

Tingkat Kenyamanan Termal Lingkungan Kampus IPB Dramaga Menggunakan Pendekatan *Physiological Equivalent Temperature* (PET)

Hutami Nur Saputri¹, Bambang Dwi Dasanto^{2*}, dan Rini Hidayati³

¹ Alumni Program Studi Meteorologi Terapan, Institut Pertanian Bogor;

^{2*}Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA, Institut Pertanian Bogor; email:

bambangdwi@apps.ipb.ac.id

³ Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA, Institut Pertanian Bogor

ABSTRAK

Pembangunan kampus IPB di Dramaga telah menimbulkan dampak fisik maupun non-fisik, seperti peningkatan jumlah penduduk dan kepadatan bangunan permukiman. Dampak pembangunan wilayah tersebut telah mendorong terbentuknya kondisi iklim artifisial yang memengaruhi kenyamanan termal terhadap penduduk yang tinggal di wilayah itu. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik termal lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga dengan menggunakan pendekatan indeks termal, yaitu *Physiological Equivalent Temperature* (PET). Karakteristik termal wilayah studi dapat diidentifikasi berdasarkan tiga tahapan. Pertama mengidentifikasi nilai indeks termal PET dengan menggunakan model RayMan pada tutupan lahan bervegetasi dan penggunaan lahan permukiman. Tahap kedua menentukan tingkat kenyamanan termal berdasarkan hasil survei kuesioner; dan ketiga memetakan hubungan antara indeks termal PET dan tingkat kenyamanan termal menggunakan teknik GIS untuk mengidentifikasi karakteristik termal wilayah studi secara spasial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai indeks termal PET dipengaruhi oleh tingkat kerapatan naungan vegetasi dan rasio antara tinggi bangunan dan jarak antar bangunan (*height/width* atau *H/W*). Nilai indeks termal PET semakin meningkat dengan berkurangnya kerapatan naungan vegetasi dan turunnya nilai rasio bangunan baik pada waktu pagi, siang maupun sore hari. Karakteristik termal lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga secara keseluruhan memiliki tingkatan persepsi 'nyaman' yaitu pukul 7.00 hingga pukul 9.00 dengan nilai PET antara 27 °C dan 30 °C. Persepsi sangat tidak nyaman terjadi pada pukul 12.00 hingga 13.00 dengan nilai PET antara 38 °C dan 42 °C. Tingginya tekanan termal yang berupa peningkatan nilai indeks termal PET dapat dikurangi dengan menambah kerapatan naungan vegetasi. Naungan vegetasi terbukti mampu mengurangi rentang nilai PET dan meningkatkan kenyamanan termal di wilayah studi.

Kata kunci: PET, indeks termal, rasio H/W, RayMan, kenyamanan termal

ABSTRACT

Development at IPB University in Dramaga has given an effect on the environment, such as population increase and building density. In general, these conditions will encourage the formation of artificial climatic conditions that affect the thermal comfort of the population in that area. This research aims to identify the thermal characteristic of the environment around the IPB campus in Dramaga using the thermal index approach, which is *Physiological Equivalent Temperature* (PET). The thermal characteristic of the study area can be identified based on three stages. First, identify the value of the PET index thermal using Rayman model on vegetated land cover and residential land use. The second stage determines the level of thermal comfort based on the questionnaire survey and the third stage mapped the relation between PET thermal index and thermal comfort level using GIS techniques to identify the thermal characteristics of the study area spatially. The research result shows that the value of PET index thermal is affected by the level of vegetation shade density and the ratio between building height and the distance between buildings (*height/width*). The value of the PET thermal index increases with decreasing vegetation shade density and decreasing building ratio values in the morning, afternoon, and evening. Environment thermal characteristics around the IPB campus in Dramaga overall have the perception level of 'comfort' at 7.00 to 9.00 with PET values between 27 °C dan 30 °C. Perception 'very uncomfortable' happened from 12.00 to 13.00 with PET vales between 38 °C dan 42 °C. The high thermal stress in the form of an increase in the value of the PET index thermal can be reduced by increasing the density of vegetation shade. Vegetation shade has been evidenced to reduce the range of PET values and increase thermal comfort in the study area.

Keywords: PET, ratio H/W, RayMan, SVF, thermal comfort

Citation: Saputri, H. N., Dasanto, B. D., dan Hidayati, R. (2023). Tingkat Kenyamanan Termal Lingkungan Kampus IPB Dramaga Menggunakan Pendekatan *Physiological Equivalent Temperature* (PET). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21 (2), 299-307, doi:10.14710/jil.21.2.299-307

1. Pendahuluan

Stres atau tekanan lingkungan terutama untuk penduduk yang tinggal di wilayah urban atau perkotaan, umumnya, disebabkan oleh peningkatan urbanisasi yang menyebabkan tingginya tingkat kepadatan penduduk (Nouri *et al.* 2022), tingginya kepadatan bangunan dan minimnya ruang terbuka hijau. Dalam kasus ini, sumber tekanan lingkungan akan muncul pada saat pembangunan di wilayah tersebut tidak memerhatikan kebutuhan fisik, psikologis, dan sosial penduduk yang tinggal di wilayah tersebut. Kebutuhan fisik bagi penghuni sebuah perkotaan salah satunya adalah kenyamanan termal (*thermal comfort*) (Kusuma 2015). Lebih lanjut, Coccolo *et al.* (2016), Hashim *et al.* (2016), Fang *et al.* (2018) dan Lin *et al.* (2019) menyatakan bahwa kenyamanan termal merupakan panduan (*guideline*) dalam pembangunan kota berkelanjutan.

