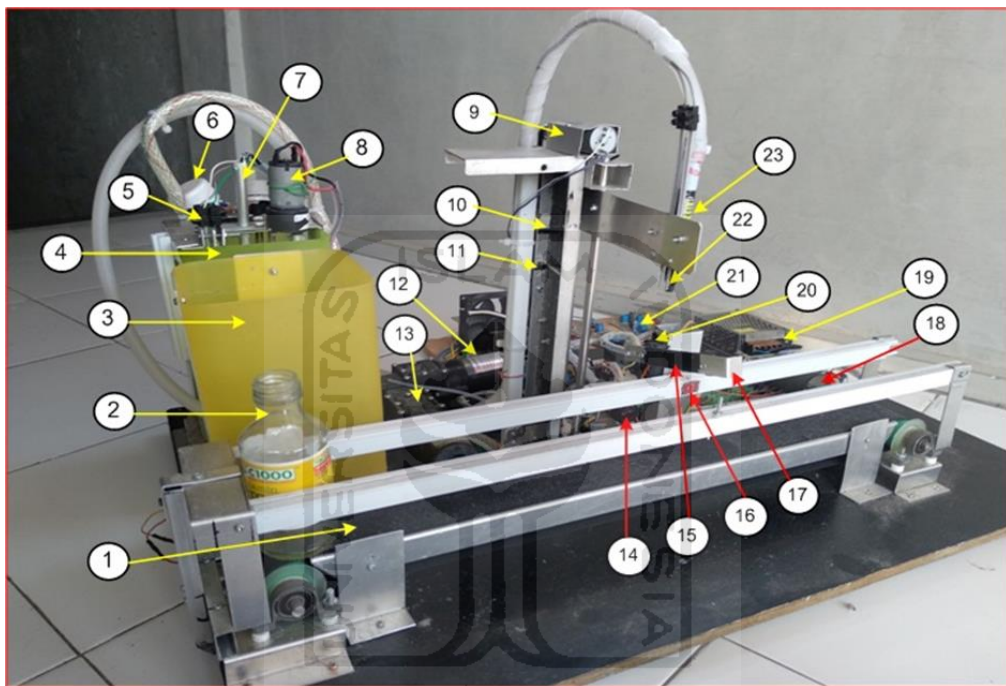


Gambar 3.2 Skema Perancangan Prototipe

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.

Pada Tabel 3.1 menunjukkan nama alat dan bahan prototipe yang digunakan pada penelitian sesuai dengan penomoran yang ada pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Alat dan Bahan Prototipe

Tabel 3.1 Nama Alat dan Bahan Prototipe

No	Komponen	No	Komponen	No	Komponen
1	Konveyor	9	Motor Pengisi Botol	17	Palang Pembatas
2	Botol	10	Sensor Posisi Atas Pengisi Botol	18	Motor Konveyor
3	Sumur	11	Sensor Posisi Bawah Pengisi	19	Power Supply
4	Tandon Air Panas	12	Pompa Sumur	20	Motor Palang Pembatas
5	Sensor Level Air Panas	13	Pompa Air Panas	21	Mikrokontroler
6	Pemanas Air	14	Sensor Ada Botol	22	Sensor Level Air Botol
7	Sensor Temperatur	15	Sensor Posisi Botol	23	Pengisi Botol
8	Motor Pengaduk Air Panas	16	Sensor Botol Lewat		

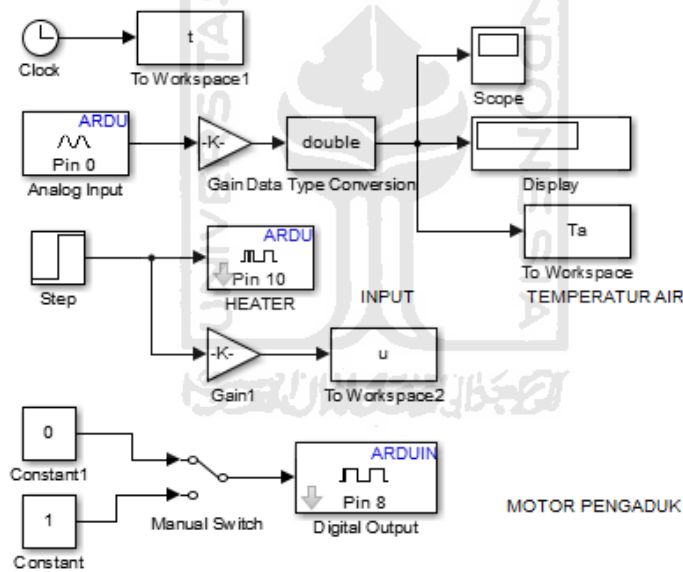
Setelah dilakukan pembuatan prototipe, maka dilanjutkan dengan melakukan pengujian dengan menggunakan *input* tegangan sebesar 5V. Pengujian prototipe dikatakan berhasil apabila sistem pemanas air menyala pada saat diberikan *input* tegangan sebesar 5V dan temperatur air naik sampai temperatur maksimal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

3.3 Desain Pemodelan Sistem Kendali

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 respons yang terbaik sesuai dengan kriteria kinerja sistem.

