

## ***PASSIVE COOLING STUDY TO OPTIMIZE SCHOOL THERMAL COMFORT IN A HUMID TROPICAL CLIMATE (CASE STUDY: PAHOA KINDERGARTEN TANGERANG)***

**<sup>1</sup>Kirana Syifa Nirmala, <sup>2</sup>Wulani Enggar Sari, S.T., M.T.**

<sup>1</sup> Student in the Undergraduate's (S-1) Study Program in Architecture at Parahyangan Catholic University

<sup>2</sup> Senior lecturer in the Undergraduate's (S-1) Study Program in Architecture at Parahyangan Catholic University

**Abstract** - The comfort of a building is a supporting role for the user's activities. Student activities at school, especially kindergarten students, have activities that tend to use more of a higher metabolism, so a comfortable space is an important aspect of user activity in a room for a learning environment. The object used as a study is KB-TK Pahoa Tangerang as a school where the building maximizes passive design to support teaching and learning activities. Thermal discomfort caused by high temperatures can be a distraction and have a negative impact on the teaching and learning process. This study aims to look at thermal comfort in kindergartens located in tropical environments and activities that use a lot of physical activity for learning at the kindergarten level.

In this research an experimental method will be carried out using CFD (computational fluid dynamics) simulations and including activities in kindergarten to address the problem of thermal comfort, especially for children aged 4-6 years. The analysis was carried out using the PMV (predicted mean vote) which in this process included activity variables, clothing, and building physical data to determine user satisfaction and classroom thermal comfort. Direct observation of the location of the study object was carried out to obtain existing data and literature studies for reference regarding thermal comfort and passive cooling strategies.

The results obtained from this study indicate that the conditions of thermal comfort in the kindergarten from morning to noon, students using the classroom show slightly warm thermal sensation. Based on the results of the existing simulation, it is continued with efforts to optimize the design to achieve thermal comfort by optimizing it through modification of the classroom model using sun protection (shading) & ventilation. The optimization percentage reached the maximum value of PMV reduction by 12,68% in ventilation optimization, and 6,55% in shading optimization.

**Keywords:** Passive Cooling, Thermal Comfort, School, Humid Tropical Climate, Pahoa Kindergarten Tangerang

## **KAJIAN PENDINGINAN PASIF UNTUK MENGOPTIMASI KENYAMANAN TERMAL SEKOLAH PADA IKLIM TROPIS LEMBAP (STUDI KASUS: KB-TK PAHOA TANGERANG)**

**<sup>1</sup>Kirana Syifa Nirmala, <sup>2</sup>Wulani Enggar Sari, S.T., M.T.**

<sup>1</sup> Mahasiswa S1 Program Studi Arsitektur Universitas Katolik Parahyangan

<sup>2</sup> Dosen Pembimbing S1 Program Studi Arsitektur Universitas Katolik Parahyangan

**Abstrak** - Kenyamanan suatu bangunan merupakan hal penunjang aktivitas. Aktivitas siswa di sekolah khususnya peserta didik Taman Kanak-Kanak mempunyai aktivitas yang cenderung lebih banyak menggunakan metabolisme yang lebih tinggi, sehingga ruang yang nyaman adalah aspek penting bagi aktivitas pengguna di dalam ruang untuk lingkungan belajar. Objek yang digunakan sebagai studi adalah KB-TK Pahoa Tangerang sebagai sekolah dimana bangunan memaksimalkan desain pasif untuk mendukung kegiatan belajar mengajar. Ketidaknyamanan termal yang disebabkan oleh temperatur yang tinggi dapat menjadi distraksi dan memberikan dampak negatif dalam proses belajar-mengajar. Penelitian ini bertujuan melihat kenyamanan termal di sekolah

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: kiranasyifanirmala@gmail.com

Taman Kanak-Kanak yang berada di lingkungan tropis dan aktivitas yang banyak menggunakan fisik untuk aktivitas belajar di tingkat taman kanak-kanak.

Pada penelitian ini akan dilakukan metode eksperimental dengan menggunakan simulasi CFD (*computational fluid dynamics*) dan memasukkan aktivitas di Taman Kanak-Kanak untuk menyikapi permasalahan kenyamanan termal terutama bagi pengguna anak-anak usia 4-6 tahun. Analisis dilakukan dengan menggunakan PMV (*predicted mean vote*) dimana dalam proses ini dapat memasukkan variabel aktivitas, pakaian, dan data fisik bangunan untuk mengetahui kepuasan pengguna dan kenyamanan termal ruang kelas. Observasi langsung ke lokasi objek studi dilakukan untuk mendapatkan data eksisting dan studi literatur untuk acuan terkait kenyamanan termal dan strategi pendinginan pasif.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi kenyamanan termal di TK pada saat pagi sampai siang hari, peserta didik pengguna ruang kelas menunjukkan sensasi termal sedikit hangat (*slightly warm*). Berdasarkan hasil eksisting simulasi dilanjutkan kembali pada upaya optimalisasi desain untuk mencapai kenyamanan termal dengan optimalisasi melalui modifikasi model ruangan kelas menggunakan penangkal sinar matahari (*shading*) & ventilasi. Persentase optimalisasi mencapai nilai maksimum penurunan nilai PMV sebesar 12,68% pada optimalisasi ventilasi, dan 6,55% pada optimalisasi *shading*.

**Kata Kunci:** Pendinginan Pasif, Kenyamanan Termal, Sekolah, Iklim Tropis Lembap, KB-TK Pahoa Tangerang

## 1. PENDAHULUAN

Masyarakat modern menghabiskan 85-90% waktunya di dalam ruangan, maka ruang yang nyaman adalah aspek penting bagi aktivitas pengguna di dalam ruang terutama untuk lingkungan belajar. Peserta didik menghabiskan waktu lebih lama di sekolah dibandingkan tempat lainnya, sehingga penting untuk menjaga kenyamanan lingkungan belajar untuk mencapai proses belajar-mengajar yang efisien. Kondisi termal ruangan adalah salah satu aspek fisik penting yang berkontribusi pada keberhasilan proses belajar-mengajar (Che Ahmad *et al*, 2013). Indonesia adalah negara dengan iklim tropis yang memiliki karakter hangat dan lembap dengan intensitas radiasi matahari yang panjang dan curah hujan tinggi. Sebagian besar sekolah di daerah hangat belum berkembang terkait pola desain berkelanjutan sehingga menjadi ruang yang tidak nyaman terlebih dalam kondisi pemanasan global.

Salah satu solusi pengendalian kenyamanan termal di adalah implementasi desain pasif dalam bangunan. Lingkungan belajar didesain agar responsif terhadap iklim sehingga menciptakan kondisi nyaman di dalam bangunan. Desain pasif dengan memanfaatkan penghawaan alami sangat diharapkan terutama pada bangunan dengan pengguna bangunan anak usia TK (4-6 tahun). Objek studi adalah KB-TK Pahoa Summarecon Serpong, Tangerang, sekolah yang tidak menggunakan AC dan berlokasi di salah satu daerah hangat dalam lingkup Jawa Barat. Berdasarkan data *Weather Spark* suhu harian rata-rata Tangerang Selatan di atas 32°C pada musim panas sehingga pada penelitian ini akan dilakukan kajian bagaimana desain sekolah KB-TK menyikapi permasalahan kenyamanan termal.

Masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah meneliti kenyamanan termal lingkungan sekolah pada iklim tropis lembap melalui strategi pendinginan pasif dengan studi kasus KB-TK Pahoa Tangerang. Pada penelitian ini dikaji bagaimana kondisi kenyamanan termal, apakah pendinginan pasif yang diterapkan dalam berjalan dengan efektif, dan bagaimana kriteria ruang untuk bangunan dalam lingkup kenyamanan termal dengan pengguna anak-anak KB dan TK. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pendinginan pasif yang optimal, serta memberikan masukan dan solusi untuk pengoptimalan kenyamanan termal pada bangunan sekolah di iklim tropis lembap dengan strategi pendinginan pasif. Manfaat penelitian ini untuk memberikan informasi mengenai pendinginan pasif yang optimal pada bangunan sekolah di iklim tropis lembap sebagai upaya mengoptimalkan kenyamanan termal, serta memberikan masukan dan data bagi penelitian sejenis. Ruang lingkup pembahasan penelitian meliputi pendinginan pasif dan kenyamanan termal, dan pembahasan analisis penelitian seputar kajian pendinginan pasif pada bangunan sekolah di iklim tropis lembap sebagai upaya mengoptimalkan kenyamanan termal.

## **2. KAJIAN TEORI**

Pada kajian teori dibahas mengenai teori tipologi sekolah dan kenyamanan termal dalam sekolah. Tolak ukur kenyamanan termal menggunakan indikator termal *Predicted Mean Vote* (PMV) dan *Standard Effective Temperature* (SET) dengan faktor yang mempengaruhinya meliputi temperatur udara, radiasi, kelembapan relatif, kecepatan angin, pakaian serta aktivitas pengguna. Lokasi objek studi yang berada dalam iklim tropis lembap memerlukan pengendalian termal spesifik, salah satunya dengan desain pasif dalam bangunan.

### **2.1 Tipologi Sekolah**

Sekolah adalah sistem interaksi sosial suatu organisasi keseluruhan terdiri atas interaksi pribadi terkait bersama dalam suatu hubungan organik (Wayne dalam buku Soebagio Atmodiwirio, 2000:37). Berdasarkan KBBI, sekolah adalah bangunan atau lembaga untuk belajar dan mengajar serta tempat menerima dan memberi pelajaran (menurut tingkatannya, ada) – dasar, -- lanjutan, -- tinggi; (menurut jurusannya, ada). Kenyamanan di lingkungan belajar menjadi persyaratan penting agar memungkinkan siswa belajar dengan produktif. Penyediaan lingkungan belajar yang nyaman dan sehat di sekolah penting bagi kesehatan, kesejahteraan, dan produktivitas siswa di sekolah (d'Ambrosio Alfano *et al.* 2013).