Kenyamanan termal didefinisikan oleh *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE 2017) sebagai kondisi pikiran dan ini mengekspresikan kepuasan terhadap lingkungan termal. Menurut de Freitas dan Grigorieva (2015) dan Potchter *et al.* (2018), jumlah indeks termal yang telah terpublikasi ada sekitar 160-an artikel dan salah satu yang digunakan sebagai indikator kenyamanan termal adalah *physiological equivalent temperature* (PET). PET merupakan metode empiris (Binarti *et al.* 2020) dan memiliki keunggulan dalam hal satuan, yaitu derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$) dan ini telah dikenal luas sehingga hasilnya lebih mudah dipahami (Matzarakis *et al.* 2010). Menurut Kusuma (2015) dan Fröhlich *et al.* (2019) cara yang paling tepat untuk menghitung ataupun menilai kondisi lingkungan termal adalah memanfaatkan model Rayman. Model ini dapat menangani struktur perkotaan yang kompleks bahkan mampu menghitung kenyamanan termal untuk manusia (Kusuma 2015).

Penelitian mengenai *Physiological Equivalent Temperature* (PET) di Indonesia masih tergolong sedikit. Pada umumnya, rentang kenyamanan PET yang digunakan berasal dari negara Eropa (Matzarakis dan Mayer 1996). Penelitian rentang PET untuk negara tropis dapat ditemukan pada penelitian Lin dan Matzarakis (2008) di Taiwan bagian tengah, tepatnya di Sun Moon Lake ($23^{\circ}52' \text{LU}$; $120^{\circ}55' \text{BT}$). Berdasarkan letak lintangnya, iklim tropis di Sun Moon Lake masih dipengaruhi oleh karakteristik iklim subtropis sehingga rentang PET Taiwan yang telah ditemukan oleh Lin dan Matzarakis (2008) perlu dimodifikasi jika akan digunakan di Indonesia yang terletak pada lintang sekitar $06^{\circ}00' \text{LU}$ sampai $11^{\circ}00' \text{LS}$.

Institut Pertanian Bogor (IPB) terletak di Kecamatan Dramaga yang merupakan wilayah sub

urban. Populasi penduduk Kecamatan Dramaga berkembang pesat semenjak kehadiran IPB di Dramaga. Hal ini memengaruhi pola penggunaan lahan di sekitar kawasan kampus IPB. Karakteristik lingkungan dalam kampus sendiri masih didominasi vegetasi, namun area di luar kampus dipadati oleh permukiman penduduk. Penelitian yang dilakukan oleh Fahmi (2013) terhadap perubahan penggunaan lahan di sekitar kawasan kampus IPB Dramaga menunjukkan bahwa luas ruang terbangun meningkat sebesar 45% sedangkan luas ruang terbuka hijau turun sekitar 44% selama periode 15 tahun. Hal ini disertai dengan peningkatan suhu udara sebesar 3°C selama periode tersebut. Menurut Johansson *et al.* (2017) peningkatan suhu di wilayah tropis (seperti halnya kawasan kampus IPB Dramaga) akan mengurangi performa mental dan fisik seseorang yang tinggal di lingkungan tersebut.

Lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga yang merupakan sarana belajar dan tempat tinggal bagi mahasiswa menjadi alasan penting dilakukannya penelitian kenyamanan termal di wilayah ini. Berdasarkan nilai penting tersebut maka fokus dari artikel adalah mengidentifikasi tingkat kenyamanan termal lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga secara spasial dengan menggunakan pendekatan indeks termal *physiological equivalent temperature* (PET).

2. Metodologi Penelitian

Lokasi penelitian berada di lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga. Data penelitian yang digunakan terdiri dari data meteorologi dan persepsi tingkat kenyamanan termal responden (persepsi termal). Data meteorologi diobservasi langsung di lapangan dengan alat *digital anemometer* dan *black globe thermometer*. Sementara itu, data persepsi termal dihimpun dari hasil survei kuesioner. Jumlah dan lokasi sampel survei ditentukan menggunakan pendekatan *purposive* dengan pertimbangan bahwa keberadaan kampus IPB memengaruhi peningkatan jumlah penduduk dan kepadatan permukiman di sekitarnya. Pengukuran dilakukan pada 50 titik lokasi sampel yang dibedakan berdasarkan kerapatan naungan vegetasi dan konfigurasi permukiman. Adapun klasifikasi keduanya adalah sebagai berikut:

1. Naungan vegetasi

Naungan vegetasi dibedakan berdasarkan nilai *sky view factor* (SVF). SVF memiliki rentang nilai 0 sampai 1 dan ini merupakan representasi dari bagian langit yang terlihat pada hemisfer di titik pengamatan. Nilai SVF yang digunakan untuk mengklasifikasikan naungan vegetasi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Klasifikasi naungan vegetasi berdasarkan nilai SVF

Klasifikasi	Nilai SVF
Naungan vegetasi rapat	0 - 0.3
Naungan vegetasi sedang	0.3 - 0.7
Naungan vegetasi jarang	0.7 - 1

2. Konfigurasi permukiman

Konfigurasi permukiman dibedakan berdasarkan nilai rasio *height/width* (H/W). Nilai rasio diperoleh dengan membagi nilai tinggi bangunan (H) dan nilai lebar dari jarak antar bangunan (W). Dalam artikel ini, rasio H/W digunakan untuk mengklasifikasikan konfigurasi permukiman dan ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi konfigurasi permukiman berdasarkan nilai rasio H/W

Klasifikasi	Rasio H/W
Rasio bangunan tinggi	> 3
Rasio bangunan sedang	2 - 3
Rasio bangunan rendah	1 - 2

