



BINA CIPTA KARYA BERSAMA IKLIM

Menuju Bangunan Gedung Berkelanjutan



2024



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL CIPTA KARYA
Direktorat Bina Teknik
Permukiman dan Perumahan
Balai Sains Bangunan**

Jl. Panyawungan, Cileunyi Wetan,
Kabupaten Bandung, Jawa Barat
Telepon: (022) 7798393
E-mail: ditbtpp.bsb@pu.go.id



BINA CIPTA KARYA BERSAMA IKLIM

Menuju Bangunan Gedung Berkelanjutan



2024



Penyusun

Penulis

Muhammad Nur Fajri Alfata
I Dewa Gede Arya Putra
Andhang Rakhmat Trihamdhani
Hideyo Nimiya
Tetsu Kubota
Hansoo Lee
Nikhil Kumar

Editor

Muhammad Nur Fajri Alfata

Desain Sampul

Balai Sains Bangunan

Penata Letak

Balai Sains Bangunan

Penerbit

Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jalan Pattimura 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan 12110
DKI Jakarta

Daftar Isi

DAFTAR ISI	V		
DAFTAR GAMBAR	VI		
DAFTAR TABEL	VIII		
DAFTAR ISTILAH	IX		
SAMBUTAN	X		
KATA PENGANTAR	XII		
BAB 01 PENDAHULUAN			
1.1 Pemanasan Global dan Perubahan Iklim	01	3.8 Potensi Pendinginan Pasif untuk Setiap Zona Iklim	36
1.2 Iklim dan Bangunan Gedung di Indonesia	01	3.9 Kesimpulan	39
1.3 SATREPS: DeLCA	03	BAB 04 DATA IKLIM STANDAR (TMY) INDONESIA UNTUK SIMULASI KINERJA BANGUNAN GEDUNG	
1.4 Kontribusi untuk Indonesia	04	4.1 Pendahuluan	43
1.5 Isi dan Sistematika Buku	05	4.2 Metodologi	44
BAB 02 BANGUNAN GEDUNG HIJAU (BGH) DI INDONESIA		4.3 Distribusi Data Pengamatan yang Hilang	47
2.1 Pendahuluan	09	4.4 Korelasi dan Bias dari Data Analisis Ulang ERA5	48
2.2 Kebijakan BGH di Indonesia	09	4.5 Pengisian Kesenjangan Data Pengamatan	48
2.3 Parameter Penilaian BGH: Efisiensi Energi	11	4.6 Proses Pembuatan Data Iklim Standar (TMY)	50
2.4 Implementasi BGH di Indonesia	12	4.7 Perbandingan Antara Data Multi-tahun, <i>Long-term Average</i> (LTA), dan TMY	56
2.5 Pengembangan BGH ke depan	14	4.8 Pola TMY di Setiap Zona Iklim	59
BAB 03 PETA POTENSI PENDINGINAN PASIF UNTUK IKLIM PANAS-LEMBAP INDONESIA		4.9 Kesimpulan	61
3.1 Pendahuluan	21	BAB 05 MEMBANGUN BERSAMA IKLIM: STRATEGI DESAIN PASIF PURWARUPA RUMAH SUSUN HEMAT ENERGI KOTA TEGAL	
3.2 Metodologi	23	5.1 Pendahuluan	65
3.3 Hubungan Antar-Faktor Iklim	25	5.2 Strategi Desain Pasif dalam Desain	66
3.4 Analisis Suhu Udara dan Kecepatan Angin	27	5.3 Desain Rusun	69
3.5 Zona Iklim Terpadu	30	5.4 Pengukuran Lapangan	71
3.6 Pengaruh Suhu Udara dan Kecepatan Angin pada Kenyamanan Ventilasi	32	5.5 Variasi Suhu Udara dan Kenyamanan Termal dalam Ruang	72
3.7 Pengaruh Kelembapan Udara dan Kecepatan Udara pada Pendinginan Evaporatif	34	5.6 Efek <i>Void</i> untuk Ventilasi Alami	74
		5.7 Kesimpulan	77
		BAB 06 PENUTUP	81
		BIBLIOGRAFI	85

Daftar Gambar

Gambar 1.1	Alur kegiatan DeLCA-SATREPS dalam mencapai tujuan dan sasaran kegiatan	04
Gambar 2.1	Proses sertifikasi BGH di Indonesia	13
Gambar 2.2	Suasana pelatihan tenaga ahli BGH untuk profesional dan ASN (Foto: Sekretariat Pembinaan BGH Nasional)	15
Gambar 3.1	Peta lokasi 106 titik stasiun klimatologi yang digunakan beserta ketinggiannya	22
Gambar 3.2	Alur pengembangan zona iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia	24
Gambar 3.3	Plot sebar atau <i>scatter plot</i> dari matriks korelasi antar faktor iklim	26
Gambar 3.4	Zona suhu udara (T) dan peta panas masing-masing zona	28
Gambar 3.5	Zona kecepatan angin (WS) dan peta panas masing-masing zona	29
Gambar 3.6	Delapan zona iklim terpadu di Indonesia	31
Gambar 3.7	Zona suhu udara dan kecepatan angin (TWS) dan peta panas masing-masing zona	33
Gambar 3.8	Jumlah jam potensi kenyamanan ventilasi untuk (a) siang hari dan (b) malam hari	33
Gambar 3.9	Zona kelembapan udara dan kecepatan angin (RHWS) dan peta panas masing-masing	35
Gambar 3.10	Jumlah jam potensi pendinginan evaporatif pada (a) siang hari dan (b) malam hari	35
Gambar 3.11	Rentang nilai iklim pada kondisi diurnal: (a) suhu udara; (b) kelembapan relatif; (c) kecepatan angin	37
Gambar 3.12	CCP harian berdasarkan perbedaan antara kondisi iklim luar ruangan dan asumsi kondisi iklim dalam ruangan: (1.a-c) ventilasi malam; (2.a-c) kenyamanan ventilasi; dan (3.a-c) pendinginan evaporatif	38
Gambar 4.1	Diagram alur pembuatan data iklim standar (TMY)	45
Gambar 4.2	Distribusi data pengamatan per jam yang hilang	47
Gambar 4.3	Distribusi spasial korelasi dan bias ERA5	48
Gambar 4.4	Contoh proses koreksi bias ERA5 dan mengisi kesenjangan dalam data pengamatan	49
Gambar 4.5	Distribusi korelasi ERA5, bias ERA5, dan debias ERA5	50
Gambar 4.6	Jumlah total TMM yang dipilih dari 106 lokasi	51
Gambar 4.7	Perbandingan tahunan antara nilai multi-tahun, rata-rata jangka panjang atau <i>Long-term Average</i> (LTA), dan TMY dari masing-masing elemen iklim	57
Gambar 4.8	Korelasi delapan elemen iklim antara TMY dan LT	57
Gambar 4.9	Distribusi RMSE	58
Gambar 4.10	Distribusi MAE	58
Gambar 4.11	Distribusi MSE	58
Gambar 4.12	Pola tahunan setiap elemen iklim TMY dalam berbagai zona iklim	60
Gambar 5.1	Peresmian purwarupa Rusun eksperimen di Kota Tegal	65
Gambar 5.2	Purwarupa rusun eksperimen di Kota Tegal	66

Gambar 5.3	Profil tipikal kecepatan angin dan arahnya di Kota Tegal pada musim kemarau di (a) siang hari dan (b) malam hari dan pada musim hujan di (c) siang hari dan (d) malam hari	67
Gambar 5.4	Konsep strategi ventilasi pada (a) malam hari dan (b) siang hari	68
Gambar 5.5	Konsep strategi ventilasi pada (a) malam hari dan (b) siang hari. Simulasi efek <i>void</i> terhadap kecepatan angin dan arahnya untuk purwarupa rusun dengan menggunakan CFD (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia)	68
Gambar 5.6	Simulasi efek sirip angin yang dipasang pada <i>void</i> untuk ventilasi apung (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia)	69
Gambar 5.7	Simulasi efek jendela penangkap angin yang dipasang di setiap unit hunian (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia)	69
Gambar 5.8	(a) denah dan (b) potongan purwarupa rusun hemat energi Kota Tegal dan titik-titik lokasi pengukuran	70
Gambar 5.9	Gambaran purwarupa rusun hemat energi Kota Tegal: (a) <i>void</i> vertikal, (b) ruang pilotis dan sirip angin, dan (c) <i>penthouse</i> di atas <i>void</i> vertikal	71
Gambar 5.10	(a) lokasi pengukuran di enam unit hunian dan titik pengukuran parameter termal di unit (b) <i>loft</i> dan (c) standar.	71
Gambar 5.11	Rangkuman statistik suhu udara di unit <i>loft</i> yang menghadap selatan pada (a) ventilasi penuh, (b) tanpa ventilasi, (c) ventilasi siang, dan (d) ventilasi malam	73
Gambar 5.12	Rangkuman statistik suhu udara di unit standar yang menghadap selatan pada (a) ventilasi penuh, (b) tanpa ventilasi, (c) ventilasi siang, dan (d) ventilasi malam	73
Gambar 5.13	Rasio kecepatan angin rata-rata di <i>void</i> vertikal untuk Kasus 1 hingga 5	76
Gambar 5.14	<i>Boxplot</i> rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 1	78
Gambar 5.16	<i>Boxplot</i> rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 3	78
Gambar 5.15	<i>Boxplot</i> rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 2	78
Gambar 5.17	<i>Boxplot</i> rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 4	78
Gambar 5.18	<i>Boxplot</i> rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 5	79

Daftar Tabel

Tabel 2.1	Klas bangunan non-bangunan gedung negara serta pesyaratan diwajibkan dan disarankan untuk BGH	10
Tabel 2.2	Parameter penilaian kinerja BGH pada tahap perencanaan sesuai Permen PUPR No. 21 Tahun 2021	12
Tabel 2.3	<i>Baseline</i> IKE pada beberapa tipe bangunan gedung.	13
Tabel 2.4	Zona wilayah dalam strategi penyelenggaraan dan pembinaan BGH	15
Tabel 2.5	Skenario peta jalan penyelenggaraan dan pembinaan BGH 2023-2030 (dalam juta m ² per tahun)	16
Tabel 2.6	Sasaran fokus strategi penyelenggaraan dan pembinaan BGH	16
Tabel 3.1	Beban komponen utama yang dirotasi dan komunalitas (rotasi <i>varimax</i>)	27
Tabel 3.2	Rata-rata rentang suhu udara diurnal dan musiman untuk setiap zona suhu udara (T)	28
Tabel 3.3	Rata-rata rentang kecepatan angin diurnal dan musiman untuk setiap zona kecepatan angin (WS)	29
Tabel 3.4	Probabilitas potensi kenyamanan ventilasi berdasarkan kombinasi suhu udara dan kecepatan angin	32
Tabel 3.5	Probabilitas penerapan pendinginan evaporatif berdasarkan kombinasi kelembapan udara dan kecepatan angin	34
Tabel 3.6	Nilai hari derajat pendinginan (CDD) dan persentase beban pendinginan (CL)	37
Tabel 3.7	Potensi dari tiga metode pendinginan pasif dengan nilai iklim dasar yang berbeda (dalam %)	38
Tabel 4.1	Ringkasan TMY terpilih untuk 106 lokasi di Indonesia	51
Tabel 5.1	Rincian kondisi untuk Kasus 1 hingga Kasus 5	72
Tabel 5.2	Evaluasi kenyamanan termal di bawah strategi ventilasi yang berbeda	74

Daftar Istilah

BGH	Bangunan Gedung Hijau
CC	<i>Total cloud cover</i> atau Tutupan awan total (oktas)
CCP	<i>Climatic Cooling Potential</i> atau Potensi pendinginan iklim
CDD	<i>Cooling Degree Days</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> atau Komputasi dinamika fluida
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i> atau Iradiansi horisontal difus (W/m^2)
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i> atau Iradiansi normal langsung (W/m^2)
FS	<i>Finkelstein-Shaffer</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i> atau Iradiansi horisontal global (W/m^2)
IKE	Intensitas Konsumsi Energi ($kWh/m^2.tahun$)
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> atau galat absolut rata-rata
IWEC2	<i>International Weather for Energy Calculation ver. 2</i>
LT	<i>Local Time</i> atau Waktu setempat
LTA	<i>Long-term Average</i> atau Rata-rata jangka panjang
MixR	<i>Mixing Ratio</i> atau Rasio campuran
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
OTTV	<i>Overall Thermal Transfer Value</i> atau nilai perpindahan panas total
PC	<i>Principal Component</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> atau Analisis komponen utama
Pr	Curah hujan (mm)
Pres	Tekanan atmosfer (mbar)
RH	Kelembapan udara (%)
RH_b	Kelembapan udara di dalam ruangan (%)
RHWS	Kelembapan udara dan kecepatan angin
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SET*	<i>Standard Effective Temperature</i>
T	Suhu udara ($^{\circ}C$)
T_b	Suhu udara di dalam ruangan ($^{\circ}C$)
T_d	Suhu titik embun atau dew-point temperature ($^{\circ}C$)
T_o	Suhu operatif ($^{\circ}C$)
TMM	<i>Typical Meteorological Month</i>
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
TWS	Suhu udara dan kecepatan angin
WS	Kecepatan angin (m/s)
WS_b	Kecepatan angin di dalam ruangan (m/s)
WVR	<i>Wind Velocity Ratio</i> atau rasio kecepatan angin
\overline{WVR}	<i>Mean wind velocity ratio</i> atau rasio kecepatan angin rata-rata
θ_z	Sudut zenith matahari ($^{\circ}$)

Sambutan

Pemerintah Indonesia telah meneguhkan komitmennya dalam perang global melawan dampak perubahan iklim dan pemanasan global. Dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution*, hingga tahun 2030 pemerintah menaikkan target penurunan emisi gas rumah kaca dari 29% menjadi 31,9% atas usaha sendiri, dan dari 41% menjadi 42,3% dengan dukungan internasional. Efisiensi energi merupakan salah satu upaya menurunkan emisi gas rumah kaca, dan sektor bangunan gedung merupakan salah satu kontributor utama emisi tersebut.

Peraturan Pemerintah No. 16 tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang No. 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung mengamanatkan Konservasi Energi pada bangunan Konservasi Energi tersebut dilakukan melalui implementasi bangunan gedung hijau, sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau.

Peta zonasi iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia dan data iklim standar yang dihasilkan dari kolaborasi antara Kementerian PUPR dan BMKG ini, melalui kerja sama internasional *Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS)*, sangat penting. Keduanya sangat mendukung penerapan prinsip-prinsip bangunan gedung hijau sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri PUPR No. 21/2021. Kedua hasil tersebut juga dapat dimanfaatkan oleh perencana dan perancang dalam merancang sebuah bangunan gedung yang berkinerja tinggi, efisien, nyaman, dan sehat, sesuai dengan konteks iklim setempat.

Data dan informasi hasil kolaborasi ini diharapkan dapat diakses oleh publik, dan dapat dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya untuk meningkatkan kualitas bangunan gedung pada umumnya, dan kualitas penyelenggaraan bangunan gedung hijau pada khususnya. Sehingga, secara langsung juga berkontribusi terhadap pencapaian target efisiensi energi dan penurunan emisi gas rumah kaca sebagaimana diamanatkan oleh Peraturan Pemerintah No. 16 Tahun 2021.

Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Dr. Ir. Basuki Hadimuljono



Sambutan

Meningkatnya tren suhu udara global akibat perubahan iklim telah menyebabkan konsekuensi negatif di berbagai sektor, diantaranya sektor Infrastruktur secara spesifik bangunan gedung. Dalam beberapa dekade terakhir, untuk mencapai kenyamanan termal bagi penghuni dalam ruangan gedung didominasi oleh penggunaan pendingin aktif (*air conditioner*) yang menyebabkan konsumsi energi bangunan meningkat. Oleh karena itu, strategi adaptasi perubahan iklim perlu dikembangkan dalam meningkatkan kemampuan kinerja bangunan untuk mencapai kenyamanan termal dengan lebih efisiensi energi.

Kumpulan data iklim memainkan peranan penting untuk menjadi acuan dalam mendesain bangunan baru dan menilai kinerja bangunan yang sudah ada saat ini. Beberapa teknologi dan inovasi pendinginan pasif dalam konsep *green building*, seperti *comfort ventilation*, *nighttime ventilation*, dan *evaporative cooling* yang mempertimbangkan beberapa unsur iklim, diantaranya suhu, kecepatan angin, dan kelembapan relatif, menjadi solusi menjanjikan yang dapat diterapkan untuk mencapai kenyamanan termal dalam ruangan. Hal ini dapat mengurangi konsumsi energi bangunan yang berlebih sesuai dengan kondisi iklim masing-masing wilayah di Indonesia.

BMKG dan Kementerian PUPR bekerjasama dalam menciptakan inovasi berupa produk peta zona iklim untuk pendinginan pasif dan produk data *Typical Meteorological Year* (TMY) di Indonesia. Peta zona iklim di Indonesia dibagi ke dalam delapan zona iklim baru beserta penilaian potensi pendinginan pasifnya, meliputi zona iklim 1A (ekuator), 1B (sub-ekuator), 2A (dataran tinggi tropis), 2B (dataran sangat tinggi tropis), 3A (monsunal), 3B (sub-monsunal), 4A (sabana), dan 4B (sub-sabana). Sedangkan data TMY yang dikembangkan terdiri dari 106 lokasi stasiun pengamatan cuaca dan iklim BMKG yang tersebar di seluruh Indonesia. Informasi peta zona iklim untuk pendinginan pasif dan data TMY di Indonesia dibahas lebih rinci dalam pembahasan tiap bab pada buku ini.

Pada akhirnya, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung kerjasama lintas kementerian dan proses penciptaan inovasi yang ditulis dalam buku Iklim dalam Bina Cipta Karya : Menuju Bangunan Gedung Berkelanjutan pada tahun 2024 ini. Semoga layanan informasi yang disajikan dalam buku ini dapat memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan serta memenuhi kebutuhan dan menjawab tantangan yang dihadapi oleh para pengguna serta *stakeholder* di sektor bangunan di Indonesia.

Plt. Kepala Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Prof. Ir. Dwikorita Karnawati, M.Sc. Ph.D.

Kata Pengantar

Peraturan Pemerintah No. 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang No. 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung telah mengamanatkan konservasi energi sebesar 25% dari *baseline* dalam penyelenggaraan bangunan gedung. Cara meningkatkan konservasi energi ini kemudian diatur dalam Peraturan Menteri PUPR No. 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. Hingga 2030, ditargetkan 233,4 juta m² untuk kategori bangunan gedung baru dan 51,5 juta m² untuk bangunan gedung yang sudah ada mendapatkan sertifikasi bangunan gedung hijau.

Dalam Peraturan Menteri PUPR No. 21 Tahun 2021, efisiensi penggunaan energi merupakan parameter penting serta mendapatkan prioritas utama dalam penilaian kinerja bangunan gedung hijau. Di antara kriteria dan indikator pada parameter tersebut, terdapat beberapa yang berkaitan erat dengan ketersediaan data iklim yang akurat, antara lain kriteria orientasi bangunan gedung, perhitungan OTTV, sistem pencahayaan, ventilasi alami, dan pemanfaatan sumber energi terbarukan.

Di dalam peta jalan penyelenggaraan bangunan gedung hijau, inovasi dan pengembangan teknologi merupakan salah satu strategi penting. Kolaborasi antara Kementerian PUPR dan BMKG, melalui program *Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development* (SATREPS), dengan demikian menjadi penting dalam menghasilkan inovasi teknologi termasuk di dalamnya penyusunan norma standar prosedur dan kriteria (NSPK). Salah satu yang dihasilkan dalam kolaborasi tersebut adalah peta zonasi iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia dan data iklim standar atau *typical meteorological year* (TMY). Hasil kolaborasi ini mengisi kebutuhan akan data dan informasi iklim yang akurat dan *reliable* untuk proses perancangan dan perancangan bangunan berkinerja tinggi, khususnya bangunan gedung hijau.

Selain kolaborasi antara Kementerian PUPR dan BMKG, pengembangan peta zonasi iklim untuk pendinginan pasif dan data iklim standar ini juga berkolaborasi dengan Kagoshima University dan Hiroshima University, Jepang, dengan dukungan dari *Japan International Cooperation Agency* (JICA) dan *Japan Science and Technology Agency* (JST). Kami sangat mengapresiasi kerja sama ini sekaligus berharap bahwa model kolaborasi lintas-bangsa ini dapat menjadi contoh pelaksanaan kegiatan dengan hasil yang bermanfaat untuk bangsa dan negara.

Dengan hadirnya peta zonasi iklim untuk pendinginan pasif dan data iklim standar dalam pangaturan NSPK, pembangunan infrastruktur bangunan gedung di masa depan diharapkan dapat menjadi lebih baik, lebih efisien, lebih sehat, dan mampu meningkatkan kualitas hidup penghuninya. Semoga hasil-hasil inovasi ini dapat dimanfaatkan dengan baik oleh semua penyelenggara bangunan gedung hijau, serta memberikan kontribusi dalam upaya kita memitigasi dampak perubahan iklim dan pemanasan global.

Direktur Jenderal Cipta Karya
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Ir. Diana Kusumastuti, M.T.

Kata Pengantar

Dalam beberapa dekade terakhir, sekitar 1/3 emisi gas rumah kaca terkait penggunaan energi global berasal dari sektor bangunan. Dengan kekhawatiran dampak perubahan iklim, peningkatan efisiensi energi bangunan semakin diperlukan saat ini dan di masa mendatang. Dalam kerangka *Sustainable Development Goals* (SDG 13: *climate action*), bangunan *low carbon* dan hemat energi dalam konsep *green building* dapat berkontribusi mengurangi laju perubahan iklim dengan menurunkan emisi karbon yang terkait dengan konsumsi energi.

Layanan informasi iklim adalah salah satu kunci yang sangat penting dan dapat dijadikan pertimbangan dalam desain pendinginan pasif bangunan untuk mengurangi konsumsi energi. Selain itu, informasi iklim juga memainkan peranan penting sebagai komponen utama dalam menilai kinerja energi bangunan melalui simulasi perhitungan numerik *computational fluid dynamics* untuk simulasi termal/energi bangunan. Dengan hal tersebut pengguna dan *stakeholder* mendapatkan acuan ilmiah untuk mengambil keputusan yang digunakan untuk menentukan desain yang optimal dalam mencapai tujuan efisiensi energi bangunan. BMKG dan Kementerian PUPR telah bekerjasama untuk menciptakan inovasi baru berupa produk peta zona iklim untuk strategi pendinginan pasif dan produk informasi *Typical Meteorological Year* (TMY) di Indonesia. Berdasarkan peta zona iklim, Indonesia dibagi menjadi delapan zona iklim berdasarkan berbagai unsur iklim meliputi suhu, radiasi matahari, kecepatan angin dan unsur-unsur iklim lainnya. Sebanyak tiga teknik pendinginan pasif yang meliputi *comfort ventilation*, *nighttime ventilation*, dan *evaporative cooling* telah dinilai potensinya untuk setiap zona iklim yang diidentifikasi di Indonesia. Selanjutnya, informasi TMY yang terdiri atas beberapa unsur iklim, telah tersedia untuk kebutuhan simulasi peningkatan kinerja energi bangunan di 106 lokasi Indonesia.

Akhir kata kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung kerjasama dan terciptanya publikasi Iklim dalam Bina Cipta Karya: Menuju Bangunan Gedung Berkelanjutan di Indonesia 2024 ini. Kami berharap melalui peluncuran buku ini, dapat menjembatani dan menjadi solusi kebutuhan sektor bangunan di Indonesia pada saat ini dan di masa mendatang.

Deputi Bidang Klimatologi
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Dr. Ardhasena Sopaheluwakan

BAB 01

PENDAHULUAN



1.1 Pemanasan Global dan Perubahan Iklim

Pemanasan global dan perubahan iklim telah menjadi isu global saat ini. Di tengah perdebatan ada tidaknya perubahan iklim, gejala-gejala yang menyertainya sudah mulai dapat dirasakan. Dampak yang diakibatkan sudah mulai melanda sebagian besar wilayah di dunia termasuk di Indonesia. Suhu di perkotaan semakin meningkat, cuaca menjadi semakin tidak menentu, kekeringan lebih panjang, banjir dan badai menjadi lebih sering dan besar, penyakit endemik seperti malaria dan demam berdarah juga semakin meningkat, merupakan di antara dampak-dampak yang ditimbulkan akibat perubahan iklim tersebut.

Pemanasan global dan perubahan iklim disebabkan oleh emisi gas rumah kaca, yang sebagian besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil untuk pembangkitan energi. Hampir semua aspek kehidupan kita tidak bisa dilepaskan dari energi fosil. Mobil dan sepeda motor yang setiap hari memenuhi jalan raya menggunakan minyak bumi untuk menggerakkannya. Industri pun demikian. Di dalam bangunan gedung, setiap peralatan listrik menggunakan energi listrik yang sebagian besar dibangkitkan dari bahan bakar fosil (batu bara, minyak bumi dan gas).

Emisi gas rumah kaca (GRK) diprediksi akan semakin meningkat di masa mendatang, terutama apabila langkah-langkah mitigasinya tidak segera dilakukan. Konsumsi energi global meningkat dengan cepat dan diperkirakan akan semakin meningkat hingga 28% antara tahun 2015 hingga 2040. Bangunan gedung merupakan salah satu pengguna utama energi, terutama pada tahap operasional. Sektor ini bertanggung jawab terhadap konsumsi energi hingga lebih dari 40% dari total konsumsi energi dunia, dan juga untuk kurang lebih sepertiga dari emisi GRK, baik di negara berkembang maupun negara maju. Penggunaan energi akhir di sektor ini diperkirakan terus meningkat hingga 32% pada tahun 2040 sementara penggunaan energi listrik juga meningkat 2% per tahun hingga 2040. Emisi GRK dari sektor ini meningkat hampir dua kali sejak tahun 1970 hingga 2010, di mana sebagian besar

emisi ini berasal dari emisi tidak langsung gas CO₂ dari penggunaan listrik, yang memperlihatkan kecenderungan peningkatan yang dinamis dan bertolak belakang dengan emisi langsung yang relatif stagnan selama empat dekade terakhir.

Secara nasional, sektor bangunan gedung merupakan pengguna terbesar energi listrik (41%) dan pengguna energi akhir (termasuk minyak dan gas) terbesar ketiga (27%) setelah industri dan transportasi (ESDM 2014). Lebih dari 60% dari total energi di sektor bangunan gedung digunakan untuk pendingin udara (*air-conditioner* atau AC). Seiring pertumbuhan penduduk, yang diiringi pula oleh peningkatan laju urbanisasi di Indonesia yang akan mencapai 66,6% di tahun 2035, konsumsi energi dan emisi GRK termasuk di sektor bangunan gedung diperkirakan akan meningkat pula.

1.2 Iklim dan Bangunan Gedung di Indonesia

Indonesia adalah negara kepulauan (6°LU – 11°LS dan 95°BT – 141°BT) yang terletak di antara benua Asia dan Australia serta Samudra Hindia dan Pasifik, dengan karakteristik iklim yang kompleks karena fenomena global, regional dan lokal. Wilayah Indonesia terdiri dari banyak pulau yang dikelilingi oleh air laut hangat yang berperan sebagai sumber panas utama yang menggerakkan sirkulasi atmosfer melalui proses konveksi.

Interaksi antara atmosfer dan laut di seluruh Indonesia membentuk variasi iklim global tahunan seperti *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO) dan Mode Dipol Samudra Hindia (IOD), variasi iklim intra-musiman seperti Zona Konvergensi Intertropis (ITCZ) dan Osilasi Madden-Julian (MJO) yang memengaruhi kondisi iklim di Indonesia. Dinamika atmosfer di Indonesia dipengaruhi oleh angin pasat, musim hujan/monsun, dan pengaruh berbagai kondisi lokal seperti angin laut, menjadikan cuaca dan iklim di Indonesia memiliki karakteristik fisik yang kompleks dan dinamis.

Karena berada di antara tropis Cancer (23,5°LU) dan tropis Capricorn (23,5°LS), Indonesia dapat dikategorikan ke dalam wilayah beriklim tropis. Wilayah ini ditandai oleh suhu udara rata-rata

tahunan yang relatif tinggi dengan amplitudo siang dan malam yang relatif kecil. Suhu udara rata-rata pada siang hari 20-32°C dan pada malam hari 21-27°C. Kelembapan udara di wilayah ini juga sangat tinggi, antara 55-100% dengan rata-rata tahunan 75%. Kecepatan angin relatif rendah sementara radiasi matahari cukup tinggi, di atas 900 W/m² dan sudut jatuh sinar matahari hampir 90°. Curah hujan di daerah tropis sangat tinggi, di atas 1.600 mm/tahun, dan langit hampir selalu dalam keadaan berawan.

Selain itu, beberapa wilayah di Indonesia juga memiliki kategori iklim yang lain, yaitu iklim pegunungan dan iklim pantai (laut). Iklim pegunungan biasanya memiliki suhu udara tahunan rata-rata yang lebih rendah sehingga relatif sejuk sementara iklim pantai (laut) selain memiliki suhu udara tahunan rata-rata yang relatif tinggi, juga ditandai oleh kelembapan udara dan kecepatan angin yang relatif tinggi.

Sebagai produk budaya dan daya cipta manusia, bangunan gedung tidak dapat dilepaskan dari konteks iklim dan budaya manusia pada ruang dan waktu yang ada. Misal, bangunan tradisional atau vernakular yang telah bertahan di Indonesia selama ratusan tahun, dipercaya merupakan bangunan gedung yang adaptif terhadap iklim setempat. Meskipun dibangun tanpa arsitek profesional, bangunan tradisional/vernakular berhasil menciptakan kondisi udara di dalam ruangan yang nyaman tanpa menggunakan sumber energi berlebih, melalui strategi desain pasif. Udara yang panas dan lembap, radiasi matahari dan curah hujan yang tinggi, serta kecepatan angin yang relatif rendah, disiasati oleh leluhur Nusantara dengan mengorientasikan bangunan tradisional menghindari paparan matahari, tritisan atau *overhang* yang lebar sebagai peneduh dinding dan bukaan (jendela), langit-langit yang tinggi, atap yang miring dan tebal dengan bahan alami (alang-alang, ijuk, daun kelapa, dsb.), bahan bangunan, ketinggian dari permukaan tanah, bukaan yang lebar dan banyak, dan lain sebagainya. Teknik-teknik pendinginan pasif tersebut terbukti secara empiris mampu mempertahankan kondisi udara di dalam ruangan tetap nyaman tanpa sedikit pun menggunakan energi tambahan, sebagaimana dibuktikan oleh banyak penelitian di Indonesia.

Ketika bangsa Eropa memasuki wilayah Nusantara

sejak akhir abad 16 dan melakukan kolonisasi, mereka membawa teknologi, bahan serta desain bangunan yang ada di negara induk ke daerah jajahan. Seringkali teknologi dan desain tersebut tidak sesuai dengan kondisi setempat termasuk kondisi iklim dan budaya, sehingga lambat laun mereka mengubah teknologi dan desainnya. Kehadiran bangunan kolonial selama ratusan tahun di Indonesia memperlihatkan bagaimana mereka berevolusi untuk dapat beradaptasi dengan baik terhadap iklim tropis Indonesia. Strategi pendinginan pasif yang ada di rumah tradisional diadopsi untuk digunakan oleh bangunan kolonial, antara lain beranda atau koridor yang lebar, bukaan yang banyak dan lebar, material penahan panas, langit-langit yang tinggi, dan sebagainya. Bahkan, sebuah studi memperlihatkan bahwa bangunan kolonial memiliki kinerja yang lebih baik daripada bangunan tradisional.

Saat ini, di tengah tantangan pemanasan global dan perubahan iklim yang semakin nyata, kearifan lokal dan warisan pengetahuan ini justru semakin ditinggalkan. Kalau kita amati, sebagian besar bangunan gedung yang ada dapat dikatakan dirancang dan dibangun tanpa memperhatikan prinsip-prinsip keberlanjutan, termasuk di dalamnya prinsip desain pasif. Hampir semua bangunan dirancang dan dibangun dengan premis menggunakan AC untuk mendapatkan kenyamanan termal, tanpa sedikit pun upaya mengurangi konsumsi energi melalui desain pasif. Kita dapat melihat bangunan gedung tanpa peneduh, dengan rasio bukaan yang besar, sehingga penetrasi radiasi matahari begitu besar. Bahkan jika kita menengok pada rumah tinggal di kompleks perumahan, strategi-strategi desain pasif seperti tritisan atau kanopi jendela sudah jarang digunakan, serta bukaan ventilasi silang semakin langka ditemukan. Sebaliknya, kita dapat dengan mudah menemukan unit *condenser* untuk AC di setiap rumah tinggal.

Dengan demikian, kita dapat melihat pentingnya pertimbangan iklim di dalam proses perencanaan dan perancangan bangunan gedung. Pendekatan ini telah lama mendapatkan perhatian sejak beberapa dekade yang lalu. Para ahli seperti Victor Olgyay dan Baruch Givoni misalnya, mengembangkan bagan bioklimatik (*bioclimatic chart*) untuk memandu strategi pendinginan pasif yang sesuai dengan kondisi iklim. Teknik ini terus

berkembang dan disempurnakan hingga saat ini, antara lain melalui perangkat lunak dan aplikasi berbasis *web*, serta bagan psikrometrik.

International Energy Agency (IEA) baru-baru ini juga menawarkan sebuah pendekatan baru efisiensi energi di sektor bangunan gedung yang melibatkan beberapa strategi di setiap tahapnya, yaitu: (1) iklim mikro yang sesuai; (2) desain pasif bangunan gedung; (3) pendinginan pasif; (4) mekanikal-elektrikal yang efisien; (5) bangunan gedung cerdas (*smart building*), dan terakhir (6) energi terbarukan. Enam tahapan perencanaan dan perancangan tersebut harus dilakukan secara terpadu.

Pendekatan tersebut, penggunaannya di Indonesia didorong melalui peraturan tentang bangunan gedung hijau (BGH) yang tertuang dalam Peraturan Menteri (Permen) Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 21 tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. Permen ini menekankan pentingnya pemanfaatan iklim mikro, desain pasif, dan pendinginan pasif untuk mencapai efisiensi energi. Pendekatan yang sama juga digunakan dalam kegiatan pengembangan purwarupa rumah susun (rusun) hemat energi hasil kolaborasi riset antara Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Permukiman Kementerian PUPR dan Hiroshima University tahun 2018-2020. Pendekatan tersebut mampu menghasilkan sebuah purwarupa bangunan rusun yang memiliki kinerja termal yang sangat baik, sehingga memiliki potensi efisiensi energi yang besar. Kedua hal tersebut (BGH dan purwarupa rusun hemat energi) akan dibicarakan secara mendalam pada Bab 2 dan 5 dalam buku ini.

1.1 SATREPS: DeLCA

SATREPS, kependekan dari *Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development*, adalah sebuah program bersama antara *Japan International Cooperation Agency (JICA)* and *Japan Science and Technology Agency (JST)* untuk penelitian dan pengembangan yang menargetkan isu-isu global dan melibatkan kemitraan strategis antara peneliti dan perencana (*engineer*)

di Jepang dan negara berkembang. SATREPS merupakan hibah langsung dari pemerintah Jepang melalui JICA dan JST dalam bentuk bantuan teknis (*technical assistance*).

Sesuai dengan *Record of Discussion (R/D)* antara Kementerian PUPR dan JICA pada tanggal 24 Januari 2020, Program SATREPS di Indonesia mengambil topik *the Project for the Development of Low-Carbon Affordable Apartments in the Hot-Humid Climate of Indonesia towards Paris Agreement 2030* atau DeLCA. Hibah langsung dengan nomor hibah JICA ID 201900860 dan nomor register 23XG12EA ini memiliki tiga tujuan, yaitu: (1) mengembangkan teknik pendinginan pasif yang komprehensif untuk bangunan rumah susun (Rusun) yang terjangkau di Indonesia; (2) mengembangkan standar atau pedoman teknis tentang teknik pendinginan pasif tersebut di atas; dan (3) membangun purwarupa Rusun terjangkau yang rendah karbon berdasarkan hasil kajian tersebut di atas.

Dalam kegiatan ini, Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan (BTTP) Direktorat Jenderal Cipta Karya bertindak sebagai badan pelaksana (*implementing agency*) di Indonesia. Untuk melaksanakan kegiatan ini, Direktorat BTTP berkolaborasi dengan lembaga dan perguruan tinggi di Indonesia, antara lain Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Pemerintah Kota (Pemkot) Tegal-Jawa Tengah, Departemen Pulmonologi Universitas Indonesia (UI), Departemen Arsitektur Institut Teknologi Bandung (ITB), Departemen Arsitektur Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Bandung, Departemen Teknik Elektro dan Informatika (TEDI) Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta, Departemen Arsitektur Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Departemen Arsitektur Universitas Brawijaya (UB) Malang, dan YKK AP R&D Center Indonesia (YKK AP). Sementara itu, kolaborator di pihak Jepang terdiri dari Hiroshima University (HU), Tokyo Institute of Technology (TIT), Waseda University (WU), Kagoshima University (KU), dan Shinshu University (SU).

Untuk mencapai tujuan sebagaimana tersebut di atas, gabungan peneliti dan perencana dari kedua negara dikelompokkan ke dalam lima grup utama, yaitu (1) Grup Iklim (*Climate*), yang

beranggotakan tim dari PUPR, BMKG, YKK AP, HU, dan KU; (2) Grup Manusia (*Human*), beranggotakan tim dari PUPR, UI, ITB, UGM, SU, dan HU; (3) Grup Bangunan Gedung (*Building*), yang terdiri dari tim PUPR, ITS, YKK AP, UB, UGM, HU, dan TIT; (4) Grup Energi (*Energy*) yang terdiri dari tim PUPR, UPI, HU, dan WU; dan terakhir (5) Grup Implementasi (*Implementation*) yang beranggotakan tim dari PUPR, Pemkot Tegal, YKK AP, HU, dan TIT. Alur kegiatan untuk mencapai tujuan proyek diperlihatkan oleh Gambar 1.1.

Apa yang tersaji dalam buku ini adalah hasil penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh kolaborasi antara Kementerian PUPR, BMKG, Kagoshima University, dan Hiroshima University di Grup Iklim. Hasil utama kegiatan grup ini adalah peta potensi pendinginan pasif dan data iklim standar (*typical meteorological year*). Hasil-hasil ini menjadi dasar penting bagi kegiatan-kegiatan pengembangan selanjutnya, antara lain pengembangan standar kenyamanan termal adaptif orang Indonesia, yang dipengaruhi oleh kondisi iklim setempat dan proses aklimatisasi baik secara fisiologis maupun psikologis, dan penentuan strategi pendinginan pasif yang sesuai dengan kondisi iklim lokal setempat (suhu udara, kelembapan udara, kecepatan angin, arah angin, radiasi matahari, curah hujan, dan lain sebagainya).

1.2 Kontribusi untuk Indonesia

Salah satu pembagian iklim yang banyak digunakan adalah pembagian iklim Koppen, yang diusulkan pertama kali oleh ahli iklim berdarah Jerman-Rusia Vladimir Koppen tahun 1884, dan terus diperbaharui termasuk dilengkapi oleh Rudolf Geiger di kemudian hari.

Pembagian iklim ini dilakukan berdasarkan sebaran curah hujan dan vegetasi, sehingga menghasilkan lima kelompok iklim utama, yaitu tropis (*tropics*), kering (*dry*), sedang (*temperate*), benua (*continental*), dan kutub (*polar*). Dalam klasifikasi iklim ini, Indonesia masuk ke dalam iklim tropis, dengan tiga zona iklim, yaitu hutan-hujan atau *rainforest* (Af), monsun atau *monsoon* (Am) dan sabana tropis atau *tropical savanna* (Aw). Perbedaan utama ketiga zona tersebut terletak pada kadar curah hujannya.

Pada taraf tertentu, klasifikasi ini dapat digunakan untuk berbagai aplikasi khususnya di bidang pertanian, kehutanan, dan lain sebagainya. Kebutuhan untuk perancangan dan perancangan bangunan gedung membutuhkan lebih dari sekedar informasi curah hujan dan sebaran vegetasi. Dibutuhkan data dan informasi tentang suhu dan kelembapan udara,



Gambar 1.1 Alur kegiatan DeLCA-SATREPS dalam mencapai tujuan dan sasaran kegiatan.

radiasi matahari, tutupan awan, serta arah dan kecepatan angin. Peta potensi pendinginan pasif yang dikembangkan dalam kegiatan ini mengisi kekosongan akibat ketiadaan zonasi iklim yang sesuai untuk perancangan bangunan gedung.

Sebagaimana peta bencana gempa yang diluncurkan beberapa tahun lalu, peta zona iklim untuk pendinginan pasif ini memiliki manfaat praktis untuk arsitek dan insinyur bangunan gedung dalam merencanakan dan merancang bangunan gedung berkinerja tinggi dan berkelanjutan. Apalagi, beberapa negara, terutama yang memiliki wilayah luas, telah memiliki peta zonasi ini untuk kebutuhan perencanaan dan perancangan bangunan gedung yang hemat energi, seperti Amerika Serikat, China, India, Jepang, Turki, dan sebagainya. *American Society for Refrigeration, Heating, and Air Conditioning (ASHRAE)* bahkan menyaratkan perhitungan beban pendinginan untuk perencanaan sistem tata udara harus sesuai dengan zonasi iklim di Amerika Serikat. Sehingga, pengembangan peta zona iklim ini memberikan kontribusi yang sangat signifikan bagi upaya Indonesia memitigasi dampak perubahan iklim.

Dalam proses perencanaan dan perancangan bangunan gedung berkinerja tinggi, peta zona iklim tersebut masih belum cukup. Hingga saat ini, sudah banyak perangkat yang dikembangkan untuk tujuan itu; salah satunya adalah simulasi komputer, baik dalam bentuk simulasi multi-zona maupun komputasi dinamika fluida (*computational fluid dynamic*). Selama lebih dari 50 tahun, metode ini semakin berkembang dan telah banyak digunakan, mulai dari untuk penelitian dan pengembangan hingga untuk proyek komersial. Gedung utama Kementerian PUPR, yang menerima banyak penghargaan untuk bangunan gedung hemat energi, memanfaatkan perangkat lunak EnergyPlus untuk menyimulasikan kinerja energi dalam proses perancangannya.

Salah satu masukan (*input*) penting untuk simulasi kinerja bangunan adalah data iklim. Indonesia belum memiliki dataset *Typical meteorological Year (TMY)* berstandar nasional. TMY dapat mengurangi upaya komputasi yang rumit dalam simulasi dan penanganan data cuaca menggunakan dataset satu tahun. Dataset TMY yang selama ini digunakan di Indonesia diperoleh

dari hasil kalkulasi numerik yang berasal dari data citra satelit (misalnya data NOAA) atau data meteorologi (seperti misalnya data iklim dari perpustakaan EnergyPlus atau <https://climate.onebuilding.org>).

Maka, pengembangan data iklim standar dengan menggunakan dataset hasil pengukuran langsung oleh stasiun klimatologi (BMKG) dapat mengisi kekosongan kebutuhan kita akan data iklim standar untuk simulasi kinerja bangunan gedung. Apalagi, untuk urusan ini kita masih tertinggal dari negara-negara lain yang telah mengembangkan data iklim standarnya sendiri, seperti misalnya Amerika Serikat, China, India, Jepang, negara-negara Eropa, dan lain sebagainya.

1.3 Isi dan Sistematika Buku

Hampir semua isi dalam buku ini merupakan ringkasan atau intisari dari makalah yang sudah diterbitkan di dalam jurnal ilmiah internasional terakreditasi dan pernah dipresentasikan dalam konferensi internasional. Semua isi buku ini telah melalui proses peninjauan (*review*) yang sangat ketat dari para ahli di bidangnya, sehingga isinya dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Pengembangan zona iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia (Bab 3), telah diterbitkan di Jurnal *Building and Environment* 226 tahun 2022. Pengembangan standar *weather* data (TMY) Indonesia (Bab 4) telah diterbitkan dalam Jurnal *Renewable* Volume 221 tahun 2024. Sementara itu, Bab 5 merupakan ringkasan dari dua makalah, yang masing-masing telah dipresentasikan di *the 5th International Conference on Building Energy and Environment* di *Concordia University*, Kanada pada tanggal 25-29 Juli 2022 dan di *Indoor Air Quality and Ventilation Conference (IAQVEC)* pada tanggal 20-23 Mei 2023 di Tokyo, Jepang.

Buku ini terbagi menjadi enam bab. Bab 1 menguraikan latar belakang umum yang mendasari pentingnya pengembangan peta potensi pendinginan pasif di Indonesia serta data iklim standar bagi pembangunan berkelanjutan, khususnya di sektor bangunan gedung. Bab 2 menjelaskan kebijakan umum tentang bangunan gedung hijau (BGH) di Indonesia, dan keterkaitannya dengan penggunaan data iklim dalam proses perencanaan dan penerapan

konsep BGH di Indonesia. Bangunan gedung hijau merupakan salah satu kebijakan pemerintah dalam rangka mengintroduksi pembangunan berkelanjutan melalui efisiensi energi, air, dan sumber daya alam lainnya.

Bab selanjutnya, Bab 3, mendeskripsikan upaya pengembangan klasifikasi zona iklim yang komprehensif untuk desain pasif pada bangunan gedung. Bab ini menjelaskan secara mendalam proses pengembangan zona iklim baru di Indonesia sesuai dengan kondisi iklim aktual, yang menghasilkan beberapa wilayah dengan pola iklim serupa berdasarkan data cuaca per jam dalam jangka panjang. Penilaian metode pendinginan pasif di setiap zona iklim juga dijelaskan dalam bab ini. Teknik pendinginan pasif yang meliputi ventilasi malam (*night ventilation*), kenyamanan ventilasi (*comfort ventilation*), dan pendinginan evaporatif (*evaporative cooling*) dievaluasi pada tiap zona iklim dengan menggunakan persamaan potensi pendinginan klimatik atau *Climatic Cooling Potential*(CCP). Peta zonasi untuk potensi pendinginan pasif diusulkan untuk ditetapkan pada peraturan bangunan dengan desain pasif dalam rangka mendorong pengurangan konsumsi energi pada bangunan gedung di Indonesia di masa depan.

Studi data iklim standar atau TMY membutuhkan data deret waktu per jam dalam periode jangka panjang. Jika terdapat data yang hilang, maka pengisian data dengan teknik interpolasi akan dilakukan. Bab 4 berisi penjelasan bagaimana kontrol kualitas dataset dilakukan untuk input perhitungan TMY. Data analisis dikoreksi biasanya untuk menutupi data yang hilang dengan teknik pengisian celah yang didasarkan pada data ERA5. Pemetaan kuantil dapat meningkatkan distribusi nilai suhu udara ERA5 agar mendekati distribusi nilai yang diamati. Prosedur yang sama digunakan untuk mengisi data pengamatan yang hilang untuk elemen kelembapan udara dan kecepatan angin di 106 lokasi di Indonesia.

Perhitungan TMY menggunakan metode Sandia dengan modifikasi *weighted factor* untuk masing-masing elemen iklim, yang melibatkan pemilihan bulan-bulan tertentu dalam setahun yang berbeda dari periode yang tercatat. TMY yang dihasilkan terdiri dari 12 *Typical Meteorological Month* (TMM) di 106 lokasi. TMY yang dihasilkan akan sangat

bermanfaat untuk berbagai aplikasi, seperti desain bangunan hemat energi, penilaian potensi energi terbarukan, dan desain arsitektur yang responsif terhadap iklim di masa depan.

Bab 5 mengeksplorasi kemungkinan penggunaan peta potensi pendinginan pasif dan data iklim standar dalam proses perancangan bangunan gedung berkinerja tinggi. Bab 5 akan mengambil contoh pemanfaatan data iklim setempat untuk merancang purwarupa rumah susun hemat energi di Kota Tegal, Jawa Tengah. Bangunan yang sudah selesai dibangun tahun 2020 ini memiliki kinerja termal yang baik, di mana suhu udara di dalam ruangan pada siang hari dapat lebih rendah daripada suhu udara luar, dengan memanfaatkan strategi desain pasif yang sesuai untuk kondisi iklim lokal Kota Tegal. Buku ini ditutup oleh Bab 6 yang menyimpulkan dari bab-bab sebelumnya.

BAB 02

BANGUNAN GEDUNG HIJAU (BGH) DI INDONESIA



2.1 Pendahuluan

Meskipun sektor bangunan gedung menyumbang emisi GRK yang signifikan, sekitar 30% dari total emisi GRK, sektor ini memiliki peluang besar untuk mereduksi konsentrasi GRK di atmosfer melalui penghematan energi.

Salah satu upaya penghematan energi dapat dilakukan melalui implementasi teknologi bangunan gedung hijau (BGH), yang diklaim dapat mengurangi konsumsi energi hingga 80% apabila diterapkan pada bangunan lamadan baru. Beberapa negara maju sudah mengawali teknologi sistem penilaian bangunan hijau, diantaranya adalah LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) dari Amerika Serikat/Kanada, CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency*) dari Jepang, BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) dari Inggris, Green Star dari Australia, dan lain sebagainya.

Bangunan gedung hijau banyak didiskusikan dan diperdebatkan akhir-akhir ini, baik di dunia dan Indonesia. Beberapa melihat isu bangunan gedung hijau lebih dominan pada aspek bisnis dan ekonomi (pasar) daripada aspek teknis, beberapa mendiskusikan aspek teknis penilaian bangunan gedung hijau. Misalnya, meskipun sistem penilaian bangunan gedung hijau oleh LEED diprediksi dapat menurunkan konsumsi energi sekitar 18-39% bila dibandingkan bangunan gedung non-hijau, terdapat bukti lain bahwa bangunan gedung yang bersertifikasi LEED ternyata tidak menunjukkan kemampuan penghematan energi yang lebih baik bila dibandingkan dengan yang tidak. Kritik muncul ketika parameter LEED digunakan untuk semua jenis bangunan tanpa melihat apakah bangunan tersebut termasuk bangunan kompleks atau bangunan sederhana.

