

Kontrol Ventilasi Mekanis Berbasis pada Jumlah Estimasi Penghuni menggunakan Sensor Karbon Dioksida

Haolia Rahman^{*1}, Agus Sukandi¹, Nasruddin², Arnas², Remon Lapisa³

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta,

Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Depok, Jawa Barat, Indonesia, 16425

²Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,

Kampus Baru UI, Depok Jawa Barat, Indonesia 16424

³Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang,

Jl. DR Hamka, Kampus UNP Air tawar, Padang, Indonesia 25142

Abstrak

Ventilasi merupakan unsur penting untuk menjaga kualitas udara yang baik di dalam sebuah bangunan. Namun, penggunaan ventilasi yang berlebihan menyebabkan tingginya konsumsi energi dari sistem HVAC. Standar American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) telah memberikan aturan bahwa laju ventilasi tergantung dari banyaknya penghuni dan luas ruangan di dalamnya. Oleh karena itu kuantifikasi populasi penghuni perlu diketahui sebagai acuan sebuah kontrol ventilasi. Pada penelitian ini, jumlah penghuni diestimasi menggunakan metode Bayesian MCMC berdasarkan level CO₂ di dalam ruangan. Persamaan kesetimbangan massa CO₂ digunakan sebagai model perhitungan Bayesian MCMC. Pengujian metode Bayesian dalam mengestimasi jumlah penghuni diaplikasikan pada sebuah ruangan kantor skala kecil berukuran 96,7 m³ yang dilengkapi dengan sistem ventilasi, sehingga estimasi penghuni dan kontrol ventilasi dapat dilakukan secara bersamaan. Pengujian juga mencakup kontrol ventilasi konvensional menggunakan level CO₂ secara langsung tanpa mengkonversinya menjadi jumlah penghuni. Laju ventilasi berdasarkan jumlah penghuni pada ruangan pengujian mengacu pada standar ASHRAE 62.1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol ventilasi berbasis pada estimasi jumlah penghuni menggunakan metode Bayesian berhasil dilaksanakan dengan nilai laju ventilasi per penghuni lebih mendekati standar ASHRAE 62.1 dibandingkan dengan ventilasi metode konvensional.

Kata kunci: estimasi penghuni; kontrol ventilasi; Bayesian MCMC; karbon dioksida; persamaan kesetimbangan massa.

Abstract

[**Title: Mechanical ventilation control based on estimated occupancy using a carbon dioxide sensor**] Ventilation is an important aspect to maintain good indoor air quality in a building. However, excessive ventilation causing high energy consumption of the HVAC system. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard provides a guideline to set the ventilation rate that depends on the occupants' number and space. Thus, quantification of the number of occupants is required to regulate the ventilation rate. In this study, the estimated number of occupants was estimated using a Bayesian MCMC method based on CO₂ levels. The mass balance equation of the CO₂ is used as a model for the calculation of Bayesian MCMC. The Bayesian method for estimating the occupants' number is tested in a 96,7 m³ office room equipped with a ventilation system. Thus the occupancy estimation and control of ventilation can be done in real-time. The test also includes conventional ventilation control based on CO₂ levels directly without converting to the occupants' number. The ventilation rate based on the number of occupants at the present test chamber refers to ASHRAE 62.1. The test results show that ventilation controlled by the estimated number of occupants using the Bayesian method successfully conducted with ventilation rate per occupant closer to the ASHRAE 62.1 standard over conventional ventilation method.

^{*)} Penulis Korespondensi.

E-mail: haolia.rahman@mesin.pnj.ac.id

Keywords: occupancy estimation; ventilation control; Bayesian MCMC; carbon dioxide, mass balance equation

1. Pendahuluan

Hampir sebagian besar bangunan modern dilengkapi dengan sistem *heating ventilation and air conditioning* (HVAC) yang bertugas untuk menyediakan kenyamanan serta kesehatan udara bagi penghuni gedung. Salah satu komponen penting dalam sistem HVAC yaitu ventilasi yang dapat menjamin ketersediaan oksigen serta membuang polusi yang terdapat di dalam ruangan masih banyak diabaikan. Penghuni gedung lebih dapat merasakan nyaman termal dibandingkan ketersediaan oksigen serta polusi karena kenyamanan termal dapat dirasakan secara langsung. Padahal, kurangnya ventilasi di dalam gedung dapat menyebabkan beberapa penyakit seperti gejala *Sick Building Syndrom* (SBS) misalnya pusing, mengantuk hingga dapat menurunkan produktivitas kerja didalam ruangan (Camelia, 2011), dan pertumbuhan jamur (Nasruddin *dkk.*, 2018). Untuk itu ventilasi yang cukup merupakan faktor pendukung utama agar kesehatan udara penghuni dapat terjaga selain kenyamanan termal. Namun, perlu diperhatikan juga bahwa ventilasi yang berlebihan dapat menyebabkan tingginya konsumsi energi karena terbuangnya udara ruangan yang telah terkondisikan.

