

## INTISARI

Model kenyamanan termal merupakan persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara respons subjektif kenyamanan termal yang dirasakan penghuni terhadap variabel lingkungan ruang huni yang memengaruhi respons tersebut. Model kenyamanan yang akurat menuntut untuk dapat mengamati setiap faktor dalam lingkungan ruang huni yang memengaruhi tingkat kenyamanan termal. Sistem pendukung yang dilengkapi dengan sistem pemantauan untuk setiap variabel lingkungan ruang huni yang memengaruhi tingkat kenyamanan dibutuhkan untuk pengembangan model kenyamanan termal secara efisien dan efektif. Dalam penelitian ini dikembangkan suatu sistem pendukung pengembangan model kenyamanan termal di Indonesia secara efisien dan efektif dengan memanfaatkan sistem pemantauan lingkungan yang terdapat pada *Building Management System* (BMS) dengan alat dan metode ukur yang valid dan andal serta memenuhi kebutuhan *big data* dengan lokasi penyimpanan data cadangan untuk dapat mempertimbangkan setiap faktor yang memengaruhi respons kenyamanan termal dalam skala besar dan jangka panjang.

Sistem pendukung pengembangan model kenyamanan termal merupakan sistem pada *server* lokal yang terhubung pada *server website* sistem BMS, yang memungkinkan pihak manajemen bangunan untuk melakukan pembangunan model, pengujian hasil model, dan pembaruan parameter model untuk memperbaiki akurasi dari model. Tuntutan kebutuhan sistem diidentifikasi melalui studi pustaka, di mana sistem didesain untuk memenuhi tuntutan kebutuhan pengembangan model kenyamanan termal dengan pendekatan kesetimbangan termal (*thermal balance*) dan adaptif. Metode pendekatan ini menentukan variabel, alat, dan metode ukur yang diterapkan pada sistem pemantauan lingkungan ruang huni. Keluaran model berupa respons kenyamanan termal diukur dengan sensasi, kenyamanan, dan penerimaan termal. Formulasi kuesioner sensasi termal yang lebih andal dilakukan dengan mempertimbangkan sensitivitas termal tubuh, rentang iklim, dan semantik dalam bahasa Indonesia. Masukan model berupa kondisi lingkungan termal ruang huni dan karakteristik personal penghuni. Kajian penempatan sensor yang optimal dilakukan dengan mempertimbangkan aktivitas penghuni, keamanan, kemudahan dalam pemasangan, dan nilai *Standardized Euclidean Distance* (SED) terhadap hasil simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) agar hasil pengukuran valid mewakili kondisi lingkungan termal di area aktivitas penghuni. Optimasi alur algoritma penyimpanan data pada konfigurasi *multipoint to point* (MP) dilakukan untuk memenuhi kebutuhan lokasi penyimpanan cadangan dan performansi keandalan dan *real-time* pada sistem komunikasi data yang sama dengan konfigurasi *point to point* (PP). Terakhir, dilakukan analisis untuk menunjukkan efisiensi dan efektivitas sistem dalam mendukung pengembangan model kenyamanan termal dan kemungkinan implementasinya dalam BMS.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendukung pengembangan model kenyamanan termal yang telah dirancang bangun sesuai dengan tuntutan kebutuhan. Sistem pendukung lebih efisien relatif dibandingkan dengan metode konvensional yang dilakukan secara survei lapangan dengan dukungan sistem pemantauan lingkungan ruang huni pada BMS. Kuesioner sensasi termal 5-kategori dengan semantik bahasa Indonesia tipe I (*sangat dingin – dingin – tidak panas tidak dingin – panas – sangat panas*) adalah yang paling andal, jika dibandingkan dengan kuesioner 7-kategori ASHRAE atau kuesioner sensasi termal 5-kategori dengan semantik bahasa Indonesia tipe II dengan standar deviasi rata-rata sebesar 0,66. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian pada *chamber* iklim, di mana responden akan merasakan 1 sensasi lebih panas atau lebih dingin jika ada perubahan kondisi lingkungan termal sebesar  $2,99^{\circ}\text{C}$  dan rentang suhu udara di Indonesia antara tahun 2011-2017 mencapai  $13\pm 2$  K. Validasi data kuesioner dilakukan dengan penambahan algoritma dalam metode pengambilan data respons kenyamanan termal. Penempatan sensor optimal dengan pertimbangan aktivitas penghuni, keselamatan, kemudahan instalasi, dan analisis SED yang menunjukkan akurasi, konsistensi, dan % *coverage* hasil pengukuran sensor pada posisi tersebut, yang valid mewakili kondisi lingkungan termal dengan nilai SED sebesar  $2,5\pm 0,3$ ,  $2,2\pm 0,6$ ,  $2,0\pm 1,1$ , masing-masing untuk R15, R33, dan R40. Sistem pendukung memenuhi kebutuhan *big-data* dengan sistem komunikasi data dan *server website* yang andal dan *real-time*, serta kontinu. Performansi andal dan *real-time* untuk pemantauan kondisi lingkungan termal dari sensor terpasang dapat dilihat dari sistem komunikasi data (dengan proses dari akuisisi data ke API *server*) mencapai 99,96 % dan rata-rata waktu proses sistem sebesar 710,77 ms dan pada *server website* (dengan proses dari API *server* ke basis data *server*) mencapai 100% dan *real-time* dengan waktu tunda proses maksimal 4.286 ms dan 20.860 ms masing-masing untuk data sensor dan data kuesioner. Performansi kontinu dari sistem ditunjukkan oleh kapasitas penyimpanan pada basis data *server website* yang digunakan saat ini sebesar 50 GB, mampu menyimpan data selama 59,26 bulan. Sistem pendukung menyediakan lokasi penyimpanan data cadangan pada masing-masing titik pemantauan (basis data lokal) dan titik MP (basis data utama). Sistem secara efektif menyiapkan data dalam format yang siap untuk pemodelan, serta fungsi-fungsi pemodelan, baik penyediaan data, pembangunan, pengujian, maupun perbaruan model.

