



Implementasi Kontrol MPC pada Suhu dan Kelembaban Ruangan *Living Wall* Menggunakan Sistem HVAC

Ifan Azriel Eka Sasmita¹, Muhammad Rifa'i², Fitri³

^{1,2,3}Teknik Elektronika, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

¹ivanazriel25@gmail.com*, ²muh.rifai@polinema.ac.id, ³fitri@polinema.ac.id

Abstract

In this rapid development of time, the infrastructure in the industrial, office, and hotel sectors is becoming more crowded. This triggers the pollution of the Earth's air due to contamination. The Living Wall is one way to reduce the scarcity of Green Open Space (RTH) as the Living Wall does not require horizontal land for planting media but utilizes vertical space. However, the Living Wall needs to control its temperature and humidity as required. Therefore, a system is designed to regulate the temperature and humidity in the Living Wall room using the HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) system with the Model Predictive Control (MPC) method, and LabVIEW serves as the interface. In this study, the MPC parameters are determined with the values of Prediction Horizon (Np) = 150 and Control Horizon (Nc) = 85. The resulting system response has a steady-state value of 83 seconds, a steady-state error of 0.005, an overshoot of 28.92, and a rise time of 48.62 seconds.

Keywords: *Living Wall*, Ruang Terbuka Hijau, HVAC, *Model Predictive Control*, LabVIEW

Abstrak

Dalam perkembangan zaman yang pesat ini, infrastruktur pada bidang industri, perkantoran, dan perhotelan semakin ramai. Hal ini memicu udara di bumi tercemar oleh polusi. *Living Wall* merupakan salah satu cara untuk mengurangi minimnya Ruang Terbuka Hijau (RTH) karena *Living Wall* tidak membutuhkan lahan horizontal untuk tempat media tanam melainkan pada lahan vertikal. Namun, *Living Wall* perlu dikontrol suhu dan kelembabannya sesuai yang dibutuhkan. Oleh karena itu, dirancang *plant* untuk mengatur suhu dan kelembaban pada ruangan *Living Wall* menggunakan sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) dengan metode kontrol *Model Predictive Control* (MPC) dan LabVIEW sebagai *interface*. Pada penelitian ini, didapatkan parameter MPC dengan nilai *Prediction Horizon* (Np) = 150 dan *Control Horizon* (Nc) = 85. Respon sistem yang dihasilkan memiliki nilai *steady state* sebesar 83 detik, *error steady state* sebesar 0,005, *overshoot* sebesar 28,92 dan *rise time* sebesar 48,62 detik.

Kata kunci: *Living Wall*, Ruang Terbuka Hijau, HVAC, *Model Predictive Control*, LabVIEW

Diterima Redaksi : 23-05-2023 | Selesai Revisi : 25-06-2023 | Diterbitkan Online : 30-06-2023

1. Pendahuluan

Pencemaran udara menjadi masalah yang serius seiring bertambahnya waktu. Perkembangan yang cepat menjadi salah satu faktor utama penyebab pencemaran udara. Pencemaran udara juga tak luput dari banyaknya pembangunan seperti gedung-gedung bertingkat, perkantoran, dan sektor industri. Dari survey yang dilakukan oleh *United Nations*, gedung-gedung bertingkat menjadi sektor yang menyumbang gas karbondioksida paling besar [1]. Umumnya beberapa gedung besar berada pada pusat kota sehingga terdapat perbedaan suhu dengan pinggiran kota yang disebut dengan *Urban Heat Island* (UHI) [2].

Salah satu langkah untuk mengurangi polusi udara adalah dengan membuat *vertical garden*. *Vertical garden* sering dikenal dengan *green wall* atau *living wall*. *Living wall* adalah sistem penanaman tumbuhan yang menggunakan dinding dan media tanam yang posisinya tegak atau vertikal [3]. Pengaplikasian *living wall* membuat media tanam menjadi lebih besar sehingga tanaman yang dapat ditanam menjadi lebih banyak bahkan sampai berkali-kali lipat. Salah satu dampak positif dari pengaplikasian *living wall* adalah dapat menurunkan suhu ruangan sampai dengan 7°C [4]. Tapi, permasalahan yang muncul saat ini adalah penggunaan *living wall* khususnya dalam ruangan masih bersifat konvensional. Akibatnya, kualitas suhu dan kelembaban udara dalam

ruangan sulit untuk menjadi lebih baik sehingga diperlukan pengkondisian suhu dan kelembaban ruangan agar pengaplikasian sistem *living wall* menjadi lebih efektif. Seperti halnya tanaman *living wall* yang akan diaplikasikan pada penelitian ini yaitu tanaman sirih gading. Tanaman sirih gading dapat tumbuh dengan baik pada suhu antara 22-26°C. Bahkan tanaman sirih gading dapat tumbuh pada suhu 10°C. Menurut pengetahuan penulis, pengkondisi suhu dan kelembaban yang relevan yang dapat diaplikasikan adalah HVAC. HVAC atau *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* adalah sistem AC yang menyerupai AC *split* namun menggunakan air atau udara sebagai refrigerannya [5].

