JURNAL SURYA ENERGY| ISSN (p): **2528-7400**| ISSN (e): **2615-871X**
DOI : https://doi.org/10.32502/jse.v10i2.1691 Vol. 10 | No. 2 | Halaman 99 - 106
[Maret] [2026]

Implementasi *Model Predictive Control* (MPC) pada Sistem HVAC Skala Kecil untuk Optimasi Kinerja Termal dan Efisiensi Energi

Fadilah[1*], Zulkiffli Saleh[2], Hafiidh Muzaki[3], Asri Indah Lestari[4], Yosi Apriani[5]
[1234]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Palembang
[5]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Tangerang
fadilah@um-palembang.ac.id[1*], zulkifflisaleh64@gmail.com[2], hafidhmzk@gmail.com[3], asri_indahlestari@um-palembang.ac.id[4], yosi@umt.ac.id[5]

Received 23 Februari 2026 | *Revised* 11 Maret 2026 | *Accepted* 16 Maret 2026

ABSTRAK

Sistem *Heating*, *Ventilation*, dan *Air Conditioning* (HVAC) merupakan salah satu penyumbang konsumsi energi terbesar pada bangunan, sehingga diperlukan strategi kendali yang tidak hanya mampu menjaga kenyamanan termal tetapi juga meningkatkan efisiensi energi. Metode kendali konvensional PID memiliki keterbatasan dalam menangani kendala system dan perubahan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji implementasi *Model Predictive Control* (MPC) pada subsistem *Air Conditioner* (AC) pada HVAC skala kecil untuk mengoptimalkan kinerja termal dan konsumsi energi. Sistem HVAC dimodelkan sebagai sistem termal satu zona menggunakan pendekatan *lumped* parameter dan direpresentasikan dalam bentuk model *state-space* diskrit. MPC dirancang dengan fungsi objektif yang meminimalkan kesalahan pelacakan suhu terhadap setpoint dan perubahan daya pendinginan dengan memeprtimbangkan kendala operasional system. Pengujian dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB dengan skenario pelacakan setpoint suhu dan gangguan lingkungan. Kinerja MPC dibandingkan dengan kendali PID konvensional berdasarkan respon suhu dan konsumsi energi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MPC mampu menghasilkan respons suhu yang stabil dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan kendali PID. Secara kuantitatif, MPC membutuhkan energi sekitas 56,6 Wh, lebih rendah dibanding PID sebesar 58,5 Wh. Meskipun demikian, MPC memiliki waktu tunak yang sedikit lebih lama, yaitu sekitar 8 menit, dibandingkan dengan 6 menit pada kendali PID. Selain itu, MPC menghasilkan aksi kendali yang lebih halus, yang terlihat dari perubahan daya pendinginan yang lebih terkendali. Hasil ini menunjukkan bahwa MPC efektif sebagai alternatif kendali untuk meningkatkan kenyamanan termal dan efisiensi energi pada system HVAC skala kecil.

Kata kunci: Model Predictive Control, HVAC, Efisiensi Energi, Sistem Kendali

Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems represent one of the largest sources of energy consumption in buildings. Therefore, an effective control strategy is required not only to maintain thermal comfort but also to improve energy efficiency. Conventional PID control methods have limitations in handling system constraints and environmental disturbances. Therefore, this study investigates the implementation of Model Predictive Control (MPC) in a small-scale HVAC Air Conditioner (AC) subsystem to optimize thermal performance and energy consumption. The HVAC system is modeled as a single-zone thermal system using a lumped parameter approach and represented in a discrete state-space model. The MPC controller is designed with an objective function that minimizes the temperature tracking error relative to the setpoint and the variation of cooling power while considering system operational constraints. The performance evaluation is conducted through MATLAB-based simulations under temperature setpoint tracking and environmental disturbance scenarios. The MPC performance is compared with a conventional PID controller in terms of temperature response and energy consumption. Simulation results indicate that MPC produces a stable temperature response with lower energy consumption compared to the PID controller. Quantitatively, MPC requires approximately 56.6 Wh of energy, which is lower than the 58.5 Wh required by the PID controller. However, MPC exhibits a slightly longer settling time of about 8 minutes, compared to 6 minutes for the PID controller. In addition, MPC generates smoother control actions, as indicated by more gradual variations in cooling power. These results demonstrate that MPC is an effective control alternative for improving thermal comfort and energy efficiency in small-scale HVAC systems.