Salah satu penelitian terkait tentang studi lapangan kenyamanan termal anak-anak KB-TK usia 4-6 tahun di Korea menyimpulkan anak-anak lebih sensitif terhadap perubahan metabolisme dibandingkan orang dewasa, dan suhu yang mereka pilih sebagai nyaman lebih rendah dari yang diprediksi oleh indikator termal PMV dan EN 15251. Anak-anak menunjukkan sensasi termal yang lebih tinggi untuk perubahan metabolisme dan merasakan kenyamanan pada suhu sekitar 3° C lebih rendah dibandingkan orang dewasa. Oleh karena itu, perhatian atas pengkondisian kenyamanan termal menjadi penting terutama bagi anak-anak (Hyunjun Yun, Insick Nam, Jinman Kim, Jinho Yang, Kyoungho Lee, Jongryeul Sohn, 2014).

### **2.2 Kenyamanan Termal**

Kenyamanan termal didefinisikan oleh Standar *American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) ke-55 sebagai “sebuah kondisi dalam pikiran yang mengekspresikan kepuasan dengan lingkungan termal” dan oleh *World Health Organization* (WHO) sebagai “kondisi ketika manusia puas dengan lingkungan termal”. Ruang di dalam bangunan harus memiliki kondisi lingkungan yang nyaman untuk menyelenggarakan aktivitas dengan optimal. Selain untuk menciptakan kondisi ruang yang nyaman, kenyamanan termal juga berdampak bagi kesehatan penghuni bangunan. Tolak ukur untuk mencapai kenyamanan termal menggunakan indikator *Predicted Mean Vote* (PMV) dan *Standard Effective Temperature* (SET) dengan faktor yang mempengaruhinya yaitu temperatur udara, radiasi, kelembapan relatif, kecepatan angin, pakaian serta aktivitas pengguna untuk mengetahui sensasi termal serta reaksi fisiologis pengguna.

### **2.3 Iklim Tropis Lembap**

Iklim atau cuaca rata-rata adalah efek dari matahari. Kata iklim digunakan ilmuwan untuk membagi wilayah bumi berdasarkan musim. Iklim di Indonesia adalah iklim tropis lembap yaitu iklim yang berlaku di daerah tropis yaitu daerah yang terdapat di 23,5° Lintang Utara dan 23,5° Lintang Selatan. Terdapat dua kategori iklim tropis yaitu iklim tropis kering dan tropis lembap. Menurut Lippsmeier (1994) Indonesia termasuk ke dalam kategori iklim

tropis lembap atau daerah hutan hujan tropis yang meliputi daerah sekitar garis khatulistiwa. Karakter iklim tropis lembap ditandai dengan kelembapan, curah hujan, dan temperatur tinggi (suhu tahunan berkisar antara 23°C hingga 38°C pada musim panas), sedikit angin dan radiasi matahari sedang - kuat. Manusia di iklim tropis harus menyesuaikan dengan kondisi iklim yang tidak seluruhnya dapat mendukung aktivitas dengan memadai. Suhu udara dan radiasi matahari yang relatif tinggi menyebabkan ketidaknyamanan termal, dan kelembapan yang relatif tinggi berpengaruh pada lambatnya waktu penguapan, memberi efek dingin terhadap tubuh maka manusia memerlukan angin yang kencang agar uap air cepat menguap. Oleh karena itu bangunan di iklim tropis sebagai lingkungan binaan menjadi penting bagi penyelesaian masalah terkait pencapaian kenyamanan termal bagi penghuni.

## **2.4 Desain Pasif dalam Bangunan**

Salah satu solusi pengendalian kenyamanan termal di lingkungan belajar dengan upaya efisiensi konsumsi energi dapat dilakukan dengan implementasi desain pasif dalam bangunan. Desain pasif adalah desain dengan penyikapan terhadap iklim dengan cara yang alami. Desain pasif sebagai bidang ilmu mempelajari tentang prinsip-prinsip fisika seperti panas, cahaya, bunyi, yang berpengaruh terhadap bangunan dan bagaimana menyikapinya untuk menciptakan kenyamanan bagi penghuni (kenyamanan termal, visual, audial). Bangunan didesain agar responsif terhadap iklim sehingga menciptakan kondisi nyaman di dalam bangunan. Strategi desain pasif untuk mengutamakan pendinginan pasif alami seperti menggunakan material bangunan, angin, air, dan lainnya untuk mengontrol kenaikan temperatur bangunan karena sumber panas. Pendinginan pasif dapat membantu mempertahankan kenyamanan termal bangunan dengan konsumsi energi yang minimal.

Dalam rangka menciptakan area termal yang nyaman, teknik pendinginan pasif untuk mengurangi beban panas menurut Dnyandip K. Bhamare, Manish K. Rathod, dan Jyotirmay Banerjee (2019) didesain menjadi tiga bagian yaitu Proteksi terhadap Panas (*Heat Protection*), Modulasi Panas (*Heat Modulation*), dan Disipasi Panas (*Heat Dissipation*). Proteksi terhadap Panas (*Heat Protection*) meliputi pengendalian iklim mikro dengan orientasi, bentuk, dimensi, dan perletakan bangunan, pengaturan lanskap dan vegetasi, serta memanfaatkan permukaan air. Selain itu dapat dilakukan kontrol terhadap sinar matahari dengan mengontrol bukaan, material kaca, serta pembayangan pada bangunan. Modulasi Panas (*Heat Modulation*) mencakup peningkatan terhadap material bangunan dengan menggunakan *Phase Change Material* (PCM) dengan bentuk integrasi pada struktur bangunan seperti dinding, plafon, atap, dan jendela. Disipasi Panas (*Heat Dissipation*) adalah pelepasan panas berlebih ke lingkungan dengan suhu yang lebih rendah. Strategi ini meliputi pelepasan panas melalui udara, air, dan langit. Pelepasan panas melalui udara dapat dilakukan dengan ventilasi yang digerakkan angin (*cross ventilation, stack ventilation*), dinding trombe, dan cerobong surya. Pelepasan melalui air memanfaatkan evaporasi air untuk menurunkan suhu udara dan meningkatkan kelembapan udara. Pelepasan panas melalui langit terjadi melalui pertukaran panas dan membuangnya ke luar angkasa. Strategi ini meliputi pendinginan radiasi malam hari (*roof pond, teknologi fluid cooling panel*) dan *radiant cooling* yang dapat diimplementasikan dengan pemasangan pipa yang dialiri air dingin pada struktur ruang sehingga dapat mengurangi panas di dalam ruangan.

## **3. METODE PENELITIAN**

Jenis penelitian yang digunakan merupakan penelitian dengan cara deskriptif-evaluatif dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian dilakukan pada objek studi KB-TK Pahoa Tangerang yang berada di Jalan Ki Hajar Dewantara No.6 Summarecon Serpong, Pakulonan Bar., Kec. Klp. Dua, Kabupaten Tangerang, Banten.



Gambar 2.1. Tata Blok KB-TK Pahoia Tangerang  
(Sumber: www.googlemaps.com)

Sekolah Terpadu KB-TK Pahoia Tangerang ditampilkan dalam publikasi pada halaman web *Green Building Council* Indonesia (GBCI), organisasi yang bergerak di bidang *green building* dan keberlanjutan pada industri bangunan, sebagai sekolah sehat dan hemat energi. Sekolah ini juga tampil dalam publikasi layanan siaran publik Jerman *Deutsche Welle* (DW) sebagai proyek percontohan untuk *Net Zero Healthy Building*. Pada publikasi tersebut dideskripsikan bagaimana KB-TK Pahoia Tangerang memanfaatkan cahaya alami dan pergerakan udara untuk pengkondisian dan penghematan energi dalam bangunan.

Tabel 2.1. Waktu Pengukuran

Waktu Pengukuran	Indikator
07.00 WIB	Sebagai data pembanding di pagi hari, anak-anak memulai aktivitas dan matahari berada dalam posisi yang rendah dari arah timur.
13.00 WIB	Sebagai data pembanding di siang hari, anak-anak kelas umum selesai beraktivitas, kelas siang dimulai dan matahari berada dalam posisi yang tinggi.
16.00 WIB	Sebagai data pembanding di sore hari, matahari berada dalam posisi rendah dari arah barat.

Pengambilan data penelitian dilakukan sebanyak 3 kali pada tanggal 24 dan 31 Oktober serta 1 November 2022 pada kondisi langit cerah. Sumber data utama untuk metode penelitian kuantitatif meliputi observasi langsung ke objek studi. Sumber data sekunder meliputi proses pembacaan jurnal, penelitian, dan studi literatur terdahulu yang menyangkut teori dan variabel penelitian. Teknik pengumpulan data dengan studi literatur, teknik penelitian survei dengan mengobservasi langsung ke lokasi objek studi dan pengukuran data di lapangan. Data yang diambil meliputi data eksisting fisik bangunan dan data iklim.