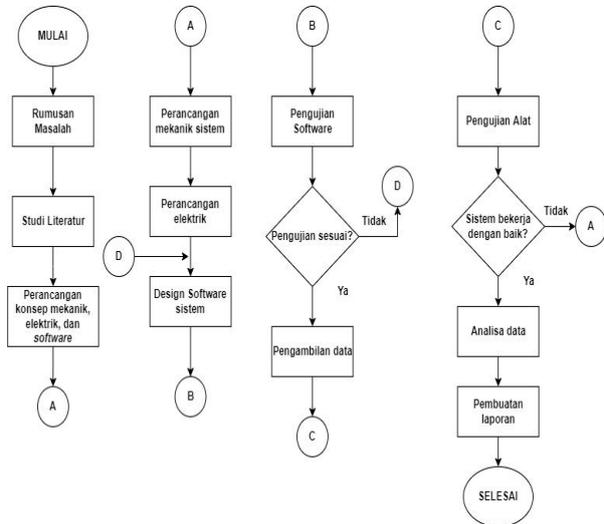
HVAC yang dibutuhkan untuk pengaplikasian pada *living wall* harus dapat dikontrol suhu udaranya, memiliki ukuran yang ringkas dan mudah perawatannya. Pada penelitian tentang “Desain Kendali Temperatur pada sistem *Heating Ventilation Air Conditioning* (HVAC) Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*”, dirancang sebuah sistem HVAC yang ringkas, dan suhunya dapat dikontrol [6]. Akan tetapi, pada penelitian tersebut, aktuator berupa *peltier* yang dikontrol masih bersifat nonlinier dan jenis kontrol yang kurang cocok dengan aktuator yang digunakan sehingga nilai *overshoot* dan *error steady state* sistem relatif tinggi. Jenis refrigeran yang dipakai adalah *fan cooler* sehingga proses kondensasi menjadi lebih lama [7]. Sehingga dibutuhkan sistem HVAC yang membutuhkan proses kondensasi yang baik, aktuator yang dapat dikontrol serta metode kontrol yang relevan untuk mengontrol kinerja sistem. Menurut pengetahuan penulis saat ini, jenis kontrol yang cocok untuk sistem tersebut adalah MPC atau *Model Predictive Control* karena kontrol ini mempertimbangkan perhitungan saat ini dengan kejadian dimasa mendatang sehingga proses dapat ditingkatkan [8]. Pada penelitian [9] – [11], didapatkan perbedaan respon sistem yang cukup signifikan antara penggunaan MPC dengan FLC, PID, dan LQR. Hasilnya, pada respon sistem dengan implementasi MPC mempunyai *overshoot* dan *error steady state* yang kecil namun memiliki *rise time* yang lebih rendah dari ketiga kontroler yang lain hal ini dikarenakan MPC bersifat *soft control* dan bekerja secara iteratif.

Berdasarkan hal diatas, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja sistem dengan menggunakan sistem HVAC disentral yang ringkas, mudah cara merawatnya, membutuhkan biaya yang lebih terjangkau. Penelitian ini menggunakan aktuator yang dikontrol secara linier berupa *peltier thermoelectric* yang menggunakan air sebagai refrigeran untuk mempercepat proses kondensasi dan menggunakan MPC sebagai kontrol. Dengan MPC sebagai kontrol, respon sistem menjadi lebih baik dengan *overshoot* dan nilai *error steady state* yang kecil. Diharapkan sistem HVAC yang akan dibuat penulis kompatibel dan sesuai dengan konsep *living wall* yang akan dibuat.

2. Metode Penelitian

2.1. Rancangan Penelitian

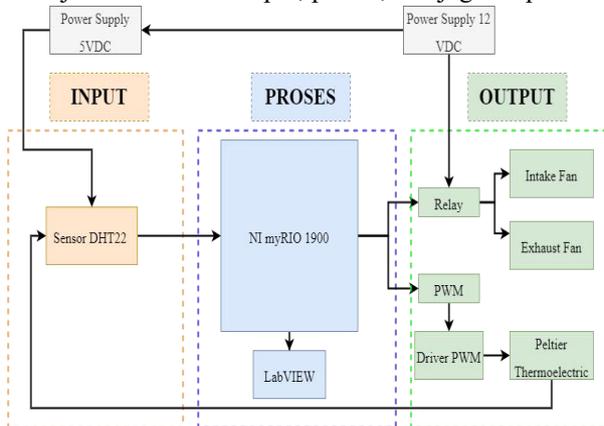
Pada tahapan penelitian terdapat beberapa langkah yang dilakukan yang bertujuan untuk membuat proses penelitian berjalan dengan baik. Proses ini dimulai dengan menentukan rumusan masalah dan diakhiri dengan pembuatan lapotan. Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Rancangan Penelitian

2.2. Diagram Blok Sistem

Dalam Gambar 2 dijelaskan alur dari sistem yang akan dikerjakan mulai dari input, proses, dan juga output.



