



Model Predictive Control (MPC) pada Sistem Kendali Suhu ITCLAB dan Pemantauannya Menggunakan Internet of Things (IOT)

Muhammad Habib Arrosyid¹, Basuki Rahmat², Henni Endah Wahanani³

^{1, 2, 3}Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Indonesia

Info Artikel

Riwayat Artikel:Diterima : **04-01-2024**Direvisi : **12-01-2024**Disetujui : **14-01-2024****Kata Kunci:**

*Model Predictive Control,
internet based temperature
control lab,
second order,
arx model*

Keywords:

*information systems,
sale,
fuzzy time series method*

ABSTRAK

Pengendalian suhu merupakan aspek kritis dalam berbagai aplikasi industri, termasuk di dalam laboratorium. Dalam konteks ITCLab, pengendalian suhu yang efisien menjadi suatu keharusan untuk memastikan konsistensi dan kestabilan eksperimen. *Model Predictive Control (MPC)* telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan sistem kendali suhu, namun penerapannya dalam lingkungan laboratorium seringkali terbatas. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan mengimplementasikan MPC pada sistem kendali suhu ITCLab. Desain percobaan melibatkan instalasi sensor suhu yang terhubung ke perangkat IoT untuk pemantauan secara *real-time*. Selain itu, model matematis sistem suhu ITCLab diidentifikasi dan digunakan dalam pengembangan kontrol MPC. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pengendalian suhu antara MPC dan metode kontrol konvensional. Data pemantauan yang diperoleh dari perangkat IoT digunakan untuk mengevaluasi kinerja MPC. Hasil awal menunjukkan bahwa penerapan MPC mampu meningkatkan respons sistem kendali suhu ITCLab, menghasilkan peningkatan signifikan dalam presisi dan waktu stabilisasi. Meskipun demikian, dampak penuh dari integrasi IoT pada pemantauan suhu masih belum sepenuhnya terlihat. Data yang terkumpul akan dianalisis lebih lanjut untuk mengevaluasi kehandalan dan ketersediaan informasi secara *real-time*. Selain itu, potensi peningkatan efisiensi energi dan adaptabilitas sistem kendali suhu terhadap variasi eksperimen akan dijelaskan lebih lanjut dalam presentasi hasil lengkap penelitian ini.

ABSTRACT

Temperature control is a critical aspect in various industrial applications, including laboratory settings. In the context of ITCLab, efficient temperature control is imperative to ensure the consistency and stability of experiments. Model Predictive Control (MPC) has proven effective in optimizing temperature control systems, but its application in laboratory environments is often limited. This research employs an experimental approach by implementing MPC in the temperature control system of ITCLab. The experimental design involves the installation of temperature sensors connected to IoT devices for real-time monitoring. Additionally, the mathematical model of the ITCLab temperature system is identified and utilized in the development of MPC control. Testing is conducted by comparing the temperature control results between MPC and conventional control methods. Monitoring data obtained from IoT devices is used to evaluate the performance of MPC. Preliminary results indicate that the implementation of MPC enhances the response of the ITCLab temperature control system, resulting in a significant improvement in precision and stabilization time. However, the full impact of IoT integration on temperature monitoring is not yet fully evident. The collected data will be further analyzed to assess the reliability and real-time information availability. Furthermore, the potential for improving energy efficiency and the adaptability of the temperature control system to experimental variations will be elaborated upon in the comprehensive presentation of the research findings.

Penulis Korespondensi:

Muhammad Habib Arrosyid,
Informatika,
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur
Email: 190810100034@student.upnjatim.ac.id



PENDAHULUAN

Model Predictive Control (MPC) merupakan metode kendali dalam sistem kendali yang bertujuan menghasilkan tindakan kontrol optimal dengan meramalkan perilaku sistem berdasarkan model matematis. Teknik ini memanfaatkan model matematika yang menggambarkan respons sistem untuk meramalkan masa depan, dan kemudian memilih tindakan kontrol yang optimal guna mencapai tujuan yang diinginkan. MPC diterapkan secara luas dalam industri sebagai metode kendali lanjutan untuk meningkatkan kinerja proses [1].

