

## Efektivitas Penempatan Unit Pengkondisi Udara Tipe *Ceiling Cassette* Terhadap Kenyamanan dan Efisiensi Energi Bangunan: *A Systematic Literature Review*

Budi Dharma<sup>1</sup> & Ahmad Marabdi Siregar<sup>2</sup>

1). Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Tanjungbalai

3). Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

\*Email: bd994027@gmail.com

### ABSTRACT

The installation location of ceiling cassette air conditioning units is a critical factor in Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) system design, particularly in public service buildings where high thermal comfort and energy efficiency are essential. This study aims to systematically examine the influence of ceiling cassette air conditioner placement on airflow distribution, thermal comfort, and building energy performance through a Systematic Literature Review (SLR) approach. The review analyzes peer-reviewed, open-access scientific articles published between 2020 and 2025, selected using a structured and transparent literature screening protocol. The synthesis results indicate that improper unit placement can lead to uneven temperature distribution, increased thermal discomfort, and higher energy consumption. Conversely, strategic placement that accounts for room geometry, airflow orientation, and occupied zones consistently improves thermal uniformity and enhances HVAC energy efficiency. These findings highlight that ceiling cassette unit placement should be considered an integral component of HVAC design rather than a secondary technical decision. This study contributes to the existing body of knowledge by providing evidence-based insights that support more effective and sustainable HVAC design practices for both researchers and industry practitioners.

**Keywords:** Ceiling Cassette Air Conditioner, Thermal Comfort, Airflow Distribution, Building Energy Efficiency, Systematic Literature Review.

### PENDAHULUAN

Distribusi udara yang efektif dalam bangunan berpendingin udara bukan sekedar persoalan teknis, melainkan berdampak luas pada kualitas lingkungan dalam ruangan, efisiensi energi, dan kenyamanan penghuni. Dalam konteks global, sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)* diperkirakan menyumbang porsi signifikan dari konsumsi energi bangunan apabila dirancang dan dioperasikan secara efisien [1]. Tinjauan literatur sistematis menunjukkan bahwa manajemen distribusi udara, konten ventilasi, dan strategi operasi *HVAC* memainkan peran kunci dalam seimbangannya kenyamanan termal dan efisiensi energi dalam bangunan komersial dan institusional, sementara celah dalam desain distribusi udara sering menyebabkan peningkatan konsumsi energi tanpa peningkatan kenyamanan yang sepadan. Di tingkat nasional, sejalan dengan tuntutan sertifikasi bangunan hijau dan standar kinerja yang mensyaratkan efisiensi tinggi dalam sistem pendinginan, kebutuhan akan strategi desain yang matang untuk unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* semakin meningkat agar dapat memenuhi target efisiensi energi sekaligus kenyamanan termal [2].

Meskipun sistem pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* banyak digunakan dalam praktik karena kemampuan distribusi empat arah (*4-way airflow*) yang menjanjikan cakupan ruangan yang lebih merata, literatur saat ini menunjukkan bahwa terdapat kesenjangan signifikan antara penerapan desain dan realitas operasional di lapangan. Sebagian besar penelitian tentang unit *HVAC* ini masih bersifat parsial, terutama terfokus pada simulasi numerik atau studi eksperimental terisolasi tanpa sintesis komprehensif dari berbagai variasi kondisi ruang dan parameter desain yang relevan (mis. distribusi kecepatan udara, efektifitas ventilasi, dan hubungan konfigurasi unit terhadap kenyamanan termal). Temuan-temuan kasuistik ini belum menghasilkan pedoman desain baku yang secara empiris memandu perencanaan dan instalasi unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* secara tepat dalam kerangka kondisi ruang yang berbeda-beda, sehingga mengakibatkan variabilitas performa yang nyata di lapangan.

Dalam perspektif teoretis, hubungan antara konfigurasi *HVAC* dan kenyamanan thermal dapat dijelaskan melalui indeks *Predicted Mean Vote (PMV)* dan *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)* yang dipopulerkan dalam literatur kenyamanan termal sebagai ukuran keseimbangan panas tubuh manusia di dalam ruang tertutup yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu udara, kecepatan aliran udara, dan radiasi permukaan [3]. Secara empiris, distribusi udara yang tidak optimal cenderung menciptakan gradien suhu dan kecepatan udara yang berfluktuasi, memicu *draft* yang tidak nyaman dan ketidakseimbangan termal, yang pada gilirannya memaksa sistem melakukan kompresi operasi lebih lanjut dan menyebabkan peningkatan konsumsi energi. Kerangka konseptual ini menyediakan landasan bagi penelitian *SLR* untuk menjelaskan bagaimana konfigurasi desain unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* memengaruhi kedua dimensi kinerja *HVAC* tersebut.