Kontrol ventilasi sesuai permintaan atau lebih dikenal dengan *demand-controlled ventilation* (DCV) merupakan istilah yang umum pada bangunan modern untuk mengontrol ventilasi sesuai dengan jumlah okupansi atau ventilasi sesuai kebutuhan. Output yang diharapkan dari sistem DCV yaitu mampu menjaga kualitas udara di dalam ruangan sekaligus dapat meminimalisir energi yang digunakan oleh sistem HVAC (Lu *dkk.*, 2011).

Cara yang paling umum untuk menentukan DCV adalah menggunakan jadwal, level CO₂ atau berdasarkan jumlah penghuni di dalam ruangan. Jika pola okupansi telah diketahui dalam sebuah bangunan maka pemrograman berdasarkan jadwal dapat dilakukan untuk mengontrol jumlah ventilasi melalui *supply fan* atau pengaturan *dampner*. *The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) Standard 90.1-2004 telah menyediakan jadwal untuk beberapa jenis gedung sehingga *timer* sederhana dapat diaplikasikan pada jenis kontrol ini (Duarte *dkk.*, 2013). Level CO₂ di dalam ruangan merupakan indikator yang baik untuk mengetahui kebutuhan ventilasi. Level CO₂ yang tinggi di dalam sebuah ruangan mengindikasikan menurunnya kadar oksigen serta perlunya udara segar sebagai pengganti. Untuk itu, DCV berbasis pada level CO₂ di dalam ruangan merupakan jenis kontrol yang paling banyak digunakan oleh manajemen gedung selama beberapa dekade. Namun demikian, gas CO₂ di dalam ruangan tidak merepresentasikan sepenuhnya kebutuhan penghuni akan udara segar serta gas CO₂ tidak menjamin tingkat polusi yang dikeluarkan oleh zat lainnya (Schibuola *dkk.*, 2018).

Kontrol ventilasi berdasarkan jumlah penghuni merupakan strategi yang paling tepat sesuai standar ASHRAE 62.1-2007 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007). Namun demikian mengukur populasi di dalam ruangan tidaklah mudah. Beberapa metode dan sensor dapat digunakan untuk menentukan jumlah penghuni diantaranya menggunakan sensor *passive infrared* (PIR) (Duarte *dkk.*, 2013), *radio frequency identification* (RFID) *tag* (Li *dkk.*, 2012), video kamera (Yang *dkk.*, 2020) dan sensor CO₂ (Rahman & Han, 2017a). Dengan alasan privasi dan keleluasaan dalam perhitungan jumlah penghuni, sensor CO₂ merupakan metode paling nyaman untuk digunakan. Namun demikian, kuantifikasi jumlah okupansi berdasarkan level CO₂ tidaklah mudah. Hal ini terutama dikarenakan kenaikan atau penurunan level CO₂ secara eksponensial sedangkan perubahan jumlah penghuni terjadi secara bertahap.

Pendekatan umum untuk mendapatkan jumlah penghuni berdasarkan level CO₂ yaitu dengan model fisik melalui persamaan kesetimbangan massa (Cali *dkk.*, 2015). Tetapi, penyelesaian menggunakan model fisik harus dapat menangani dengan baik adanya infiltrasi, ketidakpastian pada pembacaan sensor CO₂ serta masalah pencampuran udara (*air mixing*) di dalam ruangan. Untuk mengatasi masalah ketidakpastian dalam pembacaan sensor CO₂, metode probabilitas dapat digunakan, salah satunya dengan mengadopsi konsep Bayesian MCMC (Rahman & Han., 2017b; Rahman & Han., 2017c). Pendekatan lainnya yang juga umum digunakan adalah *machine learning* (Alam *dkk.*, 2017), tetapi metode ini membutuhkan *dataset* yang besar sebagai pembelajaran awal.