Keywords: Model Predictive Control, HVAC, Energy Efficiency, Control Systems

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global pada sektor bangunan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan intensitas aktivitas manusia. Pada sector ini, Sistem *Heating, Ventilation, and Conditioning* (HVAC) berkontribusi secara signifikan terhadap konsumsi energi total bangunan, khususnya wilayah beriklim tropis yang membutuhkan pengendalian suhu ruangan secara kontinu untuk menjaga kenyaman termal (Shiyu , Man, & Chen, Model Predictive control with adaptive machine-learning-based model for building energy efficiency and comfort optimization, 2020) (Agency, 2019). Oleh karena itu, pengembangan strategi kendali yang efisien dan adaptif menjadi isu penting dalam mendukung penghematan energi dan keberlanjutan lingkungan (Md, Rajam, Anil, Ranjeet, & V.P., 2023) (Juan, Haoran, Natasa, & Gongsheng, 2022).

Metode kendali konvensional seperti *Proportional–Integral–Derivative* (PID) masih banyak digunakan pada sistem HVAC karena memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Meskipun demikian, pengendali PID memiliki keterbatasan dalam menangani sistem yang bersifat multivariable, menghadapi kendala aktuator, serta merespon gangguan lingkungan yang bersifat dinamis dan tidak terprediksi (Abdul & Farrokh, 2014). Keterbatasan ini dapat menyebabkan kinerja pengendalian yang kurang optimal, terutama dalam konteks efiseinsi energi dan kualitas respons termal.

Sebagai alternatif, *Model Predictive Control* (MPC) berkembang sebagai metode kendali berbasis model yang mampu memprediksi perilaku sistem di masa depan dan menentukan sinyal kendali optimal melalui proses optimasi kendali sistem (E. F. Camacho and C. Bordons, 2013). Karakteristik tersebut menjadikan MPC sangat sesuai untuk aplikasi HVAC yang menuntut keseimbangan antara kenyaman termal dan konsumsi energi.

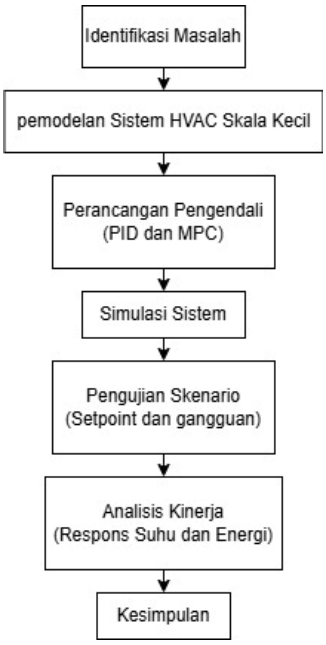
Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penerapan MPC pada sistem HVAC mampu meningkatkan efisisensi energi sekaligus memperbaiki kualitas pengendalian suhu dibandingkan metode kendali konvensional (Yaohua, Junchao, & Shen, Energy Management Strategy Based on Model Predictive Control-Differential Evolution for hybrid energy storage system in Electric Vehicles, 2024) (J. Drgoňa, 2020). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan Model Predictive Control (MPC) pada sistem HVAC mampu meningkatkan efisiensi energi bangunan secara signifikan dengan tetap mempertahankan kenyamanan termal. Studi oleh (J. Drgoňa, 2020) menunjukkan bahwa pendekatan MPC berbasis model termal bangunan mampu mengoptimalkan konsumsi energi hingga 20% dibandingkan strategi kendali konvensional. Penelitian lain oleh Killian dan Kozek (Killian, Implementasi of cooperative fuzzy model predictive control for an energy-efficient office buildings, 2017) menegaskan bahwa MPC efektif dalam mengatasi dinamika termal bangunan yang kompleks melalui pendekatan optimasi berbasis prediksi. Selain itu, beberapa studi terbaru juga menyoroti integrasi MPC dengan sistem manajemen energi bangunan untuk meningkatkan performa operasional HVAC secara keseluruhan (Afram, 2021) (Yihang, Dang , Bin, & Pengju, 2024).

