

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal didefinisikan sebagai kondisi psikologis individu di mana seseorang mengalami rasa puas dengan kondisi lingkungan termal di sekitarnya, yang mencerminkan interaksi kompleks antara respons tubuh dengan kondisi lingkungan di sekitarnya (Olesen, 2020)(Mansi et al., 2021c). Di Indonesia kenyamanan termal pada bangunan telah di atur dalam SNI 03-6572-2001, suhu hangat dan nyaman temperatur efektif berada di antara 25,8°C - 27,1°C. Sehingga penelitian ini berfokus pada pemenuhan suhu termal pada bangunan asrama gedung D unissula sesuai dengan SNI 03-6572-2001, tetapi dalam mencapai kenyamanan termal ada beberapa faktor yang mempengaruhi, seperti pada berikut ini :

2.1.1. Faktor Lingkungan

Temperatur udara merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kenyamanan termal karena secara langsung memengaruhi proses pertukaran panas antara tubuh manusia dan lingkungan sekitarnya. Temperatur udara memengaruhi suhu kulit dan keseimbangan termal tubuh, sehingga perubahan kecil pada parameter ini dapat berdampak signifikan terhadap persepsi kenyamanan (Kim et al., 2021). Dalam konteks lingkungan dalam ruang, variasi temperatur yang ekstrem, baik terlalu tinggi maupun terlalu rendah, dapat menyebabkan ketidaknyamanan dan penurunan kinerja penghuni (Barreira et al., 2024). Selain itu, temperatur udara merupakan bagian dari faktor lingkungan utama yang digunakan dalam evaluasi kenyamanan termal bersama dengan parameter lain seperti kelembapan, kecepatan udara, dan temperatur radiasi (Simion et al., 2016). Penelitian juga menunjukkan bahwa distribusi temperatur dalam ruang tidak selalu seragam, sehingga variasi lokal dapat memengaruhi persepsi kenyamanan (Rajput & Thomas, 2024) di setiap titik ruang (Rajput & Thomas, 2024). Oleh karena itu, pengendalian temperatur udara secara tepat menjadi aspek penting dalam desain sistem HVAC dan strategi lingkungan bangunan.

Kelembapan relatif memiliki peran penting dalam memengaruhi kemampuan tubuh untuk melakukan pendinginan melalui proses evaporasi keringat. Pada kondisi kelembapan tinggi, laju penguapan keringat menurun sehingga tubuh kesulitan melepaskan panas dan menimbulkan rasa tidak nyaman, terutama pada kondisi suhu tinggi (Al-Absi et al., 2022)(Kim et al., 2021). Sebaliknya, kelembapan rendah dapat menyebabkan kekeringan pada kulit dan saluran pernapasan, yang juga berdampak negatif terhadap kenyamanan. Kelembapan merupakan salah satu faktor lingkungan utama yang secara langsung berinteraksi dengan temperatur dan kecepatan udara dalam menentukan kondisi termal dalam ruang (Simion et al., 2016). Studi eksperimental menunjukkan bahwa rentang kelembapan moderat, seperti 40%–60%, umumnya memberikan kondisi yang lebih nyaman bagi sebagian besar penghuni (Zhou et al., 2023). Namun demikian, preferensi kenyamanan dapat berubah tergantung pada kombinasi parameter lain, seperti temperatur dan ventilasi, sehingga diperlukan pendekatan holistik dalam pengendaliannya.

Pergerakan udara atau kecepatan aliran udara berperan penting dalam meningkatkan kenyamanan termal melalui peningkatan proses konveksi dan evaporasi pada tubuh manusia. Aliran udara yang lebih tinggi dapat membantu mengurangi sensasi panas dengan mempercepat pelepasan panas dari tubuh, terutama pada kondisi panas dan lembap. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan udara dapat memperluas rentang kenyamanan termal serta menurunkan suhu kulit secara signifikan (Zhou et al., 2023). Nilai kecepatan udara yang disukai penghuni bervariasi tergantung kondisi lingkungan, dengan kisaran sekitar 0,53 m/s hingga 1,48 m/s pada berbagai kombinasi temperatur dan kelembapan (Zhou et al., 2023). Selain itu, kemampuan penghuni untuk mengontrol aliran udara secara individu juga terbukti meningkatkan kepuasan termal secara keseluruhan. Oleh karena itu, desain ventilasi alami maupun mekanis perlu mempertimbangkan distribusi dan kontrol aliran udara untuk mencapai kenyamanan optimal.