Studi yang berkaitan dengan kontrol ventilasi berdasarkan jumlah penghuni dimana metode kesetimbangan massa diaplikasikan, terbatas pada ruangan dengan kapasitas jumlah penghuni puluhan dan sulit untuk diaplikasikan pada ruangan kecil (Sun *dkk.*, 2011). Untuk itu, konsep baru untuk mengontrol ventilasi menggunakan jumlah estimasi penghuni dengan kapasitas ruangan kecil diusulkan pada penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini untuk menerapkan algoritma estimasi jumlah penghuni pada aplikasi kontrol ventilasi berdasarkan jumlah penghuni. Jumlah populasi okupansi diestimasi melalui input parameter perubahan level CO₂ dan laju kecepatan ventilasi yang terukur. Input parameter diproses menggunakan metode Bayesian MCMC yang berbasis pada pendekatan model fisik. Metode Bayesian MCMC dapat membantu menangani masalah-masalah pada pendekatan model fisik melalui teori probabilitas. Investigasi perlu dilakukan untuk mengetahui faktor apa saja yang mempengaruhi keakuratan estimasi. Selain itu evaluasi laju ventilasi dari konsep baru ini perlu divalidasi dengan standar ventilasi yang ada maupaun dengan kontrol ventilasi konvensional.

2. Metode Penelitian

2.1 Model Bangunan

Pengujian sistem kontrol dilakukan secara eksperimen dalam ruangan berukuran 96,7 m³. Ruangan tersebut merupakan ruang kantor skala kecil yang dapat mengakomodasi 6 meja okupan. *Ducting* terpasang diatas langit-langit ruangan yang menghubungkan saluran udara masuk (SA) dan keluar (RA). Laju udara masuk dan keluar ruangan dikontrol melalui kipas *exhaust*. Sensor CO₂ dan sensor kecepatan udara dipasang di dalam *ducting* masuk maupun keluar seperti terlihat pada Gambar 1. Sensor CO₂ dikalibrasi menggunakan dua gas CO₂ standar (500 ppm dan 2000 ppm) dengan akurasi sensor ±3 % per 0-5000 ppm. Sensor CO₂ lainnya dipasang di tengah ruangan pada ketinggian 2 meter dari lantai. Laju aliran udara di dalam *ducting* diukur menggunakan *hot-wire* anemometer dengan mengadopsi metode Log-Tchebycheff (International Organization for Standardization, 2008). dalam merubah kecepatan udara menjadi laju aliran. *Counter sensor* dipasang pada pintu untuk mendeteksi jumlah penghuni yang masuk dan keluar. Sehingga pengukuran penghuni aktual dijadikan acuan untuk memverifikasi hasil estimasi penghuni. Validasi diasumsikan sebagai tingkat keakuratan estimasi yang diekpresikan melalui koefisien variansi (CV) dalam persen seperti tertuang pada Persamaan 1.

$$CV(\%) = \sqrt{\frac{\sum(N_e - N_a)^2}{\bar{N}_a n}} \times 100\%, \quad (1)$$

dimana N_e adalah jumlah penghuni estimasi dan N_a adalah jumlah penghuni aktual, \bar{N}_a adalah jumlah rata-rata penghuni aktual, dan n adalah jumlah data yang diobservasi.

Sinyal dari keseluruhan sensor masuk menuju data akuisisi (DAQ) dengan penyimpanan data per 1 menit interval. Data dari DAQ diproses oleh komputer menggunakan software LabView dimana algoritma Bayesian dan kontrol juga dijalankan melalui *interface* yang sama. Alur sistem kontrol ventilasi serta pengukurannya dapat terlihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Tabel 6-1 pada standar ASHRAE 62.1 laju ventilasi minimum pada gedung kantor

Gedung kantor	q_N (L/s·person)	q_A (L/s·m ²)
Ruang kantor	2.5	0.3
Area resepsionis	2.5	0.3
Ruang data	2.5	0.3
Lobi masuk utama	2.5	0.3

2.2 Bayesian MCMC

Metode Bayesian digunakan untuk mengatasi ketidakpastian pada variabel-variabel pengukuran. Mengacu kepada teorema Bayes dimana probabilitas *posterior* dihitung dari probabilitas *prior* dan fungsi *likelihood* seperti diformulasikan pada Persamaan 2.

