

KINERJA LINGKUNGAN RUMAH SUBSIDI DI INDONESIA (STUDI KASUS PERUMAHAN KABA RESIDENCE KENDARI)

Ali Amin Soewarno¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Nahdlatul Ulama Sulawesi Tenggara,
Kota Kendari, Indonesia

*E-mail: soewarno@gmail.com

Abstrak

Pemerintah secara masif meningkatkan pemilikan rumah layak huni, khususnya rumah subsidi bagi masyarakat berpenghasilan menengah ke bawah. Rumah bersubsidi harus memenuhi syarat utama, yakni terjangkau dan dapat memberikan kualitas kehidupan yang baik. Namun hingga kini masih sedikit penelitian terkait performa lingkungan dari perumahan subsidi. Secara umum, performa lingkungan yang baik akan dapat menjamin kesehatan dari penghuninya, dan secara khusus hunian yang hemat energi lebih dibutuhkan oleh kelompok rentan dengan kategori kemiskinan energi. Penelitian ini bermaksud untuk menginvestigasi kenyamanan termal dari rumah subsidi melalui simulasi komputasi dengan menggunakan aplikasi Rhino3D dan plug-in Grasshopper, Ladybug, serta Honeybee. Dari hasil simulasi diperoleh kesimpulan bahwa orientasi bangunan tidak memiliki efek yang signifikan terhadap kinerja lingkungan bangunan bermassa kecil, nilai mean radiant temperature berkisar antara 22,59 °C hingga 32,74 °C. Untuk kenyamanan termal dengan metode *Predicted Mean Vote* diperoleh TCP sebesar 39,21%, serta 94,59% untuk metode adaptive.

Kata Kunci

kenyamanan termal;
kinerja lingkungan;
rumah subsidi;
simulasi komputasi;

Abstract

The government is massively increasing the ownership of affordable houses, especially subsidized houses for low to middle-income people. Subsidized houses must meet the main requirements, namely affordability and providing a good quality of life. However, until now there has been little research related to the environmental performance of subsidized housing. In general, good environmental performance will be able to guarantee the health of its occupants, and in particular, energy-efficient housing is more needed by vulnerable groups within the energy poverty category. This study intends to investigate the thermal comfort of subsidized houses through computational simulations using the Rhino3D application and the Grasshopper, Ladybug, and Honeybee plug-ins. From the simulation results, it was concluded that building orientation does not have a significant effect on the environmental performance of small-mass buildings, the mean radiant temperature value ranges from 22.59 °C to 32.74 °C. For thermal comfort with the *Predicted Mean Vote* method, the TCP was obtained at 39.21%, and 94.59% for the adaptive method.

Keywords

Environmental
performance; computer
simulation; subsidized
house;; thermal comfort.

1. PENDAHULUAN

Hingga saat ini tercatat kurang lebih 1,3 juta rumah tapak subsidi telah terjual di Indonesia dengan tujuan untuk meningkatkan kepemilikan rumah layak huni dengan prasarana, sarana dan utilitas umum yang diharapkan berkualitas. Prototipe dari rumah untuk masyarakat berpenghasilan menengah ke bawah ini hampir sama yakni rumah tapak 1 lantai dengan luas lantai antara 36 hingga 38 m², dengan konstruksi permanen (Sikumbang - *Daftar Lokasi Perumahan*, n.d.). Rumah subsidi, baik yang berbentuk *subsidised public housing* (SPH) maupun *low income housing* (LIH) bertujuan untuk meningkatkan kualitas kehidupan dari penghuninya seraya meminimalkan dampak lingkungan dengan cara memastikan setiap orang memiliki akses ke unit rumah yang menjamin kesehatan penghuninya dan terjangkau (Wei et al., 2024).

Salah satu faktor penting terkait kesehatan penghuni adalah kinerja lingkungan dari rumah subsidi (*environmental performance outcomes*), yang meliputi: kualitas udara dalam ruangan. Studi yang dilakukan oleh Anastasiou et al. (2020) menemukan bahwa, penghuni LIH lebih berpotensi terpapar polusi udara dalam ruang dan permasalahan terkait kontaminasi udara lainnya yang disebabkan oleh kondisi hunian dan kebiasaan penghuni (merokok sebagai sumber utama konsentrasi PM_{2.5}). Adanya pertukaran udara yang cukup (ventilasi melalui peningkatan frekuensi pembukaan jendela) adalah salah satu faktor penting guna meningkatkan kesehatan penghuni serta mengurangi polusi udara dalam ruang, selain dari pemilihan material interior.

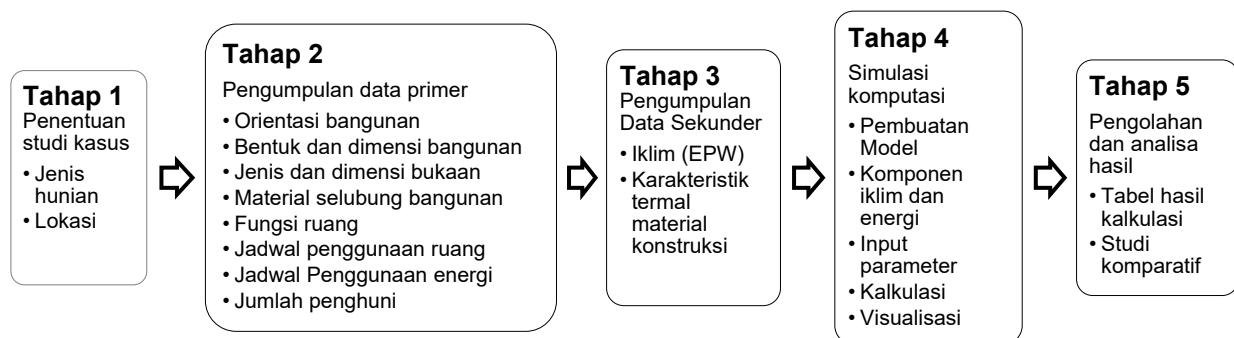
Faktor kedua terkait kinerja lingkungan adalah efisiensi energi melalui penggunaan komponen non mekanis pasif dan aktif. Komponen pasif terkait selubung bangunan, naungan, dan orientasi bangunan, sedangkan komponen aktif meliputi sistem pemanasan dan pendinginan yang efisien, serta pencahayaan ekologis (*eco-lighting*). Di sini, hunian harus memiliki desain-energi yang memanfaatkan elemen alam seperti panas matahari, angin, terang langit, dan penggunaan energi seefisien mungkin bagi kenyamanan penghuni dengan meminimalkan penggunaan bahan bakar fosil (Wei et al., 2024).

Faktor selanjutnya adalah keterjangkauan, yang meliputi dua aspek, yakni aspek biaya awal pengadaan hunian hemat energi, dan aspek biaya operasional pemakaian energi setiap harinya. Kinerja operasional dari hunian bersubsidi dalam rangka meningkatkan kondisi kehidupan diharapkan tidak membebani secara finansial masyarakat berpenghasilan menengah kebawah yang masuk dalam kategori kemiskinan energi (*energi poverty*), mengingat hampir 70% dari total konsumsi energi digunakan untuk penyediaan kenyamanan termal (San Miguel-Bellod et al., 2018).