Kualitas udara dalam ruang (indoor air quality/IAQ) merupakan faktor penting yang saling berkaitan dengan kenyamanan termal dan kesehatan penghuni. Meskipun tidak secara langsung termasuk parameter termal, kualitas udara memiliki pengaruh signifikan terhadap persepsi kenyamanan secara keseluruhan. Konsentrasi CO₂ yang tinggi dan keberadaan polutan dapat menurunkan kepuasan penghuni serta mengurangi kemampuan adaptasi terhadap kondisi termal (Lamberti et al., 2024). Selain itu, kualitas udara yang buruk dapat menyebabkan berbagai dampak kesehatan seperti gangguan pernapasan, alergi, dan penurunan kinerja kognitif (Beswick et al., 2025). Studi juga menunjukkan bahwa kualitas udara dan kenyamanan termal saling berinteraksi, sehingga perubahan pada salah satu parameter dapat memengaruhi persepsi terhadap parameter lainnya (Lamberti et al., 2024). Oleh karena itu, pengelolaan kualitas udara yang baik melalui ventilasi dan kontrol polutan menjadi bagian integral dalam menciptakan lingkungan dalam ruang yang sehat dan nyaman.

2.1.2. Faktor Desain dan Orientasi Bangunan

Desain bangunan dan penggunaan insulasi memiliki peran krusial dalam meningkatkan kinerja termal serta menjaga stabilitas temperatur dalam ruang. Material insulasi dengan konduktivitas termal rendah, seperti *expanded polystyrene* atau *wood fiber*, mampu mengurangi perpindahan panas dan menurunkan beban energi bangunan secara signifikan. Kinerja insulasi sangat dipengaruhi oleh nilai konduktivitas termal (k-value), yang bergantung pada kondisi seperti temperatur dan kelembapan lingkungan, sehingga performanya dapat berubah seiring waktu. Selain itu, thermal mass dari material seperti beton atau batu mampu menyimpan dan melepaskan panas secara bertahap, sehingga mengurangi fluktuasi temperatur dalam ruang dan meningkatkan kenyamanan. Desain selubung bangunan, termasuk ketebalan dinding, jenis material, dan sistem bukaan, juga berpengaruh signifikan terhadap performa termal serta pengurangan beban pendinginan. Oleh karena itu, integrasi antara insulasi, thermal mass, dan desain selubung bangunan menjadi strategi utama dalam mencapai kenyamanan termal dan efisiensi energi yang berkelanjutan.

Orientasi bangunan merupakan faktor penting dalam menentukan kenyamanan termal karena memengaruhi paparan radiasi matahari dan arah aliran angin yang diterima bangunan. Orientasi yang tepat memungkinkan bangunan memaksimalkan penerimaan panas matahari pada musim dingin dan meminimalkannya pada musim panas, sehingga mendukung keseimbangan termal dalam ruang. Selain itu, orientasi bangunan juga berperan dalam meningkatkan performa termal secara keseluruhan serta mengurangi kebutuhan energi melalui pemanfaatan ventilasi alami dan kontrol solar gain. Studi menunjukkan bahwa orientasi bangunan yang tepat, seperti orientasi timur, dapat memberikan kenyamanan termal yang lebih stabil sepanjang tahun dibandingkan orientasi lainnya. Namun demikian, pada bangunan dengan insulasi yang baik, pengaruh orientasi terhadap temperatur dalam ruang dapat menjadi kurang signifikan dibandingkan faktor selubung bangunan. Oleh karena itu, orientasi bangunan perlu dipertimbangkan secara terpadu dengan strategi desain pasif lainnya untuk mencapai kenyamanan termal dan efisiensi energi yang optimal.