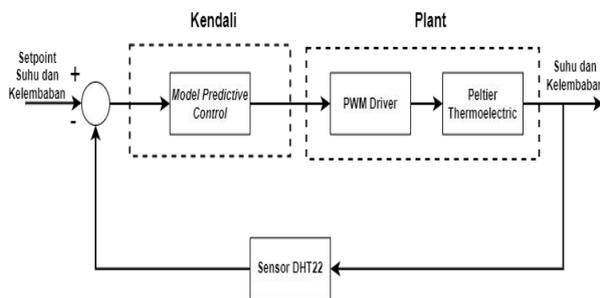
Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Pada diagram blok diatas, terdapat *supply 12VDC* sebagai catu daya relay, *supply 5VDC* untuk mengaktifkan sensor DHT22. Pada bagian input, terdapat sensor DHT22 yang bekerja sebagai pembaca suhu dan kelembaban udara yang ada pada ruangan *living wall* berupa sinyal digital untuk diproses ke kontroler. Pada blok proses, terdapat NI myRIO 1900 yang berfungsi sebagai kontroler yang dibantu dengan LabVIEW sebagai *software* untuk mengkonfigurasi I/O yang ada pada NI myRIO 1900 dan sebagai GUI atau *Graphical User Interface*. Selanjutnya, pada blok

output terdapat *Intake* dan *Exhaust Fan* yang berfungsi sebagai penyalur udara dari ruangan sistem HVAC menuju ruangan *living wall*. *Driver* PWM berfungsi untuk membaca sinyal PWM dari output myRIO kemudian data tersebut diubah menjadi data *analog* untuk mengaktifkan *peltier thermoelectric* sesuai dengan arus yang disalurkan. *Peltier thermoelectric* berfungsi sebagai pendingin udara untuk dihembuskan ke ruangan *living wall* dengan memanfaatkan air sebagai refrigerannya.

2.3. Diagram Blok Kontrol

Pada diagram blok kontrol, dijelaskan tentang bagaimana metode kontrol yang digunakan bekerja dan bisa membuat sistem berjalan dengan apa yang diinginkan. Diagram blok kontrol ditunjukkan pada Gambar 3 dibawah ini



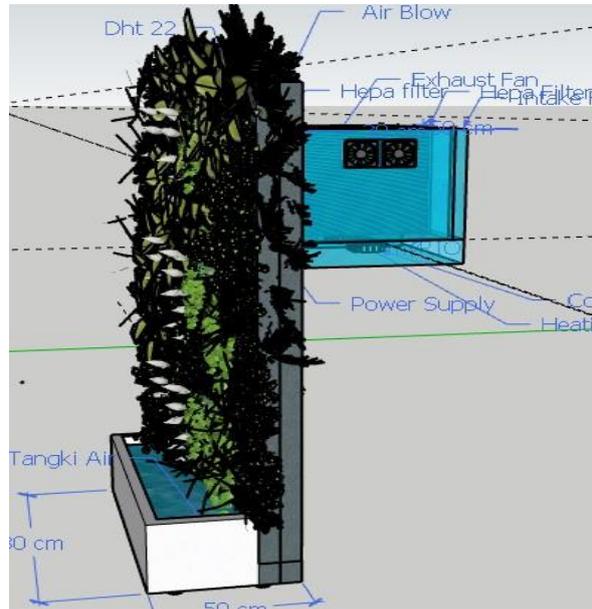
Gambar 3. Diagram Blok Kontrol

Diagram blok kontrol diatas memperlihatkan *plant* dengan sinyal input dan output berupa suhu dan kelembaban. Pada blok kendali terdapat metode kontrol yaitu *Model Predictive Control* (MPC). MPC ini berguna untuk melakukan optimisasi dan pendekatan dari perbandingan antara input dengan *setpoint* yang telah ditentukan. Nilai tersebut didapat dari pembacaan sensor DHT22 saat ini yang dibandingkan dengan nilai *setpoint* yang ditentukan. Sinyal yang telah dioptimisasi akan dikirim ke *PWM driver* dalam bentuk sinyal digital kemudian diproses oleh *PWM driver* sehingga menghasilkan sinyal digital untuk menghasilkan arus sesuai dengan besar PWM yang diberikan. *Duty cycle* yang diberikan akan berbanding lurus dengan arus pada *peltier thermoelectric*. Apabila arus yang ada pada *peltier thermoelectric* semakin besar maka semakin cepat dingin udara yang dihasilkan oleh sistem.

2.4. Perancangan Mekanik

Pada Gambar 4 ditunjukkan desain mekanik dengan perspektif samping keseluruhan sistem. Bahan *base* dari sistem terbuat dari besi *hollow* dan baja ringan sebagai rangka dasar dan penutup. Untuk tangki air dan ruangan sistem HVAC terbuat dari akrilik bening. Tangki air mempunyai ketebalan 5mm dan pada ruangan sistem HVAC mempunyai ketebalan 3mm. Pada bagian depan terdapat media tanam yaitu

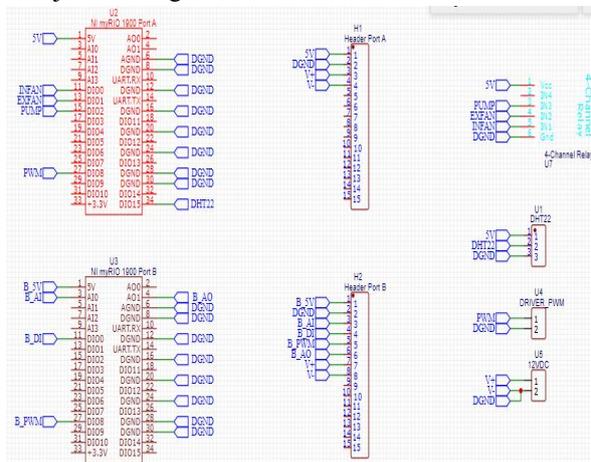
glasswool karena penggunaannya yang simpel dan fleksibel sebagai media tanam vertikal. Tanaman yang digunakan adalah sirih gading.