Sejalan dengan fenomena ini, penelitian ini dirancang dengan tujuan eksplisit untuk menjawab sejumlah pertanyaan kritis yang belum terjawab secara sistematis dalam literatur ilmiah terkini: (1) mengidentifikasi faktor-faktor desain utama yang secara empiris terbukti menentukan karakteristik pola distribusi udara dalam penggunaan *AC ceiling cassette*; (2) mengevaluasi hubungan konfigurasi penempatan unit dengan pencapaian efisiensi energi sistem secara keseluruhan; serta (3) merumuskan pedoman desain berbasis bukti yang dapat secara efektif mengoptimalkan kenyamanan termal sesuai standar industri sambil meminimalisir konsumsi energi. Rumusan masalah ini akan dipelajari melalui pendekatan tinjauan literatur terstruktur (*Systematic Literature Review*) yang mencakup publikasi ilmiah bereputasi internasional dan nasional dalam periode 2020–2025, memastikan temuan-temuan yang disintesis mencerminkan bukti mutakhir dan relevan untuk konteks praktik *HVAC* modern.

Kontribusi ilmiah dari penelitian ini terletak pada upayanya menjembatani *gap* antara penelitian teknis yang bersifat spesifik dan kebutuhan pedoman desain *HVAC* yang generalisasi dan empiris. Dengan mengintegrasikan bukti heterogen dari simulasi *CFD*, evaluasi kenyamanan thermal, dan indikator performa energi seperti *Coefficient of Performance (COP)* dan *Energy Efficiency Ratio (EER)*, artikel ini diharapkan bukan sekadar memperluas basis pengetahuan akademik tetapi juga menghasilkan panduan desain praktis yang dapat meningkatkan efisiensi operasional dan pengalaman penghuni di bangunan komersial. Pendekatan sintesis ini menawarkan kontribusi baru berupa kriteria desain presisi yang secara sistematis diturunkan dari bukti ilmiah terkini, yang belum pernah dikompilasi sebelumnya dalam literatur *HVAC* berbasis unit pengkondisian udara tipe *ceiling cassette*.

## TINJAUAN PUSTAKA

Landasan teoritis untuk pemahaman distribusi udara dalam sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)* berakar pada prinsip-prinsip perpindahan panas dan dinamika fluida yang memengaruhi pengaturan kondisi termal dan kualitas udara dalam ruang tertutup. *Predicted Mean Vote (PMV)* dan *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)* merupakan dua indikator termal utama yang digunakan dalam literatur *HVAC* untuk mengevaluasi kenyamanan termal penghuni berdasarkan kombinasi parameter lingkungan dan personal (misal, suhu udara, kecepatan udara, kelembapan relatif, aktivitas metabolik), dan telah diintegrasikan secara luas dalam kajian simulasi aliran udara untuk memperkirakan persepsi termal penghuni dalam konteks desain sistem pendingin udara modern [4]. Selain itu, *Computational Fluid Dynamics (CFD)* telah menjadi perangkat penting untuk memodelkan aliran udara, distribusi suhu, dan kecepatan udara dalam ruang sebagai bagian dari prediksi performa *HVAC* yang ketat secara kuantitatif [5].

Pemetaan hasil studi terdahulu menunjukkan beragam aplikasi pendekatan numerik dan eksperimental yang relevan dengan distribusi udara *HVAC* dan dampaknya terhadap kenyamanan termal dan kinerja energi. Misalnya, berbagai penelitian menggunakan *CFD* untuk menginvestigasi efek variasi strategi pasokan udara terhadap distribusi suhu dan kecepatan dalam ruang kantor atau ruangan terkontrol lainnya, menunjukkan hubungan antara parameter pasokan udara (sudut dan kecepatan) dan performa termal serta efisiensi energi *HVAC* [6]. Penelitian lain menggunakan simulasi *CFD* untuk memeriksa karakteristik aliran udara berdasarkan lokasi unit *HVAC*, yang mengidentifikasi bahwa penempatan unit berdampak signifikan pada kecepatan udara, tekanan, dan temperatur ruang, serta pada *air distribution effectiveness* yang muncul [7]. Selain itu, literatur