iTCLab merupakan laboratorium yang menyediakan lingkungan eksperimental untuk pengembangan dan pengujian sistem kendali suhu. Peningkatan kompleksitas sistem modern menuntut pendekatan kontrol yang lebih canggih, seperti MPC, yang mampu memprediksi perilaku sistem dan mengoptimalkan kontrolnya. Dengan mengintegrasikan teknologi IoT, kita dapat meningkatkan pemantauan jarak jauh dan merespons perubahan suhu secara *real-time*. Kontroler umpan balik Proporsional-Integral-Derivative (PID) adalah kontroler yang paling banyak digunakan dalam industri. Baru-baru ini, desain kontroler PID molekuler telah diidentifikasi sebagai tujuan penting untuk biologi sintetis dan bidang siber genetika [2]. Sistem kontrol suhu iTCLab merupakan sistem yang digunakan untuk mengatur suhu dalam suatu ruangan atau lingkungan tertentu. Komponen utama sistem ini melibatkan sensor suhu, aktuator pemanas atau pendingin, serta kontroler. Tujuan utama dari sistem kontrol suhu ini adalah untuk mempertahankan suhu dalam batas yang diinginkan dengan mengelola tindakan kontrol pada aktuator. Dalam konteks penerapan Internet of Things (IoT), sistem kontrol suhu iTCLab dapat terhubung ke jaringan internet, memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh. Kemudian pada sistem pemantauan, sistem ini dapat berupa server local atau cloud yang dapat mengakses data suhu secara *real-time*. Data suhu yang diterima dapat digunakan untuk visualisasi, analisis, dan pengaturan kontrol suhu [3].

Konektivitas keseluruhan perangkat di dunia dapat diwujudkan melalui Internet of Things atau disebut sebagai IoT. IoT itu sendiri merujuk pada perangkat yang memiliki bentuk fisik dan karakter secara virtual, menggunakan antarmuka pintar, dan terintegrasi dalam jaringan informasi dan telekomunikasi [4]. Dengan memanfaatkan Internet of Things (IoT), Internet of Thing atau IoT adalah arsitektur terdiri dari hardware khusus, sistem software, Web API, protocol yang bersama membuat lingkungan yang mulus dimana divais embedded pintar dapat terkoneksi ke internet semisal data sensor dapat diakses dan sistem control dapat digerakkan melalui internet [5]. Pengguna memiliki kemampuan untuk memonitor kondisi suhu secara *real-time*, mengubah nilai setpoint suhu, dan bahkan mengontrol sistem kendali secara remote. Penerapan *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem kendali suhu iTCLab dengan dukungan IoT membawa beberapa keuntungan.

Dalam mencapai tujuan penelitian, kita akan mengembangkan model matematis yang akurat untuk sistem kendali suhu iTCLab. MPC akan diimplementasikan sebagai metode kontrol utama untuk meningkatkan respons sistem terhadap perubahan suhu yang dinamis. Selanjutnya, perangkat IoT akan diterapkan untuk mengumpulkan data suhu secara *real-time*, mengirimkannya ke platform cloud, dan memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengontrol sistem melalui antarmuka web atau aplikasi mobile. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kendali suhu, sambil memanfaatkan potensi penuh dari teknologi MPC dan IoT. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai landasan untuk pengembangan sistem kendali suhu yang lebih canggih dan terintegrasi di berbagai aplikasi.

METODE PENELITIAN

1.1 *Model Predictive Control* (MPC)

Formulasi implisit, fleksibilitas, dan penggunaan eksplisit dari model adalah keunggulan utama MPC dan alasan bagi kami untuk mempromosikan MPC di komunitas rekayasa. Makalah ini akan memberikan ringkasan dari sudut pandang aplikasi, namun tidak akan mengklaim bahwa MPC merupakan pilihan optimal di atas semua algoritma kontrol dalam setiap masalah tertentu [6]. *Model Predictive Control* (MPC) adalah metode pengendalian yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja suatu sistem dengan meramalkan respons sistem dalam jangka waktu tertentu ke depan. MPC memanfaatkan model matematika yang menggambarkan perilaku sistem yang sedang dikendalikan. Model tersebut harus akurat dan memadai untuk memproyeksikan respons sistem di masa depan. Model dapat berupa model fisik yang didasarkan pada prinsip-prinsip fisika yang mengatur sistem atau model yang diperoleh melalui pendekatan empiris seperti identifikasi sistem. *Model*

Predictive Control (MPC) beroperasi sebagai teknik pengendalian dengan interval waktu diskrit, menggunakan model proses dari suatu sistem. Tujuannya adalah memprediksi perilaku proses di masa depan untuk mencapai tindakan kendali lup tertutup yang optimal, dengan meminimalkan fungsi objektif dalam suatu horizon waktu yang terbatas dan batasan tertentu. Perhitungan MPC menghasilkan nilai yang digunakan sebagai solusi masalah optimasi *real-time*.