Pada penelitian ini, sistem HVAC yang dikaji difokuskan pada subsistem *Air Conditioning* (AC) sebagai komponen utama pengendali suhu ruangan. Subsistem *heating* dan *ventilation* tidak dimodelkan secara eksplisit, namun pengaruh lingkungan luar direpresentasikan sebagai gangguan suhu pada model termal satu zona. penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem HVAC skala kecil berbasis simulasi MATLAB serta membandingkan kinerja dengan pengendali PID konvensional dalam hal respons termal dan efisiensi energi.

II. METODE PENELITIAN

A. Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian ini diawali dengan pemodelan matematis sistem HVAC skala kecil menggunakan pendekatan termal satu zona dengan asumsi kapasitas pendinginan maksimum sebesar 1.2 kW. Model termal disusun menggunakan pendekatan *lumped* parameter yang merepresentasikan dinamika perpindahan panas antara ruangan dan lingkungan. Sistem yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar perancangan pengendali MPC untuk mempertahankan suhu referensi 24^{o}C dengan Batasan daya aktuator dan perubahan daya. Selanjutnya, pengendali PID konvensional dirancang sebagai pembanding. Kedua pengendali diuji melalui simulasi MATLAB dengan skenario pelacakan setpoint. Evaluasi kinerja dilakukan berdasarkan respons suhu dan konsumsi energi sistem.



Gambar 1. Diagram Blok Penelitian

B. Pemodelan Matematis Sistem HVAC

Sistem HVAC dimodelkan sebagai sistem termal satu zona menggunakan pendekatan *lumped parameter,* yang mengasumsikan suhu ruangan seragam dan dapat direpresentasikan oleh satu variable keadaan. Pendekatan ini umum digunakan pada studi awal sistem HVAC karena kesederhanaan dan kemudahan implementasi tanpa mengurangi validitas analisis secara signifikan (S. Wang and Z. Ma, 2008), (ASHRAE, 2017). Pendekatan model termal satu zona banyak digunakan dalam penelitian terkini sebagai representasi sederhana namun efektif untuk analisis sistem HVAC pada tahap simulasi awal. Beberapa studi terbaru menunjukkan bahwa model *lumped thermal* parameter mampu memberikan estimasi dinamika suhu ruangan yang cukup akurat untuk evaluasi strategi kendali berbasis MPC (Saman, Panis, & Ali, Model Predictive control of Heating ventilation, and Air conditioning (HVAC) systems: A State-of-the-art review, 2022) (Sachidananda & Maneesh, 2022). Model termal ruangan dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

$$C\frac{dT(t)}{dt} = \frac{T_{out}(t)-T(t)}{R} + P(t) \quad (1)$$

Dengan,
T(t) adalah suhu ruangan (℃)
T_{out}(t) adalah suhu lingkungan (℃)
C adalah kapasitas termal (J/℃)
R adalah resistansi termal (℃/W)
P(t) adalah daya pendingin/pemanasan HVAC (W)
T_{ref} sebesar 24℃

Model kontinu tersebut kemudian direpresentasikan dalam bentuk *state-space* dan didiskritisasi menggunakan metode *zero-order hold* untuk keperluan implementasi kendali digital (K. Ogata, 1995):

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$
$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

Dengan mendefinisikan *variable state* sebagai:

$$x(t) = T(t)$$

Maka persamaan (1) dapat dituliskan dalam bentuk state-*space* kontinu sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{RC}x(t) + \frac{1}{C}P(t) + \frac{1}{RC}T_{out}(t) \quad (3)$$