$$\pi(N|C) = \frac{\pi(N)f(C|N)}{\int \pi(N)f(C|N)dN}, \quad (2)$$

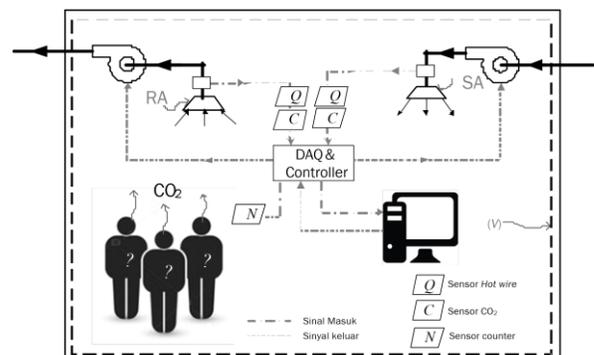
dimana $\pi(N|C)$ adalah probabilitas *posterior* dari jumlah penghuni (N) yang dihitung berdasarkan konsentrasi CO₂ yang diobservasi (C). Simbol $\pi(N)$ merupakan probabilitas *prior* dari N dimana menggabungkan semua asumsi terhadap N , dan $f(C|N)$ adalah fungsi *likelihood* dari kemungkinan CO₂ dari N yang mengacu pada persamaan kesetimbangan massa CO₂ di dalam ruangan seperti ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$V \frac{dC(t)}{dt} = \dot{m}N + Q(C_\infty - C(t)), \quad (3)$$

dimana V adalah volume dari ruangan, $\frac{dC(t)}{dt}$ adalah perubahan kadar CO₂ di dalam ruangan perinterval sampling. Solusi umum dari Persamaan Diferensial Biasa pada persamaan 3 ditunjukkan pada persamaan 4. Kadar konsentrasi CO₂ saat ini ($C(t)$) ditentukan oleh konsentrasi sebelumnya ($C_{t-\Delta t}$), konsentrasi yang diproduksi ($\dot{m}N$) dan konsentrasi dari udara masuk (C_{SA}). Faktor eksponensial ($exp(-Q/V\Delta t)$) yang tergantung pada laju pergantian udara perjam (Q/V) serta interval waktu perhitungan (Δt) yang telah ditentukan sebanyak 5 menit per interval.

$$C_t = \frac{\dot{m}N}{Q} + C_{t-\Delta t} + (C_{t-\Delta t} - C_{SA} - \frac{\dot{m}N}{Q})e^{-\frac{Q}{V}\Delta t}. \quad (4)$$

Penentuan distribusi input *prior* dilakukan berdasarkan informasi probabilitas terjadinya sebuah kejadian. Hal ini dapat dilakukan berdasarkan observasi maupun pengukuran, dimana informasi probabilitas berbentuk nilai rata-rata dan standar deviasi. Empat



Gambar 1. Layout sistem kontrol

variabel input yang ditentukan meliputi jumlah okupansi (N), produksi CO_2 per penghuni (\dot{m}), konsentrasi CO_2 udara masuk (C_{SA}) serta laju ventilasi (Q). Distribusi uniform ditetapkan pada *prior* N dengan nilai minimum 0 orang dan maksimum 10 orang yang disesuaikan dengan kapasitas ruangan. Sedangkan tiga distribusi *prior* lainnya diasumsikan sebagai distribusi Gaussian. Nilai rata-rata dari distribusi *prior* \dot{m} diasumsikan 0.553 g/min. per orang, atau setara dengan laju metabolisme ketika melakukan aktivitas di kantor. Standar deviasi dari \dot{m} ($\sigma_{\dot{m}}$) diasumsikan 30% dari nilai rata-rata atau setara dengan perbedaan level metabolisme duduk dan berjalan (Persily and de Jonge, 2017). Nilai rata-rata Q di tentukan berdasarkan pengukuran dengan asumsi standar deviasi 30% ($\sigma_{c_{out}}$). Sedangkan untuk konsentrasi CO_2 dari udara masuk diasumsikan memiliki konsentrasi 420 ppm dengan 5% standar deviasi (σ_Q).