2.1. Pengukuran Data Meteorologi

Seperti telah diungkapkan di awal bahwa data meteorologi diobservasi atau diukur langsung di lapangan. Kondisi cuaca pada saat pengukuran dibedakan menjadi hari cerah dan hari hujan untuk melihat perbedaan tingkat kenyamanan termal pada kedua kondisi tersebut. Pengukuran dilakukan setiap satu jam sekali dari pukul 7.00 - 17.00 WIB. Temperatur udara, kelembapan relatif dan kecepatan angin diukur menggunakan *digital anemometer*. Temperatur radiasi rata-rata (T_{mrt}) diperkirakan menggunakan *black globe thermometer* berdiameter 15 cm dengan sensor termometer air raksa di pusatnya. Termometer ini sebenarnya mengukur temperatur globe (T_g) di mana dengan mengetahui nilai T_g maka T_{mrt} dapat ditentukan. Menurut Standar ISO 7726, persamaan yang paling sering digunakan adalah sebagai berikut:

$$T_{mrt} = [(T_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (T_g - T_a)]^{1/4} - 273 \quad (1)$$

di mana:

T_{mrt} = Temperatur radiasi rata-rata (°C)

T_g = Temperatur globe (°C)

v_a = Kecepatan angin pada ketinggian *globe* (m/s)

T_a = Temperatur udara (°C)

2.2. Pengolahan Data

Raw data yang diperoleh dari pengukuran di lapangan meliputi data meteorologi skala mikro dan asumsi data termo-fisiologis disimulasi dalam aplikasi Rayman untuk memperoleh nilai PET. Nilai standar yang digunakan untuk aktivitas metabolisme ditetapkan sebesar 80 W atau setara dengan aktivitas ringan (berdiri), sementara nilai insulasi pakaian 0.9 clo.

Dasar perhitungan PET berasal dari *Munich Energy-balance Model for Individuals* (MEMI) yang

merupakan model keseimbangan panas termofisiologis (Höppe 1993, 1999). Secara rinci model MEMI didasarkan pada persamaan keseimbangan energi untuk tubuh manusia:

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (2)$$

di mana:

M = Laju metabolisme

W = *Output* pekerjaan fisik

R = Radiasi netto tubuh

C = Aliran panas konvektif

E_D = Aliran panas laten untuk menguapkan air yang menyebar melalui kulit

E_{Re} = Jumlah aliran panas untuk memanaskan atau melembabkan udara

E_{Sw} = Aliran panas karena penguapan keringat

S = Aliran penyimpanan panas untuk memanaskan atau mendinginkan massa tubuh

2.3. Pengolahan Kuesioner

Pengisian kuesioner oleh 40 responden dilakukan dari pukul 7.00 - 12.00 WIB pada satu tempat dalam sehari. Data persepsi responden diolah pada MS Excel dengan membuat *trendline* sehingga diperoleh persamaan garis tren regresi linear. Persamaan tersebut digunakan untuk mencari nilai rentang kenyamanan. Regresi linear dipilih karena merupakan metode yang sederhana dan sesuai untuk skala pengukuran interval.

2.4. Pemetaan Kenyamanan Termal

Pemetaan kenyamanan termal dilakukan terhadap wilayah sekitar kampus IPB Dramaga menggunakan aplikasi ArcGIS untuk melihat tingkat kenyamanan secara spasial. Data koordinat titik pengukuran bersama dengan nilai PET pada setiap titik dimasukkan dalam bentuk *raw data*. Interpolasi dilakukan terhadap nilai PET dengan teknik *Inverse Distance Weighting* (IDW). IDW merupakan teknik interpolasi yang mempertimbangkan jarak sebagai bobot; asumsinya, semakin dekat jarak antara titik sampel dan titik yang diestimasi maka semakin besar bobotnya, begitu pula sebaliknya. Teknik ini dipilih karena data titik sampel pada penelitian ini memiliki jarak yang berdekatan, sehingga hasil interpolasinya akan semakin akurat.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Profil PET

Data meteorologi dan nilai termofisiologis (aktivitas seseorang dan jenis pakaian yang dipakai) diolah menggunakan aplikasi RayMan untuk mengestimasi temperatur ekuivalen fisiologis (PET). Khusus nilai termofisiologis - parameter yang perlu diukur sangat beragam sehingga pada penelitian ini perlu ditetapkan suatu asumsi dan ini berlaku untuk lokasi studi. Nilai asumsi yang digunakan untuk aktivitas adalah sebesar 80 W atau setara dengan aktivitas berdiri dan jenis pakaian diasumsikan bernilai sekitar 0.9 clo atau setara dengan pakaian kerja (Matzarakis dan Amelung 2008; Walther dan

Goestchel 2018.). Kedua nilai asumsi tersebut merupakan nilai standar yang umumnya digunakan dalam aplikasi RayMan. Penggunaan nilai asumsi dilakukan guna menghindari penilaian subjektif, sehingga hasil karakteristik termal lingkungan kampus IPB Dramaga yang diperoleh bersifat objektif dan merepresentasikan kondisi lingkungan yang sebenarnya. Pengukuran dilakukan pada dua kondisi lingkungan yaitu pada naungan vegetasi dan permukiman untuk menghasilkan nilai PET yang mengindikasikan tingkat kenyamanan termal yang berbeda.

Profil PET pada klasifikasi naungan vegetasi (Gambar 1) dan rasio bangunan (Gambar 2) menunjukkan pola yang serupa. Nilai PET minimum berlangsung pada pengukuran pukul 7.00, sedangkan nilai maksimum berlangsung pada pengukuran pukul 13.00. Perbedaan terlihat cukup jelas pada pengukuran pukul 13.00 untuk kedua klasifikasi. Pada klasifikasi naungan vegetasi, naungan jarang menunjukkan nilai PET tertinggi sebesar 41.8°C, sedangkan naungan sedang memiliki nilai lebih rendah sebesar 39.5°C, dan naungan rapat sebesar 38°C. Pada klasifikasi rasio bangunan, nilai PET tertinggi sebesar 43.9°C terdapat pada rasio rendah, sedangkan kedua rasio lainnya memiliki nilai lebih rendah namun perbedaannya cukup kecil yaitu 40.7°C untuk rasio sedang dan 40.3°C untuk rasio tinggi.