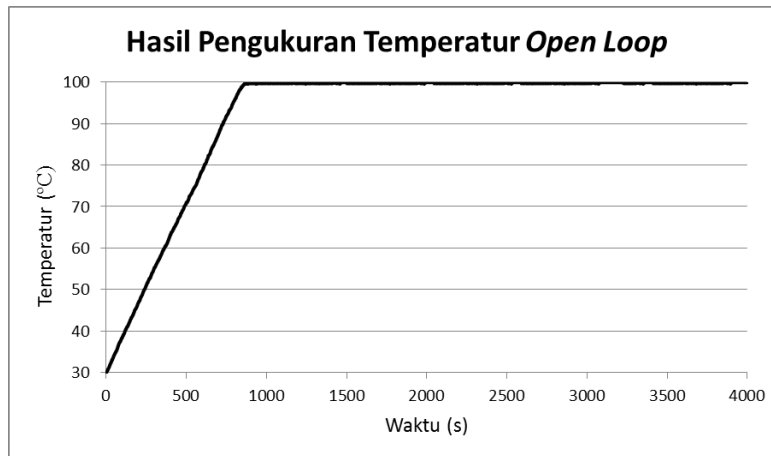
3.3.1 Pengambilan Data *Open Loop* Temperatur Pemanas Air

Pengambilan data *input* dan *output open loop* sistem pemanas air dilakukan dengan menggunakan *Simulink* MATLAB yang tersambung dengan prototipe sistem dengan Arduino Mega 2560 sebagai sistem akuisisi data. Blok diagram *Simulink open loop* sistem dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Blok Diagram *Simulink Open Loop* Sistem

Data *open loop* temperatur pemanas air yang sudah didapatkan memiliki grafik seperti pada Gambar 3.5 berikut:



Gambar 3.5 Grafik Hasil Pengukuran Temperatur *Open Loop*

Dari Gambar 3.5 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.

3.3.2 Identifikasi Sistem dengan Kurva S

Identifikasi sistem pemanas air menggunakan data yang telah diambil dengan sistem *open loop* untuk mendapatkan data *input* dan *output plant* sistem. Pemodelan matematis sistem dilakukan dengan menggunakan persamaan model matematis sistem kurva S seperti Persamaan (3.1) berikut [15]:

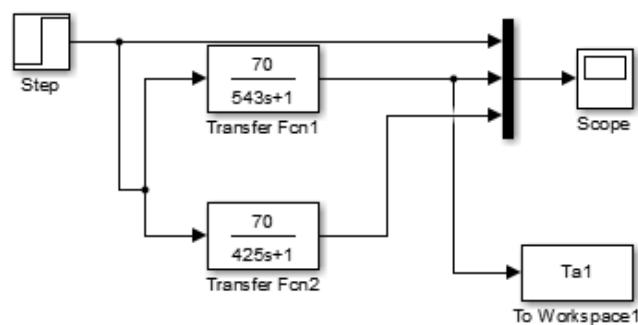
$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

K = *Steady state gain*

T = *Time constant*

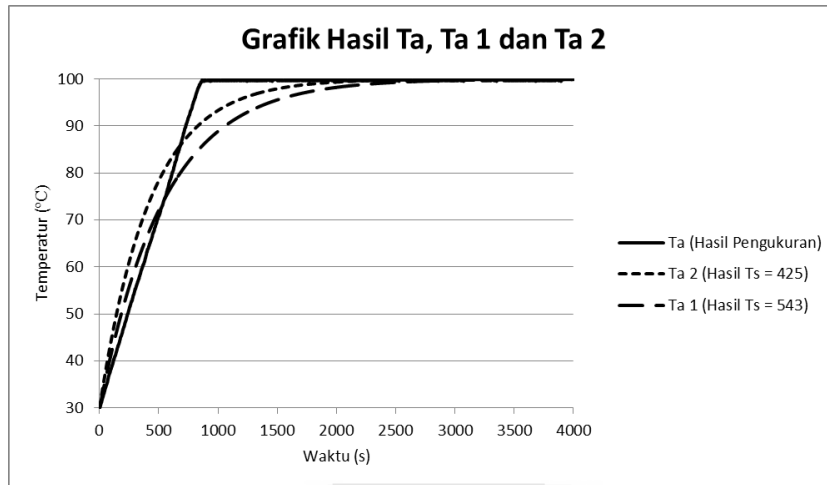
L = *Time delay*

Berikut ini merupakan blok diagram simulasi identifikasi kurva S dengan menggunakan *Simulink* yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Blok Diagram *Simulink* Identifikasi Kurva S

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 3.7 merupakan hasil dari tiga percobaan yang telah dilakukan untuk mendapatkan nilai *error* yang paling sedikit.

