

Studi Pengaruh Properti Termal Material Dinding dan Infiltrasi Udara terhadap Potensi Penghematan Energi dan Kenyamanan Termal Rumah Susun

Ahmad Yusuf Rabbani*, Jatmika Adi Suryabrata

Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Email: yusufrabbani@gmail.com*

Keywords

Wall thermal properties;
Air Infiltration;
Energy savings;
Thermal comfort;
Rumah susun

Abstract

Cooling load contributes to 40-70% of building energy consumption. Urban population growth and increasing use of air conditioning pose challenges for rumah susun in energy saving and providing thermal comfort. This research aims to analyze the effect of wall thermal properties (thermal conductivity, density, specific heat) and air infiltration on the energy consumption and thermal comfort (operative temperature) in apartment units as a generalization of a large-scale survey. The simulation method with the energyplus tool was carried out on a baseline validation model (IKE 53 kWh/m²/year without air conditioning, which then increased to 158.80 kWh/m²/year with air conditioning), to further optimize the material properties and change the ACH from 1.9 to 1.0 and 0.4. The results show that high insulation materials (PIR, EPS) and low ACH (0.4) can save energy up to 29.17%, although the OT amplitudo increases in materials with low thermal conductivity. On the other hand, high thermal mass provides temperature stability but is less efficient in saving energy. The combination of bedroom envelope wall insulation with tight infiltration is an optimal strategy in providing energy efficiency and comfort according to ASHRAE 55 standards in air-conditioned rumah susun located in Jakarta's hot-humid climate.

Kata Kunci

Properti termal dinding;
Infiltrasi udara;
Penghematan energi;
Kenyamanan termal;
Rumah susun

Abstrak

Beban pendinginan berkontribusi pada 40 – 70 % konsumsi energi bangunan. Pertumbuhan penduduk urban dan meningkatnya penggunaan ac menjadi tantangan untuk rumah susun dalam melakukan penghematan energi dan menghadirkan kenyamanan termal. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh modifikasi properti termal material dinding (konduktivitas termal, densitas, kalor jenis) dan infiltrasi udara terhadap indeks konsumsi energi serta kenyamanan termal (*operative temperature*) pada unit rumah susun hasil generalisasi survey skala besar. Metode simulasi dengan perangkat *energyplus* dilakukan pada model validasi *baseline* (IKE 53 kWh/m²/tahun tanpa AC, yang kemudian naik menjadi 158,80 kWh/m²/tahun dengan AC), untuk selanjutnya dilakukan optimasi pada properti material dan perubahan ACH dari 1,9 menjadi 1,0 dan 0,4. Hasil menunjukkan material isolasi tinggi (PIR, EPS) dan ACH rendah (0,4) dapat menghemat energi hingga mencapai 29,17%, meski amplitudo OT meningkat pada material dengan konduktivitas termal rendah. Di sisi lain, massa termal tinggi memberikan stabilitas suhu namun kurang efisien menghemat energi. Kombinasi isolasi dinding selubung kamar tidur dengan infiltrasi ketat menjadi strategi yang optimal dalam memberikan efisiensi energi dan kenyamanan sesuai standar ASHRAE 55 di rumah susun dengan AC yang terletak di iklim panas-lembap Jakarta.

PENDAHULUAN

Hasil sensus menunjukkan jumlah penduduk di Indonesia sebanyak 237.641.326 jiwa pada tahun 2010 dan meningkat menjadi 270.203.917 jiwa pada tahun 2020 (Badan Pusat Statistik, 2020). Peningkatan jumlah penduduk berbanding lurus dengan kebutuhan lahan, namun berbanding terbalik dengan ketersediannya. Melalui desain *vertical housing*, pembangunan rumah susun dapat mengurangi penggunaan lahan dan mengoptimalkan ruang terbuka untuk kepentingan bersama (Setia Dewi Prihapsari dkk., 2022).

Masyarakat Indonesia termasuk juga didalamnya masyarakat penghuni rumah susun mengalami peningkatan taraf ekonomi yang mempengaruhi perubahan pola hidupnya. Dalam kurun waktu 20 tahun terakhir, Indonesia menunjukkan pertumbuhan ekonomi yang relatif stabil, merujuk pada tren positif kenaikan nilai PDB (Produk Domestik Bruto) perkapita dari tahun ke tahun (World Bank, 2024). Kondisi ekonomi yang cukup stabil sehingga daya beli masyarakat meningkat memberikan ruang bagi Masyarakat untuk bisa melakukan perubahan pada pola konsumsi rumah tangganya. Salah satu cara yang dilakukan adalah pengadaan unit AC di rumah tinggal. Berdasarkan data yang dirilis oleh Survei Sosial Ekonomi Nasional (Susenas) yang dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik (BPS), presentase rumah tangga di Indonesia yang menggunakan AC terus mengalami peningkatan hingga menyentuh angka 20,5 % pada tahun 2024 yang merepresentasikan pertumbuhan relatif hingga hampir dua kali lipat hanya dalam kurun waktu dua tahun saja (Badan Pusat Statistik, 2024). Peningkatan penggunaan AC pada sektor rumah tangga yang terjadi, menandai adanya sebuah transformasi pola konsumsi energi rumah tangga, berbeda dengan hasil survey nasional yang telah dilakukan oleh CLASP-Ipsos pada tahun 2018, dimana kondisi saat itu hanya sekitar 5 % rumah tangga berlistrik di Indonesia yang telah memiliki AC (CLASP & IPSOS, 2019). Studi yang dilakukan pada tahun 2022 mengenai konsumsi energi rumah tangga di tiga kota besar Indonesia (Jakarta, Semarang dan Bandung) menunjukkan bahwa rata-rata konsumsi energi rumah tangga meningkat karena sumbangsih penggunaan AC dan aktivitas memasak di rumah tangga (Surahman dkk., 2022). Dari keseluruhan konsumsi energi bangunan, dalam rentang antara 40% hingga 70% konsumsi energi bangunan dipengaruhi oleh sistem pengkondisian udara dan ventilasi (Khorram dkk., 2020). Konsumsi energi yang besar pada bangunan juga harus diimbangi upaya efisiensi energi yang baik, maka sangat penting untuk menerapkan prinsip bangunan hijau hemat energi. Sudah banyak tindakan diupayakan untuk menekan konsumsi energi pada bangunan. Salah satu strategi penghematan energi bangunan yang saat ini sedang mendapatkan peningkatan perhatian adalah strategi *passive design* (Elaouzy & El Fadar, 2022). *Passive Design* juga dapat memberikan rasa nyaman bagi pengguna bangunan dan meningkatkan kesehatannya dengan cara mengharmonisasikan iklim dan kondisi lingkungan dengan rancangan arsitektur bangunan dan teknologinya (Yao dkk., 2018).

Passive design merupakan konsep yang menitik beratkan pada rekayasa aspek-aspek yang berkaitan dengan selubung bangunan untuk mengurangi kebutuhan energi bangunan (Chen dkk., 2015). Salah satu elemen selubung bangunan yang penting adalah elemen dinding. Dalam penelitian yang dilakukan pada tahun 2019 (Nurjannah dkk., 2019) menunjukkan bahwa perlakuan pada bangunan berupa modifikasi pada aspek selubung bangunan mampu berdampak pada penghematan energi pada bangunan hingga sekitar 20% dibandingkan dengan model *baseline*, sekaligus dapat berkontribusi pada penurunan suhu operatif dalam ruang yang berpengaruh pada kenyamanan termal penghuni.