Perbedaan nilai PET yang signifikan pada pengukuran pukul 13.00 dipengaruhi oleh banyaknya radiasi matahari yang diterima untuk memanaskan permukaan. Naungan jarang memiliki nilai PET yang lebih tinggi disebabkan sedikitnya naungan yang menghalangi paparan radiasi matahari. Hal yang sama juga terjadi pada klasifikasi rasio rendah dimana bangunan pada rasio ini memiliki ketinggian yang relatif rendah sehingga akses radiasi matahari yang mengenai permukaan lebih besar.

Nilai PET untuk pengukuran yang dilakukan pada hari hujan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan saat pagi hari. Hal ini dikarenakan saat pengukuran, hujan terjadi ketika lewat tengah hari atau menjelang sore. Ketika terjadi hujan, nilai PET menjadi lebih rendah dikarenakan cuaca yang berawan menyebabkan radiasi matahari yang masuk ke permukaan menjadi lebih sedikit. Titik balik penurunan nilai PET juga terjadi lebih awal dengan laju penurunan yang cukup pesat. Karakteristik hujan Bogor yang biasanya turun pada siang hari ataupun menjelang sore, menyebabkan kondisi cuaca sebelum terjadi hujan menjadi mendung. Pola profil PET ketika terjadi hujan untuk kedua klasifikasi juga tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Artinya, hujan memiliki pengaruh yang besar terhadap penurunan nilai PET pada kedua klasifikasi tersebut.

Persepsi kenyamanan termal yang mengacu pada rentang PET Taiwan (Lin dan Matzarakis 2008), menunjukkan bahwa tingkatan persepsi 'nyaman' untuk kedua klasifikasi hanya berlangsung selama dua jam pengukuran yaitu pada pukul 7.00 hingga pukul 9.00. Persepsi 'tidak nyaman' mulai

berlangsung dari pukul 9.00 hingga sore hari pada hari cerah. Perbedaan terdapat pada tingkatan persepsi termal serta durasinya. Pada klasifikasi naungan vegetasi, tingkatan termal tertinggi berlangsung pada pengukuran pukul 11.00 hingga pukul 14.00 dengan persepsi 'panas' untuk naungan jarang. Paparan radiasi matahari yang lebih banyak pada naungan jarang juga berdampak pada peningkatan persepsi termal.

Persepsi termal pada klasifikasi rasio bangunan berada pada tingkatan yang lebih tinggi. Persepsi 'sangat panas' berlangsung pada pengukuran pukul 12.00 hingga pukul 13.00 untuk rasio rendah. Persepsi tersebut merupakan tingkatan paling tinggi dalam merepresentasikan ketidaknyamanan. Hal ini menunjukkan bahwa naungan yang dibentuk oleh vegetasi cenderung lebih nyaman dibandingkan dengan naungan yang dibentuk oleh bangunan. Pada saat terjadi hujan, persepsi seseorang cenderung menjadi nyaman. Hasil pengukuran yang dilakukan pada kedua klasifikasi saat hari hujan, menunjukkan persepsi termal yang kembali 'nyaman' pada pengukuran pukul 15.00 hingga pukul 17.00.

Secara keseluruhan nilai PET pada ketiga klasifikasi naungan vegetasi semakin meningkat dengan berkurangnya kerapatan naungan. Nilai PET naungan jarang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai PET naungan rapat dan naungan sedang. Suatu permukaan dengan sedikit atau tanpa naungan lebih mudah menerima dan melepaskan kembali radiasi yang diterimanya. Pada malam hari, permukaan bumi melepaskan radiasi gelombang panjang ke atmosfer, sehingga pada pagi hari temperatur di sekitar permukaan menjadi lebih rendah. Permukaan dengan naungan vegetasi jarang menerima radiasi matahari lebih banyak yang mempercepat proses pemanasan permukaan saat menjelang siang.

Kerapatan naungan dihitung berdasarkan nilai SVF dan ini berpengaruh pada akses masuknya radiasi matahari. SVF berkaitan dengan kenyamanan termal manusia karena dapat mempengaruhi Tmrt yang merupakan rata-rata dari radiasi langsung maupun pantulan radiasi gelombang panjang dan pendek yang mengenai tubuh (Middel *et al.* 2017). Keterkaitan antara PET dan nilai SVF ditampilkan pada Gambar 3, dimana nilai SVF yang semakin meningkat diikuti dengan peningkatan PET. Nilai PET cukup tinggi pada SVF diatas 0.6 dan mencapai nilai maksimum pada SVF bernilai 1 yang merepresentasikan tampilan langit tanpa terhalang naungan apapun. Terdapat dua puncak PET pada Gambar 3 yaitu pada SVF bernilai 0.7 dan 1 yang disebabkan tidak meratanya penyebaran data, sehingga terdapat data kosong pada kisaran SVF 0.8 hingga 0.9.