Tingkat kenyamanan dan kepuasan penghuni bangunan gedung hijau juga tidak lepas dari kritik. Penghuni bangunan gedung hijau di daerah subtropis misalnya, merasa puas pada aspek desain, kebutuhan dan produktifitas tapi kurang puas pada aspek kesehatan, serta merasa nyaman pada lebih musim panas ketimbang pada musim dingin. Bahkan, sebuah studi menyatakan bahwa

tidak ada bukti yang menyatakan bahwa bangunan gedung hijau lebih nyaman daripada bangunan gedung non-hijau.

Terlepas dari perdebatan yang ada, sistem penilaian yang lebih komprehensif perlu terus dikembangkan dan disempurnakan. Pengembangan sistem penilaian bangunan gedung hijau tetap perlu mengacu kepada kriteria, indikator dan parameter serta penilaian yang sudah ada, dengan tetap mempertimbangkan konteks dan aspek lokalitas serta karakteristik wilayah penerapan penilaian bangunan gedung hijau.

2.2 Kebijakan BGH di Indonesia

Perkembangan sistem pemeringkatan bangunan gedung hijau di Indonesia tidak dapat dipisahkan dari perkembangan isu bangunan hijau di dunia secara umum.

Sistem penilaian bangunan gedung hijau di Indonesia pertama kali diinisiasi oleh *Green Building Council Indonesia* (GBCI) pada tahun 2009 dengan sistem penilaian yang diberi nama Greenship. Sejak saat itu, beberapa bangunan gedung di Indonesia tersertifikasi Greenship, salah satu di antaranya adalah gedung utama Kementerian PUPR yang memperoleh peringkat Platinum untuk kategori desain (*design recognition*). Gedung ini diklaim mampu menghemat pemakaian energi sebesar 56%, mengurangi emisi CO₂ sebesar 947 ton/tahun dan menghemat air 17,2%.

Selanjutnya, bangunan gedung hijau mendapatkan perhatian dari pemerintah, baik pemerintah pusat maupun daerah. Pemerintah Provinsi DKI Jakarta pada tahun 2012 mengeluarkan beleid tentang bangunan gedung hijau yang tertuang dalam Pergub DKI Jakarta Nomor 38 tahun 2012, yang kemudian disusul oleh Kementerian PUPR yang mengeluarkan beleid yang sama dengan terbitnya Permen PUPR No. 02 Tahun 2015. Pada tahun 2016, Pemerintah Kota Bandung menerbitkan Peraturan Walikota (Perwal) Bandung Nomor 1023 Tahun 2016 dan disusul oleh Pemerintah Kota Semarang dengan terbitnya Perwal Semarang Nomor 24 Tahun 2019. Meskipun tidak semua kota (setidaknya kota besar) mengeluarkan peraturan

tentang bangunan gedung hijau, keluarnya peraturan-peraturan tersebut memperlihatkan perhatian yang serius dari pemerintah tentang bangunan gedung hijau.

Pada tahun 2020, pemerintah mengeluarkan Undang-undang (UU) Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja, atau yang biasa disebut *Omnibus Law*. Salah satu UU yang “dilebur” dalam *omnibus law* adalah UU Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Dari UU Cipta Kerja, lahir Peraturan Pemerintah (PP) No. 16 Tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan UU Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Di dalam PP tersebut, terdapat ketentuan eksplisit tentang standar teknis bangunan gedung, salah satunya adalah ketentuan penyelenggaraan BGH. Dengan berlakunya UU Cipta Kerja, peraturan lain yang berkaitan dengan bangunan gedung, termasuk Pergub DKI, Perwal Bandung, dan Perwal Semarang tentang BGH dinyatakan tidak berlaku, dan pengaturan bangunan gedung sepenuhnya mengikuti rezim PP No. 16/2021.

Bangunan gedung hijau di dalam PP No. 16/2021 didefinisikan sebagai bangunan gedung yang memenuhi standar teknis bangunan gedung dan memiliki kinerja terukur secara signifikan dalam penghematan energi, air, dan sumber daya lainnya melalui penerapan prinsip bangunan gedung

hijau. Penyelenggaraan BGH dalam PP tersebut memuat standar teknis yang meliputi standar teknis di setiap tahap penyelenggaraan, meliputi tahap perencanaan teknis, tahap pelaksanaan konstruksi, tahap pemanfaatan, dan tahap pembongkaran. Setiap tahapan tersebut memiliki penilaian kinerja dengan parameter, kriteria, dan indikator, yang diatur dan ditentukan dalam Permen PUPR Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau, dan dirinci dalam Surat Edaran (SE) Menteri PUPR Nomor 01 Tahun 2022 tentang Petunjuk Teknis Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. Ketentuan ini berlaku untuk bangunan gedung yang sudah ada (*existing building*) maupun bangunan gedung baru (*new building*), bangunan gedung negara (BGN) dan non-BGN. Dalam penyelenggaraannya, penyelenggara BGH (yaitu pemerintah pusat dan daerah, pemilik gedung, pengguna dan/atau pengelola gedung, serta penyedia jasa) wajib melibatkan tenaga ahli BGH, yang tersertifikasi oleh lembaga sertifikasi profesi.

Permen PUPR No. 21/2021 mewajibkan semua BGN dengan luas lantai di atas 5000m² menerapkan prinsip-prinsip BGH. Sementara itu, peraturan ini juga mewajibkan klas bangunan tertentu pada non-BGN untuk menerapkan prinsip BGH, disertai dengan insentif bagi bangunan gedung yang menerapkannya dan disinsentif bagi yang

Tabel 2.1 Klas bangunan non-bangunan gedung negara serta persyaratan diwajibkan dan disarankan untuk BGH.

Klas bangunan	Deskripsi	Contoh	Persyaratan	
			Diwajibkan	Disarankan
Klas 1, 2 dan 3	Rumah tinggal	Rumah tunggal, rumah tapak, asrama, hostel, dsb.		Hostel dan asrama: Luas lantai max. 300m ² dan dihuni kurang dari 12 orang.
Klas 4	Rumah tinggal	Apartemen <i>mixed-use</i> , hotel, dsb.	Lebih dari 4 lantai dan luas lantai min. 50.000 m ²	Kurang dari 3 lantai, atau lebih dari 4 lantai dengan luas lantai kurang dari 50.000m ² .
Klas 5	Gedung kantor	Gedung perkantoran.		
Klas 6	Gedung komersial	Toko, supermarket, pasar, <i>showroom</i> , dll.	Lebih dari 4 lantai dan luas lantai min. 5.000 m ²	Kurang dari 3 lantai, atau lebih dari 4 lantai dengan luas lantai kurang dari 5000m ² .
Class 7	Gedung penyimpanan	Gudang		
Class 8	Gedung lab., atau industri, atau pabrik	Laboratorium, bengkel, pabrik, dsb.		
Class 9a	Gedung publik: perawatan kesehatan	Rumah sakit, klinik, dsb.	Luas lantai lebih dari 20.000 m ²	Luas lantai kurang dari 20.000 m ²
Class 9b	Gedung publik: selain rumah sakit	Sekolah, tempat ibadah, gedung budaya, dsb.	Luas lantai lebih dari 10.000 m ²	Luas lantai kurang dari 10.000 m ²

tidak. Selain kategori bangunan gedung yang diwajibkan, peraturan BGH juga memberikan kategori bangunan gedung yang disarankan untuk memenuhi BGH, sebagaimana dapat kita lihat dalam Tabel 2.1.

Untuk mencapai tujuan implementasi BGH, dilakukan sertifikasi BGH. Sertifikasi ini akan mendorong penyelenggaraan bangunan gedung yang memiliki kinerja terukur secara signifikan, efisien, aman, sehat, mudah, nyaman, ramah lingkungan, hemat energi dan air, dan sumber daya lainnya. Terdapat tiga peringkat sertifikasi BGH, yaitu Pratama, Madya dan Utama. Masing-masing kategori memiliki nilai yang harus dipenuhi terhadap pemenuhan standar teknis, yang akan diuraikan pada bagian selanjutnya.

Proses verifikasi untuk penilaian kinerja BGH dan dokumen pembuktiannya dilakukan oleh Tim Profesi Ahli (TPA) untuk ditetapkan peringkatnya. Selanjutnya, sertifikat diterbitkan oleh pemerintah kabupaten atau kota (pemerintah provinsi untuk DKI Jakarta) dan pemerintah pusat untuk bangunan gedung fungsi khusus (BGFK), dan berlaku untuk lima tahun.

2.3 Parameter Penilaian BGH: Efisiensi Energi

Sebagaimana kita bicarakan sebelumnya, peringkat sertifikasi BGH sangat tergantung pada pemenuhan parameter, kriteria, dan indikator yang terdapat dalam standar teknis BGH. Setiap tahap penyelenggaraan, mulai dari tahap pemrograman hingga pembongkaran, memiliki parameter, kriteria, dan indikator yang berbeda, meskipun total nilai setiap tahap tersebut sama, yaitu 165.

Setiap bangunan gedung dengan kategori wajib BGH, sebelum mendapatkan persetujuan bangunan gedung (PBG), harus dirancang memenuhi persyaratan BGH memenuhi persyaratan BGH sesuai dengan kategori kewajiban untuk klas bangunan. Dalam tahap perencanaan teknis, terdapat tujuh parameter dengan 29 kriteria yang harus dipenuhi (Tabel 2.2). Di antara parameter dan kriteria tersebut, terdapat

dua parameter yang berkaitan dengan efisiensi energi, yaitu pengelolaan tapak dan efisiensi penggunaan energi. Jika yang pertama berkaitan tidak langsung melalui desain pasif, maka yang kedua berkaitan secara langsung melalui efisiensi energi peralatan mekanikal-elektrikal. Kedua parameter tersebut juga berkaitan dengan iklim setempat. Selain kedua parameter tersebut, efisiensi penggunaan air merupakan parameter yang berkaitan erat dan langsung dengan data iklim.

Dari 38 poin maksimum yang ada di parameter pengelolaan tapak, 2 poin diberikan untuk kriteria orientasi bangunan yang sesuai dan 6 poin untuk kriteria rencana ruang terbuka hijau (RTH) privat. Pemilihan orientasi bangunan sangat mengandalkan data iklim lokal yang setidaknya memuat radiasi matahari dan peredaran semu matahari, serta arah dan kecepatan angin. Dengan memahami iklim setempat, kita dapat merancang orientasi bangunan gedung untuk meminimalkan dampak radiasi matahari yang tinggi dan di saat yang sama memaksimalkan pendinginan pasif melalui ventilasi alami. Sementara itu, kriteria perencanaan RTH privat dimaksudkan agar tercipta kondisi iklim mikro yang sesuai, sehingga mengurangi beban pendinginan bangunan gedung. Perencanaan RTH privat tidak dapat dipisahkan dari kondisi iklim setempat.

Jika menilik parameter efisiensi penggunaan energi, terdapat 4 kriteria dari 7 kriteria yang berkaitan langsung dengan data iklim lokal, dengan nilai maksimal 31 poin dari total 46 poin yang tersedia. Keempat parameter itu antara lain nilai *Overall Thermal Transfer Value* (OTTV) selubung bangunan yang tidak boleh lebih dari 35 W/m^2 , sistem ventilasi, sistem pengondisian udara, dan sistem pencahayaan. Selain empat kriteria tersebut, terdapat satu kriteria lagi di mana salah satu indikatornya berkaitan langsung dengan iklim, yaitu kriteria sistem kelistrikan dengan indikator pemanfaatan sumber listrik dari sumber energi terbarukan.

Pada parameter OTTV, dibutuhkan data iklim yang akurat terkait dengan radiasi matahari di masing-masing wilayah, tidak hanya radiasi horisontal global, tapi juga radiasi vertikal dari empat atau delapan arah angin yang berbeda. Metode perhitungan OTTV, termasuk bagaimana

menggunakan faktor matahari dari arah angin diberikan dalam SNI 6389-2020 tentang Konservasi Energi Selubung Bangunan. Yang perlu dicatat, data faktor matahari yang ada di dalam standar tersebut merupakan hasil perhitungan dan bukan hasil pengukuran langsung.

Salah satu metode perhitungan OTTV, terutama apabila melibatkan bentuk fasad bangunan yang sangat kompleks, adalah dengan menggunakan perangkat lunak simulasi kinerja bangunan seperti EnergyPlus, TRNSYS, Grasshopper, dan perangkat lunak sejenis. Pembangunan gedung-gedung yang ada di Ibukota Nusantara (IKN) saat ini didorong menggunakan perangkat lunak simulasi tersebut untuk menghitung OTTV dan menilai kinerja energinya. Penggunaan perangkat lunak ini meniscayakan penggunaan data iklim standar (TMY) sebagai bahan masukan. Tanpa data iklim standar tersebut, mustahil diperoleh hasil yang akurat.

Sementara itu, parameter ventilasi membutuhkan data arah dan kecepatan angin pada lokasi dan wilayah tertentu untuk perencanaan ventilasi alami. Sebagaimana perhitungan OTTV dan energi, pembangunan bangunan gedung di IKN juga didorong menggunakan perangkat lunak komputasi dinamika fluida (CFD) untuk mengevaluasi kinerja ventilasinya. Untuk keperluan ini pun, dibutuhkan data iklim setempat sebagai bahan masukan simulasi.

Meskipun standar kenyamanan termal telah ditetapkan dalam SNI 6390-2020 tentang Konservasi Energi Sistem Udara pada Bangunan Gedung, data iklim setempat diperlukan untuk perencanaan sistem tata udara (pengondisian udara) yang lebih efisien, terutama jika merujuk pada standar kenyamanan termal adaptif.

Praktik yang sama dilakukan di Amerika Serikat, sebagaimana dipersyaratkan oleh ASHRAE.

Kriteria sistem pencahayaan berusaha memaksimalkan pencahayaan alami untuk kebutuhan pencahayaan di dalam ruangan. Untuk itu, diperlukan data cahaya langit untuk kebutuhan perencanaan pencahayaan alami. Bahkan, penggunaan perangkat simulasi pencahayaan Dialux dipersyaratkan dalam perencanaan pencahayaan alami di dalam ruang; dan ini membutuhkan data iklim yang sesuai agar akurat.

Pemanfaatan energi terbarukan sangat didorong di dalam implementasi BGH. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak digunakan untuk bangunan gedung panel surya, yang dalam istilah teknis dikenal dengan *building integrated photovoltaic* (BIPV). Perencanaan pemenuhan kebutuhan energi dari sumber terbarukan ini mutlak membutuhkan data iklim setempat, terutama data radiasi matahari. Daya yang dihasilkan oleh setiap panel surya selain tergantung pada efisiensi panel, juga tergantung pada paparan radiasi matahari.

2.4 Implementasi BGH di Indonesia

Penerapan BGH di Indonesia diarahkan untuk meningkatkan efisiensi energi di sektor bangunan gedung sebagaimana diamanatkan dalam PP 16/2021, yaitu sebesar 25% dari *baseline*. Karena itu, penting untuk memahami seberapa besar *baseline* konsumsi energi sektor tersebut.

Studi *Global Building Performance Network* (GBPN) tahun 2023 menyebutkan bahwa bangunan rumah tangga mewakili 68% dari total

Tabel 2.2 Parameter penilaian kinerja BGH pada tahap perencanaan sesuai Permen PUPR No. 21 Tahun 2021.

No.	Parameter	Kriteria	Poin maksimum
1.	Pengelolaan tapak	9 kriteria	38
2.	Efisiensi penggunaan energi	7 kriteria	46
3.	Efisiensi penggunaan air	3 kriteria	22
4.	Kualitas udara dalam ruang	3 kriteria	19
5.	Penggunaan material ramah lingkungan	2 kriteria	21
6.	Pengelolaan sampah	3 kriteria	7
7.	Pengelolaan air limbah	2 kriteria	12

kebutuhan energi listrik pada bangunan gedung, sementara bangunan komersial dan gedung pemerintah mewakili 29% dan 3% dari total kebutuhan energi listrik. Meskipun bangunan rumah tangga mewakili peluang penghematan terbesar, namun regulasi terkait sektor bangunan untuk skala rumah tangga saat ini masih terbatas dan memiliki banyak tantangan, termasuk proses perizinan belum optimal pada bangunan rumah tinggal. Di sisi lain, meskipun dampak langsungnya terhadap pengurangan emisi GRK pada bangunan gedung pemerintah cenderung rendah, penguatan peraturan pada bangunan gedung pemerintah dapat menjadi kunci untuk mendorong transformasi menuju BGH. *Baseline* intensitas konsumsi energi (IKE) pada beberapa tipe bangunan gedung dapat dilihat pada Tabel 2.3. *Baseline* ini merupakan hasil kajian dan studi oleh GBPN tahun 2023 di beberapa kota di Indonesia.

Sebagaimana dapat kita lihat pada Gambar 2.1, proses sertifikasi BGH terbilang tidak rumit. Pemilik, atau konsultan perencana, atau perancang (*designer*) bangunan gedung memasukkan dokumen yang memuat justifikasi teknis BGH beserta poin yang diklaim untuk setiap parameter, kriteria, dan indikator. Submisi

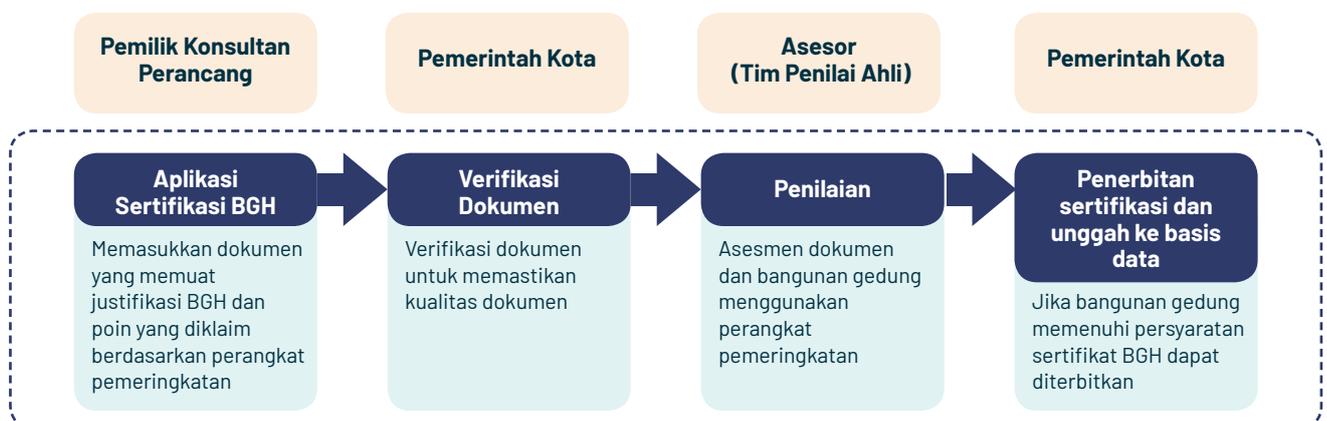
dokumen ini dilengkapi dengan bukti-bukti yang dapat diverifikasi sebagaimana diatur dalam peraturan.

Selanjutnya, Pemkot melakukan verifikasi dokumen untuk memastikan kelengkapan dan kualitas dokumen yang dimasukkan. Apabila dokumen tersebut dinilai lengkap, maka dokumen tersebut akan dinilai oleh Tim Profesi Ahli (TPA), apakah bukti-bukti yang dilampirkan sesuai dengan klaim yang diambil. Hasil akhir penilaian tersebut disampaikan kepada Pemkot dalam bentuk rekomendasi untuk disahkan oleh Pemkot dan dikeluarkan sertifikat peringkat BGH.

Setelah Permen PUPR 21/2021 diundangkan, Kementerian PUPR segera membentuk Sekretariat Pusat Pembinaan BGH Nasional yang memfasilitas pendidikan dan pelatihan untuk tenaga ahli, serta asesmen BGH berdasarkan Permen No. 21/2021. Sampai terbentuknya lembaga sertifikasi profesi dan tim ahli BGH di masing-masing kabupaten/kota (provinsi untuk DKI Jakarta), Sekretariat Pembinaan BGH Nasional melakukan asesmen terhadap proposal BGH. Di masa transisi tersebut, Sekretariat juga melakukan kegiatan pelatihan tenaga ahli BGH yang menyasar profesional dan juga ASN (Gambar 2.2).

Tabel 2.3 *Baseline* IKE pada beberapa tipe bangunan gedung.

IKE (kWh/m ² .thn)	Gedung pemerintah	Kantor swasta	Hotel	Pusat perbelanjaan	Rumah sakit	Sekolah	Apartemen
Maksimal	188	216	250	349	255	162	241
Rata-rata	183	180	225	307	248	126	229
Minimum	178	151	192	290	240	107	221



Gambar 2.1 Proses sertifikasi BGH di Indonesia.

Sejauh ini, semua proyek infrastruktur bangunan gedung yang dibiayai oleh negara, baik dari Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN) maupun Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD), harus dibangun dengan menerapkan prinsip-prinsip BGH. Tercatat beberapa bangunan gedung di berbagai wilayah di Indonesia telah dinilai peringkat BGH-nya, meliputi bangunan pasar, pendidikan, pusat pelatihan, pusat olahraga, rumah sakit, gedung pertemuan, gedung kantor pemerintah, dan lain sebagainya.

Sebagai amanat pelaksanaan Peraturan Presiden (Perpres) No. 63 Tahun 2022 tentang Perincian Rencana Induk Ibukota Nusantara (IKN), semua bangunan gedung yang ada di Kawasan Inti Pusat Pemerintahan (KIPP) harus memenuhi standar teknis BGH. Terlebih, sebagai rujukan sekaligus percontohan nasional, semua bangunan gedung yang dibangun di KIPP IKN harus memenuhi peraturan BGH dengan peringkat utama. Dengan demikian, semua bangunan gedung yang saat ini sedang dan telah selesai dibangun di KIPP IKN memiliki sertifikat BGH dengan peringkat utama untuk tahap perencanaan teknis. Tercatat, bangunan gedung kantor dan istana presiden serta wakil presiden, gedung kementerian koordinator (Kemenko), hingga gedung rusun untuk ASN dan Kepolisian Republik Indonesia (Polri) telah disertifikasi BGH untuk kategori perencanaan teknis.

2.5 Pengembangan BGH ke depan

Rencana pengembangan BGH ke depan tertuang dalam dokumen Peta Jalan Penyelenggaraan dan Pembinaan Bangunan Gedung Hijau (BGH) yang disusun oleh Kementerian PUPR tahun 2023. Rencana strategis ini meliputi empat fokus utama, yaitu pengaturan, pemberdayaan, pengawasan, dan penugasan lain.

Strategi pertama adalah pengaturan, yang meliputi penyusunan norma standar prosedur dan kriteria (NSPK), pelaksanaan pendampingan bagi provinsi dan kabupaten/kota. Dan penyebarluasan NSPK. Pengembangan instrumen penilaian kinerja BGH dapat dilakukan melalui kegiatan:

- Ulasan pada NSPK yang dilakukan pada ordo bangunan gedung dan kawasan;
- Ulasan pada modul penilaian kinerja Tahap Perencanaan, Tahap Pelaksanaan/Konstruksi, Tahap Pemanfaatan, dan Tahap Pembongkaran, dan
- Penyusunan NSPK pada seluruh klas bangunan gedung dan/atau kebutuhan penyelenggaraan BGH.

Pelaksanaan pendampingan penyelenggaraan BGH bagi Pemerintah Provinsi/Kabupaten/Kota diprioritaskan pada daerah yang belum memiliki Tim Profesi Ahli (TPA) BGH serta belum memiliki Aparatur Sipil Negara (ASN) yang tersertifikasi dan/atau belum mengikuti pelatihan penilaian kinerja BGH.

Strategi kedua adalah pemberdayaan melalui peningkatan kapasitas dan kesadaran publik. Inisiasi kerja sama dengan institusi pendidikan dapat dilakukan dengan tujuan untuk menciptakan kesadaran sejak dini sebagai upaya penghematan atau konservasi energi dan air. Upaya ini dapat dilakukan dengan memasukkan materi pemahaman akan pentingnya BGH melalui kurikulum pembelajaran. Selain itu, unsur pendidikan tinggi tentu dapat dilibatkan dalam penyelenggaraan BGH baik dalam pengembangan sumber daya manusia, pengembangan NSPK, Penyusunan Modul Pembelajaran, penelitian serta kegiatan ilmiah lain terkait BGH di Indonesia.

Pengembangan kapasitas penyelenggara BGH dilakukan sebagai upaya mewujudkan terselenggaranya BGH yang memenuhi standar teknis BGH yang berlaku. Pengembangan kapasitas penyelenggaraan BGH ini dilakukan dengan melakukan pelatihan kepada penyelenggara BGH baik ASN, TPA dan profesional.

Strategi ketiga adalah pengawasan dan evaluasi pelaksanaan kegiatan. Pengawasan dilaksanakan melalui kegiatan pemantauan penyelenggaraan BGH untuk mengevaluasi pelaksanaan penyelenggaraan BGH baik secara substansi teknis, maupun manajemen pelaksanaan di daerah. Pemantauan dilakukan secara berkala terhadap kendala, permasalahan dan hambatan dalam penyelenggaraan BGH. Hasil pemantauan menjadi pertimbangan dalam pelaksanaan evaluasi

penyelenggaraan BGH. Pelaksanaan kegiatan pemantauan perlu melibatkan *stakeholder* di tingkat pusat, provinsi dan kabupaten/kota. Pemantauan juga dapat menggunakan Sistem Informasi Bangunan Gedung Hijau (SIMBGH) sebagai pendukung kegiatan.

Strategi terakhir melibatkan kegiatan penugasan lain berupa sertifikasi BGH pada bangunan gedung fungsi khusus (BGFK) dan inovasi teknologi.

Penyelenggaraan BGH di Indonesia dilakukan secara bertahap mengingat adanya celah dari segi

kesiapan dan kapasitas di daerah dalam proses penyelenggaraan siklus bangunan. Kesiapan penyelenggaraan BGH di daerah bergantung dari banyak hal, mulai dari ketersediaan sumber daya dan keahlian dalam menjalankan kebijakan BGH sampai dengan kesiapan pasar dalam menerapkan kebijakan BGH. Pentahapan didasarkan pada penentuan zonasi dan batas luasan (*threshold*) penerapan BGH dan pemodelan penghematan energi. Zonasi dan batas luasan target implementasi BGH diperlihatkan dalam Tabel 2.4 dan 2.5, sementara tahapan implementasinya diperlihatkan dalam Tabel 2.6.



Gambar 2.2 Suasana pelatihan tenaga ahli BGH untuk profesional dan ASN (Foto: Sekretariat Pembinaan BGH Nasional)

Tabel 2.4 Zonas wilayah dalam strategi penyelenggaraan dan pembinaan BGH

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
<ul style="list-style-type: none"> • Jawa Barat • DKI Jakarta • Banten 	<ul style="list-style-type: none"> • DI Aceh • Sumatera Utara • Riau • Sumatera Selatan • Lampung • Jawa Tengah • DI Yogyakarta • Jawa Timur 	<ul style="list-style-type: none"> • Kalimantan Tengah • Kalimantan Timur • Kalimantan Utara • Kalimantan Selatan • Bali • NTB • NTT • Sulawesi Utara • Sulawesi Selatan 	<ul style="list-style-type: none"> • Kep. Riau • Jambi • Bangka-Belitung • Bengkulu • Sumatera Barat • Sulawesi Tengah • Sulawesi Tenggara • Sulawesi Barat • Gorontalo • Kalimantan Barat 	<ul style="list-style-type: none"> • Maluku • Maluku Utara • Papua • Papua Barat

Tabel 2.5 Skenario peta jalan penyelenggaraan dan pembinaan BGH 2023-2030 (dalam juta m² per tahun).

Rencana Aksi Peta Jalan BGH	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Target sertifikasi BGH gedung baru							
Pemerintah	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2
Komersial	8,9	9,5	10,2	11,0	11,8	12,7	13,6
Rumah Tangga	17,0	18,3	19,6	21,0	22,6	24,2	26,0
Target sertifikasi BGH gedung yang ada							
Pemerintah	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Komersial	-	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Rumah Tangga	-	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4

Tabel 2.6 Sasaran fokus strategi penyelenggaraan dan pembinaan BGH.

Fokus strategi	Sasaran jangka pendek (2023-2024)	Sasaran jangka menengah (2025-2026)	Sasaran jangka panjang (2027-2028)
Kebijakan	Penyempurnaan kebijakan dan instrumen pendukung (termasuk NSPK)	Penyempurnaan kebijakan untuk optimalisasi penyelenggaraan BGH menuju penerapan	Penyempurnaan kebijakan untuk optimalisasi penyelenggaraan BGH menuju penerapan Batas Luasan 5
	Pembentukan lembaga sekretariat pusat pembi-naan BGH		
	Mendorong agenda konservasi energi dan air, termasuk penyeleng-garaan BGH dalam dokumen perencanaan pembangunan nasional dan daerah		
	Review dan usulan penyempurnaan SKKNI No. 2 tahun 2023		
	Pembentukan Pokja untuk penguatan kolaborasi lintas kementerian dan daerah di zona 1 dan 2	Pembentukan Pokja untuk penguatan kolaborasi lintas kementerian dan daerah di zona 3	Pembentukan Pokja untuk penguatan kolaborasi lintas kementerian dan daerah di zona 4 dan 5
	Pengembangan model insentif dan disinsentif	Penerapan insentif dan disinsentif	Perluasan penerapan insentif dan disinsentif
	Mendorong pengembangan mekanisme pembiayaan BGH	Penerapan mekanisme pembiayaan BGH	Perluasan penerapan mekanisme pembiayaan BGH
Implementasi	Pengembangan modul sistem BGH yang terintegrasi dalam SIMBG	Penerapan modul sistem BGH yang terintegrasi dalam SIMBG	Penerapan modul sistem BGH yang terintegrasi dalam SIMBG
	Penerbitan sertifikat BGH dan optimalisasi sertifikasi BGH sebagai bagian dari proses PBG dan SLF, termasuk penilaian kinerja untuk BGFK dengan fokus di gedung pemerintah dan BGFK Zona 1 dan 2	Penerbitan sertifikat BGH dan optimalisasi sertifikasi BGH sebagai bagian dari proses PBG dan SLF, termasuk penilaian kinerja untuk BGFK dengan fokus perluasan di Zona 3 bagi gedung pemerintah dan BGFK, dan BG klas 5-10 (nonhunian) di Zona 1 dan 2	Penerbitan sertifikat BGH dan optimalisasi sertifikasi BGH sebagai bagian dari proses PBG dan SLF, termasuk penilaian kinerja untuk BGFK dengan fokus perluasan sampai Zona 5 bagi gedung pemerintah dan BGFK, dan BG klas 5-10 (nonhunian)
	Pengembangan mekanisme dan sistem monitoring dan evaluasi yang terintegrasi dan berkelanjutan.	Penerapan mekanisme dan sistem monitoring dan evaluasi yang terintegrasi dan berkelanjutan.	Perluasan mekanisme dan sistem monitoring dan evaluasi yang ter-integrasi dan berkelanjutan.
	Pengembangan mekanisme penyelenggaraan snggah banding untuk sertifikasi BGH	Penerapan mekanisme penyelenggaraan snggah banding untuk sertifikasi BGH	Penerapan mekanisme penyelenggaraan snggah banding untuk sertifikasi BGH

Fokus strategi	Sasaran jangka pendek (2023-2024)	Sasaran jangka menengah (2025-2026)	Sasaran jangka panjang (2027-2028)
Peningkatan kapasitas	Peningkatan kapasitas teknis bagi penyelenggara BGH di prov/kab/kota yang belum memiliki TPA dan ASN tersertifikasi BGH dengan fokus utama di Zona 1 dan 2	Perluasan peningkatan kapasitas teknis bagi penyelenggara BGH di Zona 3	Perluasan peningkatan kapasitas teknis bagi penyelenggara BGH di Zona 4 dan 5
	Memasukkan BGH pada kurikulum di pendidikan vokasi dan perguruan tinggi	Memasukkan BGH pada kurikulum di pendidikan vokasi dan perguruan tinggi	Perluasan sosialisasi kepada pengelola dan pemilik BG (asosiasi, profesional) di Zona 4 dan 5
	Sosialisasi kepada pengelola dan pemilik BG (asosiasi, profesional) di Zona 1 dan 2	Sosialisasi kepada pengelola dan pemilik BG (asosiasi, profesional) di Zona 3	
Kesadaran publik	Mengenalkan BGH ke masyarakat luas di Zona 1 dan 2	Perluasan pengenalan BGH ke masyarakat luas di Zona 3	Perluasan pengenalan BGH ke masyarakat luas di Zona 4 dan 5
	Memasukkan BGH ke dalam kurikulum pendidikan dasar dan menengah	Memasukkan BGH ke dalam kurikulum pendidikan dasar dan menengah	
Teknologi dan inovasi	Inventarisasi dan pembangunan basis data teknologi terkait BGH	Inventarisasi dan pembangunan basis data teknologi terkait BGH	Inventarisasi dan pembangunan basis data teknologi terkait BGH
	Peningkatan efisiensi dan penggunaan produk lokal	Peningkatan efisiensi dan penggunaan produk lokal	Peningkatan efisiensi dan penggunaan produk lokal
	Pengembangan teknologi hijau dan cerdas	Pengembangan teknologi hijau dan cerdas	Pengembangan teknologi hijau dan cerdas
	Penguatan sistem rating dan labeling untuk teknologi terkait BGH	Penguatan sistem rating dan labeling untuk teknologi terkait BGH	
	Digitalisasi desain BGH untuk memudahkan proses PBG klas bangunan rumah tangga (hunian)		

BAB 03

PETA POTENSI PENDINGINAN PASIF UNTUK IKLIM PANAS- LEMBAP INDONESIA



3.1 Pendahuluan

Sebagaimana telah dibicarakan pada bab pertama buku ini, posisi Indonesia yang berada di antara dua benua dan dua samudra, serta bentuknya yang kepulauan dengan dikelilingi laut hangat, menjadikan iklim dan cuaca di Indonesia memiliki karakteristik fisik yang kompleks dan dinamis. Dinamika ini dipengaruhi oleh angin pasat, musim hujan atau monsun, dan pengaruh kondisi lokal seperti angin laut.

Kondisi iklim yang sangat dinamis inilah, dengan melibatkan banyak faktor atau variabel yang memengaruhi, menjadikan klasifikasi iklim Koppen kurang memadai sebagai dasar pertimbangan perencanaan dan perancangan bangunan gedung di Indonesia. Pengembangan zona iklim dengan demikian akan memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi kondisi iklim yang berbeda dalam skala makro di Indonesia.

Mendefinisikan zona iklim adalah pekerjaan yang rumit sekaligus sulit karena interaksi beberapa variabel bebas yang memengaruhi iklim. Hingga saat ini, hampir tidak ada metode ilmiah yang diterima secara luas untuk mengembangkan zona iklim, meskipun beberapa metode telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir. Meskipun demikian, metode yang umum digunakan adalah analisis komponen utama atau *Principal Component Analysis* (PCA) yang kemudian diikuti oleh analisis kluster (*cluster analysis*) dan dilanjutkan dengan interpolasi spasial. Meskipun memiliki kelemahan, terutama dalam *chaining* dan penentuan jumlah kluster yang optimal, analisis kluster memungkinkan penggunaan berbagai variabel iklim dan geografis yang dapat memengaruhi kondisi termal dan kinerja energi pada bangunan gedung.

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, iklim memiliki kaitan yang erat dengan strategi pendinginan pasif pada bangunan gedung. Strategi pendinginan pasif dianggap sebagai salah satu langkah efisiensi energi untuk bangunan gedung, di mana target utamanya adalah mengurangi konsumsi energi melalui pencapaian kenyamanan termal secara alamiah. Strategi pendinginan pasif

ini secara efektif mampu menurunkan konsumsi energi untuk pendinginan hingga 20%.

Istilah pendinginan dan/atau pemanasan pasif pada bangunan pertama kali digunakan di Amerika Serikat pada awal tahun 1970-an untuk menggambarkan sistem pengondisi ruang yang memanfaatkan sumber-sumber alam. Secara definisi, teknik pendinginan pasif adalah beragam teknik pendinginan sederhana yang memungkinkan suhu udara ruang dalam (*indoor*) lebih rendah melalui penggunaan sumber-sumber energi alam. Istilah lain untuk pendinginan pasif antara lain desain bioklimatik, arsitektur tropis dalam konteks iklim tropis dan belakangan disebut juga dengan istilah bangunan gedung hijau dan *eco-house*.

Sejak pertama kali diperkenalkan, penelitian dan praktik pendinginan pasif telah meningkat dari tahun ke tahun serta melingkupi kondisi iklim yang sangat beragam. Strategi pendinginan pasif secara umum dapat dilakukan dalam tiga strategi, yaitu mengurangi perolehan panas (*heat gain*), memodulasi panas (*heat modulation*), dan meningkatkan pelepasan panas (*heat loss*).

Beberapa strategi pendinginan pasif yang dikenal dan banyak dipraktikkan antara lain kenyamanan ventilasi (*comfort ventilation*), ventilasi malam (*night ventilation*), pendinginan evaporatif (*evaporative cooling*), pendinginan radiatif (*radiative cooling*), dan pendinginan tanah (*ground cooling*). Kenyamanan ventilasi ditentukan dengan menghitung periode saat udara luar yang mengalir ke dalam ruangan dapat digunakan untuk menghilangkan udara panas yang berlebihan. Strategi ventilasi malam menghilangkan panas dari bangunan gedung di malam hari melalui infiltrasi udara luar yang dingin dan mengurangi laju kenaikan suhu udara di dalam ruangan pada siang hari. Pendinginan radiatif adalah terjadinya kehilangan panas melalui radiasi gelombang panjang ke langit pada malam hari. Pendinginan evaporatif dicapai dengan menurunkan suhu udara melalui penguapan air, sementara pendinginan tanah memanfaatkan tanah sebagai sumber pendingin pada bangunan.

Studi tentang strategi pendinginan pasif untuk daerah iklim tropis panas-lembap telah banyak dilakukan belakangan ini. Spektrum penelitiannya

pun sangat luas, mulai dari strategi selubung bangunan hingga ventilasi yang sesuai. Meskipun demikian, kesimpulan dari setiap studi yang dilakukan sangat beragam tergantung pada lokasi serta kondisi iklim setempat. Sangat sulit untuk menentukan teknik pendinginan pasif tunggal yang bersifat generik untuk iklim tropis panas-lembap.

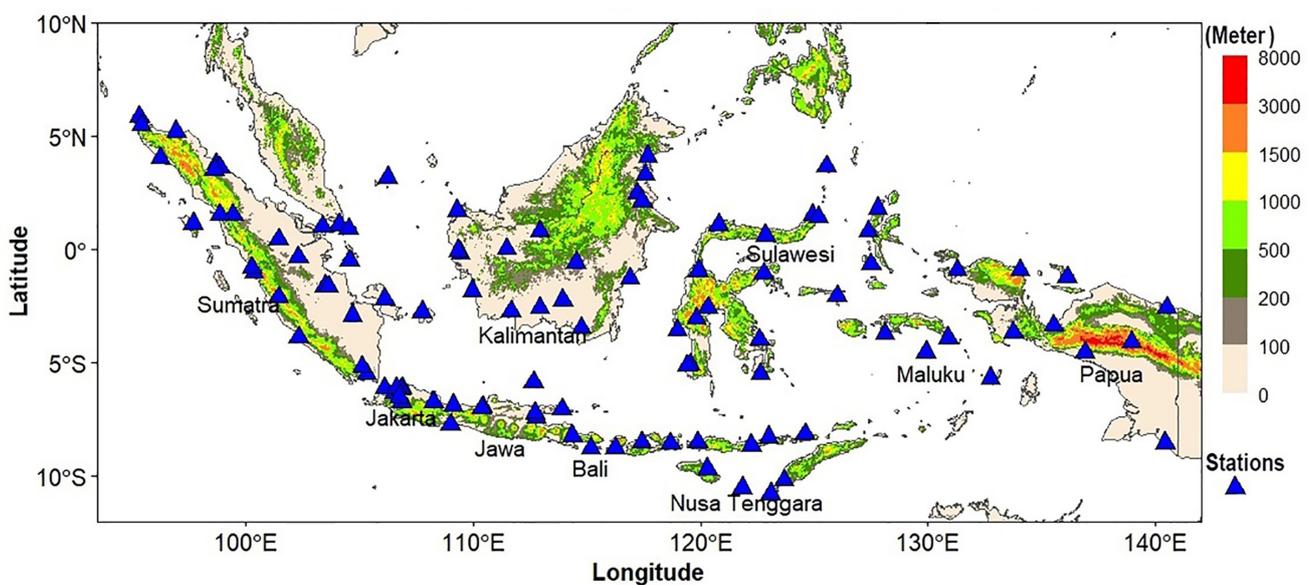
Strategi ventilasi adalah salah satu contoh. Meskipun ventilasi dianggap sebagai salah satu strategi utama dan paling efektif untuk mencapai kenyamanan termal pada bangunan gedung berventilasi alami, beberapa studi memperlihatkan hasil yang berbeda. Ada yang menyatakan bahwa ventilasi penuh (*full-day ventilation*) efektif, tetapi ada yang menyatakan bahwa ventilasi malam lah yang efektif. Contoh lain adalah massa termal (*thermal mass*) dan orientasi bangunan. Di satu sisi, massa termal dianggap menguntungkan untuk memodulasi panas, di sisi lain ada yang menganggap tidak. Orientasi selatan atau utara bisa jadi efektif menurunkan suhu udara di dalam ruang di suatu lokasi, tetapi di lokasi lain orientasi barat atau timur yang lebih bermanfaat karena dapat memaksimalkan pergerakan udara.

Banyak usaha dilakukan untuk menilai potensi strategi pendinginan pasif menggunakan bagan bioklimatik dan psikrometri. Meskipun bagan tersebut sangat berguna dalam praktiknya, tetapi masih mengabaikan beberapa variabel iklim yang

memengaruhi perilaku termal bangunan, seperti radiasi matahari dan paparan angin. Selain itu, strategi pendinginan pasif untuk zona iklim tropis yang panas dan lembap seperti Indonesia masih terbatas dalam bagan tersebut.

Potensi penghematan energi pada bangunan gedung seringkali hanya ditentukan berdasarkan hari derajat pendinginan atau *Cooling Degree Day* (CDD). Padahal, berbagai parameter iklim harus dipertimbangkan dalam evaluasi potensi strategi desain pasif. Penerapan strategi pendinginan pasif memerlukan pertimbangan kondisi iklim setempat di antaranya iklim umum, iklim meso, dan iklim mikro.

Kajian pengembangan zonasi iklim yang komprehensif untuk mengevaluasi potensi pendinginan pasif masih terbatas. Bab ini fokus pada pengembangan zona iklim di Indonesia untuk potensi pendinginan pasif serta evaluasi metode potensi pendinginan pasif di setiap zona iklim. Formula potensi pendinginan klimatik atau *Climatic Cooling Potential* (CCP) digunakan untuk mengevaluasi pendekatan pendinginan pasif seperti kenyamanan ventilasi, ventilasi malam, dan pendinginan evaporatif. Peta zonasi iklim yang mungkin dapat digunakan untuk beberapa sistem pendingin pasif diusulkan, agar dapat menjadi bahan peraturan bangunan gedung berkelanjutan di masa depan.



Gambar 3.1 Peta lokasi 106 titik stasiun klimatologi yang digunakan beserta ketinggiannya.

3.2 Metodologi

3.2.1 Data Iklim

Pengembangan zona iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia mempertimbangkan data historis per jam dari delapan faktor iklim luar ruangan, termasuk suhu udara (T), kecepatan angin (WS), kelembapan udara (RH), tekanan atmosfer (Pres), total tutupan awan (CC), dan rasio pencampuran (MixR). Data tersebut diperoleh dari stasiun meteorologi Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dari Januari 2014 hingga Desember 2020 (Gambar 3.1). Data radiasi horisontal global (GHI) dan presipitasi (Pr) diekstraksi dari data analisis ulang ERA5 pada semua koordinat lokasi stasiun. Model ETOPO1 dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) diambil dan digunakan sebagai data ketinggian permukaan bumi. Pemilihan faktor-faktor ini memastikan bahwa kelompok-kelompok dengan kondisi iklim yang sama dapat diidentifikasi dengan mempertimbangkan variasi spasial dan temporal (diurnal dan musiman) dalam kondisi iklim dan ketinggian lokal.

Data iklim yang dikumpulkan kemudian diperiksa kualitasnya dengan menyelidiki periode yang tersedia, persentase data yang hilang, dan tren historis. Dalam proses ini, stasiun klimatologi dengan lebih dari 30% nilai yang hilang tidak dimasukkan dalam analisis lebih lanjut. Setelah pemeriksaan kualitas data, terdapat 106 titik stasiun yang digunakan dalam proses analisis lebih lanjut. Waktu pengamatan dalam format *Universal Time Coordinated* (UTC) diubah menjadi format waktu lokal atau local time (LT) menurut tiga zona waktu Indonesia yaitu, Waktu Indonesia Barat (WIB), Waktu Indonesia Tengah (WITA), dan Waktu Indonesia Timur (WIT).

3.2.2 Proses Analisis

Sebagaimana digambarkan dalam Gambar 3.2, data per jam yang diperoleh pada semua faktor iklim distandarisasi dan dikorelasikan untuk menentukan hubungan di antara semua faktor iklim. Analisis peta panas (*heatmap*) yang berisi informasi diurnal dan musiman (24 jam x 12 bulan) dilakukan berdasarkan nilai rata-rata per jam dan bulanan untuk memvisualisasikan variasi temporal faktor suhu udara dan kecepatan angin di masing-masing zona.

Selanjutnya, analisis kluster dilakukan dengan mengombinasikan suhu udara dan kecepatan angin untuk mengevaluasi potensi kenyamanan ventilasi. Dalam evaluasi tersebut, suhu udara ruang di atas 29°C dianggap tidak nyaman dan total jam potensial untuk kenyamanan ventilasi ditentukan berdasarkan kombinasi suhu udara di bawah 29°C dan kecepatan angin di atas 1,8 m/s. Selain itu, analisis kluster untuk kombinasi kelembapan udara dan kecepatan angin dilakukan untuk menilai potensi pendinginan evaporatif. Potensi pendinginan evaporatif ditentukan berdasarkan kombinasi kelembapan udara di bawah 70% dan kecepatan angin di atas 1,8 m/s. Ambang batas untuk kelembapan udara sesuai persyaratan standar kenyamanan termal di Indonesia sesuai SNI 6390-2020.

PCA dilakukan untuk mengurangi dimensi data yang terdiri dari berbagai kombinasi dari delapan faktor iklim. Hasil analisis kluster dipetakan secara spasial melalui metode interpolasi spasial menggunakan bobot jarak terbalik yang dimodifikasi dengan *overlay* data topografi. Saat mengembangkan zona iklim terpadu, hari derajat pendinginan (CDD) dan beban pendinginan (*cooling load*) dari jumlah total data pengamatan per jam dihitung. Potensi pendinginan pasif (ventilasi malam, kenyamanan ventilasi, dan pendinginan evaporatif) dinyatakan dalam persentas di setiap zona iklim terpadu.

PCA digunakan untuk mengidentifikasi fitur dominan dan sejumlah kecil faktor yang menyumbang sebagian besar dari total varian dalam faktor asli, dengan cara mengekstraksi faktor penting, mengukur frekuensi, menentukan jenis sirkulasi, dan menentukan periode faktor iklim dominan. Data input yang diterapkan dalam PCA adalah deret waktu rata-rata per jam dari delapan faktor iklim yang diperoleh dari 106 stasiun, sehingga menghasilkan informasi tentang kombinasi siklus harian dan musiman.

Kemudian, delapan faktor iklim distandarisasi dengan nilai rata-rata 0 dan standar deviasi 1 untuk mengonfirmasi bahwa semua faktor mencapai bobot yang sama. Berat komponen utama menggambarkan ukuran korelasi antara faktor-faktor dan komponen utama. Komponen utama terbesar pertama berorientasi

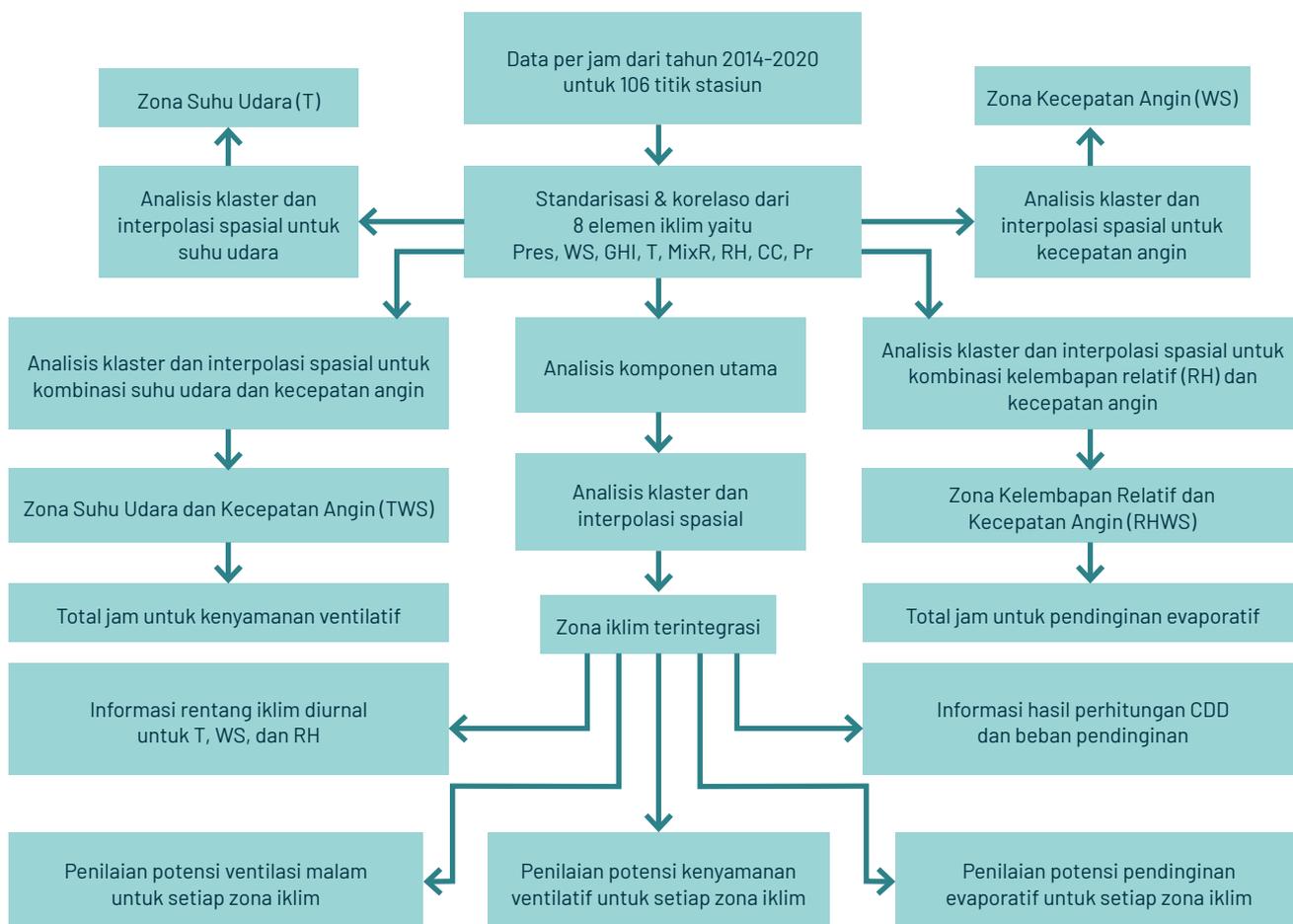
Analisis kluster mengklasifikasikan sekumpulan objek ke dalam kelompok berdasarkan ukuran kesamaan tertentu. Teknik ini digunakan untuk mendapatkan zona iklim homogen berdasarkan faktor iklim yang diamati. Algoritma Ward dilakukan dalam pada komponen yang dipertahankan dari skor PCA sebelumnya. Kluster diperoleh dengan memilih area dengan varian internal serendah mungkin. Pengelompokan aglomerasi hierarkis bergantung pada metode Ward, yang menggabungkan pasangan kluster dengan nilai jarak *intercluster Euclidean* terkecil.