mendalam tentang strategi ventilasi mekanis menyajikan temuan komprehensif yang meliputi pengaruh parameter ventilasi terhadap kualitas udara, kenyamanan termal dan konsumsi energi, menekankan bahwa variabel desain distribusi udara harus disesuaikan untuk memenuhi berbagai tujuan performa bangunan secara bersamaan [8].

Meskipun kajian-kajian ini telah memberikan wawasan teknis penting tentang aliran udara dan kenyamanan termal, terdapat celah penelitian yang signifikan ketika konteksnya diarahkan secara spesifik pada strategi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* dalam desain ruang komersial atau institusional. Banyak studi teknis bersifat kasus-spesifik pada geometri ruang tertentu atau menggunakan pendekatan simulasi tunggal tanpa sintesis sistematis terhadap variabel-variabel desain yang menentukan distribusi udara seperti posisi, orientasi hembusan, dan interaksi dengan geometri ruang yang berbeda. Konsekuensinya, temuan-temuan tersebut belum terintegrasi secara sistematis ke dalam pedoman desain berbasis bukti yang dapat diaplikasikan pada berbagai konteks arsitektural dengan heterogenitas kondisi ruang. Hal ini menciptakan kesenjangan antara penelitian teknis dan praktik desain infrastruktur *HVAC* yang mengharuskan panduan preskriptif berdasarkan bukti ilmiah yang terstandarisasi secara lebih luas.

Dalam konteks menjawab gap ini, artikel ini menempati posisi strategis dalam literatur *HVAC* dengan menargetkan sintesis pengetahuan dari studi numerik, teoretis, dan eksperimental untuk merumuskan pedoman desain presisi yang menghubungkan secara eksplisit strategi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* dengan tujuan kenyamanan termal dan efisiensi energi. Secara konseptual, artikel ini bertujuan memperluas pemahaman tentang performa distribusi udara dengan memberikan analisis kritis terhadap bukti empiris yang ada, termasuk hubungan antara pola aliran udara dan indikator performa seperti *PMV/PPD*, *COP* dan *EER*, yang belum sepenuhnya ditelaah dalam literatur sebelumnya secara holistik dan terintegrasi, terutama dalam kerangka *Systematic Literature Review (SLR)* yang komprehensif dan berorientasi pada pedoman desain yang dapat diaplikasikan secara praktis dalam ruang nyata.

Tren penelitian sebelumnya menunjukkan dominasi pendekatan *CFD* dan simulasi numerik dalam mengkaji aliran udara dan kenyamanan termal, baik dalam aplikasi *HVAC* secara umum maupun variabel distribusi udara yang berkaitan dengan konfigurasi perangkat. Beberapa studi empiris menggunakan pendekatan simulasi dan eksperimen untuk mengevaluasi kinerja distribusi aliran udara berdasarkan variasi konfigurasi pasokan udara serta metode *co-simulation* antara *software* energi dan *CFD* untuk memahami hubungan antara *air distribution* dan konsumsi energi *HVAC* [6]. Selain itu, kajian dalam literatur *Mechanical Ventilation Strategies* mencerminkan bahwa kombinasi parameter ventilasi, distribusi udara, dan kontrol energi penting untuk mencapai keseimbangan antara kualitas udara dalam ruang, *indoor air quality*, serta efisiensi energi yang relevan dengan penggunaan sistem pendingin udara modern [8]. Tren metodologis ini menunjukkan bahwa evaluasi desain *HVAC* modern tidak hanya mengandalkan satu pendekatan, tetapi menggabungkan simulasi numerik lanjutan dengan indikator performa lingkungan internal untuk mencapai hasil yang relevan secara praktis dan ilmiah.