Gambar 4. Gambar Mekanik

2.5. Perancangan Rangkaian Keseluruhan

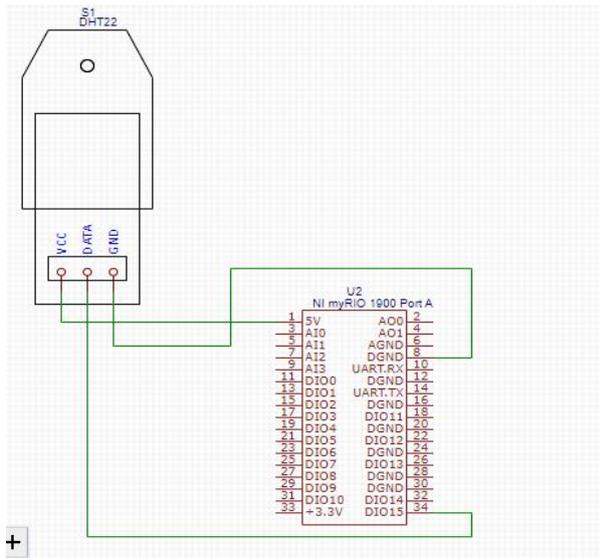
Dalam perancangan rangkaian keseluruhan, ditunjukkan rangkaian skematik dan rangkaian PCB keseluruhan sistem. Pada Gambar 5 dibawah ini ditunjukkan rangkaian skematik keseluruhan sistem.



Gambar 5. Rangkaian Skematik Keseluruhan Sistem

2.6. Perancangan Sensor Suhu dan Kelembaban

Pada rangkaian sensor suhu dan kelembaban digunakan sensor DHT22 karena harganya yang terbilang cukup ekonomis dan mudah dicari di pasaran. DHT22 cocok diaplikasikan untuk pengukuran suhu dan kelembaban ruangan karena rentang suhu yang dapat dibaca oleh sensor ini adalah -55 sampai dengan 83°C dengan error pembacaan $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Skema rangkain sensor suhu dan kelembaban ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Rangkain Sensor Suhu dan Kelembaban

Data dari sensor DHT22 terdiri dari dua bagian yaitu integral dan desimal. Berikut dijelaskan Persamaan data dari sensor DHT22

$$Data = 16bit\ data\ RH + 16bit\ data\ suhu + 8bit\ checksum \quad (1)$$

Misalkan MCU telah menerima data sebagai berikut

0000 0010 1000 1100 0000 0001 0101 1111 1110 1110

Maka, 0000 0010 1000 1100 = 652 (dalam desimal)

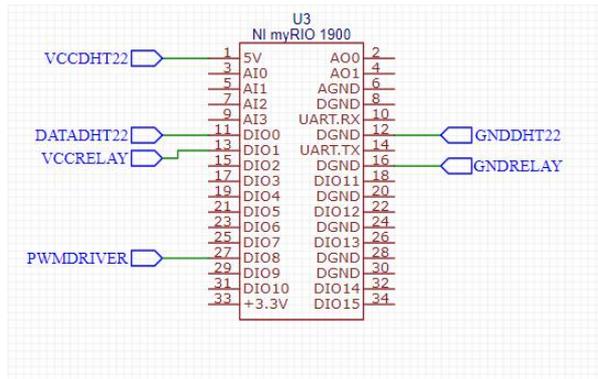
$$RH (\%) = \frac{652}{10} = 65,2\% \quad (2)$$

Untuk suhu, 0000 0001 0101 1111 = 351 (desimal)

$$T (^{\circ}C) = \frac{351}{10} = 35,1^{\circ}C \quad (3)$$

2.7. Perancangan Kontrol

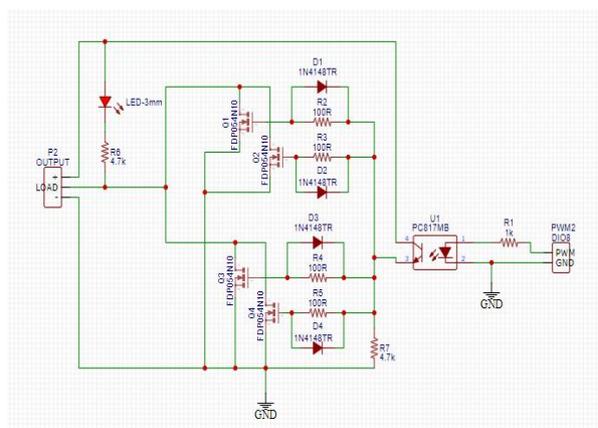
Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini adalah NI myRIO 1900 yang akan memproses data dari sensor DHT22 dan menyalurkan data ke PWM berupa *duty cycle* untuk kebutuhan arus pada *peltier thermoelectric*. Pada setiap *port* myRIO 1900 terdapat 34 pin. Beberapa pin tersambung dengan *input* dan *output*. Gambar 7 menunjukkan skema rangkaian kontrol.