Model Predictive Control (MPC) adalah salah satu jenis algoritma kontrol yang digunakan untuk mengontrol sistem dengan dinamika. Kontroler MPC merupakan kontroler berbasis model. Artinya, diperlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kontroler yang telah didesain dapat bekerja secara optimal [7].

1.2 Persamaan Second Order

Persamaan diferensial orde kedua adalah representasi umum dari persamaan diferensial yang melibatkan turunan kedua suatu fungsi terhadap variabel independen [8]. Tujuan dari makalah ulasan ini adalah untuk menunjukkan caranya memperoleh dan cara menggunakan urutan kedua secara efisien informasi dalam asimilasi data [9]. Persamaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk umum pada Persamaan 1.

$$a \frac{d^2y}{dx^2} + b \frac{dy}{dx} + cy = F(x) \quad (1)$$

Dalam konteks ini, y mewakili fungsi yang sedang dicari, x adalah variabel independen, dan a , b , dan c adalah konstanta (dengan $a \neq 0$). Persamaan ini dapat diklasifikasikan sebagai persamaan diferensial linear orde kedua homogen ketika $F(x)=0$, atau sebagai persamaan diferensial linear orde kedua non-homogen jika $F(x) \neq 0$. Berikut adalah penjelasan mengenai komponen-komponennya:

1. $a \frac{d^2y}{dx^2}$: Ini merupakan istilah yang menyatakan turunan kedua dari fungsi y terhadap variabel x , dikalikan dengan konstanta a .
2. $b \frac{dy}{dx}$: Ini adalah suku yang menggambarkan turunan pertama dari y terhadap x , kali konstanta b .
3. cy : Ini adalah suku yang terdiri dari y sendiri, dikalikan dengan konstanta c .
4. $F(x)$: Ini adalah fungsi yang tergantung pada x (hanya muncul pada persamaan non-homogen). Ini mewakili suku non-homogen yang dapat bervariasi sesuai dengan masalah spesifik yang dihadapi.

Sifat dan solusi dari persamaan ini bergantung pada karakteristik akar-akar persamaan karakteristik yang dihasilkan dari menggantikan y dengan e^{rx} (dengan r adalah konstanta kompleks atau riil). Solusi umum persamaan ini dapat ditemukan menggunakan metode-metode berikut:

- Metode Faktorisasi: Solusi dapat dicari dengan mencari faktorisasi dari persamaan.
- Metode Karakteristik: Dengan mengasumsikan solusi dalam bentuk $y = e^{rx}$, kita dapat menemukan akar karakteristik dan membangun solusi umum.
- Metode Coefficients Konstanta: Solusi umum dapat ditemukan dengan mencari koefisien konstanta dari solusi patikular dan solusi umum homogen.
- Metode Laplace: Metode ini melibatkan transformasi Laplace untuk menyelesaikan persamaan diferensial orde kedua.

Solusi dari persamaan diferensial orde kedua ini dapat mencakup kombinasi linier dan solusi homogen (yang diperoleh tanpa mempertimbangkan $F(x)$) dan solusi particular (yang muncul karena $F(x)$). Solusi ini memerlukan penentuan konstanta-konstanta yang sesuai dengan syarat batas atau syarat awal yang diberikan pada masalah spesifik.

1.3 Implementasi iTCLab

iTCLab dirancang sebagai perangkat khusus untuk simulasi dan eksperimen dalam pengendalian suhu, dengan ruang insulasi yang menjaga suhu terisolasi dari lingkungan eksternal. Materi isolasi termal yang efektif digunakan dalam ruang insulasi untuk mengurangi perubahan suhu akibat kondisi lingkungan. Perangkat ini dilengkapi dengan elemen pemanas sebagai sumber panas untuk meningkatkan suhu di dalam ruang insulasi dan memberikan kontrol terhadap suhu yang diinginkan. Sensor suhu, seperti termokopel atau termistor, digunakan untuk mengukur suhu aktual di dalam ruang insulasi, memberikan nilai suhu yang akurat. iTCLab menggunakan kontroler, berupa mikrokontroler atau komputer dengan algoritma kontrol seperti MPC, sebagai otak sistem pengendalian suhu. Kontroler membaca data suhu dari sensor dan menghasilkan sinyal kendali

untuk mengatur elemen pemanas dan pendingin, mencapai suhu yang diinginkan. Plant yang digunakan untuk pengujian adalah yang Berbasis internet Kit Lab Kontrol Suhu (iTCLab) [10].