Jumlah kluster awal diperoleh dari dendrogram. Dendrogram menunjukkan bagaimana kluster digabungkan pada setiap langkah prosedur sampai semua objek terkandung dalam satu kluster. Pada tahap awal setiap obyek digambarkan sebagai kluster terpisah. Ukuran yang digunakan dalam metode Ward adalah galat jumlah kuadrat (*sum square error*) dari setiap rata-rata kluster yang diamati.

Algoritma Ward mengklasifikasikan 106 lokasi menjadi beberapa zona iklim berdasarkan homogenitas karakteristik iklim. Hasil zonasi dari semua faktor iklim selanjutnya dipetakan secara spasial menggunakan metode *inverse distance-weighted* yang dimodifikasi dan dilapisi dengan data topografi untuk semua output analisis kluster untuk menentukan karakteristik iklim yang lebih detail.

3.2.3 Hari derajat pendinginan (CDD) dan beban pendinginan

Hari derajat pendinginan secara rutin digunakan oleh perancang dan insinyur untuk memperkirakan konsumsi energi dalam ruangan yang terkait dengan pendinginan. CDD adalah indikator iklim yang penting untuk memperkirakan beban pendinginan yang bergantung pada iklim di setiap bangunan gedung. CCD adalah metode sederhana yang menunjukkan konsumsi energi pendinginan atau pemanasan.



Gambar 3.2 Alur pengembangan zona iklim untuk pendinginan pasif di Indonesia

Hari derajat pendinginan (CDD) didefinisikan sebagai penjumlahan bulanan atau tahunan dari perbedaan antara suhu udara dasar dalam ruang (T_b) dan rata-rata harian suhu udara luar ruangan (T_o), ketika T_o lebih besar dari T_b . Dalam penilaian potensi pendinginan pasif, nilai T_b ditetapkan pada 24°C, 25°C, 26°C, dan 27°C sebagai dasar suhu nyaman termal. CDD dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$CDD = (1 \text{ day}) \sum_{\text{days}} (T_o - T_b)^+$$

tanda + menunjukkan nilai positif dari akumulasi lebih banyak dari n hari selama periode yang dipilih (misalnya, bulan, musim, atau tahun) sementara T_o dan T_b masing-masing adalah rata-rata harian udara luar dan suhu udara dasar dalam ruang. Hari derajat umumnya direpresentasikan sebagai hari °C.

Persentase beban pendinginan dihitung ketika suhu udara luar mencapai nilai yang sama dengan suhu udara di dalam ruang berdasarkan jumlah total pengamatan suhu udara per jam. Batas suhu udara dalam ruang untuk perhitungan CDD dan beban pendinginan diasumsikan konstan, meskipun dalam kondisi aktual dapat berfluktuasi.

3. 2. 4 Potensi pendinginan klimatik (CCP)

Potensi pendinginan pasif dihitung₊ dengan menggunakan formula potensi pendinginan klimatik (CCP). Potensi pendinginan dihitung selama periode N (jumlah malam atau hari selama 7 tahun) dan kemudian dirata-ratakan menjadi potensi harian dalam satu tahun. CCP untuk ventilasi malam didefinisikan sebagai penjumlahan dari perbedaan antara suhu udara dalam ruang dan suhu udara luar, dengan syarat suhu udara luar lebih rendah dari suhu udara dalam ruang. Potensi ventilasi malam menganggap bahwa semakin besar perbedaan antara suhu udara minimum luar ruangan dengan suhu udara dalam ruang, semakin besar kapasitas pendinginan yang disimpan oleh struktur bangunan.

Jam pendinginan dihitung berdasarkan nilai suhu udara dengan mengatur suhu udara dasar dalam ruang (T_b) yang menunjukkan kisaran suhu udara yang direkomendasikan untuk kenyamanan termal. Besarnya potensi pendinginan pasif

ventilasi malam dihitung selama 12 jam. Semakin besar perbedaan suhu udara di bawah T_b , semakin tinggi potensi ventilasi malam. CCP untuk ventilasi malam dihitung menggunakan persamaan:

$$CCP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=h_i}^{h_f} m_{n,h} (T_o - T_b)$$

h adalah waktu dalam sehari {0..., 24 jam}, h_i dan h_f mewakili waktu mulai dan berakhirnya ventilasi malam. Ventilasi malam diasumsikan dimulai pada $h_i = 19,00$ LT dan berakhir pada $h_f = 06,00$ LT. Untuk perhitungan CCP kenyamanan ventilasi, variabel T_o dan T_b dalam persamaan diganti dengan variabel WS_o dan WS_b , sementara untuk CCP pendinginan evaporatif, diubah dengan variabel RH_o dan RH_b .

CCP untuk kenyamanan ventilasi didefinisikan sebagai penjumlahan dari perbedaan antara kecepatan angin dalam ruang dan luar. Potensi ini dihitung berdasarkan jumlah jam pendinginan dengan mempertimbangkan kecepatan angin sepanjang hari dengan nilai kecepatan angin dalam ruang dasar (WS_b) menjadi 1,8 m/s, 2 m/s, dan 2,2 m/s selama 24 jam. Kecepatan angin pada daerah tropis umumnya relatif rendah sehingga kecepatan angin ekstrem yang bernilai di atas 10 m/s tidak dipertimbangkan. Semakin besar perbedaan kecepatan angin luar ruangan dibandingkan dengan nilai WS_b , maka semakin tinggi potensi dan durasi kenyamanan ventilasi.

CCP untuk pendinginan evaporatif didefinisikan sebagai penjumlahan dari perbedaan antara kelembapan udara dalam ruang dan ruang luar. Potensi pendinginan evaporatif ditentukan berdasarkan jumlah jam total pendinginan dengan mempertimbangkan kelembapan udara sepanjang hari dengan nilai kelembapan relatif dasar dalam ruangan (RH_b) menjadi 60%, 65%, dan 70% selama 24 jam. Kelembapan udara pada daerah tropis umumnya relatif tinggi dan jarang turun di bawah 40%. Semakin besar perbedaan kelembapan udara luar ruangan dibandingkan dengan RH_b , maka semakin tinggi potensi dan durasi pendinginan evaporatif.

3.3 Hubungan Antar-Faktor Iklim

Berdasarkan matriks korelasi, kecepatan angin, radiasi horisontal global, suhu udara, dan rasio

pencampuran menunjukkan hubungan positif dengan nilai korelasi di atas 0,65 (Gambar 3.3). Dengan demikian, suhu udara, rasio pencampuran, dan kecepatan angin meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas radiasi horisontal global.

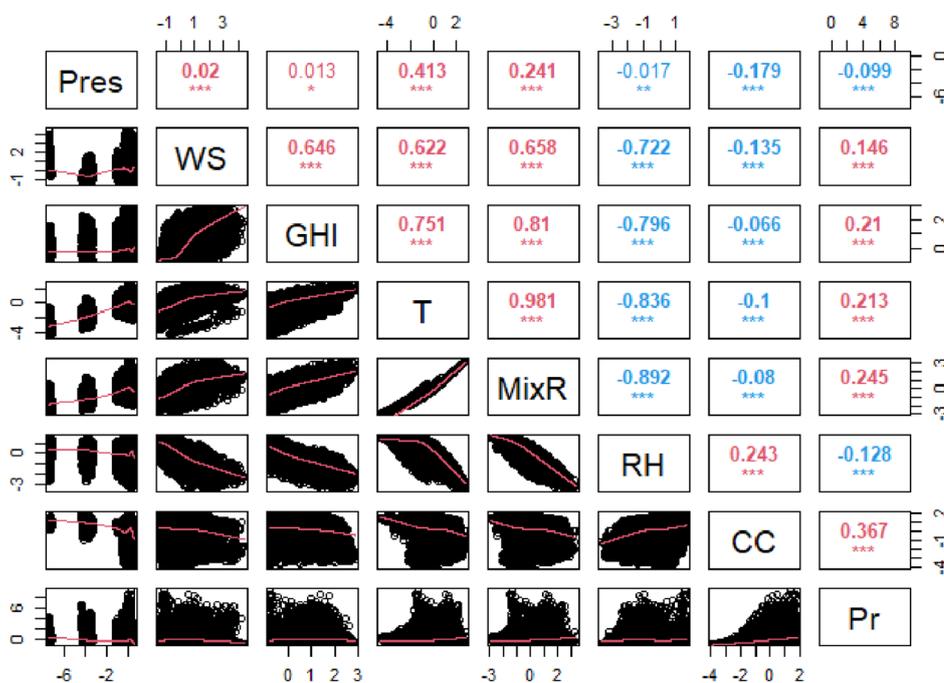
Meningkatnya intensitas radiasi horisontal global akan meningkatkan suhu udara di siang hari. Ketika suhu udara di dataran meningkat, akan terjadi sirkulasi udara yang diikuti dengan intensifikasi kecepatan angin.

Kelembapan udara memiliki korelasi terbalik dengan kecepatan angin, radiasi horisontal global, suhu udara, dan rasio pencampuran. Hubungan ini ditunjukkan oleh korelasi negatif bernilai 0,8 yang menunjukkan bahwa kelembapan udara menurun ketika radiasi horisontal global meningkat. Tekanan atmosfer, tutupan awan total, dan curah hujan memiliki nilai korelasi terendah dengan faktor-faktor lain. Korelasi antara tekanan atmosfer dan suhu udara bernilai positif sebesar 0,41 dikarenakan daerah tropis memiliki variasi

diurnal rendah pada tekanan atmosfer dan suhu udara.

Korelasi antara tutupan awan dan curah hujan mencapai 0,37. Tutupan awan total yang tinggi berkaitan dengan peningkatan potensi hujan. Namun, pengamatan tutupan awan total meliputi cakupan tipe awan rendah, sedang, dan tinggi. Hujan lebih mungkin terjadi pada jenis awan rendah, seperti awan konvektif dangkal dan stratiform. Ini menjelaskan nilai korelasi yang relatif rendah antara total tutupan awan dan curah hujan.

Tutupan awan total yang tinggi umumnya menghasilkan penurunan intensitas radiasi horisontal global. Kondisi ini ditunjukkan dengan nilai korelasi negatif, meskipun nilai korelasinya sangat kecil. Faktor iklim lainnya dengan korelasi rendah adalah antara curah hujan dengan tekanan atmosfer, tutupan awan dengan suhu udara, radiasi horisontal global dengan tekanan atmosfer, dan kelembapan relatif dengan tekanan atmosfer dengan nilai di bawah 0,1. Korelasi ini



Gambar 3.3 Plot sebar atau scatter plot dari matriks korelasi antar faktor iklim

tercermin dari distribusi yang tidak teratur pada plot sebar atau scatter plots.

Dengan menggunakan PCA, pengelompokan berdasarkan delapan unsur iklim cukup menggunakan empat komponen utama atau *principal component* (PC), yaitu PC1 hingga PC4, yang secara signifikan menyumbang sekitar 91% dari total varian dalam data. Faktor utama lainnya tidak digunakan karena memiliki kemampuan yang cukup rendah untuk menjelaskan variasi total, atau lebih rendah dari kontribusi masing-masing variabel terhadap varian total.

Empat variabel berpengaruh signifikan terhadap variabel baru. Keempat variabel tersebut dirumuskan dalam tiga faktor utama yang memiliki korelasi erat dengan variabel yang dianalisis dan dianggap mencerminkan fenomena yang berkaitan dengan karakteristik iklim.

Hasil PC1 mewakili sekitar 53% keragaman data dengan variabel karakteristik utama, yaitu rasio pencampuran (nilai *factor loadings* 0,47), suhu udara (0,46), dan kelembapan udara (-0,45) (Tabel 3.1). Namun variabel kelembapan udara memiliki korelasi negatif, sehingga peningkatan suhu udara dapat menurunkan kelembapan udara. Beberapa faktor dapat memengaruhi suhu udara, antara lain durasi dan intensitas radiasi matahari. Semakin tinggi intensitas radiasi, suhu udara semakin tinggi.

PC2 mewakili sekitar 18% dari keragaman data. Variabel karakteristik adalah tutupan awan (-0,65) dan curah hujan (-0,62). Hal ini mencerminkan adanya hubungan searah, yaitu ketika tutupan awan rendah, curah hujan yang dihasilkan lebih sedikit. PC3 mewakili sekitar 13% dari keragaman data, dengan variabel karakteristik berupa tekanan atmosfer (-0,80). PC4 mewakili sekitar 7% dari keragaman data di mana variabel karakteristik adalah presipitasi (0,72).

3.4 Analisis Suhu Udara dan Kecepatan Angin

Algoritma pengelompokan yang diterapkan pada faktor suhu udara menghasilkan empat zona. Suhu udara di wilayah Indonesia sedikit bervariasi sehubungan dengan adanya siklus musim dan siklus diurnal di zona T1, T2, T3, dan T4 (Gambar 3.4). Hal ini tidak mengherankan karena Indonesia adalah negara kepulauan yang dikelilingi lautan dan terletak di daerah tropis. Perubahan suhu udara diurnal dapat diabaikan karena moderasi termal sepanjang hari akibat massa air laut yang besar.

Dari peta panas kita dapat mengetahui bahwa Indonesia mengalami suhu udara tinggi sepanjang tahun dengan siklus diurnal dan siklus musiman, dengan rentang antara 23,3°C sampai 31,6°C di daerah datar dengan topografi rendah (Tabel 3.2), kecuali zona T2 yang terletak di dataran

Tabel 3.1 Beban komponen utama yang dirotasi dan komunalitas (rotasi *varimax*)

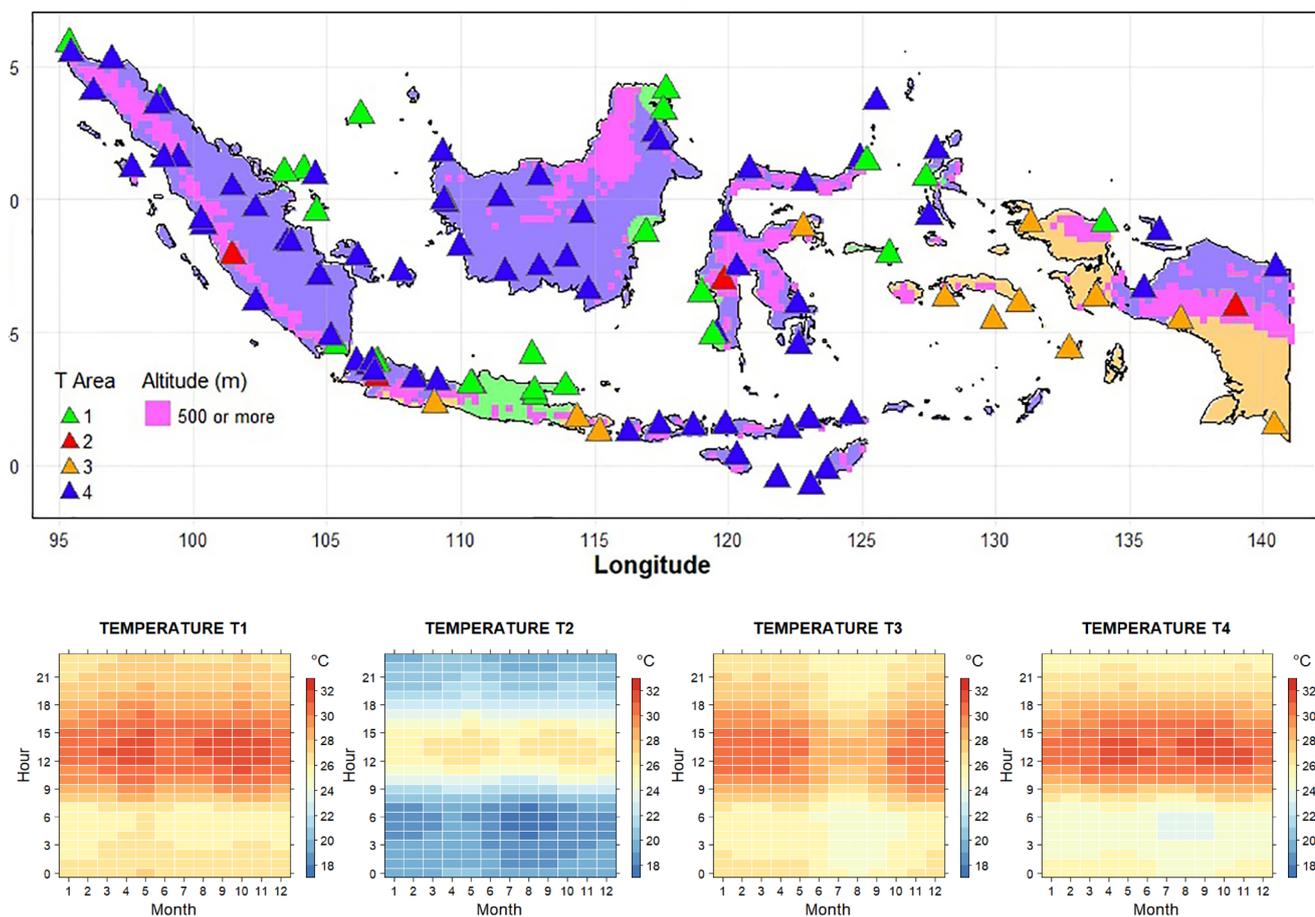
Variabel Iklim	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Tutupan Awan (CC)	-0.08	-0.65	-0.29	-0.67	0.10	-0.06	0.15	0.00
Suhu udara (T)	0.46	0.05	-0.25	-0.08	-0.15	-0.24	-0.36	0.71
Kecepatan Angin (WS)	0.38	-0.02	0.24	-0.02	0.89	0.03	-0.09	-0.01
Kelembapan relatif (RH)	-0.45	-0.04	-0.22	0.01	0.16	0.35	-0.77	-0.01
Tekanan atmosfer (Pr)	0.10	0.41	-0.80	0.01	0.21	0.19	0.28	-0.13
Radiasi Matahari (GHI)	0.43	-0.10	0.15	-0.13	-0.25	0.84	0.04	0.03
Curah hujan (Pres)	0.12	-0.62	-0.26	0.72	0.03	0.03	0.06	0.00
Rasio Pencampuran (MixR)	0.47	-0.02	-0.11	-0.08	-0.22	-0.26	-0.40	-0.69

tinggi. Zona T2 yang meliputi wilayah Kerinci, Jambi; Citeko, Jawa Barat; Tana Toraja, Sulawesi Selatan; dan Wamena, Papua menunjukkan suhu udara yang relatif rendah.

Variabilitas temperatur harian dan musiman mengikuti pergerakan semu matahari dan memengaruhi intensitas radiasi horisontal global. Suhu udara tertinggi dalam siklus musiman terjadi pada bulan Maret-April dan September-Oktober dalam kondisi ekuinoks (matahari terletak di atas khatulistiwa). Faktor regional, yaitu monsun tenggara yang menguapkan massa udara dari Australia ke Indonesia berdampak pada variabilitas suhu udara di zona T4. Zona tersebut

mencakup hampir seluruh wilayah Indonesia yaitu Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Kepulauan Nusa Tenggara, dan Papua Utara. Di wilayah tersebut, suhu udara menurun pada sore hari dari bulan Juni hingga September (JJAS).

Di zona T3 yang terletak di selatan Pulau Jawa dan selatan Pulau Papua, siklus suhu udara musiman mengalami penurunan pada siang dan malam hari dari bulan Juni hingga September (JJAS). Pola tersebut dipengaruhi oleh monsun tenggara dan temperatur permukaan laut yang menurun selama waktu JJAS di selatan Pulau Jawa dan Laut Arafura.



Gambar 3.4 Zona suhu udara (T) dan peta panas masing-masing zona

Tabel 3.2 Rata-rata rentang suhu udara diurnal dan musiman untuk setiap zona suhu udara (T)

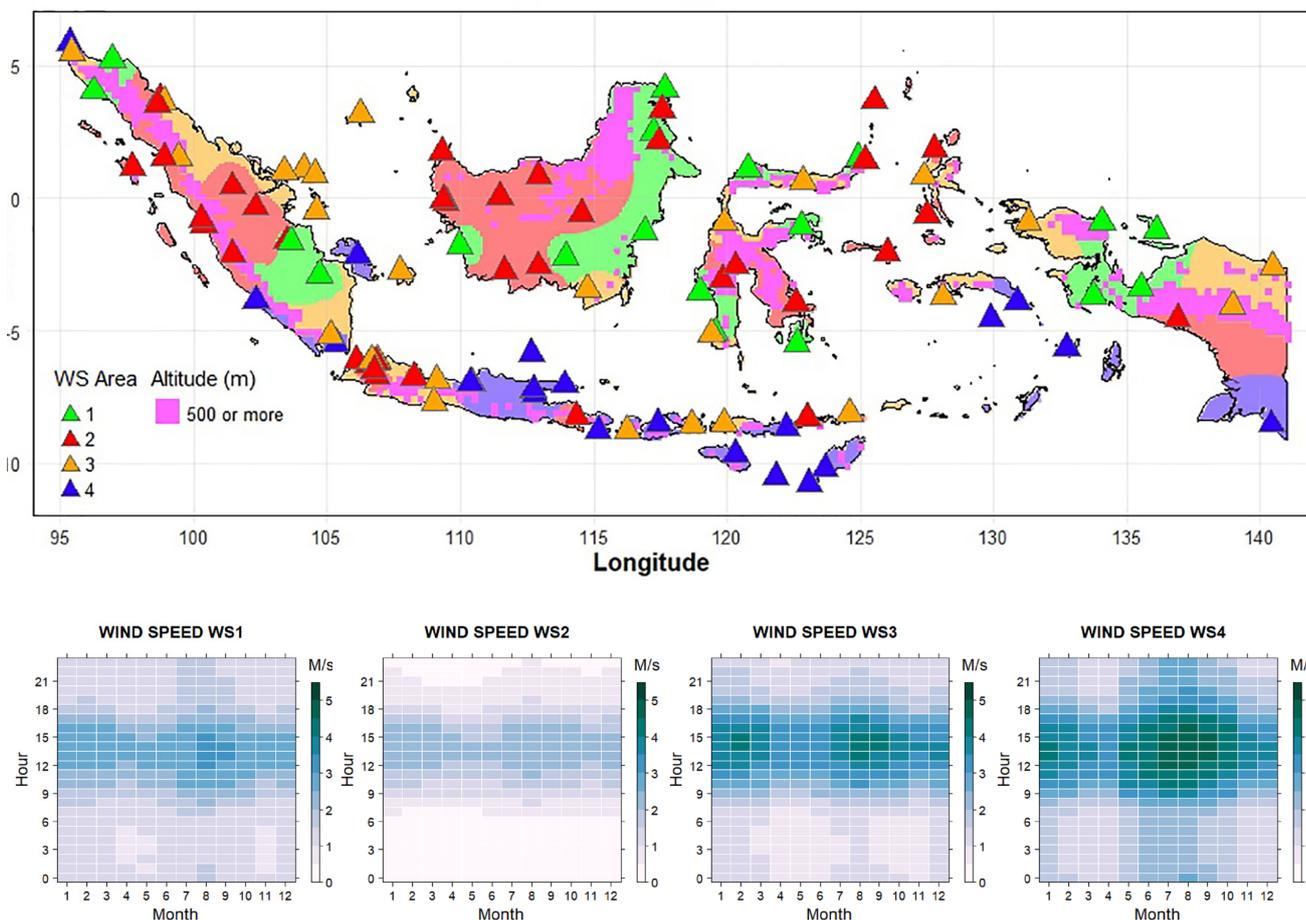
Zona T	Suhu udara (°C)			
	Minimum	Maksimum	Nilai Tengah	Rata-rata
1	23,3	31,6	27,7	28,1
2	17,6	27,0	20,8	21,6
3	24,2	30,9	26,8	27,2
4	23,5	31,5	26,6	27,2

Sementara itu, di zona T1 yang meliputi Jawa Timur hingga Pulau Bawean, Kepulauan Riau, pesisir barat Sulawesi Selatan, pesisir timur Kalimantan Timur, dan Kepulauan Maluku Utara, suhu udara relatif tetap tinggi sepanjang tahun dan tidak menunjukkan siklus musiman yang jelas. Hal ini disebabkan oleh topografi rendah dan efek skala lokal dari kondisi laut.

Berdasarkan algoritma pengelompokan faktor kecepatan angin (WS), pola kecepatan angin di Indonesia secara umum memiliki siklus diurnal yang jelas di empat zona WS. Sebagai negara kepulauan, angin darat-laut skala mikro dan angin lembah memengaruhi siklus diurnal di hampir

seluruh wilayah Indonesia, yang ditandai dengan peningkatan kecepatan angin pada siang hari dan penurunan pada malam hari (Gambar 3.5).

Kecepatan angin menunjukkan siklus diurnal, musiman, tahunan, dan antar-tahunan yang berhubungan dengan indeks iklim global, seperti indeks osilasi selatan dan Dipole Samudra Hindia. Siklus musiman kecepatan angin di Indonesia didominasi oleh sirkulasi regional yang dipengaruhi oleh pergerakan semu matahari. Selama bulan Juni hingga September (JJAS), matahari bergerak menuju belahan bumi utara, dan membentuk daerah pusat tekanan atmosfer rendah di utara dan daerah tekanan atmosfer tinggi di selatan



Gambar 3.5 Zona kecepatan angin (WS) dan peta panas masing-masing zona.

Tabel 3.3 Rata-rata rentang kecepatan angin diurnal dan musiman untuk setiap zona kecepatan angin (WS)

Zona WS	Kecepatan angin (m/s)			
	Minimum	Maksimum	Nilai Tengah	Rata-rata
1	3,2	0,9	1,4	1,7
2	2,4	0,2	0,7	1,0
3	4,2	0,7	1,6	2,0
4	4,8	1,1	2,3	2,5

Indonesia. Kondisi ini menghasilkan angin selatan yang relatif kuat. Selama bulan Desember hingga Februari (DJF), matahari bermigrasi ke belahan bumi selatan, menghasilkan angin utara yang relatif lebih lemah.

Dari Gambar 3.5, tampak zona WS4 mencakup wilayah Nusa Tenggara, Jawa Timur, Sumatera Selatan, dan Papua Selatan, sedangkan zona WS3 mencakup sebagian Nusa Tenggara, sebagian Jawa, Sulawesi, dan Papua Utara. Zona WS4 dan WS3 mengalami angin yang relatif kuat di siang hari pada bulan JJAS dan DJF. Sebaliknya, Zona WS1 yang meliputi Sumatera Selatan, Aceh, Kalimantan bagian selatan, Sulawesi, dan Papua Utara mengalami angin yang relatif lemah.

Pengaruh angin yang berasal dari utara dan selatan melemah karena zona WS1 sebagian besar terletak di dekat khatulistiwa. Zona WS2 meliputi bagian tengah Sumatera, Kalimantan, Jawa Barat, Sulawesi Tengah, dan Maluku Utara, serta daerah dengan kecepatan angin terendah karena lokasinya sebagian besar terletak di pulau-pulau dekat khatulistiwa. Rata-rata rentang kecepatan angin diurnal dan musiman untuk setiap wilayah disediakan pada Tabel 3.3.

3.5 Zona Iklim Terpadu

Indonesia adalah negara kepulauan yang terletak di sepanjang garis khatulistiwa dan menunjukkan topografi yang bervariasi serta penggunaan lahan yang berbeda. Berbagai fenomena iklim yang kompleks pada skala global, regional, dan lokal mulai dari sirkulasi udara atas dan permukaan hingga interaksi atmosfer dengan lautan, telah membentuk karakteristik iklim yang berbeda di masing-masing daerah. Dalam studi ini, delapan zona iklim terpadu di Indonesia didefinisikan sesuai dengan potensi penerapan strategi desain pasif.

Berdasarkan zona yang terbentuk, tiga faktor geografis (bujur, lintang, dan ketinggian) memengaruhi karakteristik spasial dan temporal zona iklim. Delapan zona iklim terpadu diklasifikasikan dengan mempertimbangkan output PCA, analisis kluster, interpolasi spasial, dan kombinasi delapan faktor iklim (Gambar 3.6). Delapan zona iklim terpadu tersebut adalah zona

iklim khatulistiwa (*equator*), sub-khatulistiwa (*sub-equator*), dataran tinggi (*highland*), pegunungan tinggi (*very highland*), monsun (*monsoon*), sub-monsoon (*sub-monsoon*), sabana (*savanna*), dan sub-sabana (*sub-savanna*). Zonasi ini lebih rinci dibandingkan dengan klasifikasi zona iklim Köppen, yang membagi Indonesia menjadi tiga zona iklim, yaitu iklim khatulistiwa (Af), iklim monsun (Am), dan iklim sabana tropis (Aw).

Zona iklim 1A (khatulistiwa) tersebar di pulau-pulau besar yang terletak di dekat khatulistiwa, di antaranya Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Zona 1A merupakan wilayah hangat dengan tutupan awan tinggi dan kondisi curah hujan tinggi sepanjang tahun. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 1A berkisar antara 22,6–33,1°C, dengan nilai kecepatan angin berkisar antara 0,0–4,8 m/s.

Zona iklim 1B (sub-khatulistiwa) tersebar di pulau-pulau kecil yang terletak di dekat khatulistiwa, meliputi Kepulauan Maluku Utara hingga Maluku Selatan, Kepulauan Bangka Belitung, dan Kepulauan Riau. Perbedaan antara zona 1B dan zona 1A adalah zona 1B dipengaruhi oleh monsun yang berdampak pada siklus musiman suhu udara dan kecepatan angin dengan besaran kecil. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 1B berkisar antara 22,6–32,9°C dan nilai kecepatan angin pada kisaran 0,1–6,7 m/s.

Zona iklim 2A (dataran tinggi) terletak pada ketinggian di atas 700 meter di wilayah Kerinci, Jambi; Citeko, Jawa Barat; dan Tana Toraja, Sulawesi Selatan. Zona ini mengalami iklim dataran tinggi yang ditandai dengan suhu udara rendah, lembap, dan tingkat curah hujan yang tinggi karena efek geografis. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 2A berkisar antara 17,8–29,0°C dan kecepatan angin antara 0,0–3,6 m/s.

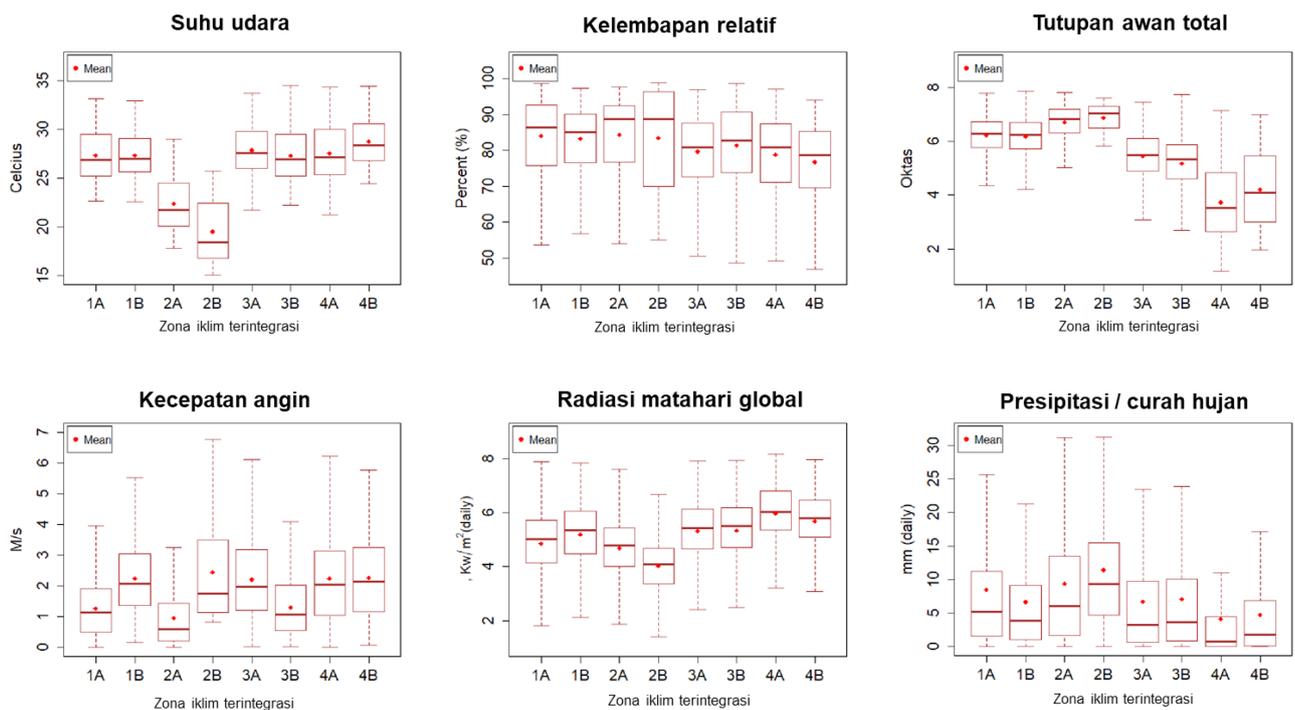
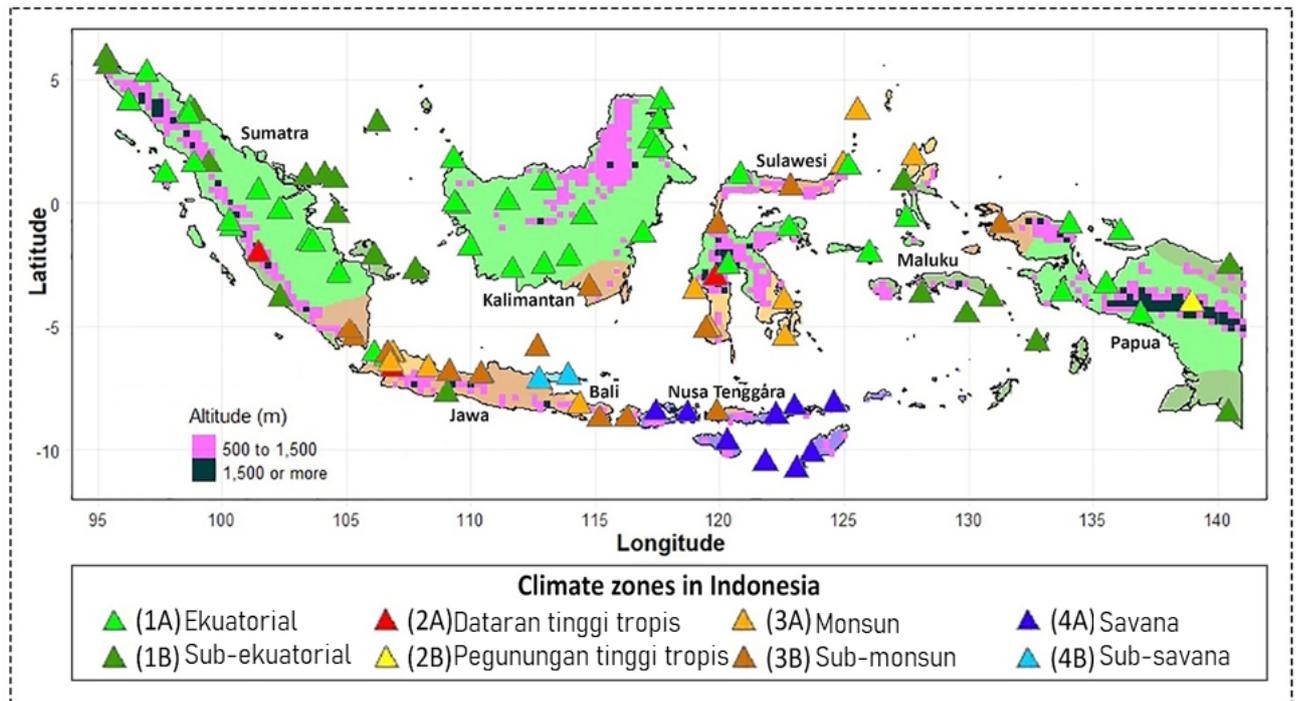
Zona iklim 2B (pegunungan tinggi) ditemukan di Wamena, Papua pada ketinggian 1660 m yang menjadikan daerah ini daerah terdingin, terlembap, paling berangin, dan paling basah dengan tingkat curah hujan tinggi. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 2B berkisar antara 15,1–25,7°C dan nilai kecepatan angin berkisar antara 0,8–6,8 m/s.

Zona iklim 3A (monsun) dan 3B (sub-monsoon)

terjadi di sebagian besar Jawa, Kalimantan Selatan, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Utara. Kedua zona ini menunjukkan siklus musiman yang jelas untuk masing-masing faktor iklim. Musim hujan dengan tutupan awan dan kelembapan udara tinggi selama bulan DJF, serta musim kemarau dengan tutupan awan dan kelembapan udara rendah selama bulan JJAS. Suhu diurnal dan musiman di zona 3A berkisar antara 21,7-33,7°C

dan kecepatan angin antara 0,1-6,3 m/s. Zona 3B berbeda dari zona 3A karena menunjukkan angin yang lebih lemah dan suhu udara musiman yang lebih rendah. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 3B berkisar antara 22,2-34,5°C dan kecepatan angin antara 0.0-4.1 m/s.

Zona iklim 4A(sabana)berada di seluruh kepulauan Nusa Tenggara yang merupakan daerah dengan



Gambar 3.6 Delapan zona iklim terpadu di Indonesia.

musim kemarau panjang, angin kencang, dan intensitas radiasi horisontal global yang tinggi selama bulan JJAS. Zona 4A sebagian besar dipengaruhi oleh monsun tenggara. Suhu udara di daerah ini menurun pada malam hari selama bulan JJAS. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 4A berkisar antara 21,2–34,3°C dan kecepatan angin antara 0,0 - 7 m/s.

Zona iklim 4B (sub-sabana) ditemukan di pulau Madura. Zona 4B memiliki kisaran variabilitas suhu udara yang lebih kecil antara siklus musiman dan harian apabila dibandingkan dengan zona 4A. Suhu udara diurnal dan musiman di zona 4B berkisar antara 24,4–34,4°C dan kecepatan angin antara 0,0–5,8 m/s.

3.6 Pengaruh Suhu Udara dan Kecepatan Angin pada Kenyamanan Ventilasi

Berdasarkan algoritma pengelompokan yang diterapkan pada kombinasi faktor suhu udara dan kecepatan angin untuk membagi zona TWS, terjadi peningkatan suhu udara dan intensifikasi kecepatan angin (Gambar 3.7). Penilaian kenyamanan ventilasi dilakukan berdasarkan kombinasi suhu udara dan kecepatan angin. Dari peta panas, suhu udara pada siang hari (dari 07:00 hingga 18:00 LT) di empat zona TWS masih relatif tinggi (>26°C), di luar batas kenyamanan termal.

Pengecualian terjadi pada zona TWS2 yang meliputi wilayah Kerinci, Jambi; Citeko, Jawa Barat; Tana Toraja, Sulawesi Selatan; dan Wamena, Papua. Pada zona tersebut, suhu udara masih berada pada kisaran nyaman termal karena lokasinya yang berada di ketinggian. Kenyamanan ventilasi sangat efektif diterapkan di zona TWS2 karena suhu udara siang hari relatif rendah dengan kecepatan angin yang relatif tinggi.

Kecepatan angin di zona TWS4 dan TWS3 menunjukkan nilai yang relatif tinggi (>1,8 m/s) dengan cakupan wilayah Nusa Tenggara, Jawa, Kepulauan Bangka Belitung, Batam hingga Natuna, Sulawesi Selatan, Kepulauan Maluku, dan Papua bagian selatan. Wilayah tersebut memiliki potensi penerapan kenyamanan ventilasi untuk menurunkan suhu udara dan menciptakan kenyamanan termal dengan adanya kecepatan angin yang relatif tinggi di siang hari.

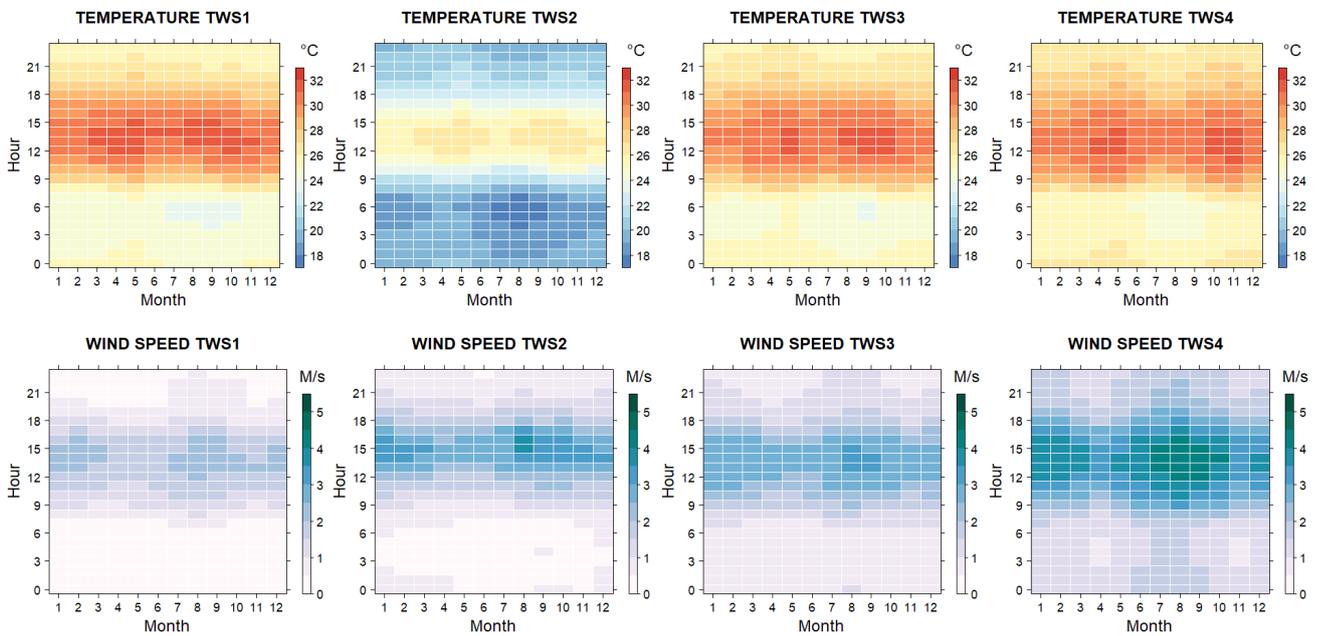
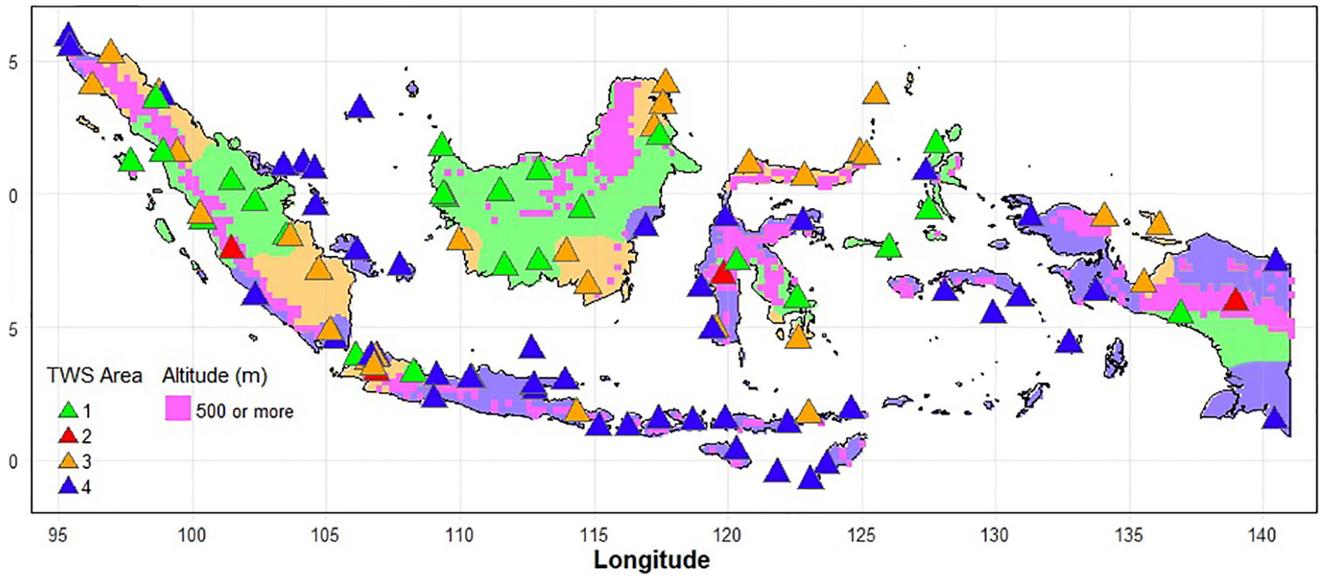
Tabel 3.4 Probabilitas potensi kenyamanan ventilasi berdasarkan kombinasi suhu udara dan kecepatan angin

Zona TWS	Potensi kenyamanan ventilasi (%)		
	Siang hari	Malam hari	Harian
1	7.7	5.8	6.8
2	38.6	12.3	25.5
3	12.0	17.6	14.8
4	15.9	31.1	23.5

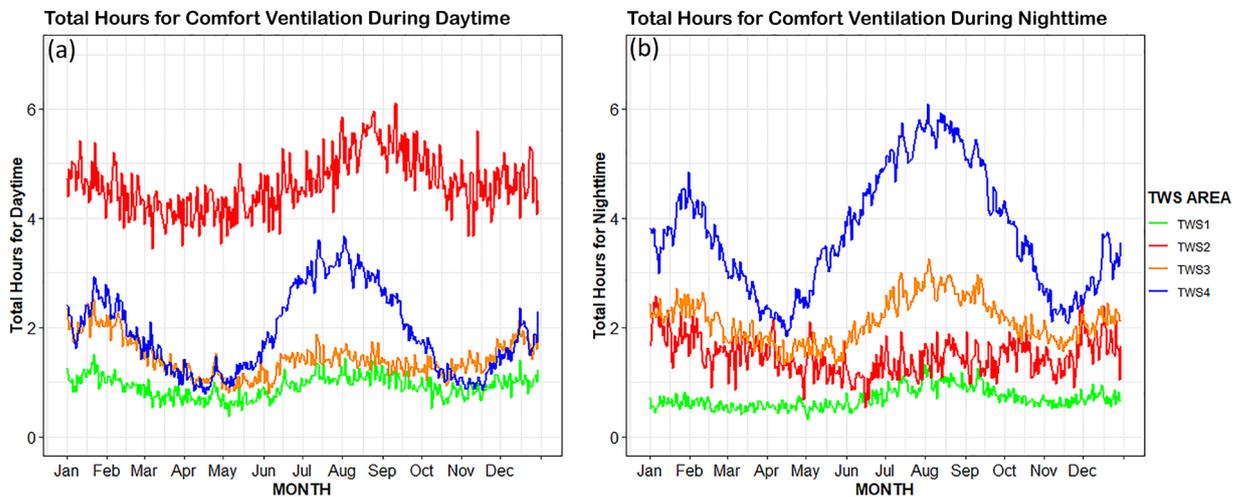
Pada malam hari (19:00–06:00 LT), kecepatan angin di empat zona TWS relatif lemah. Zona TWS4 menunjukkan kecepatan angin yang lebih tinggi dari zona lainnya, yang menunjukkan potensi kenyamanan ventilasi pada malam hari dengan rentang kecepatan angin 1–2 m/s disertai dengan penurunan suhu udara. Zona TWS1 sebagian besar terletak di dekat khatulistiwa yang mencakup pulau Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Maluku, dan Papua dengan suhu udara siang hari yang relatif tinggi dan kecepatan angin yang lemah. Akibatnya, zona TWS1 memiliki potensi yang lebih kecil dalam penerapan kenyamanan ventilasi.

Penilaian kenyamanan termal yang digunakan dalam kenyamanan ventilasi mengadopsi standar kenyamanan termal adaptif untuk bangunan gedung berventilasi alami, yang nilainya tergantung pada suhu udara luar. Batas suhu udara luar ditetapkan di bawah 29°C dan kecepatan angin melebihi 1,8 m/s. Meskipun demikian, kinerja kenyamanan ventilasi tergantung pada distribusi tekanan angin pada bangunan dan jenis serta ukuran bukaan dibandingkan dengan faktor-faktor lainnya. Total jam dapat digunakan untuk menentukan jadwal pengoperasian jendela dan ventilasi untuk optimasi.