Gambar 7. Skema Rangkaian Kontrol

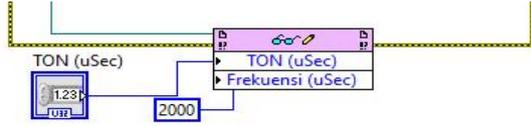
2.8. Perancangan Driver PWM

Pada rancangan *driver* PWM digunakan MOSFET 076N12 sebagai *switching* untuk mengaktifkan *peltier thermoelectric* secara linier sesuai dengan *duty cycle* yang dikeluarkan oleh myRIO. Sinyal PWM dari output myRIO akan disalurkan ke kaki LED optocoupler, kemudian *gate* dari optocoupler akan mencapai titik saturasi karena mendapat cahaya dari LED sehingga tegangan dari *drain* akan menuju ke *source* sehingga tegangan *output* akan mengalir menuju pin LOAD sesuai dengan *duty cycle* yang dimasukkan dari pin A/DIO 8. Skema rangkaian *driver* PWM ditunjukkan oleh Gambar 8 dibawah ini



Gambar 8. Skema Rangkaian Driver PWM

Penentuan dari frekuensi *switching* dilakukan dengan cara *trial and error*. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan sinyal *gate* berbentuk kotak dengan *noise* seminimal mungkin. Setelah melakukan *trial and error*, ditetapkan frekuensi *switching* sebesar 5000 Hz karena menampilkan sinyal *gate* yang paling bagus. Gambar 9 menunjukkan *block diagram* LabVIEW dari FPGA *driver* MOSFET



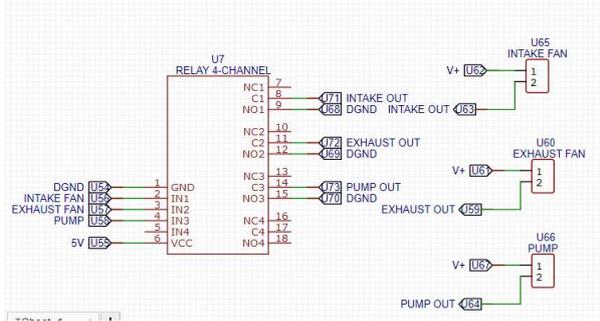
Gambar 9. Block Diagram Driver MOSFET pada LabVIEW

Pada parameter *driver* MOSFET, dapat ditentukan *duty cycle* dengan pembagian TON dengan Ttotal.

$$duty\ cycle = \frac{TON}{Ttotal} \times 100\% \quad (4)$$

2.9. Rancangan Rangkaian Relay

Relay yang digunakan adalah relay 5VDC yang berfungsi sebagai *switching* untuk menyalakan *intake fan*, *exhaust fan*, dan pompa. Kedua *fan* tersebut berfungsi untuk menghisap dan menghembuskan udara sehingga terjadi sirkulasi udara pada ruangan *living wall*. Pompa berfungsi sebagai penyalur air dari *water tank* ke *water block* untuk mendinginkan sisi panas pada *peltier thermoelectric*. Pada Gambar 10 ditunjukkan skema rangkaian relay.



Gambar 10. Skema Rangkaian Relay

2.10. Perancangan Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control merupakan metode kendali yang meminimalkan kesalahan antara *setpoint* dan *prediction signal*. MPC merupakan metode yang cocok digunakan untuk sistem yang memiliki parameter linear seperti pada penelitian ini yang berupa suhu, kelembaban, dan sinyal PWM. MPC digunakan untuk memroses data DHT22, sinyal output $y(k)$, dan sinyal kontrol $u(k)$ sekaligus untuk dilakukan proses optimasi dengan melihat nilai *cost* dan *constraint* yang ditentukan pada parameter MPC.

Dalam merancang MPC, diperlukan perubahan dari bentuk *transfer function* ke dalam bentuk transformasi Z dengan menggunakan transformasi bilinear. Transformasi bilinear ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$s = \frac{2}{T_s} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (5)$$

Dimana nilai T_s telah ditetapkan sebelumnya yaitu 12s. Kemudian MPC mempunyai persamaan *state space* umum yang digunakan untuk mencari parameter yang akan dimasukkan ke MPC. Persamaan *state space* ditunjukkan pada Persamaan 6 dibawah ini.

$$x_m(k + 1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (6)$$

$$y(k) = C_m x_m(k)$$

Dimana $u(k)$ merupakan variabel *input*, y adalah *process input*, dan x_m adalah vektor variabel *state*. Delta variabel *control* dapat dinotasikan pada Persamaan 10 berikut.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (7)$$

Sehingga Persamaan 6 *state space*-nya adalah sebagai berikut.

$$\Delta x_m(k + 1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (8)$$

$$y(k + 1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m + C_m B_m \Delta u(k) \quad (9)$$