2.3 Skema kontrol

Skema kontrol dibuat untuk mengetahui besarnya udara luar yang masuk melalui kontrol yang telah ditentukan. Dua skema kontrol ventilasi yaitu skema pertama kontrol proporsional terhadap level CO_2 , dan skema kedua kontrol berdasarkan jumlah perkiraan penghuni. Untuk kontrol ventilasi yang pertama mengacu pada (Schell *dkk.*, 1998) yang mana tinggi dan rendahnya laju udara masuk sebanding dengan tinggi dan rendahnya konsentrasi CO_2 di dalam ruangan seperti diformulasikan melalui Persamaan 5.

$$Q = \frac{C_R - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} (Q_{max} - Q_{min}) + Q_{min}, \quad (5)$$

dimana, C_R , C_{min} , C_{max} , adalah konsentrasi CO_2 yang terukur pada sensor, minimal, dan maksimal secara berurutan. Nilai konsentrasi minimal diset 420 ppm yang mengacu pada nilai konsentrasi CO_2 rata-rata udara luar, sedangkan nilai konsentrasi maksimum diset 1000 ppm mengacu pada ASHRAE 62-1989 (ASHRAE, 1989). Untuk laju aliran minimal (Q_{min})

diasumsikan sebesar 11,1 L/s atau setara dengan ventilasi minimum untuk ruangan kosong dan laju aliran maksimal adalah 41,67 L/s yang setara dengan kebutuhan ventilasi untuk 6 orang.

Skema kontrol kedua adalah kontrol ventilasi mengacu pada standar ASHRAE 62.1-2007 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007) dimana kebutuhan laju ventilasi merupakan penjumlahan laju ventilasi untuk penghuni (Q_N) dan laju ventilasi sesuai dengan luasan (Q_A) seperti terlihat pada Persamaan 6. Laju ventilasi untuk masing-masing komponen juga terjabar pada persamaan 7 yaitu laju ventilasi per penghuni (q_N) dan laju ventilasi per area (q_A) yang mengacu pada Tabel 6-1 pada standar ASHRAE 62.1-2007 Adapun ruang pengujian diasumsikan sama dengan ruangan kantor dimana nilai q_N dan q_A tercantum pada Tabel 1.