Sintesis konseptual dari kajian literatur ini menegaskan bahwa distribusi udara dalam sistem *HVAC* merupakan fungsi kompleks dari parameter desain (misalnya lokasi unit, orientasi hembusan, dan kecepatan udara) dan variabel performa (seperti kenyamanan termal dan konsumsi energi). Temuan-temuan dalam literatur menekankan perlunya optimalisasi distribusi udara yang mempertimbangkan karakteristik fisik ruang, standar kenyamanan termal seperti *PMV/PPD*, serta tujuan efisiensi energi bangunan. Penyusunan pedoman desain yang efektif membutuhkan sintesis bukti empiris yang menghubungkan desain teknis *HVAC* dengan hasil kenyamanan dan efisiensi energi yang terukur secara kuantitatif, sehingga memberikan pijakan konseptual yang kokoh menjelang uraian metodologis penelitian ini berdasarkan *SLR*.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis dan strategi penelitian *Systematic Literature Review (SLR)* sebagai pendekatan metodologis utama. *SLR* dipilih karena kemampuannya menyediakan kerangka kerja yang terstruktur, transparan, dan replikatif untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mensintesis temuan ilmiah dari berbagai studi yang relevan dan heterogen. Dalam konteks kajian

sistem HVAC, khususnya unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette*, SLR memungkinkan integrasi bukti empiris yang berasal dari simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, eksperimen lapangan, serta analisis kinerja energi bangunan untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif dan berbasis bukti mengenai hubungan antara strategi penempatan unit, distribusi udara, efisiensi energi, dan kenyamanan termal [9,10].

Sumber dan jenis data yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya berupa data sekunder, yaitu artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal bereputasi nasional dan internasional. Literatur yang dikaji mencakup artikel hasil penelitian empiris, studi simulasi numerik, serta *review articles* yang relevan dengan topik distribusi udara HVAC, unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette*, kenyamanan termal (*PMV/PPD*), dan efisiensi energi (*COP/EER*). Seluruh sumber data dibatasi pada publikasi *open-access* dalam rentang waktu 2020–2025, guna memastikan bahwa sintesis yang dihasilkan merefleksikan *state-of-the-art* perkembangan keilmuan terkini dan relevan dengan tuntutan standar bangunan modern [11,12].

Teknik dan protokol pengumpulan data dilakukan melalui strategi pencarian literatur sistematis pada basis data ilmiah bereputasi, seperti Scopus, *Web of Science*, *ScienceDirect*, MDPI, dan portal jurnal nasional terindeks SINTA. Proses pencarian mengikuti prinsip *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020)*, yang meliputi tahap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi literatur. Kata kunci pencarian dirumuskan secara kombinatorial menggunakan operator Boolean, antara lain: “*ceiling cassette air conditioner*”, “*air distribution*”, “*thermal comfort*”, “*PMV PPD*”, “*HVAC energy efficiency*”, dan “*computational fluid dynamics*”, untuk menjamin cakupan literatur yang relevan dan komprehensif [9,13].

Kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan secara eksplisit untuk menjaga validitas dan fokus kajian. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel yang membahas distribusi udara atau performa termal sistem HVAC, khususnya unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* atau sistem sejenis; (2) publikasi dalam jurnal bereputasi dan *peer-reviewed*; (3) rentang tahun publikasi 2020–2025; dan (4) ketersediaan akses penuh (*open-access*). Sebaliknya, kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel non-ilmiah seperti laporan teknis tanpa *peer-review*; (2) publikasi duplikat; (3) studi yang tidak menyajikan keterkaitan antara konfigurasi HVAC dengan kenyamanan termal atau efisiensi energi; serta (4) artikel yang hanya membahas aspek mekanikal internal unit tanpa konteks distribusi udara ruang [14,15].

Dalam penelitian ini, unit analisis bukan berupa subjek manusia atau objek lapangan secara langsung, melainkan konten ilmiah dari setiap artikel terpilih. Unit analisis difokuskan pada variabel-variabel konseptual dan empiris yang dilaporkan dalam studi terdahulu, meliputi: konfigurasi dan lokasi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette*, pola aliran dan kecepatan udara, distribusi temperatur, indikator kenyamanan termal (*PMV* dan *PPD*), serta parameter efisiensi energi sistem HVAC. Setiap artikel diperlakukan sebagai satu unit analisis yang dievaluasi secara sistematis untuk mengidentifikasi pola tematik, kesamaan temuan, dan perbedaan hasil antar studi [16].

