ISSN 2088-4842 / 2442-8795 OPTIMASI SISTEM INDUSTRI

PENYUSUNAN KRITERIA RUMAH TINGGAL BERKONSEP ERGO-EKOLOGI DALAM UPAYA PENINGKATAN KENYAMANAN TERMAL PENGHUNI

Lusi Susanti, Sri Zetli
Jurusan Teknik Industri, Universitas Andalas, Padang

Email: lusi@ft.unand.ac.id (korespondensi)

Abstract

Nowadays, developers of residential houses often neglect to pay attention about the air circulation as one of the factors that affects thermal comfort zones inside the room environment. In general, people overcome the thermal discomfort using mechanical ventilation such as a fan or Air Conditioning (AC).This study measured the comfort zone of 32 row houses in the Batam city with two types of floor area (LT ≤ 36 m^2 and LT > 36 m^2). Other variables include Ceiling Height (Tp_i), Aperture Area (Vi), Wall Materials (Bh_i) and Orientation (Or_i) were also considered in this measurement. The results show that thermal comfort zone was influenced by the wall material (Bh_1) made from brick, aperture area (V_2) > 20% of the floor area, and ceiling height (Tp_2) > 3 m. While the house orientation variable can still be received by utilizing the architecture techniques to reduce direct solar radiation. This study also formulated three models of row house design with ergo-ecological concept, which are R_{ee} = f {Lt_i, Bh, V, Tp_2, Or_i} atau R_{ee} = f {Lt_2, Bh, V, Tp_1, Or_2} atau R_{ee} = f {Lt_1, Bh, V, Tp_1, Or_1}.

Keywords *: Thermal comfort, Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Ergo-Ecology house concept*

Abstrak

Pengembang rumah tinggal dewasa ini seringkali abai dalam memperhatikan sirkulasi udara sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal di dalam ruangan. Pada umumnya masyarakat mengatasi ketidaknyamanan termal dengan menggunakan ventilasi mekanis seperti kipas angin atau Air Conditioner (AC). Penelitian ini mengukur kenyamanan pada 32 rumah deret di Kota Batam yang dikelompokan menjadi dua bagian utama berdasarkan Luas Lantai (Lt_i), yaitu LT ≤ 36 m^2 dan LT > 36 $m^{2.}$ ^{V}. Variable struktur rumah lainnya yang diperhatikan adalah Tinggi Plafon (Tp_i), Area Bukaan (V_i), Material Dinding (Bh_i) dan Orientasi (Or_i). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenyamanan termal dipengaruhi oleh variable material dinding terbuat dari bata (Bh_1), area bukaan > 20% dari luas lantai (V_2), dan tinggi plafon > 3 m (Tp_2). Sedangkan variable orientasi rumah masih bisa diterima dengan memanfaatkan teknik-teknik arsitektur untuk mengurangi radiasi sinar matahari langsung. Penelitian ini juga memformulasi tiga model rancangan rumah deret dengan konsep ergo-ekologi yaitu R_{ee} = f {Lt_i, Bh, V, Tp_2, Or_i} atau R_{ee} = f {Lt_2, Bh, V, Tp_1, Or_2} atau R_{ee} = f {Lt_1, Bh, V, Tp_1, Or_1}

Kata Kunci : *Kenyamanan termal, Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Rumah Berkonsep Ergo-Ekologi*

1. PENDAHULUAN

Kota Batam merupakan kota terbesar ke tiga populasinya di Sumatra setelah Medan dan Palembang. Batam merupakan salah satu kota dengan pertumbuhan terpesat di Indonesia. Sehingga meyebabkan proyek perumahan massal berkembang di Batam khususnya rumah deret. Saat ini, proporsi area bangunan untuk perumahan di lahan perkotaan rata-rata mencapai 65%, sehingga area pemukiman adalah area yang paling dominan di wilayah perkotaan [1].