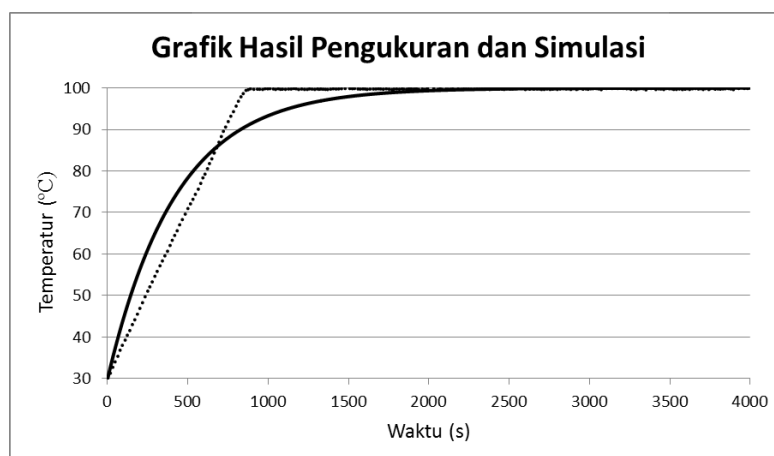


Gambar 3.7 Grafik Perbandingan Hasil Ta, Ta 1 dan Ta 2

Setelah melakukan perbandingan tersebut, maka didapatkan model matematis sistem pemanas air dengan *nilai error* yang paling sedikit. Berikut ini merupakan persamaan model matematis sistem yang dipilih dapat dilihat pada Persamaan (3.2).

$$G(s) = \frac{70}{425s + 1} \quad (3.2)$$

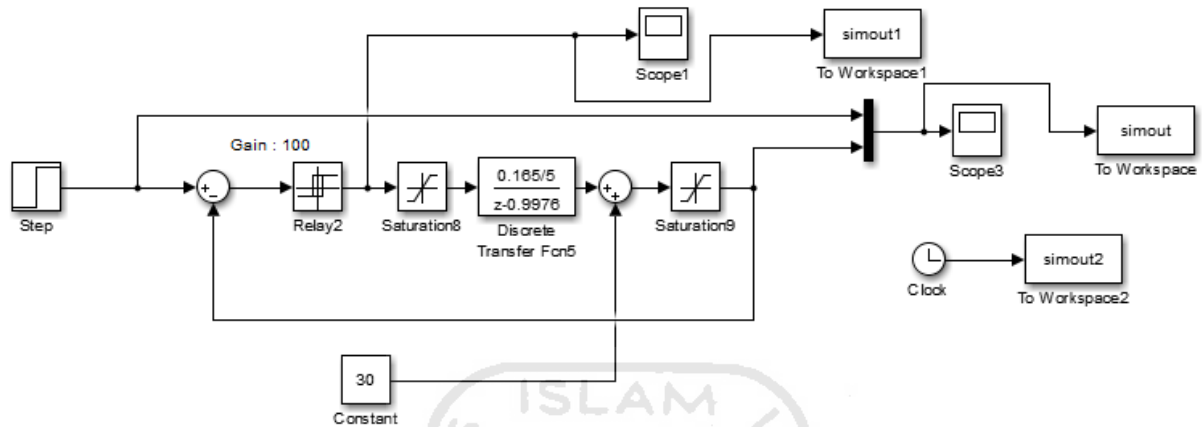
Grafik perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi Persamaan (3.2) dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Grafik Hasil Pengukuran dan Simulasi Temperatur

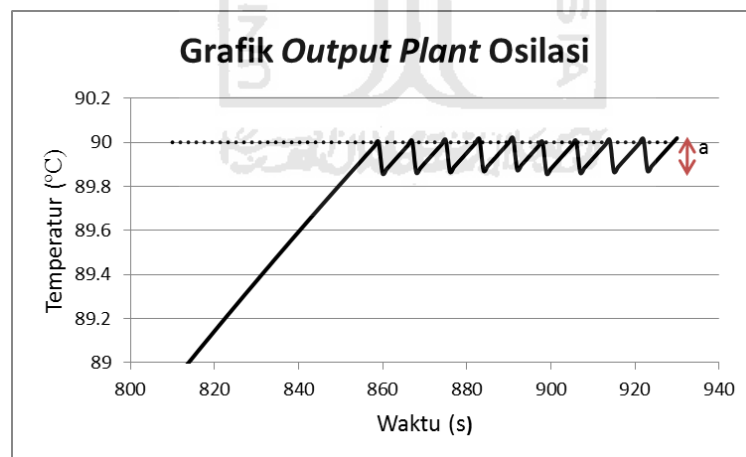
3.3.3 Perancangan Desain Model PID

Perancangan model sistem PID dilakukan dengan pencarian parameter awal PID dengan menggunakan metode gabungan *Relay Feedback* dan formula Ziegler Nichols. 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 seperti Gambar 3.9 untuk melakukan simulasi metode *Relay Feedback*.