Fungsi alih yang didapatkan tidak bisa langsung diinputkan ke dalam kendali MPC namun dirubah terlebih dahulu menjadi bentuk *Canonical Form*. Persamaan *Controllable Canonical Form* dapat dilihat pada Persamaan dibawah ini.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1z^2 + \alpha_1 z + \alpha_2} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} (k + 1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} (k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (11)$$

$$y(k) = [b_2 - \alpha_2 b_0 \quad b_1 - \alpha_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} (k) \quad (12)$$

Dengan memasukkan persamaan 8 dan 9 digabung menjadi bentuk model *state space Augmented Model*-nya sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m \\ y \end{bmatrix} (k + 1) = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} u(k) \quad (13)$$

$$y(k) = [0_m \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix}$$

Berdasarkan data yang ada pada datasheet ditambah dengan persamaan-persamaan yang ada sebelumnya, dapat ditentukan parameter-parameter keseluruhan sistem. Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter yang ada pada sistem.

Tabel 1. Tabel Parameter Sistem

Parameter Sistem	Nilai
Arus Maksimal TEC12710	10 A
Tegangan Kerja TEC12710	12 VDC
Koefisien <i>Seebeck</i>	0,0513
Resistansi Internal	1,1909 Ω
Konduktivitas Termal	0,8757 W/m ^o C
Kapasitansi Termal	12 J/K
<i>Gain Overall</i>	6,25
Konstanta Waktu	1,92 s

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{121,2064 + 242,4128z^{-1} + 121,2064z}{1z^2 - 0,04502z^{-1} - 0,488025z} \quad (17)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -0,40232 \\ \alpha_2 &= -0,488025 \\ b_0 &= 121,2064 \\ b_1 &= 242,4128 \end{aligned}$$

Setelah parameter-parameter telah ditentukan maka dapat dimasukkan pada Persamaan 14 berikut.

$$\frac{\theta_0(s)}{u(s)} = \frac{K_T R_T}{(1+T_s)(1+R_T T_s)} \quad (14)$$

Dimana K_T adalah *gain overall*, R_T adalah konduktivitas termal bahan dan T_s adalah konstanta waktu. Maka diperoleh Persamaan 15.

$$\frac{\theta_0(s)}{u(s)} = \frac{4385,058}{323,301s^2 + 168,386s + 1} \quad (15)$$

Maka model *state space* diskrit sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,0488025 & 0,40232 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \\ y(k) &= [62,0546 \quad 193,64905] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

Setelah didapatkan fungsi alih sistem, diperlukan model *state space* sistem untuk perancangan *Model Predictive Control*.

$$4385,058U = 323,301\ddot{\theta} + 168,386s\dot{\theta} + \theta \quad (16)$$

Didefinisikan:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2 \\ x_2 &= \dot{\theta} \rightarrow x_2 = \ddot{\theta} \end{aligned}$$

Jadi, dari persamaan keadaan dan persamaan keluaran dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C, dan D sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,00309 & -0,52083 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$C = [13,563 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Kemudian, dari persamaan yang sudah ada diatas dapat dirancang desain *augmented model*. Diperlukan perubahan dari model *state space* yang sudah didiskritisasi menjadi desain *augmented model* pada Persamaan 19 berikut ini.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,0488025 & 0,40232 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,0488025 & 0,40232 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u(k) \end{aligned} \quad (19)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0,0488025 & 0,40232 & 0 \\ 94,50557 & 139,9634 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 193,64905 \end{bmatrix} \Delta u(k) \end{aligned}$$

$$y(k) = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Bentuk *state space* diatas merupakan bentuk *state space* dalam bentuk diskrit. Model *state space* diskrit yang telah didapatkan dapat dirubah menjadi bentuk *Canonical Form*. Persamaan *state space* diskrit dapat dibagi dengan 0,1119 untuk mendapatkan nilai 1 mengacu pada persamaan *Canonical Form*.

Matriks A, B, C, dan D adalah bentuk *augmented model* yang digunakan dalam merancang kontroler MPC.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Sensor Suhu dan Kelembaban DHT22

Pada pengujian ini digunakan sensor suhu dan kelembaban DHT22 yang dibandingkan dengan alat ukur berupa *thermo-hygrometer*. Kedua alat ukur ditempatkan sejajar untuk memperoleh hasil yang lebih akurat. Hasil pembacaan DHT22 dilihat pada *front panel* LabVIEW dan *thermo-hygrometer* dilihat langsung pada alat ukur. Tabel dibawah ini merupakan hasil pembacaan *thermo-hygrometer* akan dikurangi dengan hasil pembacaan DHT22 kemudian dibagi dengan hasil pembacaan *thermo-hygrometer* untuk mendapatkan error. Dapat dicari menggunakan Persamaan 21 berikut.

$$Error(\%) = \left| \frac{Hasil\ Hygrometer - Hasil\ DHT22}{Hasil\ Hygrometer} \right| \times 100\% \quad (21)$$

Tabel 2. Data Pengujian Suhu DHT22

No.	Temperature DHT22 (°C)	Temperature <i>hygro-meter</i> (°C)	Selisih Pengukuran	Error
1	27	27,9	0,9	3,2
2	26,5	26,2	0,3	1,14
3	26	25,7	0,3	1,16
4	27,3	27,5	0,2	0,7
5	27,8	28	0,2	0,7
6	26	26,5	0,5	1,88
7	25,9	26	0,1	0,3
Rata-Rata			0,35	1,29

Pada Tabel 1 diatas, rata-rata selisih data suhu antara pembacaan DHT22 dengan *hygro-meter* relatif kecil yaitu 0,35 dan memiliki rata-rata error yang kecil yaitu 1,29. Ini menunjukkan bahwa DHT22 telah bekerja dengan baik dalam pembacaan suhu.