Aspek selubung bangunan pertama yang diuji pada penelitian ini adalah properti termal material dinding yang terdiri dari konduktivitas termal, densitas, dan kalor jenis material.

Konduktivitas termal berperan dalam menentukan kecepatan aliran panas yang menembus material dinding secara konduksi, densitas dan kalor jenis panas berperan dalam menentukan kapasitas penyimpanan panas yang bisa ditampung oleh material tersebut (Johra, 2021). Kombinasi dari properti termal menghasilkan sebuah konsep yang dinamakan massa termal, yaitu kemampuan elemen bangunan terutama elemen material dinding untuk menyimpan dan melepaskan panas sehingga mampu menstabilkan temperatur dalam ruang (Balaras, 1996). Massa termal oleh peneliti seperti (Santamouris & Asimakopoulos, 2013) dijadikan fokus perhatian sebagai bagian dari strategi utama pada *passive design* arsitektur untuk dapat mengurangi amplitudo fluktuasi suhu dalam ruang.

Aspek selanjutnya yang diteliti adalah infiltrasi udara pada selubung bangunan. Merujuk pada penelitian (Ng dkk., 2014), infiltrasi udara pada bangunan melalui selubungnya merupakan salah satu bagian utama dari pergerakan udara tidak terkondisikan yang dapat mempengaruhi kebutuhan energi bangunan, kenyamanan termal penghuni dan juga kualitas udara dalam ruang. Infiltrasi udara ini menjadi bagian yang memegang peranan penting dan krusial pada upaya penghematan energi pada bangunan dan perancangan regulasi kinerja energi yang menuntut tingkat kekedapan udara tertentu pada bangunan (Raafat dkk., 2025). Total beban termal yang ditanggung oleh bangunan akibat adanya infiltrasi udara berkisar antara 30 – 53 % dari total beban termal yang diterima bangunan, bahkan bisa mencapai 66-85 % untuk bangunan tinggi (Zheng dkk., 2024). Lisa Ng dalam penelitiannya ditahun 2021 terkait hubungan infiltrasi udara dengan konsumsi energi dengan metode simulasi menggunakan model *EnergyPlus* dengan korelasi infiltrasi yang dikembangkan NIST (*National Institute of Standards and Technology*) menunjukkan bahwa infiltrasi udara melalui selubung bangunan dapat menyumbang sekitar 6% dari konsumsi energi bangunan komersial di Amerika Serikat (Ng dkk., 2021).

Penelitian terdahulu telah banyak mengkaji pengaruh properti termal material dinding terhadap konsumsi energi bangunan (Al-Sanea dkk., 2012; Reilly & Kinnane, 2017) maupun pengaruh infiltrasi udara terhadap beban pendinginan (Ng dkk., 2021; J. Hu dkk., 2023). Namun, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan pada bangunan perkantoran atau rumah tinggal tapak, bukan pada rumah susun dengan karakteristik hunian vertikal yang memiliki pola okupansi dan beban termal yang berbeda. Selain itu, studi yang menguji secara simultan pengaruh kombinasi properti termal material dinding (dengan berbagai nilai konduktivitas, densitas, dan kalor jenis) dan tingkat infiltrasi udara terhadap konsumsi energi sekaligus kenyamanan termal (*operative temperature*) di rumah susun dengan sistem pengkondisian udara di iklim tropis lembap seperti Jakarta masih sangat terbatas. Celah penelitian yang ditemukan adalah belum adanya analisis komprehensif mengenai interaksi antara kedua variabel tersebut dalam konteks rumah susun eksisting yang kemudian diproyeksikan sebagai hunian ber-AC di masa depan. Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal: pertama, penggunaan model baseline yang divalidasi dengan data survei skala besar (1.628 responden di 5 kota besar), sehingga representatif terhadap kondisi riil rumah susun di Indonesia; kedua, pengujian simultan tujuh jenis material dinding dengan rentang properti termal yang luas (dari massa termal sangat tinggi hingga isolator ultra-rendah) pada dua skenario infiltrasi udara (ACH 1,0 dan 0,4); ketiga, evaluasi tidak hanya pada indeks konsumsi energi tetapi juga pada *operative temperature* dan persentase jam kenyamanan termal berdasarkan standar ASHRAE 55, sehingga memberikan gambaran utuh tentang keseimbangan antara efisiensi energi dan kenyamanan penghuni.

Tujuan dari Penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan material dinding dengan nilai properti termal yang berbeda dan juga infiltrasi udara terhadap kebutuhan konsumsi energi yang ditunjukkan dengan indeks konsumsi energi listrik karena energi listrik memiliki porsi yang paling dominan dalam konsumsi energi sebuah bangunan (Rahmawati dkk., 2024), dan kenyamanan termal bangunan rumah susun yang ditunjukkan dengan *operative temperature* ruang. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoretis bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang fisika bangunan dan efisiensi energi, khususnya dalam memahami interaksi properti termal material dinding dan infiltrasi udara pada hunian vertikal di iklim tropis lembap. Secara praktis, hasil penelitian ini bermanfaat bagi arsitek dan perencana bangunan dalam memilih material dinding dan merancang tingkat kededapan udara yang optimal untuk rumah susun, bagi pengembang dan pengambil kebijakan dalam menyusun standar kinerja energi bangunan hunian vertikal di Indonesia, serta bagi penghuni rumah susun dalam memahami strategi penghematan energi yang tetap mempertahankan kenyamanan termal.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian kali ini, peneliti menggunakan pendekatan penelitian kuantitatif-simulasi komputasi. Studi yang dilakukan memberikan evaluasi performa energi unit rumah susun eksisting yang diberi penambahan sistem pengkondisian udara sebagai gambaran kondisi *business as usual (BaU)* rumah susun di masa depan. Selanjutnya hasil evaluasi tersebut digunakan sebagai *base case* untuk mengeksplorasi strategi optimasi dan juga mengidentifikasi solusi penghematan energi dan kenyamanan termal melalui modifikasi properti termal dan pengaturan infiltrasi udara. Dalam konteks penelitian ini, ada dua aspek utama yang menjadi skala pengukuran, yaitu Indeks Konsumsi Energi Bangunan dalam satuan kWh/m²/tahun dan juga performa termal bangunan melalui *operative temperature* pada zona-zona unit rumah susun yang disimulasikan.

Studi Kasus Penelitian

Dalam penelitian ini, objek penelitian adalah hasil generalisasi dari survey skala besar yang melibatkan 1628 rumah tangga yang menempati unit rumah susun di 5 kota besar yang ada di Indonesia yaitu Jakarta, Surabaya, Bandung, Medan, Makassar. Survey skala besar ini dilakukan oleh Lembaga survey IPSOS dan *Takaguci Laboratory* Universitas Waseda Jepang pada tahun 2022.



Gambar 1. Denah Unit sampel terpilih

Sumber: Dokumentasi survei IPSOS-Takaguci Laboratory, 2022



Gambar 2. Unit sampel terpilih rumah susun tipe 2 kamar tidur

Sumber: Dokumentasi survei IPSOS-Takaguci Laboratory, 2022

Unit sampel rumah susun memiliki dimensi 8,20 m x 5,20 m dengan tinggi *floor to floor* 3,2 m dan tinggi *floor to ceiling* 2,65 m. Unit sampel terpilih terdiri dari 6 ruang yaitu 2 kamar tidur, 1 ruang keluarga, 1 kamar mandi, 1 dapur dan dilengkapi dengan balkon / area servis. Ruang-ruang ini akan didefinisikan menjadi 6 zona termal pada simulasi pemodelan energi bangunan. Sampel rumah susun eksisting tidak menggunakan system pengkondisian udara dan memiliki indeks konsumsi energi sebesar 53 kWh/m²/tahun.