Studi literatur digunakan untuk memahami topik penelitian dan menjadi bahan pembanding serta acuan. Studi literatur diperlukan untuk menjadi acuan terkait teori mengenai kenyamanan termal dan pendinginan pasif. Literatur tersebut melengkapi pengumpulan data dan pembahasan analisis penelitian ini. Observasi digunakan untuk mengetahui data eksisting fisik bangunan dan data iklim. Data eksisting fisik bangunan berupa kondisi termal dalam bangunan dan elemen arsitektural yang berfungsi untuk pendinginan pasif. Simulasi digital digunakan untuk melengkapi dan membandingkan data yang diambil melalui pengukuran langsung. Simulasi dilakukan dengan menggunakan program komputer Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang dimodelkan melalui Sketchup. Pengambilan data dilakukan melalui pengukuran data lapangan untuk mendapatkan data temperatur udara, radiasi, dan kelembapan udara menggunakan *Heat Index WBGT Meter*, data kecepatan aliran udara menggunakan alat *Hot Wire Anemometer*, dan untuk pengukuran bangunan menggunakan laser meter.

Analisis data dilakukan menjadi beberapa tahap meliputi observasi dan observasi dan pengukuran lapangan, setiap area diklasifikasikan berdasarkan standar tentang kenyamanan termal. Hasil pengambilan data dianalisis dengan indikator termal PMV (*predicted mean vote*) dan SET (*standard effective temperature*) sebagai tolak ukur kuantitatif kenyamanan termal karena parameter aktivitas dengan unit MET (*metabolic equivalent of task*) yang mengestimasi jumlah energi yang digunakan oleh tubuh dalam aktivitas fisik yang khusus (pada anak-anak usia 4-6 tahun). Membuat simulasi dengan *software* Autodesk CFD (*computational fluid dynamics*). *Modeling* menggunakan Sketchup dan kemudian diekspor ke dalam *software* Autodesk CFD. *Modeling* eksisting disimulasikan untuk membandingkan hasil antara eksisting dan alternatif.

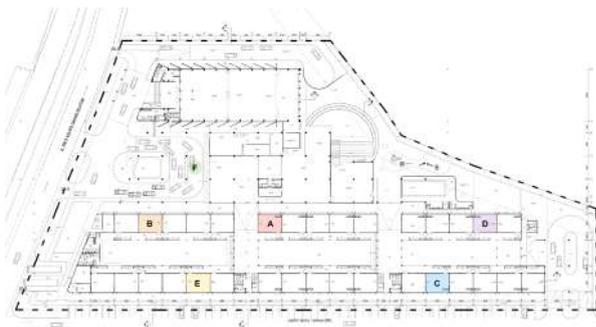
#### 4. ANALISIS

##### 4.1 Karakteristik KB-TK Pahoa Tangerang

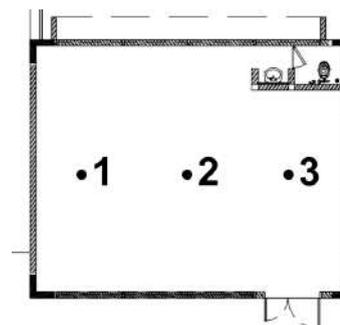
Bangunan KB-TK Pahoa Tangerang memiliki 2 lantai, lantai dasar adalah zona ruang kelas KB dan TK, serta lantai 2 berupa zona ruang guru, staff, dan *green roof*. Denah bangunan memanjang menghadap Timur Laut dan Barat Daya, menyesuaikan dengan bentuk tapak. Bangunan sekolah berbatasan dengan bangunan komersial seperti rumah-rumah toko dan Danau Pahoa. Pada penelitian ini analisis kenyamanan termal difokuskan pada bangunan yang dominan digunakan anak-anak KB-TK Pahoa Tangerang untuk beraktivitas yaitu pada lantai 1 terutama ruang-ruang kelas. Analisis karakteristik fisik bangunan KB-TK Pahoa Tangerang dibagi menjadi kategori area Ruang Luar dan area Ruang Dalam yaitu ruang kelas KB, TK-A, dan TK-B.

##### 4.2 Data Pengukuran Lapangan KB-TK Pahoa Tangerang

Observasi langsung ke lokasi objek studi dan pengukuran data lapangan dilakukan dengan pengambilan kebutuhan data termal pada ruang-ruang kelas dan ruang luar. Ruang-ruang kelas TK-A, TK-B, dan KB tipikal dengan ukuran 49,14 m<sup>2</sup>, jendela di kedua sisi ruangan, dan dilengkapi *air vents* (ventilasi udara) di bagian bawah dinding dalam. Area pengukuran dibagi menjadi kode ruang dan titik ukur sebagai berikut:



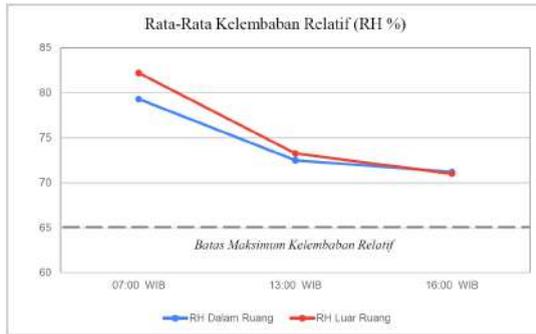
Gambar 4.1. Area Pengukuran



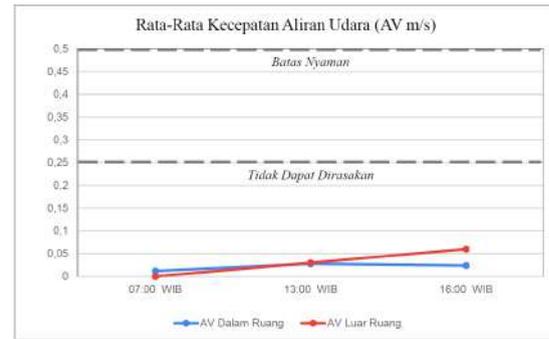
Gambar 4.2. Titik Ukur

Berdasarkan data pengukuran lapangan didapatkan kesimpulan rata-rata kumpulan data termal berupa Temperatur Udara/ *Air Temperature* (TA) dengan Temperatur Radiasi/ *Mean Radiant Temperature* (TG), Kelembapan Udara Relatif/ *Relative Humidity* (RH), dan Kecepatan Aliran Udara/ *Air Velocity* (AV) yang diukur pada kondisi langit cerah disusun dalam data grafik sebagai berikut:

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Pahoa Kindergarten Tangerang)*

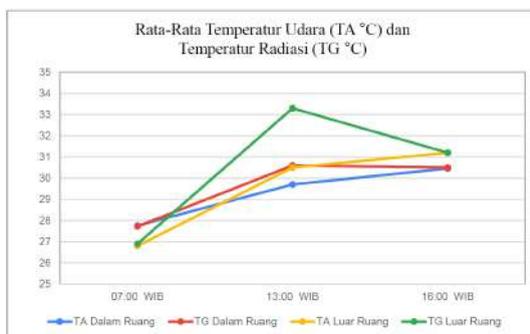


Gambar 4.3. Grafik Rata-Rata Kelembaban Relatif

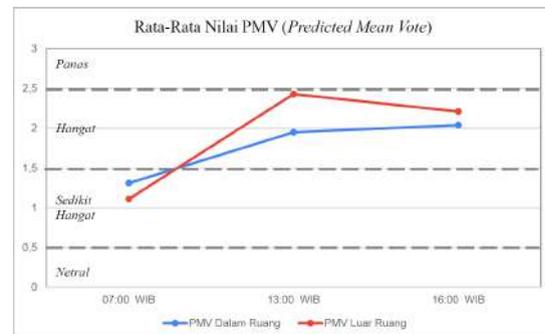


Gambar 4.4. Grafik Rata-Rata Kecepatan Angin

Nilai kelembapan relatif lebih rendah di dalam ruangan dibandingkan di luar ruangan namun masih berada di atas batas maksimum standar kelembapan relatif sehingga belum mencapai standar kelembapan optimal. Nilai rata-rata kecepatan aliran udara pada ruang dalam dan ruang luar secara keseluruhan masih berada dalam kategori tidak terasa.



Gambar 4.5. Grafik Rata-Rata Temperatur

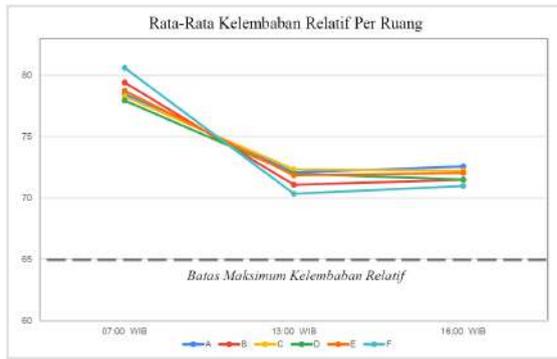


Gambar 4.6. Grafik Rata-Rata PMV

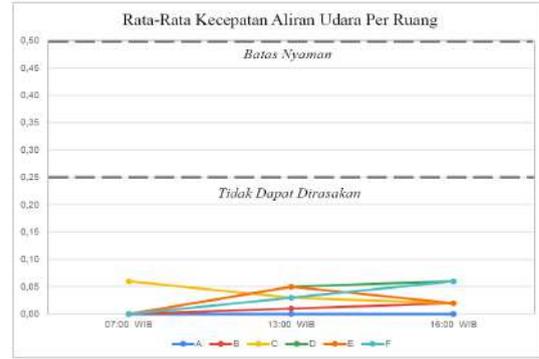
Nilai rata-rata keseluruhan PMV di dalam ruangan mencapai nilai tertinggi +2,04 pada pukul 16.00 WIB yang termasuk ke dalam kategori hangat, dan terendah +1,31 pada pukul 07.00 WIB termasuk ke dalam kategori sedikit hangat. Nilai rata-rata PMV di luar ruangan mencapai titik tertinggi +2,43 pada pukul 13.00 WIB yang termasuk ke dalam kategori hangat dengan titik terendah +1,11 pada pukul 07.00 WIB termasuk ke dalam kategori sedikit hangat.