2.1.3. Faktor Manusia

Insulasi pakaian (clothing insulation) merupakan salah satu faktor personal yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kenyamanan termal karena berfungsi sebagai penghalang antara tubuh manusia dan lingkungan sekitarnya. Pakaian menentukan tingkat resistansi terhadap perpindahan panas, sehingga memengaruhi keseimbangan termal tubuh dalam berbagai kondisi lingkungan. Dalam kajian kenyamanan termal, insulasi pakaian termasuk dalam faktor utama bersama dengan aktivitas metabolik yang harus dipertimbangkan dalam model seperti PMV untuk memprediksi sensasi termal (Simion et al., 2016). Variasi tingkat insulasi pakaian sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim, di mana individu di daerah beriklim dingin cenderung menggunakan pakaian dengan insulasi lebih tinggi dibandingkan dengan individu di daerah panas dan lembap. Studi empiris menunjukkan bahwa nilai insulasi pakaian secara signifikan lebih tinggi pada wilayah beriklim dingin, yang berkontribusi terhadap perbedaan temperatur kenyamanan antara kedua kondisi iklim tersebut (Thapa & Indraganti, 2020). Selain itu, perubahan insulasi pakaian

juga merupakan bentuk adaptasi perilaku terhadap lingkungan termal, sehingga berperan penting dalam menjaga kenyamanan tanpa harus bergantung sepenuhnya pada sistem mekanis seperti HVAC.

Laju metabolisme (*metabolic rate*) merupakan faktor personal lain yang sangat menentukan kenyamanan termal karena berkaitan langsung dengan jumlah panas yang dihasilkan oleh tubuh manusia. Aktivitas fisik seperti berjalan, bekerja, atau berolahraga akan meningkatkan produksi panas internal, sehingga memengaruhi persepsi terhadap suhu lingkungan. Dalam kerangka evaluasi kenyamanan termal, laju metabolisme termasuk parameter utama yang digunakan dalam berbagai indeks seperti PMV, PET, dan UTCI (Fang et al., 2018). Variasi laju metabolisme dapat cukup besar, misalnya berkisar antara 1,0 met untuk aktivitas ringan hingga sekitar 3,8 met untuk aktivitas yang lebih intens, yang secara signifikan memengaruhi nilai indeks kenyamanan termal (Fang et al., 2018). Penelitian lapangan juga menunjukkan bahwa sebagian besar individu dalam lingkungan luar ruang memiliki tingkat aktivitas yang lebih tinggi sebelum evaluasi dilakukan, sehingga memengaruhi kondisi fisiologis dan persepsi kenyamanan mereka. Oleh karena itu, dalam perancangan lingkungan termal yang optimal, penting untuk mempertimbangkan variasi aktivitas penghuni agar kondisi yang dihasilkan dapat mengakomodasi berbagai tingkat produksi panas tubuh secara efektif.

2.2. Asrama sebagai Fasilitas Edukasi

Asrama menyediakan peluang untuk pembelajaran informal yang mendorong pengalaman pendidikan individual dan kolaboratif. Faktor lingkungan utama seperti desain spasial, aspek sosial, dan sumber daya secara signifikan memengaruhi kepuasan dan hasil belajar mahasiswa. Sumber daya, khususnya, memainkan peran penting dalam meningkatkan pembelajaran informal (He & Zeng, 2025). Sehingga untuk meningkatkan performa akademik mahasiswa, penyediaan kondisi asrama yang nyaman menjadi salah satu faktor meningkatkan performa akademik mahasiswa, sehingga kenyamanan termal pada asrama berperan penting dalam meningkatkan kenyamanan asrama.

Pada bangunan asrama mahasiswa di iklim tropis, kondisi kenyamanan termal seringkali tidak terpenuhi akibat pengaruh desain bangunan dan lingkungan. Studi pada asrama Universitas Syiah Kuala menunjukkan bahwa temperatur, kelembapan, dan kecepatan udara melebihi ambang kenyamanan termal menurut SNI 03-6572-2001, yang dipengaruhi oleh orientasi bangunan dan rendahnya aliran udara (Mahfudha et al., 2024). Orientasi bangunan berperan penting karena menentukan besarnya radiasi matahari yang masuk melalui bukaan, khususnya pada sisi timur dan barat. Temuan serupa pada asrama Universitas Hasanuddin menunjukkan bahwa temperatur dalam ruang rata-rata melebihi 30°C, melampaui batas kenyamanan nasional (Mulyadi et al., 2022). Selain itu, distribusi panas dipengaruhi oleh posisi ruang dan paparan radiasi, terutama pada lantai atas dan sisi barat bangunan. Simulasi menunjukkan bahwa peningkatan tinggi plafon dapat menurunkan temperatur dalam ruang secara signifikan, sehingga menjadi strategi desain yang efektif (Mulyadi et al., 2022). Oleh karena itu, optimasi orientasi, ventilasi, dan elemen desain bangunan menjadi kunci dalam meningkatkan kenyamanan termal di lingkungan tropis.