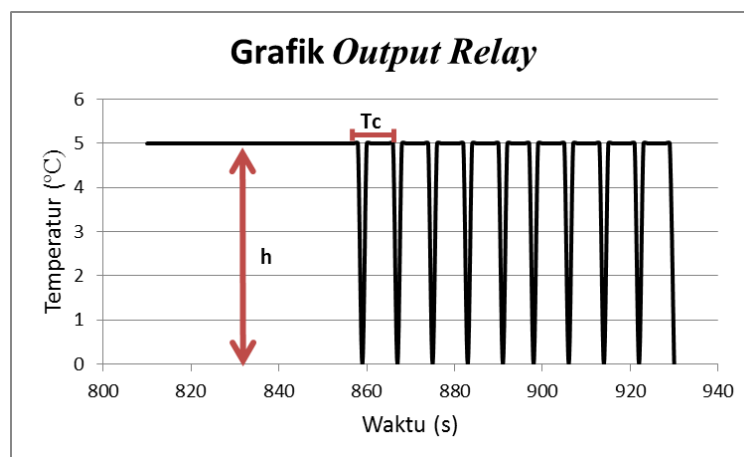


Gambar 3.9 Blok Diagram *Simulink* Metode *Relay Feedback*

Metode *Relay Feedback* digunakan untuk menghasilkan *output* yang berosilasi dengan gelombang amplitudo secara kontinu [16]. Hasil simulasi metode *Relay Feedback* dapat dilihat pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11.



Gambar 3.10 Grafik *Output Plant* Osilasi pada *Relay Feedback*



Gambar 3.11 Grafik *Output Relay Feedback*

Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 menunjukkan hasil *output* dari simulasi sistem metode *Relay Feedback* dengan nilai amplitudo osilasi (a), ketinggian level *relay* (h), dan periode osilasi (T_c). Nilai *output relay* dapat dilihat pada Tabel 3.2 seperti berikut:

Tabel 3.2 *Output Relay Feedback*

a	T_c	h
0,17	8	5

Mengacu pada hasil *output relay* tersebut, maka didapatkan nilai parameter PID dengan menggunakan formula Ziegler Nichols seperti pada Tabel 3.3:

Tabel 3.3 Parameter Kendali PID dan Formula Ziegler Nichols

K_C	K_P	K_i	K_d	T_i	T_d
$\frac{4h}{\pi a}$	$= \frac{K_C}{5}$	$= \frac{(2/5)K_C}{T_c}$	$= \frac{K_C T_c}{15}$	$= \frac{T_c}{2}$	$= \frac{T_c}{3}$
$= 37,47$	$= 7,5$	$= 1,87$	$= 19,98$	$= 4$	$= 2,6$

K_C = *Critical gain*

K_P = *Proportional gain*

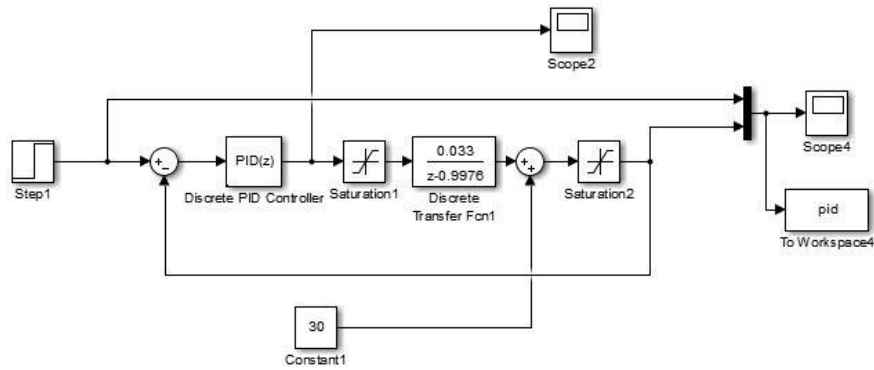
K_i = *Integral gain*

K_d = *Derivative gain*

T_i = Waktu integral

T_d = Waktu derivative

Setelah didapatkan nilai parameter kendali PID, parameter tersebut akan menjadi *input* sistem PID yang akan disimulasikan dengan menggunakan *Simulink* MATLAB. Berikut ini merupakan blok diagram *Simulink* metode kendali PID yang dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Blok Diagram *Simulink* Metode PID

3.3.4 Perancangan Desain Model LQR

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

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0,0337}{s + 0,002403} \quad (3.3)$$

Selanjutnya, bentuk *transfer function* tersebut diubah menjadi bentuk *state space* dengan parameter *state space*:

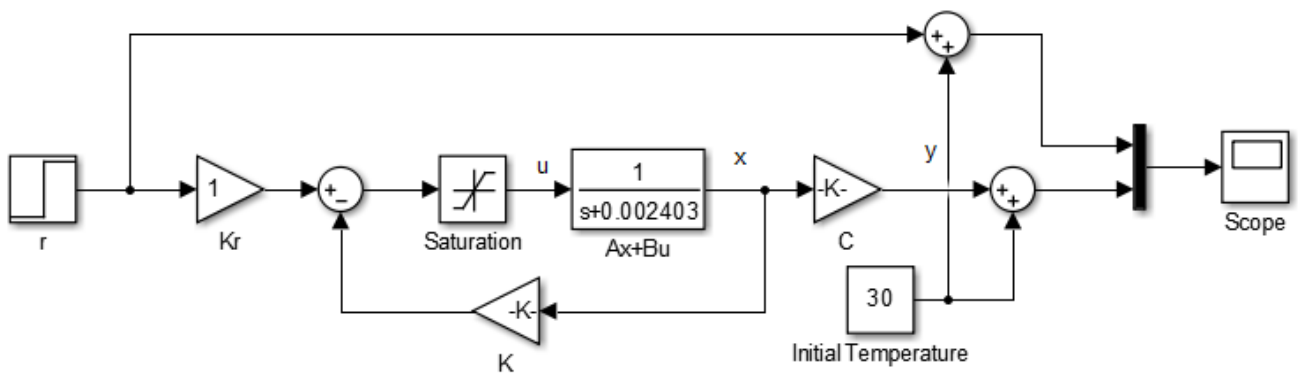
$$A = -0,0024$$

$$B = 1$$

$$C = 0,0337$$

$$D = 0$$

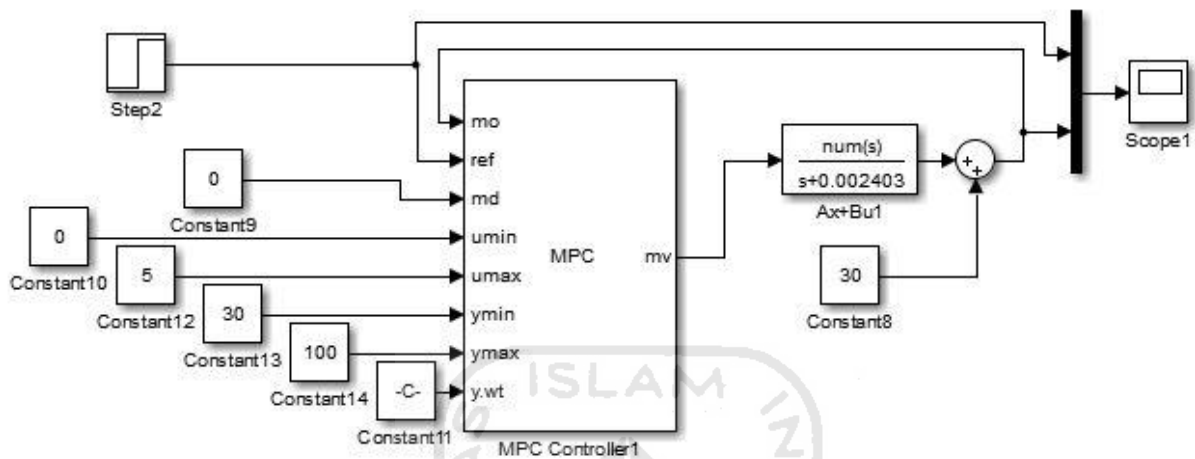
Pada sistem kendali LQR berupa *set point tracker*, *output* (y) akan dibuat agar dapat mengikuti nilai *set point* (r) yang diberikan. Tujuan dari sistem kendali LQR saat ini adalah untuk membuat nilai $y - r = 0$ dimana *output* (y) dari plant sistem merupakan *error* atau selisih antara *output* (y) dengan *set point* (r). Proses selanjutnya dilanjutkan dengan menggunakan blok diagram *Simulink* untuk metode kendali LQR yang dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Blok Diagram *Simulink* Metode LQR

3.3.5 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. Gambar 3.14 menunjukkan blok diagram dari sistem MPC.



Gambar 3.14 Blok Diagram *Simulink* Metode MPC

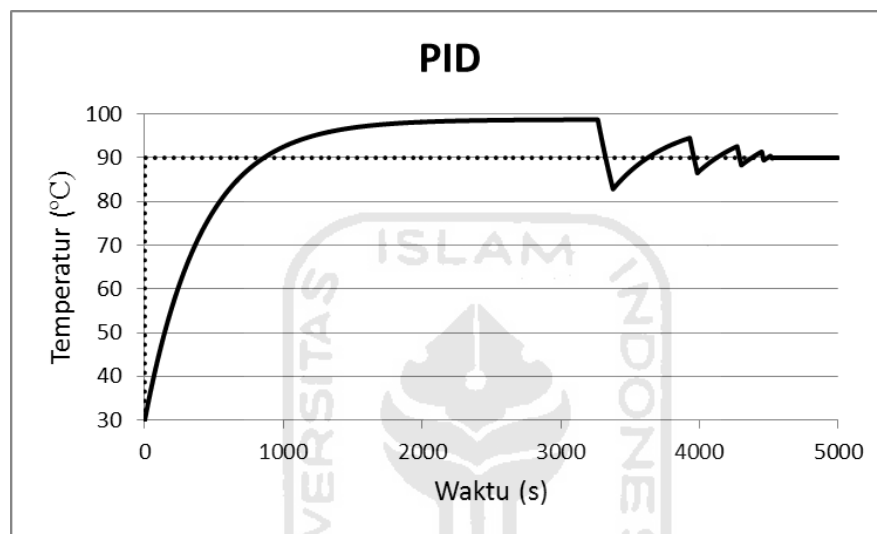
BAB 4

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.