Rata-rata kondisi termal KB-TK Pahoa Tangerang dianalisis lebih terperinci dengan mengukur rata-rata kondisi termal setiap ruangan kelas. Berdasarkan data terlampir di atas didapatkan kesimpulan rata-rata kumpulan data termal pada setiap ruangan kelas berupa temperatur udara dengan temperatur radiasi, kelembapan udara relatif, dan kecepatan aliran udara sebagai berikut:

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Pahoa Kindergarten Tangerang)*

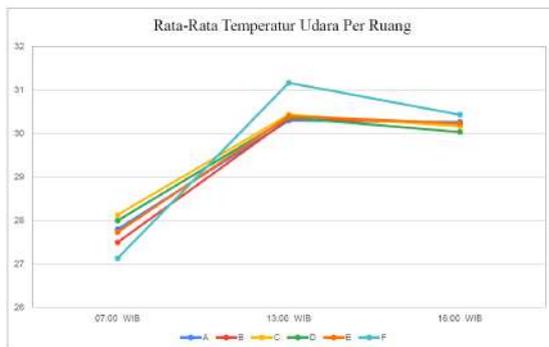


Gambar 4.7. Grafik Kelembaban Relatif Per Ruang

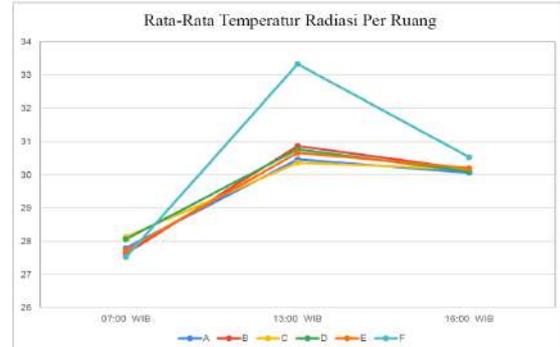


Gambar 4.8. Grafik Kecepatan Angin Per Ruang

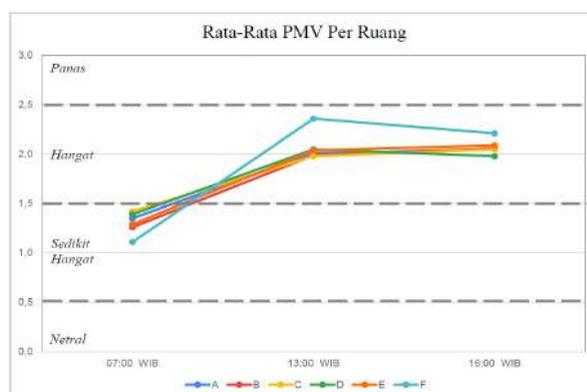
Nilai kelembapan relatif pada seluruh ruangan kelas pada pukul 07.00 WIB, 13.00 WIB, dan 16.00 WIB berada di atas batas maksimum standar kelembapan relatif sehingga belum mencapai kelembapan optimal dan berpotensi menyebabkan ketidaknyamanan dan gangguan kesehatan yang disebabkan oleh bakteri, virus, jamur, dan lain sebagainya. Menurut grafik tersebut didapatkan kesimpulan kecepatan aliran udara pada setiap ruangan kelas bervariasi dari 0 – 0,06 m/s, kecepatan aliran udara terendah berada pada pagi hari, serta ruangan kelas A tidak mendapatkan aliran udara. Berdasarkan standar Stewart (2008) dan Buku Ilmu Fisika Bangunan, Heinz Frick (Tohari, 2014) kecepatan aliran udara mencapai batas nyaman dari 0,25 – 0,5 m/s. Pada setiap ruangan kelas nilai rata-rata kecepatan aliran udara pada ruang dalam dan ruang luar secara keseluruhan masih berada dalam kategori tidak terasa.



Gambar 4.9. Grafik Temperatur Udara Per Ruang



Gambar 4.10. Grafik Temperatur Radiasi Per Ruang



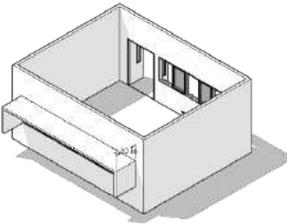
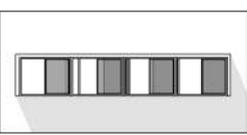
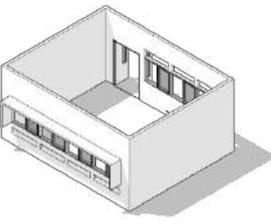
Gambar 4.11. Grafik PMV Per Ruang

Nilai rata-rata PMV pada setiap ruangan kelas di dalam ruangan mencapai nilai tertinggi +2,09 pukul 16.00 WIB pada ruang kelas E sehingga termasuk ke dalam kategori hangat, dan terendah +1,26 pada pukul 07.00 WIB pada ruangan kelas B termasuk ke dalam kategori sedikit hangat. Nilai rata-rata PMV di luar ruangan mencapai titik tertinggi +2,36 pada pukul 13.00 WIB yang termasuk ke dalam kategori hangat dengan titik terendah +1,11 pada pukul 07.00 WIB termasuk ke dalam kategori sedikit hangat.

### 4.3 Hasil Optimalisasi Ruang Kelas

Simulasi digunakan untuk memprediksi kinerja termal bangunan dan bagaimana metode yang efektif dan efisien untuk menguji berbagai macam strategi optimalisasi bangunan. *Software* yang digunakan untuk simulasi termal adalah Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Simulasi CFD dapat memberikan prediksi terperinci terkait kecepatan aliran udara, tekanan udara, suhu, hingga kelembapan relatif sehingga menjadi alat yang andal untuk mengevaluasi lingkungan termal. Hasil simulasi dapat digunakan untuk menganalisis secara kuantitatif lingkungan termal dan menentukan efektivitas serta efisiensi kinerja bangunan. Implementasi data berdasarkan rata-rata nilai yang diperoleh dari pengukuran lapangan yaitu Temperatur Udara/ *Air Temperature* (TA), Temperatur Radiasi/ *Mean Radiant Temperature* (TG), Kelembapan Udara/ *Relative Humidity* (RH) serta Kecepatan Aliran Udara/ *Air Velocity* (AV). Hasil analisis kondisi termal ruangan kelas KB-TK Pahoa Tangerang menunjukkan dapat dilakukan optimalisasi dengan strategi desain pasif dengan implementasi dalam model alternatif sebagai berikut:

Tabel 4.1. Model Alternatif Optimalisasi Ruang Kelas

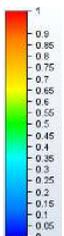
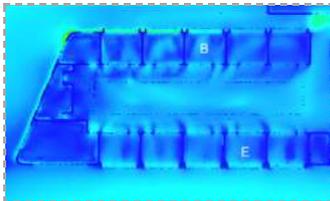
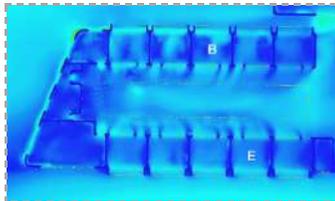
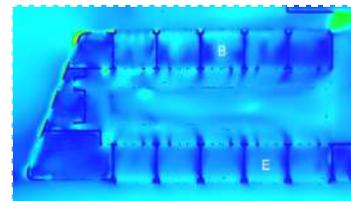
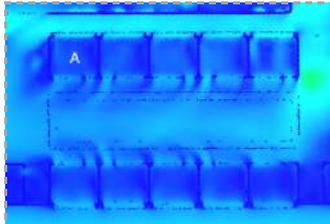
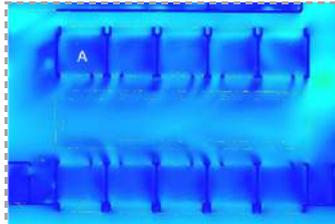
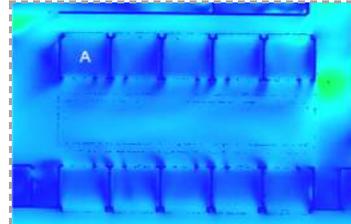
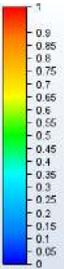
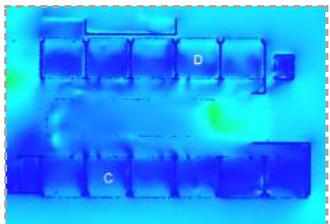
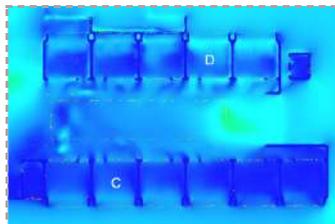
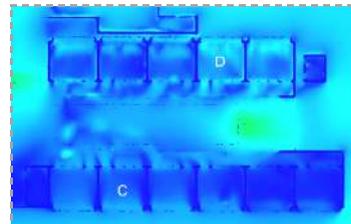
No.	Gambar	Keterangan
<b>Penangkal Sinar Matahari/ <i>Shading</i></b>		
1.	  <p>Isometri Model Alt 1      Tampak Model Alt 1</p>	Model alternatif ruangan kelas ini berupaya untuk menanggapi masalah kehangatan berlebih dalam ruangan dengan memperlebar <i>shading</i> eksisting sebesar 120 cm. Strategi ini diharapkan dapat mengurangi intensitas panas matahari masuk ke dalam ruangan dengan pelebaran penangkal sinar matahari.
<b>Modifikasi Ventilasi</b>		
2.	  <p>Isometri Model Alt 2      Tampak Model Alt 2</p>	Model alternatif ruangan ini berupaya untuk memasukkan aliran udara alami lebih banyak ke dalam bangunan dengan menambahkan ventilasi alami di bagian <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> . Ventilasi di bagian inlet yang menghadap ke luar bangunan diletakkan di bawah jendela eksisting dan ventilasi bagian outlet berada di atas. Hal ini diterapkan untuk mengupayakan gerakan <i>stack effect</i> untuk membuang udara hangat ke atas sehingga menciptakan aliran udara baru yang lebih segar.