Beberapa faktor lain terkait unjuk kinerja lingkungan dari LIH adalah aspek akustik, emisi gas rumah kaca (GHG, *greenhouse gas emission*) dan lain sebagainya, namun faktor kenyamanan termal merupakan salah satu aspek utama yang menjadi obyek penelitian para peneliti hingga saat ini, khususnya terlalu panasnya suhu ruang akibat perubahan iklim global, yakni meningkatnya paparan akan suhu tinggi akibat rendahnya kinerja lingkungan dari bangunan. Menurut Escandón et al. (2022), diperkirakan, perubahan iklim dan pemanasan global dimasa depan akan mengancam kesehatan dari masyarakat rentan dengan proyeksi peningkatan ketidaknyamanan termal sebesar 40%. Oleh karenanya, perubahan iklim mempertegas kebutuhan akan perumahan hemat energi yang berkelanjutan yang dapat mengantisipasi cuaca ekstrem yang semakin meningkat frekuensi dan intensitasnya yang dapat menyebabkan meningkatnya angka mortalitas.

Tantangan dari penyediaan rumah subsidi dan perumahan sosial adalah seringkali faktor keterjangkauan membuat kenyamanan termal menjadi terabaikan. Kenyataan di lapangan, kavling perumahan subsidi merupakan hasil pembukaan lahan dari mekanisme *cut-and-fill* yang menghilangkan vegetasi peneduh serta lapisan permukaan tanah subur. Hal ini membuat tanaman sulit untuk tumbuh di lingkungan perumahan, ditambah lagi, demi memaksimalkan keuntungan, seringkali penataan lingkungan meniadakan jalur hijau atau pohon peneduh. Di sisi lain, faktor penentu bagi orientasi bangunan adalah seberapa banyak unit kavling yang dapat memenuhi lahan, dan bukan berdasarkan orientasi matahari atau faktor lingkungan lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Rafik (2019) terhadap perumahan Tipe 36 menunjukkan hampir separuh responden yang tidak puas dengan kondisi ventilasi rumah. Hal ini menunjukkan bahwa konsep rumah hemat energi bukan menjadi aspek penentu dari bentuk bangunan, melainkan efisiensi biaya serta selera pasar.

Penelitian terkait SHEP (*social housing environmental performace*) yang meliputi LIH, SPH, dapat dilakukan dengan metode studi literatur, evaluasi purna huni, maupun permodelan. Hal ini merupakan peluang baru bagi topik penelitian terkait bangunan rumah secara umum, dan rumah subsidi khususnya, namun juga akan mendukung usaha pengembangan desain perumahan subsidi yang sehat, hemat energi serta berkelanjutan. Desain energi hunian tersebut sebaiknya diwujudkan melalui beragam pendekatan dan disesuaikan dengan konteks setempat (Wei et al., 2024). Oleh karenanya, penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan data dasar terkait estimasi performa



Gambar 1 Metodologi yang diimplementasikan dalam penelitian.
(Sumber: Analisa penulis)

lingkungan rumah subsidi tapak di kompleks perumahan Kaba Residence, Kota Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, dengan metode permodelan menggunakan aplikasi Rhino3D, ladybug serta honeybee. Indikator luaran yang diinvestigasi adalah orientasi bangunan, karakteristik termal selubung bangunan, kenyamanan termal, serta penggunaan energi. Diharapkan hasil penelitian ini akan menjadi cikal bakal penelitian lanjutan terkait desain energi dari rumah subsidi dengan konteks setempat yakni daerah beriklim tropis panas. Obyek penelitian dipilih berdasarkan faktor kedekatan dengan domisili penulis, dengan alasan agar memudahkan bagi penelitian lanjutan di masa yang akan datang.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini digunakan metode kuantitatif dan eksperimental untuk mengestimasi kinerja lingkungan dari perumahan tapak tipe 38. Metodologi terdiri dari tiga tahap: dalam tahap pertama, hunian subsidi di Perumahan Kaba Residence dipilih sebagai studi kasus. Tahap kedua

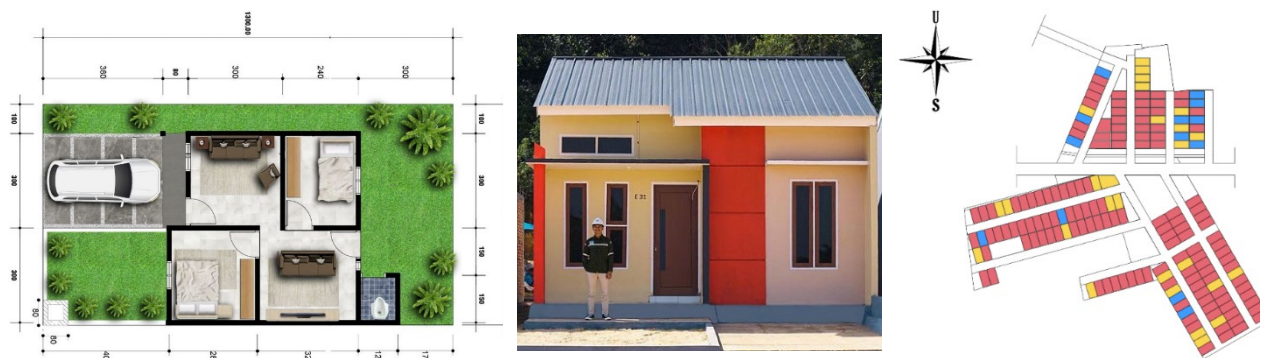
bangunan hunian dievaluasi melalui serangkaian simulasi komputasi untuk mendapatkan data-data terkait kinerja lingkungan. Di tahap terakhir, dilakukan pemrosesan atas hasil simulasi dan analisis komparatif, yang akan menyimpulkan hubungan antara orientasi dan selubung bangunan terhadap kinerja lingkungan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat di Gambar 1.

2.1. Lokasi dan Obyek Penelitian

Lokasi obyek hunian yang diteliti berada di Perumahan Kaba Residence, Jalan Brigjen Katamso, Kecamatan Baruga, Kota Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia, dengan koordinat $4^{\circ} 2'51.86''$ Lintang Selatan dan $122^{\circ}29'34.93''$ Bujur Timur. Saat ini di atas lokasi perumahan telah dibangun sekitar 25 unit hunian subsidi, dan untuk tahap berikutnya direncanakan sekitar 141 unit lagi akan dibangun ([Sikumbang tapera.go.id](http://Sikumbang.tapera.go.id)). Dengan demikian unit hunian subsidi yang dipilih merupakan prototipe hunian untuk produksi massal, sehingga jumlah masyarakat yang akan memanfaatkan karakteristik performa lingkungan dari bangunan tersebut jumlahnya cukup signifikan.

