

SIMULASI DAN PEMODELAN STATE-SPACE PADA TEMPERATUR DAN KELEMBAPAN SISTEM HVAC

SIMULATION AND STATE-SPACE MODELING OF TEMPERATURE AND HUMIDITY IN HVAC SYSTEM

Totok Winarno, Achmad Komarudin , Anindya Dwi Risdhayanti, Lucky Nindya Palupi, Wahyu Tri Wahono, Dinda Mauriza Aulia

Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta 9 Malang, Jawa Timur, 65151

Email: totok.winarno@polinema.ac.id

ABSTRAK

Sistem *Heating, Ventilation, and Air-Conditioning* (HVAC) merupakan sistem yang membutuhkan pengendalian kendala, prediksi gangguan, kenyamanan termal ruangan dan konsumsi energi yang banyak. Membangun HVAC dengan teknik kontrol yang tepat dapat mengurangi konsumsinya. Alat yang dirancang ini dilengkapi dengan sensor yang dihubungkan dengan mikrokontroler Ni MyRio, sehingga kondisi suhu dan kelembapan ruangan dapat diketahui, serta memudahkan pengguna dalam memonitor data secara *real-time*. Pemodelan HVAC dibutuhkan untuk menganalisis kebutuhan *controller* yang tepat agar suhu ruangan yang diinginkan dapat tercapai dengan cepat. *Noise* pengukuran diestimasi menggunakan algoritma Kalman Filter, sehingga signifikansi pengaruh *noise* pengukuran pada sistem dapat diketahui. Hasil yang ditunjukkan adalah HVAC dapat dikontrol dan diamati. *Noise* proses dan vektor *noise* sensor menggunakan nilai kovarians *noise Q* sebesar 2,3 dan *R* sebesar 10, sama dengan yang digunakan untuk mendesain filter. *Measurement-error-covariance* dan *estimation-error-covariance* bernilai 1,0022 dan 1,0005, yang dihitung berdasarkan *error* sebelum dan sesudah *filtering*. Hal ini menunjukkan bahwa Kalman Filter dapat menurunkan *error* yang disebabkan oleh *noise* pengukuran.

Kata Kunci: Sistem HVAC, *Controllability*, *Observability*, Desain Kalman Filter, *Noise* Pengukuran

ABSTRACT

A Heating, Ventilation, and Air Conditioning System (HVAC) is a system that requires constrained control, prediction of disturbances, and the maintenance of thermal comfort in a room, which significantly affects building energy consumption. Constructing an HVAC system with proper control techniques can reduce excessive energy consumption. This tool is designed to monitor temperature and humidity in a room using temperature and humidity sensors connected to the Ni MyRio microcontroller, enabling real-time data monitoring for users. HVAC system modeling is necessary to analyze the requirement for the appropriate controller to quickly achieve the desired thermal temperature. To determine the demand for the optimal controller and expedite the attainment of the desired thermal temperature, HVAC system modeling is essential. The Kalman filter will also be utilized to evaluate measurement noise. The results demonstrate that the HVAC system can be controlled and monitored. The noise covariance value is 2.3, and R is 10, which are the same as those utilized to create the filter for the process noise and sensor noise vectors. The measurement error covariance was 1.0022, and the estimation error covariance was 1.005 when errors were calculated both before and after filtering. This illustrates how the Kalman Filter can reduce inaccuracies related to measurement noise

Keywords: *HVAC System, Controllability, Observability, Kalman Filter Design, Measurement Noise*

1. PENDAHULUAN

Sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) dibangun untuk kenyamanan *thermal* dengan kualitas udara yang baik bagi pengguna ruangan. Namun, sistem HVAC membutuhkan banyak konsumsi energi. Membuat dan membangun sistem ini dengan teknik kontrol yang tepat akan mengurangi kebutuhan konsumsi energi. Sistem pendingin udara adalah komponen yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Sekitar 60% dari energi yang dikonsumsi di area perumahan digunakan untuk sistem pendingin udara (Kassas, 2015).