Persamaan (3) menunjukkan bahwa dinamika suhu ruangan dipengaruhi oleh kondisi suhu saat ini, sinyal kendali HVAC, serta gangguan berupa suhu lingkungan.
Untuk keperluan implementasi kendali digital, model kontinu pada persamaan (3) didiskritisasi menggunakan metode Euler maju dengan waktu sampling T_s. metode ini dinyatakan sebagai:

$$x(k+1) = x(k) + T_s\dot{x}(k)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (3), diperoleh model diskrit sebagai berikut:

$$\dot{x}(k+1) = (1 - \frac{T_s}{RC})x(k) + \frac{T_s}{C}P(k) + \frac{T_s}{RC}T_{out}(k) \quad (4)$$

Model diskrit system HVAC dapat dituliskan dalam bentuk state-space diskrit sebagai:

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + E_d w(k)$$

Dengan,

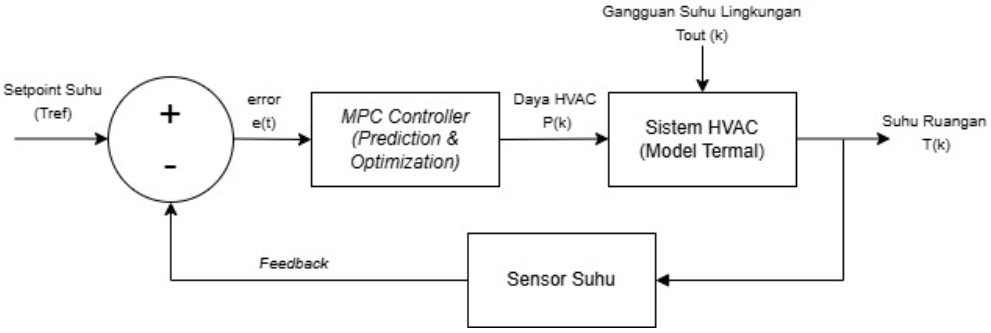
$$A_d = 1 - \frac{T_s}{RC}, B_d = \frac{T_s}{C}, E_d = \frac{T_s}{RC}$$

Model diskrit ini selanjutnya digunakan sebagai dasar perancangan pengendali MPC pada system HVAC skala kecil.

C. Perancangan Sistem Kendali

1. Perancangan *Model Predictive Control* (MPC)

Pada penelitian ini *Model Predictive Control* (MPC) diterapkan pada system HVAC skala kecil yang dimodelkan sebagai system termal satu zona. System HVAC menerima sinyal kendali berupa daya pendinginan atau pemanasan P(k) yang dihasilkan oleh pengendali MPC. Nilai daya ini mempengaruhi dinamika suhu ruangan berdasarkan model termal diskrit yang telah diturunkan sebelumnya.



Gambar 2. Diagram blok sistem *Model Predictive Control* (MPC) pada HVAC

Pengendali MPC menggunakan model diskrit system HVAC untuk memprediksi perilaku suhu runagan pada horizon prediksi tertentu berdasarkan kondisi suhu saat ini, sinyal kendali, serta gangguan berupa suhu lingkungan. Pada setiap Langkah waktu, MPC menyelesaikan masalah optimasi dengan fungsi objektif yang mempertimbangkan kesalahan pelacakan suhu terhadap setpoint dan perubahan daya HVAC, dengan tetap memperhatikan kendala operasional sistem. Hasil optimasi berupa sinyal kendali optimal kemudian diterapkan pada sistem HVAC, dan proses diulang secara berulang dengan mekanisme umpan balik yang dirumuskan sebagai:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p}\left(T_{ref}(k+i) - T(k+i)\right)^2 + \lambda\sum_{i=0}^{N_c-1}\Delta u(k+i)^2 \quad (5)$$

Di mana N_p adalah horizon kendali, λ faktor pembobot perubahan sinyal kendali, dan Δu perubahan daya HVAC. Formulasi ini bertujuan untuk menyeimbangkan antara akurasi pelacakan suhu dan efisiensi energi (J. B. Rawlings and D. Q. Mayne, 2009), (M. Killian and M. Kozek, 2016).