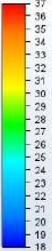
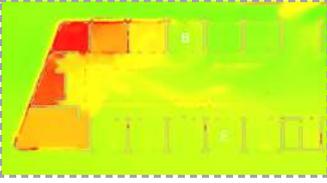
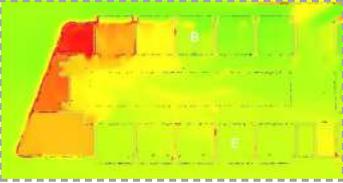
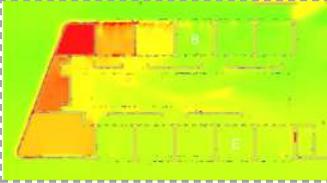
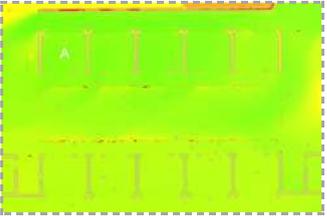
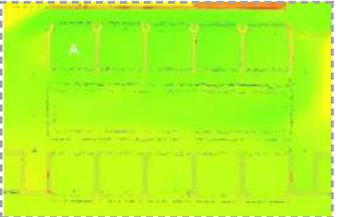
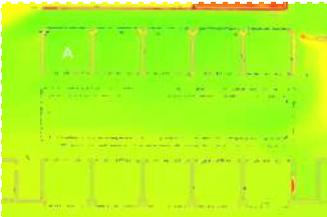
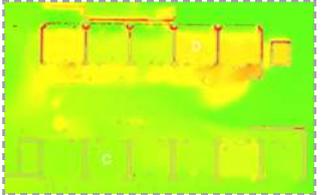
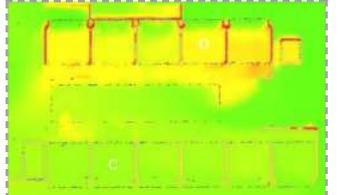
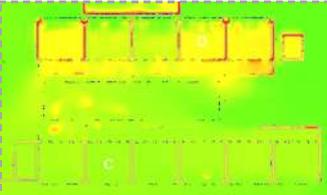
Hasil simulasi untuk optimalisasi dilakukan untuk mengetahui efisiensi kinerja model alternatif. Simulasi eksisting diupayakan dengan angka yang serupa dengan data lapangan pada tanggal 31 Oktober 2022 pukul 13.00 WIB, kemudian dilanjutkan dengan simulasi model optimalisasi. Alternatif optimalisasi ruangan kelas model 1 untuk mengidentifikasi pengaruh pelebaran penangkal sinar matahari/ *shading* hingga 120 cm dan alternatif ruangan kelas model 2 untuk mengidentifikasi pengaruh modifikasi ventilasi terhadap kenyamanan termal dalam ruangan.

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Pahoa Kindergarten Tangerang)*

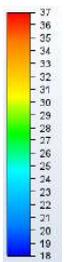
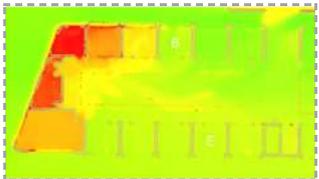
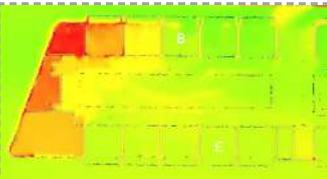
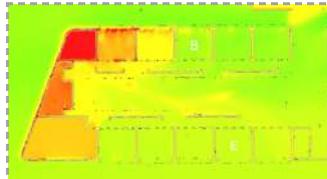
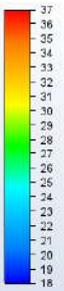
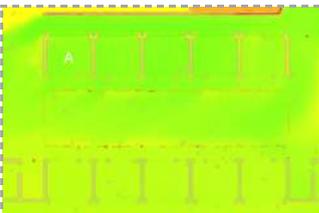
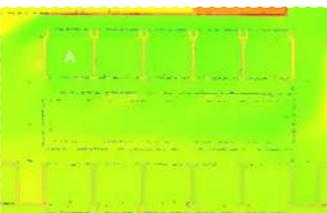
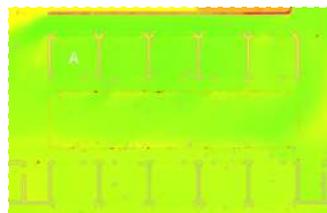
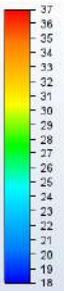
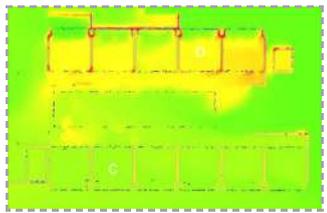
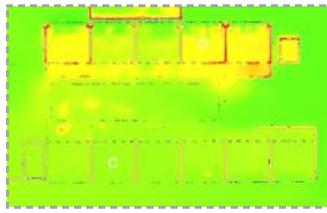
Tabel 4.2. Hasil Simulasi Optimalisasi Ruang Kelas

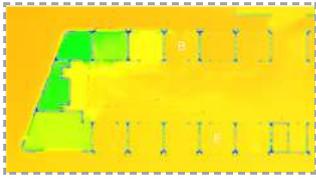
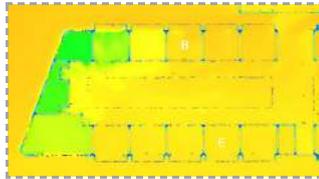
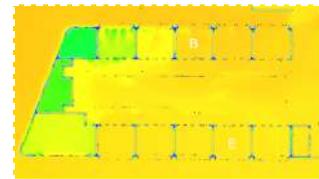
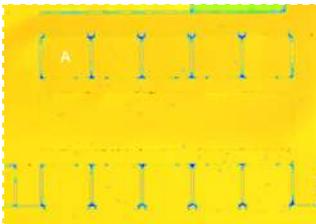
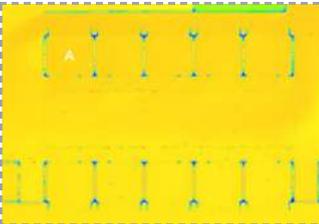
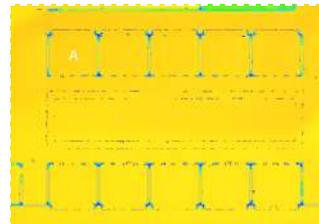
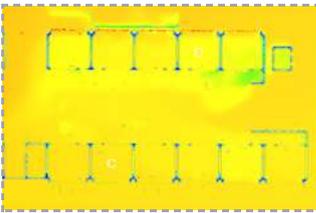
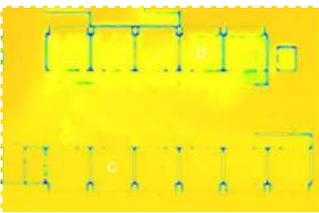
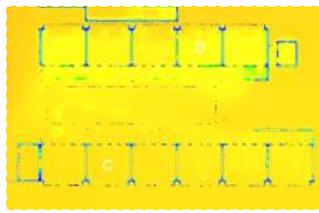
Nilai	Kriteria		
	Kecepatan Aliran Udara (AV m/s)		
	Eksisting Bagian 1	Shading Bagian 1	Ventilasi Bagian 1
			
	<p><b>Ket.</b> Pada ruang kelas B, angin dapat menjangkau bagian tengah ruangan kelas sebesar 0,14 m/s. Pada ruang kelas E kecepatan angin sebesar 0,12 m/s menjangkau bagian tengah ruang kelas.</p>	<p>Pada ruang kelas B, angin dapat menjangkau bagian tengah ruangan kelas sebesar 0,17 m/s. Pada ruang kelas E kecepatan angin sebesar 0,14 m/s menjangkau bagian tengah ruang kelas.</p>	<p>Kecepatan angin pada bagian tengah ruang kelas B mengalami peningkatan sehingga mencapai 0,2 m/s. Pada ruang kelas E persebaran angin menjadi lebih merata dan meningkat hingga 0,14 m/s.</p>
	Eksisting Bagian 2	Shading Bagian 2	Ventilasi Bagian 2
			
	<p><b>Ket.</b> Angin dapat menjangkau bagian tengah ruangan kelas A dengan kecepatan 0,08 m/s.</p>	<p>Angin dapat menjangkau bagian tengah ruangan kelas A dengan kecepatan 0,1 m/s.</p>	<p>Pada ruang kelas A persebaran angin lebih merata dan mengalami peningkatan kecepatan mencapai 0,1 m/s.</p>
	Eksisting Bagian 3	Shading Bagian 3	Ventilasi Bagian 3
			