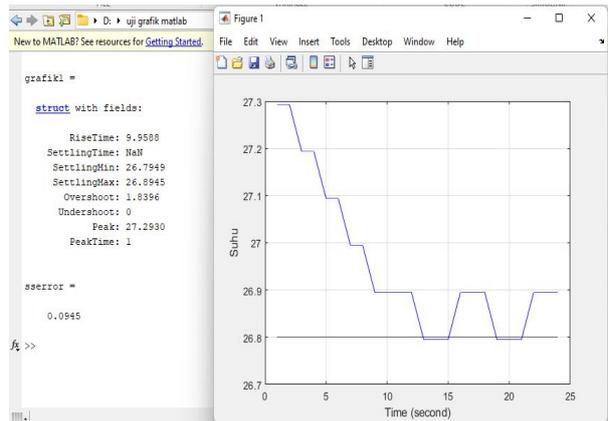
Tabel 3. Data Pengujian Kelembaban DHT22

No.	Kelembaban DHT22 (°C)	Kelembaban <i>hygro-meter</i> (°C)	Selisih Pengukuran	Error
1	85	83	2	2
2	86	84	2	2,3
3	83	78	5	6
4	86	80	6	7,5
5	79	80	1	1
6	79	77	2	2,59
7	81	76	5	6,57
Rata-Rata			3,85	3,994

Pada Tabel 2 diatas, rata-rata selisih data kelembaban antara pembacaan DHT22 dengan *hygro-meter* termasuk kecil yaitu 3,85 dan memiliki rata-rata error yaitu 3,994. Ini menunjukkan bahwa DHT22 telah berjalan dengan baik dalam pembacaan kelembaban relatif.

3.2. Pengujian Keseluruhan Sistem Tanpa MPC

Pada pengujian ini sistem diberikan fungsi *case structure* untuk membuat kondisi dimana saat suhu belum mencapai *setpoint* maka aktuator akan menyala dan aktuator akan mati apabila pembacaan suhu telah mencapai *setpoint*. Diasumsikan bahwa *duty cycle* sebesar 100 persen karena sistem tidak diberikan kontrol. Gambar 11 menunjukkan respon sistem keseluruhan tanpa menggunakan *Model Predictive Control* atau sistem bersifat *open loop*.

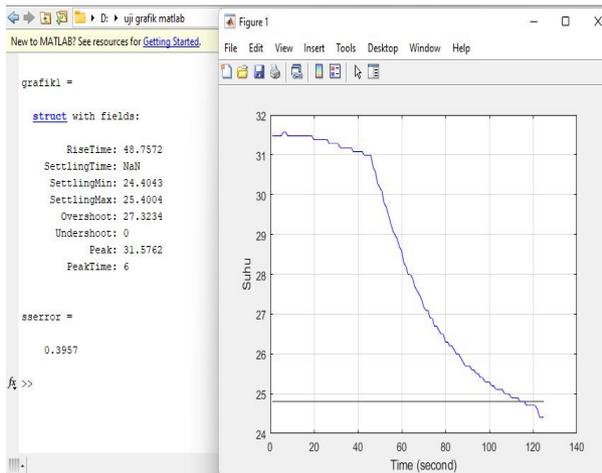


Gambar 11. Grafik Respon Sistem Tanpa Implementasi Kontrol MPC

Dari grafik respon sistem diatas, dapat dilihat bahwa *intake fan*, *exhaust fan*, pompa, dan *peltier thermoelectric* menyala ketika suhu dari pembacaan sensor belum mencapai *setpoint*. Keempat aktuator tersebut akan menyala hingga suhu dari pembacaan sensor mencapai *setpoint*. Apabila *setpoint* telah tercapai maka keempat aktuator tersebut akan mati. Hal ini sesuai dengan tujuan dari pengujian ini.

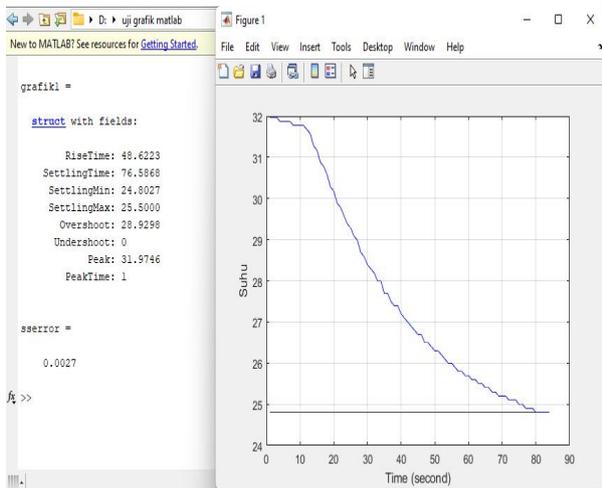
3.3. Pengujian Keseluruhan Sistem Menggunakan MPC