Zona TWS1 adalah area dengan potensi kenyamanan ventilasi dengan jumlah jam terkecil, yaitu sekitar 1 jam di siang hari dan kurang dari 1 jam di malam hari (Gambar 3.8). Zona TWS2 memiliki potensi kenyamanan ventilasi yang tinggi, yaitu mencapai 4–6 jam di siang hari dan menurun menjadi 1–2 jam di malam hari. Zona TWS3 memiliki potensi kenyamanan ventilasi sebesar 1–2 jam di siang hari dan 2–3 jam di malam hari. Zona TWS4 memberikan potensi kenyamanan ventilasi dengan siklus musiman yang bervariasi dari 1 jam pada bulan Mei dan November dengan



Gambar 3.7 Zona suhu udara dan kecepatan angin (TWS) dan peta panas masing-masing zona.



Gambar 3.8 Jumlah jam potensi kenyamanan ventilasi untuk (a) siang hari dan (b) malam hari.

puncak di bulan Agustus sebesar 3,5 jam di siang hari. Sebaliknya pada malam hari, potensi kenyamanan ventilasi mencapai 2 jam pada bulan Mei dan November dengan puncak sebesar 6 jam pada bulan Agustus.

Nilai probabilitas dari potensi kenyamanan ventilasi di setiap zona TWS secara rinci dapat dilihat pada Tabel 3.4. Berdasarkan probabilitas kenyamanan ventilasi, zona TWS1 adalah area dengan jumlah total jam dan persentase terendah, sedangkan zona TWS2 adalah area dengan jumlah total jam dan persentase tertinggi mengikuti urutan zona TWS1 < zona TWS3 < zona TWS4 < zona TWS2 pada siang hari dan malam hari di setiap harinya.

3.7 Pengaruh Kelembapan Udara dan Kecepatan Udara pada Pendinginan Evaporatif

Berdasarkan algoritma pengelompokan yang diterapkan pada kombinasi faktor kelembapan udara dan kecepatan angin, variasi diurnal di empat zona RHWS menunjukkan hubungan yang berlawanan antara faktor kelembapan udara dan kecepatan angin, yaitu terjadi penurunan kelembapan udara seiring dengan peningkatan kecepatan angin (Gambar 3.9). Penurunan kelembapan udara terendah terjadi di zona RHWS4 yang meliputi Nusa Tenggara, Jawa Timur, Sumatera Selatan, Sulawesi Selatan, Kepulauan Maluku, dan Papua Timur. Zona RHWS3 yang meliputi Nusa Tenggara, Jawa, dan Sulawesi mencapai kelembapan udara rendah pada siang hari (<70%) pada pukul 08:00-19:00 LT yang memperlihatkan kondisi nyaman berdasarkan kelembapan relatif. Zona RHWS4 dan RHWS3 menjadi area potensial untuk penerapan pendinginan evaporatif pada siang hari karena kelembapan udara yang rendah dan angin yang kencang.

Zona RHWS1 yang meliputi Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Maluku Utara, Papua, dan Jawa Barat memiliki kondisi kelembapan udara yang tinggi (>70%). Zona RHWS1 menunjukkan potensi yang lebih kecil untuk penerapan pendinginan evaporatif di siang hari. Di malam hari kelembapan udara meningkat di semua zona RHWS mencapai

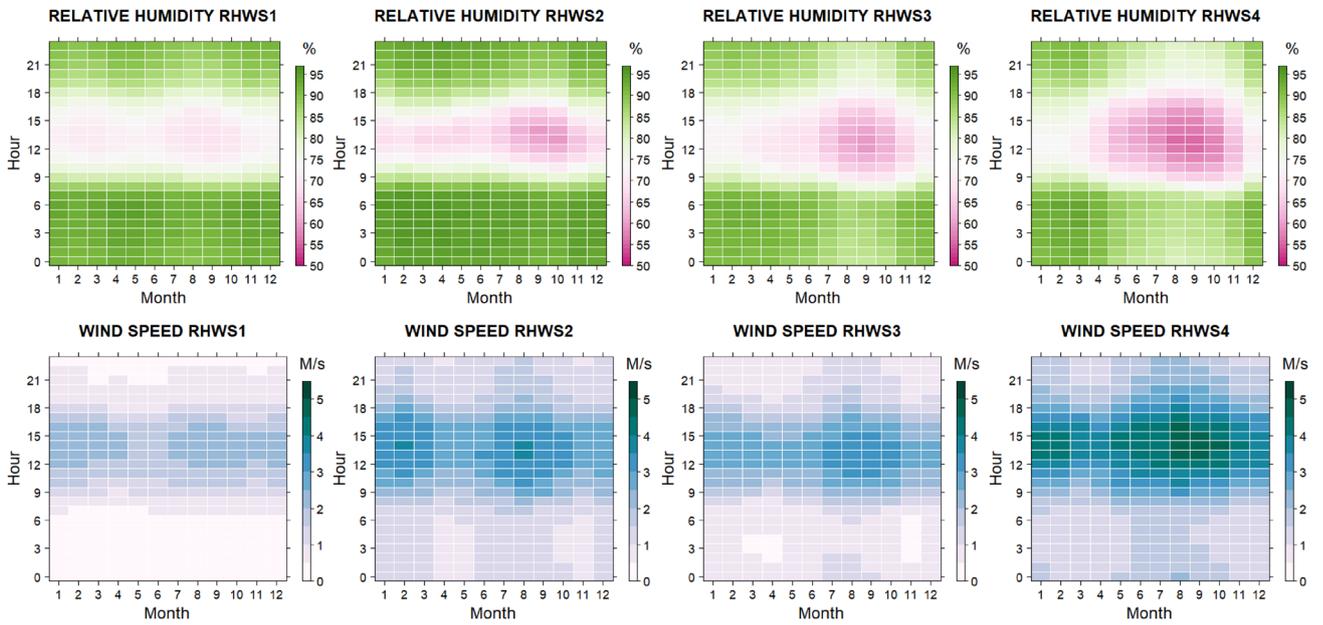
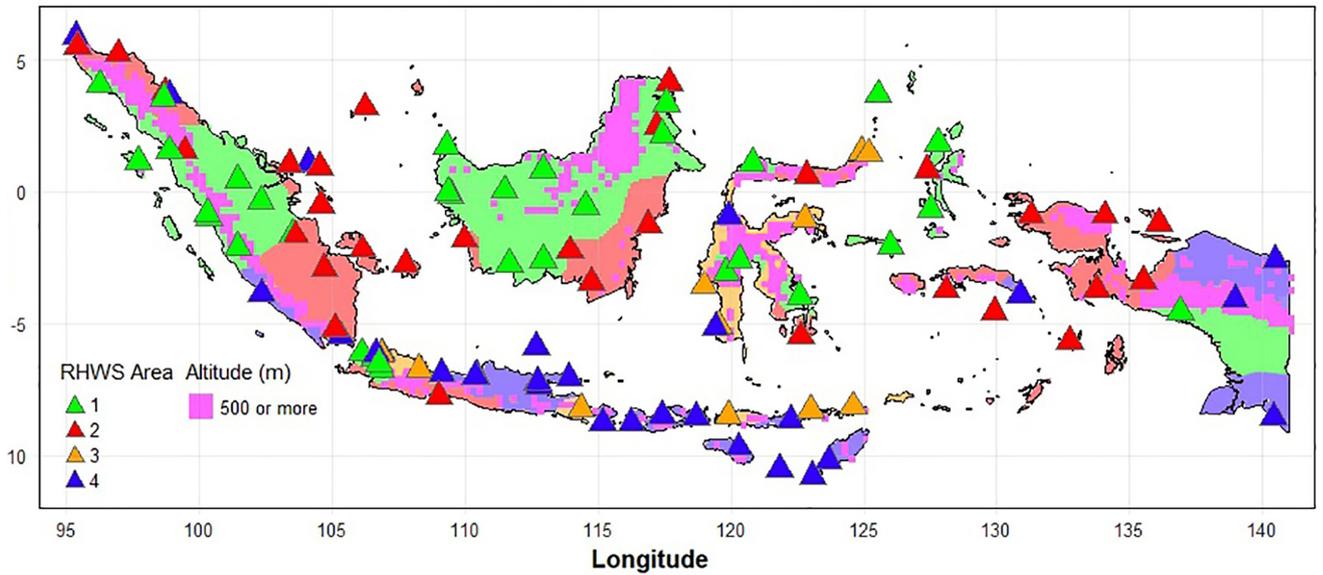
lebih dari 70%, akan tetapi terjadi penurunan di zona RHWS4 dan RHWS3 pada bulan Juni, Agustus, dan September dikarenakan angin yang relatif kuat di malam hari dengan kecepatan hingga 2 m/s.

Kelembapan udara di bawah 70% dan kecepatan angin di atas 1,8 m/s dianggap cukup untuk memberikan efek pendinginan evaporatif di daerah tropis. Zona RHWS1 memiliki jumlah jam terkecil untuk potensi pendinginan evaporatif yaitu antara 2-3 jam di siang hari dan Zona RHWS2 sebesar 2-4 jam. Profil potensi pendinginan evaporatif antara zona RHWS3 dan RHWS4 hampir sama, mulai dari 2-7 jam di siang hari dan bervariasi terhadap musim. Secara musiman, peningkatan potensi pendinginan evaporatif terjadi pada bulan Juli-November dengan puncak pada bulan September dan Oktober di semua zona RHWS (Gambar 3.10).

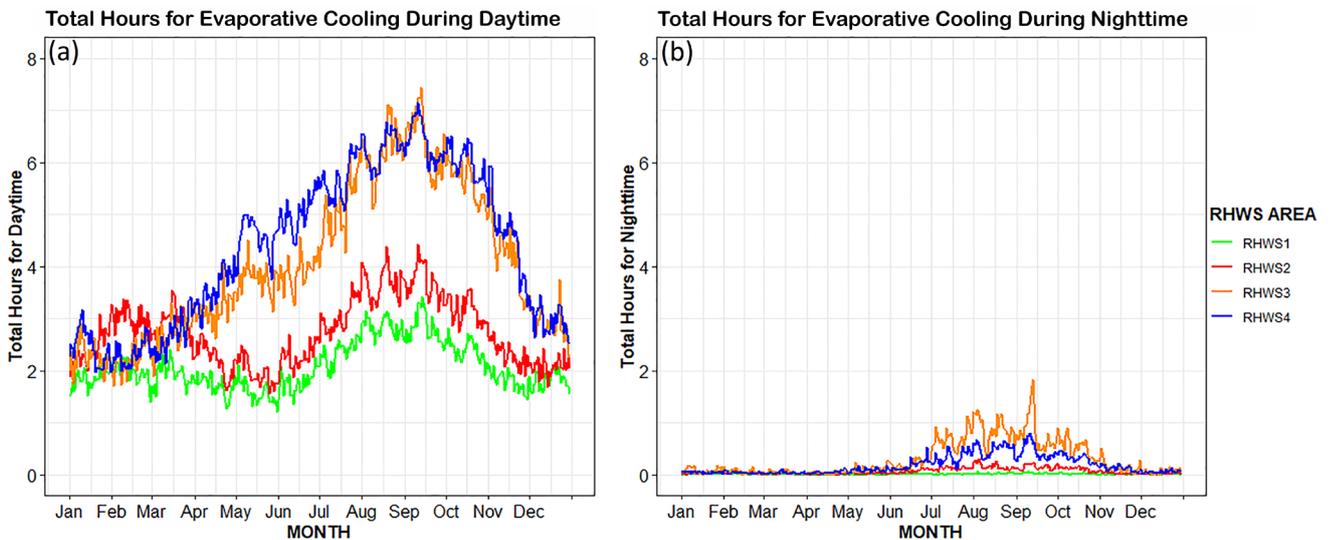
Potensi pendinginan evaporatif sangat rendah di malam hari. Zona RHWS3 memiliki potensi pendinginan evaporatif sekitar 1 jam pada bulan Agustus dan September, sedangkan pada bulan-bulan lain potensi pendinginan evaporatifnya di bawah 1 jam. Selain zona RHWS3, potensi pendinginan evaporatif selalu kurang dari 1 jam di malam hari. Nilai probabilitas dari potensi pendinginan evaporatif untuk setiap zona RHWS secara rinci ditampilkan pada Tabel 3.5. Berdasarkan analisis, potensi pendinginan evaporatif pada siang dan malam menurun secara berurutan dari zona RHWS1 < zona RHWS2 < zona RHWS3 < zona RHWS4.

Tabel 3.5 Probabilitas penerapan pendinginan evaporatif berdasarkan kombinasi kelembapan udara dan kecepatan angin.

Zona RHWS	Potensi pendinginan evaporatif (%)		
	Siang hari	Malam hari	Harian
1	17.3	0.1	8.7
2	22.7	0.6	11.7
3	33.7	2.5	18.1
4	36.4	1.5	19.0



Gambar 3.9 Zona kelembapan udara dan kecepatan angin (RHWS) dan peta panas masing-masing



Gambar 3.10 Jumlah jam potensi pendinginan evaporatif pada (a) siang hari dan (b) malam hari.

3.8 Potensi Pendinginan Pasif untuk Setiap Zona Iklim

Setelah dilakukan klasifikasi zona iklim berdasarkan homogenitas spasial dan temporal nilai iklim, penting untuk mempelajari variasi iklim diurnal dari faktor suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin untuk menentukan batas atas dan batas bawah pada metode pendinginan pasif. Rentang faktor iklim diurnal di Indonesia berbeda-beda di setiap zona iklim, namun beberapa menunjukkan siklus musim yang jelas.

Zona iklim dataran tinggi tropis menunjukkan variasi besar dalam rentang diurnal, yaitu suhu udara mulai dari 9-12°C, kelembapan relatif mulai dari 40-50%, dan kecepatan angin mulai dari 5 m/s hingga 11 m/s. Zona iklim sub-khatulistiwa menunjukkan kisaran suhu udara diurnal yang lebih sempit, sekitar 6-7°C dan kelembapan udara antara 25-30%. Zona iklim dataran tinggi memiliki kisaran kecepatan angin diurnal terkecil dengan nilai rata-rata sekitar 3 m/s. Kisaran suhu udara dan kelembapan udara diurnal meningkat pada bulan Agustus, September, dan Oktober pada zona iklim sub-monsun, monsun, sabana dan sub-sabana. Kecepatan angin diurnal meningkat pada Januari-Februari dan pada September-November di semua zona iklim dengan nilai yang bervariasi. Pola suhu udara diurnal, kelembapan udara, dan kecepatan angin di setiap zona iklim ditunjukkan pada Gambar 3.11.

Setelah mengidentifikasi kisaran diurnal suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin, selanjutnya dilakukan analisis beban pendinginan (CDD/tahun). Perhitungan CDD dengan nilai dasar suhu udara yang berbeda memperlihatkan bahwa nilai CDD tertinggi sebesar 24°C pada tingkat CDD 25-27°C dalam zona iklim yang sama. Zona iklim dataran tinggi dan pegunungan tinggi memiliki nilai CDD 0/tahun pada nilai dasar suhu udara antara 24-27°C.

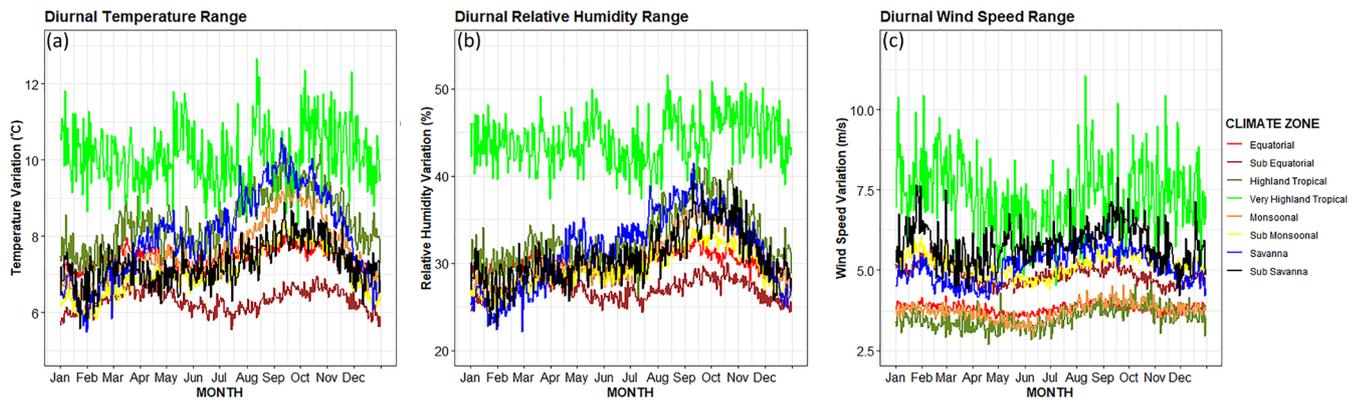
Peningkatan nilai CDD diikuti dengan kenaikan beban pendinginan, dan begitu pun sebaliknya. Nilai CDD terbesar 24°C dicapai pada zona iklim sub-sabana, yaitu 1739,5/tahun dengan beban pendinginan sebesar 98,8% ketika suhu udara di atas 24°C. Sebaliknya, nilai CDD terkecil 27°C

diamati di zona iklim dataran tinggi pada 0/tahun dengan beban pendinginan 1,6% ketika suhu udara melebihi 27°C. Persentase nilai CDD dan beban pendinginan untuk setiap zona iklim dirangkum secara rinci pada Tabel 3.6.

Strategi desain pasif dipilih berdasarkan karakteristik zona iklim untuk mencapai kenyamanan termal dalam ruangan (Gambar 3.12). Potensi ventilasi malam ditentukan berdasarkan perbedaan antara suhu udara luar dan suhu struktur bangunan pada malam hari untuk pendinginan massa bangunan (Gambar 3.13-1). Dalam perhitungan potensi ventilasi malam, tiga nilai T_b (26°C, 27°C, dan 28°C) berdasarkan kisaran suhu udara nyaman dengan asumsi suhu udara dalam ruang konstan dengan massa bangunan tak terbatas.

Pola potensi ventilasi malam tetap relatif sama untuk ketiga basis sesuai dengan siklus musiman di setiap zona, tetapi terdapat perbedaan antara T_b dan suhu udara luar. Perhitungan untuk potensi ventilasi malam menggunakan T_b 28°C menghasilkan kapasitas penyimpanan pendinginan yang lebih besar dibandingkan dengan nilai T_b 27°C dan 26°C. Temuan ini dikaitkan dengan peningkatan selisih antara suhu udara minimum luar ruang dan suhu udara dalam ruang yang dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan pendinginan struktur bangunan. Pendinginan yang disimpan oleh bangunan pada malam hari akan digunakan untuk pendinginan udara di dalam ruangan pada siang hari.

Mempertimbangkan hasil perhitungan potensi kenyamanan ventilasi dan pendinginan evaporatif menggunakan tiga nilai ambang batas WS_b dan RH_b , pola siklus musiman dihasilkan untuk setiap teknik pasif di setiap zona iklim (Gambar 3.13-2 dan 3.13-3). Potensi kenyamanan ventilasi menggunakan nilai WS_b 1,8 m/s, sehingga menghasilkan peningkatan perbedaan kecepatan angin total yang lebih besar dari yang diperoleh dengan WS_b 2 m/s dan 2,2 m/s. Banyaknya perbedaan kecepatan angin luar ruangan di atas WS_b menentukan durasi kenyamanan ventilasi dalam satu hari. Semakin tinggi kecepatan angin luar ruangan di atas WS_b , semakin besar perbedaannya, dan semakin lama durasi kenyamanan ventilasi.



Gambar 3.11 Rentang nilai iklim pada kondisi diurnal: (a) suhu udara; (b) kelembapan relatif; (c) kecepatan angin

Tabel 3.6 Nilai hari derajat pendinginan (CDD) dan persentase beban pendinginan (CL)

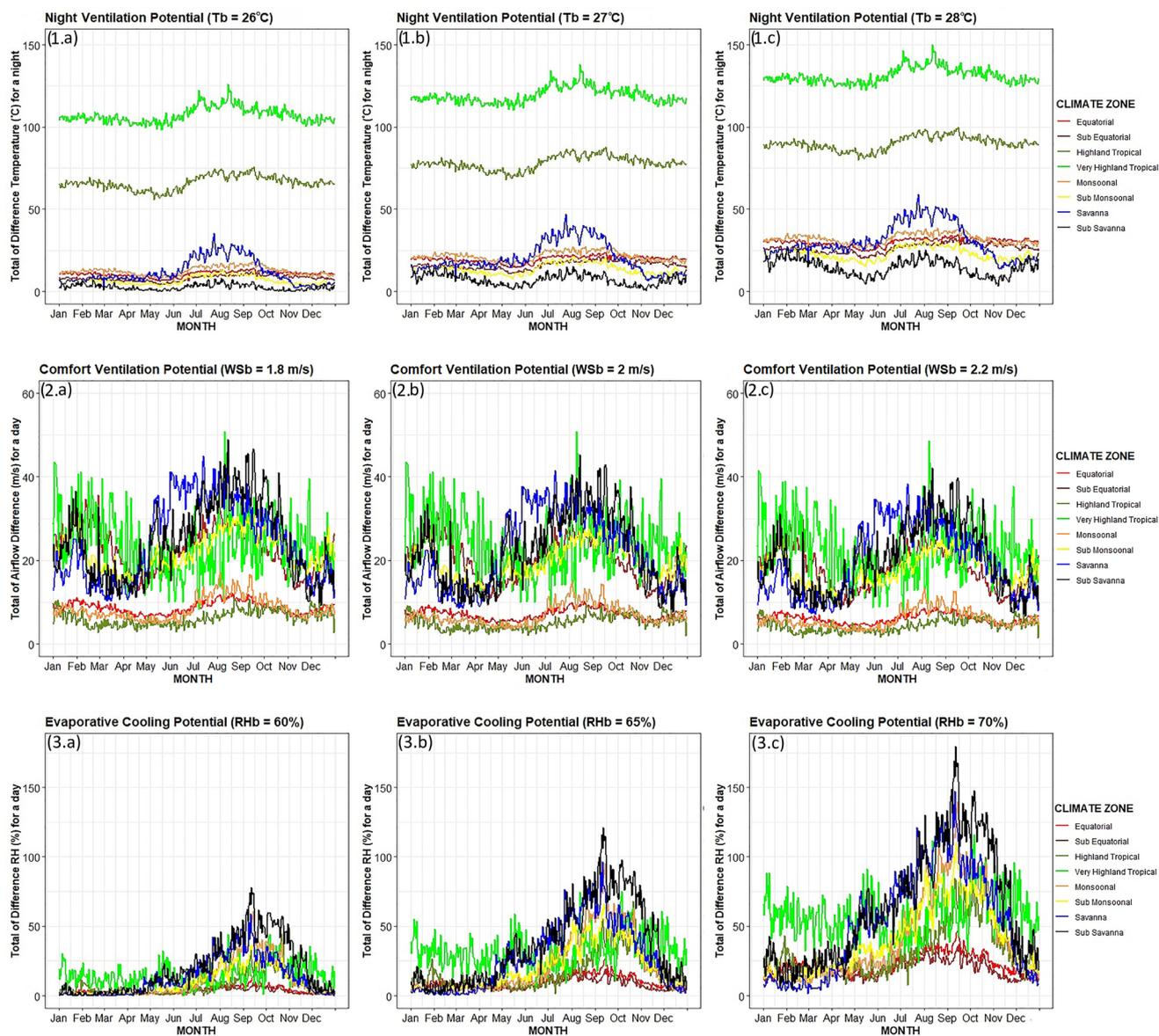
Zona iklim terpadu	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
CDD 24°C/tahun	1210.1	1210.6	0	0	1203.9	1408.0	1291.9	1739.5
CDD 25°C/tahun	884.8	845.4	0	0	838.6	1042.7	972.1	1374.1
CDD 26°C/tahun	479.5	480.1	0	0	473.5	677.4	572.2	1009.1
CDD 27°C/tahun	131.4	135.6	0	0	140.2	319.3	267.9	648.4
CL >T 24°C	90.6 %	93.6 %	27.7 %	14.1 %	87.5 %	95.0 %	88.7 %	98.8 %
CL >T 25°C	74.8 %	81.1 %	20.9 %	8.6 %	73.8 %	85.6 %	77.4 %	94.6 %
CL >T 26°C	58.7 %	64.1 %	14.6 %	4.4 %	59.6 %	70.7 %	63.5 %	84.1 %
CL > T 27°C	46.6 %	48.4 %	9.4 %	1.6 %	47.8 %	56.2 %	51.2 %	68.7 %

Perhitungan potensi pendinginan evaporatif menggunakan nilai RH_b 70%. Hal tersebut mengakibatkan munculnya perbedaan kelembapan udara total lebih besar dari RH_b 65% dan 60%. Angka perbedaan antara kelembapan udara luar ruangan dan RH_b memengaruhi durasi pendinginan evaporatif. Semakin rendah kelembapan udara di bawah RH_b , semakin tinggi potensi dan durasi pendinginan evaporatif.

Zona iklim dataran tinggi dan iklim pegunungan tinggi memiliki potensi ventilasi malam yang tinggi karena berada pada ketinggian dengan suhu udara yang relatif rendah (Gambar 3.13-1), sedangkan zona iklim sub-sabana yang terletak di Pulau Madura memiliki potensi ventilasi malam terendah. Potensi ventilasi malam meningkat di semua zona iklim pada bulan Juli, Agustus, September, dan Oktober.

Zona iklim sub-sabana dan sabana yang terletak di pulau Nusa Tenggara Timur dan Nusa Tenggara Barat memiliki potensi tinggi karena daerah tersebut dipengaruhi oleh sirkulasi monsun yang kuat (Gambar 3.13-2). Zona iklim dataran tinggi juga memiliki potensi kenyamanan ventilasi yang tinggi. Pada zona iklim khatulistiwa, dataran tinggi, dan monsun yang terletak di dekat khatulistiwa memiliki potensi kenyamanan ventilasi terendah. Potensi kenyamanan ventilasi meningkat di semua wilayah iklim pada bulan Juli, Agustus, September, dan Oktober yang dipengaruhi oleh monsun tenggara, serta pada bulan Desember, Januari, dan Februari yang dipengaruhi oleh monsun timur laut.

Zona iklim sub-sabana, sabana, monsun dan sub-monsoon menunjukkan potensi pendinginan evaporatif yang tinggi pada bulan Juli, Agustus, September, dan Oktober, diiringi dengan



Gambar 3.12 CCP harian berdasarkan perbedaan antara kondisi iklim luar ruangan dan asumsi kondisi iklim dalam ruangan: (1.a-c) ventilasi malam; (2.a-c) kenyamanan ventilasi; dan (3.a-c) pendinginan evaporatif.

Tabel 3.7 Potensi dari tiga metode pendinginan pasif dengan nilai iklim dasar yang berbeda (dalam %).

Zona iklim terpadu	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B
Malam VP $T_b < 26^\circ\text{C}$	25.2	19.0	79.1	91.4	26.2	14.8	22.6	5.4
Malam VP $T_b < 27^\circ\text{C}$	41.3	35.9	85.4	95.6	40.4	29.3	36.5	15.9
Malam VP $T_b < 28^\circ\text{C}$	53.4	51.6	90.6	98.4	52.2	43.7	48.8	31.3
ECP $\text{RH}_b < 70\%$	14.2	12.3	16.0	24.6	19.9	21.0	24.7	26.9
ECP $\text{RH}_b < 65\%$	7.4	5.9	10.0	18.0	11.7	12.0	15.8	17.6
ECP $\text{RH}_b < 60\%$	3.2	2.6	5.3	10.8	6.4	6.2	8.7	10.8
Comfort VP $\text{WS}_b > 1,8\text{ m/s}$	32.7	56.0	23.1	44.5	32.4	53.2	55.8	54.2
Comfort VP $\text{WS}_b > 2\text{ m/s}$	22.6	45.5	16.0	35.2	21.9	43.0	46.5	43.4
Comfort VP $\text{WS}_b > 2,2\text{ m/s}$	22.4	45.2	15.7	34.8	21.5	42.9	46.2	43.3

penurunan kelembapan udara (Gambar 3.13-3). Zona iklim khatulistiwa dan sub-khatulistiwa memiliki potensi pendinginan evaporatif rendah karena tingkat kelembapan udara yang tinggi di sepanjang tahun.

Probabilitas potensi pendinginan pasif yang dinilai berdasarkan nilai dasar iklim yang berbeda untuk ventilasi malam (NVP), potensi kenyamanan ventilasi (CVP) dan potensi pendinginan evaporatif (ECP) di setiap zona iklim terpadu dapat dilihat pada Tabel 3.7. Bagaimana pun, hasil ini masih merupakan pendekatan awal dalam menilai potensi pendinginan pasif berdasarkan zonasi iklim. Untuk mendapatkan hasil yang lebih detail, perlu dilakukan simulasi kinerja bangunan gedung secara detail di setiap zona iklim.

3.9 Kesimpulan

Zona iklim terpadu baru yang dikembangkan berbeda dari zonasi iklim Köppen-Geiger dan memperoleh hasil yang lebih rinci berdasarkan distribusi spasial dan temporal (diurnal, musiman, dan tahunan). Pengembangan zona iklim terpadu telah mempertimbangkan data topografi dan lebih banyak elemen iklim, di antaranya suhu udara, kecepatan angin, kelembapan udara, tekanan atmosfer, tutupan awan total, rasio pencampuran, radiasi matahari global, dan curah hujan dengan data resolusi temporal tinggi (per jam). Berbeda dengan klasifikasi Köppen-Geiger, yang membagi Indonesia menjadi hanya tiga zona iklim, hasil ini mengklasifikasikan iklim di Indonesia dibagi menjadi delapan zona iklim terpadu baru yaitu: 1A (khatulistiwa), 1B (sub-khatulistiwa), 2A (dataran tinggi), 2B (pegunungan tinggi), 3A (monsun), 3B (sub monsun), 4A (sabana), dan 4B (sub-sabana).

Berkaitan dengan strategi pendinginan pasif, dengan mengambil batas probabilitas yang lebih rendah dari 50%, zona iklim monsun, sabana, dan sub-sabana sesuai untuk pendinginan pasif kenyamanan ventilasi. Sementara itu, zona iklim sub-khatulistiwa memiliki potensi besar untuk pendinginan pasif ventilasi malam dan/ atau kenyamanan ventilasi, dengan asumsi nilai suhu udara dalam ruang dasar (T_b), kecepatan angin dalam ruang dasar (WS_b), dan kelembapan udara dalam ruang dasar (RH_b) konstan pada

nilai tertentu. Kenyataannya, nilai-nilai tersebut sangat berfluktuasi dan berubah terhadap waktu.

Rencana penerapan pendinginan pasif di setiap zona iklim dapat menerapkan satu metode pendinginan pasif, atau gabungan dari beberapa strategi pendinginan pasif. Insinyur, arsitek, dan perancang dapat merujuk pada informasi pada peta zona iklim untuk pendinginan pasif agar dapat menentukan strategi pendinginan pasif dan keputusan desain dasar (*basic design*) selama tahap awal perancangan sebelum melakukan analisis lebih dalam dengan menggunakan simulasi kinerja bangunan gedung untuk setiap zona iklim.

Pengembangan di masa depan diperlukan untuk menetapkan pedoman desain bangunan gedung yang lebih detail berdasarkan data yang lebih kuantitatif dengan mempertimbangkan lebih banyak faktor yang memengaruhi akurasi metode pendinginan pasif untuk setiap zona.

BAB 04

**DATA IKLIM
STANDAR (TMY)
INDONESIA
UNTUK SIMULASI
KINERJA
BANGUNAN
GEDUNG**



4.1 Pendahuluan

Sektor bangunan termasuk ke dalam salah satu sektor yang mengonsumsi energi terbesar dalam beberapa dekade terakhir. Secara khusus, energi untuk operasional bangunan gedung di antaranya sistem pengondisian udara, pencahayaan, dan sistem lain telah berkontribusi pada peningkatan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.

Data pengamatan iklim historis telah digunakan untuk simulasi energi bangunan gedung dan digunakan untuk mengevaluasi kinerja termal bangunan. Data meteorologi yang diterapkan pada simulasi energi harus sepenuhnya mewakili iklim lokal untuk menilai kinerja rata-rata bangunan jangka panjang dengan lebih baik. Akurasi prediksi energi bangunan terkait erat dengan keandalan data meteorologi sebagai inputnya, sehingga pemilihan data meteorologi yang tepat merupakan prasyarat untuk menghasilkan hasil simulasi yang valid.

Studi TMY membutuhkan data deret waktu per jam lengkap dengan minimal data sebanyak 10 tahun. Ketersediaan data deret waktu jangka panjang yang berkelanjutan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perhitungan TMY. Jika terdapat data yang hilang, maka diperlukan pengolahan data yang tepat. Banyak jaringan pengamatan iklim di berbagai belahan dunia memuat data yang hilang karena berbagai faktor, seperti peralatan pengamatan yang rusak dan gangguan jaringan transmisi data. Akibatnya, diperlukan analisis ulang data untuk koreksi bias dan menutupi data yang hilang. Sebagai contoh, radiasi matahari adalah salah satu variabel iklim utama dalam dataset TMY yang sangat memengaruhi simulasi kinerja bangunan. Namun, sebagian besar stasiun cuaca di seluruh dunia, terutama di negara-negara berkembang, tidak memiliki sensor radiasi matahari karena membutuhkan biaya investasi dan pemeliharaan yang besar.

Oleh karena itu, data satelit dan data analisis ulang digunakan untuk menutupi data radiasi matahari yang hilang. Dataset global untuk analisis ulang yang paling banyak digunakan diantaranya CFS dari NOAA, MERRA-2 dari NASA, dan ERA5 dari ECMWF. ASHRAE RP-1745 misalnya, menemukan bahwa ketika data hasil analisis ulang digunakan

untuk menghitung kondisi iklim desain, hasil yang diperoleh menunjukkan korelasi yang kuat dengan nilai-nilai yang berasal dari pengamatan waktu nyata.

Peningkatan efisiensi energi bangunan semakin dibutuhkan karena adanya kekhawatiran terhadap perubahan iklim. Evaluasi dan optimalisasi efisiensi energi dan kinerja keseluruhan bangunan gedung dapat dicapai dengan menggunakan perangkat lunak simulasi kinerja bangunan (contohnya EnergyPlus, DOE2, TRNSYS) dan program komputer lainnya yang sejenis. Secara umum, informasi mengenai konstruksi, pola hunian, ventilasi, dan pendingin udara, serta kondisi batas seperti informasi iklim dimasukkan dalam simulasi kinerja bangunan. Salah satu faktor kunci yang memengaruhi akurasi simulasi kinerja bangunan adalah keandalan data iklim sebagai input, sehingga pemilihan data iklim yang tepat merupakan prasyarat untuk menghasilkan hasil simulasi yang valid.

Secara umum, ada tiga jenis data iklim per jam yang digunakan dalam membangun simulasi energi, yaitu dataset cuaca multi tahun, tahun meteorologi tipikal atau *Typical Meteorological Year (TMY)*, dan hari representatif. Jika hari representatif terlalu terbatas dan tidak cukup rinci untuk masalah desain, TMY dapat mengurangi upaya komputasi yang rumit dalam simulasi dan penanganan data iklim menggunakan dataset satu tahun. TMY memberikan prediksi beban pendinginan bulanan dan profil konsumsi energi yang cenderung sesuai dengan rata-rata jangka panjang yang diamati. Selain itu, TMY adalah data yang paling umum digunakan hingga saat ini untuk menganalisis energi pada bangunan.

TMY terdiri dari 12 bulan meteorologi tipikal (*Typical Meteorological Months/TMMs*) dari tahun yang berbeda (Januari - Desember), dan pertama kali diperkenalkan oleh Hall et al. dari Sandia National Laboratories pada tahun 1978. Renewable Energy Laboratory mengembangkan versi kedua (TMY2) pada tahun 1995. TMY versi ketiga (TMY3) dikembangkan dengan sedikit modifikasi pada proses seleksi data spesifik bulan. Dataset ASHRAE *International Weather for Energy Calculations (IWEC2)* mengandung data cuaca tahunan untuk 3012 lokasi di seluruh dunia yang dikembangkan melalui ASHRAE RP-1477 dengan

menggunakan sumber data cuaca yang sama, sementara ISO 15927-4 mengembangkan tahun referensi tes atau *Test Reference Year*(TRY).

Saat ini, beberapa program simulasi energi bangunan dilengkapi dengan *dataset* cuaca atau menawarkan akses ke basis data cuaca *open-source*. Keakuratan data tersebut masih dipertanyakan, sehingga banyak negara telah membuat dan memodifikasi TMY mereka sendiri. Berdasarkan beberapa metode yang telah dikembangkan sebelumnya, perbedaannya terletak pada pemilihan parameter iklim yang digunakan, pembobotan parameter iklim, lamanya periode data, jenis data (observasi, satelit, dan analisis ulang), dan tujuan pembuatan TMY. Dalam menentukan kriteria pembobotan untuk menghasilkan TMY, yang disebut dengan TRY, metode statistik FS telah digunakan di berbagai kota dan negara seperti Vietnam, Libya, Yunani, Siprus, Suriah, Turki, Tiongkok, Hongkong, dan lain sebagainya.

Terdapat metode lain untuk menentukan TMY karena perbedaan sumber data meteorologi dan metode matematika yang digunakan dalam proses seleksi. Umumnya, perbedaan metode tersebut berkaitan dengan prosedur pemilihan TMM yang berbeda karena tidak ada prosedur atau kriteria yang universal. Prinsip dasarnya adalah memilih semua parameter meteorologi bulanan yang memiliki nilai terdekat dengan distribusi jangka panjang. Untuk semua parameter TMY, tidak ada perbedaan yang signifikan antara nilai rata-rata 10 tahun dari parameter dengan nilai rata-rata TMY yang dihasilkan dari masing-masing metode. Metode Sandia dengan kriteria pembobotan statistik FS yang dimodifikasi direkomendasikan untuk pengembangan TMY karena sederhana dan telah banyak diuji, sehingga metode tersebut digunakan dalam pengembangan TMY di Indonesia.

TMY dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, diantaranya simulasi kinerja atau simulasi energi pada bangunan, energi terbarukan untuk aplikasi panel surya, perencanaan sistem ventilasi, strategi pendinginan pasif bangunan gedung, derajat-jam (*degree-hour*) pendinginan, serta beban pendinginan.

4.2 Metodologi

4.2.1 Data Iklim

Penelitian ini menggunakan data historis per jam untuk delapan elemen iklim, termasuk radiasi horisontal global, radiasi normal langsung, radiasi horisontal difus, suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, kelembapan relatif, dan suhu titik embun (*dew-point temperature*). Data pengamatan suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin diperoleh dari 106 stasiun meteorologi milik BMKG untuk periode Januari 2011 hingga Desember 2020.

Data deret waktu untuk radiasi horisontal global, radiasi normal langsung, dan data curah hujan untuk periode 10 tahun diekstraksi dari data analisis ulang ERA5 yang telah disesuaikan dengan koordinat 106 lokasi stasiun di masing-masing zona iklim (sepaimana dibahas di Bab 3), dikarenakan tidak tersedianya data pengamatan. Nilai radiasi horisontal difus dan suhu titik embun diperoleh melalui perhitungan yang melibatkan elemen iklim lainnya menggunakan persamaan di bawah ini:

$$DHI = GHI - DNI \times \cos(\theta_z)$$

$$T_d = \left(\frac{RH}{100} \right)^{0.7} \times (112 + (0.9 \times T)) - 112 + (0.1 \times T)$$

DHI adalah radiasi horisontal difus (W/m^2), GHI adalah radiasi horisontal global (W/m^2), DNI adalah radiasi normal langsung (W/m^2), θ_z adalah sudut zenit matahari ($^\circ$), T_d adalah suhu titik embun ($^\circ C$), RH adalah kelembapan udara (%), dan T adalah suhu udara ($^\circ C$).

Perhitungan TMY memerlukan data deret waktu lengkap tanpa satu pun nilai yang hilang, sehingga data deret waktu per jam untuk suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin juga diekstraksi dari data analisis ulang ERA5 dengan proses koreksi bias untuk mengisi kesenjangan dalam data pengamatan.

Data pengamatan yang hilang adalah masalah umum dalam dataset jangka panjang di banyak jaringan pengamatan iklim. Oleh karena itu, perlu untuk mengisi kekosongan dan mengganti data pengamatan yang hilang sebagai kontrol kualitas dataset.

Teknik pengisian kesenjangan untuk parameter suhu udara dan parameter lainnya didasarkan pada data analisis ulang ERA5. Untuk mengevaluasi distribusi data analisis ulang ERA5 di setiap lokasi, korelasi dan bias antara data analisis ulang ERA5 dan data pengamatan dihitung dengan menggunakan koefisien korelasi (r) dan bias, dengan persamaan berikut:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}$$

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)$$

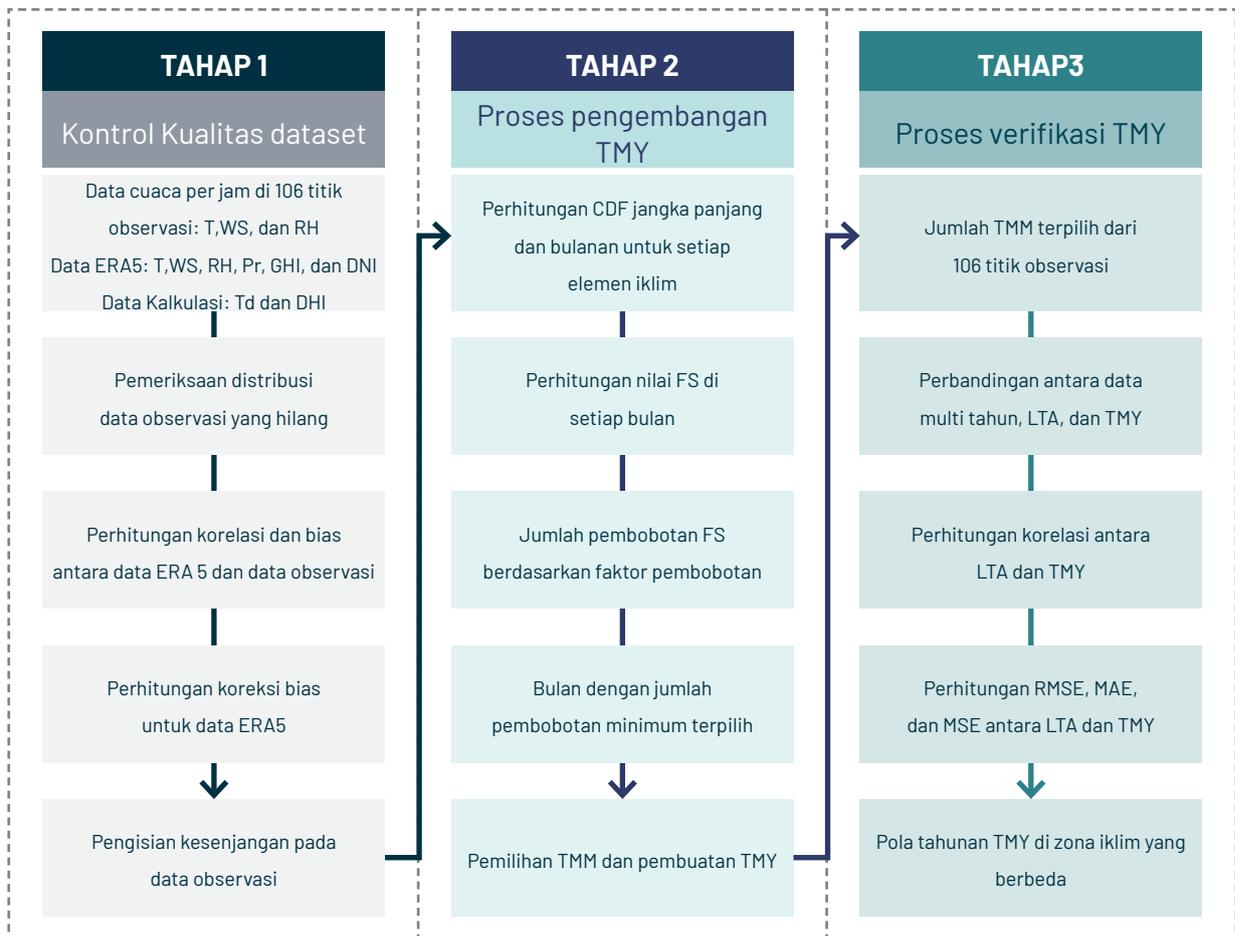
O adalah nilai aktual (data pengamatan), dan M adalah nilai perkiraan (data analisis ulang ERA5).

Teknik *gap-filling* dikembangkan berdasarkan *debias* menggunakan metode koreksi bias dengan

pemetaan kuantil dari data analisis ulang ERA5 yang dihitung menggunakan persamaan:

$$\hat{X}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1} \{ F_{m,h}[x_{m,p}(t)] \}$$

Dari pemetaan kuantil diperoleh persamaan CDF yaitu $F_{o,h}$ dan $F_{m,h}$ dari data yang diamati $x_{o,h}$ dilambangkan dengan subskripsi o , serta data analisis ulang ERA5 $x_{m,h}$ dilambangkan dengan subskripsi m , dan dalam periode pengamatan yang panjang dilambangkan dengan subskripsi h . Untuk koreksi bias $x_{m,p}(t)$, data analisis ulang ERA5 pada waktu t dalam beberapa periode prediksi, dilambangkan dengan subskripsi p . Pemetaan kuantil setara dengan tabel pencarian yang entrinya ditemukan dengan interpolasi antar-titik dalam plot kuantil dari periode sepanjang data pengamatan. Fungsi transfer dibangun secara eksklusif menggunakan informasi dari periode sepanjang pengamatan.



Gambar 4.1 Diagram alur pembuatan data iklim standar (TMY)

4.2.2 Proses Analisis

Pengembangan TMY dilakukan dalam tiga tahap, yaitu kontrol kualitas dataset, perhitungan TMY, dan verifikasi TMY (Gambar 4.1). Pada tahap kontrol kualitas, distribusi data yang hilang diperiksa. Data yang hilang untuk parameter suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin diisi menggunakan data analisis ulang ERA5 yang dikoreksi. Proses ini menghasilkan data deret waktu per jam yang lengkap untuk kemudian menjadi input perhitungan TMY.

Kemudian, setiap elemen iklim digunakan untuk memilih 12 TMM berdasarkan statistik FS dengan jumlah berbobot minimum dalam perhitungan TMY. Secara umum, fungsi distribusi kumulatif atau CDF dari TMM yang dipilih diharapkan selaras dengan distribusi jangka panjangnya.

Setelah pembuatan TMY, langkah selanjutnya adalah membandingkan data TMY dengan data LTA dan data multi-tahun. Untuk tahap verifikasi TMY, beberapa metode statistik digunakan, antara lain korelasi, RMSE, MAE, dan MSE di setiap lokasi. TMY kemudian diplot setiap bulan berdasarkan rata-rata nilai iklim harian untuk mengidentifikasi pola TMY musiman dan tahunan, serta untuk membandingkan TMY di delapan zona iklim di Indonesia. Informasi yang diperoleh dari proses ini kemudian digunakan untuk menentukan pola umum TMY di zona iklim yang berbeda yang dapat mewakili kondisi iklim jangka panjang.

4.2.3 Perhitungan *Typical Meteorological Year* (TMY)

Perhitungan TMY dilakukan dengan menggunakan metode Sandia dengan modifikasi faktor pembobotan untuk setiap elemen iklim. Metode Sandia melibatkan pemilihan bulan-bulan tertentu dalam setahun yang berbeda dari periode yang tercatat. Misal, dalam deret waktu yang berisi data 10 tahun pada bulan yang sama (Januari 2011, Januari 2012, ..., hingga Januari 2020), bulan yang paling representatif dipilih sebagai TMM adalah Januari. Proses ini kemudian diulang pada bulan lainnya untuk menyelesaikan satu tahun TMM.

Dalam memilih TMM, dipilih CDF bulanan yang memiliki nilai paling dekat dengan CDF jangka panjang. Kandidat CDF bulanan dibandingkan

dengan CDF jangka panjang menggunakan persamaan FS berikut untuk setiap elemen iklim harian.

$$FS_j = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \delta_i$$

δ_i adalah perbedaan mutlak antara CDF jangka panjang dan CDF tahunan untuk satu hari dalam sebulan, n adalah jumlah pembacaan harian di bulan itu, dan j adalah elemen iklim yang dipertimbangkan.

Jumlah pembobotan dari statistik FS digunakan untuk memilih bulan kandidat yang memiliki jumlah pembobotan terendah. Beberapa elemen iklim dinilai relatif lebih penting daripada yang lain, sehingga nilai faktor pembobotan yang ditetapkan untuk radiasi horisontal global harian adalah 0,25; suhu udara harian rata-rata 0,15; dan suhu titik embun harian rata-rata 0,1; sedangkan kecepatan angin harian maksimum, kecepatan angin harian rata-rata, suhu udara harian maksimum, suhu udara harian minimum, suhu titik embun harian maksimum, dan suhu titik embun harian minimum ditetapkan dengan faktor pembobotan yang sama, yaitu 0,05.

Dikarenakan variabel iklim luar lainnya, yaitu suhu udara, secara signifikan dipengaruhi oleh radiasi matahari, maka variasi radiasi matahari akan memengaruhi beban AC dan lingkungan termal eksternal baik secara langsung (melalui radiasi matahari) atau tidak langsung (melalui suhu udara).

$$\text{weighted sum} = \sum_{j=1}^n W_j FS_j$$

n adalah jumlah elemen iklim yang dipertimbangkan. W_j adalah bobot untuk elemen iklim j , dan FS_j merupakan statistik FS untuk elemen iklim j .

Bulan yang sama dari tahun yang berbeda diberi peringkat dalam urutan menaik dari nilai jumlah pembobotan terkecil hingga tertinggi. Tahun yang memiliki nilai jumlah pembobotan terkecil dari semua elemen iklim harian dipilih sebagai TMM. TMM yang dipilih untuk setiap bulan dari Januari hingga Desember (12 TMM) kemudian digabung

bersama untuk membentuk TMY, mewakili satu tahun penuh.