Instrumen Software Simulasi

Dalam focus pemodelan energi bangunan ini, aplikasi *SketchUp* ditunjang oleh *plug-in Euclid Openstudio*. Perangkat selanjutnya yang digunakan pada penelitian ini adalah *EnergyPlus* yang merupakan perangkat lunak yang mengakar pada program DOE-2 dan BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) (U.S. Department of Energy, 2020). *Energyplus* adalah perangkat lunak yang dapat melakukan simulasi energi bangunan secara menyeluruh dengan cara melakukan pemodelan energi bangunan (Casini, 2022).

Asumsi Parameter Dan Geometri Untuk Simulasi Bangunan Eksisting

Perancangan model bangunan dilakukan di *sketchup* dengan bantuan *plug-in euclid openstudio*. Model bangunan berdasarkan data pengatutan parameter dan geometri yang tertera pada table akan diuji untuk keperluan validasi keakuratan model bangunan sehingga dapat merepresentasikan kondisi actual dilapangan.

Tabel 1. Asumsi dan parameter bangunan

Item	Pengaturan Parameter			
	Informasi Geometri			
Tinggi <i>floor to floor</i> (m)	3.2			
Tinggi <i>floor to ceiling</i> (m)	2.65			
Luas Unit Sampel (m²)	42.64			
Volume Unit Sampel (m³)	112.996			
Lokasi	IDN JW Jakarta-Soekarno.Hatta.Intl.AP.967490 TMY			
Periode Simulasi	1 tahun (1 Januari - 31 Desember)			
Orientasi Bangunan	0°			
	Material dan konstruksi bangunan			
Atap	<i>Exterior roof (metal roofing, alumunium foil bubble, air cavity, gypsum board 12 mm</i>			
Dinding	<i>wall (plaster wall, bata ringan 100 mm, plaster wall)</i>			
Lantai	<i>Interior Floor (reinforced-concreted 2% steel, cement sand render, ceramic)</i>			
Plafon	<i>gypsum board 12 mm</i>			
Kaca	<i>Clear single galss 5 mm</i>			
	Okupansi			
Bangunan	Residensial (Rumah Susun 3 lantai)			
Penghuni (orang)	3			
(Air Change/hour) - Base Case	1.9			
	Properti termal material transparan			
WWR (%)	11.54			
Transmisi panas	0.81			
Konduktivitas Termal (W/m².K)	0.9			
	Beban Peralatan			
Nama Peralatan (W/Unit)	Kulkas (100), Penanak Nasi (300), Hp (20), Setrika listrik (350), TV flat (100), Kipas Listrik (55), lampu LED (9),			
Pengkondisian Udara	AC split set point 20° C, 380 W masa operasional 20.00 – 05.00			
Kode Zona	Nama Zona	Area (m²)	Volume (m³)	Permukaan eksterior (m²)
BR 1	Kamar Tidur 1	8.83	28.26	8.21
BR 2	Kamar Tidur 2	7.13	22.82	6.62
LR	Ruang Keluarga	15.72	50.30	4.24
WC	Kamar Mandi	2.24	7.17	0
K	Dapur	5.88	18.82	0
B	Balkon/Area servis	2.85	9.12	2.65

Sumber: Data survei IPSOS-Takaguci Laboratory, 2022; hasil olah data penelitian, 2026

Setelah proses validasi, model rumah susun eksisting diberi penambahan system pengkondisian udara pada Kamar Tidur 1 untuk menggambarkan kondisi *business as usual (BaU)* dari unit rumah susun di masa depan.

Variabel Optimasi

Ada dua variabel yang akan diujikan pada optimasi performa bangunan. Variabel pertama adalah properti termal dinding yang terdiri dari konduktivitas, densitas, dan kalor jenis material. Nilai seluruh properti termal akan dikurangi. Penelitian terdahulu menyebutkan bahwa semakin rendah nilai konduktivitas termal, maka akan semakin baik performa material dinding dalam menghambat panas yang masuk ke dalam ruang sehingga beban energi bangunan akan menurun, sedangkan densitas dan kalor jenis yang rendah membuat material memiliki kapasitas simpan panas yang kecil, sehingga amplitudo udara dalam ruang akan naik dan puncak *operative temperature* dalam ruang cenderung mengikuti pola beban internal dan radiasi (Al-Sanea dkk., 2012) (Simon B Pallin dkk., 2019) (Reilly & Kinnane, 2017). Variabel kedua adalah infiltrasi udara. Nilai infiltrasi udara dalam *air change per hour* (ach) akan dikurangi sesuai dengan penelitian terdahulu bahwa mengurangi nilai ach akan mampu mengurangi konsumsi energi listrik beban pendinginan (Ng dkk., 2021).

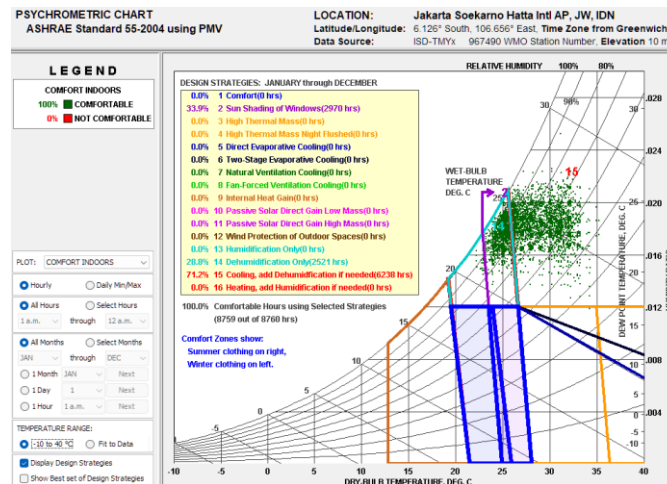
Tabel 2. Parameter Optimasi

Tabel 2. Parameter Operasional							
Parameter Properti Termal Material Dinding							
Kode	No	Nama Material		Konduktivitas Material (κ)	Kalor Jenis (c)	Densitas Material (ρ)	p.c
A - Dinding Eksterior	1	<i>Autoclaved Concrete (AAC) (baseline)</i>	<i>Aerated Block</i>	0.303	1000	750	750,000
	2	Dinding Beton Sekam Padi		0.213	1400	1572	2,200,800
	3	<i>Hemp Brick</i>		0.1875	1303	1171	1,525,813
	4	<i>Cellular Concrete (CLC)</i>	<i>Lightweight</i>	0.151	1000	700	700,000
	5	<i>Thermalite Turbo</i>		0.11	1050	480	504,000
	6	<i>Polyisocyanurate Sandwich Panel</i>	<i>(PIR)</i>	0.024	1400	53	74,200
	7	<i>Expanded (EPS) sandwich panel</i>	<i>Polystyrene</i>	0.04	1400	40	56,000
B - Dinding Selubung BR	1	<i>Autoclaved Concrete (AAC) (baseline)</i>	<i>Aerated Block</i>	0.303	1000	750	750,000
	2	Dinding Beton Sekam Padi		0.213	1400	1572	2,200,800
	3	<i>Hemp Brick</i>		0.1875	1303	1171	1,525,813
	4	<i>Cellular Concrete (CLC)</i>	<i>Lightweight</i>	0.151	1000	700	700,000
	5	<i>Thermalite Turbo</i>		0.11	1050	480	504,000
	6	<i>Polyisocyanurate Sandwich Panel</i>	<i>(PIR)</i>	0.024	1400	53	74,200
	7	<i>Expanded (EPS) sandwich panel</i>	<i>Polystyrene</i>	0.04	1400	40	56,000
Parameter Infiltrasi Udara							
Desing Flow Rate : Infiltrasi Udara (Air Change/hour)					1.0 & 0.4		