Dalam pengujian keseluruhan sistem dengan implementasi *Model Predictive Control*, sistem diberikan kontrol untuk mengatur masukan PWM sehingga kinerja *peltier thermoelectric* dapat diatur sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan. Pada pengujian ini, dapat diambil data berupa respon pembacaan sensor DHT22 terhadap *setpoint* yang disebabkan oleh besar kecilnya nilai PWM yang dimasukkan dari proses optimasi dan mendapatkan nilai $u(k)$ yang telah diinginkan. Gambar 12 menunjukkan grafik respon sistem dengan nilai $N_p = 200$ dan nilai $N_c = 50$



Gambar 20. Grafik Respon Sistem Saat $N_p = 200$ dan $N_c = 50$

Kemudian Gambar 21 adalah gambar respon sistem saat $N_p = 150$ dan $N_c = 85$



Gambar 21 Grafik Respon Sistem Saat $N_p = 150$ dan $N_c = 85$

Berdasarkan dari grafik respon sistem diatas, dapat disimpulkan bahwa pada saat $N_p = 150$ dan $N_c = 85$, respon sistem lebih baik dengan nilai *rise time* sebesar 48,622 dengan waktu *settling time* sebesar 76,58 detik.

4. Kesimpulan

Pada penelitian kali ini parameter yang diperhatikan dalam merancang kontroler *Model Predictive Control* adalah nilai N_p (*Prediction Horizon*) dan N_c (*Control Horizon*), dimana pada penelitian kali ini dilakukan dua kali percobaan dengan N_p dan N_c yang berbeda. Hasilnya suhu dapat dikontrol dengan baik pada saat $N_p = 150$ dan $N_c = 85$ dimana sistem mempunyai nilai *steady state* sebesar 83, *error steady state* sebesar 0,005, *overshoot* sebesar 28,92 dan *rise time* sebesar 48,62 detik.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih penulis ucapkan kepada Bu Anindya Dwi Risdhayanti atas bimbingan dan saran yang diberikan kepada penulis untuk menyusun penelitian ini. Terima kasih kepada Pak Muhammad Rifai dan Bu Fitri sebagai dosen pembimbing yang memberi arahan dan masukan dalam proses penyusunan penelitian ini.

Daftar Rujukan

- [1] A. R. Luddityawan, A. M. Nugroho, and H. A. Razziati, "TAMAN VERTIKAL SEBAGAI PENDINGINAN ALAMI PADA RUMAH SEDERHANA SEHAT GRIYA SAXOPHONE KECAMATAN LOWOKWARU-KOTA MALANG," 2001.
- [2] S. Putri Darlina, B. Sasmito, and B. Darmo Yuwono, "ANALISIS FENOMENA URBAN HEAT ISLAND SERTA MITIGASINYA (STUDI KASUS : KOTA SEMARANG)," 2018.
- [3] K. Shiah and J. Kim, "UBC Social Ecological Economic Development Studies (SEEDS) Student Report An Investigation into the Application of Vertical Garden at the New SUB Atrium," 2011.
- [4] R. Widiastuti, E. Prianto, W. Setia Budi, D. Jurusan Arsitektur Universitas Diponegoro, G. Besar Jurusan Fisika, and R. Artikel, "EVALUASI TERMAL DINDING BANGUNAN DENGAN VERTICAL GARDEN," 2014. [Online]. Available: www.greensreen.com,-
- [5] J. Rehr and M. Horn, "Temperature control for HVAC systems based on exact linearization and model predictive control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1119–1124, 2011, doi: 10.1109/CCA.2011.6044437.
- [6] D. Mauriza Aulia, I. Achmad Khomarudin, and T. Winarno, "Desain Kendali Temperatur Pada Sistem Heating Ventilation Air Conditioning (HVAC) Menggunakan Fuzzy Logic Controller", doi: 10.33795/elkolind.
- [7] A. Darori Hasan, D. Pembimbing Ir Tony Bambang Musriyadi, M. Ir Alam Baheramsyah, and M. Sc Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, "Perencanaan Sistem Pengkondisian Udara (hvac) pada Ruang Akomodasi Kapal Tanker Menggunakan Refrigeran R 407 c." [8] J. Mei, B. Zhu, and X. Xia, "Model predictive control for optimizing indoor air temperature and humidity in a direct expansion air conditioning system," *Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015*, pp. 2491–2496, 2015, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162340.
- [9] E. C. Permata, "PERANCANGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA ANNEALING LEHR," Pekanbaru, 2021.
- [10] F. M. Ekasari, R. A. Effendi, E. Iskandar Jurusan Teknik Elektro, and F. Teknologi Industri -Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jl Arief Rahman Hakim, "Pengendali Temperatur Fluida Pada Heat Exchanger Dengan Menggunakan Algoritma Model Predictive Control (MPC)," vol. 3, no. 1, 2014.
- [11] Gouda Mahmoud, "Fuzzy Ventilation Control for Zone Temperature and Relative Humidity," 2005.