Selain itu, kendala operasi sistem HVAC turut dipertimbangkan dalam perancangan MPC, meliputi batas daya minimum dan maksimum aktuator. Pendekatan berbasis kendala ini menjadi keunggulan utama MPC dibandingkan konvensional (A. Parisio, 2014), (Hägglund, 1995).

2. Perancangan Pengendali PID

Sebagai pembanding, pengendali PID konvensional dirancang untuk sistem HVAC yang sama, struktur pengendali PID dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Dengan e(t) merupakan selisih antara suhu referensi dan suhu actual. Parameter K_p, K_i, dan K_d ditentukan melalui proses tuning agar diperoleh respons yang stabil dan dapat dibandingkan secara adil dengan MPC (Skogestad, 2003), (A. Afram, 2017). Pengendali PID sebagai pembanding karena masih menjadi pengendali yang paling umum diguankan pada sistem HVAC industry dan bangunan (Y. Ma, 2012).

3. Skenario Simulasi dan Evaluasi Kerja

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dengan skenario pelacakan setpoint suhu ruangan. Kinerja pengendali MPC dan PID dievaluasi berdasarkan respons suhu, waktu tunak, serta konsumsi energi total selama periode simulasi. Konsumsi energi dihiutng dari integral daya HVAC terhadapt waktu, yang umu digunakan sebagai indicator efisiensi energi sistem pendingin (Panagiotis, lakovos, Federico, Hasan Huseyin, & Elias, 2025), (Kolokotsa, 2016). Pendekatan simulasi berbasis perbandingan ini banyak digunakan dalam studi HVAC untuk mengevaluasi efektivitas strategi kendali sebelum implementasi pada sistem nyata (Yiqun, et al., 2023).

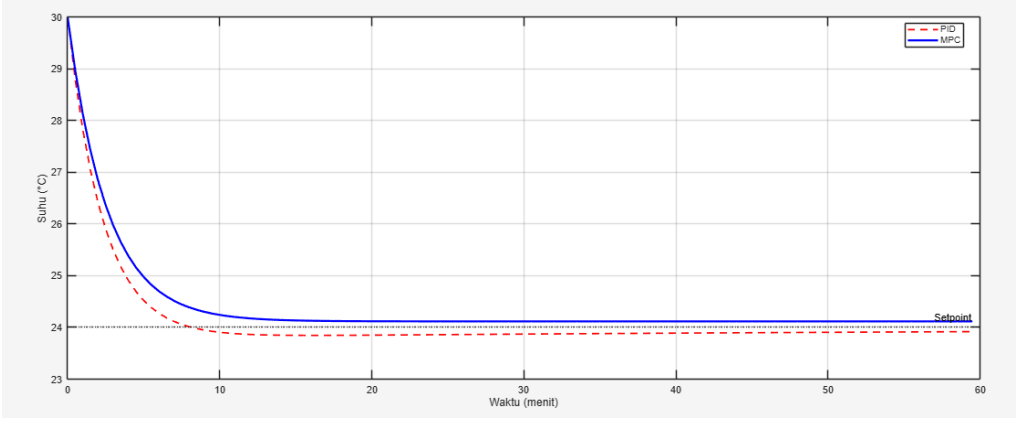
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Respons Suhu Sistem HVAC

Gambar 3 menunjukkan perbandingan respons suhu sistem HVAC terhadap setpoint menggunakan pengendali PID dan MPC. Pada system HVAC, sinyal masukan berupa daya pendinginan P(k) yang dihasilkan oleh masing-masing pengendali, sedangkan keluaran system adalah suhu ruangan T(k).