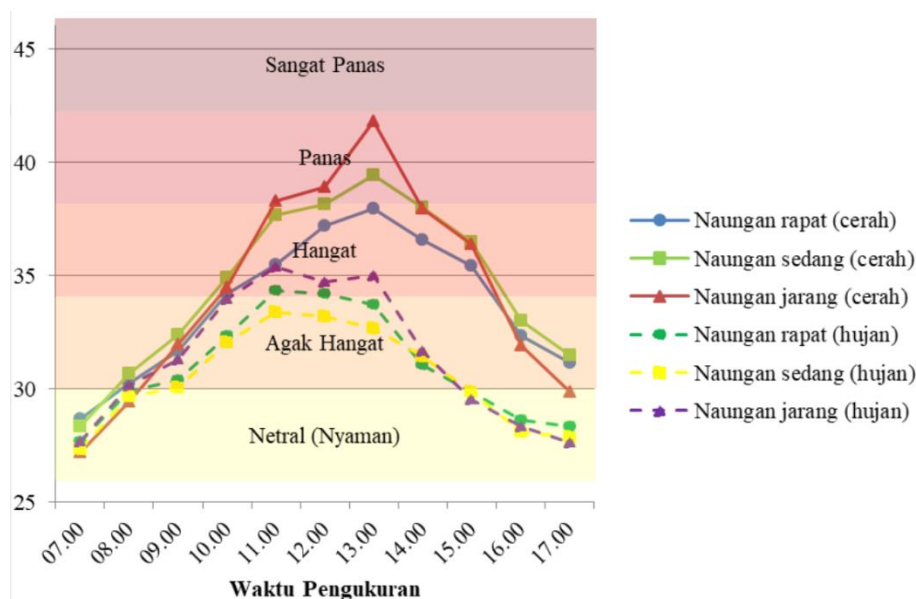
Naungan vegetasi berperan dalam meningkatkan kenyamanan termal pada wilayah tropis yang menerima radiasi matahari sepanjang tahun. Jumlah vegetasi yang lebih banyak akan memberikan suplai oksigen yang lebih tinggi sehingga menimbulkan *cooling effect* yang menciptakan rasa nyaman (Irwan

dan Kaharuddin 2010). Menurut Koerniawan dan Gao (2013), kenyamanan termal utamanya dipengaruhi oleh keterpaparan radiasi matahari. Oleh karena itu, vegetasi merupakan faktor penting terutama untuk iklim panas dalam memberikan naungan dan mengurangi keterpaparan radiasi matahari.

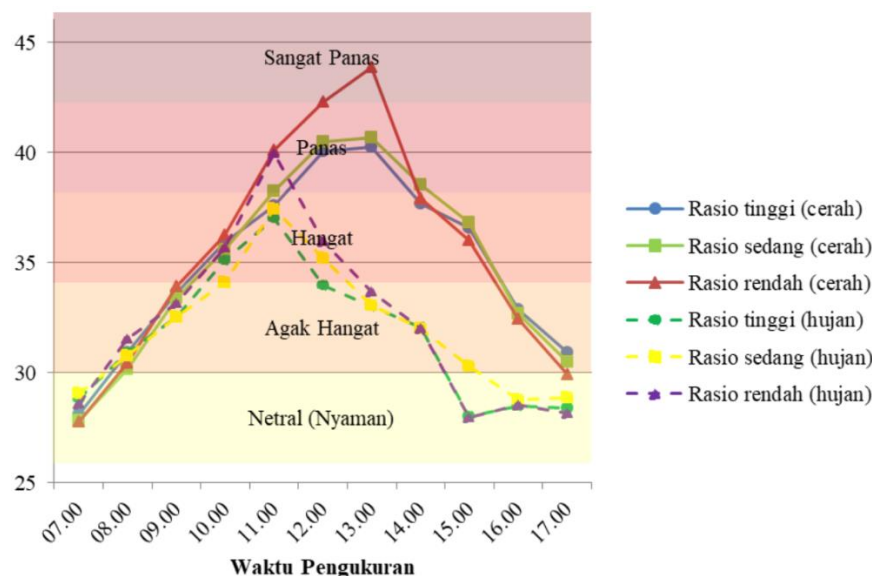
Secara keseluruhan nilai PET pada ketiga klasifikasi rasio bangunan semakin meningkat dengan menurunnya nilai rasio bangunan. Rasio rendah ($H/W = 1$) memiliki nilai PET yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan rasio sedang ($H/W = 2$) dan rasio tinggi ($H/W > 3$). Menurut Toudert dan Mayer (2006), rasio $H/W = 2$ dapat dianggap sebagai ambang batas sehubungan dengan akses radiasi matahari, radiasi yang diterima mulai bervariasi untuk rasio kurang dari 2. Oleh karena itu, nilai PET pada rasio

tinggi dan rasio sedang tidak berbeda jauh. Adapun rasio $H/W = 1$ pada umumnya memiliki ketinggian bangunan yang relatif rendah, sehingga akses radiasi yang masuk ke permukaan lebih luas dengan durasi paparan sinar matahari yang lebih lama. Hal ini menyebabkan nilai PET pada rasio rendah terutama siang hari menjadi sangat tinggi jika dibandingkan dengan kedua rasio lainnya.

Keterkaitan antara PET dan rasio H/W ditampilkan pada Gambar 4, dimana rasio $H/W > 2$ memiliki nilai PET yang tidak jauh berbeda. Hasil ini membenarkan pendapat Toudert dan Mayer (2006) yang menyatakan bahwa rasio $H/W = 2$ merupakan ambang batas. Nilai PET maksimum terdapat pada rasio $H/W < 2$ yang dapat memicu terjadinya tekanan termal yang cukup tinggi terutama pada siang hari.