Dalam penelitian yang disebutkan, MPC digunakan untuk mengontrol iTCLab dengan memanfaatkan model matematis dan data suhu yang diukur oleh sensor. MPC membuat prediksi dan menghasilkan sinyal kendali optimal berdasarkan informasi ini. Melalui integrasi IoT, data suhu iTCLab dapat dikirim ke platform atau cloud melalui koneksi internet, memungkinkan pemantauan suhu secara *real-time*, analisis data, dan pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengendalian suhu iTCLab.

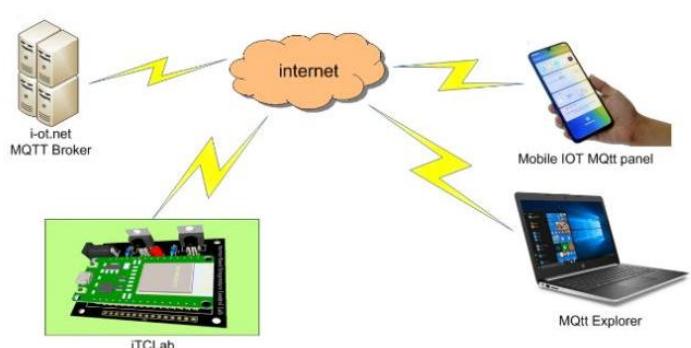
Dengan menggabungkan iTCLab sebagai sistem kendali suhu yang fleksibel, MPC sebagai metode kontrol canggih, dan pemanfaatan IoT untuk pemantauan dan analisis data, penelitian tersebut bertujuan mengembangkan solusi kendali suhu yang efektif dan efisien untuk iTCLab.

HASIL DAN ANALISIS

1.4 Hasil Hasil Pemantauan Sistem Kendali Suhu iTCLab Monitor Menggunakan Internet Of Things (IoT)

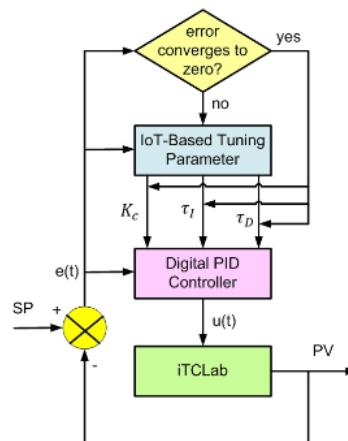
1. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem Internet of Things (IoT) merujuk pada struktur keseluruhan yang mendukung koneksi, pengumpulan, pengolahan data, serta interaksi antara perangkat dan aplikasi dalam ekosistem Internet of Things (IoT).



Gambar 1. Arsitektur Sistem

Pada Gambar 1 menunjukkan diagram alur komunikasi dalam sistem Internet of Things (IoT). Ada empat elemen utama yang terhubung melalui internet, digambarkan oleh awan dengan label "internet". Elemen-elemen tersebut adalah server MQTT Broker dengan label "i-ot.net", papan sirkuit bertuliskan "iTCLab", sebuah smartphone yang menampilkan "Mobile IOT Mqtt panel", dan laptop dengan aplikasi "MQTT Explorer" terbuka. Panah berwarna kuning mengindikasikan arah aliran data atau koneksi antara elemen-elemen tersebut melalui internet. Pada Gambar 1 menunjukkan bagaimana Internet of Things (IoT) memungkinkan perangkat-perangkat yang berbeda untuk saling berkomunikasi dan berbagai informasi melalui protokol MQTT.



Gambar 2. Diagram Blok Metode Pengendalian

2. Metode Pengendalian

Pada Gambar 2 menunjukkan diagram blok dari sistem kontrol digital yang diintegrasikan dengan parameter penyetelan berbasis Internet of Things (IoT). Diagram ini menggambarkan bagaimana eror yang dihitung dari perbedaan antara set point (SP) dan variabel proses (PV), diproses oleh kontroler PID digital untuk menghasilkan sinyal kontrol $u(t)$. Parameter penyetelan K_c , τ_I , dan τ_D disesuaikan oleh parameter penyetelan berbasis Internet of Things (IoT) jika error tidak konvergen ke nol. Sistem ini digunakan dalam konteks laboratorium iTCLab.

3. Perangkat yang diperlukan

Implementasi Internet of Things (IoT) melibatkan berbagai jenis perangkat yang bekerja bersama untuk mengumpulkan, mentransmisikan, dan mengolah data. Kombinasi perangkat-perangkat ini membentuk ekosistem Internet of Things (IoT) yang memungkinkan solusi yang cerdas dan terhubung untuk berbagai aplikasi berupa mobile, web, atau antarmuka berbasis perangkat keras.