Kata kunci : *kenyamanan termal, model, Sistem Manajemen Bangunan, Building Management System (BMS), sistem pemantauan, lingkungan ruang huni.*

## ABSTRACT

The thermal comfort model is a mathematical equation that states the relationship between the occupant's subjective thermal comfort responses on indoor environmental variables affecting the response. An accurate thermal comfort model requires observing each factor in the indoor environment affecting the level of thermal comfort. A support system fitted with a monitoring system for each variable of the indoor environment affecting the thermal comfort level is required for the development of an efficient and effective thermal comfort model. This study developed a support system for the development of an efficient and effective thermal comfort model in Indonesia by utilizing the environmental monitoring system in the Building Management System (BMS) with valid and reliable measuring instruments and measuring methods. Further, it fulfilled the needs of big data with backup data storage locations enabling us to consider each factor affecting thermal comfort response for a large scale and long term.

The support system for thermal comfort model development is a system on a local server connected to the BMS system website server allowing the building management to carry out model development, test model results, and update model parameters to improve the model's accuracy. The system requirement was identified through a literature study in which the system was designed to meet the requirements of the development of a thermal comfort model with a thermal balance and adaptive approach. This approach determines the variables, measuring instruments, and measuring methods applied to the indoor environmental monitoring system. The output in the form of thermal comfort response was measured with thermal sensation, thermal comfort, and thermal acceptance. A more reliable thermal sensation questionnaire was formulated by considering the body's thermal sensitivity, climatic range, and semantics in Indonesian. The input was in the form of the indoor thermal environmental conditions and the personal characteristics of the occupants. The study of optimal sensor placement was done by considering occupant activities, safety, ease of installation, and the value of Standardized Euclidean Distance (SED) on the Computational Fluid Dynamic (CFD) simulation results to get valid measurement results to represent the conditions of the thermal environment. The optimization of the data storage algorithm flow in the multipoint to point (MP) configuration was to meet the needs of backup storage locations and the reliability and real-time performance of the data communication system, which is the same as the point to point (PP) configuration. Lastly, the analysis was carried out to show the efficiency and effectiveness of the system in supporting the development of a thermal comfort model and its feasible implementation in a BMS.

The results show that the support system for thermal comfort model development had been designed based on the requirements. The support system with an indoor environmental monitoring system on the BMS is relatively more efficient than the conventional method through field surveys. The 5-category

thermal sensation questionnaire with Indonesian semantics type I (*sangat dingin – dingin – tidak dingin tidak panas – panas – sangat panas*) is more reliable compared to the 7-category ASHRAE questionnaire or the 5-category thermal sensation questionnaire with Indonesian semantics type II, with an average standard deviation of 0.66. It is based on the climate chamber experiment result that respondent will feel 1 hotter or cooler sensation if there is a change in thermal environmental conditions of 2.99 °C with the air temperature of  $13 \pm 2$  K between 2011-2017 in Indonesia. The questionnaire data were validated by adding an algorithm to the collecting data method of thermal comfort response. Optimal sensor placement considers occupant activity, safety, ease of installation, and SED analysis, which shows the accuracy, consistency, and % coverage of sensor measurement results at that position, in which the validly represents the condition of the thermal environment with SED values of  $2.5 \pm 0.3$ ,  $2.2 \pm 0.6$ ,  $2.0 \pm 1.1$ , for R15, R33, and R40. The support system meets the requirements of big-data needs with a reliable, real-time, and continuous data communication system and website server. Reliable and real-time performance of thermal environmental monitoring system can be seen from the data communication system (with processing from data acquisition to the API server) and on the server website (with processing from API server to the database server). Reliable and real-time performance of the data communication system reaching 99.96% with the average processing delay of 710.77 ms, and on the server website reaches 100% with real-time of maximum processing delay of 4,286 ms and 20,860 ms for sensor data and questionnaire data, respectively. The continuous performance of the system is shown by the currently-used storage capacity of the website server database of 50 GB, capable of storing data for 59.26 months. The support system provides backup data storage locations at each monitoring point (local database) and MP point (main database). The system prepares data effectively in a format that is ready for modeling and modeling functions, including data provision, building, testing, or updating the model.

**Keywords :** *thermal comfort model, Building Management System (BMS), building monitoring, indoor environment.*