Sumber: Hasil olah data penelitian, 2026 (nilai properti termal merujuk pada database material EnergyPlus dan literatur terkait)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Psychrometric Chart Iklim Jakarta Dengan Climate Consultant

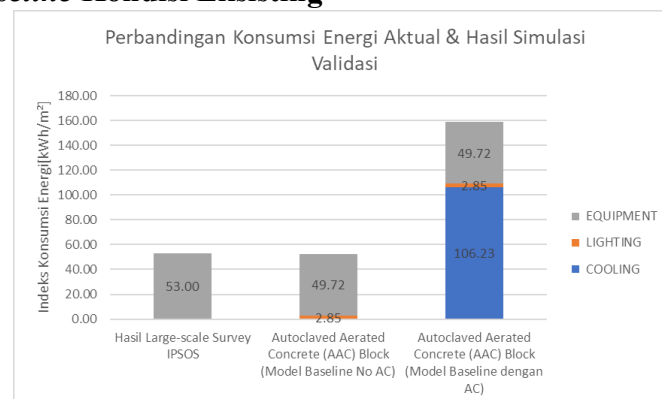


Gambar 3. Psychrometric chart ASHRAE 55 iklim Jakarta

Sumber: Hasil olah data Climate Consultant, 2026

Untuk bisa mendapatkan beberapa respon yang tepat dalam menghadapi kondisi iklim Jakarta sebagai konteks simulasi, digunakan *psychrometric chart ASHRAE Standard 55*. Dapat dilihat bahwa Suhu dan kelembapan udara luar Jakarta sering berada di luar zona nyaman termal, sehingga kebutuhan akan system pendinginan udara diperlukan oleh penghuni hampir disepanjang tahun untuk mencapai kenyamanan dalam ruang (6328 jam).

Validasi Model *Baseline* Kondisi Eksisting



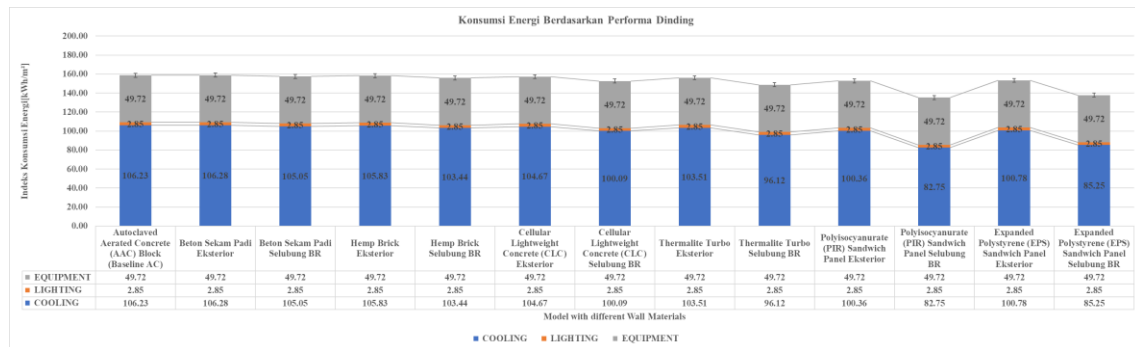
Gambar 4. Perbandingan konsumsi energi aktual & hasil simulasi validasi

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

Hasil simulasi pada tahap validasi menunjukkan bahwa model baseline tanpa AC memiliki konsumsi energi sebesar 52,57 kWh/m²/tahun, sangat dekat dengan hasil survei IPSOS sebesar kurang lebih 53 kWh/m²/tahun, sehingga model bangunan dapat dianggap valid untuk bisa merepresentasikan kondisi eksisting rumah susun. Selanjutnya, ketika unit AC ditambahkan ke dalam ruang BR1 model baseline, indeks konsumsi energi meningkat tajam hingga sebesar 158,80 kWh/m²/tahun. Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa

kebutuhan pendinginan udara akan menjadi determinan utama konsumsi energi rumah susun di masa depan.

Optimasi Properti Material

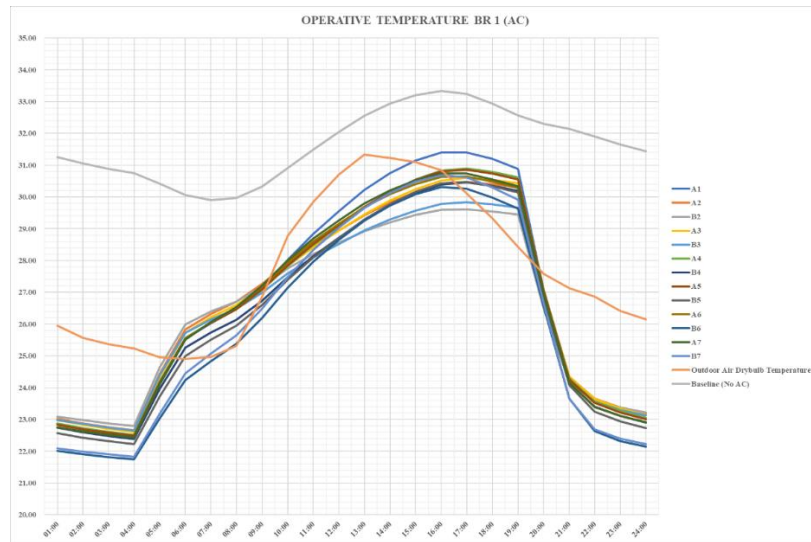


Gambar 5. konsumsi energi berdasarkan performa properti material

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

Grafik ini menunjukkan pengaruh optimasi properti material dinding terhadap indeks konsumsi energi tahunan rumah susun. Dalam grafik tersebut dapat dilihat konsistensi pola yaitu variasi B berupa penggantian material dinding pada perimeter BR (kamar tidur) dapat menghasilkan konsumsi energi pendinginan yang lebih rendah dibandingkan variasi A berupa penggantian dinding eksterior secara keseluruhan. Selanjutnya material dinding dengan konduktivitas termal terendah, yakni *Polyisocyanurate (PIR) Sandwich Panel* dengan nilai konduktivitas termal sebesar 0,024 W/m.K dan *Expanded Polystyrene (EPS) Sandwich Panel* dengan nilai konduktivitas termal sebesar 0,040 W/m.K dapat memberikan penghematan energi yang paling signifikan. Dua material dinding ini berkontribusi pada pengurangan konsumsi energi diatas 20 kWh/m² dengan masing-masing mengurangi 23,48 kWh/m² pada variasi A6 dan juga 20,98 kWh/m² pada variasi A7. Temuan ini sejalan dengan teori bahwa material dengan resistansi termal tinggi secara langsung menghambat laju perpindahan panas konduksi ke dalam ruangan, sehingga mengurangi beban kerja sistem pendingin. Sebaliknya, tiga material dengan konduktivitas termal tinggi dan juga massa termal tinggi (A2, B2, A3, B3, A4, B4) menunjukkan pengurangan kurang dari 5 % pada konsumsi energi rumah susun diseluruh variasi. Temuan ini menunjukkan bahwa massa termal yang tinggi memerlukan penyeimbangan dengan nilai konduktivitas termal yang rendah agar efek "penyimpanan panas" tidak justru menjadi beban termal di dalam ruangan seperti efek *thermal lag* yang kurang menguntungkan pada malam hari di iklim panas dan lembap seperti Jakarta.