Gambar 3 Perangkat yang dibutuhkan

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa gambar tersebut menampilkan informasi dalam bentuk daftar tentang apa yang dibutuhkan suatu aplikasi atau proyek. Pada gambar 4.28 menggambarkan bagaimana menggunakan Internet of Things (IoT) MQTT Panel di HP Android, hivemq.com sebagai cloud Internet of Things (IoT), dan Kit iTCLab sebagai perangkat Internet of Things (IoT).

4. Hasil Monitoring dan Kontrol Suhu via Internet of Things (IoT)

Pada Gambar 4 menampilkan sebuah jendela program pada komputer yang menunjukkan kode pemrograman dan beberapa parameter. Kode dan parameter tersebut berkaitan dengan pengaturan kontrol otomatis atau sistem pengukuran. Ada beberapa baris teks yang mencantumkan nilai seperti "SetPoint yaitu 35.00", "Nilai_Kc yaitu 100", "Nilai_tauI yaitu 50.00", dan "Nilai_tauD yaitu 1.00".

Gambar 4 menunjukkan jendela terminal atau konsol komputasi yang menampilkan output dari program IoT. Outputnya mencantumkan parameter dan hasil perhitungan. Beberapa parameter yang ditunjukkan termasuk SetPoint: 35.00, Nilai_Kc: 10.00, Nilai_tauI: 50.00, Nilai_tauD: 1.00, dan hasil perhitungan sp=35.00, pv=35.06, dt=1.00, op=8.60, P=-0.62, I=11.16, D=-1.93. Terdapat juga dua baris yang sama yang menunjukkan set point, nilai Kc, nilai tauI, nilai tauD, dan hasil perhitungan sp=35.00, pv=35.16, dt=1.00, op=8.57, P=-1.59, I=11.13, D=-0.97.

```

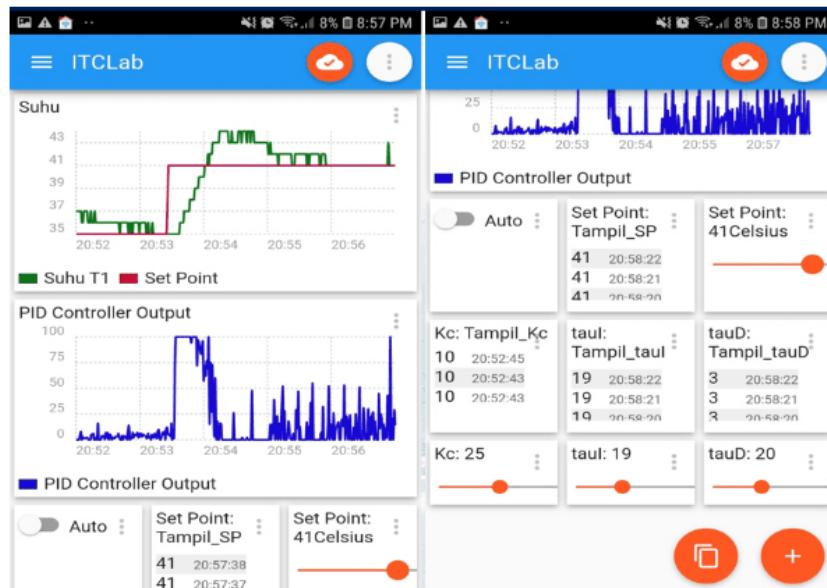
SetPoint: 35.00
Nilai_Kc: 10.00
Nilai_tauI: 50.00
Nilai_tauD: 1.00
<----->
sp=35.00 pv=35.06 dt=1.00 op=8.60 P=-0.62 I=11.16 D=-1.93
<----->
autoSet: 1
SetPoint: 35.00
Nilai_Kc: 10.00
Nilai_tauI: 50.00
Nilai_tauD: 1.00
<----->
sp=35.00 pv=35.16 dt=1.00 op=8.57 P=-1.59 I=11.13 D=-0.97

```

Gambar 4. Hasil Monitoring Kontrol Via IoT

5. Hasil Broker MQTT

Dengan aplikasi ini, pengguna dapat melihat grafik yang menggambarkan suhu aktual dan suhu yang diinginkan serta nilai output yang mengirim sinyal ke perangkat pemanas atau pendingin. Pengguna juga dapat melihat parameter seperti K_c , τ_{aul} , dan τ_{uD} yang menentukan kinerja kontroler. Aplikasi ini memiliki mode otomatis yang memungkinkan pengguna untuk menetapkan suhu target atau setpoint.