2.2. Pengumpulan Data

Rumah subsidi yang digunakan sebagai obyek penelitian bertipe tunggal dengan luas lantai $37,5 \text{ m}^2$ atau dibulatkan menjadi 38 m^2 , dengan luas tanah 91 m^2 . Bagian samping kiri dan kanan dari unit rumah dipisahkan dengan halaman samping berjarak 0,5 m. Bangunan rumah terdiri dari dua bagian, bagian utama terdiri dari dua kamar tidur, satu ruang tamu, dan satu ruang makan/dapur. Bagian utama ini dinaungi atap *spandek* dengan ketinggian langit-langit 3m. Ruang berikutnya adalah satu kamar mandi yang terletak di bagian belakang dengan konstruksi yang menempel dengan bangunan utama, beratap dak/beton bertulang dengan ketinggian langit-langit 2,5 m. Keseluruhan bangunan berdinding pasangan setengah bata dengan plester dua sisi, dengan warna cat seperti pada Gambar 2, material kusen pintu, jendela dan daun pintu dari kayu jati, kaca jendela tipe *clear float glass*, tanpa *glazing*, dengan ketebalan 6 mm.



Gambar 2 Denah, tampak depan hunian, serta siteplan kavling perumahan.
(Sumber: Sikumbang - Daftar lokasi perumahan tapera.go.id)

Orientasi bangunan terhadap arah mata angin berdasarkan site plan tahap-2 dari pengembang diidentifikasi terdiri dari 6 (enam) jenis, yakni kavling menghadap Barat Laut, Barat, Selatan Barat Daya, Tenggara, Timur, dan Utara Timur Laut. Jika dihitung dari arah Utara (nol derajat) dengan perputaran berlawanan arah jarum jam, maka masing-masing orientasi bangunan di atas memiliki besar sudut 59, 90, 164, 239, 270, dan 344 derajat.

Daya tampung dan rutinitas penggunaan ruang dari penghuni rumah disesuaikan dengan skenario keluarga kecil di Indonesia pada umumnya, yakni terdiri dari ibu, bapak, dan dua orang anak (empat orang penghuni di luasan lantai 38 m^2 , nilai *occupancy* 0,105). Pada malam hari,

digunakan nilai *occupancy* atau penggunaan ruang maksimal (nilai *occupancy* 0,11) lebih tinggi dibanding siang hari, di mana pada waktu tersebut rumah hanya dihuni satu orang saja (nilai *occupancy* 0,026). Penggunaan ruang hanya dihitung jika ruang digunakan minimal 15 menit (ASHRAE, 2010), dengan demikian ruang keluarga dan dapur adalah ruang-ruang dengan nilai penggunaan tertinggi, sedangkan kamar mandi memiliki nilai yang terendah. Rentang waktu penggunaan ruang dihitung mulai dari jam 05:00 pagi hingga pukul 22:00 malam. Penggunaan energi listrik dihitung dari waktu menyalakan lampu, satu buah kulkas, penanak nasi listrik, setrika, televisi, dan satu buah laptop, dengan jadwal penggunaan yang diatur. Ruangan tidak menggunakan pengkondisi udara (air conditioning), air bersih diasumsikan menggunakan jaringan komunal (tidak menggunakan pompa sumur bor). Untuk selengkapnya, dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 1 Data bangunan menurut ruang.

Data Primer						
Orientasi bangunan	bervariasi					
Luas lantai total	38,24	m ²				
Luas permukaan dinding total	104,43	m ²				
Window-wall ratio	4,28	%				
Luas permukaan atap total	199,97	m ²				

Data per ruang	Luas m ²	Volume m ³	Bukaan m ²	Penerangan W/m ²	Penghuni m ² /orang	Listrik W/m ²
Ruang keluarga & Dapur	19,08	57,24	0,51	3,33	4,5	144,44
Kamar tidur depan	9,45	28,35	0,704	1,11	2,25	1,15
Kamar tidur belakang	7,65	22,95	1,27	1,11	2,25	1,15
Kamar mandi	2,06	5,16	0,06	4,84	2,06	0
Loteng (plenum)	36,18	47,46	0	0	*	0
Teras	1,8	0,036	0	0	*	*

* Tidak diperhitungkan dalam simulasi.

Selain data primer terkait orientasi, bentuk dan dimensi bangunan, luas bukaan, jumlah penghuni, serta penggunaan energi, tidak kalah pentingnya adalah data sekunder terkait spesifikasi termal yang disesuaikan dengan material yang digunakan di Indonesia.

Tabel 2 Spesifikasi termal dari material bangunan.

	d	K	Density	Specific Heat	Roughness	Absorption		
	(m)	(W/m.K)	(kg/m ³)	(J/Kg.K)		Thermal	Solar	Visible ww.
Spandek	0,002	110	7.000	390	Smooth	0,9	0,4	0,7
Plat beton	0,12	1,28	2.300	1.130	Med.Rough	0,9	0,8	0,8
Gypsum	0,009	0,17	880	1.089	Smooth	0,9	0,7	0,5
Plester	0,025	0,533	1.837	839,46	Smooth	0,9	0,32	0,7
Batu bata	0,1	0,807	1.760	790	Med.Rough	0,9	0,65	0,65
Keramik	0,02	1,298	2.640	850	Smooth	0,9	0,26	0,65
Meranti	0,25	0,23	650	3.050	Smooth	0,9	0,5	0,5

(sumber: Dirangkum dari berbagai sumber)