Hasil *Operative Temperature* Akibat Perubahan Properti Material



	A1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6	A7	B7	Outdoor Air Drybulb Temperature
Suhu Maksimum	31.40	30.47	29.62	30.60	29.83	30.90	30.46	30.85	30.48	30.64	30.31	30.73	30.69	31.33
Suhu Minimum	22.50	22.66	22.79	22.61	22.65	22.51	22.38	22.48	22.22	22.43	21.75	22.43	21.83	24.91
Waktu suhu maksimum	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	16:00	16:00	16:00	13:00
waktu suhu minimum	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	06:00
Rata-rata Operative Temperature	26.86	26.66	26.41	26.65	26.37	26.68	26.39	26.66	26.29	26.59	25.90	26.63	26.12	27.71
Amplitudo	4.450	3.905	3.412	3.997	3.588	4.192	4.040	4.184	4.129	4.104	4.282	4.150	4.427	3.21
Decrement Factor	1.385	1.215	1.062	1.244	1.117	1.305	1.257	1.302	1.285	1.277	1.333	1.292	1.378	
Operative Temperature Nyaman (ASHRAE 55) (jam)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	11.00	10.00	12.00	10.00	9.00	10.00	9.00	8.00
Prosentase Kenyamanan Termal	41.67%	41.67%	41.67%	41.67%	41.67%	41.67%	45.83%	41.67%	50.00%	41.67%	37.50%	41.67%	37.50%	33.33%

Gambar 6. *Operative Temperature* Optimasi Properti Material

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

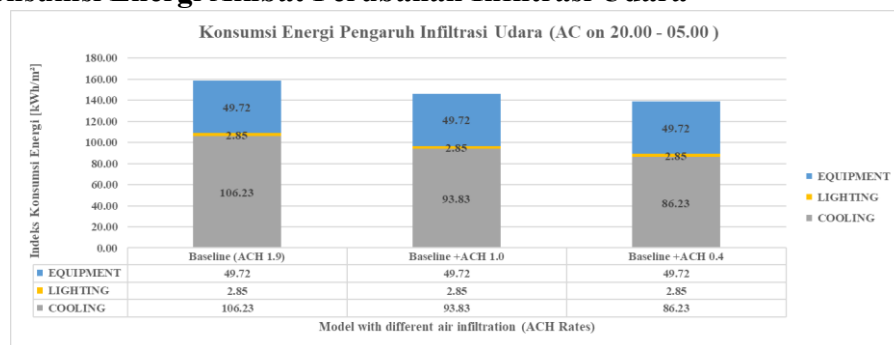
Grafik hasil simulasi tersebut menunjukkan fluktuasi *operative temperature*. Penggunaan Ac dengan *setpoint* suhu 20°C pada jam operasinal 20.00 – 05.00 dapat secara drastis menurunkan *operative temperature* (OT) ke rentang 22 -24 °C, namun *setpoint* ini jauh di bawah suhu operatif rata-rata yang dicapai dengan material konvensional, sehingga AC bekerja keras di jam awal operasional. Penggunaan material dengan konduktivitas termal rendah (A6, B6, A7, B7) membantu mempertahankan kondisi suhu target lebih lama dengan beban pendinginan yang lebih rendah dibandingkan material bermassa tinggi yang masih melepaskan panas tersimpan di awal malam. Seluruh material dinding menunjukkan suhu puncak *operative temperature* lebih rendah dibandingkan dengan A1 sebagai baseline. Seluruh jenis material dinding pada variasi B menunjukkan penurunan *operative temperature* puncak dari variasi A untuk material yang sama.

Seluruh material pada variasi B kecuali B6 & B7 menghasilkan *decrement factor* yang lebih rendah (1,062 & 1,117), yang berarti fluktuasi suhu di dalam kamar lebih stabil dibandingkan variasi A. Pada material isolator ultra-ringan, aplikasi yang lebih luas pada selubung kamar dapat meningkatkan respons suhu terhadap beban panas internal/eksternal yang masuk. B2 dan B3 dengan nilai konduktivitas dan massa termal paling tinggi menghasilkan amplitudo paling kecil diantara jenis material dinding lain (3,412 & 3,588). Ini adalah bukti efek massa termal, bahwa material yang memiliki kapasitas panas volumetric yang besar mampu lebih efektif dalam memperkecil fluktuasi suhu. Ini sejalan dengan bukti bahwa material B6 dan B7 dengan konduktivitas termal dan massa termal rendah menghasilkan

amplitudo yang paling tinggi (4,282 & 4,427), menunjukkan bahwa dinding cenderung merespons fluktuasi suhu luar secara lebih langsung dan cepat. Material dengan stabilitas suhu yang lebih baik (massa termal tinggi) cenderung memiliki durasi kenyamanan yang lebih konsisten, namun PIR/EPS memberikan efisiensi energi yang lebih baik untuk mencapai *setpoint* AC, meskipun durasi kenyamanan di luar jam AC operasional bisa lebih fluktuatif. Temuan bahwa B4 dan B5 yang memiliki nilai konduktivitas termal dan massa termal sedang dibandingkan dengan material dinding lain menghasilkan kenyamanan termal tertinggi (45,83 % dan 50 %) merupakan hasil dari optimalisasi *thermal balancing* (keseimbangan termal) yang tepat di antara konduktivitas termal, densitas, dan kapasitas panas spesifik. Tidak seperti PIR/EPS yang memiliki insulasi sangat tinggi, namun massa termal yang rendah sehingga OT bisa cepat berubah saat AC tidak operasional, atau material beton sekam padi dengan massa termal tinggi tapi lambat melepas panas, CLC dan *Thermalite Turbo* berada pada titik tengah yang ideal.

Optimasi Infiltrasi Udara

Hasil Indeks Konsumsi Energi Akibat Perubahan Infiltrasi Udara

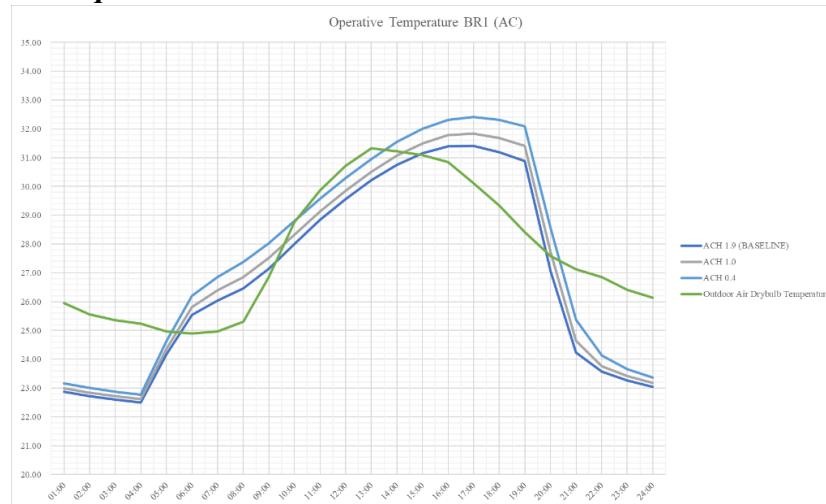


Gambar 7. Konsumsi Energi optimasi infiltrasi udara

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

Pada grafik hasil simulasi energi tersebut, dapat dilihat korelasi yang konsisten antara tingkat infiltrasi (ach) udara dengan total konsumsi energi rumah susun. Semakin rendah nilai ach akan berdampak pada semakin rendahnya indeks konsumsi energi bangunan. Pengurangan infiltrasi sebesar 0,9 ACH menghasilkan penghematan sebesar 11,68 %. Pengurangan lebih lanjut sebesar 0,6 ACH menurunkan tambahan penghematan sebesar 8,10 %. Temuan ini selaras dengan literatur yang menyatakan bahwa infiltrasi udara melalui selubung bangunan merupakan salah satu faktor utama yang meningkatkan beban pendinginan (J. Hu dkk., 2023).