2.2.1. Manfaat Kenyamanan Termal Pada Hunian Asrama

Peningkatan kenyamanan termal dalam hunian mahasiswa memiliki peran penting dalam meningkatkan kesejahteraan, kepuasan, dan performa akademik penghuni. Kondisi termal yang terkontrol melalui pengaturan parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan udara terbukti meningkatkan kepuasan mahasiswa terhadap lingkungan tempat tinggalnya (Mmereki & Akpaca, 2021). Selain itu, kemampuan adaptasi terhadap kondisi iklim, baik melalui proses perilaku maupun psikologis, memungkinkan mahasiswa menyesuaikan diri terhadap variasi temperatur, terutama pada lingkungan beriklim dingin (Mmereki & Akpaca, 2021). Dalam konteks pembelajaran, kenyamanan termal yang optimal berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi, efisiensi belajar, dan produktivitas mahasiswa dalam ruang pendidikan (Shi et al., 2022). Perilaku adaptif seperti penggunaan ventilasi alami, kipas, serta penyesuaian pakaian juga berperan dalam mempertahankan kondisi nyaman meskipun berada di luar standar termal

konvensional (Gou et al., 2018). Oleh karena itu, integrasi antara desain lingkungan termal dan kemampuan adaptasi penghuni menjadi faktor kunci dalam mendukung kualitas hidup dan keberhasilan akademik mahasiswa.

Dari perspektif kesehatan dan ketahanan, kenyamanan termal berperan penting dalam mengurangi risiko kesehatan yang berkaitan dengan kondisi lingkungan ekstrem. Studi menunjukkan bahwa adaptasi terhadap lingkungan termal dapat meningkatkan toleransi terhadap variasi suhu, meskipun sensitivitas terhadap perubahan suhu tetap menjadi faktor penting, terutama setelah penghuni terbiasa dengan kondisi tertentu (Ning et al., 2016). Selain itu, peningkatan kenyamanan termal seringkali sejalan dengan peningkatan kualitas udara dalam ruangan, terutama melalui peningkatan ventilasi dan kecepatan udara yang lebih baik (Gou et al., 2018). Data empiris juga menunjukkan bahwa perbaikan kondisi termal dan kualitas lingkungan dalam ruangan dapat mengurangi paparan terhadap polutan serta meningkatkan kesehatan penghuni secara keseluruhan (Pandey et al., 2025). Dengan demikian, penerapan strategi desain yang mendukung kenyamanan termal tidak hanya meningkatkan kenyamanan, tetapi juga memperkuat kesehatan dan ketahanan mahasiswa terhadap kondisi.

2.2.2. Dampak Jika Kenyamanan Termal Tidak Terpenuhi Pada Hunian Asrama

Kenyamanan termal dan kualitas lingkungan dalam ruang memiliki pengaruh penting terhadap kesehatan, kesejahteraan, dan performa akademik mahasiswa di asrama. Kondisi termal yang buruk seringkali berkaitan dengan rendahnya kualitas udara dalam ruang, seperti tingginya konsentrasi CO₂ dan volatile organic compounds (VOCs), yang dapat menciptakan lingkungan tidak sehat serta meningkatkan risiko gangguan kesehatan (Miao et al., 2022). Penelitian menunjukkan bahwa ventilasi yang tidak memadai menyebabkan konsentrasi CO₂ dalam asrama dapat melebihi 3000 ppm, yang berdampak pada penurunan kualitas udara dan meningkatnya risiko gangguan pernapasan (Yang et al., 2024). Selain itu, kualitas udara yang buruk terbukti memengaruhi kualitas tidur mahasiswa, sehingga berdampak pada konsentrasi, kemampuan berpikir logis, dan performa

pada hari berikutnya (Strøm-Tejsen et al., 2016). Mahasiswa juga cenderung melaporkan tingkat kepuasan yang lebih rendah terhadap lingkungan tempat tinggalnya ketika kondisi termal dan kualitas udara tidak terpenuhi, yang dapat memicu stres dan menurunkan kesejahteraan psikologis (Miao et al., 2022). Oleh karena itu, penyediaan lingkungan termal dan kualitas udara yang baik menjadi faktor penting dalam mendukung kesehatan fisik dan mental mahasiswa.