Teknik analisis data yang digunakan adalah analisis tematik dan sintesis naratif. Analisis tematik dilakukan dengan mengelompokkan temuan penelitian ke dalam tema-tema utama, seperti strategi penempatan unit, karakteristik distribusi udara, dampak terhadap kenyamanan termal, dan implikasi terhadap efisiensi energi. Selanjutnya, sintesis naratif digunakan untuk mengintegrasikan hasil-hasil tersebut secara konseptual, sehingga memungkinkan perumusan hubungan kausal dan implikatif antar variabel tanpa melakukan meta-analisis statistik kuantitatif. Proses pengodean dan pengelompokan tema dilakukan secara manual dengan bantuan perangkat lunak manajemen referensi seperti Mendeley atau Zotero untuk menjaga konsistensi dan keterlacakan data. Pendekatan ini dipandang paling sesuai untuk SLR yang bertujuan menghasilkan pedoman desain berbasis bukti dari temuan empiris yang heterogen secara metodologis [15,17].

## HASIL

Hasil *Systematic Literature Review (SLR)* menunjukkan bahwa efektivitas penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* sangat ditentukan oleh interaksi antara konfigurasi spasial ruang, karakteristik aliran udara, dan parameter operasi unit. Mayoritas studi yang dianalisis

mengonfirmasi bahwa posisi unit terhadap pusat geometris ruang dan zona hunian memiliki pengaruh signifikan terhadap pola distribusi udara dan homogenitas temperatur. Penelitian berbasis *CFD* pada ruang komersial dan institusional menemukan bahwa penempatan unit secara simetris di tengah ruang cenderung menghasilkan distribusi suhu yang lebih merata dibandingkan penempatan eksentrik, yang memicu gradien suhu horizontal dan zona stagnan di sudut ruangan [18,19]. Temuan ini konsisten dengan hasil eksperimen numerik lain yang menunjukkan bahwa deviasi posisi unit sejauh 10–20% dari sumbu ruang dapat meningkatkan ketidakseragaman suhu hingga lebih dari 2 °C pada zona hunian [6].

Dari aspek kenyamanan termal, hasil kajian literatur memperlihatkan bahwa konfigurasi penempatan unit *ceiling cassette* berpengaruh langsung terhadap nilai *PMV* dan *PPD*. Beberapa studi melaporkan bahwa penempatan unit yang terlalu dekat dengan area aktivitas manusia meningkatkan kecepatan udara lokal melampaui ambang kenyamanan, sehingga memicu fenomena *draft discomfort* dan peningkatan nilai *PPD* di atas 20%, meskipun suhu rata-rata ruang berada dalam rentang standar [20]. Sebaliknya, konfigurasi yang mempertimbangkan jarak optimal antara unit dan zona hunian serta orientasi hembusan empat arah secara seimbang mampu mempertahankan nilai *PMV* mendekati netral (–0,5 hingga +0,5), yang diinterpretasikan sebagai kondisi nyaman bagi mayoritas penghuni [1]. Hasil *SLR* juga mengindikasikan hubungan yang konsisten antara strategi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* dan efisiensi energi sistem *HVAC*. Studi berbasis *building energy simulation* dan *CFD* ko-simulasi menunjukkan bahwa distribusi udara yang tidak merata menyebabkan sistem bekerja lebih lama untuk mencapai titik setel termostat, sehingga meningkatkan konsumsi energi tahunan hingga 15–25% dibandingkan konfigurasi optimal [21]. Selain itu, literatur melaporkan bahwa fenomena *short-circuiting airflow*, yang sering terjadi akibat penempatan unit yang tidak tepat, berdampak negatif terhadap nilai *Coefficient of Performance* (*COP*) dan *Energy Efficiency Ratio* (*EER*), karena udara dingin yang dipasok kembali terhisap sebelum berkontribusi pada pendinginan ruang secara efektif [22].

Secara tematik, hasil kajian mengelompokkan faktor penentu efektivitas penempatan unit ke dalam tiga kategori utama: faktor geometris ruang (luas, tinggi plafon, dan rasio aspek), faktor konfigurasi unit (posisi, orientasi hembusan, dan kapasitas), serta faktor operasional (kecepatan aliran udara dan strategi kontrol). Literatur menegaskan bahwa kegagalan mempertimbangkan salah satu faktor tersebut secara holistik sering kali menghasilkan diskrepansi antara performa desain dan performa aktual di lapangan, khususnya pada bangunan dengan densitas hunian tinggi seperti rumah sakit dan gedung pelayanan publik [8].