Hasil *Operative Temperature* Akibat Perubahan Infiltrasi Udara



	ACH 1.9 (BASELINE)	ACH 1.0	ACH 0.4	Outdoor Air Drybulb Temperature
Suhu Maksimum	31.40	31.84	32.42	31.33
Suhu Minimum	22.50	22.62	22.77	24.91
Waktu suhu maksimum	17:00	17:00	17:00	13:00
Waktu suhu minimum	04:00	04:00	04:00	06:00
Rata-rata OT	26.86	27.17	27.60	27.71
Amplitudo	4.450	4.609	4.826	3.213
Decrement Factor	1.385	1.434	1.502	
Zona Operative Temperature Nyaman (ASHRAE 55) (jam)	10.00	10.00	9.00	8.00
Prosentase Kenyamanan Termal	41.67%	41.67%	37.50%	33.33%

Gambar 8. *Operative Temperature* Optimasi infiltrasi udara

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

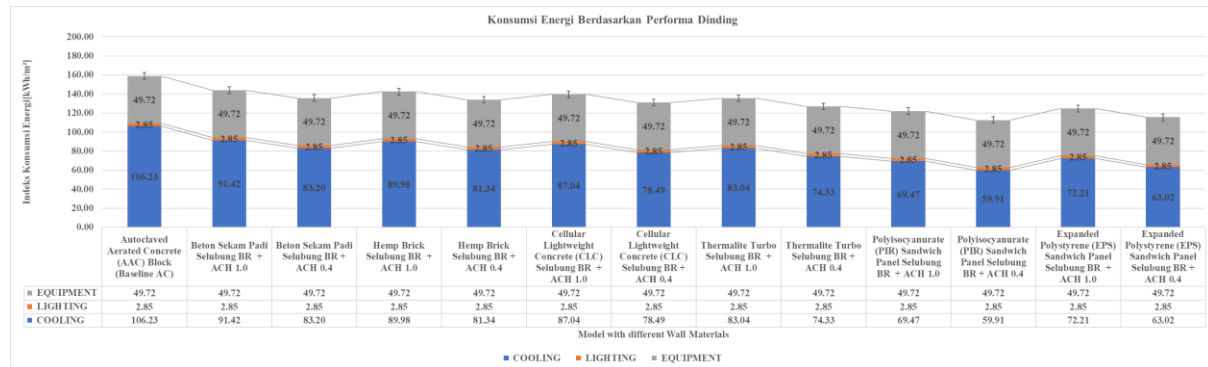
Grafik pada hasil simulasi menghasilkan hubungan korelasi terbalik antara *operative temperature* dengan hasil konsumsi energi yang telah dilakukan sebelumnya. Simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan udara dengan ach lebih kecil (ach 0,4) berimplikasi pada nilai *operative temperature* yang lebih tinggi di dalam ruangan dibandingkan skenario dengan infiltrasi lebih tinggi (ach 1,0). Semakin kecil nilai ach juga berdampak pada semakin tingginya suhu maksimum, suhu minimum, dan rata-rata OT yang tercatat. Pada simulasi dengan ach 0,4, pertukaran udara pasif yang juga berfungsi sebagai akses untuk membuang panas yang terperangkap di siang hari ketika ac tidak beroperasi menjadi sangat terbatas dibandingkan dengan kondisi *baseline* dan ach 1,0. Sejalan dengan konsistensi data yang ditemukan, nilai kenyamanan termal terendah ada pada ACH 0,4 (37.50%), yang terjadi akibat *heat trapping* dimana suhu ruang yang terjebak panas membuat ruangan lebih sulit mencapai zona kenyamanan standar ASHRAE 55 secara konsisten, meskipun secara efisiensi energi menjadi yang paling unggul. Semakin kecil nilai ach, semakin tinggi ketergantungan ruangan terhadap masa operasional AC untuk menjaga kenyamanan.

Optimasi Gabungan Properti Termal Dan Infiltrasi Udara

Dari hasil simulasi optimasi properti material, dinding variasi B (perubahan pada selubung BR) memiliki performa yang cenderung lebih baik dari keseluruhan aspek yang diteliti yaitu menurunkan konsumsi energi dan juga menjaga stabilitas *operative temperature* dibandingkan dengan variasi A (perubahan pada dinding eksterior). Variasi A secara konsisten memberikan performa termal dan penghematan energi yang lebih rendah sehingga dapat diasumsikan jika melanjutkan Variasi A memberikan hasil yang secara teoretis kurang

optimal. Untuk itu, pada tahap optimasi gabungan ini, variasi perubahan pada selubung BR yang akan diuji Bersama dengan perubahan infiltrasi udara.