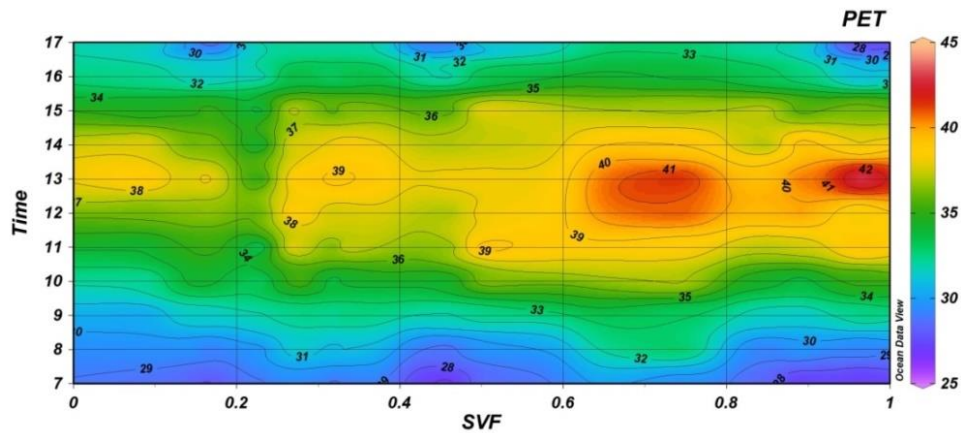


Gambar 1. Profil PET rata-rata terhadap waktu menurut klasifikasi naungan vegetasi

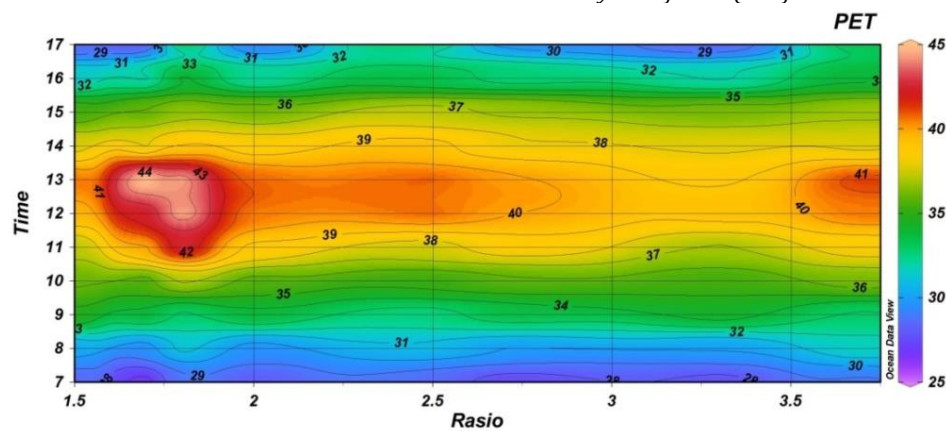


Gambar 2. Profil PET rata-rata terhadap waktu menurut klasifikasi rasio bangunan

3.2. Penentuan Rentang Kenyamanan



Gambar 3. Profil PET berdasarkan nilai sky view factor (SVF)



Gambar 4. Profil PET berdasarkan nilai rasio H/W

Seperti telah disampaikan pada bagian Pendahuluan, rentang PET yang ditemukan oleh Lin dan Matzarakis (2008) telah dimodifikasi. Dalam penelitian ini, rentang PET diperoleh dari hasil survei kuesioner yang menelaah persepsi kenyamanan termal responden dalam rangka penentuan rentang kenyamanan termal.

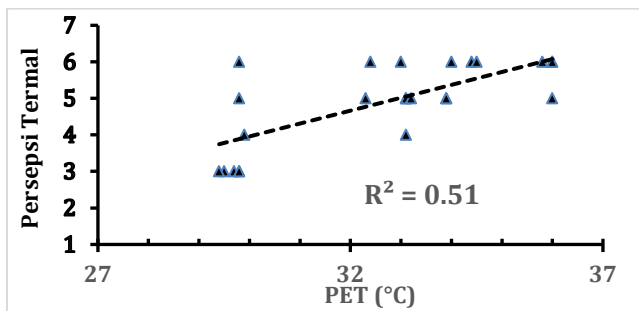
Data yang digunakan dalam penentuan rentang kenyamanan adalah sebanyak 29 responden dari total 40 responden. Tindakan ini perlu dilakukan karena sebagian responden keliru dalam mengisi kuesioner, sehingga data tersebut dianulir. Data persepsi responden yang telah disortir kemudian dikelompokkan ke dalam 6 kategori persepsi termal terkait nyaman dan diberi skor 1: Sejuk, 2: Agak sejuk, 3: Netral/ Nyaman, 4: Agak hangat, 5: Hangat, dan 6: Panas.

Selanjutnya, persepsi termal yang berkaitan dengan rentang kenyamanan dibangun dari hubungan antara nilai indeks termal PET dan skor persepsi termal (lihat Gambar 5).

Pada Gambar 5, ada suatu kecenderungan peningkatan persepsi termal dengan meningkatnya nilai PET dan ini sesuai dengan hasil penelitian yang ditemukan oleh Cohen *et al.* (2013) dan Johansson *et*

al. (2017). Selanjutnya, kekuatan hubungan antara nilai indeks termal PET dan persepsi termal ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sekitar 0.51. Ini berarti 51% keragaman persepsi termal terkait kenyamanan dapat dijelaskan oleh nilai indeks termal PET, sedangkan sisanya 49% oleh faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam hubungan (model) tersebut.

Faktor lain yang kemungkinan berpengaruh adalah faktor-faktor yang tidak dimasukkan dalam penyusunan asumsi ketika mengestimasi nilai PET dengan aplikasi RayMan. Seperti telah dikemukakan di awal bahwa penelitian ini menggunakan asumsi standar yaitu: aktivitas responden sebesar 80 W (aktivitas berdiri) dan jenis pakaiannya bernilai sekitar 0.9 clo (pakaian kerja). Asumsi ini bersifat umum dan belum menjangkau secara detil seperti aktivitas berjalan atau mengangkat sesuatu yang nilainya lebih besar dari 80 W; sementara itu, jenis pakaian yang semakin rapat maka nilainya lebih besar dari 0.9 clo. Hidayati dan Banja (2028), mendapatkan bahwa faktor adaptasi, faktor yang belum diperhitungkan dalam penelitian ini, juga berpengaruh pada persepsi nyaman termal pada kelompok masyarakat.



