

## 学位論文の要旨

氏名

I Dewa Gede Arya Putra

学位論文題目

インドネシアにおけるパッシブクーリング気候区分と  
標準年気象データの開発

本論文は、インドネシアのパッシブクーリング気候区分と標準年気象データの作成方法についてまとめたものである。

第1章は、研究背景・目的・特徴について述べた。地球温暖化は人類にとっての課題であり、インドネシアでも温暖化防止対策が政策課題となっている。建物で消費するエネルギーは年々増加しており、建物の省エネルギー基準の策定が喫緊の課題となっている。建物の省エネルギー性能を規定するには、地域毎の気候の特徴を捉えて適切な基準を設定する必要がある。インドネシアは赤道帯に位置し、東西に長い国土を有する。気候に関してはケッペン気候区分が広く知られているが、本論文では建物のパッシブクーリング手法に着目したパッシブクーリング気候区分について検討した。次に、建物の環境性能をシミュレーションで評価する際に用いる標準年気象データの作成方法を検討した。気象は年による変動が大きく、特定の年の観測データをそのまま建物の評価に用いることはできない。このため月毎に標準と見なされる年を選定して、省エネルギー政策で用いる気象データを作成する。標準年気象データの作成方法には多くの既往研究があり、課題や特徴を整理した。

第2章は、パッシブクーリング手法の観点からインドネシアの気候区分について検討し、パッシブクーリング気候区分を提案した。多くの国では、気温等の過酷さに応じた省エネルギー基準を設けており、それを適用する地域を区分して示している。例えば日本では気温に応じて8つの地域に区分している。インドネシアは年間を通して冷房が使われるが、住宅での普及はまだ低く、今後の増加を抑えるには冷房に頼らないパッシブクーリング手法を有効に活用することが望まれる。そこで、インドネシア106地点の2014年～2020年の8気象要素の時別値を収集し、主成分分析とクラスター解析により、4つの大区分とそれぞれ2つの小区分からなるパッシブ気候区分を提案した。

第3章は、各気候区分におけるパッシブクーリング手法のポテンシャルについて考察した。ここではパッシブクーリング手法として夜間換気、快適換気、蒸発冷却について検討した。夜間換気ポテンシャルから、高地熱帯気候ゾーンは、比較的気温が低いいため、夜間換気のポテンシャルが高いことが示された。インドネシアの全ての気候帯で夜間換気の可能性が高い季節は、7月、8月、9月、10月であった。快適な換気の可能性を見ると、サバンナ気候ゾーンは、強いモンスーン風の影響を受けるため、快適な換気の可能性が高い。一方、赤道付近の赤道気候ゾーンは、夜間換気、快適換気のポテンシャルが最も低い地域である。蒸発冷却ポテンシャルについては、サバンナ気候ゾーン、モンスーン気候ゾーンは、7月、8月、9月、10月に相対湿度が低下し高い蒸発冷却ポテンシャルを示した。一方、赤道気候ゾーンは、年間を通して相対湿度が高いため、蒸発冷却の可能性が低くなった。

第4章ではタンゲランとバリで観測している4方位鉛直面日射量について考察した。建物の熱環境は、日射の影響を強く受ける。特に窓や壁からの日射熱取得は冷房負荷の大きな割合を占める。日射の影響を定量的に評価するには、壁面に入射する日射量のデータが必要となるが、気象官署で観測されている日射量は水平面全天であり、鉛直面日射量は推定せざるを得ない。本章ではタンゲランとバリで1年以上観測を続けている、4方位鉛直面日射量データを用いて、インドネシアでの方位別日射量の特徴を明らかにした。

第5章ではTMYの整理に必要な10年間の気象データの品質管理について検討した。106気象台を対象に2011年から2020年の特別気象データを収集し、データのクオリティチェックを実施した。その結果、多数の欠測とともに、観測システムの更新に伴うギャップも見られた。品質管理プロセスにおいて、ギャップを埋め、欠損データを置き換える必要がある。本研究ではバイアス補正されたERA5データセットを106地点の観測データに組み込むことによって行った。温度、相対湿度、風速の各要素に分位数マッピングを用いたバイアス補正式を提案し、ERA5データセットが精度向上に有効であることを実証した。

第6章ではTMYの開発とその検証について検討した。TMYは10年間の気象データの中から月ごとに平均的な年を選定し、つなぎ合わせた人工的な年間特別データである。TMYは、建物のエネルギーシミュレーション等で最も一般的に使用されている。本研究ではTMYの編集に、各気象要素の加重係数を修正したサンディア法を使用した。インドネシア106地点について、それぞれ月ごとに標準年を選定しTMYを作成した。また得られたTMYが10年間の毎時気象データと統計的に類似していることを検証した。

第7章は、インドネシアのパッシブクーリング気候区分と標準年気象データ(TMY)の提案を総括した。本研究で新たに開発したパッシブクーリング気候区分は、従来のケッペン気候区分とは異なり、空間的・時間的分布(日周、季節、年周)に基づき、より詳細で最適な結果を得ることができた。これは地形データに加え、より多くの気候要素(気温、風速、相対湿度、気圧、全雲量、混合比、全天日射量、降水量など)の特別値を用いて考察したことによる。本研究では気候ゾーン1A(赤道直下)、気候ゾーン1B(亜赤道直下)、気候ゾーン2A(熱帯高地)、気候ゾーン2B(熱帯中高地)、気候ゾーン3A(モンスーン)、気候ゾーン3B(亜モンスーン)、気候ゾーン4A(サバンナ)、気候ゾーン4B(亜サバンナ)の8つの区分を提案した。また2011年から2020年までの気温、相対湿度、風速の1時間毎の観測データについて、TMY作成のために、バイアス補正と欠測値の補充を含む品質管理を行った。最後にインドネシア106地点について、それぞれ月ごとに標準年を選定しTMYを作成した。また得られたTMYが10年間の毎時気象データと統計的に類似していることを検証した。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation: Development of climate zones for passive cooling techniques and typical meteorological years based on quality control of datasets in Indonesia.