Pengendali MPC, nilai input P(k) ditentukan berdasarkan hasil prediksi perilaku suhu ruangan pada horizon prediksi tertentu menggunaan model termal system HVAC. Dengan memanfaatkan prediksi tersebut, MPC mampu mengatur daya HVAC secara bertahap dan terencana sehingga perubahan suhu enuju setpoint berlangsung lebih halus. Hal ini terlihat dari respons suhu yang stabil dan minim fluktuasi setelah mendekati referensi 24 °C. Sebaliknya, pengendali PID menentukan input HVAC berdasarkan error suhu saat ini tanpa mempertimbangkan prediksi kondisi dai masa depan. Akibatnya, PID memberikan aksi kendali yang lebih agresif pada awal respon untuk memperceat pencapaian setpoint. Meskipun PID mampu mencapai suhu referensi lebih cepat, pendekatan ini menyebabkan perubahan daya HVAC yang lebih besar dan kurang optimal dari sisi efisiensi energi.

Secara keseluruhan, perbedaan karakteristik respon suhu ini menunjukkan bahwa MPC menghasilkan output suhu yang lebih terkendali melalui pengaturan input HVAC yang berbasis prediksi, sedangkan PID lebih mengutamakan kecepatan respon tanpa mempertimbangkan optimasi energi.



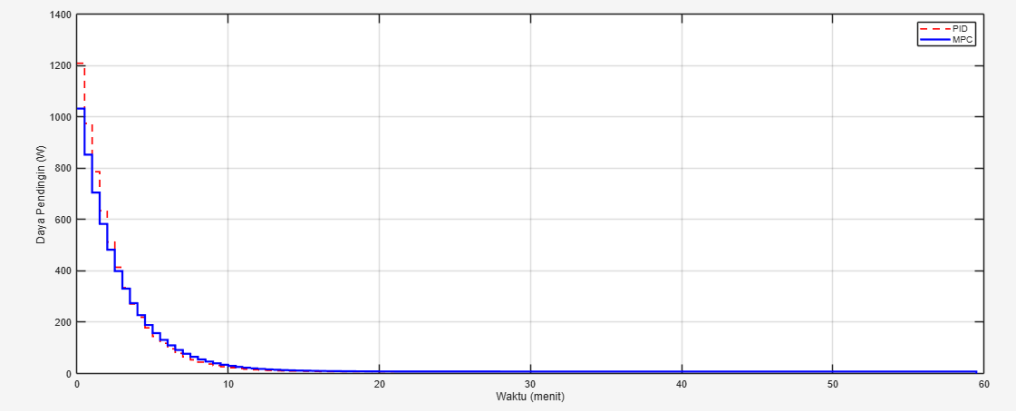
Gambar 3. Perbandingan Respons Suhu Sistem HVAC Terhadap Setpoint Menggunakan Pengendali PID dan MPC

2. Analisis Profil Daya Pendinginan HVAC

Gambar 4 memperlihatkan bagaimana masing-masing pengendali mengatur kebutuhan daya HVAC selama proses pendinginan. Pada awal simulasi, kedua pengendali menghasilkan daya pendinginan yang tinggi untuk mengatasi error suhu yang besar dari kondisi awal.

Pengendali PID menunjukkan lonjakan daya awal yang lebih tinggi dan penurunan daya yang lebih tajam. Pola ini mencerminkan karakteristik PID yang cenderung memberikan aksi kendali agresif tanpa mempertimbangkan dampak energi jangka panjang.

Sebaliknya, MPC menghasilkan profil daya yang lebih bertahap dan terkontrol. Penurunan daya pada MPC berlangsung secara lebih halus, yang menunjukkan bahwa MPC mempertimbangkan prediksi kondisi suhu ke depan serta penalti terhadap perubahan daya dalam fungsi objektifnya. Setelah suhu mendekati kondisi tunak, daya pendinginan pada MPC menurun secara stabil hingga mendekati nol tanpa fluktuasi signifikan.



Gambar 4. Grafik Daya Pendinginan

3. *Performance Index Evaluation*

Tabel 1 perbandingan performa menyajikan evaluasi kuantitatif antara pengendali PID dan MPC berdasarkan waktu tunak, overshoot suhu, nilai *Integral Absolute Error* (IAE), dan konsumsi energi total. Hasil menunjukkan bahwa PID memiliki waktu tunak yang lebih singkat (6 menit) dibandingkan MPC (8 menit). Namun, kedua pengendali menghasilkan nilai overshoot suhu yang sama, yang menunjukkan bahwa penerapan MPC tidak memperburuk deviasi suhu maksimum.