Keterbatasan lahan di perkotaan memicu pembangunan rumah tinggal yang meminimasi luas area untuk pergerakan udara demi memenuhi tuntutan kebutuhan ruang. Jika perkampungan kota semakin padat, maka pergerakan udara di sekitar bangunan menjadi

terhalang sehingga mengakibatkan suhu udara di sekitar bangunan menjadi panas [1].

Pengembang maupun pemilik rumah tinggal dewasa ini seringkali abai dalam memperhatikan sirkulasi udara sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal di dalam ruangan, terutama untuk wilayah yang memiliki iklim tropis dengan karakteristik kelembaban udara yang tinggi (dapat mencapai angka 80%), suhu udara relatif tinggi (dapat mencapai hingga 35 ^{o}C), serta radiasi matahari yang menyengat serta mengganggu [1].

Pada umumnya masyarakat mengatasi ketidaknyamanan karena rasa panas tersebut dengan menggunakan ventilasi mekanis seperti kipas angin atau *air conditioner* (AC). Efek negatif yang ditimbulkan oleh penggunaan AC telah pula menjadi kekhawatiran bagi para peneliti dan pemerhati kesehatan dalam beberapa dekade terakhir. Efek rumah kaca seperti dampak penggunaan CFC (*Chloro Fluoro Carbon*) terhadap lapisan ozon yang mencemari lingkungan atau penyakit-penyakit yang ditimbulkan akibat ruangan yang selalu tertutup tanpa adanya sirkulasi udara yang memadai, telah menyebabkan penggunaan AC secara masif menjadi pilihan yang tidak menguntungkan. Disamping itu jenis pendingin ruangan tersebut, khususnya AC membutuhkan energi listrik yang sangat besar.

Penelitian sebelumnya di Indonesia menemukan bahwa konsumsi energi pendingin di Yogyakarta dan Bandung secara berturut-turut sekitar 25% dan 16%. Kondisi lain terjadi di Kota Padang untuk tingkat konsumsi energi pendingin yaitu sebesar 17% [2].

Penelitian yang dilakukan oleh Sindikia [3], menjelaskan bahwa peralatan listrik pendingin berpengaruh terhadap rata-rata biaya tagihan listrik per bulan. Sehingga kenyamanan lingkungan sekitar merupakan faktor penting yang dapat mempengaruhi tingkat konsumsi energi listrik di rumah tinggal. Sindikia (2015) [3] juga menjelaskan bahwa tingkat konsumsi energi pada rumah tinggal terhadap rata-rata biaya tagihan listrik per bulan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhinya adalah tipe rumah, tahun pembangunan rumah, luas lantai bangunan rumah, tinggi plafon, bahan dinding rumah, posisi jendela terhadap area terbuka, dan jumlah jendela.

Untuk menghindari krisis energi dan untuk mempertahankan keberlanjutan energi, pemerintah Indonesia telah menetapkan target jangka panjang untuk mengurangi intensitas energi minimal 1% per tahun hingga tahun 2025 [4]. Sesuai dengan target kebijakan energi nasional tersebut, berarti total konsumsi energi pada tahun 2025 haruslah dapat diturunkan hingga 50% dengan perencanaan konservasi energi. Oleh karena itu diharapkan bagi masyarakat Indonesia dapat melakukan upaya-upaya di segala bidang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mendorong konservasi energi.

Ada upaya untuk melihat kembali ke prinsip-prinsip desain vernakular dengan penggunaan cara alami untuk memberikan kenyamanan termal dalam ruangan. Ada banyak prinsip-prinsip desain yang dapat digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada perangkat pemanasan dan pendinginan untuk mencapai kondisi nyaman, termasuk ventilasi alami, perangkat *shading*, isolasi termal, *radiant cooling*, pendinginan *evaporatif*, dan lainnya [5]. Sebuah rumah yang memanfaatkan prinsip-prinsip tersebut tanpa menggunakan pemanas atau pendingin ruang aktif. Pendekatan ergo-ekologi dewasa ini telah dipercaya menjadi metode yang sangat baik dalam menjembatani kebutuhan teknis dengan isu-isu lingkungan [6]. Ergo-ekologi adalah disiplin ilmu yang berhubungan dengan sistem ergonomis untuk faktor lingkungan yang menekankan hubungan antara aspek ekologi-geografi dengan aktifitas manusia. Salah satu penerapan dari konsep ergo-ekologi terhadap rumah yang hemat energi adalah rumah pasif energi/*passive house* [5].