	<p><b>Ket.</b> Pada ruang kelas C angin menjangkau bagian tengah ruang kelas sebesar 0,07 m/s dan ruang kelas D mencapai 0,15 m/s di bagian tengah ruangan kelas.</p>	<p>Kecepatan angin pada bagian tengah ruang kelas C mengalami peningkatan mencapai 0,08 m/s, dan pada ruang kelas D mencapai 0,17 m/s.</p>	<p>Kecepatan angin pada bagian tengah ruang kelas C meningkat hingga 0,08 m/s, pada ruang kelas D meningkat hingga 0,2 m/s sehingga menjangkau bagian dalam ruang kelas.</p>
Nilai	Temperatur Udara (TA °C)		

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Pahoa Kindergarten Tangerang)*

	<p style="text-align: center;"><b>Eksisting Bagian 1</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Shading Bagian 1</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Ventilasi Bagian 1</b></p> 
<p><b>Ket.</b></p>	<p>Pada ruang kelas B, temperatur udara di bagian tengah ruangan kelas mencapai 29,5°C. Pada ruang kelas E, temperatur mencapai 29,6°C di bagian tengah ruang kelas.</p>	<p>Temperatur udara di bagian tengah ruangan kelas B mengalami mencapai 29,3°C. Pada ruang kelas E, temperatur mencapai 29,5°C di bagian tengah ruang kelas.</p>	<p>Temperatur udara pada bagian tengah ruang kelas B mengalami penurunan dengan kisaran 29°C – 29,3°C, dan pada ruang kelas E 29,4°C – 29,5°C.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Eksisting Bagian 2</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Shading Bagian 2</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Ventilasi Bagian 2</b></p> 
<p><b>Ket.</b></p>	<p>Temperatur udara di bagian tengah ruangan kelas A mencapai 28,9°C.</p>	<p>Pada bagian tengah ruangan kelas A mengalami penurunan hingga 28,7°C.</p>	<p>Temperatur udara di bagian tengah ruangan kelas A mengalami penurunan dengan kisaran 28,7°C - 28,8°C.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Eksisting Bagian 3</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Shading Bagian 3</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Ventilasi Bagian 3</b></p> 
<p><b>Ket.</b></p>	<p>Pada ruang kelas C temperatur udara bagian tengah mencapai 29,2°C. Pada ruang kelas D temperatur mencapai 31°C pada bagian tengah ruangan kelas.</p>	<p>Temperatur udara pada bagian tengah ruangan kelas C mengalami penurunan hingga 29°C. Pada ruang kelas D temperatur mencapai 31°C pada bagian tengah ruangan kelas.</p>	<p>Temperatur udara bagian tengah ruang kelas C mengalami penurunan pada kisaran 29°C - 29,1°C dan pada bagian tengah ruang kelas D 30,2°C - 30,7°C.</p>

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Pahoa Kindergarten Tangerang)*

Nilai	Temperatur Radiasi (TG °C)		
	<b>Eksisting Bagian 1</b>	<b>Shading Bagian 1</b>	<b>Ventilasi Bagian 1</b>
			
<b>Ket.</b>	Pada ruang kelas B, temperatur radiasi mencapai 29,5°C pada bagian tengah ruangan. Pada ruang kelas E, temperatur pada bagian tengah ruang mencapai 29,6°C.	Temperatur radiasi di bagian tengah ruangan kelas B mengalami penurunan mencapai 29,3°C. Pada ruang kelas E, temperatur mencapai 29,5°C di bagian tengah ruang kelas.	Temperatur radiasi pada bagian tengah ruang kelas B mengalami penurunan pada kisaran 29°C – 29,3°C dan pada ruang kelas E 29,5°C.
	<b>Eksisting Bagian 2</b>	<b>Shading Bagian 2</b>	<b>Ventilasi Bagian 2</b>
			
<b>Ket.</b>	Temperatur radiasi di bagian tengah ruangan kelas A mencapai 28,9°C.	Pada bagian tengah ruangan kelas A mengalami penurunan hingga 28,7°C.	Temperatur radiasi di bagian tengah ruangan kelas A mengalami penurunan dengan kisaran 28,7°C - 28,8°C.
	<b>Eksisting Bagian 3</b>	<b>Shading Bagian 3</b>	<b>Ventilasi Bagian 3</b>
			
<b>Ket.</b>	Pada ruang kelas C temperatur radiasi bagian tengah ruangan kelas C mencapai 29,2°C. Pada ruang kelas D temperatur mencapai 31°C pada bagian tengah ruangan kelas.	Temperatur radiasi pada bagian tengah ruangan kelas C mengalami penurunan hingga 29°C. Pada ruang kelas D temperatur mencapai 31°C pada bagian tengah ruangan kelas.	Temperatur radiasi bagian tengah ruang kelas C mengalami penurunan pada kisaran 29°C - 29,1°C dan pada bagian tengah ruang kelas D 30,2°C - 30,7°C.

Nilai	Kelembapan Udara Relatif (RH %)		
	Eksisting Bagian 1	Shading Bagian 1	Ventilasi Bagian 1
			
Ket.	Pada bagian tengah ruang kelas B kelembapan udara mencapai 75,7%. Pada ruang kelas E, kelembapan udara mencapai 73% pada bagian tengah ruangan.	Kelembapan udara pada bagian tengah ruang kelas B mencapai 74,9%. Pada ruang kelas E, kelembapan udara mencapai 73% pada bagian tengah ruangan.	Kelembapan udara pada bagian tengah ruang kelas B mencapai 76,6% dan ruang kelas E mencapai 73,3%.
			
Ket.	Kelembapan udara mencapai 76% pada bagian tengah ruang kelas A.	Pada bagian tengah ruang kelas A kelembapan udara mencapai 76,3%.	Kelembapan udara mencapai 76,3% pada bagian tengah ruang kelas A.
			
Ket.	Pada bagian tengah ruang kelas C, kelembapan udara mencapai 73,3%. Pada ruang kelas D, kelembapan udara mencapai 66,5% pada bagian tengah ruang kelas.	Kelembapan udara pada bagian tengah ruang kelas C mencapai 73%. Pada ruang kelas D, kelembapan udara mencapai 66% pada bagian tengah ruang kelas.	Pada bagian tengah ruang kelas C, kelembapan udara mencapai 73,5%. Pada ruang kelas D, kelembapan udara mencapai 68% pada bagian tengah ruang kelas.

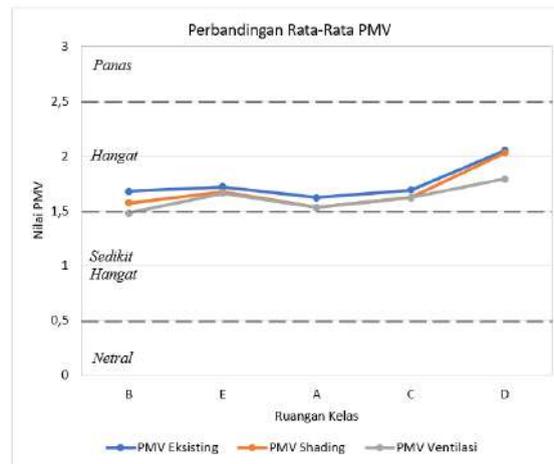
#### 4.4 Perbandingan Hasil Optimalisasi Bangunan

Hasil optimalisasi ruangan kelas dengan strategi pelebaran penangkal sinar matahari/*shading* dan modifikasi ventilasi dibandingkan dengan model eksisting untuk memperjelas efek yang dipengaruhi optimalisasi model alternatif ruangan kelas. Hasil perbandingan PMV, SET, Kecepatan Aliran Udara, Temperatur Udara, Temperatur Radiasi, dan Kelembapan Udara Relatif dari setiap model ruangan kelas dijabarkan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 4.3. Perbandingan Hasil Optimalisasi Ruang Kelas

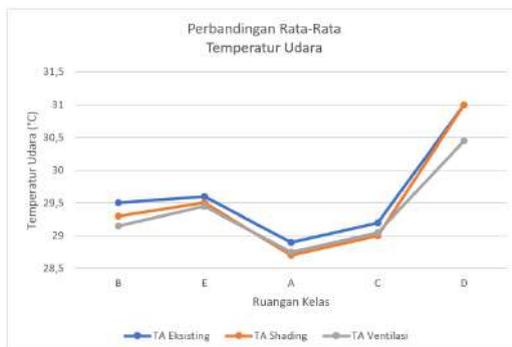
Strategi Optimalisasi	Eksis-tin g	Shading	Ventilasi	Eksis-tin g	Shading	Ventilasi
<b>Tolak Ukur</b>	<b>Predicted Mean Vote (PMV)</b>			<b>Standard Effective Temperature (SET)</b>		
Nilai Maksimum	+2.05	+2.03	+1.79	33,72°C	33,2°C	32,86°C
Nilai Minimum	+1.62	+1.53	+1.48	32,56°C	31,73°C	31,33°C
Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	+1.75	+1.68	+1.62	33,04°C	32,5°C	32,15°C
% Perubahan Maksimum	-	-6,55%	-12,68%	-	-4,34%	-5,55%
% Perubahan Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	-	-4%	-7,43%	-	-1,63%	-2,69%
<b>Tolak Ukur</b>	<b>Kecepatan Aliran Udara (AV)</b>			<b>Temperatur Udara (TA)</b>		
Nilai Maksimum	0,15 m/s	0,17 m/s	0,2 m/s	31°C	31°C	30,7°C
Nilai Minimum	0,07 m/s	0,08 m/s	0,08 m/s	28,9°C	28,7°C	28,7°C
Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	0,11 m/s	0,13 m/s	0,14 m/s	29,6°C	29,5°C	29,4°C
% Perubahan Maksimum	-	25%	42,86%	-	-0,69%	-1,77%
% Perubahan Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	-	17,86%	25,57%	-	-0,47%	-0,91%
<b>Tolak Ukur</b>	<b>Temperatur Radiasi (TG)</b>			<b>Kelembapan Udara Relatif (RH)</b>		
Nilai Maksimum	31°C	31°C	30,7°C	76%	76,3%	76,6%
Nilai Minimum	28,9°C	28,7°C	28,7°C	66,5%	66%	68%
Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	29,6°C	29,5°C	29,4°C	72,9%	72,8%	73,5%
% Perubahan Maksimum	-	-0,69%	-1,77%	-	-1,06%	2,26%
% Perubahan Rata-Rata ( $\bar{x}$ )	-	-0,47%	-0,88%	-	-0,36%	0,88%