$$Q = Q_N + Q_A, \quad (6)$$

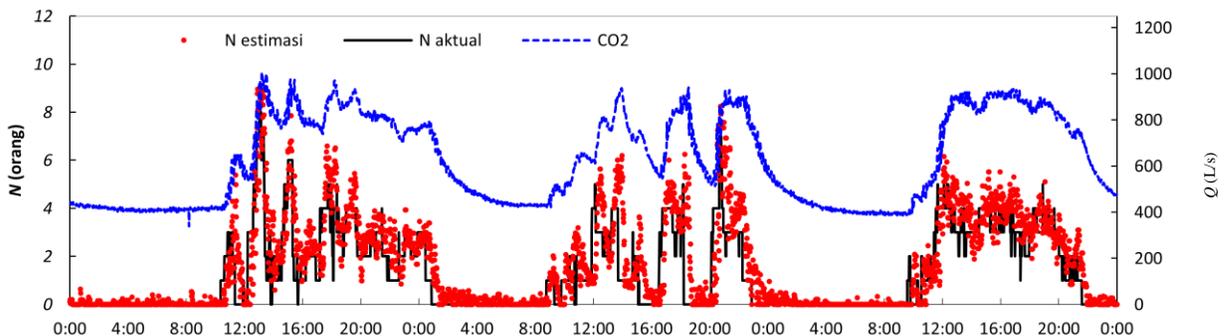
$$Q = q_N N + q_A A. \quad (7)$$

3. Hasil dan Pembahasan

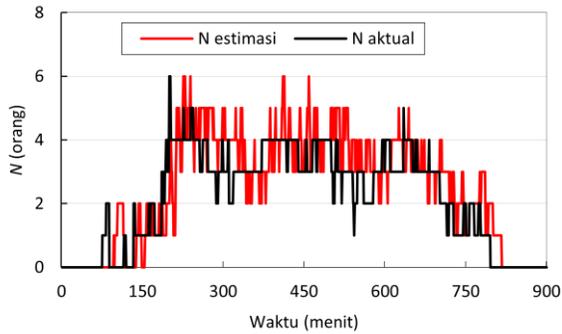
3.1 Estimasi jumlah penghuni

Rekaman jumlah okupansi aktual serta level CO_2 di dalam ruangan selama 3 hari dapat dilihat pada Gambar 2. Dimana level CO_2 meningkat dan menurun secara eksponensial. Titik merah menggambarkan jumlah estimasi penghuni menggunakan metode Bayesian yang secara dinamis terlihat mengikuti pola penghuni aktual. Nilai CV diperoleh dari perhitungan adalah 52%. Error yang cukup tinggi ini dikarenakan dua faktor utama yaitu fluktuasi data CO_2 dan waktu tunda dari estimasi. Untuk melihat lebih detail efek dari waktu tunda, Gambar 3 menunjukkan profil okupansi aktual dan profil penghuni terestimasi yang dibulatkan sebagai dasar kontrol ventilasi di hari ketiga pengujian. Dari Gambar 3 terlihat bahwa profil penghuni terestimasi bergeser dari profil penghuni aktual.

Untuk mengetahui jumlah waktu tunda pada sistem ventilasi yang sudah dibangun, analisa dilakukan



Gambar 2. Profil CO_2 , jumlah penghuni aktual dan estimasi pada skema kontrol ventilasi kedua



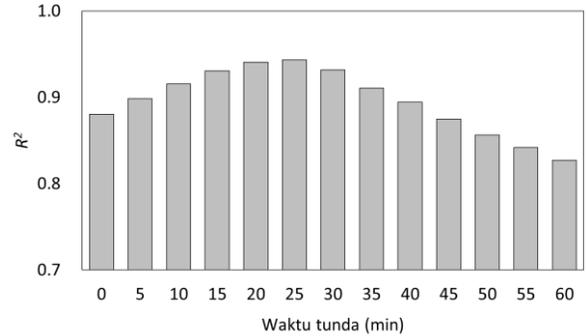
Gambar 3 profil okupansi aktual dan profil penghuni terestimasi pada hari ketiga

dengan mengkorelasikan antara profil penghuni aktual dengan profil penghuni terestimasi. Gambar 4 adalah hubungan waktu tunda dengan korelasi (R^2) dimana nilai tersebut mengindikasikan bahwa korelasi tertinggi dari rata-rata pengukuran selama 3 hari terletak pada 25 menit. Hal lain juga memberikan informasi bahwa pada kondisi waktu tunda 25 menit, nilai R^2 mencapai 0,94 yang artinya hasil estimasi dan aktual memiliki korelasi yang sangat baik.

Berdasarkan waktu tunda maksimum, error estimasi berasal dari faktor waktu tunda dapat dihilangkan dengan mengasumsikan N_{es} berada pada 25 menit lebih awal. Dengan demikian nilai CV turun menjadi 37% yang artinya error estimasi hanya berasal dari faktor fluktuasi CO_2 saja.

3.2 Kontrol ventilasi

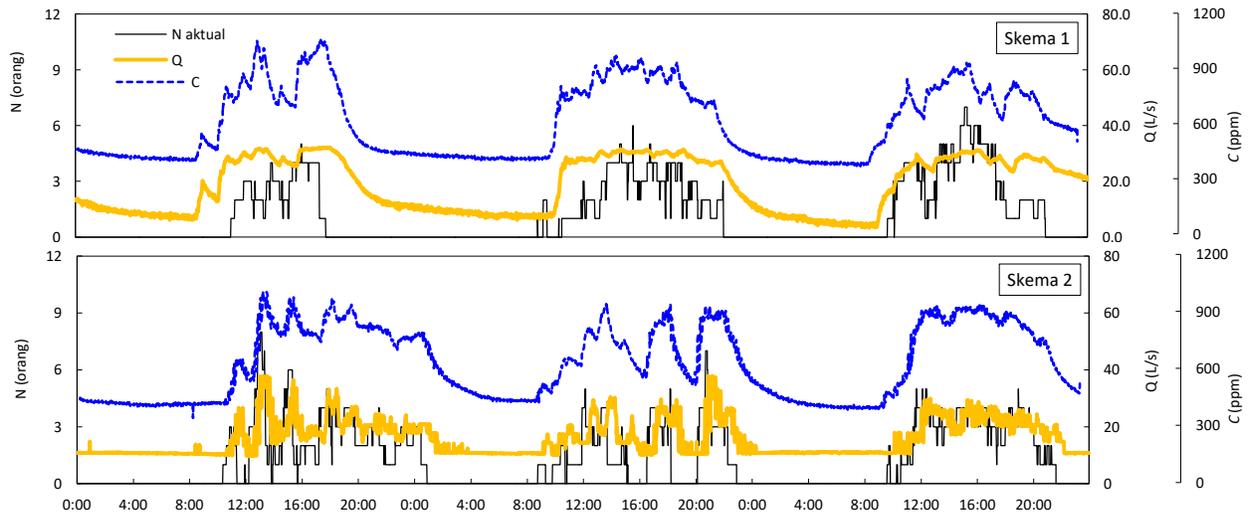
Hasil pengukuran dari kedua skema kontrol ventilasi dapat dilihat pada Gambar 5. Konsentrasi CO_2 dari kedua skema kontrol tidak ada yang melebihi 1000 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa kedua skema kontrol