Prosedur ini dilakukan di 106 lokasi pengamatan yang tersebar di delapan zona iklim yang berbeda. Untuk tujuan verifikasi, TMY yang dihasilkan dibandingkan dengan rata-rata jangka panjang menggunakan beberapa metode statistik, yaitu korelasi, RMSE, MAE, dan MSE yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - M_i|$$

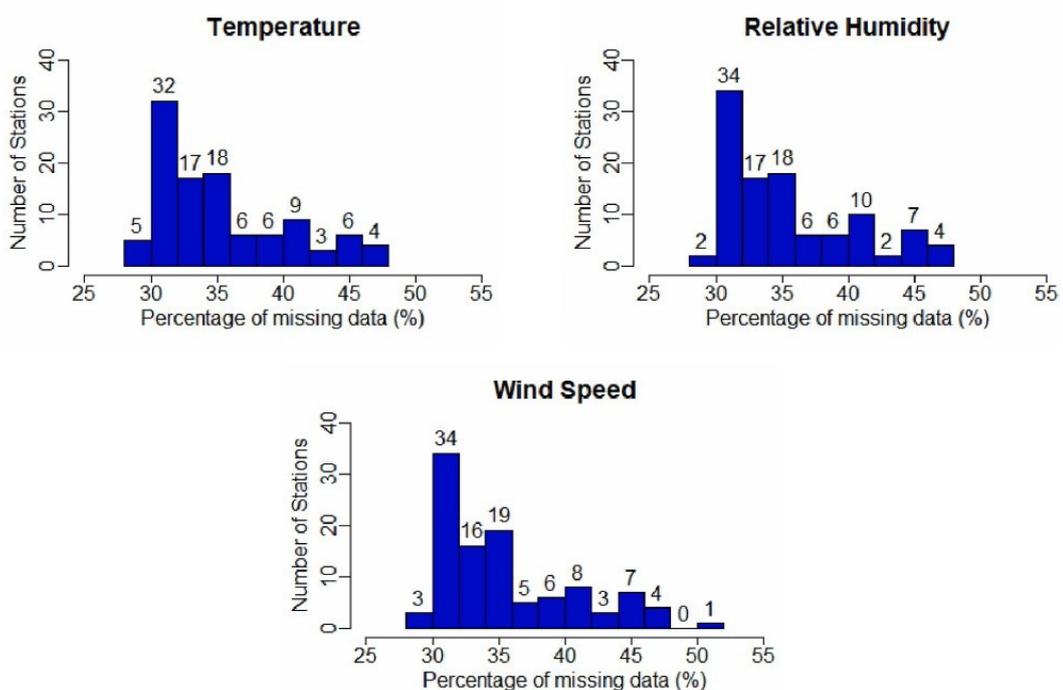
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2$$

O adalah nilai aktual (rata-rata data jangka panjang), M adalah nilai perkiraan (data pembuatan TMY), dan n adalah *number of instances*.

4.3 Distribusi Data Pengamatan yang Hilang

Distribusi data per jam yang hilang untuk suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin di 106 stasiun klimatologi dari Januari 2011 hingga Desember 2020 ditunjukkan pada Gambar 4.2. Untuk rangkaian waktu lengkap data 10 tahun pada Januari 2011 pukul 00:00 LT hingga Desember 2020 pukul 23:00 LT, total data pengamatan terdiri dari 87.672 data. Semua titik memiliki data yang hilang dengan persentase yang bervariasi antara 29,96-50,19%. Sebagai contoh, sebuah stasiun klimatologi di Kota Pontianak dengan ID stasiun 96585 memiliki 44,5% data temperatur hilang dengan total nilai hilang per jam sebanyak 39.042 data.

Dari 106 lokasi stasiun klimatologi, distribusi data suhu udara yang hilang berkisar antara 29,96-47,65%, dengan persentase tertinggi adalah 31% di 32 lokasi. Sebaran data kelembapan udara yang hilang berkisar antara 29,97-47,65%, dengan persentase tertinggi 31% di 34 lokasi. Terakhir, distribusi data kecepatan angin yang hilang berkisar antara 29,96-50,19%, dengan persentase tertinggi 31% di 34 lokasi.



Gambar 4.2 Distribusi data pengamatan per jam yang hilang.

4.4 Korelasi dan Bias dari Data Analisis Ulang ERA5

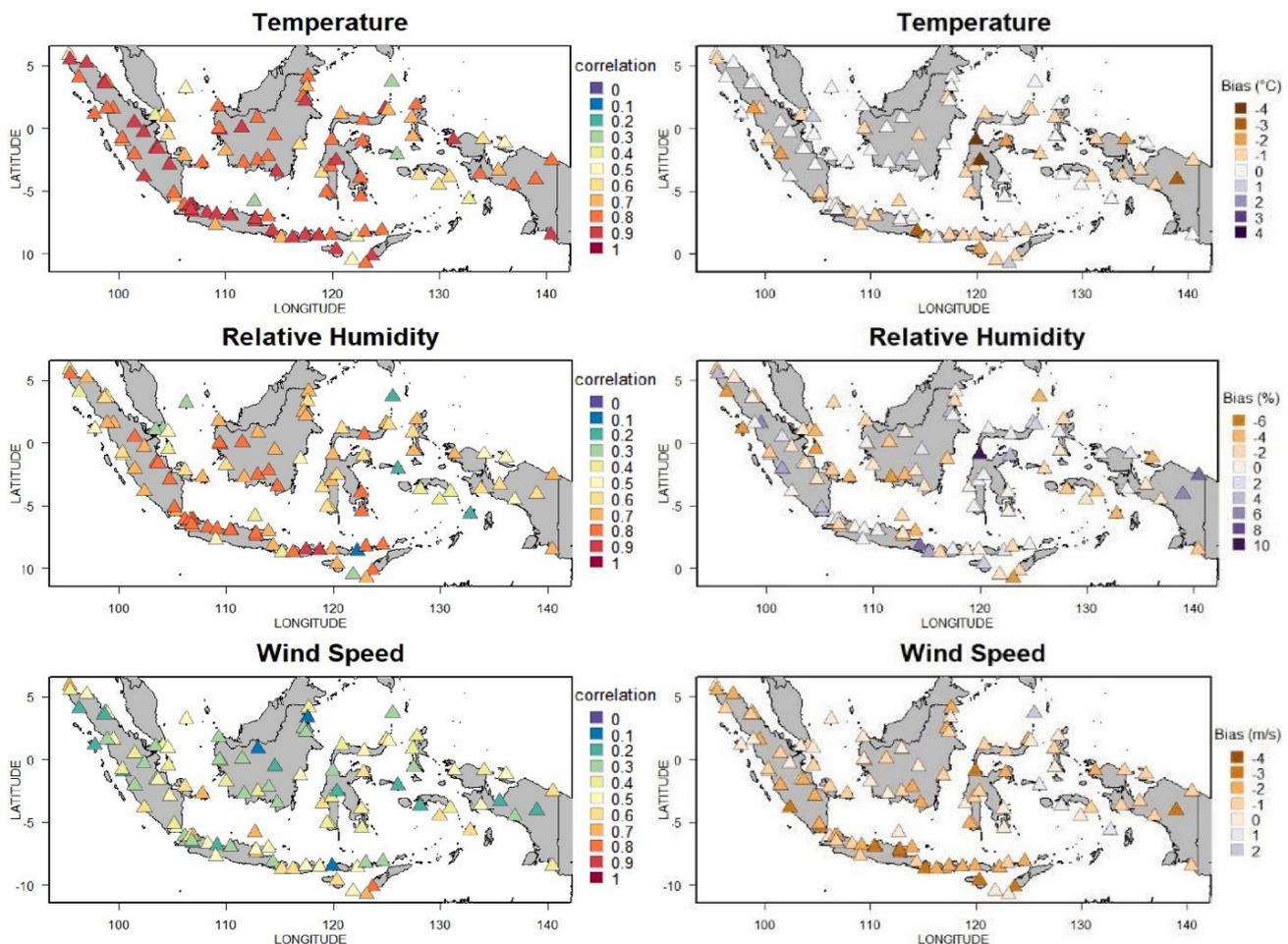
Hasil korelasi dan bias data deret waktu per jam ERA5 berasal dari jumlah pasangan data deret waktu per jam yang diperoleh selama tahun 2011 – 2020 ditunjukkan pada Gambar 4.3. Nilai korelasi dan bias antara data analisis ulang ERA5 dengan data pengamatan dihitung untuk elemen suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin yang divisualisasikan secara spasial dengan diplotkan pada koordinat lokasi masing-masing.

Di antara tiga elemen iklim yang diamati di 106 stasiun klimatologi di seluruh Indonesia, data suhu udara memiliki korelasi terbesar antara data analisis ulang ERA5 dengan data pengamatan dibandingkan dengan kelembapan udara dan kecepatan angin. Korelasi suhu udara tertinggi ($r=0,7$) diamati di pulau-pulau besar, seperti Sumatera, Kalimantan, Jawa, Sulawesi, dan Papua. Selain itu, lokasi yang terletak dekat dengan garis pantai, seperti di Kepulauan Maluku,

memiliki distribusi korelasi suhu udara yang relatif lebih rendah. Secara spasial, distribusi bias suhu udara ERA5 berkisar antara $-4,5^{\circ}\text{C}$ hingga $2,7^{\circ}\text{C}$. Bias untuk kelembapan udara adalah -6% hingga 10% dan bias untuk kecepatan angin adalah -4 m/s hingga 2 m/s.

4.5 Pengisian Kesenjangan Data Pengamatan

Dataset analisis ulang ERA5 untuk suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin diekstraksi di semua koordinat lokasi dan kemudian dikoreksi dengan metode koreksi bias menggunakan pemetaan kuantil. Agar lebih ringkas, dilakukan plot deret waktu untuk elemen suhu udara di satu stasiun, yaitu Stasiun Meteorologi Pontianak dengan ID stasiun 96585 (Gambar 4.4 (a-f)), untuk menggambarkan dengan jelas proses pengisian data suhu udara yang hilang menggunakan data analisis ulang ERA5 dan koreksi bias.



Gambar 4.3 Distribusi spasial korelasi dan bias ERA5.

Deret waktu data pengamatan selama 10 tahun diperlihatkan oleh garis biru (Gambar 4.4a), termasuk data pengamatan yang hilang. Berdasarkan perbandingan, data suhu udara ERA5 selalu lebih rendah dari data suhu udara yang diamati (Gambar 4.4b). Distribusi CDF temperatur ERA5 sebelum koreksi bias dan suhu udara ERA5 yang dikoreksi bias (*debias* temperatur ERA5) ditunjukkan oleh Gambar 33c.

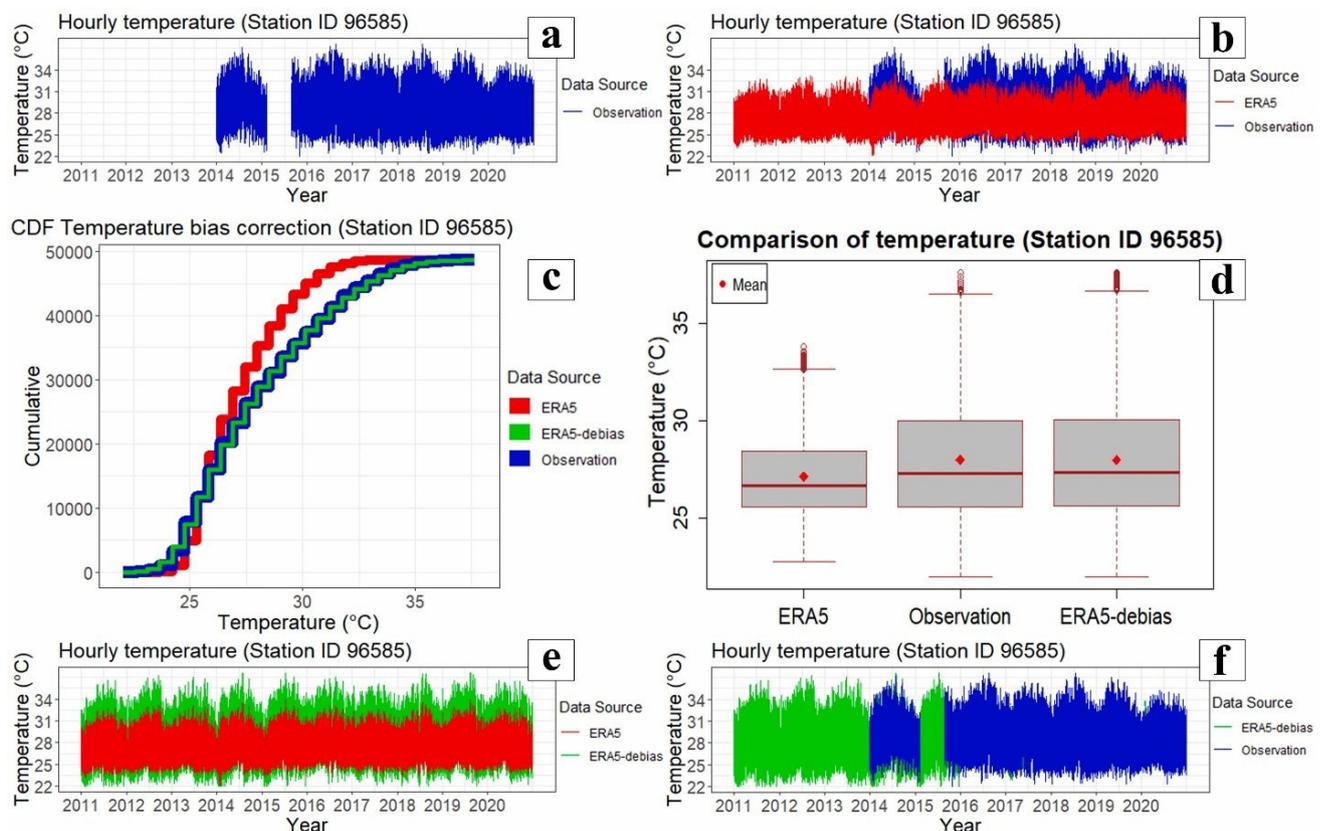
Pemetaan kuantil dapat meningkatkan distribusi nilai suhu udara ERA5 agar mendekati distribusi nilai suhu udara yang diamati. Nilai rata-rata, kuartil pertama, median, dan kuartil ketiga data suhu udara ERA5 yang telah dikoreksi biasanya agar mendekati nilai data suhu udara yang diamati diperlihatkan Gambar 4.4.d, sedangkan perbandingan suhu udara ERA5 sebelum dan sesudah koreksi bias ditunjukkan Gambar 4.4e.

Kisaran suhu udara diurnal ERA5 yang *debias* meningkat berdasarkan hasil penyesuaian bias data suhu udara ERA5. Hasil data pengamatan yang diisi menggunakan data *debias* suhu udara ERA5 diperlihatkan oleh garis hijau dalam Gambar 4.4f. Prosedur yang sama digunakan untuk mengisi data pengamatan suhu udara, kelembapan udara,

dan kecepatan angin yang hilang di 106 stasiun klimatologi di Indonesia.

Distribusi korelasi ERA5, bias ERA5, dan *debias* ERA5 di semua lokasi ditunjukkan pada Gambar 4.5. Model koreksi bias yang dikembangkan meningkatkan akurasi data analisis ulang ERA5. Kinerja data analisis ulang ERA5 dinilai berdasarkan ketersediaan data pengamatan deret waktu per jam untuk tahun 2011-2020. Korelasi antara suhu udara yang diamati dan suhu udara ERA5 berkisar antara 0,28 hingga 0,92, dengan jumlah lokasi tertinggi memiliki korelasi 0,83. Korelasi antara RH yang diamati dan RH ERA5 berkisar antara 0,13 hingga 0,86, dengan jumlah lokasi tertinggi memiliki korelasi 0,70. Korelasi antara kecepatan angin yang diamati dan kecepatan angin ERA5 berkisar antara 0,06 hingga 0,76, dengan jumlah situs tertinggi memiliki korelasi 0,40.

Setelah menerapkan metode koreksi bias, distribusi bias suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin di ERA5 di semua lokasi berkurang. Awalnya, distribusi suhu udara berkisar antara $-4,5^{\circ}\text{C}$ hingga $2,7^{\circ}\text{C}$, dengan distribusi terbesar adalah $-0,4^{\circ}\text{C}$, kemudian dikurangi menjadi kisaran yang lebih sempit yaitu $-0,014^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.4 Contoh proses koreksi bias ERA5 dan mengisi kesenjangan dalam data pengamatan.

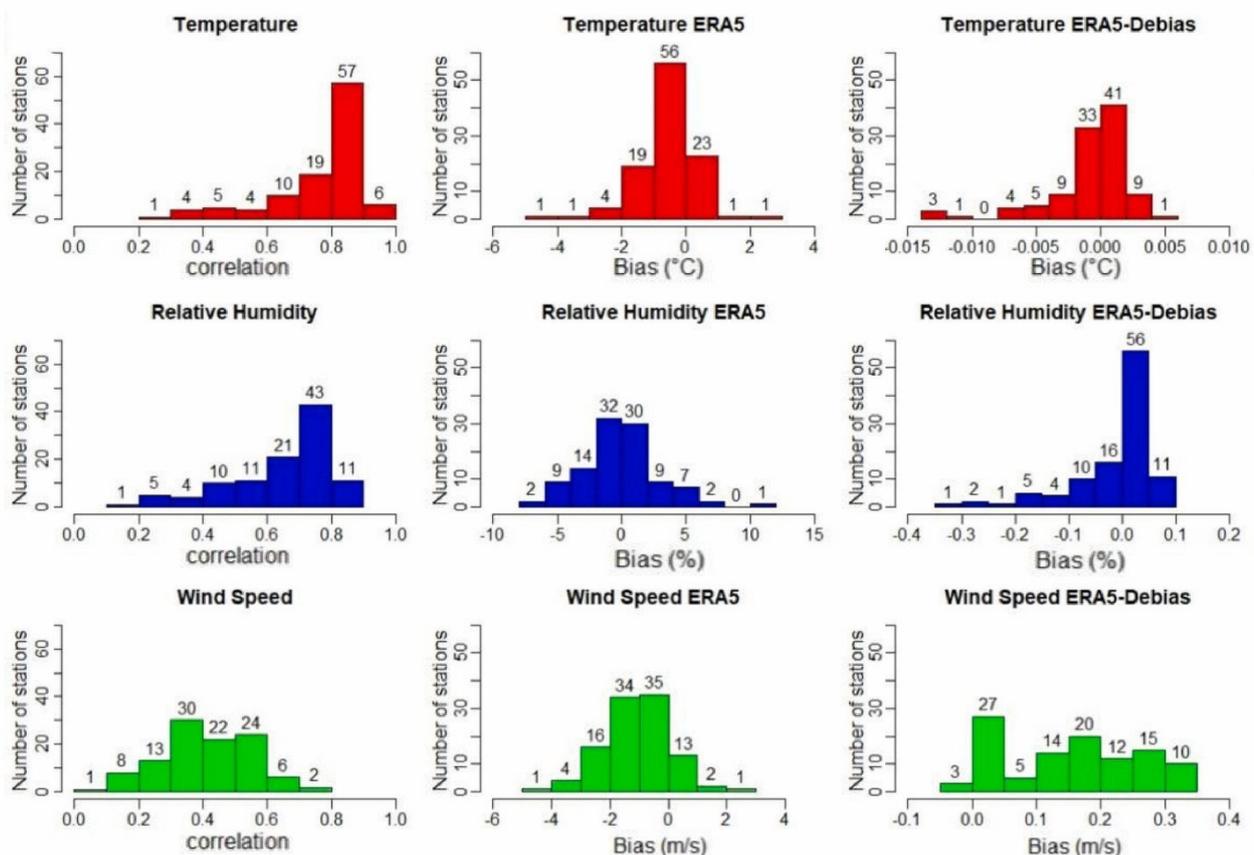
hingga 0,005°C. Demikian pula, distribusi awal bias kelembapan udara untuk ERA5 di semua lokasi adalah -6% hingga 10%, dengan distribusi terbesar -0,2%, kemudian diminimalkan menjadi -0,32% hingga 0,07%. Distribusi bias kecepatan angin untuk ERA5 di semua lokasi, awalnya berkisar antara -4 m/s hingga 2 m/s dengan distribusi terbesar adalah -1 m/s, juga berkurang menjadi -0,02 m/s menjadi 0,35 m/s. Setelah mengisi data pengamatan yang hilang dengan data *debias* ERA5, data deret waktu per jam dapat digunakan untuk perhitungan TMY di 106 titik di Indonesia.

4.6 Proses Pembuatan Data Iklim Standar (TMY)

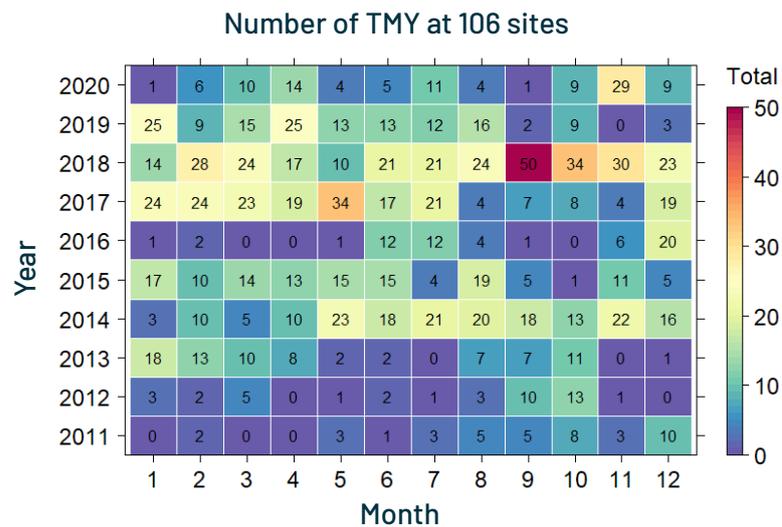
Typical Meteorological Month (TMM) hasil pembuatan TMY sangat bervariasi, meskipun lokasi berada di zona iklim yang sama. Kondisi iklim lokal memiliki pengaruh besar terhadap TMM yang dihasilkan. Misal, TMM di Kabupaten Aceh Utara (ID stasiun 96009) dalam zona iklim 1A (khatulistiwa) adalah Januari 2013, Februari 2018, Maret 2018, April 2018, Mei 2014, Juni 2019, Juli 2018, Agustus 2015, September 2018, Oktober

2012, November 2017, dan Desember 2016 (Tabel 4.1). Lebih banyak TMM ditemukan pada tahun 2018, yaitu pada bulan Februari, Maret, April, Juli, dan September. Sementara itu, di lokasi berbeda dengan zona iklim yang sama di Kabupaten Nagari Raya, TMM yang dihasilkan berbeda. TMM lebih banyak ditemukan di tahun 2014, yaitu pada bulan Mei, Juni, dan September. Informasi lebih rinci tentang generasi TMY di 106 lokasi di Indonesia tersedia pada Tabel 9.

Secara umum, tahun 2018 berkontribusi paling besar terhadap komposisi TMM, sedangkan 2011 adalah kontributor yang paling tidak signifikan. Tahun 2018 berkontribusi paling besar terhadap komposisi TMM di bulan Februari, Maret, Juni, Agustus, September, Oktober, November, dan Desember, dengan total masing-masing 28, 24, 21, 24, 50, 34, 30, dan 23 bulan. Tahun 2019 memiliki kontribusi tertinggi terhadap TMM bulan Januari dan April dengan total masing-masing 25 bulan. Tahun 2017 memiliki kontribusi tertinggi terhadap TMM bulan Mei dengan total 34 bulan. Untuk TMM bulan Juli, tahun yang paling banyak dipilih adalah 2014, 2017, dan 2018 dengan total masing-masing 21 bulan (Gambar 4.6).



Gambar 4.5 Distribusi korelasi ERA5, bias ERA5, dan debias ERA5.



Gambar 4.6 Jumlah total TMM yang dipilih dari 106 lokasi.

Tabel 4.1 Ringkasan TMY terpilih untuk 106 lokasi di Indonesia

N o	ID Sta-siun	Zona Iklim	Kabupaten/ Kota	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
1	96009	1A	Kab. Aceh Utara	2013	2018	2018	2018	2014	2019	2018	2015	2018	2012	2017	2016
2	96015	1A	Kab. Nagan Raya	2013	2017	2019	2017	2014	2014	2016	2011	2014	2020	2018	2018
3	96033	1A	Kota Medan	2013	2018	2013	2013	2014	2015	2018	2015	2012	2011	2018	2011
4	96041	1A	Kota Medan	2012	2016	2018	2013	2017	2013	2015	2015	2012	2011	2015	2017
5	96073	1A	Kab. Tapanuli Tengah	2012	2018	2019	2020	2015	2017	2016	2019	2020	2014	2018	2020
6	96075	1A	Kab. Nias	2015	2019	2018	2013	2015	2018	2014	2017	2017	2014	2018	2018
7	96109	1A	Kota Pekanbaru	2013	2017	2012	2019	2015	2017	2016	2018	2018	2014	2014	2018
8	96161	1A	Kota Padang	2013	2015	2015	2013	2015	2012	2016	2015	2014	2014	2015	2014
9	96163	1A	Kab. Padang Pariaman	2013	2018	2019	2018	2015	2014	2016	2018	2014	2014	2018	2015
10	96171	1A	Kab. Indragiri Hulu	2018	2017	2012	2018	2017	2016	2018	2018	2011	2014	2018	2017
11	96191	1A	Kab. Muaro Jambi	2018	2017	2012	2018	2017	2016	2017	2017	2018	2018	2018	2017
12	96195	1A	Kota Jambi	2019	2017	2012	2017	2017	2017	2017	2020	2018	2020	2014	2017
13	96221	1A	Kota Palembang	2017	2020	2019	2020	2019	2017	2014	2020	2018	2018	2020	2017
14	96503	1A	Kab. Nunukan	2017	2018	2018	2017	2018	2015	2017	2015	2015	2018	2017	2017
15	96509	1A	Kota Tarakan	2019	2015	2018	2017	2017	2014	2018	2016	2015	2019	2018	2018

No	ID Stasiun	Zona Iklim	Kabupaten/ Kota	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
16	96525	1A	Kab. Bulungan	2017	2018	2018	2017	2015	2014	2017	2016	2014	2018	2018	2016
17	96529	1A	Kab. Berau	2018	2018	2018	2014	2018	2014	2014	2011	2014	2018	2015	2011
18	96535	1A	Kab. Sambas	2013	2018	2018	2019	2017	2018	2017	2015	2014	2015	2015	2016
19	96559	1A	Kab. Sintang	2018	2018	2017	2015	2015	2016	2017	2011	2011	2017	2017	2016
20	96565	1A	Kab. Kapuas Hulu	2013	2020	2014	2013	2014	2011	2016	2013	2018	2017	2011	2011
21	96581	1A	Kab. Kubu Raya	2019	2015	2014	2015	2015	2015	2017	2015	2014	2017	2018	2014
22	96585	1A	Kota Pontianak	2012	2017	2017	2018	2015	2015	2017	2012	2018	2020	2016	2016
23	96595	1A	Kab. Barito Utara	2019	2013	2015	2015	2018	2016	2018	2019	2012	2018	2014	2020
24	96615	1A	Kab. Ketapang	2018	2017	2019	2014	2015	2017	2017	2014	2018	2018	2014	2016
25	96633	1A	Kota Balikpapan	2018	2017	2019	2017	2011	2018	2019	2018	2018	2017	2020	2018
26	96645	1A	Kab. Kotawaringin Barat	2013	2015	2017	2017	2015	2015	2018	2018	2013	2012	2020	2016
27	96651	1A	Kab. Kotawaringin Timur	2015	2019	2014	2015	2014	2016	2018	2014	2018	2019	2018	2014
28	96655	1A	Kota Palangkaraya	2017	2019	2015	2014	2015	2015	2017	2018	2011	2019	2020	2014
29	96737	1A	Kota Serang	2017	2017	2018	2019	2014	2018	2014	2018	2018	2013	2020	2017
30	96739	1A	Kab. Tangerang	2017	2013	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2011	2014	2014
31	97016	1A	Kota Bitung	2019	2020	2017	2019	2017	2015	2019	2011	2013	2018	2018	2020
32	97028	1A	Kab. Toli Toli	2017	2018	2013	2017	2014	2015	2017	2011	2012	2013	2011	2016
33	97086	1A	Kab. Banggai	2017	2017	2013	2013	2019	2014	2017	2014	2013	2013	2020	2016
34	97126	1A	Kab. Luwu Utara	2015	2019	2015	2017	2018	2019	2020	2014	2014	2019	2020	2016
35	97460	1A	Kab. Halmahera Selatan	2019	2018	2018	2020	2018	2019	2019	2018	2014	2018	2015	2018
36	97530	1A	Kab. Manokwari	2015	2014	2013	2013	2013	2015	2019	2020	2018	2019	2014	2017
37	97560	1A	Kab. Biak Numfor	2018	2017	2019	2015	2014	2018	2019	2018	2014	2017	2016	2014
38	97600	1A	Kab. Kep. Sula	2017	2018	2017	2017	2018	2019	2019	2014	2018	2019	2015	2014
39	97682	1A	Kab. Nabire	2017	2013	2017	2018	2014	2013	2018	2018	2014	2018	2018	2011

No	ID Stasiun	Zona Iklim	Kabupaten/ Kota	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
40	97760	1A	Kab. Kaimana	2019	2019	2019	2018	2019	2014	2018	2019	2018	2018	2015	2017
41	97796	1A	Kab. Mimika	2014	2017	2014	2015	2014	2017	2018	2019	2014	2018	2018	2014
42	96001	1B	Kota Sabang	2013	2015	2020	2018	2016	2018	2011	2020	2018	2014	2020	2017
43	96011	1B	Kab. Aceh Besar	2015	2018	2018	2018	2014	2019	2012	2019	2015	2011	2015	2011
44	96035	1B	Kab. Deli Serdang	2013	2017	2015	2015	2019	2012	2017	2012	2017	2014	2018	2016
45	96071	1B	Kab. Padang Lawas Utara	2013	2016	2015	2015	2015	2014	2014	2017	2017	2011	2020	2014
46	96087	1B	Kota Batam	2013	2018	2017	2015	2019	2016	2018	2015	2011	2018	2014	2019
47	96089	1B	Kab. Karimun	2013	2017	2015	2019	2014	2017	2016	2015	2017	2017	2018	2014
48	96091	1B	Kota Tanjung Pinang	2018	2018	2017	2015	2019	2016	2018	2015	2016	2019	2014	2019
49	96145	1B	Kab. Kep. Anambas	2013	2018	2017	2019	2012	2018	2017	2015	2014	2017	2020	2020
50	96179	1B	Kab. Lingga	2013	2015	2017	2015	2015	2014	2017	2018	2018	2018	2017	2019
51	96237	1B	Kab. Bangka Tengah	2015	2015	2017	2014	2020	2018	2017	2018	2018	2018	2014	2020
52	96249	1B	Kab. Belitung	2018	2019	2017	2018	2014	2017	2014	2014	2011	2018	2015	2018
53	96253	1B	Kota Bengkulu	2019	2018	2015	2018	2020	2018	2014	2016	2018	2017	2020	2014
54	96805	1B	Kab. Cilacap	2019	2017	2017	2020	2019	2018	2015	2018	2014	2014	2018	2016
55	97430	1B	Kota Ternate	2018	2018	2018	2017	2014	2014	2019	2014	2012	2012	2018	2014
56	97690	1B	Kab. Jayapura	2016	2014	2019	2014	2019	2016	2016	2014	2018	2020	2014	2018
57	97724	1B	Kota Ambon	2019	2019	2020	2017	2019	2019	2019	2019	2014	2018	2014	2018
58	97748	1B	Kab. Seram Bagian Timur	2015	2011	2020	2019	2019	2019	2014	2014	2012	2012	2014	2018
59	97790	1B	Kab. Maluku Tengah	2019	2014	2020	2014	2019	2019	2015	2019	2013	2012	2015	2016
60	97810	1B	Kab. Maluku Tenggara	2015	2018	2015	2015	2017	2019	2018	2019	2018	2019	2016	2018
61	97980	1B	Kab. Merauke	2014	2017	2013	2019	2017	2017	2018	2013	2012	2012	2014	2018
62	96207	2A	Kab. Kerinci	2013	2018	2015	2019	2015	2014	2019	2015	2018	2014	2018	2014
63	96751	2A	Kab. Bogor	2019	2018	2018	2015	2017	2018	2020	2018	2018	2014	2014	2011

No	ID Stasiun	Zona Iklim	Kabupaten/ Kota	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
64	97124	2A	Kab. Tana Toraja	2013	2013	2019	2018	2014	2019	2014	2013	2013	2019	2018	2018
65	97686	2B	Kab. Jayawijaya	2018	2018	2015	2018	2017	2015	2014	2018	2018	2018	2014	2018
66	96745	3A	Kota Jakarta Pusat	2019	2013	2018	2019	2017	2017	2020	2015	2018	2018	2018	2015
67	96753	3A	Kota Bogor	2015	2013	2018	2019	2017	2017	2017	2017	2017	2018	2014	2011
68	96791	3A	Kab. Majalengka	2017	2013	2019	2019	2014	2017	2011	2013	2018	2011	2020	2016
69	96987	3A	Kab. Banyuwangi	2019	2020	2020	2020	2020	2020	2014	2014	2018	2012	2020	2015
70	97008	3A	Kab. Kep. Sangihe	2017	2014	2014	2017	2014	2016	2011	2012	2018	2018	2014	2014
71	97012	3A	Kab. Minahasa Utara	2019	2020	2020	2019	2018	2016	2016	2016	2018	2018	2014	2020
72	97014	3A	Kota Manado	2014	2018	2020	2019	2014	2016	2016	2018	2014	2018	2014	2020
73	97120	3A	Kab. Majene	2019	2014	2012	2017	2014	2019	2014	2014	2019	2020	2014	2017
74	97144	3A	Kota Kendari	2018	2014	2017	2013	2013	2018	2018	2019	2013	2020	2018	2016
75	97180	3A	Kab. Maros	2019	2013	2015	2014	2011	2018	2014	2019	2012	2020	2011	2017
76	97192	3A	Kota Bau Bau	2020	2019	2020	2017	2020	2020	2020	2019	2013	2020	2018	2018
77	97406	3A	Kab. Halmahera Utara	2019	2014	2013	2019	2014	2015	2016	2018	2018	2018	2015	2020
78	96293	3B	Kota Bandar Lampung	2017	2013	2017	2020	2011	2019	2019	2013	2018	2018	2014	2018
79	96295	3B	Kab. Lampung Selatan	2017	2014	2019	2019	2017	2016	2017	2015	2018	2012	2014	2016
80	96685	3B	Kota Banjarmasin	2019	2018	2019	2018	2014	2020	2014	2014	2018	2018	2016	2017
81	96741	3B	Kota Jakarta Utara	2015	2013	2018	2019	2014	2018	2014	2018	2018	2012	2018	2015
82	96749	3B	Kota Tangerang	2018	2015	2018	2018	2017	2018	2020	2015	2012	2018	2020	2017
83	96797	3B	Kab. Tegal	2015	2017	2018	2019	2017	2018	2017	2013	2018	2013	2018	2016
84	96837	3B	Kota Semarang	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2020	2018	2018	2014	2020	2016
85	96839	3B	Kota Semarang	2019	2017	2017	2020	2017	2018	2020	2014	2018	2018	2020	2018
86	96925	3B	Kab. Gresik	2017	2018	2015	2020	2017	2019	2017	2018	2018	2013	2020	2018
87	96935	3B	Kab. Sidoarjo	2019	2017	2018	2020	2017	2017	2020	2014	2018	2011	2018	2017

N o	ID Sta-siun	Zona Iklim	Kabupaten/ Kota	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
88	97048	3B	Kab. Gorontalo	2019	2018	2018	2019	2017	2014	2019	2018	2014	2018	2020	2020
89	97072	3B	Kota Palu	2018	2018	2018	2018	2018	2018	2019	2018	2018	2018	2018	2017
90	97182	3B	Kota Makassar	2017	2014	2019	2014	2018	2018	2018	2014	2012	2020	2020	2018
91	97230	3B	Kab. Badung	2017	2020	2017	2020	2017	2015	2014	2015	2018	2018	2020	2018
92	97240	3B	Kab. Lombok Tengah	2019	2011	2017	2019	2017	2020	2018	2014	2018	2013	2020	2014
93	97282	3B	Kab. Manggarai Barat	2017	2013	2020	2019	2017	2014	2017	2019	2017	2013	2020	2011
94	97502	3B	Kota Sorong	2017	2014	2017	2017	2014	2018	2016	2019	2014	2018	2018	2016
95	97260	4A	Kab. Sumbawa	2019	2013	2019	2014	2017	2014	2018	2014	2019	2012	2020	2014
96	97270	4A	Kota Bima	2015	2013	2017	2019	2017	2014	2020	2014	2015	2013	2020	2017
97	97300	4A	Kab. Sikka	2017	2012	2020	2020	2017	2017	2018	2015	2018	2012	2020	2018
98	97310	4A	Kab. Flores Timur	2015	2017	2013	2017	2017	2014	2014	2014	2018	2011	2016	2011
99	97320	4A	Kab. Alor	2015	2017	2013	2019	2019	2014	2014	2019	2018	2018	2020	2017
100	97340	4A	Kab. Sumba Timur	2017	2017	2018	2019	2017	2014	2018	2014	2018	2013	2012	2011
101	97372	4A	Kota Kupang	2015	2012	2013	2014	2019	2015	2014	2019	2015	2018	2020	2015
102	97378	4A	Kab. Rote Ndao	2015	2015	2013	2017	2017	2015	2014	2015	2018	2012	2016	2013
103	97380	4A	Kab. Sabu Raijua	2015	2015	2015	2020	2017	2015	2014	2019	2017	2014	2020	2018
104	96933	4B	Kota Surabaya	2017	2018	2018	2020	2017	2017	2020	2018	2018	2013	2018	2017
105	96937	4B	Kota Surabaya	2017	2017	2017	2020	2017	2017	2020	2015	2018	2013	2018	2016
106	96973	4B	Kab. Sumenep	2019	2019	2017	2019	2017	2020	2015	2013	2018	2012	2020	2018

4.7 Perbandingan Antara Data Multi-tahun, *Long-term Average* (LTA), dan TMY

Perbandingan tahunan antara nilai multi-tahun, rata-rata jangka panjang atau *Long-term Average* (LTA), dan TMY dari masing-masing elemen iklim berdasarkan nilai rata-rata di semua lokasi di Indonesia digambarkan pada Gambar 4.7. Tahun 2017 memiliki radiasi horisontal global rata-rata harian dengan nilai 4,9 kW/m², sedangkan tahun 2019 memiliki radiasi horisontal global tertinggi dengan nilai 5,4 kW/m². Rata-rata harian radiasi horisontal global TMY dan LTA ditemukan masing-masing 5,2 kW/m² dan 5,1 kW/m². Tahun 2011 adalah tahun terdingin dengan suhu udara rata-rata harian sebesar 26,6°C, sedangkan 2016 adalah tahun terpanas dengan suhu udara rata-rata harian 27,5°C. Suhu udara rata-rata harian TMY dan LTA masing-masing sama, yaitu 27,1°C.

Tahun 2017 memiliki radiasi normal langsung terendah dengan nilai harian rata-rata 3,1 kW/m², sedangkan 2019 memiliki radiasi normal langsung tertinggi dengan nilai rata-rata harian 3,7 kW/m². Radiasi normal langsung rata-rata harian TMY dan LTA ditemukan masing-masing 3,4 kW/m² dan 3,4 kW/m². Tahun 2020 adalah tahun dengan radiasi horisontal difus terendah dengan nilai harian rata-rata 2,59 kW/m², sedangkan 2015 adalah tahun dengan radiasi horisontal difus tertinggi dengan nilai rata-rata harian 2,64 kW/m². Radiasi horisontal difus rata-rata harian TMY dan LTA ditemukan masing-masing adalah sama, yaitu 2,63 kW/m².

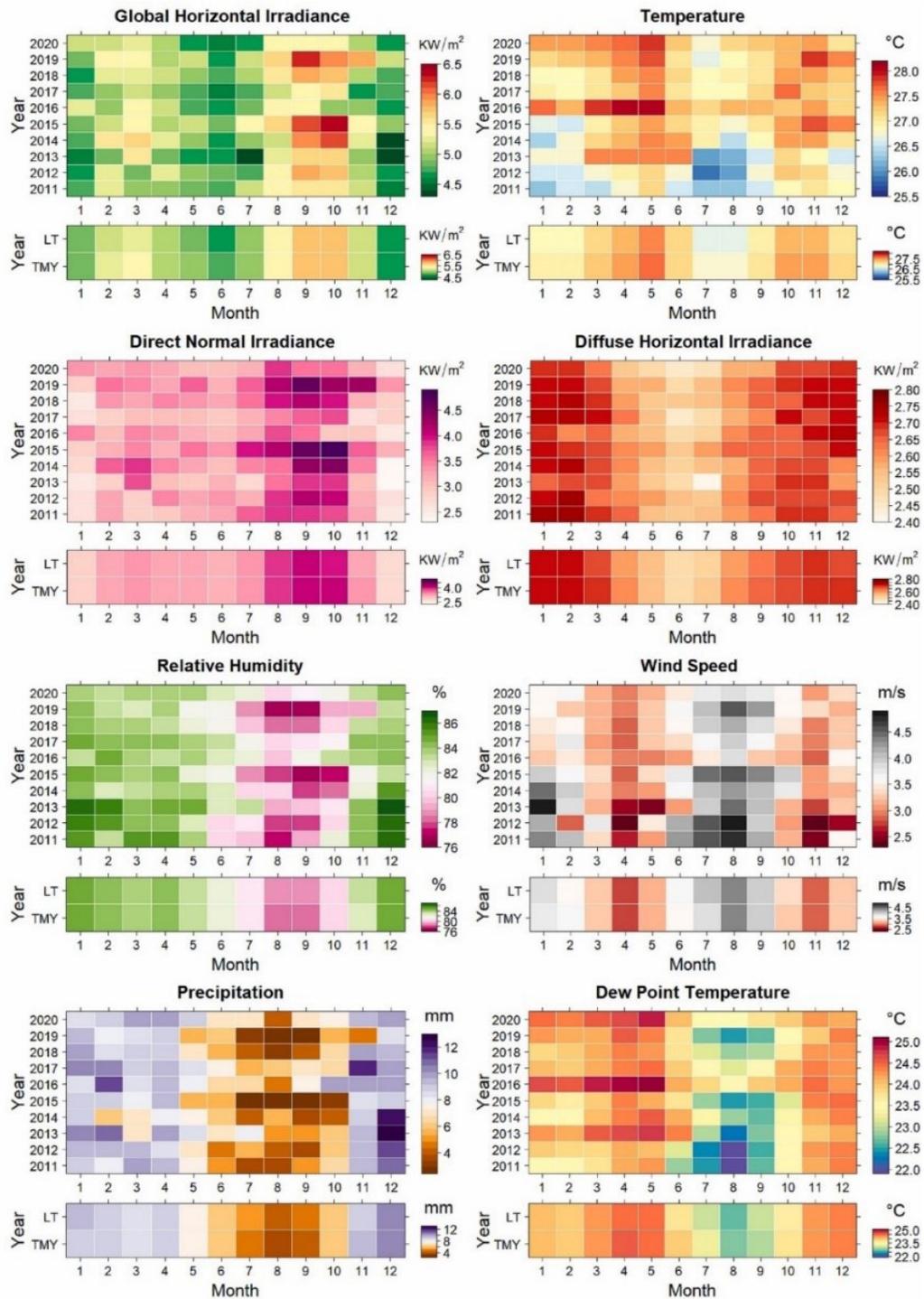
Tahun 2019 adalah tahun dengan kelembapan udara terendah dengan nilai rata-rata harian 81%, sedangkan 2013 adalah tahun dengan kelembapan udara tertinggi dengan nilai rata-rata harian 84%. TMY dan LTA memiliki rata-rata harian untuk kelembapan udara masing-masing 82,3%. Sementara itu, tahun 2016 adalah tahun dengan kecepatan angin terendah dengan rata-rata harian 3,2 m/s, sedangkan 2015 adalah tahun dengan kecepatan angin tertinggi dengan rata-rata harian 3,7 m/s. Rata-rata harian kecepatan angin TMY dan LTA masing-masing 3,5 m/s.

Berdasarkan analisis curah hujan multi-tahun, 2019 adalah tahun dengan curah hujan paling sedikit dengan nilai rata-rata harian 6,1 mm, sedangkan 2017 adalah tahun dengan curah hujan tertinggi dengan rata-rata harian 8,4 mm. Sementara itu, curah hujan harian rata-rata untuk TMY dan LTA masing-masing 7,2 mm dan 7,4 mm. 2011 adalah tahun dengan suhu titik embun terendah dengan rata-rata harian 23,4°C, sedangkan 2016 adalah tahun dengan suhu titik embun tertinggi dengan rata-rata harian 24,3°C. Sementara itu, rata-rata harian temperatur titik embun untuk TMY dan LTA masing-masing 23,9 dan 23,8°C.

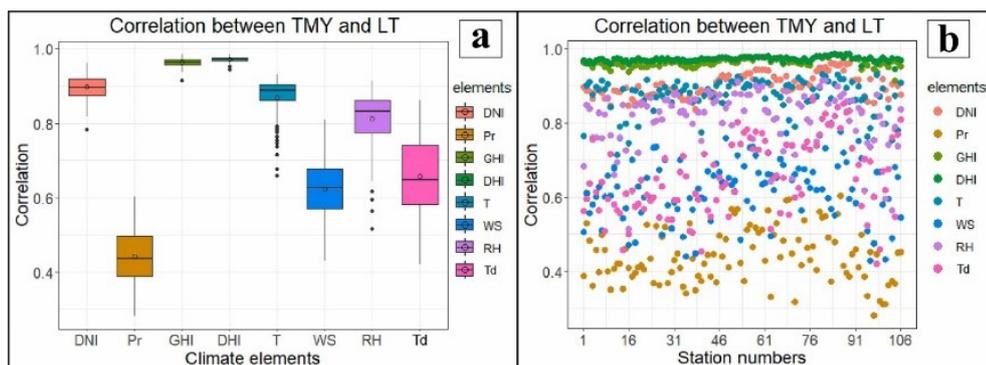
Terdapat kedekatan antara TMY dan nilai rata-rata jangka panjang untuk setiap elemen iklim. Selain itu, terdapat perbedaan pada saat yang sama dalam TMY dan variabilitas multi tahun di setiap elemen iklim. Informasi ini perlu dipertanggungjawabkan saat mendesain bangunan gedung.

Pemilihan TMY ditentukan berdasarkan kemampuan masing-masing elemen iklim untuk mengikuti pola LTA-nya pada skala jam, harian, bulanan, musiman, dan tahunan. Penting untuk membandingkan TMY dengan LTA menggunakan pola skala per jam, harian, bulanan, musiman, dan tahunan aktual dari semua elemen iklim, terutama radiasi matahari global dan suhu udara. Radiasi horisontal difus TMY memiliki korelasi tertinggi dengan LTA yang menunjukkan bahwa pola radiasi horisontal difus yang dihasilkan pada pembuatan TMY adalah yang paling dekat dengan rata-rata jangka panjang untuk 2011-2020 dibandingkan dengan elemen iklim lainnya (Gambar 4.8a).

Sementara itu, presipitasi TMY memiliki korelasi terendah dengan LTA. Distribusi nilai korelasi antara TMY dan LTA untuk setiap elemen iklim (Gambar 4.8b). Korelasi radiasi normal langsung berkisar antara 0,78-0,96 dengan rata-rata 0,89. Korelasi curah hujan berkisar antara 0,28-0,60 dengan rata-rata 0,44. Korelasi radiasi horisontal global berkisar antara 0,91-0,99 dengan rata-rata 0,96. Korelasi radiasi horisontal difus berkisar antara 0,95-0,99 dengan rata-rata 0,97. Korelasi suhu udara berkisar antara 0,66-0,93 dengan rata-rata 0,86. Korelasi kecepatan angin berkisar antara 0,43-0,81 dengan rata-rata 0,62. Korelasi kelembapan udara berkisar antara 0,51-0,92



Gambar 4.7 Perbandingan tahunan antara nilai multi-tahun, rata-rata jangka panjang atau *Long-term Average* (LTA), dan TMY dari masing-masing elemen iklim.

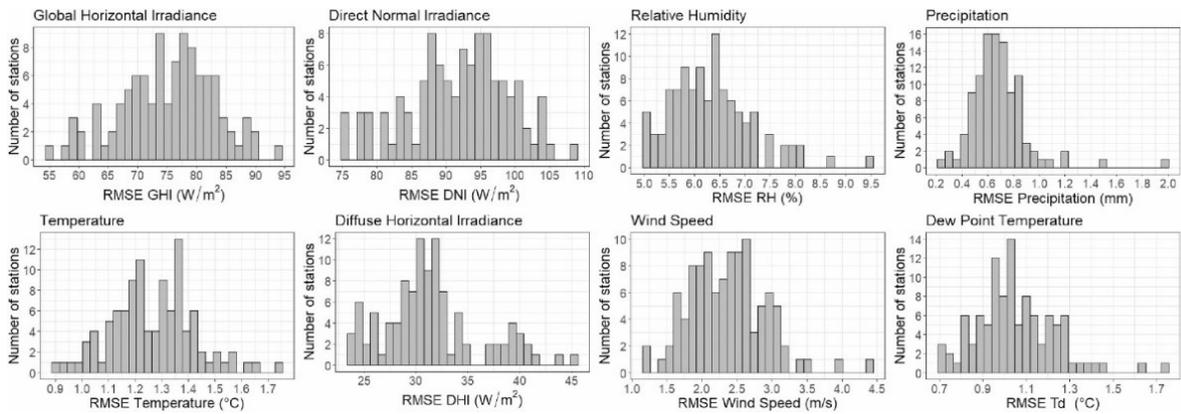


Gambar 4.8 Korelasi delapan elemen iklim antara TMY dan LT.