Kondisi kenyamanan termal yang buruk juga berdampak langsung terhadap performa akademik dan efisiensi energi bangunan asrama. Ketidaknyamanan termal dapat mengganggu fungsi kognitif, menurunkan konsentrasi, serta mengurangi efisiensi belajar mahasiswa (Miao et al., 2022). Selain itu, desain asrama yang tidak optimal, seperti rendahnya kualitas insulasi dan ventilasi, menyebabkan tingginya kehilangan energi dan ketidakstabilan temperatur dalam ruang (Xu et al., 2023). Studi menunjukkan bahwa pada bangunan asrama di wilayah beriklim dingin, kondisi temperatur dalam ruang berada pada tingkat tidak nyaman selama sekitar 85,2% hari pada periode akhir musim gugur hingga musim dingin (Xu et al., 2023). Kondisi tersebut mendorong penggunaan sistem pemanas atau pendingin secara berlebihan sehingga meningkatkan konsumsi energi bangunan. Selain itu, ventilasi alami yang tidak terkontrol juga dapat memperbesar fluktuasi temperatur dalam ruang meskipun bermanfaat dalam meningkatkan kualitas udara (Wang et al., 2022). Oleh karena itu, integrasi desain termal, ventilasi, dan strategi efisiensi energi menjadi aspek penting dalam menciptakan lingkungan asrama yang sehat, nyaman, dan mendukung performa akademik mahasiswa.

2.3. Respons Desain Pasif Terhadap Kenyamanan Termal

Terdapat berbagai solusi yang dapat diterapkan dalam merespons ketidaknyamanan termal, yang pertama melalui penggunaan sistem mekanis dan kedua dengan penerapan desain pasif pada bangunan. Penggunaan sistem mekanis seperti pendingin udara pada bangunan mampu memberikan kontrol suhu yang cepat dan efektif, namun hal tersebut membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan biaya operasional serta perawatan yang relatif besar. Oleh karena itu, pada

objek penelitian berupa asrama sederhana, pendekatan desain pasif dipilih dikarenakan kesesuaiannya dalam memenuhi kebutuhan bangunan yang menuntut solusi yang mudah diterapkan, hemat energi, dan murah dalam proses perawatan. Dalam pendekatan ini kondisi iklim dan elemen arsitektural sangat berpengaruh dalam meningkatkan kenyamanan termal tanpa ketergantungan besar terhadap energi mekanis. Terdapat berbagai jenis strategi desain pasif yang dapat digunakan untuk mengatasi ketidaknyamanan termal, seperti berikut ini :

2.3.1. Massa Termal dan Kapasitas Panas

Merupakan faktor penting dalam menjaga stabilitas temperatur dalam ruang. Bangunan dengan massa termal tinggi mampu menyerap dan melepaskan panas secara bertahap sehingga mengurangi fluktuasi temperatur dan meningkatkan kenyamanan termal subjektif (Gauthier et al., 2017). Kondisi ini menghasilkan temperatur udara dan radiasi yang lebih stabil, sehingga mengurangi risiko *overheating* pada siang hari dan kehilangan panas pada malam hari (Gauthier et al., 2017). Selain itu, material dengan kemampuan menyimpan dan meradiasikan panas berkontribusi terhadap kenyamanan melalui mekanisme perpindahan panas radiasi yang signifikan (Kujundzic & Stamatovic Vuckovic, 2020). Pada iklim panas-kering, penggunaan material bermassa tinggi dengan ketebalan sekitar 25–30 cm yang dikombinasikan dengan *shading*, insulasi, dan ventilasi alami terbukti mampu menurunkan temperatur udara dalam ruang secara signifikan (Zahiri & Altan, 2016). Oleh karena itu, penerapan *thermal mass* sebagai strategi desain pasif berperan dalam meningkatkan kenyamanan termal sekaligus efisiensi energi bangunan.