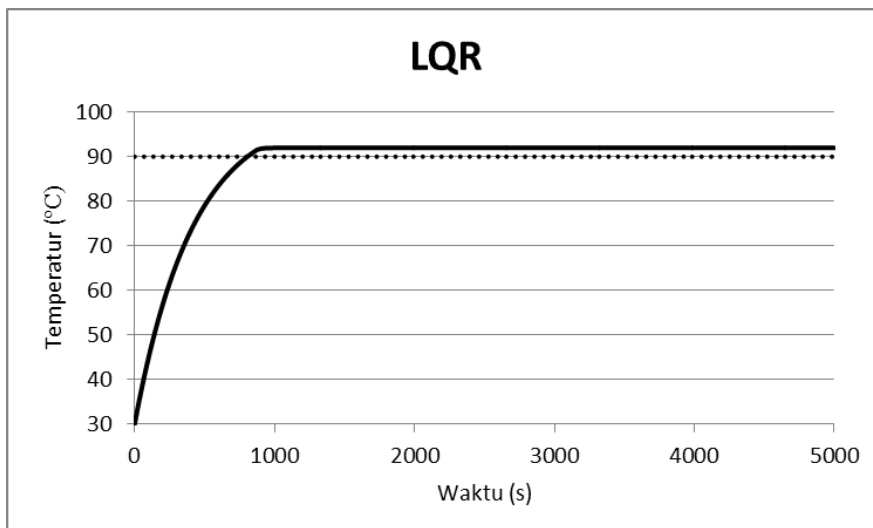
4.1.1 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode PID



Gambar 4.1 Grafik Hasil Simulasi Metode PID

Gambar 4.1 merupakan 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.

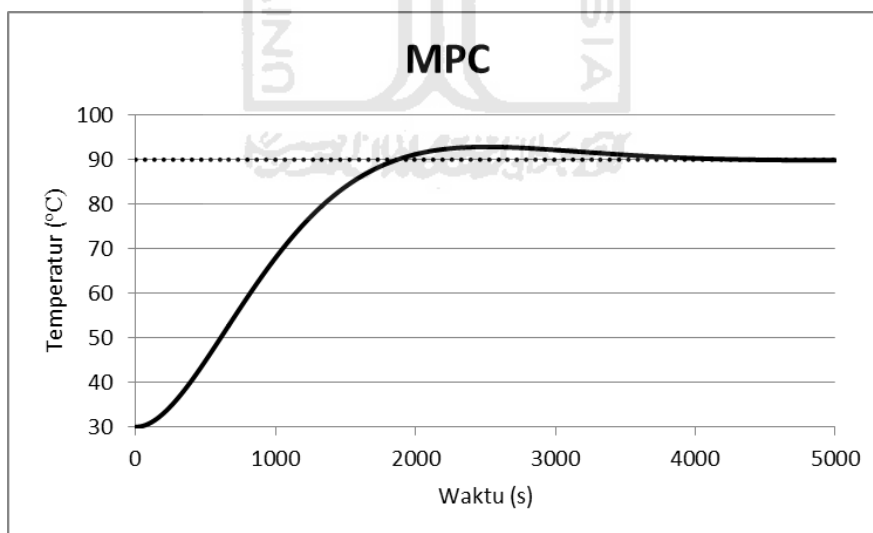
4.1.2 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode LQR



Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Metode LQR

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hasil dari respon simulasi sistem kendali dengan menggunakan metode LQR. Dari Gambar 4.2 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.

4.1.3 Hasil Simulasi Sistem dengan Metode MPC



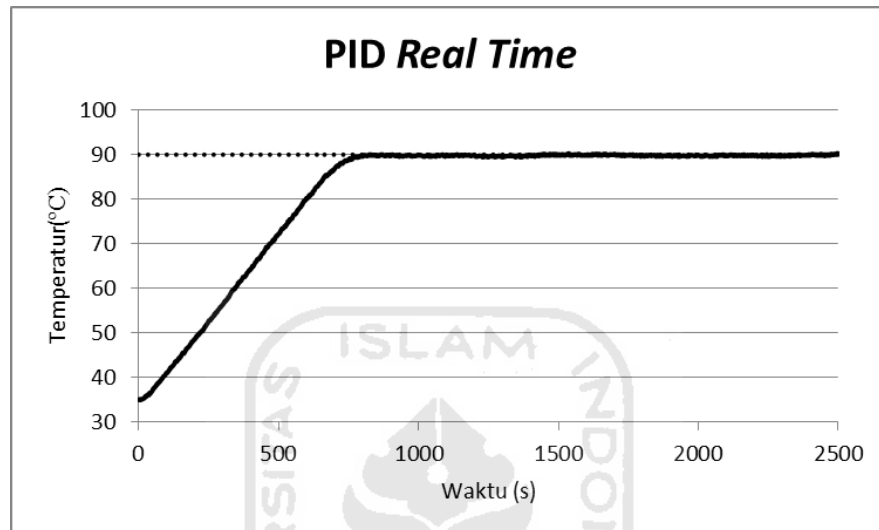
Gambar 4.3 Grafik Hasil Simulasi Metode MPC

Gambar 4.3 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.