Pemodelan sistem dilakukan untuk menemukan metode kontrol yang tepat untuk diterapkan pada sistem yang akan dikontrol. Penelitian tentang pemodelan sistem telah banyak dilakukan, diantaranya yaitu simulasi *switching control* berdasarkan model terprediksi (Karsid & Aziz, 2016). Pemodelan sistem juga dapat dilakukan secara eksperimental, data masukan dan keluaran dimodelkan dengan algoritma ARMAX4441. Data diambil menggunakan *data-logger* yang terbuat dari Arduino, hasilnya menunjukkan pemodelan yang tepat dengan tingkat kepercayaan tinggi (Karsid & Aziz, 2019). Pemodelan matematis dapat diturunkan dari Persamaan hukum fisika

yang berlaku pada sistem HVAC. Beberapa sistem dinamik, seperti mekanik, listrik, termal, hidraulik dan sebagainya dapat dikarakteristikan dengan Persamaan diferensial. Persamaan tersebut dapat diperoleh dengan beberapa hukum fisika yang berlaku pada sistem yang ditinjau (KKN Undip, 2017).

Noise pengukuran dapat mempengaruhi karakteristik dari sistem yang ditinjau. Ada banyak kemungkinan bahwa sinyal yang tidak diinginkan dalam variabel proses dan sinyal informasi lainnya dari industri dan lingkungan tergabung pada pengukuran atau pengujian yang dilakukan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah filter Kalman. Tujuan dari filter Kalman adalah untuk mengestimasi keluaran *plant* yang sebenarnya berdasarkan pengukuran *noise*. Desain filter Kalman juga untuk menurunkan *error* yang disebabkan oleh *noise* pengukuran (Anadranistakis, 2004).

Pada jurnal ini akan dibahas tentang penentuan parameter yang digunakan pada sistem HVAC, untuk kemudian dihasilkan Persamaan *state-space*. Dari Persamaan *state-space* yang telah ditentukan kemudian didesain filter Kalman untuk didapatkan *error* minimum.

2. TEORI DASAR

2.1 HVAC SYSTEM

HVAC adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengatur suhu dan kelembapan udara pada suatu ruangan, agar kondisi suhu dan kelembapan udara pada ruangan tersebut menjadi nyaman. Tujuan dari suatu sistem HVAC adalah untuk membuat suasana yang nyaman bagi pengguna dengan mengkondisikan variabel udara dalam ruangan yang meliputi suhu, kelembapan dan udara bersih. Sistem pengkondisian udara yang baik akan menghasilkan udara segar sehingga diperoleh kenyamanan yang baik bagi manusia, mesin maupun lingkungan sekitar. Tingkat kenyamanan yang baik akan meningkatkan kinerja dari manusia maupun mesin yang digunakan. Prinsip kerja sistem HVAC ini sebagai pergantian udara ruangan dengan udara segar dari lingkungan. Kolaborasi udara masuk menuju *Air Handling Unit* (AHU) melewati beberapa bagian seperti : filter, kipas (*blower*), koil *evaporator* (*cooling*) dan pemanas (*heating*). Setelah terjadi penurunan suhu kemudian disalurkan melalui pipa saluran udara (*ducting*) ke ruangan secara merata.

2.2 Controllability

Suatu sistem dikatakan terkendali jika semua keadaan benar-benar dapat

dikendalikan. Suatu sistem dapat dikontrol jika setiap keadaan pada sistem tersebut dapat dikontrol dengan sedemikian rupa sehingga keadaan awal dapat dipindahkan ke keadaan yang diinginkan dalam waktu terbatas, dengan persamaan [1] dan [2] berikut :

$$\dot{\chi} = A\chi + Bu \dots\dots\dots [1]$$

$$y = C\chi + Du \dots\dots\dots [2]$$

dengan,

- A adalah matriks sistem
- χ adalah vektor keadaan
- B adalah matriks input kontrol
- u adalah vektor input
- C adalah matriks output
- y adalah vektor output
- D adalah matriks langsung