Hasil Indeks Konsumsi Energi Optimasi Gabungan

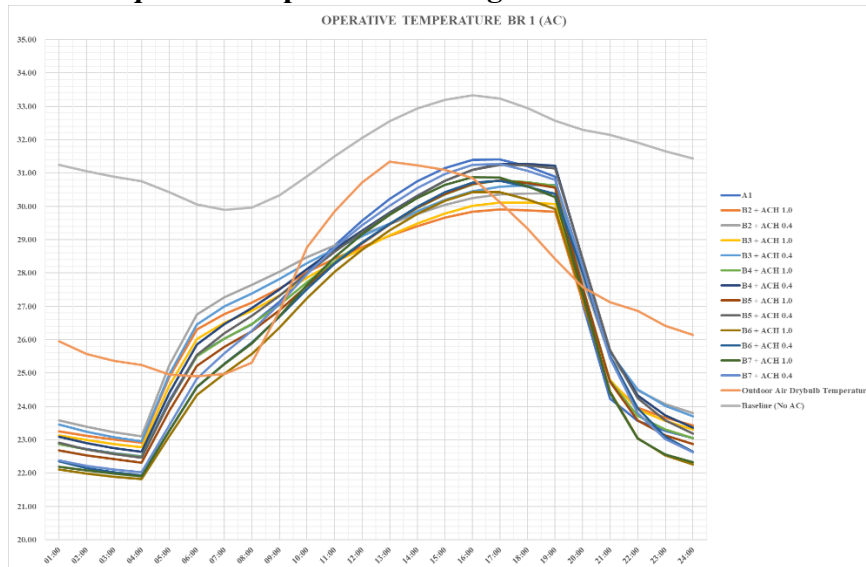


Gambar 9. Konsumsi Energi Optimasi Gabungan

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

Pada grafik hasil simulasi konsumsi energi tersebut, ada konsistensi penurunan energi yang cukup signifikan seiring dengan berkurangnya laju infiltrasi dari ach 1,0 ke ach 0,4 pada seluruh jenis material dinding. Penurunan ach sebesar 0,6 pada material dinding yang sama menunjukkan repetisi penurunan indeks konsumsi energi rata-rata sebesar 8,22 hingga 9,19 kWh/m². Material B6 dan B7 yang merupakan material dengan konduktivitas termal terendah memiliki indeks konsumsi energi terendah untuk kedua skenario ACH, bahkan penghematan melebihi 25 % (29,17 % untuk B6 + ACH 0,4 dan 27,21 untuk B7 + ACH 0,4). Ini menunjukkan adanya korelasi linear negatif yang kuat antara konduktivitas termal dengan konsumsi energi. Nilai konduktivitas termal rendah ditambah dengan kontrol laju infiltrasi udara yang ketat merupakan kombinasi paling optimal dalam menghadirkan efisiensi energi dalam simulasi yang telah dilakukan. Material dengan massa termal tinggi seperti B2 dan B3 tetap bermanfaat untuk kebutuhan stabilitas suhu, namun kontrol infiltrasi udara terbukti menjadi variabel yang lebih menentukan dalam menekan beban energi secara drastis di iklim tropis Jakarta.

Hasil *Operative Temperature* Optimasi Gabungan



	A1	B2 + ACH 1.0	B2 + ACH 0.4	B3 + ACH 1.0	B3 + ACH 0.4	B4 + ACH 1.0	B4 + ACH 0.4	B5 + ACH 1.0	B5 + ACH 0.4	B6 + ACH 1.0	B6 + ACH 0.4	B7 + ACH 1.0	B7 + ACH 0.4	Outdoor Air Drybulb Temperature
Suhu Maksimum	31.40	29.90	30.40	30.12	30.64	30.77	31.27	30.78	31.25	30.43	30.76	30.88	31.27	31.33
Suhu Minimum	22.50	22.92	23.10	22.77	22.95	22.48	22.64	22.32	22.46	21.81	21.93	21.91	22.02	24.91
Waktu suhu maksimum	17:00	17:00	19:00	17:00	19:00	17:00	18:00	17:00	17:00	17:00	17:00	16:00	17:00	13:00
waktu suhu minimum	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	04:00	06:00
Rata-rata Operative Temperature	26.86	26.70	27.13	26.65	27.09	26.66	27.08	26.55	26.96	26.08	26.43	26.34	26.71	27.71
Amplitudo	4.450	3.492	3.648	3.673	3.846	4.146	4.318	4.229	4.393	4.306	4.416	4.485	4.625	3.21
Decrement Factor	1.385	1.087	1.135	1.143	1.197	1.290	1.344	1.316	1.367	1.340	1.374	1.396	1.439	
Operative Temperature Nyaman (ASHRAE 55 (jam))	10.00	9.00	9.00	9.00	9.00	10.00	10.00	11.00	10.00	9.00	11.00	10.00	11.00	8.00
Prosentase Kenyamanan Termal	41.67%	37.50%	37.50%	37.50%	37.50%	41.67%	41.67%	45.83%	41.67%	37.50%	45.83%	41.67%	45.83%	33.33%

Gambar 10. *Operative temperature* optimasi gabungan

Sumber: Hasil simulasi EnergyPlus, 2026

Dari hasil simulasi, dapat dilihat keseragaman hasil dimana amplitudo OT pada skenario variasi ach 0,4 lebih besar dibandingkan dengan ach 1,0 untuk seluruh jenis material dinding. Panas yang terakumulasi didalam, terutama pada kondisi ac tidak beroperasi, lebih susah untuk terdistribusi keluar lewat pertukaran udara. Material B2 dan B3 dengan massa termal tinggi memiliki hasil nilai amplitudo dan decreament factor terkecil diseluruh skenario karena kemampuan penyimpanan panas yang besar, namun tidak menjamin memiliki prosentase kenyamanan termal yang tinggi, karena menghasilkan beban panas yang harus ditanggung oleh system pendinginan pada permulaan operasinya didalam hingga pagi hari. Pengaturan ac dengan *setpoint* suhu sebesar 20° C dan operasional dari jam 8 malam hingga 5 pagi dalam hal ini diuntungkan oleh material dengan konduktivitas rendah, karena dapat meminimalkan beban panas konduksi, sehingga memungkinkan ac untuk dapat mengkondisikan *operative temperature* lebih stabil dan dekat dengan *setpoint* suhu.

KESIMPULAN

Studi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh properti termal material dinding dan infiltrasi udara terhadap konsumsi energi dan juga kenyamanan termal model rumah susun yang diproyeksikan sebagai rumah susun *business as usual* di masa depan dengan konteks iklim Jakarta. Hasil simulasi pada aspek material dinding menunjukkan bahwa material berinsulasi tinggi seperti material PIR dan EPS *sandwich panel* menunjukkan penghematan energi paling

tinggi pada kedua variasi dinding dan juga skenario ach yang diuji. Pada skenario ach 0,4 material beton sekam padi dan *hemp brick* yang memiliki massa termal tinggi mulai menunjukkan performa yang lebih baik karena kestabilan termal material menjadi lebih efektif ketika laju infiltrasi panas dari luar dapat diminimalisir. Jika ditinjau dari properti termal material dinding, konduktivitas termal (λ) adalah variabel yang memiliki korelasi linear negatif yang paling kuat dengan konsumsi energi, sehingga semakin rendah nilai konduktivitas termal maka semakin kecil beban pendinginan yang dihasilkan. Sedangkan variabel lain seperti densitas (ρ) dan kalor jenis (c) material berkontribusi pada stabilitas termal, sehingga pada kondisi ACH tinggi (1,0) massa termal yang tinggi kurang memberikan pengaruh karena panas luar masuk dapat masuk terbawa laju infiltrasi. Sebaliknya, pada kondisi ach yang lebih rendah (0,4) massa termal menjadi lebih relevan dalam menjaga kestabilan suhu di dalam ruang. Di iklim tropis dengan penggunaan AC malam hari yang intensif, isolasi termal terbukti lebih baik daripada massa termal. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa massa termal bermanfaat untuk fluktuasi alami suhu, namun pada bangunan dengan system pengkondisian udara, isolasi adalah parameter yang lebih penting.

Dari segi variasi infiltrasi udara, penurunan ach dari 1,0 ke 0,4 memberikan pengaruh yang konsisten pada penurunan indeks konsumsi energi, dengan rata-rata penurunan sebesar 8,22 hingga 9,19 kWh/m². Ini menunjukkan bahwa pengurangan laju infiltrasi udara sering kali menghasilkan penghematan energi yang lebih besar dibandingkan dengan strategi mengganti material dinding, misalnya perubahan yang terjadi akibat mengganti beton sekam dengan dan CLC. Hal ini menegaskan bahwa kontrol infiltrasi udara merupakan langkah efisiensi energi penting yang perlu ditempuh, sesuai dengan penelitian terdahulu. Jika kombinasi optimasi dilihat secara terpadu, efisiensi energi tertinggi dapat dicapai melalui sinergi antara insulasi dengan kedap udara. PIR sandwich panel dengan ACH 0,4 menghasilkan konsumsi energi terendah, yaitu 112,48 kWh/m². Itu juga diimbangi dengan prosentase jam kenyamanan termal sesuai standard ASHRAE 55 yang masih relatif lebih baik dibandingkan kombinasi lainnya, yaitu mencapai 45,83 %, menunjukkan bahwa isolasi termal dengan kontrol infiltrasi udara yang ketat akan mampu menghadirkan potensi penghematan energi secara maksimal. Salah satu kebaruan temuan dalam penelitian ini adalah adanya threshold efisiensi, yaitu pada material isolator tinggi seperti PIR dan EPS, penurunan infiltrasi udara dari ACH 1,0 ke 0,4 memberikan penghematan energi yang lebih besar dibandingkan pada material bermassa termal tinggi seperti beton sekam padi dan juga *hemp brick*. Temuan penelitian ini mengindikasikan bahwa semakin baik isolasi dinding, maka akan semakin tinggi pula sensitivitas ruang terhadap kebocoran udara.