Nilai IAE pada MPC lebih tinggi dibandingkan PID. Hal ini terutama disebabkan oleh waktu tunak MPC yang lebih lama, sehingga akumulasi error suhu menjadi lebih besar. Meskipun demikian, MPC menghasilkan konsumsi energi total yang lebih rendah, yaitu sekitar 56.59 Wh dibandingkan dengan 58.50 Wh pada PID, yang menunjukkan penghematan energi sekitar 3.27%.

Tabel 1. Perbandingan performa PID dan MPC

Pengendali	*Settling Time* (min)	*Overshoot* (°C)	IAE	*Energy* (Wh)
PID	6	6	1193	58.505
MPC	8	6	1429.1	56.587

4. Analisa Keseluruhan

Berdasarkan analisis respons suhu, profil daya, dan indikator performa kuantitatif, dapat disimpulkan bahwa *Model Predictive Control* (MPC) menawarkan pendekatan kendali yang lebih seimbang untuk sistem HVAC skala kecil. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun pengendali PID memiliki waktu tunak yang lebih cepat (sekitar 6 menit) dibandingkan MPC (sekitar 8 menit), MPC menghasilkan respons suhu yang lebih stabil setelah mencapai setpoint, yang ditunjukkan oleh minimnya fluktuasi suhu dan tidak adanya osilasi berkelanjutan di sekitar suhu referensi.

Stabilitas respons MPC ini diperoleh dari kemampuan pengendali dalam memprediksi perilaku suhu ruangan pada horizon prediksi tertentu dan menyesuaikan sinyal kendali HVAC secara bertahap. Hal ini tercermin pada profil daya HVAC MPC yang lebih halus dan tidak agresif dibandingkan PID. Secara kuantitatif, MPC menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah, yaitu sekitar 56,6 Wh, dibandingkan dengan PID sebesar 58,5 Wh, meskipun memerlukan waktu tunak yang sedikit lebih lama. Selain itu, nilai kesalahan *integral absolut* (IAE) MPC yang masih berada dalam rentang yang dapat diterima menunjukkan bahwa pengendali ini mampu menjaga akurasi pelacakan suhu dengan kualitas kendali yang lebih stabil.

Dengan demikian, keunggulan stabilitas MPC tidak hanya ditunjukkan oleh bentuk respons suhu yang lebih halus, tetapi juga oleh hasil prediksi dan evaluasi kuantitatif yang menunjukkan pengaturan input HVAC yang lebih terkontrol dan efisien secara energi dibandingkan pengendali PID.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas penerapan *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem HVAC skala kecil berbasis simulasi MATLAB serta membandingkannya dengan pengendali PID konvensional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua pengendali mampu mencapai dan mempertahankan setpoint suhu ruangan. Pengendali PID memiliki waktu tunak yang lebih singkat, namun menunjukkan respons yang lebih agresif, sedangkan MPC menghasilkan respons suhu yang lebih halus dan stabil dengan tingkat *overshoot* yang sebanding, meskipun memerlukan waktu tunak yang sedikit lebih lama.

Dari sisi konsumsi energi, MPC menunjukkan kinerja yang lebih efisien dibandingkan PID dengan konsumsi energi total yang lebih rendah. Penghematan energi ini dicapai tanpa mengurangi kualitas pengendalian suhu, sehingga MPC mampu memberikan *trade-off* yang lebih baik antara kenyamanan termal dan efisiensi energi. Berdasarkan hasil tersebut, MPC dapat dipertimbangkan sebagai alternatif strategi kendali yang efektif untuk sistem HVAC skala kecil, khususnya pada aplikasi yang memprioritaskan kestabilan suhu dan efisiensi energi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Palembang atas dukungan pendanaan melalui hibah internal penelitian, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

A. Afram, F. J.-S. (2017). Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems. *Energy and Buildings*, 96-113.

A. Parisio, E. R. (2014). A model predictive control approach to microgrid operation optimization. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 1813-1827.