4.2 Hasil Pengujian Sistem Secara *Real Time*

Pada bagian 4.2 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.

4.2.1 Hasil Pengujian Sistem *Real Time* Kendali PID



Gambar 4.4 Grafik Respon Sistem Kendali PID *Real Time*

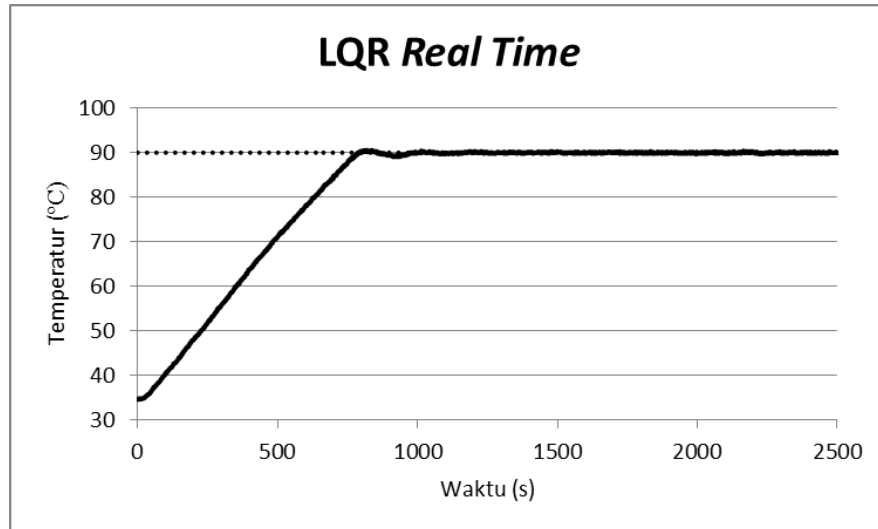
Gambar 4.4 menunjukkan grafik hasil respon *output* sistem kendali PID secara *real time*. Tabel 4.1 menunjukkan hasil parameter yang didapatkan dari grafik pada Gambar 4.4:

Tabel 4.1 Parameter Kinerja Sistem Kendali PID *Real Time*

<i>Settling Time</i> (s)	<i>Rise Time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)	<i>Steady-State Error</i> (°C)
768	624	0,3	-0,16

Dari Tabel 4.1 dapat disimpulkan 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 di atas *set point*.

4.2.2 Hasil Pengujian Sistem *Real Time* Kendali LQR



Gambar 4.5 Grafik Respon Sistem Kendali LQR *Real Time*

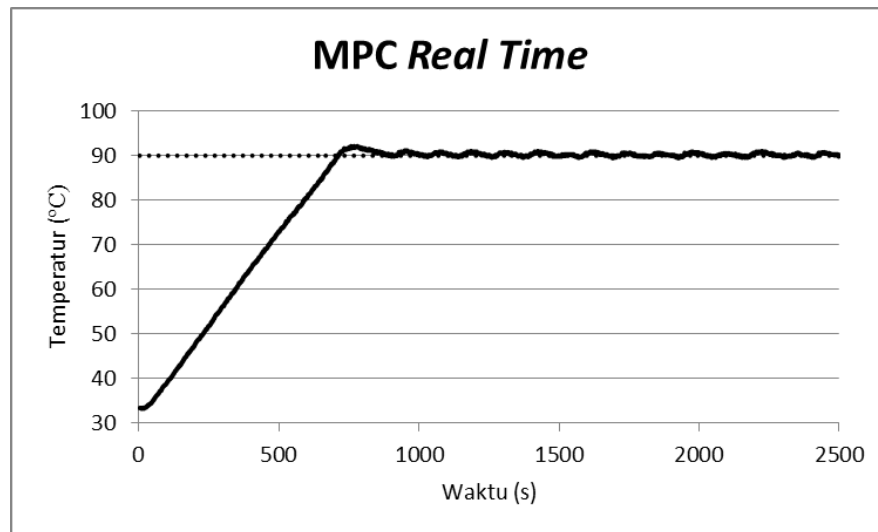
Gambar 4.5 menunjukkan grafik hasil respon *output* sistem kendali LQR secara *real time*. Tabel 4.2 yang menunjukkan hasil parameter yang didapatkan dari grafik pada Gambar 4.5:

Tabel 4.2 Parameter Kinerja Sistem Kendali LQR *Real Time*

<i>Settling Time</i> (s)	<i>Rise Time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)	<i>Steady-State Error</i> (°C)
777	647	0,5	0,006

Dari Tabel 4.2 dapat disimpulkan bahwa dapat dilihat 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.