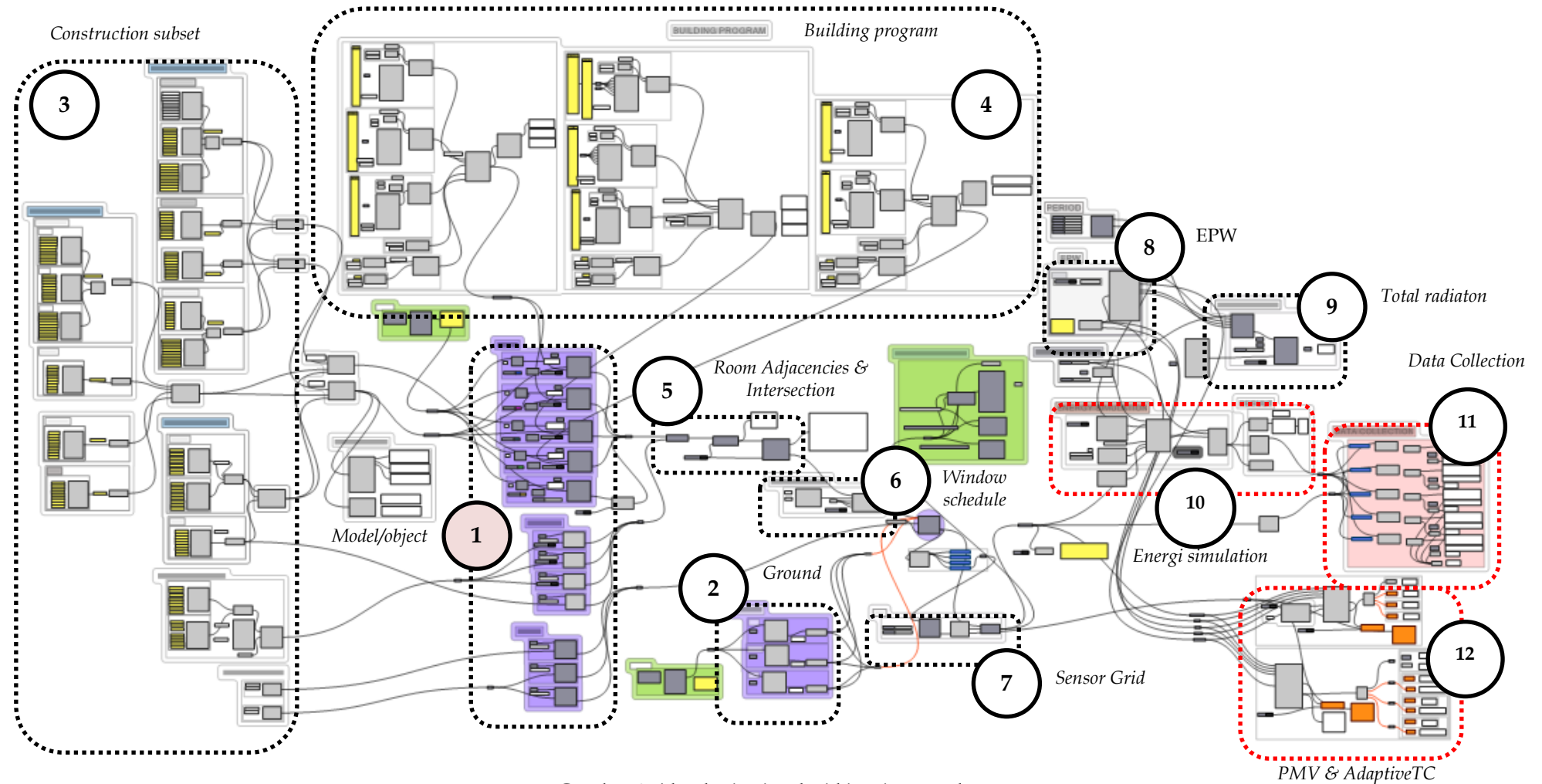
2.3. Simulasi

Aplikasi yang digunakan untuk mendapatkan estimasi kinerja lingkungan dari obyek penelitian adalah Rhinoceros3D versi 8,0 (trial edition) dengan plug-in Grasshopper, Ladybug (versi

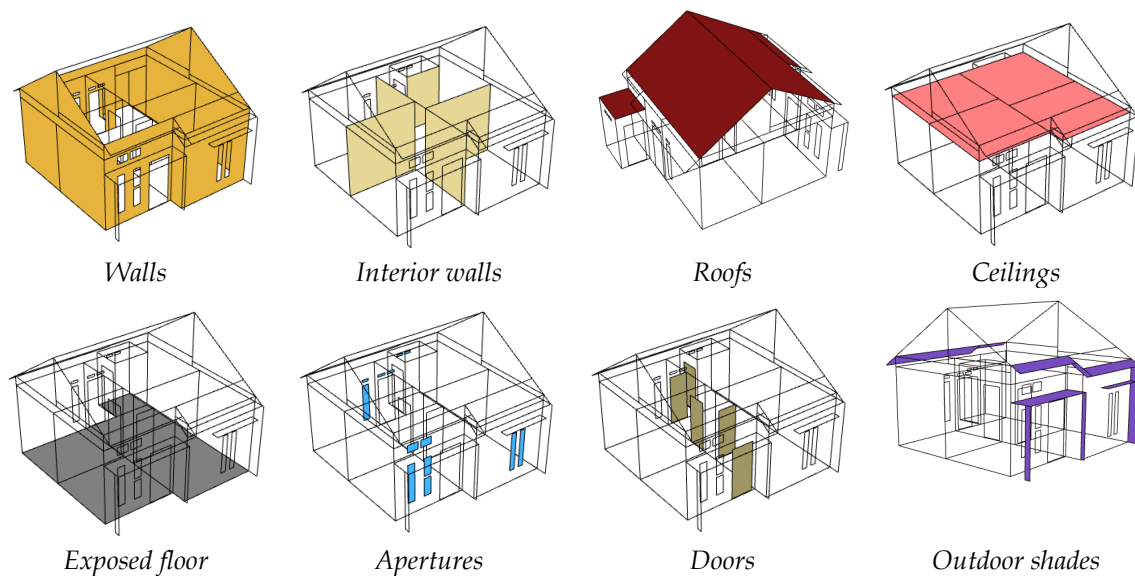
1.80) serta Honeybee, yang menyediakan antar muka pemrograman visual berbasis Phyton dengan komponen-komponen untuk menyimulasikan energi pada bangunan. Penelitian optimasi kinerja bangunan (BPO) dengan menggunakan aplikasi di atas telah banyak dilakukan di berbagai negara. *Building performance optimization* dilakukan dengan pendekatan multi-parameter secara simultan melalui simulasi dan proses optimalisasi yang bertujuan untuk mendapatkan penilaian yang lebih komprehensif dan holistik terkait desain dari sebuah bangunan (Kamel et al., 2024). Khusus untuk plugin Honeybee dan Honeybee Energi, aplikasi ini sebenarnya didesain untuk diterapkan pada bangunan kontemporer dengan menggunakan standar ASHRAE 90.1 299 dalam perhitungan serta konstruksi bangunannya. Oleh karenanya dilakukan penyesuaian-penyesuaian mengingat obyek penelitian tidak menggunakan sistem insulasi, dan konstruksi serta material yang berbeda spesifikasinya dengan yang digunakan oleh bangunan di negara beriklim sedang dan dingin

Dalam alur kerja pemrograman visual seperti yang ditampilkan di Gambar 4, keseluruhan kerangka penelitian terbagi dalam 11 (sebelas) tahapan, dimulai dari pembuatan model 3D hingga visualisasi hasil. Pada tahapan pertama, model penelitian digambar ulang di aplikasi Rhino3D dalam satuan unit meter, yang secara garis besar terdiri dari komponen-komponen *closed solid*, *subface*, *shade*, dan *ground* (tahap ke-1 dan 2). Tahapan selanjutnya, yakni tahap ke-3, merupakan langkah yang sangat penting, di mana dalam tahapan ini setiap komponen ditentukan konstruksi penyusunnya dengan spesifikasi termal material yang sesuai. Di tahap ke empat, masing-masing solid atau *room* diberikan tipe program sesuai konteks di lapangan. Luaran dari tahap ini, adalah jadwal jumlah manusia dalam satu ruangan, besaran energi listrik yang digunakan, serta infiltrasi udara luar yang akan diperhitungkan dalam simulasi. Posisi dari ruangan-ruang ini kemudian diidentifikasi apakah saling bersebelahan atau saling berpotongan di tahap ke-5. Pada tahap ke-6, dilakukan pengaturan atas jendela dan ventilasi, guna memastikan terjadinya ventilasi silang serta batasan suhu minimum serta maksimum dari pembukaan jendela. Untuk dapat mengalkulasikan pengukuran suhu di tiap ruang, maka dibuatlah sensor *grid* di tiap ruang, dengan ukuran *grid* 20x20cm, sebagaimana yang dilakukan di langkah ke-7.