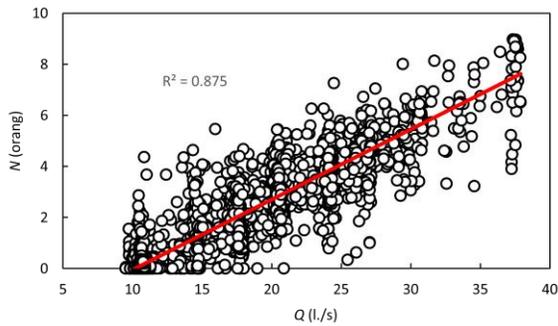
Gambar 4. Korelasi antara profil penghuni aktual dengan profil penghuni terestimasi

berfungsi dengan baik untuk menjaga konsentrasi CO_2 pada batas aman meskipun pada standar ventilasi terbaru (ASHRAE 62.1 2004-2010) tidak mencantumkan lagi batas maksimum konsentrasi CO_2 di dalam ruangan.

Kontrol ventilasi menggunakan skema kontrol pertama menunjukkan bahwa naik dan turun laju ventilasi mengikuti profil CO_2 . Pada dasarnya, skema kontrol pertama dan skema kontrol kedua mempunyai kemiripan dimana kebutuhan laju ventilasi tergantung pada kebutuhan. Kelebihan dari skema kontrol pertama dibandingkan dengan skema kontrol kedua yaitu kenaikan kadar CO_2 dapat selalu dijaga melalui kontrol laju ventilasi. Pola laju ventilasi pada skema kontrol kedua menggambarkan pola yang sama dengan pola penghuni. Hal ini juga dapat dilihat pada Gambar 6 yang menggambarkan korelasi yang cukup kuat ($R^2 = 0,875$) antara laju ventilasi dan jumlah penghuni. Dengan demikian, dapat dibuktikan bahwa metode Bayesian MCMC sangat baik digunakan untuk mengontrol ventilasi bukan hanya untuk mengestimasi penghuni pada ruangan



Gambar 5. Profil laju ventilasi pada skema 1 dan 2



Gambar 6. Korelasi antara laju ventilasi dengan jumlah estimasi penghuni

kecil tetapi juga tangguh untuk mengatasi masalah pada *feedback control* yang mana *error* pada output mempengaruhi sistem input. Misalnya pada kesalahan estimasi, metode Bayesian tidak terpengaruh terhadap kalkulasi selanjutnya meskipun informasi estimasi sebelumnya digunakan sebagai input dalam perhitungan.

Rangkuman skema kontrol ventilasi dapat dilihat pada Tabel 2 dengan kondisi perhitungan hanya saat ruangan terisi okupasi. Berdasarkan tabel tersebut dapat terlihat bahwa dengan konsentrasi CO₂ rata-rata yang tidak jauh berbeda dari kedua skema namun total volume udara yang masuk pada skema kontrol pertama lebih banyak. Hal ini dapat mengindikasikan konsumsi energi sistem HVAC akan lebih besar. Laju ventilasi per penghuni (q_N) merupakan laju ventilasi rata-rata dikurangi kebutuhan laju ventilasi per luasan (Q_A) tiap okupasi. Mengacu pada referensi untuk kondisi pengujian saat ini bahwa nilai $q_N = 2,5$ L/s per orang maka skema kontrol ventilasi kedua mempunyai nilai laju ventilasi per penghuni yang paling mendekati standar.