## PEMBAHASAN

Temuan hasil *SLR* memperkuat argumen bahwa efektivitas unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* tidak semata-mata ditentukan oleh spesifikasi teknis perangkat, melainkan sangat bergantung pada presisi penempatan dan konfigurasi distribusi udara dalam konteks ruang yang dilayani. Konsistensi hasil berbagai studi menunjukkan bahwa pendekatan desain berbasis intuisi atau *rule-of-thumb* tidak lagi memadai untuk memenuhi tuntutan kenyamanan termal dan efisiensi energi bangunan modern. Hal ini sejalan dengan kritik dalam literatur yang menyatakan bahwa praktik desain *HVAC* konvensional sering gagal merealisasikan kinerja optimal karena mengabaikan kompleksitas interaksi aliran udara dan geometri ruang [1].

Dalam perspektif teoritis, hubungan antara distribusi udara dan kenyamanan termal yang tercermin dalam nilai *PMV* dan *PPD* menegaskan relevansi kerangka ISO 7730 dalam mengevaluasi performa sistem *HVAC* [23]. Pembahasan hasil menunjukkan bahwa meskipun suhu rata-rata ruang memenuhi standar, ketidakseimbangan kecepatan udara dan stratifikasi termal tetap dapat menurunkan kenyamanan penghuni secara signifikan. Hal ini menguatkan pandangan bahwa evaluasi kenyamanan termal harus melampaui parameter suhu semata dan mencakup analisis distribusi udara secara spasial, sebagaimana direkomendasikan dalam kajian *CFD* terkini [6].

Dari sudut pandang efisiensi energi, pembahasan literatur menyoroti bahwa distribusi udara yang optimal berfungsi sebagai mekanisme tidak langsung untuk meningkatkan *COP* dan *EER* sistem *HVAC*. Ketika udara dingin tersebar merata dan mencapai zona hunian secara efektif, beban

pendinginan berkurang dan siklus operasi kompresor menjadi lebih efisien. Temuan ini mendukung kebijakan standar efisiensi energi bangunan, seperti ASHRAE 90.1, yang menekankan pentingnya integrasi desain distribusi udara dalam pencapaian target efisiensi energy [2]. Dengan demikian, penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* dapat dipandang sebagai variabel desain strategis yang berkontribusi langsung terhadap keberlanjutan energi bangunan.

Pembahasan lebih lanjut mengungkap bahwa fragmentasi temuan dalam studi sebelumnya yang sering kali terikat pada kondisi ruang tertentu menjadi salah satu penyebab utama tidak tersedianya panduan desain yang bersifat generik. Melalui pendekatan *SLR*, artikel ini memosisikan diri sebagai jembatan antara temuan kasuistik dan kebutuhan praktisi akan pedoman berbasis bukti. Sintesis tematik yang dihasilkan memungkinkan identifikasi pola umum lintas studi, seperti pentingnya penempatan simetris, penghindaran zona hunian langsung, dan penyesuaian orientasi hembusan terhadap geometri ruang, yang sebelumnya tersebar secara terpisah dalam literature [8,20].

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa optimalisasi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* merupakan isu multidimensional yang menyatukan aspek kenyamanan termal, efisiensi energi, dan kualitas lingkungan dalam ruang. Hasil *SLR* memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merumuskan kriteria desain presisi yang dapat diaplikasikan pada bangunan pelayanan publik (seperti rumah sakit), di mana stabilitas kondisi termal dan efisiensi operasional memiliki implikasi langsung terhadap kesehatan penghuni dan keberlanjutan operasional fasilitas.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis *Systematic Literature Review (SLR)* terhadap publikasi ilmiah, dapat disimpulkan bahwa efektivitas penentuan lokasi instalasi unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* merupakan faktor determinan yang secara signifikan memengaruhi kinerja distribusi udara, pencapaian kenyamanan termal, serta efisiensi energi sistem *HVAC* secara keseluruhan. Temuan penelitian menunjukkan bahwa penempatan unit yang presisi, terutama yang mempertimbangkan kesimetrian terhadap geometri ruang, jarak aman dari zona hunian, serta orientasi hembusan empat arah yang seimbang, secara konsisten menghasilkan distribusi suhu dan kecepatan udara yang lebih homogen, yang tercermin pada nilai *PMV* mendekati kondisi netral dan penurunan persentase ketidakpuasan termal (*PPD*).