Gambar 5. Hubungan antara PET dan persepsi termal terkait rentang kenyamanan

Tabel 3 Rentang kenyamanan termal berdasarkan nilai indeks termal PET (°C)

Rentang Kenyamanan Termal	Rentang PET wilayah studi	Rentang PET Taiwan *)
Sangat dingin	-	< 14
Dingin	-	14 - 18
Sejuk	-	18 - 22
Agak sejuk	< 29.5	22 - 26
Netral	29.5 - 31.0	26 - 30
Agak hangat	31.0 - 32.5	30 - 34
Hangat	32.5 - 34.0	34 - 38
Panas	≥ 34.0	38 - 42
Sangat panas	-	≥ 42

*) Sumber: Lin dan Matzarakis (2008)

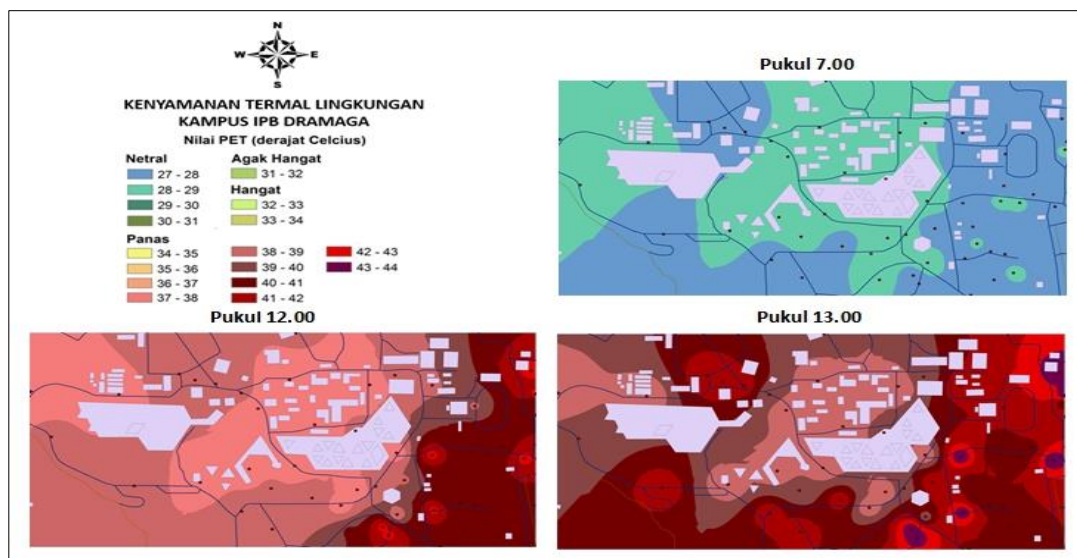
Selanjutnya, merujuk pada Gambar 5 maka penelitian ini berhasil menemukan rentang kenyamanan termal berdasarkan hasil hubungan antara persepsi termal dan indeks termal PET. Detil terkait hal ini dapat dilihat pada Tabel 3. Seperti ditunjukkan pada Tabel 3, rentang kenyamanan termal di wilayah studi dapat dipilah menjadi 5 kelas sedangkan di Taiwan dapat dipilah menjadi 9 kelas. Ini berarti karakteristik iklim di kedua wilayah adalah berbeda. Rentang PET Taiwan dipengaruhi oleh

karakteristik iklim subtropis sedangkan wilayah studi hanya dipengaruhi oleh karakteristik iklim tropis. Selanjutnya, rentang kenyamanan termal yang dipersepsikan sama atau mirip oleh responden di kedua wilayah studi adalah rentang kenyamanan termal pada kategori Netral/Nyaman, dimana PET responden berada pada rentang 29.5°C - 31°C di wilayah studi beririsan dengan rentang PET Taiwan yang berkisar antara 26°C - 30°C.

3.3. Kenyamanan Termal Lingkungan Sekitar Kampus IPB Dramaga

Hasil pengukuran di sekitar kampus IPB Dramaga menunjukkan bahwa tingkatan termal dalam kategori 'nyaman' hanya berlangsung selama dua jam yaitu pukul 7.00 hingga 9.00 pagi. Nilai PET pada waktu tersebut berkisar antara 27°C dan 30°C dan tidak terdapat perbedaan yang cukup berarti baik pada wilayah kampus maupun wilayah permukiman.

Puncak PET tertinggi yang berlangsung pada pukul 13.00 menunjukkan beberapa wilayah yang memiliki nilai PET lebih tinggi dari wilayah sekitarnya, diantaranya wilayah Babakan Lio, Babakan Raya, Babakan Tengah dan Babakan Lebak. Wilayah tersebut merupakan wilayah permukiman yang jarang vegetasi. Adapun wilayah dalam kampus, nilai PET tertinggi terdapat pada wilayah sekitar depan Masjid Al-huriyyah, FEM baru dan Gymnasium. Wilayah lainnya meskipun berada dalam rentang 'tidak nyaman' namun memiliki nilai PET yang sedikit lebih rendah, di antaranya wilayah sekitar Fakultas Kehutanan, Teknologi Pertanian dan Peternakan. Wilayah tersebut didominasi oleh naungan vegetasi sehingga nilai PET pada siang hari sedikit lebih rendah dan dapat mengurangi tekanan termal.