Mulai dari tahapan pertama hingga ketujuh merupakan tahapan persiapan sebelum dilakukannya kalkulasi simulasi. Namun sebelum itu diperlukan data mengenai iklim dari Kota Kendari dalam bentuk EPW. Data EPW yang diunduh menggunakan data yang dihimpun dari stasiun cuaca Bandara Haluoleo dengan *model year* dari tahun 1964 hingga 2014. Bandara ini berjarak ± 9 km dari lokasi penelitian dan memiliki perbedaan ketinggian ± 20 m sehingga terdapat perbedaan suhu, di mana lokasi penelitian memiliki suhu 0,13 derajat lebih tinggi. Tahap selanjutnya atau yang terakhir adalah tahap kalkulasi, simulasi dan visualisasi hasil, yakni kalkulasi radiasi matahari / *incident radiation* (Tahap ke-9) yang diterima oleh bangunan, simulasi energi (tahap ke-10) untuk menghitung panas yang diterima dan dilepas oleh bangunan, penggunaan energi, suhu permukaan dalam dan luar bangunan, serta analisis kenyamanan termal (*air temperature*, *mean radiant temperature*, *relative humidity*). Untuk data-data numerik, dikumpulkan di langkah ke-11 berdasarkan zona atau ruang.



Gambar 3 Alur kerja simulasi kinerja termal.
(Sumber: Penulis)



Gambar 4 Model beserta komponen yang disimulasikan .
(sumber: penulis)

Simulasi kenyamanan termal dilakukan hanya pada bangunan dengan orientasi ke arah Barat Laut, mengingat hunian tersebut, jika dibandingkan dengan hunian lain, mencatatkan suhu tertinggi untuk ruang tidur depan. Oleh karena nilai MRT dari masing-masing model yang hampir sama, maka nilai TCP (*Thermal Comfort Percentage*) diprediksi tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

Untuk prediksi TCP, dipilih dua metode, yakni PMV (*Predicted Mean Vote*) dan *Adaptive*, yang perhitungannya dikalkulasikan melalui *Ladybug* (LB PMV Polygon yang dihubungkan ke LB Psychrometric Chart, serta LB Adaptive Chart) dan *Honeybee energi* (HB PMV Comfort Map dan HB Adaptive Comfort Map). Dibandingkannya dua cara kalkulasi ini untuk memberikan gambaran TCP yang diperhitungkan dengan enam parameter-parameter keikliman dan visualisasi dalam bentuk grafik (*Ladybug*), serta kalkulasi yang lebih detail dengan mempertimbangkan parameter energi, bentuk dan volume ruang, serta hasil visualisasi berupa pemetaan spasial (*Honeybee Energi*). Sebagai catatan, beberapa input yang digunakan dalam kalkulasi TCP dengan *Ladybug* menggunakan data hasil simulasi energi dari OSM (*Open Studio Model*) melalui komponen *HB Read Room Comfort Result*.

Terdapat 6 (enam) elemen dasar yang diperhitungkan dalam PMV, yakni, 1. Laju metabolisme, 2. Insulasi pakaian, 3. Suhu udara, 4. Radiant temperature, 5. Kecepatan udara, dan 6. Kelembaban. Pada simulasi ini digunakan *operative temperature*, *relative humidity* dari OSM, serta *barometric pressure* dari EPW. MRT dianggap sama dengan suhu udara, kecepatan udara 0,1 m/s, laju metabolisme 1,1 met (aktivitas duduk sambil mengetik), dan insulasi pakaian 0,7 clo (memakai baju lengan panjang dan celana panjang). Perlu diketahui, menurut (ASHRAE, 2010) PMV ditujukan untuk aktivitas 1,0 hingga 1,3 met (*near sedentary*), dan insulasi 0,5 sampai 1,0 clo. Untuk kasus di Indonesia, dimungkinkan untuk menurunkan insulasi pakaian hingga 0,2 clo. Sedangkan aktivitas yang biasanya dilakukan oleh Ibu Rumah Tangga seperti memasak (1,6 – 2,0 met), atau membersihkan rumah (2,0 – 3,4 met) tidak termasuk dalam rentang aktivitas yang diperhitungkan terkait kenyamanan termal.

Bagi penghuni rumah subsidi, di mana penggunaan AC (air conditioning) berada di luar opsi, dan lebih menggantungkan pada ventilasi alami dan mekanis, maka untuk PMV ditambahkan

passive strategies, yaitu penghuni menggunakan kipas angin (fan) untuk mendapatkan kenyamanan termal pada suhu dan kelembaban tinggi, dengan parameter kecepatan kipas angin 2 m/s. Bagi negara yang memiliki musim dengan suhu dan kelembaban udara yang tinggi, kecepatan angin di atas 0,8 m/s masih dianggap nyaman (Kimura & Tanabe, 1994). ASHRAE sendiri merekomendasikan kecepatan angin hingga 1,2 m/s untuk suhu di atas 28 °C. Strategi pasif ini akan memperlebar rentang kenyamanan termal dan lebih cocok diterapkan untuk kondisi masyarakat Indonesia yang telah mengalami aklimatisasi terhadap iklim tropis panas.

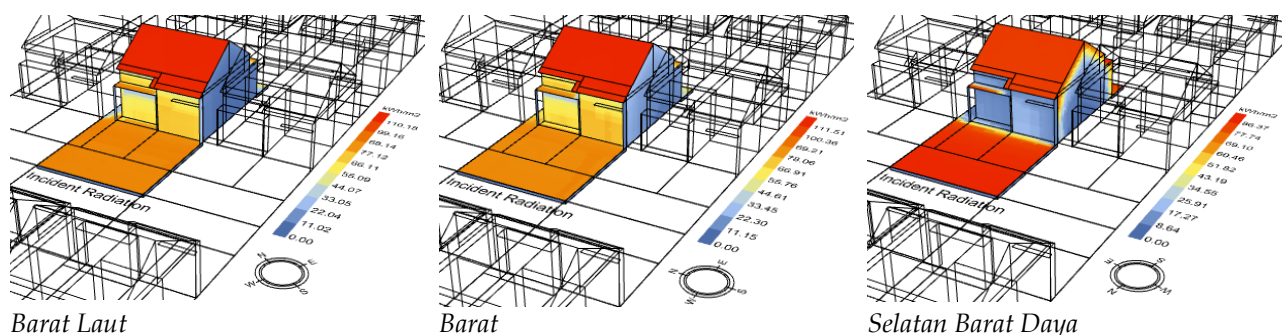
Prediksi kenyamanan termal dengan Metode *adaptive* kurang lebih hampir sama dengan metode PMV, namun dalam metode *adaptive* perbedaannya adalah penghuni secara bebas dapat menyesuaikan kondisi termal di dalam ruangan dengan pembukaan atau penutupan jendela serta diasumsikan bebas untuk menyesuaikan nilai insulasi dari pakaian. Metode *adaptive* mensyaratkan rata-rata suhu bulanan antara 10 °C hingga 33,5 °C (ASHRAE, 2010). Untuk laju metabolisme, sama dengan metode PMV yakni antara 1,0 – 1,3 met. Nilai suhu udara luar diambil data dari EPW, sedangkan *operative temperature* dan MRT diperoleh dari hasil kalkulasi energi (OSM). Nilai *offset neutral temperature* digunakan 2,5 °C, dan simulasi diatur secara total berjalan dengan penghawaan alami tanpa *air conditioning*.