2.3.2. Ventilasi Alami

Ventilasi alami merupakan strategi pasif yang efektif dalam meningkatkan sirkulasi udara dan kualitas lingkungan dalam ruang. Penerapan desain pasif yang tepat dapat memaksimalkan aliran udara melalui bangunan sehingga meningkatkan kenyamanan termal sekaligus mengurangi ketergantungan pada sistem mekanis (Chan et al., 2013). Peningkatan kecepatan aliran udara melalui ventilasi alami terbukti mampu meningkatkan tingkat kenyamanan termal, khususnya pada kondisi

suhu tinggi (Chan et al., 2013). Selain itu, strategi ventilasi sepanjang hari sebagai bagian dari desain pasif menunjukkan pengaruh signifikan dalam menjaga kondisi temperatur dalam ruang tetap berada pada rentang yang dapat diterima (Zahiri & Altan, 2016). Pada iklim tropis, optimalisasi desain atap untuk ventilasi alami yang dikombinasikan dengan material reflektif mampu menurunkan beban pendinginan hingga sekitar 78% (Ortiz, 2021). Oleh karena itu, integrasi ventilasi alami dalam desain bangunan berperan penting dalam meningkatkan kenyamanan termal dan efisiensi energi secara berkelanjutan.

2.3.3. Perangkat Peneduh and Orientasi Bangunan

Perangkat peneduh (*shading devices*) merupakan strategi desain pasif yang efektif dalam meminimalkan panas matahari yang memapar pada bangunan. Penerapan perangkat peneduh berfungsi menghalangi radiasi matahari pada bukaan dan dinding, sehingga berkontribusi terhadap penurunan suhu udara dalam ruang, dan juga orientasi bangunan yang tepat juga dapat mengurangi paparan radiasi matahari langsung, seperti menghadap selatan atau tenggara sehingga dapat menurunkan temperatur dalam ruang (Zahiri & Altan, 2016). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi *overhangs* dan *fins* mampu menurunkan temperatur dalam ruang secara signifikan, khususnya pada fasad yang terpapar langsung matahari (Zahiri & Altan, 2016). Selain itu, pada bangunan pendidikan, strategi *shading pada* atap dan fasad selatan terbukti paling efektif dalam meningkatkan kenyamanan termal dan mengurangi beban panas (Fahmy et al., 2020). Oleh karena itu, integrasi antara orientasi bangunan dan perangkat peneduh menjadi pendekatan penting dalam meningkatkan kenyamanan termal dan efisiensi energi bangunan.

2.3.4. Desain Insulasi dan Selubung Bangunan

Pemasangan insulasi pada bangunan seperti dinding dan atap merupakan strategi efektif dalam mengurangi perpindahan panas dan menjaga stabilitas temperatur dalam ruang. Penggunaan insulasi dengan ketebalan sekitar 10 cm pada dinding dan 5 cm pada atap terbukti mampu menurunkan temperatur udara dalam ruang serta mempertahankan kondisi kenyamanan termal (Zahiri & Altan, 2016).

Hal ini terjadi dikarenakan insulasi meningkatkan hambatan termal sehingga aliran panas dari lingkungan luar dapat berkurang secara signifikan ke dalam bangunan. Selain itu, pemilihan material dengan nilai U rendah berperan penting dalam meningkatkan kinerja termal selubung bangunan dengan mengurangi laju perpindahan panas (Ortiz, 2021). Penerapan fasad berlapis ganda (*secondary skin*) dan material dengan nilai U rendah juga terbukti efektif dalam menurunkan beban pendinginan serta meningkatkan efisiensi energi bangunan (Miyaoaka et al., 2014). Oleh karena itu, integrasi insulasi dan material berperforma termal tinggi menjadi strategi penting dalam mencapai kenyamanan termal dan efisiensi energi bangunan..