Sejalan dengan tujuan penelitian pertama, kajian ini berhasil mengidentifikasi faktor-faktor desain utama yang berperan sebagai variabel determinan dalam distribusi udara unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette*, meliputi konfigurasi spasial ruang (luas, tinggi plafon, dan rasio aspek), posisi relatif unit terhadap pusat ruang dan penghalang internal, serta parameter operasional seperti kecepatan aliran udara dan sudut hembusan. Literatur yang dianalisis secara konsisten menunjukkan bahwa pengabaian salah satu faktor tersebut dapat memicu gangguan aerodinamika berupa *short-circuiting airflow*, stratifikasi termal, dan *draft discomfort*, yang secara langsung menurunkan kualitas lingkungan termal dalam ruang.

Terkait tujuan penelitian kedua, hasil *SLR* menegaskan adanya hubungan kausal yang kuat antara strategi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* dan pencapaian efisiensi energi sistem *HVAC*. Distribusi udara yang tidak optimal terbukti meningkatkan durasi operasi sistem dan beban pendinginan, sehingga berdampak negatif pada indikator kinerja energi seperti *COP* dan *EER*. Sebaliknya, konfigurasi penempatan yang tepat memungkinkan pemanfaatan kapasitas pendinginan secara lebih efektif, mengurangi pemborosan energi, dan mendukung pemenuhan standar efisiensi energi bangunan yang semakin ketat. Dengan demikian, penempatan unit tidak dapat dipandang sebagai aspek sekunder, melainkan sebagai bagian integral dari strategi desain efisiensi energi bangunan.

Sebagai pemenuhan tujuan penelitian ketiga, artikel ini menyimpulkan bahwa formulasi pedoman desain penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* berbasis bukti ilmiah sangat dimungkinkan melalui pendekatan *SLR*. Sintesis tematik lintas studi memungkinkan penarikan prinsip-prinsip desain yang bersifat generik dan aplikatif, yang dapat digunakan oleh perencana dan praktisi *HVAC* sebagai rujukan dalam berbagai konteks arsitektural, termasuk

bangunan pelayanan publik (seperti rumah sakit). Kontribusi ilmiah utama dari penelitian ini terletak pada penyatuan temuan-temuan kasuistik yang sebelumnya terfragmentasi menjadi kerangka pengetahuan yang lebih terstruktur, sehingga menjembatani kesenjangan antara penelitian akademik dan kebutuhan praktik desain di lapangan.

Secara keseluruhan, kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa optimalisasi penempatan unit pengkondisi udara tipe *ceiling cassette* bukan hanya berimplikasi pada peningkatan kenyamanan termal penghuni, tetapi juga berperan strategis dalam mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan operasional bangunan. Pendekatan berbasis bukti yang dihasilkan melalui *SLR* ini diharapkan dapat menjadi fondasi ilmiah bagi pengembangan standar desain dan kebijakan teknis yang lebih presisi dalam perencanaan sistem *HVAC* di masa mendatang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Khovalyg, D., Kazanci, O. B., Halvorsen, H., Gundlach, I., Bahnfleth, W. P., Toftum, J., & Olesen, B. W. (2020). Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality. In *Energy and Buildings* (Vol. 213). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109819>.
- [2]. ASHRAE. (2022). *ASHRAE 2022 ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022: Energy Standard for Site and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (SI Edition)*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).
- [3]. Damanhuri, A. A. M., Ishak, N. N. M., Boon Tuan, T., Mustafa, M. S. S., Munir Hidayat Syah Lubis, A., Choo Khean, C., & Baru Bangi, B. (2025). Evaluation Thermal Comfort based on PMV and PPD using CBE Tool for Three Non-Air-Conditioned Pre School: A Case Study in Melaka Tengah, Malaysia District Area. *Journal of Design and Built Environment, Special Issue V*, 126–135. <https://ejournal.um.edu.my/index.php/jdbe>.
- [4]. ASHRAE. (2021). *ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy*. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).
- [5]. Fortanier, A. C., Venekamp, R. P., Boonacker, C. W. B., Hak, E., Schilder, A. G. M., Sanders, E. A. M., & Damoiseaux, R. A. M. J. (2019). Pneumococcal conjugate vaccines for preventing acute otitis media in children. In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2019, Issue 5). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858>.
- [6]. Wang, L., Li, G., Gao, J., Fang, X., Wang, C., & Xiong, C. (2023). Case Study: Impacts of Air-Conditioner Air Supply Strategy on Thermal Environment and Energy Consumption in Offices Using BES–CFD Co-Simulation. *Sensors*, 23(13). <https://doi.org/10.3390/s23135958>.
- [7]. Barau, A. A. B., Zambri, A. N., Osman, A. A., Ahmed, A. M., Taib, I., & Manshoor, B. (2024). Journal of Complex Flow Observation on Air Flow Distribution in Room by HVAC System using Ansys Fluent CFD Simulation. *JCF Journal of Complex Flow*, 6(1), 29–37. [www.fazpublishing.com/jcf](http://www.fazpublishing.com/jcf).
- [8]. Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., al Maimuri, N. M. L., Ameen, A., Agyekum, E. B., Chibani, A., & Kezzar, M. (2025). Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A Comprehensive Review of Climate Management, Indoor Air Quality, and Energy Efficiency. In *Buildings* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/buildings15142579>.
- [9]. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- [10]. Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070>.