Berdasarkan hasil simulasi alternatif optimalisasi model ruangan kelas dengan pelebaran penangkal sinar matahari/ *shading* dan modifikasi ventilasi, didapatkan hasil seperti pada tabel di atas. Pada model ruangan kelas dengan pelebaran *shading*, mengalami penurunan PMV maksimum sebesar 6,55%. PMV maksimum mengalami penurunan dari nilai eksisting +2.05 ke +2.03 dan PMV minimum +1.62 ke +1.53. Perubahan PMV secara rata-rata mengalami penurunan sebesar 4% dari +1.75 ke +1.68. Model ruangan kelas dengan modifikasi ventilasi mengalami penurunan PMV maksimum sebesar 12,68% dan penurunan rata-rata 7,43%. PMV maksimum mengalami penurunan dari nilai eksisting +2.05 ke +1.79, PMV minimum menurun dari +1.62 ke +1.48, dan secara rata-rata mengalami penurunan dari +1.75 ke +1.62. Secara garis besar model alternatif optimalisasi dengan *shading* mengalami penurunan namun masih termasuk kategori sensasi termal hangat. Model alternatif dengan optimalisasi ventilasi mengalami penurunan nilai PMV yang lebih signifikan dan satu ruangan kelas dapat mencapai kategori sensasi termal sedikit hangat.

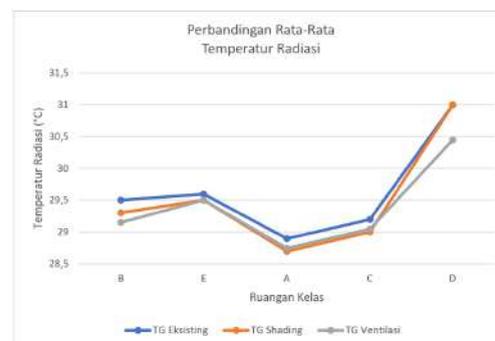


Gambar 4.12. Perbandingan Rata-Rata PMV

Pada model ruangan kelas dengan pelebaran *shading*, SET maksimum mengalami penurunan sebesar 4,34% dan penurunan rata-rata 1,63%. Nilai SET maksimum dari nilai eksisting 33,72°C menurun hingga 33,2°C, nilai minimum menurun dari 32,56°C ke 31,73°C, dan nilai rata-rata menurun dari 33,04°C hingga 32,5°C. Model ruangan kelas dengan optimalisasi ventilasi mengalami penurunan SET maksimum dari nilai eksisting 33,72°C hingga 32,86°C, SET minimum menurun dari 32,56°C ke 31,33°C, dan nilai rata-rata menurun dari 33,04°C hingga 32,15°C. Kenyamanan termal dan reaksi fisiologis yang dialami selaras dengan sensasi termal PMV, model alternatif optimalisasi dengan *shading* mengalami penurunan namun masih termasuk kategori tidak nyaman dan berkeringat. Model alternatif dengan optimalisasi ventilasi mengalami penurunan nilai SET yang lebih signifikan dan satu ruangan kelas dapat mencapai kategori sedikit tidak nyaman dan sedikit hangat.



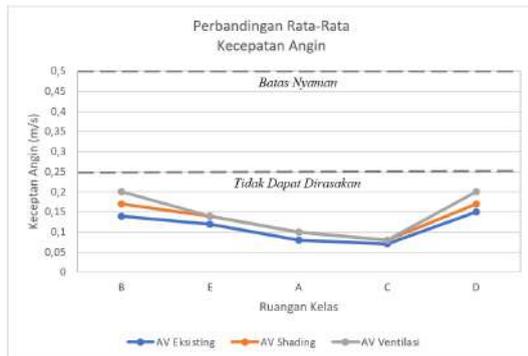
Gambar 4.13. Perbandingan Rata-Rata Temperatur Udara



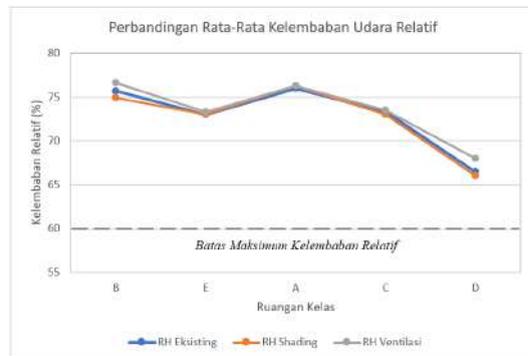
Gambar 4.14. Perbandingan Rata-Rata Temperatur Radiasi

Pada model ruangan kelas dengan pelebaran *shading*, temperatur udara maksimum mengalami penurunan sebesar 0,69% dan penurunan rata-rata 0,47%. Nilai temperatur udara maksimum dari nilai eksisting 31°C tetap pada 31°C dan nilai minimum menurun dari 28,9°C ke 28,7°C, dan nilai rata-rata menurun dari 29,6°C hingga 29,5°C. Model ruangan kelas dengan optimalisasi ventilasi mengalami penurunan temperatur udara maksimum sebesar 1,77% dan rata-rata sebesar 0,91%. Nilai temperatur udara maksimum mengalami penurunan dari nilai eksisting 31°C hingga 30,7°C, temperatur udara minimum menurun dari 28,9°C ke 28,7°C, dan nilai rata-rata menurun dari 29,6°C hingga 29,4°C. Model alternatif ruangan kelas dengan pelebaran *shading* temperatur radiasi maksimum mengalami penurunan sebesar 0,69% dan penurunan rata-rata 0,47%. Nilai temperatur radiasi maksimum dari nilai eksisting 31°C tetap pada 31°C dan nilai minimum menurun dari 28,9°C ke 28,7°C, dan nilai rata-rata menurun dari 29,6°C hingga 29,5°C. Model ruangan kelas dengan optimalisasi ventilasi

mengalami penurunan temperatur radiasi maksimum sebesar 1,77% dan rata-rata sebesar 0,88%. Nilai temperatur radiasi maksimum mengalami penurunan dari nilai eksisting 31°C hingga 30,7°C, temperatur radiasi minimum menurun dari 28,9°C ke 28,7°C, dan nilai rata-rata menurun dari 29,6°C hingga 29,4°C.



Gambar 4.15. Perbandingan Rata-Rata Kecepatan Angin



Gambar 4.16. Perbandingan Rata-Rata Kelembaban Udara Relatif

Model alternatif ruangan kelas dengan optimalisasi ventilasi mengalami peningkatan kecepatan aliran udara dengan nilai maksimum 0,2 m/s dari nilai eksisting 0,15 m/s, nilai minimum dari nilai eksisting 0,07 m/s menjadi 0,08 m/s dan rata-rata mengalami peningkatan dari 0,11 m/s ke 0,14 m/s. Perubahan kecepatan aliran udara maksimum mencapai 42,86% dan rata-rata sebesar 25,57%. Model alternatif ruangan kelas dengan optimalisasi *shading* mengalami perubahan kecepatan aliran udara dengan nilai maksimum 0,17 m/s dari nilai eksisting 0,15 m/s, nilai minimum dari nilai 0,07 m/s hingga 0,08 m/s secara rata-rata dari 0,11 m/s ke 0,13 m/s. Perubahan kecepatan aliran udara maksimum mencapai 25% dan rata-rata sebesar 17,86%. Pada model ruangan kelas dengan pelebaran *shading*, kelembapan udara maksimum mengalami penurunan sebesar 1,06% dan penurunan rata-rata 0,36%. Nilai kelembapan udara maksimum dari nilai eksisting 76% mengalami perubahan menjadi 76,3% dan nilai minimum menurun dari 66,5% ke 66%, dan nilai rata-rata dari 72,9% hingga 72,8%. Model ruangan kelas dengan optimalisasi ventilasi mengalami kenaikan kelembapan udara maksimum sebesar 2,26% dan rata-rata meningkat hingga 0,88%. Nilai kelembapan udara maksimum meningkat dari nilai eksisting 76% hingga 76,6%, kelembapan udara minimum dari 66,5% ke 68%, dan nilai rata-rata meningkat dari 72,9% hingga 73,5%. Model alternatif optimalisasi ruangan kelas dengan strategi pelebaran penangkal sinar matahari/ *shading* maupun modifikasi ventilasi belum mampu menurunkan tingkat kelembapan udara relatif sehingga perlu dilakukan penyikapan khusus untuk mencapai batas kenyamanan kelembapan.