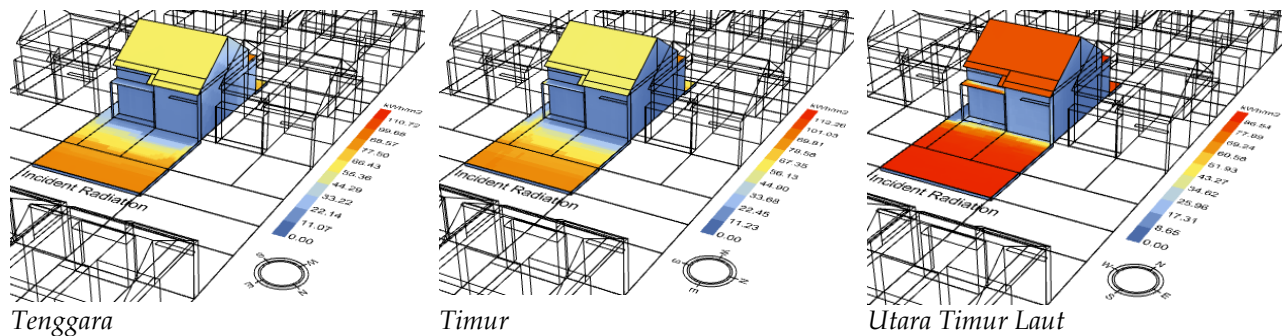
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Orientasi bangunan dan radiasi matahari

Hasil perhitungan total radiasi matahari atau *total incident radiation* yang diterima oleh bangunan selama satu tahun, berdasarkan orientasi bangunan di lokasi perumahan, dengan sudut 59, 90, 164, 239, 270, dan 344 derajat terhadap arah Utara (perputaran sudut berlawanan arah jarum jam), diperoleh hasil pengukuran antara 128.000 kWh hingga 137.000 kWh, atau terdapat perbedaan sekitar 9.000 kWh atau sekitar 6%. Orientasi bangunan yang menerima paling sedikit total radiasi matahari per tahun adalah arah muka bangunan menghadap ke Tenggara, dan total radiasi per tahun paling tinggi diterima bangunan dengan orientasi muka bangunan ke arah Barat.

Untuk memvisualisasikan bagaimana pengaruh radiasi matahari terhadap kondisi termal, sebagai contoh dilakukan simulasi hanya untuk bulan Oktober saja, yakni bulan terpanas di mana suhu maksimal mencapai 33,68 °C. Hasil perhitungan total radiasi antara jam 12:00 – 18:00 setiap hari selama 1 bulannya diperoleh hasil sebagaimana Gambar 6 di bawah ini. Bagian yang menerima panas matahari terbesar adalah sisi depan bangunan (dan sisi belakang bangunan), sedangkan sisi samping bangunan menerima radiasi matahari terkecil dikarenakan terhalangi oleh bangunan di sisi kiri dan kanannya.





Gambar 5 Radiasi matahari yang diterima menurut orientasi bangunan di Bulan Oktober.
(sumber: hasil simulasi ladybug)

3.2. Mean radiant temperature

Berdasarkan hasil simulasi, tidak ada perbedaan yang signifikan dari MRT atas ruang-ruang yang ada di dalam hunian. Dalam simulasi dengan durasi 1 tahun (8760 jam), ruang bawah atap (loteng) mencatatkan suhu tertinggi (43,10 °C) dan terendah (19,05 °C). Hal ini diduga terkait dengan material atap yang digunakan, yakni atap spandek tanpa insulasi serta langit-langit dengan material gypsum 9mm. Sedangkan bagi ruang yang dihuni (diluar kamar mandi), suhu tertinggi dialami oleh ruang tidur depan pada hunian dengan orientasi Barat Laut, dengan suhu 32,74 °C, dan suhu terendah pada ruang tidur depan pada hunian dengan orientasi ke arah Tenggara, dengan suhu 22,59 °C.

Tabel 3 MRT sesuai orientasi bangunan

	Mean Radiant Temperature (°C)								
	Barat			Timur			Selatan Barat Daya		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
Rg. keluarga & dapur	23,09	32,28	26,93	23,07	32,20	26,92	23,09	32,19	26,93
Rg. Tidur depan	22,67	32,66	26,72	22,69	32,21	26,76	22,73	32,14	26,70
Rg. Tidur belakang	22,84	32,07	26,80	22,79	32,48	26,74	22,73	32,29	26,76
Kamar mandi	23,35	33,46	27,36	23,29	33,51	27,29	23,29	34,56	27,32
Loteng	19,06	42,95	27,87	19,05	43,00	27,87	19,10	43,01	27,87
Average			27,87			27,12			27,12
Total Incident Radiation		136.559,16 kWh			135.509,67 kWh			128.491,84 kWh	
Max		1.746,00 kWh			1.710,65 kWh			1.795,80 kWh	

(Sumber: hasil simulasi)