Keadaan $x(t)$ pada $t = 0$ dikatakan terkendali jika keadaan dapat didorong ke keadaan yang diinginkan $x(t_f)$ dalam beberapa waktu terbatas $t = t_f$ dengan penerapan input kontrol kontinu $u(t)$. Pengujian untuk mengendalikan dari *controllability* dengan matriks yang dikontrol Qc dengan persamaan [3] dan [4], sebagai berikut :

$$Qc = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \dots\dots\dots [3]$$

$$|Qc| \neq 0 \text{ dan } \text{rank}(Qc) = n \dots\dots\dots [4]$$

2.3 Observability

Suatu sistem dikatakan dapat diamati jika keadaanya dapat ditentukan dari pengetahuan tentang masukan $u(t)$ dan keluarannya $y(t)$ selama selang waktu yang berhingga, dengan persamaan sistem sebagai berikut :

$$\dot{\chi} = A\chi + Bu \dots\dots\dots [5]$$

$$y = C\chi + Du \dots\dots\dots [6]$$

dengan,

- A adalah matriks sistem
- χ adalah vektor keadaan
- B adalah matriks input kontrol
- u adalah vektor input
- C adalah matriks output
- y adalah vektor output
- D adalah matriks langsung

Keadaan $x(t_0)$ pada $t = t_0$ untuk suatu sistem dikatakan dapat diamati jika untuk waktu terbatas yang diinginkan $t = t_f > t_0$, pengetahuan tentang input $u(t)$ dan output $y(t)$ selama interval $t_0 < t < t_f$ dapat dihitung. Pengujian untuk observabilitas dengan matriks yang dikontrol Q_b :

$$Q_b = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots [7]$$

$|Q_b| \neq 0$ dan $rank(Q_c) = n$

2.4 Kalman Filter

Filter kalman adalah sebuah proses pendugaan dalam keadaan optimal yang diterapkan pada suatu sistem dinamis dan melibatkan derau acak. Optimal disini berarti meminimalkan *error*. Ada tiga alasan dasar mengapa sistem deterministik dan teori kontrol tidak cukup akurat dalam analisis, antara lain :

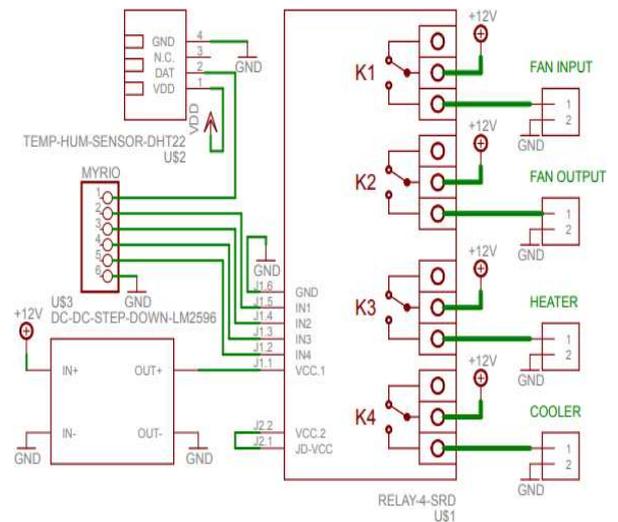
- Model matematis tidak sempurna
- Sistem dinamis dipengaruhi oleh kontrol *input* tetapi juga oleh gangguan

– gangguan yang tidak terkontrol atau tidak dapat dimodelkan secara deterministik

- Sensor tidak memberikan data yang sempurna dan lengkap.

3. METODOLOGI

Pada jurnal ini dirancang perangkat *software* dan *hardware* untuk menghasilkan sistem HVAC untuk mengendalikan suhu dan kelembapan. Pada desain kendali suhu dan kelembapan pada sistem HVAC membutuhkan sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu dan kelembapan ruangan. Aktuator yang digunakan pada sistem ini yaitu *thermoelectric cooler* di mana alat ini memiliki 2 sisi yang berbeda yaitu *cooling* sebagai pendingin dan *heater/heatsink* sebagai pemanas.