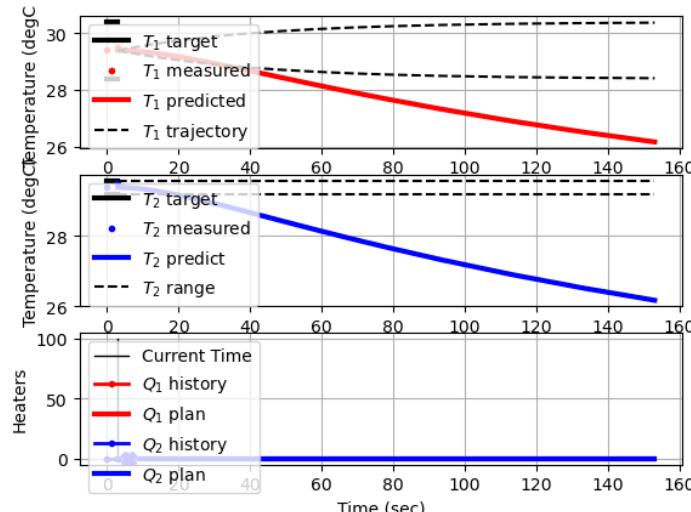
Gambar 5. Hasil Broker MQTT

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa menunjukkan dua gambar hasil dari aplikasi mobile iTCLab yang digunakan untuk memantau dan mengontrol suhu. Pada hasil gambar dari aplikasi mobile terdapat grafik suhu yang menunjukkan perubahan suhu seiring waktu serta output kontroler PID dalam bentuk grafik batang. Terdapat informasi tentang set point suhu yang ditetapkan 41°C. Kemudian pada grafik output kontroler PID menunjukkan hasil lebih detail serta parameter seperti K_c , τ_{aul} , dan τ_{uD} .

1.5 Hasil Implementasi MPC dengan Persamaan Second Order

1. Hasil awal MPC dengan Persamaan Second Order sebelum mencapai Setpoint

Sebelum mencapai nilai setpoint, MPC akan memanfaatkan persamaan Orde Kedua untuk meramalkan respons sistem terhadap tindakan kontrol yang akan dilakukan. Pada tahap awal ini, MPC menggunakan persamaan Orde Kedua untuk memproyeksikan estimasi respons sistem di waktu mendatang berdasarkan kondisi saat ini.

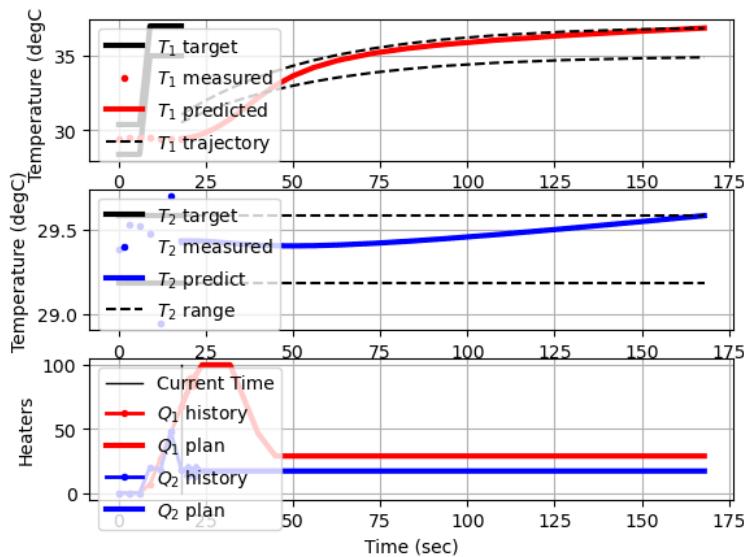


Gambar 6. Hasil Awal MPC sebelum mencapai Nilai Setpoint

Pada Gambar 6 menunjukkan bahwa respon aktual sistem diamati dan digunakan untuk memperbarui model persamaan Second Order atau kondisi awal MPC pada iterasi berikutnya.

2. Hasil MPC terhadap Respon Sistem

Hasil ini dapat diartikan dan diselidiki untuk menilai kinerja kontroler. Ketika menerapkan model Orde Kedua pada sistem pengendalian suhu iTCLab, hasil implementasi akan mencakup respons suhu yang berasal dari kontroler *Model Predictive Control* (MPC).