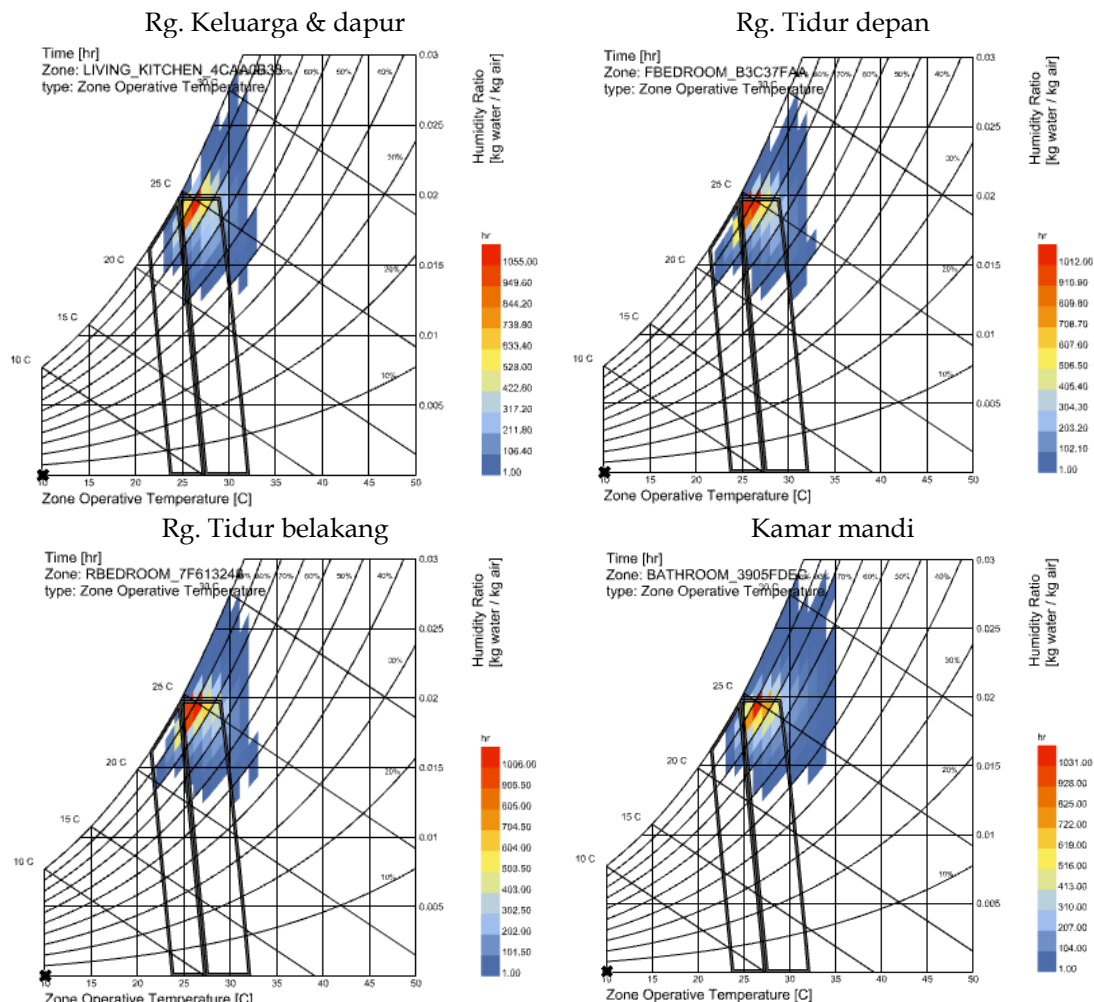
Tabel 4 MRT sesuai orientasi bangunan (lanjutan)

	Mean Radiant Temperature (°C)								
	Utara Timur Laut			Tenggara			Barat Laut		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
Rg. keluarga & dapur	23,08	32,21	26,93	23,08	32,20	26,92	23,09	32,30	26,92
Rg. Tidur depan	22,59	32,47	26,72	22,74	32,10	26,76	22,63	32,74	26,72
Rg. Tidur belakang	22,87	32,08	26,74	22,75	32,54	26,74	22,88	32,09	26,79
Kamar mandi	23,35	32,84	27,50	23,26	33,84	27,22	23,37	32,88	27,37
Loteng	19,09	43,01	27,86	19,08	43,10	27,87	19,08	43,08	27,87
Average			27,15			27,87			27,14
Total Incident Radiation x		128.304,20 kWh			133.566,78 kWh			134.231,66 kWh	
Max		1.804,48 kWh			1.750,36 kWh			1.734,01 kWh	

(Sumber: hasil simulasi)

3.3. Kenyamanan termal

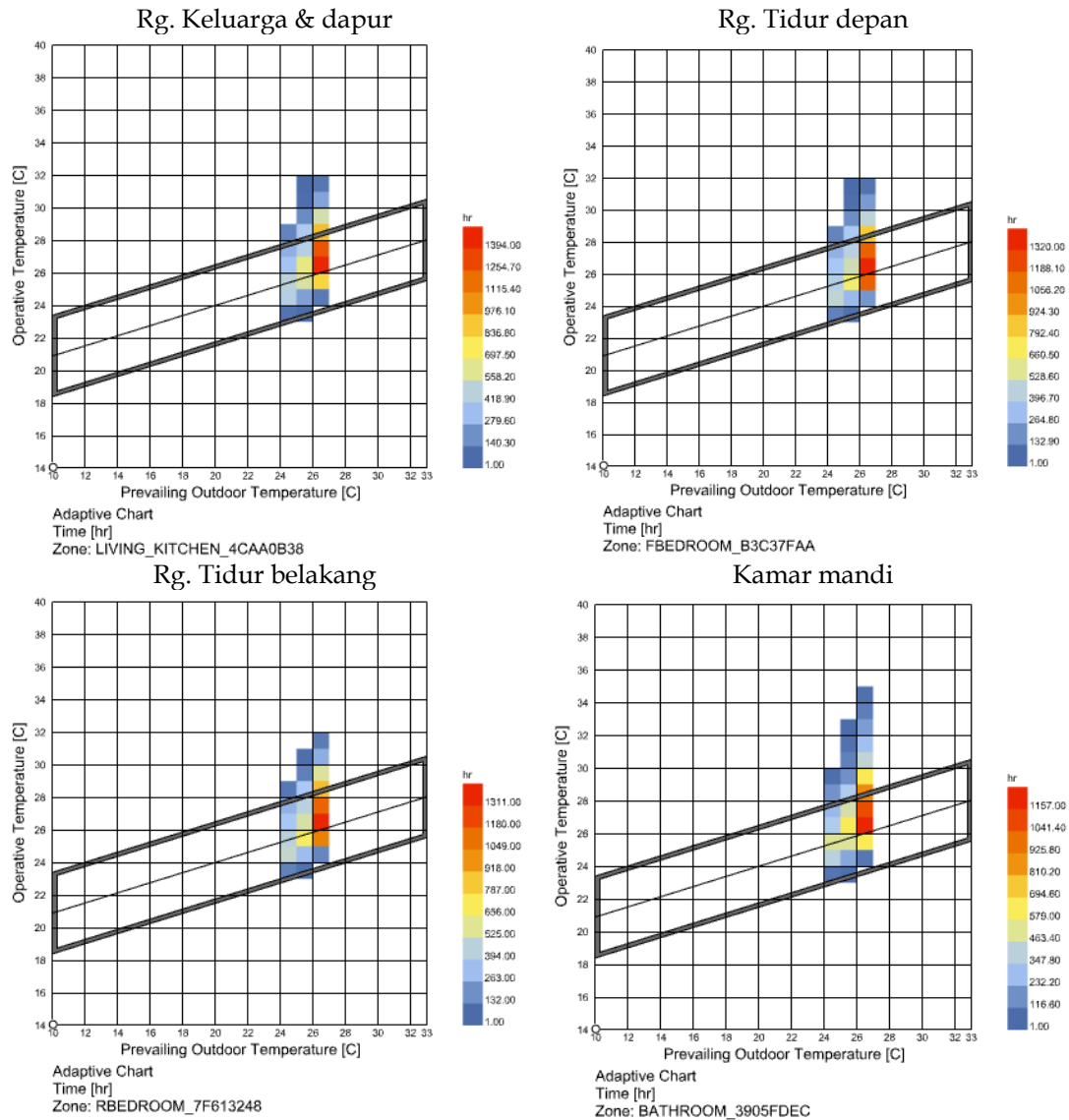
Gambar 7 memberikan gambaran rentang kenyamanan termal berdasarkan metode PMV, di mana dalam masing-masing bagan terdapat dua poligon, di sebelah kiri adalah poligon TCP PMV, dan di sebelah kanan adalah perluasan TCP dengan strategi pasif melalui peningkatan kecepatan angin dengan pengoperasian kipas angin. Untuk PMV, diperoleh TCP berkisar antara 6,68% hingga 12,27% dan dengan strategi pasif, didapatkan tambahan rentang TCP dengan rata-rata 67,22%. Dengan demikian, diperoleh rata-rata total TCP sebesar 77,21%. Perlu diingat bahwa persentase kenyamanan termal ini dihitung pada saat waktu ruangan digunakan oleh penghuni, sesuai jadwalnya masing-masing, dalam durasi satu tahun, dan bukan memberikan gambaran total kenyamanan termal dari sebuah ruangan selama 24 jam setiap harinya selama setahun. Persentase kenyamanan termal tertinggi berada dikalkulasikan berada di ruang tidur depan (80,59%) dan TCP terendah pada kamar mandi (73,16%). Di sini dapat dilihat bahwa berdasarkan hasil simulasi, peningkatan kecepatan angin (melalui penggunaan kipas angin) mampu memberikan tambahan kenyamanan termal sebesar 670%.