Gambar 1. Wiring Diagram

Gambar 1 menunjukkan perancangan *wiring* pada masing-masing komponen ke *processor* yang berupa sensor DHT22, *Step Down*, Ni myRIO 1900, *relay 4 channel*, *intake fan (input fan)*, *exhaust fan (output fan)*, *heater*, *thermoelectric cooler*.



Gambar 2. *Hardware*

Gambar 2 menunjukkan perancangan *hardware*. Terdiri dari 2 unit yaitu ruangan dari sistem yang akan diuji suhu dan kelembapannya dan unit HVAC yang diatur menggunakan mikrokontroler.

Parameter-parameter yang didapatkan saat pengujian dijelaskan pada Tabel 1, selanjutnya parameter ini digunakan untuk pemodelan *state-space*.

Tabel 1. Parameter sistem HVAC

Parameter	Nominal	Satuan
M	0,1625	kg
c	1,470	J/kg.K
Req	0,12	K/W
A	0,25	m ²
R	0,287	kJ/kg.K
bs	0,125	m ³
Mf	0,0542	kg/s
pv	2,4	W

dengan,

- M adalah Massa udara dalam ruangan
- C adalah kapasitas panas udara saat tekanan konstan
- Req adalah Resistansi panas *equivalent* ruangan
- A adalah luas penampang ruangan
- Bs adalah volume ruangan
- Mf adalah massa udara rasio aliran AC
- pv adalah daya *thermoelectric cooler*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan *state-space* sistem HVAC didapatkan dari penurunan rumus hukum fisika termodinamika yang ditunjukkan pada persamaan [5] dan [6]. Dimana matriks *plant* dan keluaran adalah sebagai berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 14.49 & 0 \\ 0 & 35.8e-06 \end{bmatrix} \dots\dots [8]$$

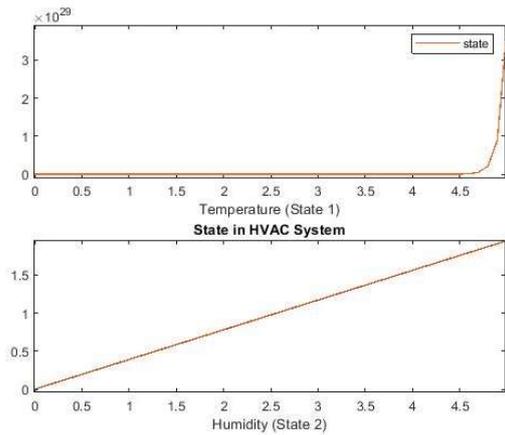
$$B = \begin{bmatrix} 0.19 \\ 0.39 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 1]$$

$$D = [\]$$

Kemudian matriks-matriks pada Persamaan [8] disubstitusi ke Persamaan [5] dan [6] menghasilkan Persamaan *state-space* sistem HVAC.

Hasil respon keluaran ditunjukkan pada Gambar 3. Plot pertama menunjukkan hasil *state* pertama $x_1(t)$ dalam hal ini adalah suhu dan plot kedua adalah *state* kedua $x_2(t)$ dalam hal ini adalah kelembapan.