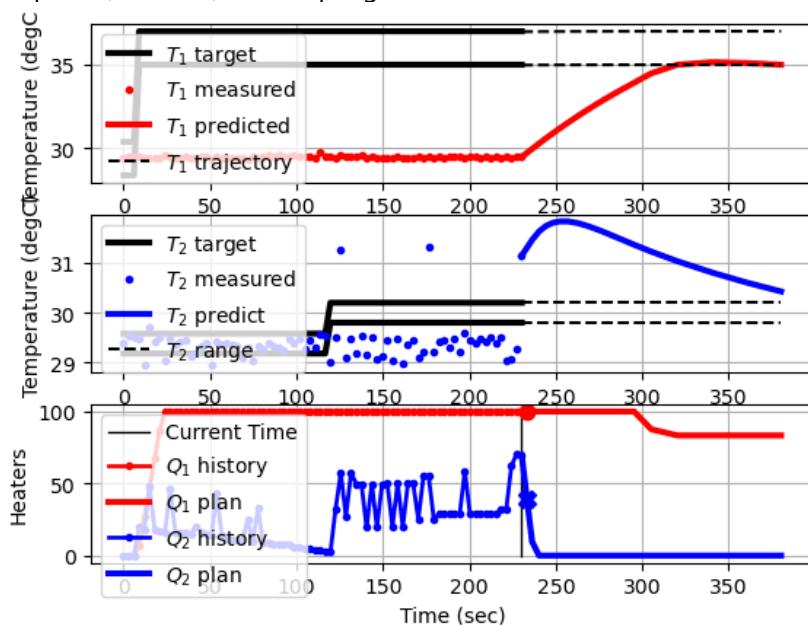


Gambar 7. Grafik Persamaan Orde Kedua pada Sistem Kendali Suhu iTCLab

Gambar 7. menggambarkan output dari persamaan Orde Kedua dalam sistem pengendalian suhu iTCLab, di mana suhu telah mencapai nilai target, yaitu setpoint yang diinginkan, bersama dengan prediksi suhu untuk periode mendatang.

3. Hasil MPC pada Respon Suhu terhadap Perubahan Kontrol

Implementasi yang berhasil akan menunjukkan bagaimana sistem merespons terhadap perubahan input kontrol dari MPC. Pada grafik atau plot waktu, kita dapat mengamati bagaimana suhu sistem mencapai nilai setpoint (referensi) setelah pengaktifan kontroler.

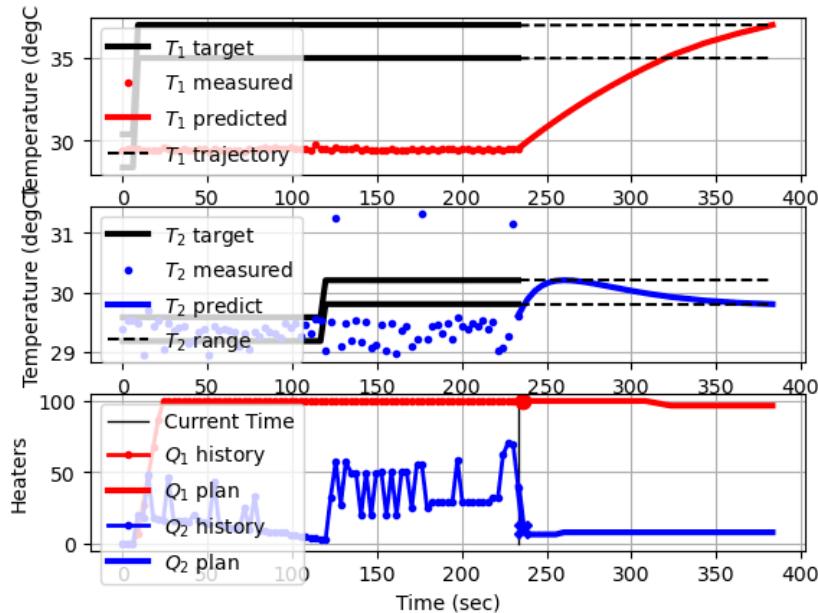


Gambar 8. Respon MPC terhadap Perubahan Kontrol dalam Sistem Kendali Suhu

Gambar 8 memperlihatkan diagram respons suhu terhadap perubahan kontrol. Di dalamnya, terlihat bahwa terjadi perubahan pada suhu setpoint, yang kemudian diikuti oleh nilai lintasan (trajectory).