Berdasarkan data pengukuran lapangan, bangunan eksisting dapat menghalau panas di dalam ruang pada siang hari pukul 13.00 WIB hingga sore hari pukul 16.00 WIB sekitar 1 – 3°C. Nilai *Predicted Mean Vote* (PMV) menyatakan sensasi termal yang dirasakan dari pukul 07.00 - 16.00 WIB terasa sedikit hangat yang menyebabkan sedikit berkeringat hingga hangat yang menyebabkan berkeringat. Kriteria tingkat aktivitas yang digunakan untuk data PMV merupakan aktivitas ringan, sehingga bila anak-anak beraktivitas cukup berat akan menyebabkan sensasi termal yang lebih tinggi. Menurut studi mengenai evaluasi kenyamanan termal dengan menggunakan model berbasis anak, model kenyamanan orang dewasa menunjukkan perbedaan dengan model anak. Ketika menggunakan model kenyamanan termal berbasis anak, hampir separuh ruang kelas mengalami panas berlebih (Despoina Teli, Leonidas Bourikas, Patrick A.B. James, Abubakr S. Bahaj. 2017). Oleh karena itu perlu menjadi pertimbangan bahwa anak-anak menunjukkan sensasi termal yang lebih tinggi dibandingkan orang dewasa. Mengetahui ruangan kelas lebih dominan digunakan pukul 07.00 – 11.00 WIB kinerja bangunan sangat baik, namun untuk mengakomodasi beberapa

anak-anak yang mengikuti kelas siang kenyamanan termal perlu diperhatikan. Data kelembapan udara relatif menunjukkan nilai yang tinggi sehingga perlu diperhatikan untuk meningkatkan kenyamanan dan pemeliharaan ruangan kelas. Pada setiap ruangan kelas, nilai rata-rata kecepatan aliran udara secara keseluruhan berada dalam kategori rendah sehingga sangat sedikit mendapatkan efek penyejukan dari angin. Namun tersedia kipas angin mekanis di dalam ruangan kelas sehingga dapat menjadi substitusi penyejukan dari aliran udara dengan catatan peningkatan konsumsi energi.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

Hasil penelitian menunjukkan pada saat pagi sampai siang hari, peserta didik pengguna ruangan kelas menunjukkan sensasi termal sedikit hangat (*slightly warm*) sehingga beberapa strategi optimalisasi dapat dilakukan. Pada siang hari berdasarkan data eksisting anak-anak KB-TK akan merasa hangat (*warm*) sehingga untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat dilakukan optimalisasi dengan alternatif penangkal sinar matahari (*shading*) & ventilasi. Hasil penelitian dari optimalisasi tersebut diperoleh optimalisasi desain yang signifikan. Berdasarkan hasil simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) sebagai upaya optimalisasi ruangan kelas ditemukan perubahan kinerja termal. Model alternatif ruangan kelas dengan modifikasi ventilasi yang disimulasikan pada pukul 13.00 WIB menunjukkan penurunan PMV hingga 12,68% dari nilai +2.05 ke +1.79, dan penurunan nilai SET hingga 5,55% dari 33,72°C ke 32,86°C. Hasil tersebut mengalami penurunan lebih signifikan dibandingkan model alternatif pelebaran penangkal sinar matahari/ *shading*. Hasil simulasi model alternatif modifikasi ventilasi memperlihatkan kemampuan dalam perubahan sensasi termal dari hangat menjadi sedikit hangat, serta kenyamanan termal dan reaksi fisiologis dari tidak nyaman dan berkeringat menjadi sedikit tidak nyaman dan sedikit berkeringat pada salah satu ruangan kelas.

Kecepatan aliran udara pada salah satu model alternatif ruangan kelas modifikasi ventilasi dapat mencapai nilai maksimum 0,2 m/s yaitu 42,86% lebih tinggi dibandingkan nilai eksisting. Temperatur udara dan temperatur radiasi mengalami penurunan 1,77% sehingga mencapai nilai minimum 28,7°C pada salah satu ruangan kelas. Kelembapan udara relatif pada hasil simulasi model alternatif cenderung memperlihatkan hasil yang serupa dengan nilai eksisting. Nilai kelembapan udara relatif mengalami penurunan 1,06% pada model alternatif ruangan kelas dengan pelebaran *shading* namun meningkat hingga 2,26% pada model alternatif ruangan kelas dengan modifikasi ventilasi. Nilai kelembapan udara relatif dari kedua model alternatif optimalisasi belum mencapai standar sehingga perlu dilakukan penyikapan khusus. Umumnya dehumidifikasi di iklim hangat lembap dilakukan dengan pengkondisian udara mekanis namun sangat memakan energi. Salah satu upaya dehumidifikasi pasif dapat menggunakan sistem loteng dengan kayu lapis/ *plywood* sebagai ruang dehumidifikasi. Kayu lapis/ *plywood* bertindak sebagai pengering, menyerap kelembapan dari udara dari ruang yang ditempati di bawah (Torwong Chenvidyakarn, 2007).

Berdasarkan hasil penelitian ditemukan terdapat perubahan signifikan pada model optimalisasi. Oleh karena itu penulis menganjurkan penelitian lebih lanjut mengenai berbagai macam model optimalisasi yang dapat diterapkan sebagai upaya pendinginan pasif. Kondisi setiap ruangan kelas yang cenderung berbeda dari nilai kecepatan angin, temperatur udara, temperatur radiasi, dan kelembapan udara relatif dapat menjadi pertimbangan untuk meneliti strategi pendinginan pasif yang berbeda untuk setiap ruangan kelas dengan berbagai macam penerapan model optimalisasi. Selain itu, nilai kelembapan yang cenderung serupa meskipun telah diterapkan model optimalisasi dapat menjadi objek untuk studi lebih lanjut sebagai upaya menganalisis cara dehumidifikasi pasif sederhana untuk menyelesaikan permasalahan kelembapan yang berlaku untuk penggunaan secara komersil. Penelitian lebih lanjut

dianjurkan untuk menyelidiki model alternatif optimalisasi ruangan kelas untuk mewujudkan kenyamanan termal bagi pengguna ruangan kelas terutama anak-anak.

## **6. DAFTAR PUSTAKA**

- AHMAD, C. N. C., SHAHARIM, S. A., & ABDULLAH, M. F. N. L. (2017). *Teacher-Student Interactions, Learning Commitment, Learning Environment and Their Relationship with Student Learning Comfort*. *Journal of Turkish Science Education*, 14(1), 57–72. Universiti Pendidikan Sultan Idris: Perak, Malaysia.
- ARIFAH, ANISA BUDIANI, ADHITAMA, M. SATYA, NUGROHO, AGUNG MURTI. (2017). *Pengaruh Bukaannya Terhadap Kenyamanan Termal Pada Ruang Hunian Rumah Susun Apartemen Surabaya*. Universitas Brawijaya Malang, Jawa Timur.
- ASHRAE. (2017). *Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI/ASHRAE.
- BHAMARE, DNYANDIP K.; RATHOD, MANISH K.; BANERJEE, JYOTIRMAY (2019). *Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones - The State of Art*. Energy and Buildings. Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology: Surat, Gujarat, India.
- CARMEN DÍAZ-LÓPEZ, ANTONIO SERRANO-JIMÉNEZ, KONSTANTIN VERICHEV, ÁNGELA BARRIOS-PADURA. (2022). *Passive cooling strategies to optimize sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review*. Building and Environment, Volume 221. University of Granada, University of Seville: Spain. Universidad Austral de Chile: Chile.
- CHEN, XI; YANG, HONGXING; LU, LIN (2015). *A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, 1425–1436. The Hong Kong Polytechnic University.
- CHENVIDYAKARN, TORWONG. (2007). *Review Article: Passive Design for Thermal Comfort in Hot Humid Climates*. Department of Architecture, University of Cambridge: UK.
- FU, ZHAOSONG FANG. (2021). *Analysis of SET\* and PMV to evaluate thermal comfort in prefabricated construction site offices: Case study in South China*. Case Studies in Thermal Engineering, Volume 26. Guangzhou University: China.
- HAMZAH, BAHARUDDIN & GOU, ZHONGHUA & MULYADI, ROSADY & AMIN, SAMSUDDIN (2018). *Thermal Comfort Analyses of Secondary School Students in the Tropics*. Hasanuddin University: Makassar, Indonesia.
- HYUNJUN YUN, INSICK NAM, JINMAN KIM, JINHO YANG, KYOUNGHO LEE, JONGRYEUL SOHN, (2014). *A field study of thermal comfort for kindergarten children in Korea: An assessment of existing models and preferences of children*. Building and Environment, Volume 75. Korea University: Seoul, The Republic of Korea.
- KARYONO, TRI HARSO. (2016). *Arsitektur Tropis dan Bangunan Hemat Energi*. Jurnal Kalang Jurusan Teknik Arsitektur. Universitas Tarumanegara: Jakarta.
- SARDJONO, AGUNG BUDI. (2011). *Respon Rumah Tradisional Kudus Terhadap Iklim Tropis*. Universitas

*Passive Cooling Study to Optimize School Thermal Comfort in a Humid Tropical Climate  
(Case Study: Paho Kindergarten Tangerang)*

- Diponegoro: Semarang.
- SNI 03-6572-2001. (2001). Standar Nasional Indonesia: *Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung, Jakarta.*
- TELI, DESPOINA & BOURIKAS, LEONIDAS & JAMES, PATRICK & BAHAJ, ABUBAKR. (2017). *Thermal Performance Evaluation of School Buildings using a Children-based Adaptive Comfort Model*. Procedia Environmental Sciences. University of Southampton: United Kingdom.
- ZAHRA SADAT ZOMORODIAN, MOHAMMAD TAHSILDOOST, MOHAMMADREZA HAFEZI. (2016). *Thermal comfort in educational buildings: A review article*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 59. Shadid Beheshti University: Tehran, Iran
- ZHIMIN ZHENG, YUCHUN ZHANG, YUDONG MAO, YANPING YANG, CHUHAO FU, ZHAOSONG
- FANG. (2021). *Analysis of SET\* and PMV to evaluate thermal comfort in prefab construction site offices: Case study in South China*. Case Studies in Thermal Engineering, Volume 26. Guangzhou University: China.