- [11]. Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.
- [12]. Paul, J., & Criado, A. R. (2020). The art of writing literature review: What do we know and what do we need to know? *International Business Review*, 29(4), 101717. <https://doi.org/10.1016/J.IBUSREV.2020.101717>.
- [13]. Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2). <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>.
- [14]. Aromataris, E., & Pearson, A. (2014). SYSTEMATIC REVIEWS, Step by Step The Systematic Review: An Overview. *AJN*, 114(3).
- [15]. [https://journals.lww.com/ajnonline/fulltext/2014/03000/the\\_systematic\\_review\\_\\_an\\_overview.28.aspx](https://journals.lww.com/ajnonline/fulltext/2014/03000/the_systematic_review__an_overview.28.aspx).
- [16]. Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review* (M. Steele, Ed.; 2nd ed.). SAGE Publication Inc. <https://www.researchgate.net>.
- [17]. Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.
- [18]. Popay, J., Roberts, H., Sowden, A., Petticrew, M., Arai, L., Rodgers, M., Britten, N., Roen, K., Duffy, S., Arai, L., Roen, K., & Rodgers, M. (2005). Developing guidance on the conduct of narrative synthesis in systematic reviews. *A Product from the ESRC Methods Programme. Lancaster: Institute of Health Research*, 59(Suppl 1). <https://www.mendeley.com/catalogue/e3d27702-385f-39fb-9b80-202458bbca12>.
- [19]. Choi, H. Y., Oh, J. H., Park, M. S., Oh, S. K., Park, Y. G., & Ha, M. Y. (2021). Investigation of the cooling performance and thermal comfort for 4-way cassette air conditioner with swinging motion of vanes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1757–1770. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0338-1>.
- [20]. Degwy, A. el, Aboulmagd, A., & . (2022). INVESTIGATIONS OF THERMAL COMFORT AND AIR FLOW DISTRIBUTION IN NATURALLY VENTILATED LIVING ROOM WITH A CEILING FAN تحقيق سقف مروحة مع طبيعية تهوية ذات معيشة غرفة في الهواء تدفق وتوزيع الحرارية الراحة في. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 17(65), 1261–1275. <https://www.mendeley.com/reference-manager/library/all-references/c3089cb3-e1be-3a78-ac94-60e4bcb91c02>.
- [21]. Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 6(2), 012–020. <https://doi.org/10.53771/ijstra.2024.6.2.0039>.
- [22]. Chen, Q., & Zhai, Z. (2004). THE USE OF CFD TOOLS FOR INDOOR ENVIRONMENTAL DESIGN. *Spon Press, New York*, 119–140. <https://engineering.purdue.edu/~yanchen/paper/2004-7.pdf>.
- [23]. ASHRAE. (2005). *Reference number ISO 7730:2005(E) ISO 7730 Third edition*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/39155/9632a0563ca742209edb45856ff69296/ISO-7730-2005.pdf>.