4. Time-to-Steady-State

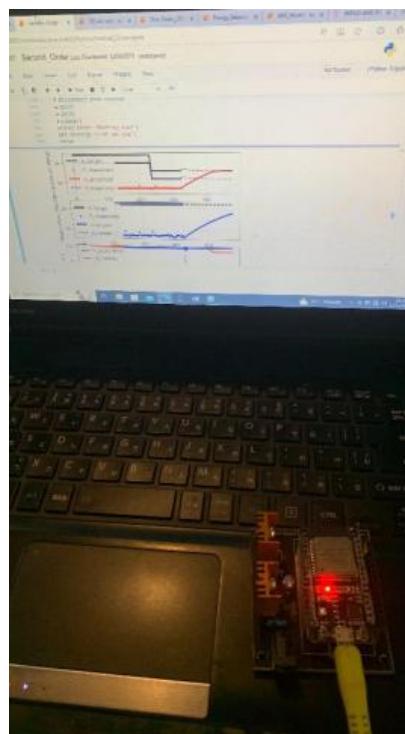
Waktu mencapai keadaan stabil setelah perubahan kontrol diukur dengan Time-to-Steady-State. Dengan *Model Predictive Control* yang efektif, waktu menuju keadaan stabil dapat dipercepat.



Gambar 9. Hasil MPC terhadap Kondisi Time-to-Steady-State

Gambar 9. menunjukkan bahwa nilai kondisi steady state tetap stabil setelah terjadi perubahan kontrol. Kondisi steady state dalam sistem pengendalian suhu iTCLab tercapai saat suhu sistem mencapai nilai setpoint atau referensi yang telah ditetapkan.

5. Hasil Eksperimen Kit iTCLab dengan Persamaan Second Order



Gambar 10 Hasil Eksperimen Menggunakan Kit iTCLab

Pada gambar 3.10 menunjukkan bahwa eksperimen menggunakan bahasa pemrograman python dan Kit iTCLab

KESIMPULAN

Paper ini memberikan informasi terperinci mengenai penerapan, *Model Predictive Control*, pemodelan nonlinier, dan optimisasi dinamis. Contoh-contoh yang disajikan menghubungkan langkah-langkah umum yang umumnya digunakan dalam aplikasi MPC linear dengan prosedur yang sebanding untuk aplikasi

nonlinier. Sebagai dasar untuk menggunakan model dinamis, proses mengubah persamaan diferensial menjadi kumpulan persamaan aljabar diperiksa kembali. Langkah konversi ini diperlukan agar dapat menyelesaikan model dan fungsi tujuan secara bersamaan. Topik yang dibahas dalam paper ini adalah *Model Predictive Control* pada system kendali suhu iTCLab. Sebagai langkah awal, beberapa parameter model disesuaikan dengan persamaan orde kedua dan model ARX. Selanjutnya, pengendali diatur agar memberikan respons pengendalian yang diinginkan untuk pelacakan set point.

REFERENSI

- [1] D. Avian Maulana, "Zeta-Math Journal Penerapan *Model Predictive Control* (MPC) pada Desain Pengendalian Robot Mobil Beroda Empat," *Zeta-Math Journal*, vol. 3, pp. 46–51, 2017.
- [2] M. Filo, S. Kumar, and M. Khammash, "A hierarchy of biomolecular proportional-integral-derivative feedback controllers for robust perfect adaptation and dynamic performance," *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-29640-7.
- [3] A. Yusuf, L. Andraini, and T. Komputer, "Implementasi Internet of Things Pada Ruangan Pengering Berbasis Web," 2022.
- [4] R. Munadi, S. Sumaryo, and D. Perdana, "Design and Implementation of a New Monitoring System for Electrical Energy Consumption with Smart Metering Based on Intenet of Things (IoT)," *International journal of simulation: systems, science & technology*, Apr. 2019, doi: 10.5013/ijssst.a.20.02.11.
- [5] "sainsjm,+Journal+manager,+SMARTICS_Journal_Vol1_No1_Oktober_2015_p20-23".
- [6] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on *Model Predictive Control*: an engineering perspective," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 5–6. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 1327–1349, Nov. 01, 2021. doi: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- [7] F. Arifin, "9935-34479-1-PB," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. 4, pp. 41–47, 2015.
- [8] R. Anil, V. Gupta, T. Koren, K. Regan, and Y. Singer, "Second Order Optimization Made Practical," 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/339445280>
- [9] F.-X. Le Dimet, I. M. Navon, and D. N. Daescu, "Second-Order Information in Data Assimilation*," 2002.
- [10] B. Rahmat *et al.*, "iTCLab Temperature Monitoring and Control System Based on PID and Internet of Things (IoT)," 2023, pp. 199–210. doi: 10.4018/978-1-6684-5629-3.ch012.