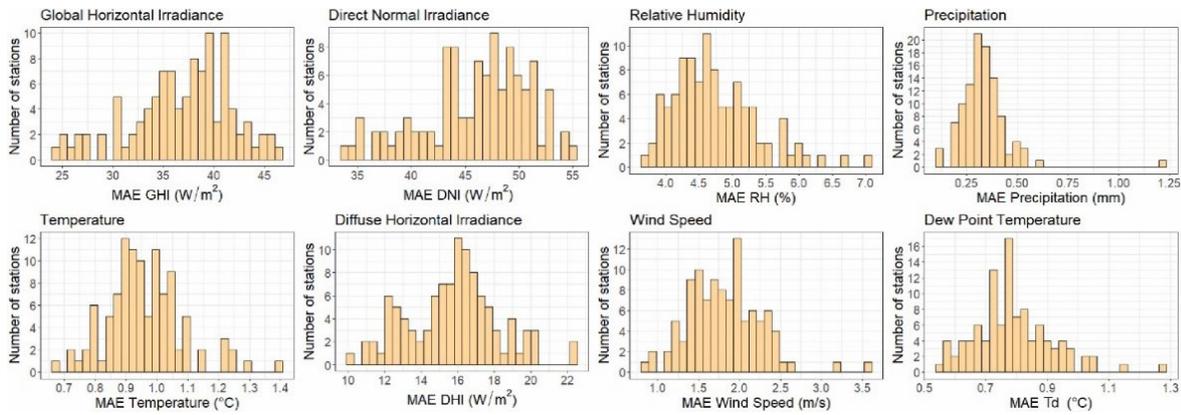
dengan rata-rata 0,81. Korelasi suhu titik embun berkisar antara 0,42-0,86 dengan rata-rata 0,65.

TMY per jam yang terdiri dari 12 TMM terpilih diverifikasi oleh RMSE, MAE, dan MSE untuk menilai akurasi setiap elemen iklim TMY terhadap distribusi frekuensi jangka panjang, yang dalam hal ini diwakili oleh LTA per jam (Gambar 4.9-11). Distribusi RMSE dari setiap elemen iklim bervariasi antar-lokasi. RMSE distribusi radiasi horisontal global berkisar antara 55-94 W/m²

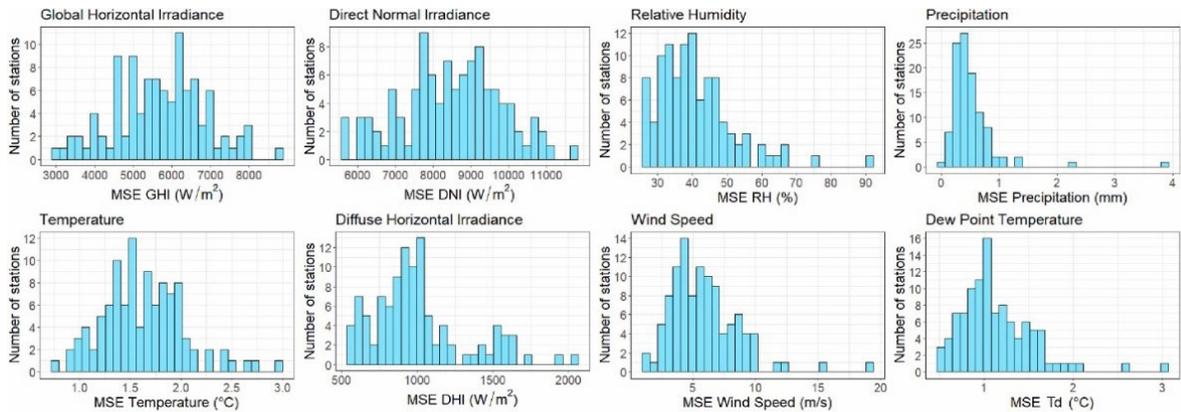
dengan rata-rata 75 W/m². RMSE distribusi suhu udara berkisar antara 0,9-1,7°C dengan rata-rata 1,3°C. RMSE distribusi radiasi normal langsung berkisar antara 75-108 W/m² dengan rata-rata 91 W/m². RMSE distribusi radiasi horisontal difus berkisar antara 24-45 W/m² dengan rata-rata 31 W/m². RMSE distribusi kelembapan udara berkisar antara 5-9% dengan rata-rata 6%. RMSE distribusi kecepatan angin berkisar antara 1,2-4,4 m/s dengan rata-rata 2,4 m/s. RMSE distribusi curah hujan berkisar antara 0,24-1,98 mm dengan



Gambar 4.9 Distribusi RMSE.



Gambar 4.10 Distribusi MAE.



Gambar 4.11 Distribusi MSE.

rata-rata 0,69 mm. RMSE distribusi suhu titik embun berkisar antara 0,7-1,7°C dengan rata-rata 1°C.

Sebagaimana RMSE, distribusi MAE juga berbeda untuk setiap elemen iklim di berbagai lokasi. MAE dari distribusi radiasi horisontal global berkisar antara 25-47 W/m² dengan rata-rata 37 W/m². MAE distribusi suhu udara berkisar antara 0,7-1,4°C dengan rata-rata 1°C. MAE distribusi radiasi normal langsung berkisar antara 34-55 W/m² dengan rata-rata 46 W/m². MAE distribusi radiasi horisontal difus berkisar antara 10-22 W/m² dengan rata-rata 16 W/m². MAE distribusi kelembapan udara berkisar antara 4-7% dengan rata-rata 5%. MAE distribusi kecepatan angin berkisar antara 0,9-3,6 m/s dengan rata-rata 1,8 m/s. Distribusi curah hujan berkisar antara 0,21-1,2 mm dengan rata-rata 0,3 mm. MAE distribusi suhu titik embun berkisar antara 0,6-1,3°C dengan rata-rata 0,8°C.

Distribusi MSE juga memperlihatkan kecenderungan yang sama dengan distribusi RMSE dan MAE. MSE dari distribusi radiasi horisontal global berkisar antara 3.017-8.805 W/m² dengan rata-rata 5.698 W/m². MSE distribusi suhu udara berkisar antara 0,8-3°C dengan rata-rata 1,6°C. MSE distribusi radiasi normal langsung berkisar antara 5.654-11.730 W/m² dengan rata-rata 8.478 W/m². MSE distribusi radiasi horisontal difus berkisar antara 559,7-2.039,4 W/m² dengan rata-rata 1.008,5 W/m². MSE distribusi kelembapan udara berkisar antara 26-90% dengan rata-rata 41%. MSE distribusi kecepatan angin berkisar antara 1,5-19,4 m/s dengan rata-rata 5,9 m/s. MSE distribusi curah hujan berkisar antara 0,059-3,918 mm dengan rata-rata 0,522 mm. MSE dari distribusi suhu titik embun berkisar antara 0,5-3°C dengan rata-rata 1,1°C.

4.8 Pola TMY di Setiap Zona Iklim

Pola tahunan elemen iklim bulanan berdasarkan pembuatan TMY di zona iklim yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4.12. Untuk menghitung pola bulanan TMY, delapan zona iklim yang berbeda dipertimbangkan dengan rata-rata representasi lokasi berikut: 41 lokasi zona iklim 1A (khatulistiwa), 20 lokasi zona iklim 1B (sub-khatulistiwa), dua

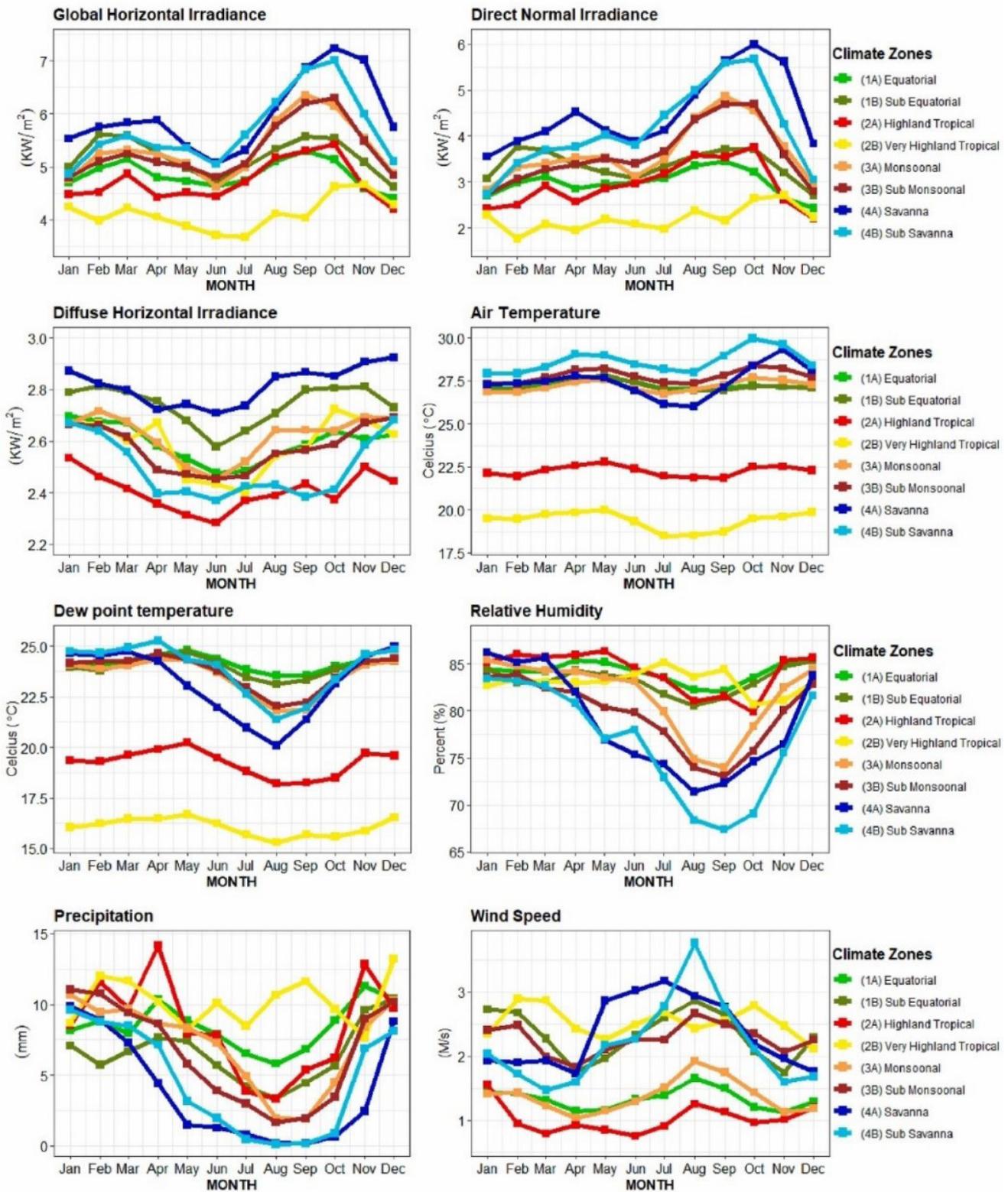
lokasi zona iklim 2A (dataran tinggi), satu lokasi zona iklim 2B (pegunungan tinggi), 12 lokasi zona iklim 3A (monsun), 17 lokasi zona iklim 3B (sub-monsun), sembilan lokasi zona iklim 4A (sabana), dan tiga lokasi zona iklim 4B (sub-sabana).

Pola TMY dapat menjelaskan dengan baik karakteristik tahunan iklim Indonesia di setiap zona iklim. Berdasarkan TMY, zona iklim 4A dan 4B menerima lebih banyak radiasi matahari daripada enam zona iklim lainnya. Radiasi horisontal global di zona iklim 4A dan 4B mencapai puncaknya selama bulan September-Oktober dengan nilai masing-masing 7,2 kW/m² dan 7,0 kW/m². Demikian pula, radiasi normal langsung juga mencapai puncaknya selama periode ini dengan nilai masing-masing 6,0 kW/m² dan 5,7 kW/m².

Suhu udara di zona iklim 1A dan 1B tidak jauh berbeda dalam siklus tahunannya, dengan rata-rata harian masing-masing berkisar antara 27,0-27,6°C dan 26,9-27,8°C. Sementara itu, zona iklim 2A dan 2B menunjukkan suhu udara yang relatif rendah sepanjang tahun. Zona iklim 3A, 3B, 4A, dan 4B, terutama yang terletak di selatan khatulistiwa, secara geografis mengalami sedikit penurunan suhu udara dari bulan Juni hingga September.

Dari parameter kecepatan angin, zona iklim 1A yang terletak di wilayah khatulistiwa memiliki angin lemah dan lembap secara keseluruhan, dengan rata-rata bulanan untuk RH dan kecepatan angin masing-masing 82,1-85,4% dan 1,1-1,7 m/s. Zona iklim 3B, 4A, dan 4B memiliki siklus tahunan yang ditandai dengan penurunan kelembapan udara di bawah 80% dari bulan Juni-Oktober, yang bertepatan dengan kecepatan angin yang relatif kuat saat itu, yaitu di atas 2 m/s.

Zona iklim 1A dan 1B memiliki pola curah hujan dengan dua puncak terjadi pada bulan Oktober-November dan Maret-Mei. Pola curah hujan TMY di zona iklim 3A, 3B, 4A, dan 4B menunjukkan puncaknya selama musim hujan, biasanya diamati pada bulan November-Maret. Di sisi lain, zona iklim 4A dan 4B memiliki musim kemarau yang lebih panjang dan musim hujan yang pendek.



Gambar 4.12 Pola tahunan setiap elemen iklim TMY dalam berbagai zona iklim.

4.9 Kesimpulan

Berdasarkan metode yang diusulkan untuk mengembangkan TMY berdasarkan data pengamatan yang relatif terbatas, formulasi koreksi bias dengan pemetaan kuantil untuk elemen suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin terbukti efektif meningkatkan akurasi dataset analisis ulang ERA5. Formula ini secara efektif mengurangi distribusi setiap bias lebih kecil. Bias suhu udara asli $-4,5^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $2,7^{\circ}\text{C}$ dikurangi ke kisaran yang lebih sempit $-0,014^{\circ}\text{C}$ hingga $0,005^{\circ}\text{C}$. Bias kelembapan udara yang awalnya -6% hingga 10% menyempit menjadi $-0,32\%$ sampai $0,07\%$. Distribusi bias kecepatan angin yang awalnya berkisar antara -4 m/s sampai 2 m/s dikurangi hingga menjadi $-0,02$ m/s sampai dengan $0,35$ m/s. Dataset analisis ulang ERA5 yang dikoreksi bias digunakan untuk mengisi nilai pengamatan yang hilang bervariasi antara $29,96\%$ dan $50,19\%$ dari total data pengamatan per jam untuk elemen suhu udara, kelembapan udara, dan kecepatan angin yang dikumpulkan selama periode 2011-2020 dalam proses pengembangan TMY.

Metode Sandia berdasarkan pembobotan statistik FS yang dimodifikasi untuk radiasi horisontal global, radiasi normal langsung, radiasi horisontal difus, suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, kelembapan udara, dan suhu titik embun telah diterapkan untuk mengembangkan TMY di 106 lokasi yang terletak di delapan zona iklim Indonesia. Pemilihan tahun untuk TMM bervariasi secara signifikan di setiap lokasi dan kondisi iklim setempat memiliki pengaruh besar pada variasi TMM yang dihasilkan di setiap zona iklim.

Setelah melalui proses verifikasi, TMY yang dihasilkan dapat menangkap dengan cermat pola distribusi jangka panjang, terutama untuk radiasi horisontal global dan suhu udara. Hasil tersebut berdasarkan nilai korelasi, RMSE, MAE dan MSE antara TMY dan LTA dengan rata-rata $0,96$; 75 W/m^2 ; 37 W/m^2 ; dan 5698 W/m^2 untuk radiasi horisontal global dan $0,86$; $1,3^{\circ}\text{C}$; 1°C ; dan $1,6^{\circ}\text{C}$ untuk suhu udara.

Selanjutnya, dataset TMY yang dihasilkan akan sangat bermanfaat untuk berbagai aplikasi, terutama dalam simulasi kinerja bangunan gedung seperti desain bangunan hemat energi dan desain arsitektur responsif iklim di masa depan.

BAB 05

**MEMBANGUN
BERSAMA IKLIM:
STRATEGI
DESAIN PASIF
PURWARUPA
RUMAH SUSUN
HEMAT ENERGI
KOTA TEGAL**



5.1 Pendahuluan

Perumahan terjangkau telah menjadi tantangan besar bagi banyak negara Selatan yang mengalami pertumbuhan populasi yang besar. Di Indonesia, yang diproyeksikan memiliki populasi sebesar 331 juta orang, di mana 72% akan tinggal di daerah perkotaan pada tahun 2050, salah satu tantangan utama bagi pemerintah adalah menyediakan perumahan terjangkau bagi penduduk yang terus tumbuh dan urbanisasi.

Untuk memenuhi kebutuhan perumahan masyarakat, kebijakan pemerintah telah mengarah pada pembangunan rumah susun atau rusun, yang pada dasarnya berarti bangunan apartemen berbiaya rendah di semua kota besar di Indonesia. Rusun diklasifikasikan menjadi Rusunami yang dikembangkan oleh perusahaan swasta untuk dijual dan Rusunawa yang dikembangkan oleh pemerintah untuk tujuan sewa.

Sebagian besar rusun ini memiliki koridor ganda yang bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan area. Di daerah tropis khatulistiwa seperti Indonesia, di mana fasad yang menghadap ke selatan dan utara mendapatkan radiasi matahari sepanjang tahun, radiasi matahari tidak diinginkan dalam bangunan tropis. Oleh karena itu, orientasi bangunan terhadap pencahayaan tidak diprioritaskan. Desain rusun terutama berfokus untuk menampung jumlah unit maksimum yang mungkin di lahan yang tersedia.

Kondisi lingkungan yang buruk, seperti kurangnya pencahayaan alami, kenyamanan termal, ventilasi, dan kualitas udara dalam ruangan, sering kali menjadi masalah dalam desain. Para penghuni unit rusun dengan koridor ganda yang berada di sisi bangunan yang tidak terkena angin mungkin mengalami ventilasi silang yang tidak memadai. Khususnya dalam rusunawa, penyediaan ventilasi alami dapat meningkatkan kenyamanan termal, efisiensi energi, dan kesehatan penghuni.

Ventilasi dianggap sebagai salah satu kebutuhan kenyamanan paling penting karena kelembapan yang tinggi di lokasi tropis, yang meningkatkan efisiensi penguapan keringat dan mengurangi ketidaknyamanan akibat kelembapan pada kulit dan pakaian. Untuk meningkatkan kinerja ventilasi

silang bahkan di sisi bangunan yang tidak terkena angin, sangat penting untuk mengidentifikasi teknik desain pasif untuk rusun berbiaya rendah dengan koridor ganda.

Sejak tahun 2014, Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman (Puskim) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melakukan penelitian untuk menghasilkan teknik pendinginan pasif pada rusun, di mana hasil penelitian tersebut sudah disajikan dalam Bab 1-8. Pada tahun 2017, Puskim menginisiasi kerja sama penelitian dengan Hiroshima University Jepang untuk pengembangan rumah susun untuk kelas menengah (rusunami) hemat energi dengan menerapkan teknik hybrid berdasarkan hasil penelitian sebelumnya. Salah satu tujuan kerja sama penelitian itu adalah mengintegrasikan hasil penelitian sebelumnya dan menghasilkan model desain pasif untuk rusun yang sesuai dengan iklim tropis panas-lembap Indonesia.

Hasil-hasil penelitian tersebut dan juga serta hasil penelitian lanjutan dari kegiatan sebelumnya diterjemahkan ke dalam sebuah konsep desain rusun dan diimplementasikan ke dalam sebuah purwarupa. Purwarupa tersebut dibangun di tempat yang memiliki kondisi iklim panas-lembap sebagaimana iklim Indonesia pada umumnya, dan memiliki ruang yang lebih terbuka untuk proses evaluasinya. Kota Tegal di Jawa Tengah dipilih sebagai lokasi pengembangan purwarupa tersebut, selain karena pertimbangan di atas juga karena dukungan Pemerintah Kota (Pemkot) Tegal yang sangat besar dalam kegiatan ini.

Kegiatan ini sepenuhnya dibiayai oleh Nichias Corp., sebuah perusahaan insulasi dari Jepang, dan didukung oleh perusahaan Jepang lainnya seperti



Gambar 5.1 Peresmian purwarupa Rusun eksperimen di Kota Tegal.

YKKAP Inc., Panasonic, Asahimas Glass. Dari pihak Indonesia, kegiatan ini mendapat dukungan dari PT. LAPI ITB, PT. Beton Elemindo Putra (BEP), dan PT. Matrix. Sejak dibangun pada awal tahun 2019, purwarupa rusun tersebut selesai konstruksinya pada akhir tahun 2019 dan diresmikan oleh Walikota Tegal bersama Plt. Kepala Badan Litbang Kementerian PUPR pada tanggal 12 Maret 2020.

5.2 Strategi Desain Pasif dalam Desain

Gedung eksperimental rusun hemat energi di Kota Tegal dibangun menggunakan data dari studi-studi sebelumnya. Pertama, tata letak umum bangunan dikembangkan berdasarkan studi tipologi pada apartemen kelas menengah yang ada, yaitu Rusunami. Kedua, konsep pendinginan pasif dalam bangunan ini mencerminkan hasil dari beberapa studi yang relevan seperti yang diterapkan pada bangunan vernakular, yaitu bangunan kolonial Belanda, strategi pendinginan pasif untuk apartemen kelas menengah di Indonesia, ruang *void* vertikal, dan sistem pendingin lantai dengan bahan perubahan fase (*Phase Change Material* atau PCM).

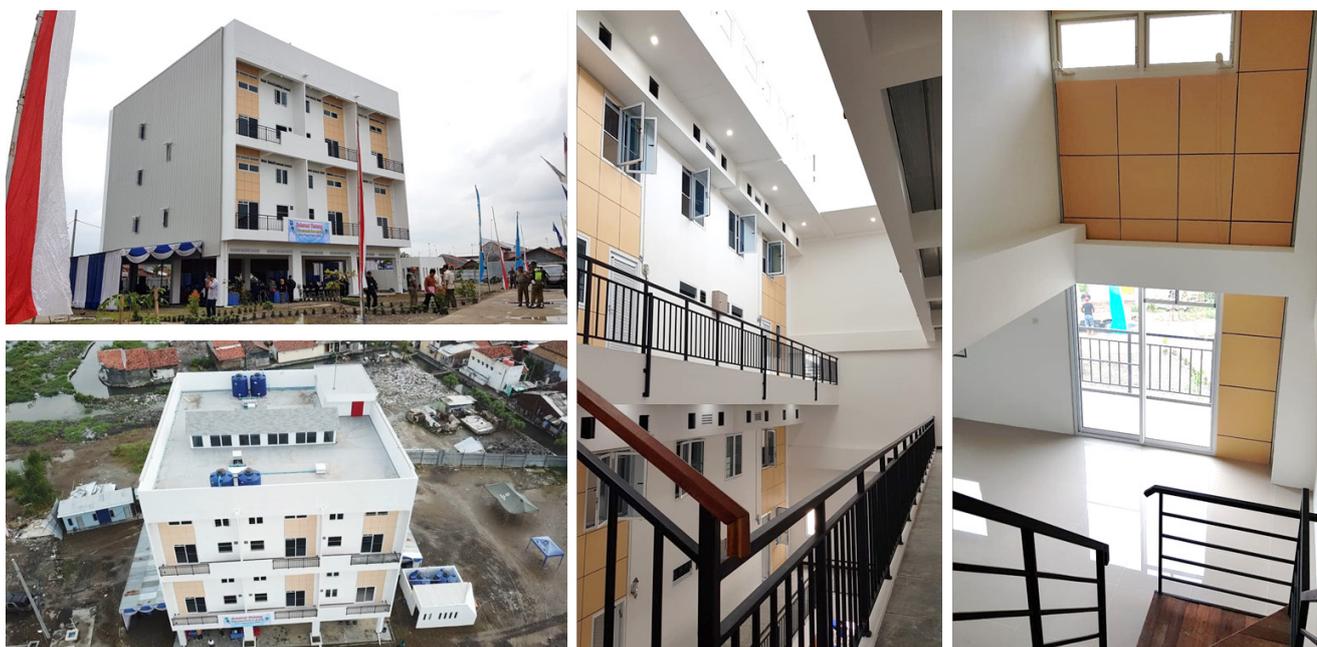
Ketiga, analisis iklim dilakukan untuk mengidentifikasi pola angin yang berlaku di lokasi yang kemudian digunakan sebagai parameter

input dari simulasi komputasi dinamika fluida (CFD). Simulasi CFD bertujuan menentukan konfigurasi bangunan yang optimal (misalnya, konfigurasi *void* vertikal) dan desain jendela-pintu untuk mengoptimalkan ventilasi dan strategi pendinginan pasif dari unit-unit tersebut.

Perancangan purwarupa rusun menggunakan prinsip bioklimatik, yaitu prinsip perancangan bangunan yang responsif terhadap kondisi iklim setempat. Secara umum, prinsip ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu mencegah panas masuk ke dalam ruangan (mengurangi *heat gain*), dan mengurangi panas yang ada di dalam ruangan (meningkatkan *heat loss*).

Sebagai sebuah bangunan bioklimatik, langkah awal yang dilakukan adalah mengkaji iklim mikro Kota Tegal. Meskipun secara umum memiliki iklim panas-lembap, iklim mikro Kota Tegal dapat sangat berbeda. Kondisi iklim mikro Kota Tegal dianalisis untuk menguji kemungkinan penggunaan teknik pendinginan pasif yang sesuai. Data iklim tersebut berupa data iklim standar IWEC2 (*International Weather for Energy Calculation ver. 2*) dari ASHRAE, yang menyediakan data iklim standar untuk simulasi energi bangunan.

Data iklim Kota Tegal selama 20 tahun dikumpulkan dan dianalisis untuk melihat pergerakan relatif matahari, jumlah radiasi matahari, profil suhu udara dan kelembapan udara, pola pergerakan



Gambar 5.2 Purwarupa rusun eksperimen di Kota Tegal.

angin dan besar kecepatannya. November merupakan bulan terpanas dalam satu tahun dengan suhu udara rata-rata sekitar 28,4°C sementara suhu terendah adalah bulan Februari dengan rata-rata sekitar 26,1°C. Profil kecepatan angin di Tegal dibagi ke dalam dua periode, yaitu musim kemarau dari April ke Desember dan musim hujan dari Januari ke Maret.

Orientasinya ditentukan berdasarkan iklim mikro untuk meminimalkan penyerapan panas dan memaksimalkan kecepatan angin dalam ruangan. Berdasarkan pola arah angin dan diagram *sun-path*, orientasi optimum untuk rusun eksperimental adalah 22,5° dari utara, di mana salah satu fasad unit rusun menghadap timur laut (NNE) (Gambar 5.3). Dengan orientasi tersebut, bangunan menerima angin dari sisi depan dan belakang dengan sudut yang sesuai setidaknya selama musim kemarau dan di saat yang sama meminimalkan perolehan panas dari radiasi matahari.

Dinding sisi barat dan timur serta atap menerima radiasi matahari paling besar, sehingga bukaan pada kedua sisi tersebut diminimalkan serta dinding yang ada di kedua sisi tersebut dilengkapi dengan bahan insulasi. Atap dilengkapi dengan bahan insulasi dan warna yang reflektif agar panas dari radiasi matahari terpantul dan tidak merambat ke dalam ruangan.

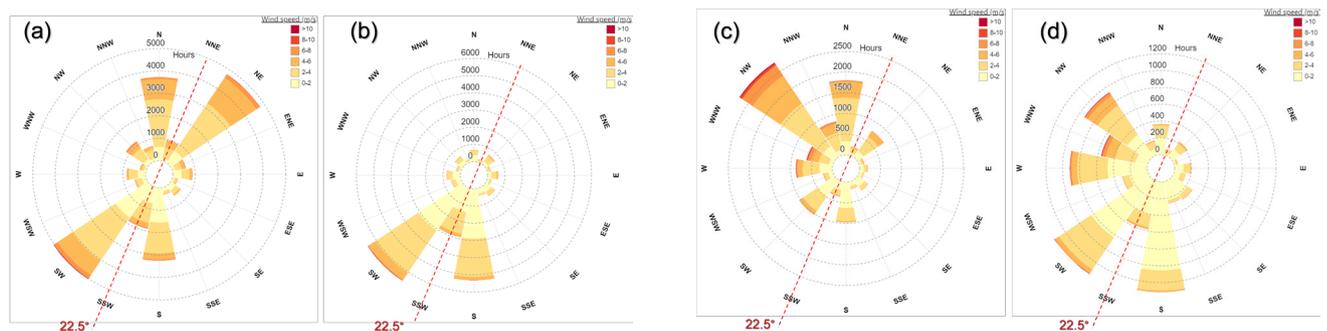
Teknik selanjutnya untuk mencegah radiasi matahari masuk melalui jendela dengan merancang peneduh yang sesuai. Matahari di Kota Tegal lebih banyak berada di belahan bumi utara, sehingga sisi utara memiliki paparan radiasi matahari yang relatif tinggi bila dibandingkan sisi selatan. Oleh karena itu, bukaan di sisi utara dilindungi oleh beranda yang lebarnya dihitung berdasarkan

sudut jatuh matahari pada kondisi maksimum. Di sisi yang lain, desain tersebut memungkinkan ruangan menerima cahaya langit sehingga pencahayaan alami dapat dimaksimalkan.

Karena kelembapan udara di daerah tropis sangat tinggi, ventilasi dianggap sebagai salah satu persyaratan kenyamanan yang paling penting dengan meningkatkan efisiensi penguapan keringat dan menghindari ketidaknyamanan akibat kelembapan pada kulit dan pakaian. Dua strategi ventilasi yang berbeda untuk siang hari dan malam hari digunakan (Gambar 5.4). Pada siang hari, jendela di kamar tidur dibuka sepenuhnya untuk menurunkan tingkat kelembapan udara sehingga panas laten (*latent heat*) dapat dikurangi. Sebaliknya, ruang tamu ditutup sepenuhnya pada siang hari untuk mencegah panas masuk melalui infiltrasi udara. Sebaliknya, pada malam hari jendela kamar tidur ditutup sepenuhnya sementara jendela di ruang keluarga dibuka untuk mendapatkan efek pendinginan struktur.

Ada dua teknik utama yang digunakan, yaitu ventilasi silang dan ventilasi apung (*stack-effect ventilation*). Ventilasi silang diperoleh dengan menggunakan bukaan inlet dan outlet di kedua sisi yang berseberangan. Jendela dan pintu dirancang sedemikian rupa sehingga efek ventilasi ini dapat diperoleh sekaligus menjaga privasi penghuni.

Bukaan atas dan bawah lebih efektif dalam mendistribusikan udara, sehingga kedua bukaan tersebut digunakan di setiap unit rusun selain bukaan utama (jendela). Bukaan atas dan bawah juga efektif mendinginkan struktur bangunan (plat lantai dan langit-langit serta dinding) sehingga struktur tersebut dapat berperan sebagai *heat sink* ketika siang hari. Efisiensi pendinginan ditingkatkan dengan memasang lorong angin di



Gambar 5.3 Profil tipikal kecepatan angin dan arahnya di Kota Tegal pada musim kemarau di (a) siang hari dan (b) malam hari dan pada musim hujan di (c) siang hari dan (d) malam hari

langit-langit yang dibantu oleh *exhaust fan* untuk ventilai paksa (*forced-ventilation*) jika kecepatan angin di luar rendah. Ventilasi paksa juga digunakan di setiap unit rusun untuk mengantisipasi kondisi iklim yang tidak menentu.

Ventilasi apung dimanfaatkan pada *void* di dalam purwarupa. Semakin kecil lebar *void*, semakin besar laju ventilasinya (Gambar 5.5). Kecepatan angin yang lebih tinggi diperoleh ketika angin masuk ke bangunan melalui sisi depan pada sudut yang sesuai. Dengan demikian, lebar *void* yang digunakan adalah 1,5m.

Kecepatan angin di *void* dimaksimalkan dengan memasang sirip angin (*wind fin*) di lantai dasar yang berfungsi menangkap angin dan mengarahkannya ke atas sehingga efisiensi ventilasi apung juga ikut meningkat. Sementara itu, jendela penangkap angin (*wind catcher*) dipasang di setiap unit rusun untuk mengarahkan angin masuk ke dalam unit hunian sehingga distribusi pergerakan udara lebih merata. (Gambar 5.7).

Selama musim hujan, angin bertiup dari arah diagonal sehingga penangkap angin dipasang di sebelah jendela agar efeknya lebih maksimal. Semakin lebar penangkap angin, semakin baik



Gambar 5.4 Konsep strategi ventilasi pada (a) malam hari dan (b) siang hari.

	VOID 1,5m	VOID 3m (Default)	VOID 4,5m	
Front wind : • Highest velocity	1.72 2.21 2.21 1.72 1.01 1.03 1.03 1.01	1.78 2.27 2.27 1.78 0.83 0.90 0.90 0.83	1.80 2.28 2.28 1.80 0.76 0.85 0.85 0.76	Lower (significant)
Side wind • Smallest velocity	0.89 0.31 0.12 0.32 0.89 0.31 0.11 0.31	0.90 0.34 0.06 0.29 0.90 0.34 0.05 0.28	0.92 0.38 0.06 0.27 0.92 0.38 0.06 0.27	(Not significant)
Diagonal wind • More even velocity	1.58 1.28 0.95 0.66 1.09 1.07 0.92 0.87	1.56 1.26 0.90 0.58 0.99 0.94 0.88 0.94	1.53 1.23 0.87 0.50 0.93 0.82 0.79 0.86	Slightly Lower (significant)

Gambar 5.5 Konsep strategi ventilasi pada (a) malam hari dan (b) siang hari. Simulasi efek *void* terhadap kecepatan angin dan arahnya untuk purwarupa rusun dengan menggunakan CFD (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia).

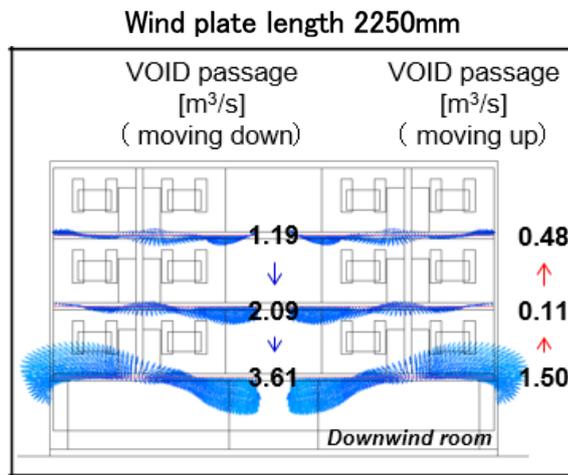
mengalirkan aliran udara ke dalam unit (Gambar 5.7). Meskipun secara teori ini bermanfaat, tapi secara praktik sulit karena menghalangi koridor atau jalur pejalan kaki. Penggunaan dan desain jendela penangkap angin perlu dilakukan lebih berhati-hati.

5.3 Desain Rusun

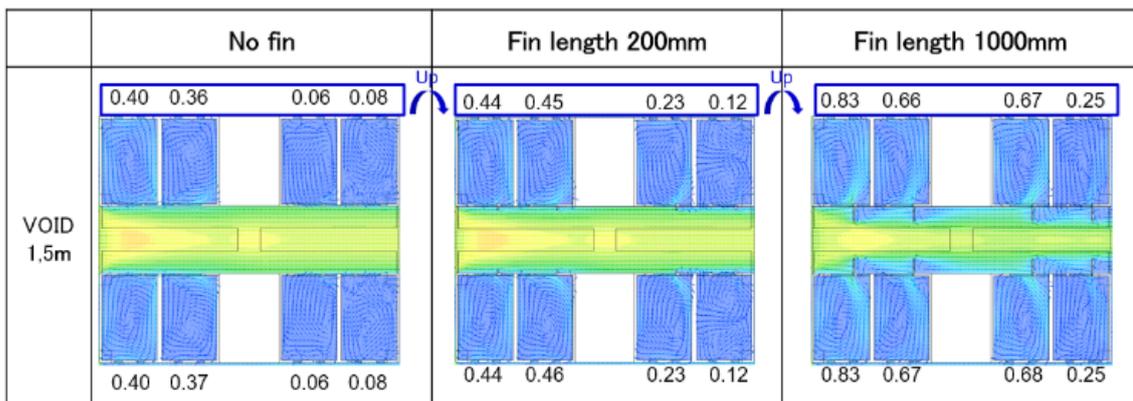
Secara umum, desain terdiri dari ruang vertikal tertutup di antara dua sisi koridor yang memisahkan bangunan menjadi dua bagian, open pilotis, dan sirip angin di area pilotis. Void vertikal dengan atap tertutup akan memberikan tingkat ventilasi yang lebih unggul, dengan menyebarkan tekanan angin ke sisi bangunan yang tidak terkena angin dan akan memicu ventilasi alami di dalam unit. Selain itu, sirip angin di area pilotis digunakan untuk menyalurkan angin ke atas dan masuk ke dalam ruang vertikal tersebut.

Sebagai cerminan hasil studi tipologi rusun, inti tunggal dengan bangunan berbentuk I diadopsi sebagai bentuk bangunan gedung. Beton bertulang digunakan sebagai struktur utama bangunan rusun, sementara bata ringan atau *autoclaved aerated concrete* (AAC) digunakan untuk dinding luar. Baik fasad yang menghadap utara maupun selatan mendapat radiasi matahari sepanjang tahun, sehingga balkon digunakan sebagai peneduh. Untuk melindungi unit hunian dari dampak termal, bahan insulasi (seperti *rockwool*, yang memiliki konduktivitas termal sekitar 0,035 W/mK) dipasang di dinding luar yang menghadap barat dan timur.

Gambar 5.8 menunjukkan denah bangunan dan penampang bangunan purwarupa rusun. Ukuran bangunan adalah 18,4 m x 21,6 m dengan tinggi atap m. Bangunan ini memiliki koridor ganda dengan enam unit hunian di kedua sisi. Ada dua jenis unit hunian yang berbeda. Satu sisi



Gambar 5.6 Simulasi efek sirip angin yang dipasang pada void untuk ventilasi apung (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia).



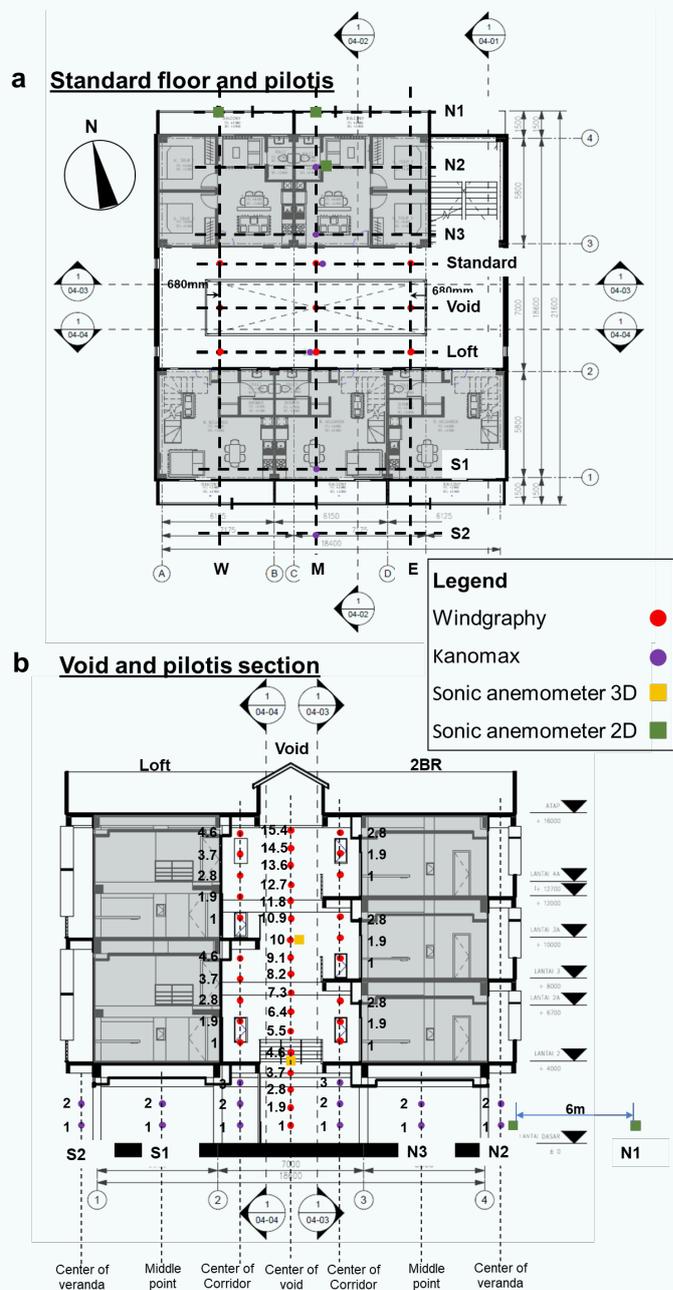
Gambar 5.7 Simulasi efek jendela penangkap angin yang dipasang di setiap unit hunian (simulasi dilakukan oleh YKK AP R&D Center Indonesia).

memiliki desain unit standar dengan dua kamar tidur dengan ukuran kamar tidur masing-masing 2,9 m x 3 m, satu toilet dan kamar mandi gabungan 1,4 m x 2,4 m, area ruang tamu dan ruang makan digabungkan dengan ukuran 6 m x 2,6 m dan dapur dengan dimensi 3,5 m x 1,5 m. Tinggi lantai ke plafon unit adalah 3 m. Terdapat dua unit standar per lantai dengan total tiga lantai. Luas area ruang tamu setiap unit adalah 41,6 m² dengan tambahan area balkon 10,75 m².

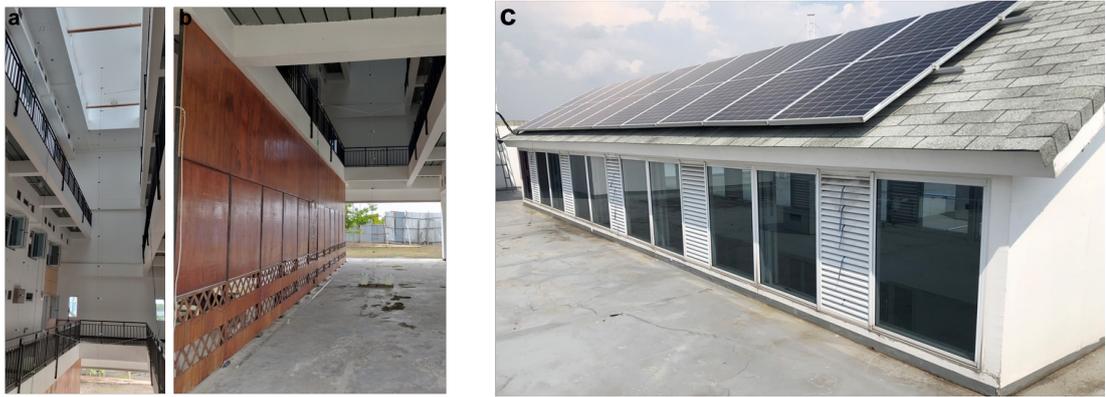
Sisi lain memiliki unit *loft* dengan tinggi lantai ke plafon 5.1 m. Ada lantai *loft* pada ketinggian 2,6 m yang dapat diakses dengan tangga di dalam unit. Tinggi lantai *loft* ke plafon adalah 2,5 m. Unit ini memiliki satu ruang tamu seluas 6 m x 3,2 m, ruang makan dan dapur berukuran 3,4 m x 3 m, satu toilet dan kamar mandi gabungan berukuran 2,5 m x 1,8 m, dan dua kamar tidur yang terletak di area loteng. Ukuran kamar tidur utama yang terletak di dinding luar adalah 3,2 m x 2,8 m dan kamar tidur kedua adalah 2,3 m x 3 m. Luas total lantai unit adalah 35,5 m² dengan tambahan area loteng 18,5 m² dan ukuran balkon 9,2 m².

Terdapat ruang vertikal dengan lebar 2,85 m yang memisahkan dua sisi bangunan (Gambar 5.9a). Area pilotis yang memiliki ketinggian 4 m dan dibiarkan terbuka untuk ventilasi alami yang lebih baik. Terdapat sirip angin dengan panjang 12 m dan tinggi 4 m di area pilotis untuk mengarahkan angin ke ruang vertikal (Gambar 5.9b), serta *penthouse* di tingkat atap bangunan dengan dimensi 3,05 m x 12,05 m dan tinggi 2,4 m (Gagar 5.9c).

Koridor dibuat setengah terbuka dan berdekatan dengan *void* vertikal. Penting untuk menjaga suhu udara di koridor yang berdekatan lebih rendah untuk menjaga suhu udara dalam ruangan melalui ventilasi alami. Jendela dan pintu dirancang khusus untuk memaksimalkan kinerja ventilasi dalam unit selain strategi ventilasi yang digunakan dalam tata letak dan konfigurasi bangunan, termasuk penggunaan *insect screen* yang dapat dioperasikan, jeruji pengaman, dan jendela ventilasi kecil.



Gambar 5.8 (a) denah dan (b) potongan purwarupa rusun hemat energi Kota Tegal dan titik-titik lokasi pengukuran. W adalah barat, M adalah tengah, dan E adalah timur.



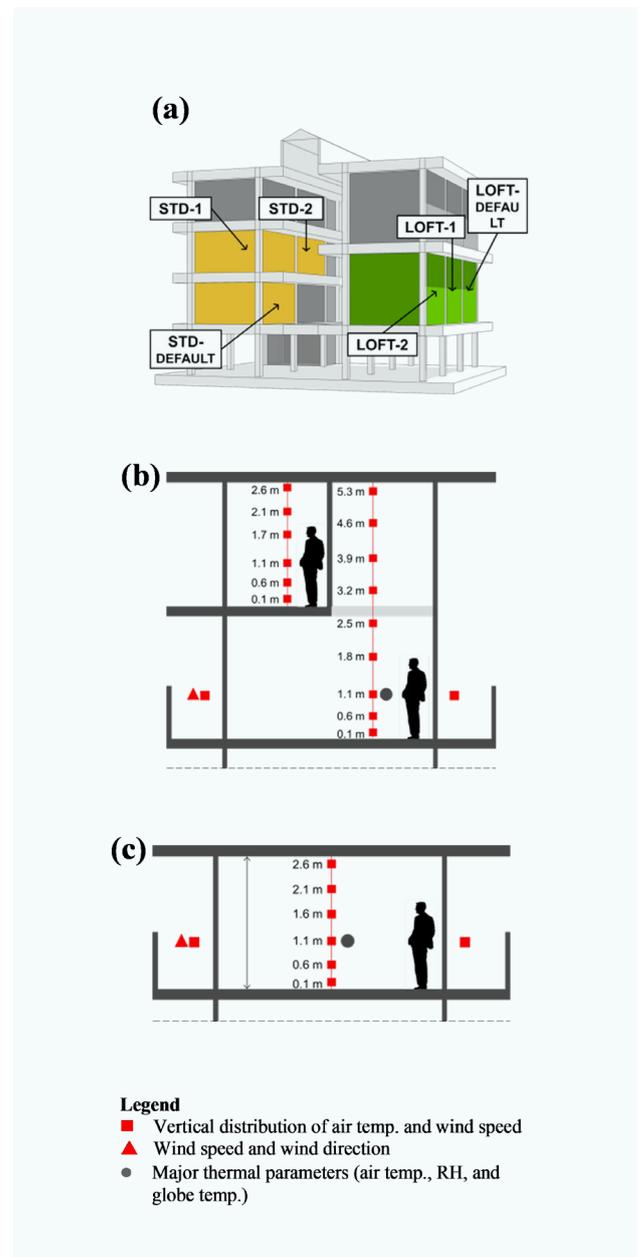
Gambar 5.9 Gambaran purwarupa rusun hemat energi Kota Tegal: (a) void vertikal, (b) ruang pilotis dan sirip angin, dan (c) penthouse di atas void vertikal.

5.4 Pengukuran Lapangan

Pengukuran lapangan dilakukan dengan tujuan yang pertama untuk menyelidiki lingkungan termal dalam ruangan dari unit hunian di bawah kondisi ventilasi alami yang berbeda, serta kedua untuk mengevaluasi aliran angin dalam ruang vertikal dengan perubahan bukaan dan ukuran sirip angin. Untuk tujuan pertama, tiga unit standar dan *loft* masing-masing dipilih sebagai unit pengukuran, termasuk satu unit *default* untuk setiap jenis. Unit *default* meniru unit apartemen yang ada, terutama dalam hal konfigurasi bukaan.

Parameter kenyamanan termal utama seperti suhu udara, kelembaban udara, kecepatan udara, dan suhu bola hitam diukur di tengah ruangan (pada ketinggian 1,1 m di atas lantai) dari unit yang dipilih serta di balkon dan koridor (Gambar 1). Pengukuran lapangan dilakukan di unit yang tidak dihuni di bawah empat strategi ventilasi alami, yaitu, ventilasi siang (*daytime ventilation*), ventilasi malam (*night ventilation*), ventilasi penuh (*full-day ventilation*), dan tanpa ventilasi (*no ventilation*).

Pada ventilasi siang, jendela dan bukaan lainnya dibuka dari pukul 6:00 hingga 18:00, sedangkan pada ventilasi malam sebaliknya dari pukul 18:00 hingga 6:00. Pengukuran untuk setiap kondisi ventilasi alami dilakukan selama 10-12 hari. Selama pengukuran, kondisi luar ruangan, termasuk suhu udara, kelembaban udara, tekanan udara, kecepatan angin, arah angin, radiasi matahari, dan curah hujan, dicatat oleh stasiun cuaca di atap bangunan. Lokasi pengukuran diperlihatkan dalam Gambar 5.10.



Gambar 5.10 (a) lokasi pengukuran di enam unit hunian dan titik pengukuran parameter termal di unit (b) *loft* dan (c) standar.