4. Kesimpulan

Estimasi jumlah penghuni mempunyai pola yang selaras dengan profil penghuni aktual meskipun memiliki tingkat error estimasi yang masih tinggi. Error tersebut berasal dari faktor fluktuasi CO₂ dan waktu tunda estimasi. Waktu tunda maksimum dari sistem pengujian berada pada 25 menit yang berasal dari respon sensor dan perhitungan algoritma estimasi.

Kontrol ventilasi menggunakan estimasi penghuni berdasarkan metode Bayesian MCMC berhasil dilakukan. Metode Bayesian mampu mengatasi masalah *feedback control* pada sistem kontrol yang digunakan, yang mana output kontrol mempengaruhi input yang diberikan. Selain itu, berdasarkan hasil pengujian, kontrol ventilasi menggunakan estimasi penghuni memiliki nilai laju ventilasi per jumlah penghuni yang lebih mendekati standar ASHRAE 62.1.

Tabel 2. Rangkuman skema ventilasi

Variabel pengukuran	Skema 1	Skema 2
Konsentrasi CO ₂ rata-rata (ppm)	798	776
Total volume udara masuk (m ³ /hari)	278	237
N rata-rata (orang)	2,84	2,66
Q (L/s)	29,1	20,3
q_N (L/s per orang)	7,9	4,3

Daftar Pustaka

- Alam, A. G., Rahman, H., Kim, J. K., & Han, H. (2017). Uncertainties in neural network model based on carbon dioxide concentration for occupancy estimation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(5), 2573– 2580.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., & American National Standards Institute. (1989). *Ventilation for acceptable indoor air quality: Standard 62-1989*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., Air-Conditioning and Refrigeration Institute., National Institute of Standards and Technology (U.S.), & U.S. Green Building Council. (2007). *62.1 user's manual: ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007 : ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Cali, D., Matthes, P., Huchtemann, K., Streblow, R., & Müller, D. (2015). CO₂ based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings. *Building and Environment*, 86, 39– 49.
- Camelia, A. (2011). Sick Building Syndrome and Indoor Air Quality. *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, 2(2): 79– 84.
- Duarte, C., Van Den Wymelenberg, K., & Rieger, C. (2013). Revealing occupancy patterns in an office building through the use of occupancy sensor data. *Energy and buildings*, 67, 587– 595.
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes*. Geneva: ISO.
- Li, N., Calis, G., & Becerik-Gerber, B. (2012). Measuring and monitoring occupancy with an RFID based system for demand-driven HVAC

- operations. *Automation in construction*, 24, 89-99.
- Lu, T., Lü, X., & Viljanen, M. (2011). A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO₂ control and energy saving in buildings. *Energy and buildings*, 43(9), 2499–2508.
- Nasruddin, Audi, M. R., Ilham, H., Putra, J. D., & Ananda, Y. O. (2018). Analysis of Heat and Mass Transfer on Fungi Growth Inside of Building Walls and Increasing of Energy Consumption, Case Study: Jakarta and Medan Weather Data. *Prosiding SNTTM XVII*, 295–99.
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor air*, 27(5), 868-879.
- Rahman, H., & Han, H. (2017a). Estimation of occupancy in a naturally ventilated room using Bayesian method based on CO₂ concentration. *International Journal of Mechanical Systems Engineering*, 3,123.
- Rahman, H., & Han, H. (2017b). Bayesian estimation of occupancy distribution in a multi-room office building based on CO₂ concentrations. *Building Simulation*, 11, 575–583.
- Rahman, H., & Han, H. (2017c). Bayesian Approach for Occupancy Estimation Based on CO₂ Concentration in a Room of Unknown Ventilation Rate. *14th Korean society for indoor environment (KOSSIE) conference*. Gwangju, South Korea.
- Schell, M. B., S. C. Turner, and R. O. Shim. (1998). Application of CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation. *ASHRAE Transactions*, 104(2):1213–25.
- Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2018). CO₂ based ventilation control in energy retrofit: An experimental assessment. *Energy*, 143, 606– 614.
- Sun, Z., Wang, S., & Ma, Z. (2011). In-situ implementation and validation of a CO₂-based adaptive demand-controlled ventilation strategy in a multi-zone office building. *Building and Environment*, 46(1), 124– 133.
- Yang, S., Hans, A., Zhao, W., & Luo, X. (2020). Indoor Localization and Human Activity Tracking with Multiple Kinect Sensors. *Smart Assisted Living*, 23– 42.