Gambar 3. Plot Respon Keluaran Sistem HVAC

Pengecekan *controllability* dan *observability* dilakukan dengan mencari nilai matriks Co dan Ob , didapatkan hasil sebagai berikut :

- Matriks *controllability* sistem HVAC

$$Co = \begin{bmatrix} 0.19 & 2.7531 \\ 0.39 & 1.3962e-05 \end{bmatrix}$$

$$unco = length(A) - rank(Co) \dots\dots [9]$$

$$unco = 0$$

- Matriks *Observability*

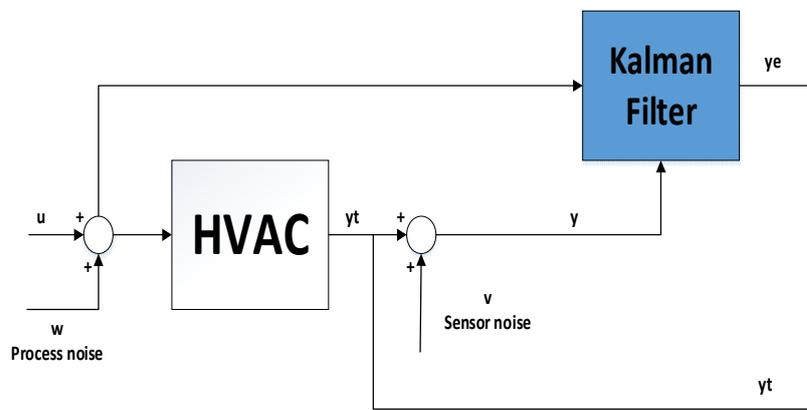
$$Ob = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 14.49 & 0 \end{bmatrix}$$

$$unob = length(A) - rank(Ob) \dots\dots [10]$$

$$unob = 0$$

Dari hasil perhitungan matriks *controllability* dan *observability*. Jumlah *uncontrollable states* dihitung dengan persamaan [9] menghasilkan 0 (nol) *uncontrollable states*, jumlah *unobservable states* dihitung dengan persamaan [10], menghasilkan 0 (nol) *unobservable states*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem HVAC yang dirancang sepenuhnya dapat dikontrol dan diamati.

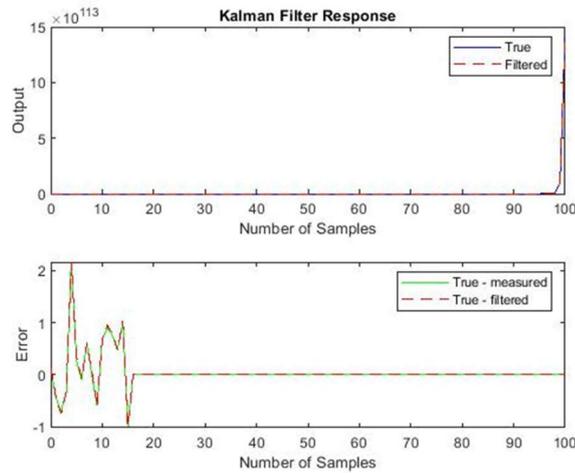
Desain filter Kalman yang ditunjukkan pada Gambar 4 dilakukan untuk simulasi sistem HVAC jika diberikan *random noise* proses dan *noise* sensor. Diharapkan desain filter Kalman akan dapat menurunkan *error* dari *noise* pengukuran. Masukan HVAC terdiri dari input u dan *noise* proses w . Keluaran HVAC adalah respon sebenarnya yt dan *noise* sensor v . Hasilnya adalah sebuah model simulasi dengan masukan w, v , dan u dan keluaran yt dan estimated response ye . Sinyal yt dan ye adalah keluaran *plant* dan filter.



Gambar 4. Blok Diagram Desain Filter Kalman

Masukan *plant* HVAC (u) menggunakan sinusoidal input *vector* untuk mensimulasikan perilaku filter.