2.4. Perhitungan Kenyamanan Termal

Terdapat dua cara untuk melakukan perhitungan kenyamanan termal pada bangunan, yakni perhitungan secara manual dan simulasi. Metode manual dilakukan menggunakan persamaan matematis dan standar tertentu untuk menghitung parameter yang diperlukan. Sedangkan, perhitungan secara simulasi memanfaatkan perangkat lunak untuk memodelkan kondisi termal bangunan secara detail sehingga dalam menghitung kenyamanan termal yang lebih kompleks dapat dilakukan dengan lebih mudah.

2.4.1. Manual

Perhitungan manual kenyamanan termal dalam bangunan umumnya melibatkan parameter lingkungan dan personal yang saling berinteraksi. Parameter lingkungan meliputi temperatur udara, kelembapan relatif, kecepatan udara, dan temperatur radiasi rata-rata, sedangkan faktor personal mencakup tingkat metabolisme dan isolasi pakaian (Telejko & Zender-Świercz, 2017). Pengukuran parameter lingkungan dilakukan menggunakan sensor seperti termometer, anemometer, dan alat pengukur kelembapan untuk memperoleh data kondisi aktual ruang (Alias et al., 2024). Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan kenyamanan termal seperti PMV/PPD berdasarkan standar ISO 7730 atau model adaptif yang mempertimbangkan kondisi iklim lokal (Ramírez-Dolores et al., 2022). Hasil perhitungan kemudian dievaluasi dengan membandingkan nilai

yang diperoleh terhadap standar seperti ASHRAE 55 untuk menentukan tingkat kenyamanan dan kesesuaian kondisi ruang (American Society of Heating, 2004)(Alias et al., 2024). Oleh karena itu, pendekatan ini memungkinkan penilaian kuantitatif terhadap kenyamanan termal sekaligus mendukung pengambilan keputusan dalam desain dan pengelolaan lingkungan bangunan.

2.4.2. Simulasi

Perhitungan kenyamanan termal dengan menggunakan simulasi dapat meningkatkan akurasi prediksi perhitungan dengan mempresentasikan kondisi lingkungan dengan lebih realistis, selain itu menggunakan *parametric simulation* dan *surrogate-assisted* dapat memungkinkan proses optimasi desain dengan lebih cepat dan tingkat kesalahan yang relatif rendah. Sehingga simulasi dapat mengevaluasi kondisi termal dengan lebih efisien tanpa melakukan perhitungan kompleks, prototipe fisik, hingga pengujian eksperimental. Oleh karena itu, simulasi menjadi solusi efektif dalam mendesain bangunan yang nyaman dan hemat energi. Berikut merupakan beberapa contoh perangkat simulasi yang dapat digunakan dalam menghitung kenyamanan termal.

- Computational Fluid Dynamics (CFD)

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode efektif untuk menganalisis kontur temperatur udara dan pola aliran udara dalam bangunan, serta mengidentifikasi pengaruh elemen desain seperti bukaan terhadap kenyamanan termal dan efisiensi energi. Pemodelan berbasis simulasi memiliki keunggulan dibanding pengukuran langsung karena mampu merepresentasikan kondisi bangunan secara lebih akurat dan efisien melalui integrasi variabel lingkungan (Hajji et al., 2024). Output simulasi berupa kontur temperatur dan distribusi aliran udara memungkinkan identifikasi zona nyaman dan tidak nyaman secara spasial (Hajji et al., 2024). Kenyamanan termal dipengaruhi oleh interaksi parameter seperti temperatur udara, kelembapan, dan kecepatan aliran udara yang berdampak pada kinerja manusia (Sugiono et al., 2017). Oleh karena itu, penerapan CFD dalam analisis bangunan mendukung optimasi desain ventilasi dan peningkatan kualitas lingkungan dalam ruang.

- Building Energi Simulation

Building Energy Simulation (BES) seperti EnergyPlus banyak digunakan untuk simulasi energi dinamis dan prediksi kenyamanan termal dalam bangunan. Perangkat ini mengintegrasikan model kenyamanan seperti PMV Fanger dan pendekatan adaptif untuk mengevaluasi kondisi termal pada berbagai musim (Fantozzi et al., 2021)(Chowdhury et al., 2008). Simulasi energi dinamis mampu memberikan gambaran konsumsi energi sekaligus kualitas lingkungan dalam ruang secara komprehensif (Fantozzi et al., 2021). Selain itu, penggunaan model kenyamanan dalam BES memungkinkan estimasi respons termal penghuni berdasarkan parameter lingkungan dan individu (Peeters et al., 2009). Oleh karena itu, BES sangat bermanfaat pada tahap awal perancangan bangunan untuk memprediksi performa energi dan kenyamanan sebelum konstruksi dilakukan (Fantozzi et al., 2021).