4.2.3 Hasil Pengujian Sistem *Real Time* Kendali MPC



Gambar 4.6 Grafik Respon Sistem Kendali MPC *Real Time*

Gambar 4.6 menunjukkan grafik hasil respon *output* sistem kendali MPC secara *real time*. Tabel 4.3 menunjukkan hasil parameter yang didapatkan dari grafik pada Gambar 4.6:

Tabel 4.3 Parameter Kinerja Sistem Kendali MPC *Real Time*

<i>Settling Time</i> (s)	<i>Rise Time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)	<i>Steady-State Error</i> (°C)
705	578	2,3	0-1,03 (osilasi)

Dari Tabel 4.3 dapat disimpulkan bahwa dapat dilihat 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 *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 PID dan LQR. Namun begitu, pada sistem kendali MPC ini, respon *output* temperatur yang dihasilkan memiliki *overshoot* dan *steady state error* berupa osilasi yang konstan sehingga dapat memengaruhi kinerja dari sistem yang digunakan.

Setelah dilakukan seluruh proses pengujian sistem secara simulasi maupun *real time*, maka dapat diberi 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*.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Sistem pemanas air pada penelitian ini dapat dikendalikan dengan menggunakan beberapa metode kendali seperti PID, LQR dan MPC untuk mencapai *set point* yang diinginkan dengan kriteria kinerja yang ideal.
2. Sistem kendali yang paling baik adalah sistem kendali yang memiliki kriteria kinerja dengan nilai *settling time* dan *rise time* yang cepat.
3. Hasil pengujian simulasi sistem masih memerlukan adanya *tuning* ulang secara manual agar didapatkan respon *output* sistem yang optimal.
4. Hasil pengujian sistem secara *real time* dapat disimpulkan seperti berikut :
 - a. 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*.
 - b. 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 $0,006^{\circ}\text{C}$.
 - 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.
5. 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*.

5.2 Saran

1. Kinerja kendali sistem pemanas air memerlukan metode identifikasi *plant* yang lebih baik lagi agar didapatkan hasil yang tepat antara pengujian secara simulasi dan eksperimen secara *real time*

2. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menggunakan metode pengendalian lainnya seperti halnya *Fuzzy Logic Controller* (FLC), kombinasi PID dengan FLC atau kombinasi PID dengan LQR, atau metode kendali lainnya.
3. Penelitian ini dapat dikembangkan untuk sistem kendali khususnya pada bagian pengisian air ke dalam botol agar pengisian air dapat terisi secara presisi dengan menggunakan beberapa metode kendali.



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*, 2018, pp. 682–687.
- [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] Z. Jamal, "Implementasi Kendali PID Penalaan Ziegler-Nichols Menggunakan Mikrokontroler," *J. Inform.*, vol. 15, no. 1, pp. 81–88, 2015.
- [8] O. Janrizky, A. Panggabean, and A. R. Firdaus, "Sistem Pengaturan Suhu Air Menggunakan Kendali PID," 2010.
- [9] H. Siregar, "Model Predictive Control (MPC) untuk Sistem Motor DC Berbasis LabVIEW," *Stud. Syst. Decis. Control*, p. 18, 2018.
- [10] E. W. Sinuraya, "Pemodelan dan Simulasi Motor DC dengan Kendali Model Predictive Control (MPC)," *TRANSMISI*, vol. 14, no. 3, pp. 1–6, 2012.
- [11] Seborg et al., "Chapter 20 : Model Predictive Control," in *Process Dynamics and Control*, 2011, pp. 414–438.
- [12] A. Schmidt, M. Dihlmann, and B. Haasdonk, "Basis Generation Approaches for A Reduced Basis Linear Quadratic Regulator," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 1, pp. 713–718, 2015.
- [13] J. Majumdar, S. C Gupta, and B. Prassanna Prasath, "Linear and Non-Linear Control Design of Skid Steer Mobile Robot on an Embedded," *IAES Int. J. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 3, p.

185, 2018.

- [14] K. K. Yit, P. Rajendran, and L. K. Wee, “Proportional Derivative Linear Quadratic Regulator Controller Design for Improved Longitudinal Motion Control of Unmanned Aerial Vehicles,” *Int. J. Micro Air Veh.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–50, 2016.
- [15] 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.
- [16] B. Supriyo, S. B. Kuntardjo, and Sihono, “Alat Peraga Kendali Pemanas Udara Berbasis Arduino Uno Sebagai Penunjang Praktikum Laboratorium Kendali Politeknik Negeri Semarang,” *FaST - J. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 1, 2017.



LAMPIRAN

Lampiran 1: Gambar Alat dari Sudut yang Berbeda