Kovarians *noise* proses Q sebesar 2,3 dan kovarians sensor *noise* sebesar 10. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Simulasi Desain Filter Kalman untuk sistem HVAC

Plot kedua dalam Gambar 5 menunjukkan bahwa filter Kalman menurunkan *error* $y_t - \hat{y}_t$ yang disebabkan oleh *noise* pengukuran. Konfirmasi tentang hal ini dengan melakukan perhitungan kovarians *error* sebelum terfilter (*measurement error covariance*) dan setelah terfilter (*estimation error covariance*) ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini menyatakan bahwa filter Kalman dapat menurunkan *error* yang disebabkan oleh *noise* pengukuran yang terdiri dari *noise* proses dan *noise* sensor.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kovarians *Error*

Kovarians <i>Error</i>	Nilai
MeasErrCov	1,0022

EstErrCov	1,0005
-----------	--------

5. KESIMPULAN

Sistem HVAC yang telah dirancang menunjukkan bahwa sistem dapat dikontrol dan diamati, sehingga dapat dilanjutkan untuk menentukan metode kontrol yang tepat sesuai dengan respon keluaran. Desain filter Kalman menggunakan parameter Q sebesar 2,3 dan R sebesar 10 yang didapatkan untuk menghasilkan *random noise* yang akan mempengaruhi sistem. Desain filter Kalman bertujuan untuk menurunkan nilai *error* akibat adanya *noise* pengukuran. Hal ini dikonfirmasi dengan nilai kovarians *error* pengukuran (sebelum terfilter) sebesar 1,0022 dan

nilai kovarians *error* terestimasi (setelah terfilter) sebesar 1,0005.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada P2M Politeknik Negeri Malang yang membiayai pembuatan *prototype* sistem HVAC ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

Anadranistakis, Manolis;dkk. (2004). Correcting temperature and humidity forecasts using Kalman filtering: potential for agricultural protection in Northern Greece. *Atmospheric Research* 71 (2004) 115 – 125.

Andrizal, Andrizal, and Yul Antonisfia. (2020). Sistem Kontrol Berbasis Pemrograman LabVIEW MyRIO untuk Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)* 4.5 (2020): 930-936.

Faizal, Mohamad, and Rudi Saputra. (2017). Perancangan Ulang Sistem HVAC Pada Gedung Perkantoran X di Jakarta Dengan Metode CLTD. *Bina Teknika* 12.1 (2017): 139-142.

Husodo, Budi Yanto, and Nurul Atiqoh Br Siagian. (2014). Analisa audit konsumsi energi sistem hvac (heating, ventilasi, air conditioning) di terminal 1a, 1b,

dan 1c bandara soekarno-hatta. *Jurnal Teknologi Elektro Universitas Mercu Buana* 5.1 (2014): 49-58.

Karsid, Rofan Aziz (2016). Studi Perbandingan Model dan Aplikasi Kontrol On-Off pada Cold Storage Jamur Merang. *Jurnal Teknologi* : Vol. 9 No.2, 2016.

Karsid, Rofan Aziz. (2019). Identifikasi Model Parametrik Sistem Suhu dan Kelembapan Udara Greenhouse Secara Eksperimental. *Jurnal Matriks*, Vol. 9, No. 2, 2019.

Kassas, M. (2015). Modeling and Simulation of Residential HVAC Systems Energy Consumption. *SEIT* 2015. doi: 10.1016/j.procs.2015.05.123.

KKN Universitas Diponegoro. (2017) Diakses tanggal 28 Agustus 2022. <http://kkn.undip.ac.id/?p=77291>

Makasenggehe, Nolvensius Ch. "Perancangan Power Supply Digital Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Keypad Sebagai Pemilih Tegangan." *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer* 1.1 (2012).

Peryoga, Laksana Widya. (2020) *Pengendalian Suhu Kelembapan Ruang Ekstraksi Metode Maserasi Minyak Atsiri Melati Kontroler PID Berbasis*

Arduino Mega. Diss. Universitas Brawijaya.

Satya, Trias Prima, et al. (2020) Analisis Akurasi Sistem sensor DHT22 berbasis Arduino terhadap Thermohygrometer Standar. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya* 16.1 (2020): 40-45.

Virdaus, Muchamad Seno Sahisnu, and Eko Ihsanto. (2021). Rancang Bangun Monitoring Dan Kontrol Kualitas Udara Dengan Metode Fuzzy Logic Berbasis Wemos. *Jurnal Teknologi Elektro* 12.1 (2021): 22-28.