- **Neural Networks dan XGBoost**

Metode machine learning tingkat lanjut, seperti neural networks dan XGBoost, terbukti mampu memprediksi kenyamanan termal dengan akurasi tinggi hingga 98,7%. Pendekatan berbasis data ini efektif dalam menangkap hubungan kompleks antara parameter terkontrol bangunan dan kondisi kenyamanan dalam ruang (Zhang et al., 2018). Selain itu, model seperti XGBoost menunjukkan kinerja prediktif yang kuat dengan nilai akurasi tinggi dalam memodelkan hubungan antara variabel lingkungan dan respons penghuni (Iram et al., 2025). Penerapan model ini memungkinkan optimasi setpoint HVAC secara dinamis untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi energi dan kenyamanan termal (Zhang et al., 2018). Oleh karena itu, integrasi machine learning dalam sistem bangunan cerdas mendukung pengelolaan energi yang lebih adaptif dan peningkatan kualitas lingkungan dalam ruang.

- **Rhinoceros**

Rhinoceros (Rhino) merupakan software pemodelan tiga dimensi yang banyak digunakan dalam desain arsitektur dan lingkungan karena mampu terintegrasi dengan berbagai tools simulasi performa bangunan. Grasshopper sebagai platform desain parametrik di dalam Rhino memungkinkan integrasi dengan engine simulasi seperti EnergyPlus, OpenFOAM, dan CFD untuk analisis

performa termal, ventilasi alami, serta efisiensi energi (Loche & Carlo, 2021)(Yoon et al., 2019). Selain itu, plugin Honeybee dan Ladybug mendukung simulasi konsumsi energi, daylighting, dan kenyamanan termal melalui koneksi dengan engine seperti *EnergyPlus*, *Radiance*, dan *Daysim* (Campanile et al., 2015)(Aksin & Selçuk, 2021). Pendekatan berbasis parametrik dan simulation-based optimization memungkinkan evaluasi berbagai parameter desain secara lebih cepat dan efisien untuk memperoleh konfigurasi bangunan yang optimal terhadap kenyamanan termal dan penghematan energi (Aksin & Selçuk, 2021)(Loche & Carlo, 2021). Integrasi OpenFOAM dengan Grasshopper juga memungkinkan simulasi heat transfer dan thermal bridging dilakukan langsung dalam lingkungan desain Rhino, sehingga meningkatkan interoperabilitas dan efisiensi proses analisis termal bangunan (Kastner & Dogan, 2020). Oleh karena itu, kombinasi Rhino, Grasshopper, Honeybee, Ladybug, dan OpenFOAM menjadi pendekatan komprehensif dalam mendukung desain bangunan berbasis performa dan optimasi lingkungan termal.

2.4.3. Pemilihan CFD Sebagai Alat Simulasi

Computational Fluid Dynamics (CFD) di digunakan karena memiliki berbagai keunggulan dalam menganalisis termal dan aliran fluida pada bangunan maupun sistem teknik. CFD dapat mengurangi kebutuhan prototipe fisik dan eksperimen yang memakan biaya mahal, dikarenakan proses analisis dapat dilakukan secara visual melalui simulasi numerik sehingga simulasi menggunakan CFD dapat dilakukan lebih cepat (Kastner & Dogan, 2020). Hasil simulasi yang dilakukan CFD memberikan visualisasi yang sangat detail terkait distribusi temperatur, perpindahan panas, hingga aliran udara pada bangunan, sehingga mempermudah evaluasi performa termal dan ventilasi alami (Yoon et al., 2019)(Kastner & Dogan, 2020). Selain itu, penggunaan CFD dalam simulasi ini didorong karena perangkat ini lebih mudah diakses, bahkan oleh non-ahli, dengan kerangka kerja otomatis dan antarmuka yang intuitif (Rojas-sola et al., n.d.).