Name: I Dewa Gede Arya Putra

This dissertation summarizes the climate classification for macro-scale passive cooling methods in regions with different climate zones in Indonesia and demonstrate comprehensively the generating typical meteorological year (TMY) data based on datasets quality control.

Chapter 1 outlines the background and objectives of the research. In this research we have divided it into two parts. This thesis essentially examines the creation of new climate zones according to actual climatic conditions resulting in several regions with similar climate patterns based on a detailed analysis of long-term hourly weather data pertaining to major cities across Indonesia. Then, a potential climate zoning map for several passive cooling techniques is proposed to eventually establish building regulations for passive design buildings to ensure Indonesia's future energy efficiency. In the second study, we specifically focuses on the gap-filling process in datasets for TMY calculation input, the development process of TMY at each site across Indonesia, verifying TMYs against the long-term distribution of climate observations, and describing climate conditions in each climate zone based on the resulting TMYs.

Chapter 2 describes the development of climate zones. The definition of adequate climatic zones is complex task due to the interaction of several independent variables. Among several methods, the most commonly used method includes a principal component analysis to reduce data, followed by a hierarchical cluster analysis. Then, a spatial interpolation is often followed. In, after careful consideration, the Ward method was chosen to redefine the climate zones with more homogeneous seasonal characteristics. Eight integrated climate zones were defined according to possible strategies that could facilitate the implementation of passive design strategies in Indonesia.

Chapter 3 describes the Assessment of passive cooling methods in each climate zone. Passive cooling techniques, namely, night ventilation, comfort ventilation, and evaporative cooling, were assessed in different climate zones using the climatic cooling potential (CCP) formula. The night ventilation potential shows that the very highland tropical and highland tropical climate zones exhibited a high potential for night ventilation because these areas are located at high altitudes with relatively low temperatures. In addition, the equatorial and sub equatorial climate zones located near the equator were areas with a low potential for evaporative cooling because these areas exhibit high relative humidity levels throughout the year.

Chapter 4 describes the study of vertical solar irradiance in Tangerang and Jembrana-Bali of Indonesia. This study uses historical solar radiation data from global horizontal irradiance and solar radiation from the vertical component including north vertical surface irradiance, south vertical surface irradiance, west vertical surface irradiance, and east vertical surface irradiance. each component of horizontal and vertical solar radiation is analyzed sub-diurnal and seasonally. The global horizontal solar radiation is influenced by the annual movement of the sun which reaches its highest intensity in March-April and September-October.

Chapter 5 describes Quality control of datasets for TMY calculation input. TMY studies require complete hourly time series data with a minimum 10-year period. If there are missing data, proper data treatment, such

as interpolation, is needed. The reanalysis data have been corrected for bias to cover missing data. The gap-filling technique for the temperature parameter and the other parameters is based on ERA5 data. Quantile mapping can improve the distribution of ERA5 temperature values to be close to the distribution of observed values. The same procedure was employed to fill in the missing observational data of relative humidity and wind speed at 106 sites in Indonesia.

Chapter 6 describes Development of TMY and its verification. TMY can reduce the complicated computational effort in simulating and handling weather data using a one-year dataset. The calculation of TMY in this study used the Sandia method with modifications in the weighted factor for each climate element. The Sandia method, an empirical approach, involves selecting specific months of the year that differ from the recorded period. the resulting TMY with 12 TMMs at 106 sites. It can be inferred that the TMMs, which are the results of TMY generation, vary significantly, despite the sites being in the same climate zone.

In Chapter 7, the results of this study were summarized. The new integrated climate zones developed in this study differed from those of the previous Koppen climate zoning and obtained more detailed and optimum results based on spatial and temporal distribution (diurnal, seasonal, and annual). The availability of information on climate classification in this study was divided into eight new integrated climate zones, namely, climate zone 1A (equatorial), climate zone 1B (sub equatorial), climate zone 2A (highland tropical), climate zone 2B (very highland tropical), climate zone 3A (monsoon), climate zone 3B (sub monsoon), climate zone 4A (savanna), and climate zone 4B (sub savanna), in the territory of Indonesia. In the passive method, by taking the lower probability limit of 50 %, the monsoon, savanna, and sub savanna climate zones are suitable for the comfort ventilation method. Meanwhile, the sub equatorial climate zone is suitable for applying passive methods by combining night ventilation and comfort ventilation. The hourly observational data for the period of 2011-2020, underwent quality control measures, including gap filling for the missing values of 29.96% to 50.19% from the total data for the purpose of TMY generation. This has been done by incorporating the bias-corrected ERA5 datasets into the observational data from 106 sites. The formula effectively reduced the distribution of each bias to close to 0. The results of the TMY selection show that the year selection for TMMs varies significantly in Indonesia. Additionally, the resulting TMY accurately captures the long-term distribution pattern, particularly for global horizontal irradiance and temperature. The above result was found based on a high correlation value between TMY and LT, particularly an average of 0.96 for global horizontal irradiance and 0.86 for temperature.