Untuk tujuan kedua, digunakan lima anemometer ultrasonik, yang terdiri dari dua anemometer ultrasonik 3D dan tiga anemometer 2D. Selain itu, sebanyak 122 anemometer *hot-wire* digunakan untuk mengukur kecepatan angin di *void* vertikal dan area pilotis, yang terdiri dari 108 sensor *windgraphy* (sensor kecepatan angin dari KOA Corporation) dan 14 sensor Kanomax. Sensor ditempatkan dalam tiga bidang yang tegak lurus terhadap fasad bangunan Barat (W), Tengah (M) dan Timur(E)(Gambar 3a). Sensor kecepatan angin dan arah angin ditempatkan di persimpangan bidang-bidang ini pada berbagai ketinggian seperti yang ditunjukkan (Gambar 3b). Area pilotis menggunakan anemometer *hot-wire*, sedangkan *void* vertikal menggunakan sensor *windgraphy*. Sensor *windgraphy* ditempatkan di koridor unit standar dan *loft* serta di tengah ruang vertikal.

Pengukuran kecepatan angin dinormalisasi menjadi rasio kecepatan angin (WVR) dengan persamaan:

$$WVR = \frac{V_M}{U_0}$$

di mana V_M adalah magnitudo kecepatan angin terukur dan U_0 adalah magnitudo kecepatan angin yang terekam pada anemometer ultrasonik 2D di ketinggian 1 m dan berjarak 6 m dari bangunan.

Kami mempertimbangkan data dengan kecepatan angin di atas 1 m/s dan sudut angin tegak lurus terhadap fasad yang diizinkan untuk perubahan arah 30° di setiap sisi, dengan pertimbangan bahwa sudut 30° dari tegak lurus ke sisi angin dapat memberikan tingkat tekanan angin yang serupa di ruang vertikal. Mengingat rusun berada pada sudut 22,5° ke utara, sudut angin berada antara 352,5° dan 52,5° (60°) dipertimbangkan untuk pengukuran ini.

Untuk membandingkan elemen desain pasif dan mempelajari dampaknya, total lima kasus dibuat dengan membuka jendela, membuka jendela *penthouse*, dan mengubah ukuran sirip angin (Tabel 5.1). Kasus 1 bertujuan mengarahkan udara ke dalam *void* vertikal. Kasus 2, untuk membandingkan dengan Kasus 1 guna mengetahui dampak dari jendela terbuka di unit hunian. Kasus 3, untuk membandingkan dengan Kasus 1 dan mengetahui dampak *penthouse* pada kecepatan angin.

Kasus 4 dan 5 untuk memahami dampak dari ukuran sirip angin. Data dikumpulkan selama lima hingga enam hari untuk setiap kasus.

Tabel 5.1 Rincian kondisi untuk Kasus 1 hingga Kasus 5.

No. Kasus	Pintu dan jendela unit hunian	Jendela <i>penthouse</i>	Ukuran sirip angin
Kasus 1	Terbuka	Terbuka	Lebar
Kasus 2	Tertutup	Terbuka	Lebar
Kasus 3	Terbuka	Tertutup	Lebar
Kasus 4	Tertutup	Tertutup	Lebar
Kasus 5	Tertutup	Tertutup	Kecil

5.5 Variasi Suhu Udara dan Kenyamanan Termal dalam Ruang

Selama pengukuran lapangan, suhu udara luar tercatat antara 23,7-34,5°C (rata-rata 28,0°C) sementara kelembapan udara ruangan berkisar dari 42% hingga 98% (rata-rata 76%). Hujan ringan terjadi sesekali selama pengukuran lapangan dan hujan lebat jarang terjadi terutama selama periode pengukuran dalam kondisi ventilasi malam. Sementara itu, kecepatan angin relatif tinggi, mencapai 8,53 m/s, dengan rata-rata 2,79 m/s (deviasi standar 1,22 m/s) dengan arah angin utama dari barat daya atau tegak lurus ke fasad selatan bangunan.

Gambar 5.11 dan 5.12 menunjukkan ringkasan statistik (persentil ke-5 dan ke-95, rata-rata, dan ± 1 deviasi standar) dari suhu udara dalam ruang dan luar masing-masing di unit *loft* dan standar, di bawah strategi ventilasi yang berbeda. Selama jam puncak (14:00-15:00), suhu udara dalam ruang di semua kamar tidur unit *loft* dan standar lebih rendah daripada suhu udara luar terlepas dari strategi ventilasi yang digunakan. Di sisi lain, suhu udara dalam ruang pada malam hari lebih tinggi daripada suhu udara luar, kemungkinan besar karena efek massa termal.

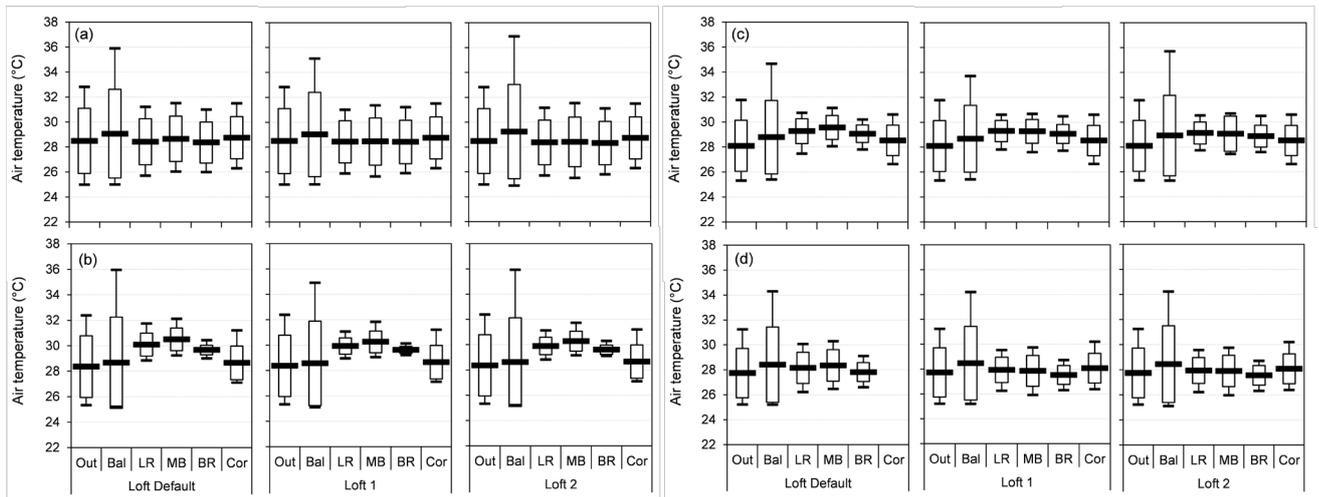
Dalam unit standar, suhu udara dalam ruangan rata-rata lebih tinggi daripada suhu udara luar

(Gambar 5.11). Seperti yang diharapkan, ketika jendela dan bukaan lainnya dibuka pada malam hari, suhu udara dalam ruang pada siang hari jauh lebih rendah terutama di unit *loft*. Pada unit *loft*, suhu udara dalam ruang di kamar tidur lebih rendah 3,1-4,7°C dan 2,8-3,5°C dari suhu udara luar pada jam puncak ketika ventilasi malam dan ventilasi penuh diterapkan. Namun, perlu dicatat bahwa hujan sesekali terjadi selama periode ini.

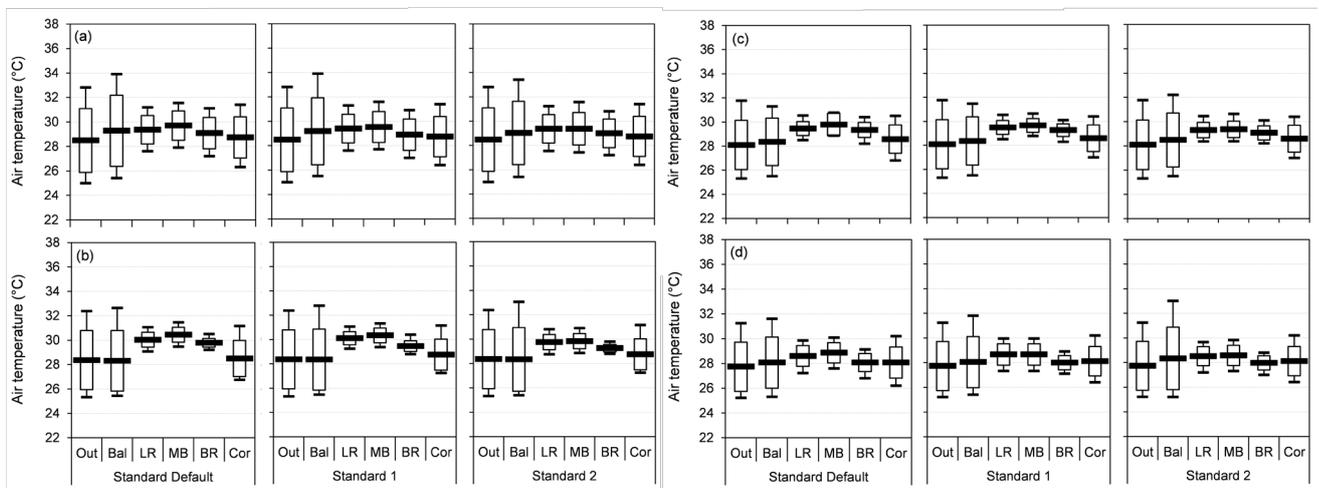
Sementara itu, ruang koridor dan *void* vertikal memainkan peran penting dalam menjaga suhu udara dalam ruang lebih rendah selama siang hari meskipun suhu udara luar dan balkon lebih tinggi. Selama siang hari, suhu udara di koridor tetap lebih rendah dari suhu udara luar dan balkon. Di sisi lain, suhu udara dalam ruang pada malam hari tidak mencapai tingkat yang sama dengan

suhu udara luar bahkan ketika jendela dan bukaan lainnya dibuka. Suhu udara yang sangat tinggi diamati di balkon unit *loft* pada sore hari karena dampak radiasi matahari langsung, sementara di unit standar tidak teramati.

Evaluasi kenyamanan termal dilakukan dengan menggunakan persamaan kenyamanan adaptif yang dikembangkan untuk digunakan di wilayah beriklim panas dan lembap. Suhu operatif (T_o) untuk indeks kenyamanan termal dihitung berdasarkan persamaan yang diberikan dalam ISO 7726. Batas atas kenyamanan 80% ditentukan pada T_o 28,4-29,8°C berdasarkan suhu udara luar harian rata-rata. Hasil perhitungan dan evaluasi tersebut diperlihatkan dalam Tabel 5.2 (LR untuk ruang tamu dan MB untuk kamar tidur utama, dan BR untuk kamar tidur).



Gambar 5.11 Rangkuman statistik suhu udara di unit *loft* yang menghadap selatan pada (a) ventilasi penuh, (b) tanpa ventilasi, (c) ventilasi siang, dan (d) ventilasi malam.



Gambar 5.12 Rangkuman statistik suhu udara di unit standar yang menghadap selatan pada (a) ventilasi penuh, (b) tanpa ventilasi, (c) ventilasi siang, dan (d) ventilasi malam.

Tabel 5.2 Evaluasi kenyamanan termal di bawah strategi ventilasi yang berbeda.

Strategi Ventilasi	Tipe unit hunian	Ruang	Batas nyaman atas 80%		Deviasi T_o terhadap batas nyaman atas 80%		Periode melebihi batas (%)
			Min. harian (°C)	Maks. harian (°C)	Min. harian (°C)	Maks. harian (°C)	
Ventilasi penuh	Std-Def	LR			-1,6 ~ -0,7	2,0 ~ 3,2	60,0
		MB			-1,5 ~ -0,5	2,6 ~ 3,8	67,4
	Std-1	LR			-1,9 ~ -0,8	1,5 ~ 3,0	55,5
		MB			-2,2 ~ -0,8	2,3 ~ 4,2	52,7
			29,0	29,6			
Tanpa ventilasi	Std-Def	LR			-0,4 ~ 0,7	2,0 ~ 3,2	97,2
		MB			-0,1 ~ 1,0	2,4 ~ 3,7	98,7
	Std-1	LR			-0,4 ~ 0,7	1,1 ~ 2,2	97,0
		MB			-0,4 ~ 0,8	1,6 ~ 2,8	97,4
			28,9	29,8			
Ventilasi siang	Std-Def	LR			-0,6 ~ 0,4	1,5 ~ 2,9	92,9
		MB			-0,3 ~ 0,6	2,1 ~ 3,6	97,5
	Std-1	LR			-0,8 ~ 0,1	1,1 ~ 2,5	87,8
		MB			-0,5 ~ 0,3	1,3 ~ 3,8	89,6
			28,8	29,5			
Ventilasi malam	Std-Def	LR			-2,5 ~ -0,6	1,5 ~ 2,5	55,2
		MB			-5,0 ~ -0,7	1,6 ~ 2,7	56,3
	Std-1	LR			-2,5 ~ -0,8	0,6 ~ 1,4	44,1
		MB			-3,5 ~ -0,8	0,9 ~ 1,7	46,8
			28,4	29,4			

Suhu operatif harian minimum yang terukur adalah 0,8-3,5°C lebih rendah dari batas atas ketika jendela dan pintu dibuka pada malam hari (ventilasi penuh) di unit standar, meskipun suhu tersebut hampir sama atau bahkan lebih tinggi selama jendela tertutup. Suhu operatif maksimum harian lebih rendah di bawah ventilasi malam dengan T_o 0,6-1,7 lebih tinggi di unit standar. Sehingga, ventilasi malam dan ventilasi penuh memiliki periode melebihi batas (*exceeding period*) yang lebih pendek, masing-masing 44,1-56,3% dan 52,7-67,4%.

Sebaliknya, jika semua jendela dan pintu ditutup pada malam hari (ventilasi siang dan tanpa ventilasi), kenyamanan termal hampir tidak dapat dicapai sepanjang hari, dengan periode melebihi batas berkisar dari 87,8-97,5% untuk ventilasi siang dan 97,0-98,7% untuk tanpa ventilasi. Ini berarti bahwa membuka jendela dan/atau bukaan lainnya pada malam hari secara signifikan meningkatkan kenyamanan termal.

Efek kecepatan angin dalam ruang terhadap kenyamanan termal harus dipertimbangkan dalam evaluasi. Indeks lain seperti SET* harus digunakan

sebagai pengganti T_o dalam kajian ke depan. Lebih lanjut, meskipun balkon dirancang untuk menaungi ruang dalam ruang, suhu udara yang relatif tinggi diamati di balkon terutama di unit *loft* (Gambar 5.11). Oleh karena itu, beberapa strategi lebih lanjut diperlukan untuk mengurangi suhu udara di ruang penyangga termal sebelum memasuki unit.

5.6 Efek Void untuk Ventilasi Alami

Studi parametrik yang dilakukan untuk memahami aliran ventilasi alami di *void* vertikal memperlihatkan bahwa \overline{WVR} di area pilotis berkisar antara 0,8 hingga 1,4 yang disebabkan oleh efek venturi, di mana pilotis berfungsi sebagai bukaan yang lebih kecil dan angin diarahkan dari pusat area fasad bangunan ke bawah menuju pilotis. Seiring dengan peningkatan ketinggian bangunan, \overline{WVR} di ruang *void* menurun (Gambar 5.13).

\overline{WVR} pada sisi timur jauh lebih tinggi daripada sisi barat dan tengah, karena terdapat hambatan

kecil di sisi barat laut yang mengurangi aliran udara ke ruang *void* untuk bagian barat dan tengah. Pada saat yang sama, terdapat hambatan di sisi tenggara yang berfungsi sebagai pengarah angin tambahan menuju ruang *void*, dan membantu meningkatkan \overline{WVR} untuk bidang 'E'. Dalam Kasus 2, \overline{WVR} untuk bagian E lebih tinggi dibandingkan dengan bagian W dan M. Setelah area pilotis, \overline{WVR} di ruang vertikal untuk ketiga bagian (W, M, dan E) menunjukkan pola serupa untuk semua lantai lainnya.

\overline{WVR} untuk lantai pertama dari 4,6 m hingga 9,1 m setelah area pilotis berkisar antara 0,75 hingga 0,5. \overline{WVR} semakin berkurang seiring dengan peningkatan ketinggian bangunan dan kurang dari 0,5 setelah ketinggian 10 m. Secara keseluruhan, \overline{WVR} untuk Kasus 1 dan Kasus 3 jauh lebih tinggi karena jendela dan pintu unit dibuka dan ada aliran udara dari unit.

Saat membandingkan Kasus 1 dengan Kasus 2, terdapat perbedaan sekitar 0,2 \overline{WVR} karena aliran angin di unit. Membandingkan Kasus 2 dan Kasus 4, kita dapat melihat bahwa membuka jendela *penthouse* meningkatkan \overline{WVR} di ruang vertikal pada berbagai ketinggian. Sedangkan \overline{WVR} dalam Kasus 4 terus menurun dengan meningkatnya ketinggian. Membandingkan Kasus 4 dan Kasus 5, kita dapat melihat dampak ukuran sirip angin. Karena ukuran sirip dalam Kasus 5 kecil, penurunan drastis \overline{WVR} dapat dilihat saat lantai unit dimulai.

Sisi tengah adalah bagian yang paling tidak terpengaruh oleh bangunan di sekitarnya, oleh karena itu dianggap sebagai bidang representasi untuk grafik masing-masing kasus. Sumbu x dari grafik menunjukkan \overline{WVR} sedangkan sumbu y menunjukkan ketinggian sensor. Gambar 5.14 menunjukkan *boxplot* \overline{WVR} di sisi tengah untuk Kasus 1. Hasil \overline{WVR} di koridor unit *loft* menunjukkan perbedaan signifikan. \overline{WVR} di lantai pertama unit *loft* adalah yang terendah pada 1 m, antara 0,5-0,7, sedangkan \overline{WVR} maksimum tercatat pada ketinggian 2,8 m yang merupakan pusat koridor *loft*, antara 0,54-1,12. Untuk lantai kedua, \overline{WVR} minimum adalah 0,19-0,3 pada ketinggian 4,7 m, dan \overline{WVR} maksimum adalah 0,27-0,4 pada ketinggian 1 m dari koridor lantai kedua loteng.

Secara keseluruhan, \overline{WVR} yang tercatat di lantai

pertama hampir dua kali lipat dari \overline{WVR} di lantai kedua. Kecepatan angin tidak terjaga dari lantai pertama ke lantai kedua karena adanya koridor.

Sedangkan untuk unit standar, \overline{WVR} keseluruhan berkisar antara 0,2-0,35 untuk semua sensor yang ditempatkan kecuali pada ketinggian 2,8 m di lantai ketiga yang memiliki \overline{WVR} 0,1-0,2. Area *void* menerima \overline{WVR} terbaik untuk Kasus 1 di mana \overline{WVR} keseluruhan lebih dari 0,5 kecuali setelah ketinggian 12,7 m di mana \overline{WVR} turun menjadi minimum 0,3. Kasus 1 adalah kasus dengan kinerja terbaik dalam hal kecepatan angin.

Gambar 5.15 menunjukkan *boxplot* \overline{WVR} pada sisi tengah untuk Kasus 2. \overline{WVR} untuk koridor unit *loft* lantai dua menurut ketinggian 1 m, 1,9 m, 2,8 m, 3,7 m, dan 4,6 m adalah antara 0,07-0,12, 0,07-0,16, 0,06-0,129, 0,55-0,134 dan 0,06-0,132. Untuk lantai pertama di sisi *loft*, \overline{WVR} berada antara 0,5-0,73, 0,6-1,01, 0,62-1,02, 0,58-0,99, dan 0,46-0,72 untuk ketinggian yang sama. Unit standar memiliki \overline{WVR} yang mirip dengan unit *loft* di lantai dua. \overline{WVR} antara persentil 25 dan persentil 75 mencapai maksimum 0,29 untuk unit standar di lantai pertama dan minimum 0,05 untuk unit standar di lantai ketiga.

Penurunan \overline{WVR} pada Kasus 1 dapat dikaitkan dengan dampak penutupan jendela dan pintu di Kasus 2. \overline{WVR} terendah dialami di lantai ketiga unit standar di antara semua lantai di Kasus 2. Di *void*, area pilotis menerima \overline{WVR} minimum sekitar 0,47 untuk persentil 25 pada ketinggian 3,7 m dan tertinggi tercatat pada 1,13 untuk persentil 75 pada ketinggian 1 m. Secara keseluruhan \overline{WVR} menurun seiring dengan peningkatan ketinggian, dan terendah tercatat antara 0,11-0,2 pada ketinggian 15,4 m.

Ruang vertikal dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu dari 1 m hingga 4,6 m di mana \overline{WVR} di atas 0,5 di semua tempat, dari 5,5-11,8 m dengan \overline{WVR} antara 0,5-0,3 dan kemudian dari 12,7-15,4 m dengan \overline{WVR} di bawah 0,3.

Gambar 5.16 menunjukkan *boxplot* \overline{WVR} pada sisi tengah untuk Kasus 3. Pola yang mirip dengan dua kasus sebelumnya, meskipun \overline{WVR} sedikit lebih rendah daripada Kasus 1 dan lebih tinggi daripada Kasus 2. Pada ketinggian 10,9 m, \overline{WVR} di atas 0,5 dan \overline{WVR} minimum 0,16-0,27 diperoleh pada

ketinggian 15,4 m. Secara keseluruhan WVR untuk Kasus 3 lebih tinggi 0,1 dari Kasus 2.

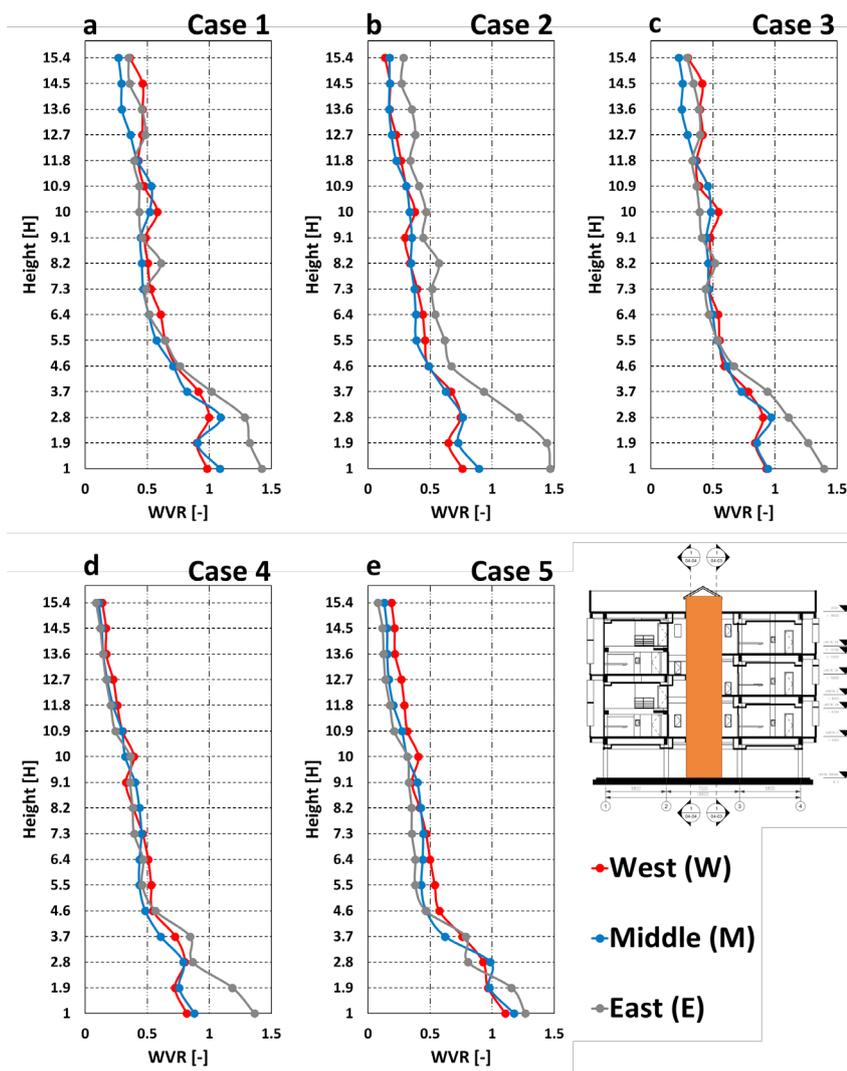
Unit *Loft* lantai pertama memiliki WVR minimum 0,46-0,72 pada ketinggian 4,6 m dan maksimum 0,62-1,02 pada ketinggian 2,8 m. Untuk unit *loft* lantai kedua, WVR minimum adalah 0,17-0,27 pada ketinggian 2,8 m dan maksimum bisa mencapai 0,23-0,35 pada ketinggian 1 m. Untuk unit standar, WVR terendah adalah 0,07-0,14 pada ketinggian 1 m di lantai ketiga.

Secara keseluruhan WVR lainnya untuk unit standar berada antara 0,19-0,42. WVR maksimum di ruang *void* di dekat area pilotis, WVR terendah di pilotis adalah 0,61-0,82 pada ketinggian 3,7 m. Selain itu, WVR di bawah 0,5 adalah dari ketinggian 10,9 m dengan WVR minimum 0,16 hingga 0,27 pada ketinggian 15,4 m. Karena Kasus 3 memiliki WVR lebih baik daripada Kasus 2, dapat dikatakan

bahwa membuka jendela dan pintu memiliki dampak yang jauh lebih besar pada WVR daripada membuka *penthouse*.

Gambar 5.17 menunjukkan *boxplot* WVR pada sisi tengah untuk Kasus 4. Karena semua bukaan tertutup, keluar masuknya udara di *void* hanya melalui pilotis. Oleh karena itu, kasus ini memiliki WVR terendah dibandingkan dengan tiga kasus sebelumnya. Kasus ini dapat digunakan sebagai kasus pembandingan untuk lebih memahami dampak bukaan jendela dan pintu, bukaan *penthouse*, dan perubahan ukuran sirip.

WVR di unit *loft* lantai kedua adalah yang terendah dari semua kasus, yaitu 0,04-0,14 pada ketinggian 2,8 m. WVR di koridor unit *loft* lantai pertama berada di antara 0,3-0,74. WVR untuk koridor unit standar berada di antara 0-0,16 untuk koridor lantai tiga, untuk lantai dua WVR berada di antara



Gambar 5.13 Rasio kecepatan angin rata-rata di *void* vertikal untuk Kasus 1 hingga 5.

0,14-0,24, dan untuk lantai pertama WVR berada di antara 0,16-0,33.

WVR di ruang vertikal Kasus 4 menurun seiring dengan meningkatnya ketinggian. WVR maksimum adalah 0,7-1,04 pada ketinggian 1 m di tingkat pilotis. Terdapat penurunan drastis WVR karena tidak ada sirkulasi angin. Pada ketinggian 8,2 m, WVR menjadi di bawah 0,5. WVR terendah yang tercatat adalah pada ketinggian 15,4 m dan di tengah ruang vertikal sebesar 0,05-0,15.

Gambar 5.18 menunjukkan *boxplot* WVR pada sisi tengah untuk Kasus 5. WVR yang terukur untuk unit *loft* lantai pertama memiliki WVR minimum 0,29-0,41 pada ketinggian 1 m dari koridor dan maksimum 0,5-0,82 pada ketinggian 2,8 m. Seperti pada kasus sebelumnya, unit *loft* lantai dua menunjukkan tingkat WVR yang lebih rendah, di mana WVR minimum adalah 0,08-0,18 pada ketinggian 2,8 m dan maksimum adalah 0,12-0,26 pada ketinggian 1 m.

WVR unit standar lebih tinggi di lantai 3 dengan minimum 0,18-0,3 pada ketinggian 1,9 m dan maksimum 0,21-0,37 pada ketinggian 1 m. WVR menurun seiring dengan peningkatan ketinggian. WVR mencapai di bawah 0,5 setelah ketinggian 8,2 m.

Secara keseluruhan, WVR lebih tinggi pada Kasus 5 dibandingkan Kasus 4 yang memiliki kondisi yang sama dengan ukuran sirip angin besar. Dari perbandingan ini, kita dapat memastikan bahwa ukuran sirip yang lebih kecil menyebabkan WVR yang lebih seimbang di daerah *void* dan koridor bangunan rusun.

5.7 Kesimpulan

Bangunan purwarupa rusun hemat energi yang mengintegrasikan strategi desain pasif untuk iklim panas-lembab di Indonesia telah dibangun di kota Tegal. Beberapa strategi desain pasif diterapkan, termasuk orientasi bangunan yang tepat, peneduh, desain jendela dan pintu, desain bukaan untuk ventilasi, tata ruang unit hunian, sirip angin di lantai dasar/pilotis, *void* vertikal, dan insulasi termal pada dinding. Kinerja semua teknik yang disebutkan di atas telah diverifikasi

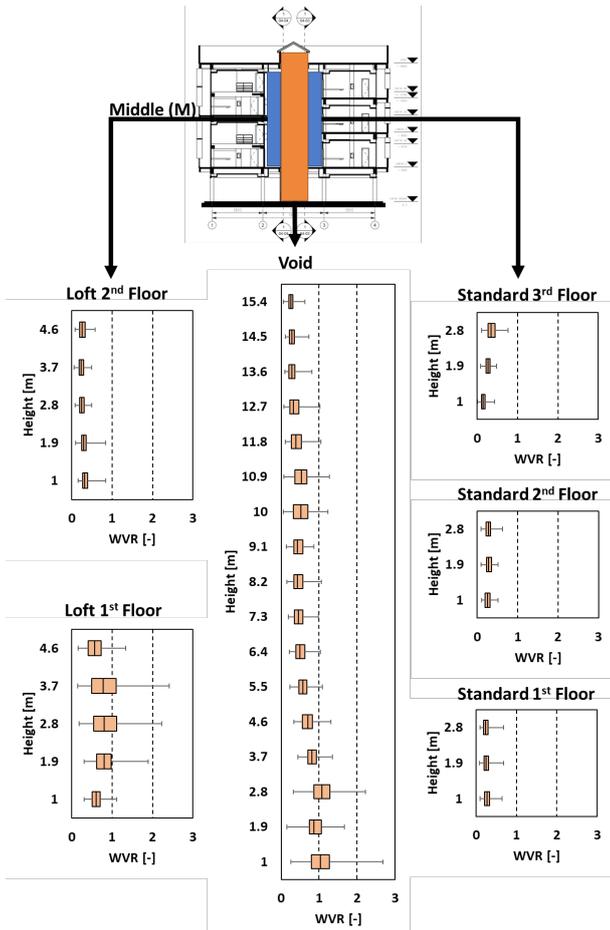
oleh studi-studi sebelumnya menggunakan berbagai metode termasuk pengukuran lapangan dan simulasi CFD. Dalam proses perancangannya, bangunan gedung ini sepenuhnya memanfaatkan data iklim standar dari IWEC2 sebagai basis sekaligus input simulasi kinerja bangunan gedung.

Dari hasil pengukuran lapangan, efek pendinginan struktural oleh ventilasi malam terlihat jelas, tetapi sulit untuk mencapai kenyamanan termal dalam ruangan selama jam-jam puncak (14:00-15:00) hanya dengan ventilasi malam di kedua unit standar dan *loft*. Ventilasi malam menunjukkan periode melebihi batas sebesar 44,1-56,3%, yang lebih pendek dibandingkan strategi ventilasi lainnya.

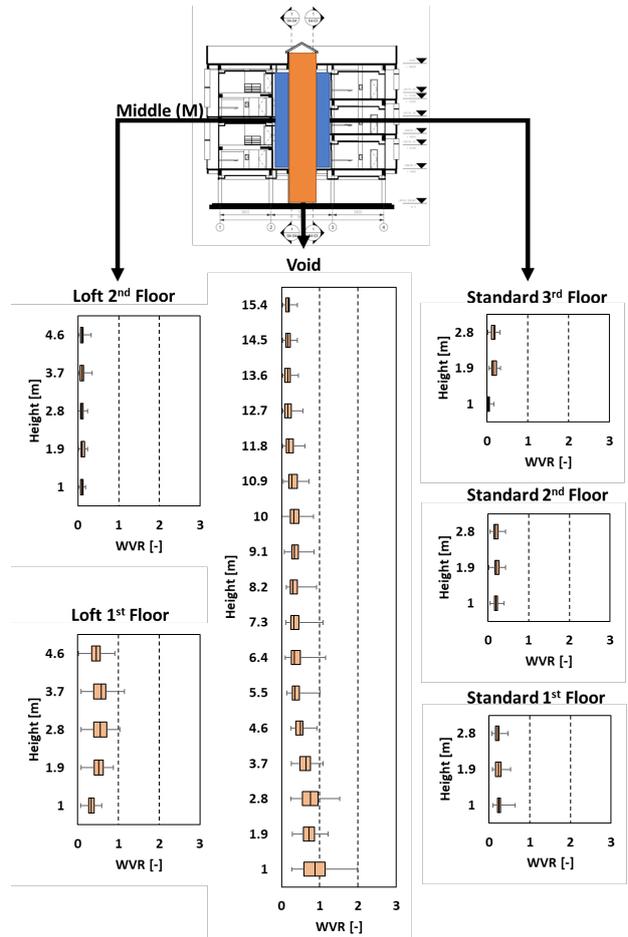
Bangunan gedung juga secara efektif menjadikan suhu udara di dalam ruang lebih rendah daripada suhu udara luar, terlepas dari strategi ventilasi yang digunakan. Bahkan, ketika tanpa ventilasi sekali pun, suhu udara di dalam ruang masih lebih rendah daripada di luar berkat strategi desain pasif yang mampu menghambat panas masuk ke dalam ruang melalui selubung bangunan.

Meskipun demikian, teknik pendinginan pasif tambahan seperti pendinginan lantai radian dan pendinginan evaporatif diperlukan, mengingat pada jam puncak masih terdapat periode melebihi batas kenyamanan termal (pada indeks suhu operatif T_o). Selain itu, efek kecepatan angin dalam ruangan terhadap kenyamanan termal penghuni tropis harus dipertimbangkan dalam evaluasi, seperti misalnya menggunakan SET*.

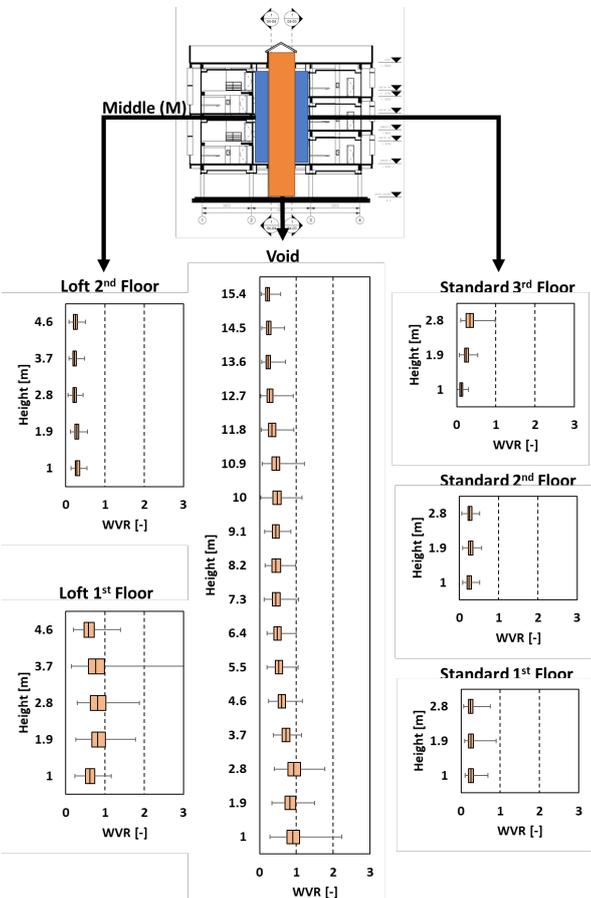
Sementara itu, dengan mengasumsikan kecepatan angin minimum adalah 1 m/s dan arah angin pada $352,5^\circ$ dan $52,5^\circ$, diperoleh fakta bahwa rasio kecepatan angin rata-rata (WVR) di area pilotis (lantai dasar) hampir 1,5 kali lebih tinggi dari ventilasi alami di luar karena efek venturi. Ketika pintu dan jendela unit hunian terbuka, WVR rata-rata di ruang vertikal 0,2 lebih tinggi dibandingkan ketika pintu dan jendela tertutup, yang mengindikasikan dampak signifikan dari pembukaan bukaan (pintu dan jendela) terhadap kinerja ventilasi alami. Unit *loft* lantai pertama menerima WVR tertinggi ketika angin tegak lurus dengan fasad angin.



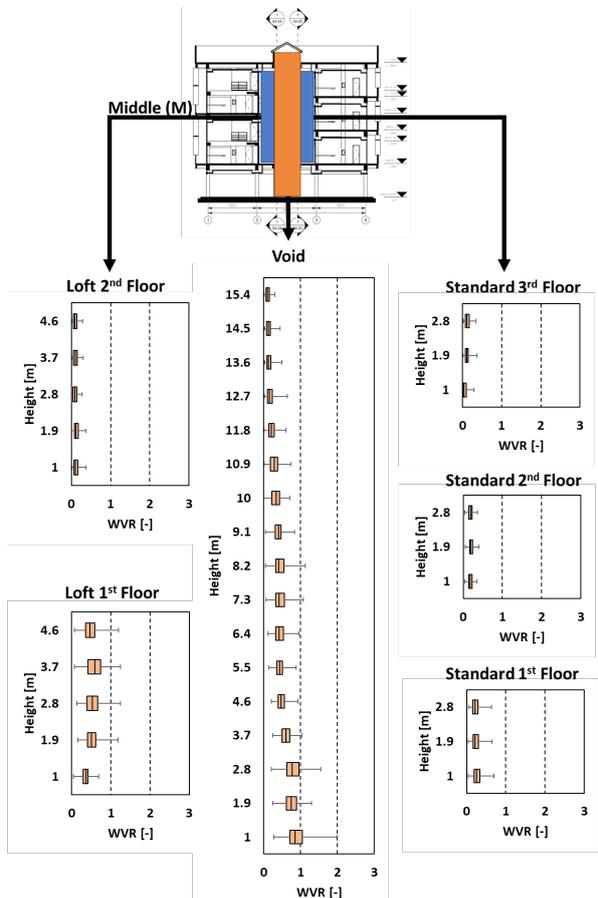
Gambar 5.14 Boxplot rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 1.



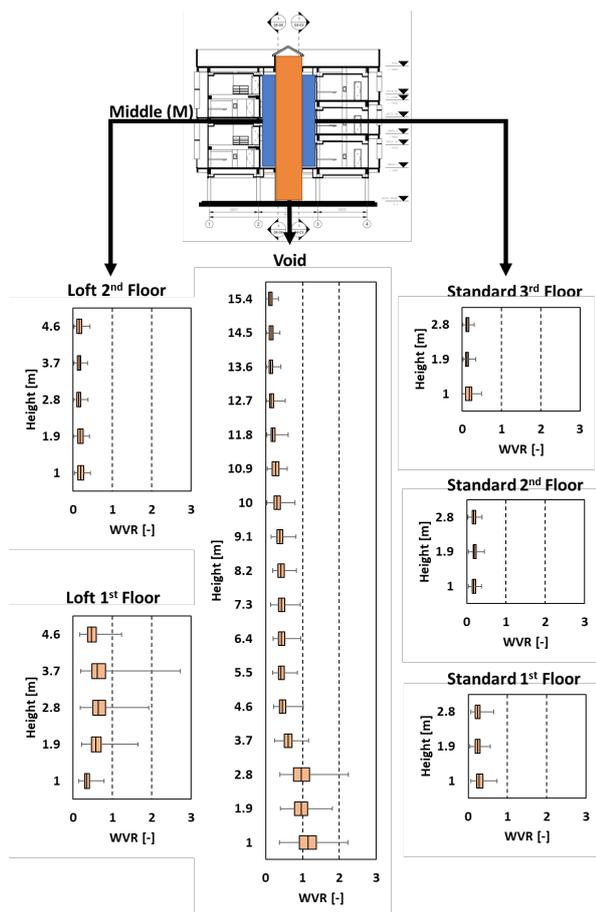
Gambar 5.15 Boxplot rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 2.



Gambar 5.16 Boxplot rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 3.



Gambar 5.17 Boxplot rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 4.



Gambar 5.18 Boxplot rasio kecepatan angin (WVR) untuk Kasus 5.

Meskipun ukuran sirip angin yang lebih besar mengarahkan lebih banyak udara ke ruang void vertikal, Kasus 5 (ukuran sirip angin kecil) mencatat WVR dan WVR rata-rata lebih tinggi dibandingkan dengan Kasus 4 (ukuran sirip angin besar). Ini menunjukkan bahwa ukuran sirip angin yang lebih kecil mungkin memberikan WVR yang lebih seimbang. WVR di koridor jauh lebih rendah dibandingkan di ruang void vertikal, menunjukkan bahwa koridor dapat menjadi gangguan aliran angin.

Dengan demikian, ruang vertikal dan sirip angin secara signifikan meningkatkan ventilasi alami. Dengan mengoptimalkan ukuran sirip angin dan memanfaatkan pembukaan secara strategis, dimungkinkan untuk meningkatkan kecepatan angin dan memastikan kualitas hidup yang lebih baik bagi penghuni rusunawa di iklim tropis.

Terdapat beberapa rekomendasi untuk pengembangan di masa depan. Studi di masa depan harus mencakup faktor lingkungan tambahan seperti suhu dan kelembapan udara untuk memberikan pemahaman yang

komprehensif tentang kinerja ventilasi alami. Perlu dilakukan studi lebih lanjut tentang pola angin dan kenyamanan termal di dalam unit hunian untuk memastikan kualitas hidup yang optimal bagi penghuni. Selain itu, lokasi koridor dalam desain bangunan perlu didiskusikan lebih lanjut. Mempelajari pola aliran udara dalam kasus koridor luar dapat meningkatkan lingkungan angin dan menambah privasi bagi penghuni.

BAB 06

PENUTUP



Dalam lintasan perjalanan bumi yang 4,5 milyar tahun, kehidupan dan kepunahan datang silih berganti. Bumi telah mengalami lima kali kepunahan massal, yang terutama disebabkan oleh perubahan iklim. Kepunahan massal terakhir 65 juta tahun yang lalu, berujung pada kestabilan iklim yang dapat kita nikmati hingga saat ini. Kehidupan bersemi kembali, dan tampak stabil, setidaknya hingga revolusi industri pada paruh kedua abad 19.

Sejak saat itu, perlahan bumi berubah kembali. Jika sebelumnya perubahan iklim terjadi dalam skala geologi (jutaan tahun), kini, perubahan itu terjadi dalam hitungan ratusan tahun, bahkan puluhan tahun. Suhu global perlahan tapi pasti terus merangkak naik, hingga kita tidak lagi sekedar memasuki masa pemanasan global tapi pendidihan global. Kita memasuki era antroposen, era ketika aktivitas manusia mengubah lansekap alam dan atmosfer secara dramatis. Kita tengah menghadapi ancaman bencana ekologis, yang menghujam langsung ke jantung eksistensi umat manusia. Sebuah tindakan, sekecil apa pun itu, harus diambil, saat ini juga.

Bangunan gedung menyumbang emisi gas rumah kaca yang sangat signifikan. Meskipun demikian, sektor ini juga memiliki potensi yang cukup besar dalam efisiensi energi (dan dengan demikian, menurunkan emisi gas rumah kaca).

Indonesia berupaya mengurangi emisi gas rumah kaca ini melalui efisiensi energi dengan menerbitkan peraturan tentang bangunan gedung hijau dalam Permen PUPR No. 21/2021. Beberapa parameter dan kriteria efisiensi energi dalam Permen tersebut berkaitan erat dengan iklim, antara lain orientasi bangunan, desain pasif, ruang terbuka hijau, perhitungan OTTV, sistem pencahayaan, dan penggunaan sumber energi terbarukan.

Indonesia, yang terletak di antara dua benua dan dua samudra, pada kenyataannya memiliki kondisi iklim yang sangat kompleks dan dinamis. Sehingga, pembagian iklim Koppen-Geiger untuk Indonesia, yang didasarkan hanya pada curah hujan dan sebaran vegetasi, kurang memadai untuk kebutuhan perencanaan dan perancangan bangunan gedung yang tanggap iklim. Dengan

metode yang telah diverifikasi secara saintifik, kegiatan kolaborasi riset dalam proyek *Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development* (SATREPS) telah menghasilkan peta zonasi iklim untuk pendinginan pasif dan data iklim standar.

Tidak seperti zona iklim Koppen-Geiger, zona iklim baru yang dikembangkan ini memperhatikan faktor iklim yang lebih kompleks, antara lain suhu udara, kelembapan udara, kecepatan angin, curah hujan, radiasi matahari, tutupan awan, tekanan udara, dan rasio pencampuran (*mixing ratio*). Setiap zona iklim dalam zonasi baru ini memuat karakteristik iklim masing-masing, yang dinyatakan dalam faktor-faktor tersebut di atas. Zona iklim baru ini dengan demikian lebih komprehensif sebagai dasar perencanaan dan perancangan bangunan gedung.

Setiap zona iklim baru ini juga dilengkapi dengan potensi pendinginan pasif dengan mempertimbangkan faktor iklim yang sesuai untuk teknik pendinginan pasif tersebut. Misalnya, zona iklim 1A (khatulistiwa) memiliki potensi kenyamanan ventilasi 7,7 jam selama siang hari, setelah mempertimbangkan faktor suhu udara dan kecepatan angin. Demikian pula dengan potensi pendinginan evaporatif setelah mempertimbangkan faktor kelembapan udara dan kecepatan angin, dan metode pendinginan pasif lainnya.

Dengan peta zonasi iklim baru ini, perencana dan perancang bangunan gedung dapat memanfaatkan zonasi iklim ini untuk memaksimalkan desain pasif dan pendinginan pasif sesuai dengan karakteristik iklim masing-masing. Perancang dapat memilih orientasi bangunan dan material yang sesuai, merancang ventilasi dan perlindungan (*shading*), menggunakan strategi pendinginan pasif yang cocok, dan sebagainya. Diharapkan, dengan strategi pasif yang sesuai dengan karakteristik iklim masing-masing, beban pendinginan bangunan gedung dapat berkurang, serta kenyamanan termal di dalam ruangan dapat dicapai tanpa menggunakan energi secara berlebihan.

Salah satu metode perancangan bangunan berkinerja tinggi yang umum digunakan adalah simulasi kinerja bangunan. Selama lima puluh

tahun terakhir, beragam perangkat lunak simulasi telah dikembangkan dan dievaluasi, serta semakin banyak digunakan. Dalam proses simulasi, titik krusial dalam akurasi dan validitas hasil simulasi adalah penggunaan data iklim standar. Selama ini, data iklim standar yang digunakan berasal dari sumber luar seperti NOAA, *onebuilding*, perpustakaan *energyplus*, dan sebagainya. Data iklim tersebut dikembangkan dari proses analitik yang sumber datanya bukan berasal dari data pengukuran langsung oleh stasiun klimatologi di Indonesia (BMKG).

Data iklim standar yang dihasilkan dari kegiatan ini, sumber data berasal dari hasil pengukuran langsung oleh stasiun klimatologi. Dari proses analisis awal, terdapat 106 stasiun iklim yang memenuhi persyaratan untuk dianalisis lebih lanjut dalam pengembangan data iklim standar. Dengan menggunakan metode yang telah terverifikasi, 106 data iklim standar telah dihasilkan, sebagaimana diperlihatkan dalam Tabel 4.1.

Data iklim standar ini dapat menangkap dengan cermat pola distribusi jangka panjang, terutama untuk radiasi horisontal global dan suhu udara. Selanjutnya, dataset TMY yang dihasilkan akan sangat bermanfaat untuk berbagai aplikasi, terutama dalam simulasi kinerja bangunan gedung seperti desain bangunan hemat energi dan desain arsitektur responsif iklim di masa depan.

Bangunan gedung yang dirancang dengan mempertimbangkan iklim setempat dapat menjamin kinerja bangunan yang tinggi. Hal ini dibuktikan oleh purwarupa rumah susun hemat energi di Kota Tegal. Purwarupa rusun tersebut dirancang sejak awal dengan memperhatikan kondisi iklim setempat, sehingga strategi desain pasif yang sesuai dapat digunakan. Beberapa strategi desain pasif tersebut antara lain orientasi bangunan, material bangunan, peneduh, strategi bukaan dan ventilasi seperti *void* vertikal, sirip angin dan jendela penangkap angin.

Purwarupa rusun tersebut mampu mempertahankan suhu udara di dalam ruangan lebih rendah daripada suhu udara luar, meskipun ketika semua pintu dan jendela tertutup. Meskipun tingkat kenyamanan termal pada siang hari masih di atas rentang zona nyaman (dengan indeks suhu operatif), ventilasi silang yang terjadi sepanjang

hari berpotensi meningkatkan kenyamanan termal melalui efek evaporatif (dengan indeks SET*). Selain itu, *void* vertikal mampu meningkatkan efisiensi aliran udara yang diperlihatkan dengan rasio kecepatan angin (WVR) yang relatif tinggi.

Hasil ini dapat membuka kemungkinan-kemungkinan pengembangan di masa depan. Strategi desain pasif untuk masing-masing zona iklim dapat lebih dirinci, sehingga dapat menjadi pedoman teknis untuk perancang dan perencana bangunan gedung. Ke depan, dapat dikembangkan model peneduh yang sesuai dengan tingkat radiasi di tiap zona iklim, strategi bukaan yang cocok untuk profil kecepatan angin di masing-masing zona iklim, material bangunan dan orientasi bangunan yang sesuai, bentuk atap, dan beragam desain pasif lainnya. Strategi pendinginan pasif seperti pendinginan evaporatif juga memiliki potensi pengembangan ke depan. Data iklim standar yang digunakan dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi model desain pasif yang dikembangkan sesuai dengan zonasi iklim.

Pada akhirnya, ini merupakan upaya kecil kita dalam menghadapi tantangan global, terutama dalam menghadapi ancaman bencana ekologis. Meskipun demikian, tantangan ini juga melahirkan peluang pengembangan ke depan. Ilmu pengetahuan dan teknologi dapat terus dikembangkan di masa depan. Norma, Standar, Prosedur, dan Kriteria (NSPK) di bidang bangunan gedung juga dapat terus dibangun untuk mengisi kekosongan-kekosongan dari adanya peta zonasi iklim dan data iklim standar. Semua upaya itu bermuara pada pembangunan infrastruktur yang berkualitas dan berkesinambungan.