Gambar 6 Psychrometric chart simulasi PMV

Di lain sisi, untuk kalkulasi TCP dengan metode *adaptive* di mana kenyamanan termal diperoleh melalui mekanisme pembukaan dan penutupan jendela, diperoleh nilai yang lebih tinggi dibanding metode PMV dengan strategi peningkatan kecepatan udara. Dengan metode ini

diperoleh total persentase kenyamanan termal sebesar 80,69%, dengan nilai tertinggi pada ruang tidur depan (83,38%) dan nilai terendah pada kamar mandi yang tidak memiliki jendela (72,89%). Dengan demikian, kalkulasi metode *adaptive* memiliki TCP lebih tinggi 4.2% dibandingkan dengan metode PMV.



Gambar 7 Psychrometric Chart berdasarkan metode *adaptive*

Terakhir, dilakukan simulasi untuk mengalkulasikan kenyamanan termal dengan Honeybee Energi, di mana faktor energi serta konstruksi model hunian dipertimbangkan secara detail. Dalam simulasi ini digunakan laju metabolisme dan insulasi pakaian yang sama dengan metode PMV dengan Ladybug. Hasil estimasi diperoleh TCP berdasarkan PMV sebesar 39,21%, dan *adaptive* dengan nilai 94,59%. Untuk selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 8 di bawah ini.

Tabel 5 Thermal comfort percentage hasil kalkulasi HB Energy

	Kenyamanan Termal	
	PMV (%)	Adaptiv (%)
Rg. keluarga & dapur	31,70	87,56
Rg. Tidur depan	49,68	87,56
Rg. Tidur belakang	49,91	87,50
Kamar mandi	38,21	87,45
Rata-rata	39,21	87,45

(Sumber: hasil simulasi)

4. KESIMPULAN

1. Tidak ada perbedaan yang signifikan antara orientasi bangunan hunian bersubsidi dengan total radiasi matahari yang diterima oleh bangunan, mengingat selisih nilai yang diperoleh hanya sekitar 6%. Bagian dari bangunan yang menerima radiasi matahari terbesar adalah atap, hal ini juga menjadi penyebab tingginya suhu ruang di bawah atap.
2. Orientasi ruang terhadap arah mata angin lebih memiliki peran yang signifikan terhadap tinggi-rendahnya suhu ruang.
3. Meskipun hunian subsidi yang dievaluasi memiliki orientasi bangunan yang berbeda, fluktuasi suhu di dalam ruangan menunjukkan tren yang sama. Untuk ruang-ruang yang dihuni, tinggi rendahnya temperatur ruang (MRT), relatif sama. Hal ini disebabkan oleh nilai volume/massa bangunan (volume ruang).
4. Faktor-faktor yang mempengaruhi tinggi-rendahnya suhu dalam ruang adalah orientasi ruang terhadap matahari, material bangunan, bukaan, dan naungan.
5. Nilai persentase kenyamanan termal melalui pengujian dengan *Ladybug* menunjukkan nilai yang lebih besar daripada simulasi dengan menggunakan *HB Energy*.
6. Berdasarkan simulasi dengan *Ladybug*, TCP untuk PMV dan *Adaptive* diperoleh nilai masing-masing sebesar 77% dan 80%.
7. Hasil simulasi dengan menggunakan *Honeybee EnergyPlus*, diperoleh TCP untuk PMV dan *Adaptive* sebesar 39,21% dan 87,45%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anastasiou, E., Feinberg, A., Tovar, A., Gill, E., Ruzmyn Vilcassim, M. J., Wyka, K., Gordon, T., Rule, A. M., Kaplan, S., Elbel, B., Shelley, D., & Thorpe, L. E. (2020). Secondhand smoke exposure in public and private high-rise multiunit housing serving low-income residents in New York City prior to federal smoking ban in public housing, 2018. *Science of The Total Environment*, 704, 135322. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135322>
- ASHRAE. (2010). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. www.ashrae.org/technology.
- Berkelanjutan, J. T., & Rafik, A. (2019). KAJIAN PENGEMBANGAN RUMAH TIPE 36 SEBAGAI DASAR PENERAPAN KONSEP RENOVABLE PADA PERUMAHAN DI BANJARMASIN. *Sustainable Technology Journal*, 8(1), 13–18. <http://jtb.ulm.ac.id/index.php/JTB>
- Escandón, R., Suárez, R., Alonso, A., & Mauro, G. M. (2022). Is indoor overheating an upcoming risk in southern Spain social housing stocks? Predictive assessment under a climate change

scenario. *Building and Environment*, 207, 108482.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108482>

- Kamel, T. M., Khalil, A., Lakousha, M. M., Khalil, R., & Hamdy, M. (2024). Optimizing the View Percentage, Daylight Autonomy, Sunlight Exposure, and Energy Use: Data-Driven-Based Approach for Maximum Space Utilization in Residential Building Stock in Hot Climates. *Energies*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/en17030684>
- Kimura, K.-I., & Tanabe, S. (1994). *Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions*. <https://www.researchgate.net/publication/279550801>
- San Miguel-Bellod, J., González-Martínez, P., & Sánchez-Ostiz, A. (2018). The relationship between poverty and indoor temperatures in winter: Determinants of cold homes in social housing contexts from the 40s-80s in Northern Spain. *Energy and Buildings*, 173, 428-442. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.05.022>
- Sikumbang - Daftar lokasi perumahan*. (n.d.). Retrieved September 16, 2024, from <https://sikumbang.tapera.go.id/>
- Wei, J., Li, H. X., Sadick, A. M., & Noguchi, M. (2024). A systematic review of key issues influencing the environmental performance of social housing. In *Energy and Buildings* (Vol. 319). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114566>