Gambar 6. Peta kenyamanan termal lingkungan kampus IPB Dramaga

4. Kesimpulan

Kenyamanan termal lingkungan sekitar kampus IPB Dramaga secara keseluruhan memiliki tingkatan persepsi 'nyaman' selama dua jam pengukuran pada pagi hari yaitu pukul 7.00 hingga pukul 9.00. Perbedaan nilai PET dipengaruhi oleh kerapatan naungan vegetasi dan tingginya rasio bangunan pada jalan berupa ngarai (*street canyon*). Nilai PET semakin meningkat dengan berkurangnya kerapatan naungan dan menurunnya nilai rasio bangunan. Berdasarkan survei kuesioner, rentang PET responden memiliki kemiripan dengan rentang PET Taiwan pada persepsi netral/nyaman. Wilayah sekitar kampus IPB Dramaga yang memiliki nilai PET relatif rendah dan lebih nyaman diantara wilayah lainnya berada di sekitar Fakultas Kehutanan, Fakultas Teknologi Pertanian, dan Fakultas Peternakan. Selanjutnya, dalam rangka meningkatkan akurasi nilai PET maka banyaknya jenis aktivitas dan jenis pakaian yang dikaji perlu ditambahkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [ASHRAE] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. 2017. *ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Binarti, F., Koerniawan, D., Triyadi, S., Utami, S. S., dan Matzarakis, A. 2020. A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions. *Journal of Urban Climate*. 31: 1-24.
- Cohen, P., Potchter, O., dan Matzarakis, A. (2013) Human thermal perception of coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*. 37: 1-10
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J. L., and Pearlmutter, D. 2016. Outdoor human comfort and thermal stress: a comprehensive review on models and standards. *Journal of Urban Climate*. 18: 33-57.
- de Freitas, C.R., and Grigorieva, E.A., 2015. A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*. 59 (1): 109-120.
- Fahmi, N. 2013. Dampak perubahan tutupan lahan terhadap *temperature humidity index* (THI) kawasan kampus IPB): Dramaga [skripsi]. Bogor (ID Institut Pertanian Bogor).
- Fang, Z., Lin, Z., Mak, C. M., Niu, J., and Tse, K. T. 2018. Investigation into sensitivities of factors in outdoor thermal comfort indices. *Journal of Building and Environment*. 128:129-142.
- Fröhlich, D., Gangwisch, M., and Matzarakis, A. 2019. Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments - Application of the RayMan and SkyHelios model. *Journal of Urban Climate*. 27: 1-7.
- Hashim, N. H. M., Tan, K. W., dan Ling, Y. 2016. Determination of thermal comfort for social impact assessment: case study in Kota Damansara, Selangor, Malaysia. *American Journal of Applied Sciences*. 13 (11): 1156-1170.
- Hidayati, R., dan Banja, A. E. 2018. Penentuan Ambang Batas Kenyamanan Termal pada Anak Sekolah dan Wisatawan Domestik di Pulau Lombok. *Agronet*. 32 (2): 71-80.
- Höppe, P. 1993. Heat balance modelling. *Experientia*. 49:741-746.
- Höppe, P. 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*. 43:71-75.
- Irwan, S. N. R., Kaharuddin. 2010. Studi kenyamanan untuk aktivitas di lanskap hutan kota UGM. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 4(2):98-110.
- [ISO] International Organization for Standardization. 1998. *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment – Instrument for measuring physical quantities*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Johansson, E., Yahia, M. W., Arroyo, I., and Bengs, C. 2017. Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *International Journal of Biometeorology*. 1-13.
- Koerniawan, M. D., and Gao, W. 2013. Comfortability in urban open space: thermal comfort measurement in 3 biggest recreation park in Jakarta. *Conference Paper*. doi: 10.13140/2.1.2946.7847.
- Kusuma, K. E. I. 2015. Status *thermal comfort* pada lingkungan atmosfer permukiman di wilayah Kecamatan Denpasar Barat [tesis]. Denpasar (ID): Universitas Udayana.
- Lin, T. P., and Matzarakis, A. 2008. Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*. 52:281-290.
- Lin, T. P., Yang, S. R. U., Chen, Y. C., and Matzarakis, A. 2019. The potential of a modified physiologically equivalent temperature (mPET) based on local thermal comfort perception in hot and humid regions. *Theoretical and Applied Climatology*. 135:873-876.
- Matzarakis, A. 2009. Additional features of the RayMan model. *Makalah*. Dalam: The Seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan, 29 June – 3 July.
- Matzarakis, A., and Amelung, B. 2008. Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort on humans. In: Thomson MC, Garcia-Herrera R, Beniston, M, editor. *Seasonal Forecasts, Climatic Change, and Human Health*. Dordrecht (NL): Springer. 161-172.
- Matzarakis, A., and Mayer, H. 1996. Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO News*. 18:7-10.
- Matzarakis, A., Mayer, H., and Iziomon, G. M. 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*. 42(2):76-84.
- Matzarakis, A., Mayer, H., and Rutz, F. 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*. 51(4):323-334.
- Matzarakis, A., Mayer, H., and Rutz, F. 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*. 54(2):131-139.
- Middel, A., Lukaczyk, J., and Maciejewski, R. 2017. Sky view factors from synthetic fisheye photos for thermal comfort routing – a case study in Phoenix, Arizona. *Urban Planning*. 2(1):19-30.
- Nouri, A. S., Charalampopoulos, I., and Matzarakis, A. 2022. The application of the physiologically equivalent temperature to determine impacts of locally defined extreme heat events within vulnerable dwellings during the 2020 summer in Ankara. *Journal of Sustainable Cities and Society*. 81: 1-21.

Saputri, H. N., Dasanto, B. D., dan Hidayati, R. (2023). Tingkat Kenyamanan Termal Lingkungan Kampus IPB Dramaga Menggunakan Pendekatan *Physiological Equivalent Temperature* (PET). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21 (2), 299-307, doi:10.14710/jil.21.2.299-307

Potchter, O., Cohen, P., Lin, T. P., and Matzarakis, A. 2018. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*. 631–632: 390–406.

Toudert, F. A., and Mayer, H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban

street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*. 41:94-108.

Walther, E., and Goestchel, Q. 2018. The P.E.T. comfort index: questioning the model. *Building and Environment*. 137: 1–10.