Bibliografi

- Adiyanto, A., Djunaedi, A., Ikaputra & Suryabrata, JA (2015) The Architecture of Dutch colonial office in Indonesia and the adaptation to tropical climate, *International Journal of Scientific and Research Publications* 5(4).
- Aflaki, A., Mahyuddin, N., Mahmoud, ZA., & Baharum, MR (2015) A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates, *Energy and Building* 101, 153-162.
- Afrifa-Yamoah, E., Mueller, UA., Taylor, SM., & Fisher, AJ (2020) Missing data imputation of high-resolution temporal climate time series data, *Meteorol. Appl.* 27, 1-18.
- Akeiber, H., Nejat, P., Abdul Majid, MZ., Wahid, MA., Jomehzadeh, F., Famileh, IZ., Calautit, JK., Hughes, BR., & Zaki, SA (2016) A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 1470-1497.
- Al-Azri, NA (2016) Development of a typical meteorological year based on dry bulb temperature and dew point for passive cooling applications, *Energy Sustain. Dev.* 33, 61-74.
- Al-Azri, NA, Zurigat, YH., & Al-Rawahi, NZ (2013) Development of bioclimatic chart for passive building design, *Int. J. Sustain. Energy.* 32, 713-723.
- Al-Obaidi KM., Ismail, M., & Abdul Rahman, AM (2014) Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review, *Frontiers of Architectural Research* 3, 283-297.
- Al-Obaidi KM., Ismail, M., & Abdul Rahman, AM (2014) Design and performance of novel innovative roofing system for tropical landed houses, *Energy Conversion and Management* 85, 488-504.
- Alargt, FS., Khalifa, YM., & Kharaz, AH(2021) Generation of a TMY for Tripoli City Using the Finkelstein-Schafer Statistical Method, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf. 2021-Octob.*
- Aldrian, E., & Dwi Susanto, R (2003) Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature, *Int. J. Climatol.* 23, 1435-1452.
- Alfata, MNF., Hirata, N., Kubota, T., Nugroho, AM., Uno, T., Ekasiwi, SN., & Antaryama, IGN (2015) Field investigation of indoor thermal environments in apartments of Surabaya, Indonesia: Potential passive cooling strategies for middle-class apartments. *Energy Procedia*, 78, pp. 2947-2952.
- Alfata, MNF., Hirata, N., Kubota, T., Nugroho, AM., Uno, T., Antaryama, IGN., & Ekasiwi, SN (2015) Thermal comfort in naturally ventilated apartments in Surabaya, Indonesia. *Procedia Engineering* 121, pp.459-467.
- Alfata, MNF., Hirose, T., & Kubota, T (2016) Field investigation on indoor thermal environments on Dutch colonial buildings in Bandung, Indonesia. *Proceedings of the 11th International Symposium on Architectural Interchange in Asia*, 20-23 Sep.
- Alfata, MNF., Hirata, N., Hirose, T., & Kubota, T (2016) Analysis of passive cooling strategies employed in Dutch colonial buildings in Indonesia. *Annual Meeting, AIJ*, Kyushu, Japan, 24-26 Aug.
- Alfata, MNF., Kubota, T., & Wibowo, AS(2017) The effects of veranda space on indoor thermal environments in Dutch colonial buildings in Bandung, Indonesia. *Proceedings of International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2017)*, Edinburgh, UK., 3-5 Jul.
- Alfata, MNF., & Kubota, T (2018) Indoor thermal environments and design problems of high-rise apartments in hot-humid climate of Indonesia in Matzarakis, et al. (Eds.) *Equity, Equality and Justice in Urban Housing Development*. UPI Press, Bandung: Indonesia.
- Alfata, MNF., Trihamdhani, AR., Kubota, T., & Asawa, T (2023) Development of Low-Carbon Affordable Apartments in the Hot and Humid Climate of Indonesia: Construction of a Full-Scale Experimental House. *Proceedings of the 5th International Conference on Building Energy and Environment*, 2537-2546.
- Amirifard, F., Sharif, SA., & Nasiri, F (2019) Application of passive measures for energy conservation in buildings—a review, *Adv. Build. Energy Res.* 13, 282-315.
- Apriliyanthi, SR., Sakoi, T., Aziiz, AD., Kubota, T., Alfata, MNF., Suhedi, F., Koerniawan, MD., & Nakaya, T (2023) Perceived thermal acceptability and behavioral adjustment for Indonesian workers. *E3S Web of Conference* 396.
- Arethusa, MT., Kubota, T., Nugroho, AM., Antaryama, IGN., Ekasiwi, SN., & Uno, T (2014) Factors influencing window opening behaviour in apartments of Indonesia. *PLEA2014*; Ahmedabad.
- Argiriou, A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Balaras, CA., Asimakopoulos, D., Petrakis, M., & Kassomenos, P (1999) Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece, *Sol. Energy.* 66, 33-45.
- Arima, Y., Ooka, R., & Kikumoto, H (2017) Proposal of typical and design weather year for building energy simulation, *Energy Build.* 139, 517-524.
- As-syakur, AR., Imaoka, K., Ogawara, K., Yamanaka, MD., Tanaka, T., Kashino, Y., Nuarsa, IW., & Osawa, T (2019) Analysis of spatial and seasonal differences in the diurnal rainfall cycle over Sumatera revealed by 17-year TRMM 3B42 dataset, *Sci. Online Lett. Atmos.* 15, 216-221.

- ASHRAE (2017) *ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI Edition)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- ASHRAE (2007) *ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta, USA.
- ASHRAE (2020) *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, USA.
- Awbi, H (2003) *Ventilation of Buildings, 2nd edition*. Spon Press, London, England.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, Badan Pusat Statistik and United Nations Population Fund (2014) *Proyeksi Penduduk Indonesia 2010–2035*. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Bai, L., Yang, L., Song, B., & Liu, N (2020) A new approach to develop a climate classification for building energy efficiency addressing Chinese climate characteristics, *Energy*. 195, 116982.
- Balaras, C (1996) Cooling in buildings. In: *Passive Cooling of Buildings* [Santamouris, M. and D. Asimakopoulos (eds.)]. James & James (Science Publishers) Ltd., London, pp. 1-34.
- Barbieri, SU. & van Duin, L (2003) *A Hundred Years of Dutch Architecture 1901–2000*. SUN, Amsterdam, the Netherland.
- Baskaran, A. & Kashef, A (1996) Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques, *Engineering Structures* 18(11), 861-875.
- Bauer, M., Möslle, P. & Schwarz, M (2010) *Green Building – Guidebook for Sustainable Architecture*. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- BCA (2004) *Guidelines on envelope thermal transfer value for buildings*. Building and Construction Authority (BCA), Singapore.
- Beck, HE., Zimmermann, NE., McVicar, TR., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, EF (2018) Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution, *Sci. Data*. 5, 1-12.
- Benestad, RE., Chen, D., Mezghani, A., Fan, L., & Parding, K (2015) On using principal components to represent stations in empirical-statistical downscaling, *Tellus, Ser. A Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 6.
- Bhamare, DK., Rathod, MK., & Banerjee, J (2019) Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art, *Energy Build.* 198, 467-490
- Bhanage, V., Lee, HS., Pradana, RP., Kubota, T., Nimiya, H., Putra, IDGA., Sopaheluwakan, A., & Alfata, MNF (2023) Development of future typical meteorological year (TMY) for major cities in Indonesia: Identification of suitable GCM. *E3S Web of Conference* 396, 05002.
- Bijarniya, JP., Sarkar, J., & Maiti, P (2020) Review on passive daytime radiative cooling: Fundamentals, recent researches, challenges and opportunities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 133, 110263.
- Bilbao, J., Miguel, A., Franco, JA., & Ayuso, A (2004) Test reference year generation and evaluation methods in the continental Mediterranean area, *J. Appl. Meteorol.* 43, 390-400.
- Bjerknes, J (1969) Monthly Weather Review Atmospheric Teleconnections From the Equatorial Pacific, *Mon. Weather Rev.* 97, 163-172.
- Bonta, D. & Snyder, S (2008) *New Green Home Solutions: Renewable Household Energy and Sustainable Living*. Gibbs Smith, Utah.
- Borda-Diaz, N., Mosconi, Pl., & Vasquez, JA (1989) Passive cooling strategies for a building prototype design in a warm-humid tropic climate, *Solar and Wind Technology* 6, 389-400.
- Brager, GS., & de Dear, RJ (1998) Thermal adaptation in the built environment: a literature review, *Energy and Buildings* 27(1), 83-96.
- Bre, F., & Fachinotti, VD (2016) Generation of typical meteorological years for the Argentine Littoral Region, *Energy Build.* 129, 432-444.
- Bre, F., de Silva Machado, RM., Lawrie, LK., Crawley, DB., & Lamberts, R (2021) Assessment of solar radiation data quality in typical meteorological years and its influence on the building performance simulation, *Energy Build.* 250, 111251.
- Bronner, SJ (2006) Building tradition, Control and authority in vernacular architecture. *Vernacular Architecture in the Twenty-First Century, Theory, education and practice* Ed. Asquith L. and M. Vellinga, Taylor and Francis, New York.
- BSI (2006) *BS/EN/ISO 7730:2005 Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. British Standards Institute, London.
- BSN (2001) *SNI 03-6572-2001 Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengondisian udara pada bangunan gedung*. BSN, Jakarta, Indonesia.
- BSN (2020) *SNI 6389-2020 Konservasi energi selubung bangunan pada bangunan gedung*. BSN, Jakarta, Indonesia.
- BSN (2011) *SNI 6390-2020 Konservasi energi sistem tata udara bangunan gedung*. BSN, Jakarta, Indonesia.
- BSN (2011) *SNI 03-6197-2020 Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan*. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Camargo, JR., Ebinuma, CD., & Cardoso, S (2006) Three methods to evaluate the use of evaporative cooling for human thermal comfort, *Rev. Eng. Térmica*. 5, 09.
- Cannon, AJ., Sobie, SR., & Murdock, TQ (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?, *J. Clim.* 28, 6938-6959.
- Cândido, C., de Dear, RJ., Lamberts, R., & Bittencourt, L (2010) Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone, *Building and Environment* 45(1), 222-229.
- Cerón, WL., Molina-Carpio, J., Ayes Rivera, I., Andreoli, RV., Kayano, MT., & Canchala, T (2020) A principal component analysis approach to assess CHIRPS precipitation dataset for the study of climate variability of the La Plata Basin, Southern South

- America, *Nat. Hazards*. 103, 767–783.
- Chan, EHW., Qian, QK., & Lam, PTI (2009) The market for green building in developed Asian cities. The perspectives of building designers, *Energy policy* 37(8), 3061–3070.
- Chan, ALS., & Chow, TT (2013) Evaluation of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) for commercial buildings constructed with green roof, *Appl. Energy*. 107, 10–24.
- Chan, ALS., Chow, TT., Fong, SKF., & Lin, JZ (2006) Generation of a typical meteorological year for Hong Kong, *Energy Convers. Manag.* 47, 87–96.
- Chan, ALS (2016) Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems, *Renew. Energy*. 90, 1–13.
- Cheng, V., Ng, E., & Givoni, B (2005) Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, *Solar Energy* 78, 528–534.
- Cheung, CK., Fuller, RJ., & Luther, MB (2005) Energy-efficient envelope design for high-rise apartments, *Energy and Buildings* 37, 37–48.
- Choi, IY., Cho, SH., & Kim, JT (2012) Energy consumption characteristics of high-rise apartment buildings according to building shape and mixed-use development, *Energy and Buildings* 46, 123–131.
- Chow, WK., & Fong, SK (1997) Typical meteorological year for building energy simulation in Hong Kong, *Archit. Sci. Rev.* 40, 11–15.
- Coackley, D., Raftery, P., & Keane, M (2014) A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, 123–141.
- Coch, H (1998) Chapter 4-Bioclimatism in vernacular architecture, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2, 67–87
- Cook, J (ed.) (1989) *Passive Cooling*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
- Couce-Casanova, A., de Dios Rodríguez-García, J., Lamas, MI., & Orosa, JA (2022) A New Way to Obtain Climate Files in Areas with the Presence of Microclimates by Applying the Sandia Method: A Galician Case Study, *Climate*. 10.
- Crawley, DB., Hand, JW., Kummert, M., & Griffith, BT (2008) Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment* 43, 661–673.
- de Dear, RJ. & Brager, GS (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings* 34, 549–561.
- de Dear, R., Brager, G., & Cooper, D (1997) *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. Final Report ASHRAE RP-884, Macquarie University and University of California, Sydney and Berkeley,
- De Gaetano, AT (1996) Delineation of mesoscale climate zones in the northeastern United States using a novel approach to cluster analysis, *J. Clim.* 9, 1765–1782.
- de Gracia, A. & Cabeza, LF (2015) Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy and Buildings* 103, 414–415.
- De Waal, HB (1993) New recommendations for building in tropical climates, *Building and Environment* 28, 271–285.
- Dimoudi, A (1996) Passive cooling of buildings. In: *Passive Cooling of Buildings* [Santamouris, M. and D. Asimakopoulos (eds.)]. James & James (Science Publishers) Ltd., London, pp. 35–55.
- Ding, Y (2007) The variability of the Asian summer monsoon, *J. Meteorol. Soc. Japan*. 85 B, 21–54.
- Djongyang, N., Tchida, R., & Njomo, D (2010) Thermal comfort: A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2626–2640.
- Djamila, H., Ming, CC., & Kumaresan, S (2015) A generalized thermal perception approach for indoor thermal comfort assessment in the humid tropics of Malaysia, *Energy and Buildings* 88, 276–287.
- Ebrahimpour, A. & Maerefat, M (2010) A method for generation of typical meteorological year, *Energy Convers. Manag.* 51, 410–417.
- Ecevit, A., Akinoglu, BG., & Aksoy, B (2002) Generation of a typical meteorological year using sunshine duration data, *Energy*. 27, 947–954.
- EIA (2016) *International Energy Outlook 2016*. Energy Information Administration (EIA).
- Ernst, M., & Gooday, J (2019) Methodology for generating high time resolution typical meteorological year data for accurate photovoltaic energy yield modelling, *Sol. Energy*. 189, 299–306.
- Etheridge, D (2015) A perspective on fifty years of natural ventilation research, *Build. Environ.* 91, 51–60.
- Fan, X., Chen, B., Wang, S., Zhao, JR., & Sun, HJ (2021) An improved typical meteorological year based on outdoor climate comprehensive description method, *Build. Environ.* 206, 108366.
- Fan, X (2022) A method for the generation of typical meteorological year data using ensemble empirical mode decomposition for different climates of China and performance comparison analysis, *Energy*. 240, 122822.
- Fang, Y., & Cho, S (2019) Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance, *Sol. Energy*. 191, 7–18.
- Feriadi, H. & Wong, NH (2004) Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia. *Energy and Buildings* 36(7), 614–626.
- Festa, R. & Ratto, CF (1993) Proposal of a numerical procedure to select Reference Years, *Sol. Energy*. 50, 9–17.
- Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stephan, L., & Jay, A (2013) State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, 272–288.
- Fowler, KM. & Rauch, EM (2006) *Sustainable Building Rating Systems Summary*. Pacific Northwest National Laboratory.
- Gardner, AS., Maclean, IMD., & Gaston, KJ (2020) A new system to classify global climate zones based on

- plant physiology and using high temporal resolution climate data, *J. Biogeogr.* 47, 2091–2101.
- Gede, ID., Pandawana, A., Tanaka, T., Osawa, T., Asyaktur, AR., & Sudiana, M (2019) Characteristics of Diurnal Rainfall Cycle Over Java as seen by the TRMM Precipitation, *Radar* 3, 17–25.
- Geetha, NB., & Velraj, R (2012) Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 29(2), 913–946
- Geros, V., Santamouris, M., Tsangrasoulis, A., & Guarracino, G (1999) Experimental evaluation of night ventilation phenomena. *Energy and Buildings* 29, 141–154.
- Givoni, B (1976) *Man, Climate and Architecture, second ed.* Applied Science Publishers Ltd., London.
- Givoni, B (1992) Comfort, climate analysis and building design guidelines, *Energy Build.* 18, 11–23.
- Givoni, B (1994) Building design principles for hot-humid regions, *Renewable Energy* 5(2), 908–916.
- Givoni, B (1994), *Passive and Low Energy Cooling of Buildings.* Van Nostrand Reinhold, New York.
- Givoni, B (2004) Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics, *Energy and Buildings* 36, 628–637.
- Givoni, B (2011) Indoor temperature reduction by passive cooling systems, *Solar Energy* 85, 1692–1726.
- Gou, Z., Prasad, D., & Lau, SS (2013) Are green buildings more satisfactory and comfortable? *Habitat International* 39, 156–161.
- GRIHA. *National Rating System for Green Building.* India, Tanpa Tahun.
- Gupta, R., Yadav, AK., Jha, SK., & Pathak PK (2023), Long term estimation of global horizontal irradiance using machine learning algorithms, *Optik (Stuttg.)* 283, 170873.
- Gueymard, CA., Bright, JM., Lingfors, D., Habte, A., & Sengupta, M (2019) A posteriori clear-sky identification methods in solar irradiance time series: Review and preliminary validation using sky imagers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 109, 412–427.
- Guy R. Newsham, GR., Mancini, S., & Birt, BJ (2009) Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but..., *Energy and Buildings* 41(8), 897–905.
- Habte, A., Lopez, A., Sengupta, M., & Wilcox, S (2014) Temporal and Spatial Comparison of Gridded TMY, TDY, and TGY Data Sets, *Tech. Rep. TP-5D00-60886.* 1–30.
- Hamada, JI., Yamanaka, MD., Matsumoto, J., Fukao, S., Winarso, PA., & Sribimawati, T (2002) Spatial and temporal variations of the rainy season over Indonesia and their link to ENSO, *J. Meteorol. Soc. Japan.* 80, 285–310.
- Handinoto & Hartono, S (2006) Arsitektur transisi di Nusantara dari akhir abad 19 ke awal abad 20 (Studi Kasus Kompleks Bangunan Militer di Jawa pada peralihan abad 19 ke 20), *Dimensi* 34(2), 81–92
- Handinoto (2010) *Arsitektur dan Kota-kota di Jawa pada Masa Kolonial.* Graha Ilmu, Yogyakarta, Indonesia.
- Hao, Z., Zhang, X., Xie, J., Wang, J., & Liu, J (2020) Building climate zones of major marine islands in China defined using two-stage zoning method and clustering analysis, *Front. Archit. Res.* 10(1), 134–147
- Harmanescu, M. & Enache, C (2016) Vernacular and Technology, In Between, *Procedia Environmental Sciences* 32, 412–419.
- Hasan, MH., Mahlia, TMI., and Nur, H (2012) A review on energy scenario and sustainable energy in Indonesia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2316–2328.
- Hasan, MH., Muzammil, WK., Dahlia, TMI., Jannifar, A., & Hasanuddin, I (2012) A review on the pattern of electricity generation and emission in Indonesia from 1987 to 2009, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3206–3219.
- Hassan, MA., Khalil, A., & Abubakr, M (2021) Selection methodology of representative meteorological days for assessment of renewable energy systems, *Renew. Energy.* 177, 34–51.
- Hashemi, A., & Khatami, N (2017) Effects of solar shading on thermal comfort in low-income tropical housing, *Energy Procedia.* 111, 235–244.
- Hassan, AS. & Ramli, M (2010) Natural ventilation of indoor air temperature: a case study of the traditional Malay house in Penang, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 3(3), 521–528.
- He, Y., Lin, ES., Tan, CL., Yu, Z., Tan, PY., & Wong, NH (2021) Model development of Roof Thermal Transfer Value (RTTV) for green roof in tropical area: A case study in Singapore, *Build. Environ.* 203, 108101.
- Hendon, HH (2003) Indonesian rainfall variability: Impacts of ENSO and local air-sea interaction, *J. Clim.* 16, 1775–1790.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, RJ., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, JN (2020) The ERA5 global reanalysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049.
- Hiyama, K (2021) Regional classification maps for engineered natural ventilation design of office buildings in Japan, *Japan Archit. Rev.* 4, 253–261.
- Hoseini, AHG., Berardi, U., Dahlan, ND., & Hoseini, AG (2014) What can we learn from Malay vernacular houses?, *Sustainable cities and society* 13, 157–170.
- Hosseini, M., Bigtashi, A., & Lee, B (2020) A systematic approach in constructing typical meteorological year weather files using machine learning, *Energy*

- Build.* 226, 110375.
- Huang, YJ., Su, F., Seo, D., & Krarti, M (2014) Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477), *ASHRAE Trans.* 120, 340-355.
- Huang, KT (2020) Identifying a suitable hourly solar diffuse fraction model to generate the typical meteorological year for building energy simulation application, *Renew. Energy.* 157, 1102-1115.
- Humphreys, MA., Nicol, JF., & Raja, IA (2007) Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach, *Advances in Building Energy Research 1*, 55-88.
- Hwang, RL., & Chen, WA (2022) Identifying relative importance of solar design determinants on office building façade for cooling loads and thermal comfort in hot-humid climates, *Build. Environ.* 226.
- IEA (2008) *Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings-IEA Information Paper.* International Energy Agency (IEA), Paris, France.
- IEA (2012) *IEA Statistics 2012 Edition: CO₂ emissions from fuel combustion.* International Energy Agency (IEA), Paris, France.
- IPCC(2007) *Climate Change 2007; Mitigation of Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC(2007) *Climate Change 2007; The Physical Science Basis.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2014) *IPCC Working Group III - Mitigation of Climate Change, Chapter 9: Buildings.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- ISO (2005) *ISO 7730: Ergonomics of thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPS indices and local thermal comfort criteria.* Switzerland.
- Jafari, Y., Othman, J., & Mohd Nor, AHS (2012) Energy consumption, economic growth and environmental pollutants in Indonesia, *Journal of Policy Modeling* 34, 879-889.
- Janjai, S., & Deeyai, P (2009) Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment, *Appl. Energy.* 86, 528-537.
- Japan Sustainable Building Consortium (JSBC). *CASBEE for New Construction 2010 Edition,* Jepang, 2010
- Ji, Y., Song, J., & Shen, P (2022) A review of studies and modelling of solar radiation on human thermal comfort in outdoor environment, *Build. Environ.* 214, 108891.
- Jiang, Y (2010) Generation of typical meteorological year for different climates of China, *Energy.* 35, 1946-1953.
- Jones, P.J. & Whittle, GE (1992) Computational fluid dynamics for building air flow prediction-Current status and capabilities, *Building and Environment* 3, 321-338.
- Kambezidis, HD., Psiloglou, BE., Kaskaoutis, DG., Karagiannis, D., Petrinoli, K., Gavriil, A., & Kavadias, K (2020) Generation of typical meteorological years for 33 locations in Greece: adaptation to the needs of various applications, *Theor. Appl. Climatol.* 141, 1313-1330.
- Kaiser, HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, *Psychometrika.* 23, 187-200.
- Kalamees, T., Jylhä, K., Tietäväinen, H., Jokisalo, J., Ilomets, S., Hyvönen, R., & Saku, S (2012) Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the en ISO 15927-4 standard, *Energy Build.* 47, 53-60.
- Karyono, TH (2000) Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta - Indonesia, *Building and Environment* 35(1), 77-90.
- Kenisarin, M. & Mahkamov, K (2016) Passive thermal control in residential buildings using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, 371-398.
- Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N., & Hirulabh, J (2000) Thailand ventilation comfort chart. *Energy and Buildings* 32(3), 245-249.
- Khedari, J., Waewsak, J., Thepa, S., & Hirunlabh, J (2000) Field investigation of night radiation cooling under tropical climate, *Renewable Energy* 20, 183-193.
- Kim, G., Lim, HS., Lim, TS., Schaefer L., & Kim, TJ (2012) Comparative advantage of an exterior shading devices in thermal performance for residential buildings, *Energy and Buildings* 46, 105-111.
- Kim, S., Zirkelbach, D., Künzel, HM., Lee, JH., & Choi, J (2017) Development of test reference year using ISO 15927-4 and the influence of climatic parameters on building energy performance, *Build. Environ.* 114, 374-386.
- Kitagawa, H., Asawa, T., Kubota, T., Trihamdani, AR., & Mori, H (2022) Thermal storage effect of radiant floor cooling system using phase change materials in the hot and humid climate of Indonesia, *Build Environ.* 207.
- Kitagawa, H., Asawa, T., Kubota, T., & Trihamdani, AR (2022) Numerical simulation of radiant floor cooling systems using PCM for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate, *Build Environ.* 226, 109762.
- Koenigsberger, OH., Ingersoll, TG., Mayhew, A., & Szokolay, SV (1974) *Manual of Tropical Housing and Building. Part 1: Climatic Design.* Longman Group Limited, London.
- Kosaka, Y. & Matsuda, Y (2005) Roles of Rossby and gravity waves on circulation associated with tropical and subtropical heating, *J. Meteorol. Soc. Japan.* 83, 481-498.
- Kotti, MC., Argiriou, AA., & Kazantzidis, A (2014) Estimation of direct normal irradiance from measured global and corrected diffuse horizontal irradiance, *Energy.* 70, 382-392.

- Kubota, T. & Toe, DHC (2010) Potential of passive cooling techniques for modern houses in tropical climate of Malaysia: analysis of indoor thermal environment with various ventilation strategies, *International Journal of Ventilation* 9(1), 11-23.
- Kubota, T., Toe, DHC., & Ahmad, S (2009) The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia, *Energy and Buildings* 41(8), 829-839.
- Kubota, T., Zakaria, MA., Abe, S., & Toe, DHC (2017) Thermal function of internal courtyards in traditional Chinese shophouse in the hot-humid climate of Malaysia, *Building and Environment* 112, 115-131.
- Kubota, T., Rijal, HB., & Takaguchi, H (eds.) (2018) *Sustainable houses and living in the hot-humid climates of Asia*, Springer Singapore.
- Kubota, T., & Alfata, MNF (2018) Low-Emission Affordable Apartments in Indonesia towards Paris Agreement 2030 in Matzarakis, et al. (Eds.) *Equity, Equality and Justice in Urban Housing Development*. UPI Press, Bandung: Indonesia.
- Kubota, T., Alfata, MNF, Arethusa, MT., Uno, T., Antaryama, IGN., Ekasiwi, SNN., & Nugroho, AM (2018) Indoor thermal environments in apartments of Surabaya, Indonesia, Chapter 40, in Kubota, T. et al. (Eds.) *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*, Springer.
- Kumar, N., Kubota, T., Bardhan, R., & Tominaga, Y (2019) CFD analysis of airflow in voids for better cross ventilation in midrise buildings in hot and humid climates., in: *Proceedings of the 16th International Building Performance Simulation Association, International Building Performance Association (IBPSA)*, pp. 3879-3885.
- Kumar, N., Kubota, T., Tominaga, Y., Shirzadi, M., & Bardhan, R (2021) CFD simulations of wind-induced ventilation in apartment buildings with vertical voids: Effects of pilotis and wind fin on ventilation performance, *Build Environ.* 194, 107666.
- Kumar, N., Bardhan, R., Kubota, T., Tominaga, Y., & Shirzadi, M (2022) Parametric study on vertical void configurations for improving ventilation performance in the mid-rise apartment building, *Build Environ.* 215, 108969.
- Kumar, N., Kitagawa, H., Alfata, MNF., Maeda, T., Nakahara, D., Kubota, T., Asawa, T., Hirayama, Y., & Trihamdani, AR (2023) Experimental study on vertical void for improving natural ventilation in midrise double-loaded apartments. *E3S Web of Conference* 396.
- Kuswanto, H., Setiawan, D., & Sopaheluwakan, A (2019) Clustering of Precipitation Pattern in Indonesia Using TRMM Satellite Data, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 9, 4484-4489.
- Kwok, AG. & Rajkovich, NB (2010) Addressing climate change in comfort standards, *Building and Environment* 45, 18-22.
- Lam, JC., Hui, SCM., & Chan, ALS (1996) A statistical approach to the development of a typical meteorological year for Hong Kong, *Archit. Sci. Rev.* 39, 201-209.
- Lee, K., Yoo, H., & Levermore, GJ (2010) Generation of typical weather data using the ISO Test Reference Year (TRY) method for major cities of South Korea, *Build. Environ.* 45, 956-963.
- Lee, H (2015) General Rainfall Patterns in Indonesia and the Potential Impacts of Local Seas on Rainfall Intensity, *Water.* 7, 1751-1768.
- Lestari, S., King, A., Vincent, C., Karoly, D., & Protat, A (2019) Seasonal dependence of rainfall extremes in and around Jakarta, Indonesia, *Weather Clim. Extrem.* 24, 100202.
- Li, DHW., Lam, JC., & Lau, CCS (2002) A new approach for predicting vertical global solar irradiance, *Renew. Energy.* 25, 591-606.
- Li, DHW., Chau, NTC., & Wan, KKW (2013) Predicting daylight illuminance and solar irradiance on vertical surfaces based on classified standard skies, *Energy.* 53, 252-258.
- Li, H., Huang, J., Hu, Y., Wang, S., Liu, J., & Yang, L (2021) A new TMY generation method based on the entropy-based TOPSIS theory for different climatic zones in China, *Energy* 231, 120723.
- Liping, W., & Wong, NH (2007) The impacts of ventilation strategies and façade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore, *Building and Environment* 42, 4006-4015.
- Liping, W., Wong, NH., & Li, S (2007) Façade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore, *Energy and Buildings* 39, 954-961.
- Lompar, M., Lalić, B., Dekić, L. & Petrić, M (2019) Filling gaps in hourly air temperature data using debiased ERA5 data, *Atmosphere (Basel).* 10, 11-13.
- Machiwal, D., Kumar, S., Meena, HM., Santra, P., Singh, RK., & Singh, DV (2019) Clustering of rainfall stations and distinguishing influential factors using PCA and HCA techniques over the western dry region of India, *Meteorol. Appl.* 26, 300-311.
- Madden, RA., & Julian, PR (1972) Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period, *J. Atmos. Sci.* 29, 1109-1123.
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, FG., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A (2015) Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 736-755.
- Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M (2017) Thermal comfort in indoor environment: Effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry, *Sol. Energy.* 144, 295-309.
- Marzuki, Hashiguchi, H., Vonnisa, M., & Harmadi (2018) Seasonal and Diurnal Variations of Vertical Profile of Precipitation over Indonesian Maritime Continent, *Eng. Math. Top. Rainfall.*
- McDonald, P (2014) A population projection for Indonesia, 2010-2035, *Bulletin of Indonesian Economic Studies* 50(1), 123-129

- Mirahimi, S., Mohamed, MF., Haw, LC., Nik Ibrahim, NL., Yusoff, WFM., & Aflaki, A (2016) The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 1508-1519.
- Mishra, AK., & Ramgopal, M (2013) Field study on human thermal comfort – An overview, *Building and Environment* 64, 94-106.
- Mistry, MN (2019) Historical global gridded degree-days: A high-spatial resolution database of CDD and HDD, *Geosci. Data J.* 6, 214-221.
- Mohamad, NB., Lai, AC., & Lim, BH (2022) A case study in the tropical region to evaluate univariate imputation methods for solar irradiance data with different weather types, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 50, 101764.
- Morf, H (2021) A validation frame for deterministic solar irradiance forecasts, *Renew. Energy*. 180, 1210-1221.
- Moron, V., Robertson, AW., & Boer, R (2009) Spatial coherence and seasonal predictability of monsoon onset over Indonesia, *J. Clim.* 22, 840-850.
- Moron, V., Robertson, AW., & Qian, JH (2010) Local versus regional-scale characteristics of monsoon onset and post-onset rainfall over Indonesia, *Clim. Dyn.* 34, 281-299.
- Moron, V., Robertson, AW., Qian, JH., & Ghil, M (2015) Weather types across the Maritime Continent: From the diurnal cycle to interannual variations, *Front. Environ. Sci.* 2, 1-19.
- Muhammad, FR., Lubis, SW., & Setiawan, S (2021) Impacts of the Madden-Julian oscillation on precipitation extremes in Indonesia, *Int. J. Climatol.* 41, 1970-1984.
- Murano, G., Dirutigliano, D., & Corrado, V (2020) Improved procedure for the construction of a Typical Meteorological Year for assessing the energy need of a residential building, *J. Build. Perform. Simul.* 13, 139-151.
- Murphy, S (2017) The construction of a modified Typical Meteorological Year for photovoltaic modeling in India, *Renew. Energy*. 111, 447-454.
- Nanda, AK., & Panigrahi, CK (2016) A state-of-the-art review of solar passive building system for heating or cooling purpose, *Front. Energy*. 10, 347-354.
- Netzel, P., & Stepinski, T (2016) On using a clustering approach for global climate classification, *J. Clim.* 29, 3387-3401.
- Nguyen, A., Singh, MK., & Reiter, S (2012) An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia, *Building and Environment* 56, 291-300.
- Nguyen, AT., & Reiter, S. (2014) A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets, *Energy Build.* 68, 756-763.
- Nicol, F (2004) Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics, *Energy and Buildings* 36(7), 628-637.
- Nicol, F. & Humphreys, MA (2002) Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings* 34(6), 563-572.
- Nicol, F., Humphreys, MA., & Roaf, S (2012) *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*. Routledge, London and New York.
- Nielsen, PV (2015) Fifty years of CFD for room air distribution, *Building and Environment* 91, 78-90.
- Nugrahanti, FI., Kubota, T., Larasati, D., Trihamdani, AR., & Morita, K (2020) Low Carbon Affordable Apartments in Hot-Humid Climate of Indonesia: Design Concept of the Full-Scale Experimental House.
- Nugroho, AM (2012) A thermal assessment of the traditional house in Flores, Indonesia, *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 2(12), 12795-12801.
- Nur'utami, MN. & Hidayat, R (2016) Influences of IOD and ENSO to Indonesian Rainfall Variability: Role of Atmosphere-ocean Interaction in the Indo-pacific Sector, *Procedia Environ. Sci.* 33, 196-203.
- Olgay, V (1963) *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press, New Jersey.
- Oliver, P (2006) *Built to Meet Needs: Cultural Issues in Vernacular Architecture*. Architectural Press, Oxford.
- Omer, AM (2008) Renewable building energy systems and passive human comfort solutions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 1562-1587.
- Omrani, S., Garcia-Hansen, V., Capra B., & Drogemuller, R (2017) Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools, *Building and Environment* 116, 182-194.
- Orosa, JA., & Oliveira, AC (2011) A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models, *Renewable Energy* 36, 951-956.
- Orosa, JA., & Gracia-Bustelo, EJ (2009) ASHRAE Standard Application in Humid Climate Ambiences, *European Journal of Scientific Research* 27(1).
- Passchier, C (2007) Colonial Architecture in Indonesia, References and Developments, in *The past in the present, Architecture in Indonesia*, Ed. Nas, J.M. Leiden: KITLV Press.
- Paul WL., & Taylor PA (2008) A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building, *Building and Environment* 43, 1858-1870.
- Petrakis, M., Lykoudis, S., & Kassomenos, P (1996) A software tool for the creation of a typical meteorological year, *Environ. Softw.* 11, 221-227.
- Petrie, WR., & McClintock, M (1978) Determining typical weather for use in solar energy simulations, *Sol. Energy*. 21, 55-59.
- Pires, L., Silva, PD., & Castro Gomes, JP (2013) Experimental study of an innovative element for passive cooling of buildings, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 4, 29-35.
- Polo, J., Alonso-Abella, M., Martín-Chivelet, N., Alonso-Montesinos, J., López, G., Marzo, A., Nofuentes, G., & Vela-Barrionuevo, N (2020) Typical Meteorological Year methodologies applied to solar

- spectral irradiance for PV applications, *Energy*. 190.
- Pradana, RP., Lee, HS., Kubota, T., Bhanage, V., Fajary, FR., Nimiya, H., Putra, IDGA., Nurrahmat, MH., Badrina, MR., Abdullah, R., Sopaheluwakan, A., & Alfata, MNF (2024) Impacts of the Asian Australian Monsoon and Indo Pasific Sea Surface Temperature on Urban Climates in Major Indonesian Cities for Low Carbon Building Design. *Advances in Hydrology & Meteorology* 1(5).
- Praene, JP., Malet-Damour, B., Radanielina, MH., Fontaine, L., & Rivière, G (2019) GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis, *Build. Environ.* 164, 106330.
- Prajongsan, P. & Sharples, S (2012) Enhancing natural ventilation, thermal comfort and energy savings in high-rise residential buildings in Bangkok through the use of ventilation shafts, *Building and Environment* 50, 104-113.
- Prasetyo, YH., Alfata, MNF., & Rumiawati, A (2013) Thermal performance of Malay traditional house *Rumah Godang*; A preliminary study. *Proceedings of the 14th International Conference on Sustainable Environment and Architecture (Senvar)*, Syiah Kuala University, Aceh, 7-9 Nov.
- Prasetyo, YH., Alfata, MNF., & Ridho, A (2014) Typology of Malay Traditional House *Rumah Lontioek* and its Response to the Thermal Environment. *Procedia Environmental Sciences* 20, pp. 162-171.
- Priyadarsini R., Cheong, KW., & Wong, NH (2004) Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system, *Energy and Buildings* 36, 61-71.
- Pusat, S., Ekmekçi, I. , & Akkoyunlu, MT (2015) Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey, *Renew. Energy*. 75, 144-151.
- Putra, IDGA., Nimiya, H., Sopaheluwakan, A., Kubota, T., Lee, HS., Pradana, RP., Alfata, MNF., Perdana, RB., Permana, DS., & Riama, NF (2022). Development of climate zones for passive cooling techniques in the hot and humid climate of Indonesia, *Building and Environment* 226.
- Putra, IDGA., Nimiya, H., Kubota, T., Lee, HS., Iketani, F., Trihamdhani, AR., Sopaheluwakan, A., Alfata, MNF., Permana, DS., and RP Pradana (2023) Study of vertical solar irradiance and local scale climate to assess passive cooling potential in Tangerang of Indonesia. *E3S Web of Conference* 396, 05002.
- Putra, IDGA., Nimiya, H., Sopaheluwakan, A., Kubota, T., Lee, HS., Pradana, RP., Alfata, MNF., Perdana, RB., Permana, DS., Riama NF., & Karnawati, D (2024). Development of typical meteorological years based on quality control of datasets in Indonesia, *Renewable Energy* 221.
- Putra, IDGA., Nimiya, H., Yuda, IWA., Kubota, T., Lee, HS., Permana, DS., Sorfian, S., Nuryanto, DE., Alfata, MNF., Trihamdhani, AR., Fajarina, Y., Sopaheluwakan, A., Hidayanto, N., Pradana, RP., & Al-Roniri, A (2024) Study of Global Horizontal and Vertical Solar Irradiance Components under Different Sky Conditions for Sustainable Building Design in Bali of Indonesia. *Journal Transnational Universal Studies* 2(2), 67-83.
- Qian, JH (2008) Why precipitation is mostly concentrated over islands in the maritime continent, *J. Atmos. Sci.* 65, 1428-1441.
- Qian, JH., Robertson, AW., & Moron, V (2010) Interactions among ENSO, the Monsoon, and Diurnal Cycle in Rainfall Variability over Java, Indonesia, *J. Atmos. Sci.* 67, 3509-3524.
- Rahman, AS., & Rahman, A (2020) Application of principal component analysis and cluster analysis in regional flood frequency analysis: A case study in new South Wales, Australia, *Water (Switzerland)* 12, 1-26.
- Rahman, IA., & Dewsbury, J (2007) Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia, *Build. Environ.* 42, 3636-3641.
- Rajapakhsa, I., Nagai, H., & Okumiya, M (2003) A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics, *Renewable Energy* 28, 1755-1778.
- Rakoto-Joseph, O., Garde, F., David, M., Adelard, L., & Randriamanantany, ZA (2009) Development of climatic zones and passive solar design in Madagascar, *Energy Convers. Manag.* 50, 1004-1010.
- Ramage, CS (1968) Role of a Tropical "Maritime Continent" in the Atmospheric Circulation 1, *Mon. Weather Rev.* 96, 365-370.
- Realpe, AM., Vernay, C., Pitaval, S., Lenoir, C., & Blanc, P (2016) Benchmarking of Five Typical Meteorological Year Datasets Dedicated to Concentrated-PV Systems, *Energy Procedia.* 97, 108-115.
- Roaf, S., Fuentes, M., & Thomas-Rees, S (2013) *Ecohouse: A Design Guide, fourth ed.* Routledge, London and New York.
- Roslan, Q., Ibrahim, SH., Affandi, R., Mohd Nawi, MN., & Baharun, A (2016) A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region, *Frontiers of Architectural Research* 5, 126-133.
- Roth, M (2019) Evaluation of climate reanalysis data for use in ASHRAE Applications, *ASHRAE Research Project RP-1745*.
- Sabzi, D., Haseli, P., Jafarian, M., Karimi, G., & Taheri, M (2015) Investigation of cooling load in buildings by passive cooling options applied on roof, *Energy and Buildings* 109, 135-142.
- Sadafi, N., Salleh, E., Lim, CH., & Jaafar, Z (2011) Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation, *Energy and Buildings* 43, 887-893.
- Sadineni, SB., Madala, S., & Boehm, RF (2011) Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 3617-3631.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp,

- P., Behringer, D., Hou, Y.T., Chuang, H.Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M.P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E (2014) The NCEP climate forecast system version 2, *J. Clim.* 27, 2185–2208.
- Saji, N., Goswami, B., Vinayachandran, P., & Yamagata, T (1999) A dipole mode in the Tropical Ocean, *Nature*. 401, 360–363.
- Sakiyama, NRM., Carlo, J.C., Frick, J., & Garrecht, H (2020) Perspectives of naturally ventilated buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 130, 109933.
- Sakurai, N., Murata, F., Yamanaka, M.D., Mori, S., Hamada, J.I., Hashiguchi, H., Tauhid, Y.I., Sribimawati, T., & Suhardi, B (2005) Diurnal cycle of cloud system migration over Sumatera Island, *J. Meteorol. Soc. Japan*. 83, 835–850.
- Salmani-Dehaghi, N., & Samani, N. (2021) Development of bias-correction PERSIANN-CDR models for the simulation and completion of precipitation time series, *Atmos. Environ.* 246, 117981.
- Santamouris, M (ed.) (2007) *Advances in Passive Cooling*. Earthscan, London, UK and Sterling, US.
- Santamouris, M (2016) Cooling the buildings-past, present and future, *Energy and Buildings* 128, 617–638.
- Santamouris, M., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., & Kolokotsa, D (2007) Recent progress on passive cooling techniques, advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households, *Energy and Buildings* 39, 859–866.
- Santos, CAG., Neto, RMB., da Silva, RM., & Costa, SGF (2019) Cluster analysis applied to spatio-temporal variability of monthly precipitation over Paraiba state using tropical rainfall measuring mission (TRMM) data, *Remote Sens.* 11.
- Scofield, JH (2009) Do LEED-certified buildings save energy? Not really..., *Energy and Buildings* 41(12), 1386–1390
- Seiki, A., Yokoi, S., & Katsumata, M (2021) The impact of diurnal precipitation over Sumatera Island, Indonesia, on synoptic disturbances and its relation to the madden-julian oscillation, *J. Meteorol. Soc. Japan*. 99, 113–137.
- Setiawan, D., & Azmi, MA (2021) Solar Radiation Study of office building shapes at a bussiness district in South Jakarta, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 794.
- Sharifi, A., & Murayama, A (2013) A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools, *Environmental Impact Assessment Review* 38, 73–87.
- Shazlyn Milleana, S., Ismail, S., Siti Mariana, CMN., & Norhaiza, A (2019) An efficient method to improve the clustering performance using hybrid robust principal component analysis-spectral biclustering in rainfall patterns identification, *IAES Int. J. Artif. Intell.* 8, 237–243
- Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K (2020) Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region, *AIP Conf. Proc.* 2223.
- Singh, N., Jena, S., & Panigrahi, CK (2022) A novel application of Decision Tree classifier in solar irradiance prediction, *Mater. Today Proc.* 58, 316–323.
- Siu, CY., & Liao, Z (2020) Is building energy simulation based on TMY representative?: A comparative simulation study on DoE reference buildings in Toronto with typical year and historical year type weather files, *Energy Build.* 211.
- Skeiker, K(2004) Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein-Schafer statistical method, *Energy Convers. Manag.* 45, 99–112.
- Skeiker, K., & Ghani, BA (2009) A software tool for the creation of a typical meteorological year, *Renew. Energy.* 34, 544–554.
- Solgi, E., Hamedani, Z., Fernando, R., Skates, H., & Orji, NE (2018) A literature review of night ventilation strategies in buildings, *Energy Build.* 173, 337–352.
- Song, B., Bai, L., & Yang, L (2022) Analysis of the long-term effects of solar radiation on the indoor thermal comfort in office buildings, *Energy.* 247, 123499.
- Sorrentino, G., Scaccianoce, G., Morale, M., & Franzitta, V (2012) The importance of reliable climatic data in the energy evaluation, *Energy.* 48, 74–79.
- Suhendri, Hu, M., Su, Y., Darkwa, J., & Riffat, S (2020) Implementation of passive radiative cooling technology in buildings: A review, *Buildings.* 10, 1–28.
- Sun, J., Li, Z., & Xiao, F. (2017) Analysis of Typical Meteorological Year selection for energy simulation of building with daylight utilization, *Procedia Eng.* 205, 3080–3087.
- Sun, J., Li, Z., Xiao, F., & Xiao, J (2020) Generation of typical meteorological year for integrated climate based daylight modeling and building energy simulation, *Renew. Energy.* 160, 721–729..
- Swami, MV. & Chandra, S (1987) *Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings*. Florida Solar Energy Center, Florida, United States of America.
- Szokolay, SV (2004) *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Architectural Press, Oxford.
- Tan, ML., Armanuos, AM., Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddarn, S., Al-Areeq, AM., Abba, SI., Halder, B., Cagan Kilinc, H., & Yaseen, ZM (2023) Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes, *J. Hydrol.* 624, 129940.
- Tanimoto, A., Kubota, T., & Alfata, MNF (2018) Study on openings for naturally ventilated houses that adapt to the hot and humid climate of Indonesia. *Annual Meeting, AIJ*, Tohoku, Japan, 4–6 Sep.
- Toe, DHC & Kubota, T (2013) Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-

- 884 database, *Frontiers of Architectural Research* 2, 278-291.
- Toe, DHC. & Kubota, T (2015) Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia, *Solar Energy* 114, 229-258.
- Tschopp, D., Jensen, AR., Dragsted, J., Ohnewein, P., & Furbo, S (2022) Measurement and modeling of diffuse irradiance masking on tilted planes for solar engineering applications, *Sol. Energy*. 231, 365-378.
- Trihamdhani, AR., Alfata, MNF., Nurdini, A., & Nurjannah, A (2022) Field Investigation on the Effects of Window Configurations on Thermal Environment, Daylighting, and Ventilation Performance in a Naturally Ventilated Residential Building: A Case Study of a Student Dormitory in ITB Jatiningor Campus. *Proceedings of the 6th International Conference on Indonesia Architecture and Planning (ICIAP 2022)*.
- UNEP (2009) *Buildings and Climate Change, Summary for decision-makers*. UNEP, Paris, France.
- Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F.J., Kaspar, F., & Sanz-Garcia, A (2018) Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data, *Sol. Energy*. 164, 339-354.
- Van Dullemen, CJ (2012) *Tropical Modernity, Life and Work of C.P. Wolf Schoemaker*. Sun, Amsterdam, Netherland.
- Vangtook, P. & Chirarattananon, S (2007) Application of radiant cooling as a passive cooling option in hot humid climate. *Building and Environment* 42, 543-556.
- Walsh, A., Cóstola, D., & Labaki, LC (2017) Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs, *Build. Environ.* 112, 337-350.
- Wibowo, AS., Alfata, MNF., & Kubota, T (2018) Indonesia: Dutch colonial buildings, Chapter 2, in Kubota, T. et al. (Eds.) *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*, Springer.
- Widodo, J (2007) Modern Indonesian architecture: Transplantation, adaptation, accommodation and hybridization. In *The past in the present, Architecture in Indonesia*. Ed. Nas, J.M. Leiden: KITLV Press.
- Wong NH & Li, S (2007) A study of effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore, *Building and Environment* 42, 1395-1405.
- Wuisman, JJJM (2007) The past in the present, the place and role of Indonesian vernacular architecture traditions and building styles of the past in the present. In *The past in the present, Architecture in Indonesia*. Ed. Nas, J.M. Leiden: KITLV Press.
- Yamanaka, MD (2016) Physical climatology of Indonesian maritime continent: An outline to comprehend observational studies, *Atmos. Res.* 178-179 231-259.
- Yang, L., Lam, JC., Liu, J., & Tsang, CL (2008) Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates, *Energy Convers. Manag.* 49, 113-124.
- Yang, L., Wan, KKW., Li, DHW., & Lam, JC (2011) A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies, *Energy*. 36, 6121-6129.
- Yao, J (2012) Energy optimization of building design for different housing units in apartment buildings, *Applied Energy* 94, 330-337.
- Yildiz, Y. & Arsan, ZD (2011) Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates, *Energy* 36, 4287-4296.
- Yokoi, S., Takayabu, YN., Nishii, K., Nakamura, H., Endo, H., Ichikawa, H., Inoue, T., Kimoto, M., Kosaka, Y., Miyasaka, T., Oshima, K., Sato, N., Tsushima, Y., & Watanabe, M (2011) Application of cluster analysis to climate model performance metrics, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50, 1666-1675.
- Yuan, J., Huang, P., & Chai, J (2022) Development of a calibrated typical meteorological year weather file in system design of zero-energy building for performance improvements, *Energy*. 259, 125031.
- Zhai, Z. & Previtali, JM (2010) Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance, *Energy and Buildings* 42, 357-365.
- Zhang, C (2013) Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 1849-1870.
- Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W., & Zhang, Y (2017) A critical review of the models used to estimate solar radiation, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70, 314-329.
- Zhou, D., Zhao, CY., & Tian, Y (2012) Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92, 593-605.
- Zhu, N., Ma, Z., & Wang, S (2009) Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Convers. Manag.* 50, 3169-3181.

**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL CIPTA KARYA**

**Direktorat Bina Teknik
Permukiman dan Perumahan
Balai Sains Bangunan**

Telepon: (022) 7798393

E-mail: ditbtpp.bsb@pu.go.id