Abdul, A., & Farrokh, J.-S. (2014). Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 343-355.

Afram, A. J.-s. (2021). Artificial Neural network based model predictive control for HVAC systems. *energy and Buildings*.

Agency, I. E. (2019). *Energy Efficiency in Buildings: Policies and Best Practices,.* Paris: IEA Publications.

ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook: Fundamental.* Atlanta: USA: ASHRAE.

Clarke, J. A. (2001). *eneegy simulation in Building Design, 2nd ed.* Oxford: UK: Butterworth-Heinemann.

E. F. Camacho and C. Bordons. (2013). *Model Predictive Control, 2nd ed.* London: Springer.

F. Oldewurtel, A. P. (2012). Use of Model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 15-27.

Hägglund, K. J. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd ed.* USA:ISA: Research Triangle Park, NC.

J. B. Rawlings and D. Q. Mayne. (2009). *Model Predictive Control: Theory and Design.* Madison, WI: USA: Nob Hill Publising.

J. Drgoňa, D. A. (2020). All you need to know about model predictive control for buildings. *Annual Reviews in Control*, 190-232.

Juan, H., Haoran, L., Natasa, N., & Gongsheng, H. (2022). Model predictive control under weather forecast uncertainty for HVAC systems in University buildings. *Energy & Buildings*.

K. Ogata. (1995). *Discrete-Time Control Systems, 2nd ed.* Upper Saddle River, NJ: USA: Prentice Hall.

Killian, M. &. (2017). Implementasi of cooperative fuzzy model predictive control for an energy-efficient office buildings. *Energy and Buildings*, 158.

Kolokotsa, D. (2016). the role of smart grids in the building sector. *Energy and Buildings*, 703-708.

Luis, P.-L., Jose , O., & Christine, P. (2008). A review on buildings energy consumtion information. *energy and buildings*, 394-398.

M. Killian and M. Kozek. (2016). Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. *Building and Environment*, 403-412.

Md, A., Rajam, K., Anil, S. y., Ranjeet, K. A., & V.P., S. (2023). Recent developments trends in HVAC (heating, ventilation, and air-conditionging) systems: A comprehensive review. *Materialstoday: Proceedings*.

Panagiotis, M., lakovos, M., Federico, M., Hasan Huseyin, C., & Elias, K. (2025). Model Predictive Control for Smart Buildings: Applications and Innovations in Energy Management. *Buildings*, 1-49.

S. Wang and Z. Ma. (2008). Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review. *HVAC&R Research*, 3-32.

Sachidananda, S., & Maneesh, K. (2022). MPC based energy system for grid-connected Smart Buildinings with EVs. *Emerging Technologies (GLobConET), IEEE IAS Global Conference on*.

Saman, T., Panis, H., & Ali, R. (2022). Model Predictive control of Heating ventilation, and Air conditioning (HVAC) systems: A State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*.

Shiyu , Y., Man, P. W., & Chen, W. (2020). Model Predictive control with adaptive machine-learning-based model for building energy efficiency and comfort optimization. *IET Electrical Systems in Transportastion*.

Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 291-309.

Y. Ma, A. K. (2012). Predictive control for energy efficient buildings with thermal storage. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 712-722.

Yaohua, T., Junchao, X., & Shen, Y. (2024). Energy Management Strategy Based on Model Predictive Control-Differential Evolution for hybrid energy storage system in Electric Vehicles. *IET electrical Systems in Transportation*, 1-13.

Yihang, L., Dang , R., Bin, Y., & Pengju, L. (2024). Energy-efficient control strategy for air conditioning and mechanical ventilation system based on occupant distribution-A case study on stratum ventilation. *Journal of Building Engineering*.

Yiqun, P., Mingya , Z., Yan, L., Yiqun, Y., Yumin, L., Ruxin, Y., . . . Xiaolei, Y. (2023). builidng energy simulation and its application for building performance optimization: a review of methods, tools, and case studies. *advances in Applied Energy*, 100135.