REFERENSI

- Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., & Al-Hussain, S. N. (2012). Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, 89(1), 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.009>
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Hasil Sensus Penduduk 2020*. <https://sensus.bps.go.id/main/index/sp2020>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Survei Sosial Ekonomi Nasional 2024*. Badan Pusat Statistik. <https://silastik.bps.go.id/v3/index.php/mikrodata/detail/QURtKzVva1pRd09XNnBQeHpHNWs3QT09>

- Balaras, C. A. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, 24(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00956-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00956-6)
- Calixto-Aguirre, I., Huelsz, G., Barrios, G., & Cruz-Salas, M. V. (2021). Validation of thermal simulations of a non-air-conditioned office building in different seasonal, occupancy and ventilation conditions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102922. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102922>
- Casini, M. (2022). Building performance simulation tools. Dalam *Construction 4.0* (hlm. 221–262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821797-9.00004-0>
- Chen, X., Yang, H., & Lu, L. (2015). A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1425–1436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.003>
- CLASP & IPSOS. (2019). *Indonesia Residential End Use Survey* (hlm. 78). CLASP. <https://www.clasp.ngo/wp-content/uploads/2021/01/Indonesia-Residential-End-Use-Survey.pdf>
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2022). Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112828. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112828>
- Gupta, J., & Chakraborty, M. (2021). Energy efficiency in buildings. Dalam *Sustainable Fuel Technologies Handbook* (hlm. 457–480). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00016-0>
- Hu, J., Liu, Z., Ma, G., Zhang, G., & Ai, Z. (2023). Air infiltration and related building energy consumption: A case study of office buildings in Changsha, China. *Journal of Building Engineering*, 74, 106859. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106859>
- Hu, R., Liu, G., & Niu, J. (2020). The Impacts of a Building's Thermal Mass on the Cooling Load of a Radiant System under Various Typical Climates. *Energies*, 13(6), 1356. <https://doi.org/10.3390/en13061356>
- Johra, H. (2021). *Thermal properties of building materials—Review and database*. Department of the Built Environment, Aalborg University. <https://doi.org/10.54337/aau456230861>
- Khorram, M., Faria, P., Abrishambaf, O., & Vale, Z. (2020). Key performance indicators regarding user comfort for building energy consumption management. *Energy Reports*, 6, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.018>
- Manda Firmansyah. (2026). Bagai Pedang Bermata Dua, Permintaan AC Naik Meski Perburuk Krisis Iklim. *Lestari*. <https://lestari.kompas.com/read/2026/03/02/160248186/bagai-pedang-bermata-dua-permintaan-ac-naik-meski-perburuk-krisis-iklim>
- Ng, L. C., Dols, W. S., & Emmerich, S. J. (2021). Evaluating potential benefits of air barriers in commercial buildings using NIST infiltration correlations in EnergyPlus. *Building and Environment*, 196, 107783. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107783>
- Ng, L. C., Persily, A. K., & Emmerich, S. J. (2014). Consideration of Envelope Airtightness in Modelling Commercial Building Energy Consumption. *International Journal of Ventilation*, 12(4), 369–378. <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684030>
- Nurjannah, A., Sindu Suryo, M., Ahmad Bahtiar, T., Sujatmiko, W., & Hadi, M. (2019). Potential of Energy Saving through Modification of Low Energy Housing Models. *KnE Social Sciences*. <https://doi.org/10.18502/kss.v3i21.4957>
- Nysa Dwianditha. (2014). PENGARUH PERPINDAHAN PENGHUNI NON RUMAH SUSUN KE RUMAH SUSUN TERHADAP KONDISI SOSIAL KONOMI PENGHUNI DI RUMAH SUSUN SARIJADI KOTA BANDUNG. *Universitas Gadjah Mada*. <https://repository.ugm.ac.id/131145/>

- Olesen, B. W., Wang, H., & Kazanci, O. B. (2019). *The Effect Of Room Temperature Control By Air- Or Operative Temperature On Thermal Comfort And Energy Use*. 2086–2093. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211423>
- Raafat, R., Goubran, S., Makhoul, N. N., & Aboulnaga, M. (2025). Asymmetries in global building envelope air infiltration and tightness data: Exploring knowledge gaps for accurate energy analyses. *Indoor Environments*, 2(1), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100071>
- Rahmawati, D., Prasetyo, D., Setiawan, H., Alfita, R., Minggu, D., & Saputra, A. R. (2024). Audit Energi Listrik Dalam Upaya Penghematan Dan Efisiensi Energi Pada Gedung Fakultas Teknik Di Universitas Trunojoyo Madura. *Informatics, Electrical and Electronics Engineering (Infotron)*, 4(2), 79–84. <https://doi.org/10.33474/infotron.v4i2.22920>
- Reilly, A., & Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, 198, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (Ed.). (2013). *Passive cooling of buildings* (Online-Ausg). Earthscan from Routledge.
- Setia Dewi Prihapsari, Nida Ashma Adilah, & Ariyani Yaman. (2022). *Informasi Statistik Infrastruktur PUPR 2022*. Kementerian PUPR.
- Sharaf, F. (2020). The impact of thermal mass on building energy consumption: A case study in Al Mafraq city in Jordan. *Cogent Engineering*, 7(1), 1804092. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1804092>
- Simon B Pallin, Tyler Pilet, & Renata Starostka. (2019). *Variables Influenced by Thermal Mass and its Impact on Energy Performance in Buildings*.
- Surahman, U., Hartono, D., Setyowati, E., & Jurizat, A. (2022). Investigation on household energy consumption of urban residential buildings in major cities of Indonesia during COVID-19 pandemic. *Energy and Buildings*, 261, 111956. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111956>
- U.S. Department of Energy. (2020, Maret). *EnergyPlus™ Version 9.5.0 Documentation*. U.S. Department of Energy.
- World Bank. (2024). *GDP per capita (current US\$)—Indonesia*. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=ID>
- Yafi, A. H., Bagaskara, A., Siswinugraha, A. P., Anindita Hapsari, Farid Wijaya, Faris Adnan Padhilah, Fathin Sabbiha Wismadi, & His Muhammad Bintang. (2023). *Indonesia Energy Transition Outlook 2024*. Institute for Essential Services Reform. <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2024/03/Indonesia-Energy-Transition-Outlook-2024-1.pdf>
- Yao, R., Costanzo, V., Li, X., Zhang, Q., & Li, B. (2018). The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region. *Journal of Building Engineering*, 15, 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.012>
- Zheng, S., Song, X., Duanmu, L., Xue, Y., Wang, Y., & Yang, X. (2024). Research on the air-infiltration rate shelter coefficient of building complexes based on building parameter clustering. *Journal of Building Engineering*, 91, 109615. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109615>