Dalam kumpulan data rumah pasif di seluruh dunia yang disusun oleh Rumah Pasif Institute dan Afiliasi (IPHA), telah ada 1.883 rumah tinggal terdaftar sebagai rumah pasif di beberapa negara, tetapi tidak ada di Indonesia. Pada kenyataannya, pengembangan rumah pasif di Indonesia merupakan hal yang mendesak. Jumlah penduduk Indonesia meningkat setiap tahun dan ini menyebabkan semakin meningkatkan konsumsi energi. Rumah pasif diharapkan dapat menekan konsumsi energi, terutama untuk kebutuhan energi pendingin.

Idealnya, sebuah bangunan mempunyai nilai estetis berfungsi sebagaimana tujuan bangunan tersebut dirancang yaitu memberikan rasa aman dan nyaman dalam mendukung aktifitas didalamnya. Salah satu faktor kenyamanan lingkungan yang mempengaruhi tingkat kenyamanan pada saat sesorang beraktifitas adalah kenyaman termal. Menurut ASHRAE [7], kenyamanan termal merupakan persamaan dimana sesorang merasa nyaman dengan keadaan temperatur lingkungannya, yang dalam konteks sensasi digambarkan sebagai kondisi dimana seseorang tidak merasakan kepanasan maupun kedinginan pada lingkungan tertentu.

Metode yang digunakan untuk menentukan kenyamanan termal dan telah menjadi standar

baku kenyamanan termal pada ASHRAE 55-2005 dan ISO 7730 adalah indeks termal PMV dan PPD. PMV (*Predicted Mean Vote*) merupakan indeks yang dikenalkan oleh Professor Fanger dari *University of Denmark* yang mengindikasikan sensasi dingin dan hangat yang dirasakan oleh manusia dengan melibatkan empat faktor yang berasal dari lingkungan yaitu suhu udara, temperatur radiant, kelembaban udara, kecepatan angin, dan dua faktor yang berasal dari manusia yaitu laju metabolisme tubuh dan nilai insulasi pakaian, yang menghasilkan skala +3 (sangat panas), +2 (panas), +1 (sedikit panas), 0 (netral), -1 (sedikit dingin), -2 (dingin), -3 (sangat dingin). Sedangkan untuk mengetahui berapa banyak orang yang tidak puas dengan kondisi lingkungan dapat ditentukan dengan PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Semakin besar presentase PPD maka semakin banyak yang tidak puas terhadap kondisi termal lingkungan [8].

Penelitian mengenai kenyamanan termal telah dilakukan diberbagai tempat, Udrea *et al* [7] melakukan pengukuran kenyaman termal di gedung perkantoran di Rumania yang menunjukan bahwa selama musim panas, rumah pasiv tanpa pendingin tambahan menyajikan prilaku adaptif sesuai dengan standar EN 15251. Simulasi kenyamanan termal di pabrik juga dilakukan oleh Susanti *et al* [9] yang menunjukan bahwa pabrik dengan atap berongga memiliki ventilasi alami yang berpotensi sangat baik untuk meningkatkan kenyamanan termal lingkungan dalam ruangan dan penghematan energi dibandingkan dengan pabrik dengan atap tunggal. Sedangkan kenyaman termal di Apartemen juga dilakukan oleh Alfata *et al* [10] yang menunjukkan bahwa apartemen bangunan lama memiliki lingkungan termal yang lebih baik dibandingkan dengan apartemen bangunan baru ataupun apartemen pribadi.

Dari latar belakang tersebut maka dirasa perlu dilakukan penelitian untuk mengukur kenyaman termal di bangunan rumah tinggal khususnya di Kota Batam dalam rangka mengurangi pemakaian konsumsi energi listrik tanpa harus mengorbankan kenyamanan termal penghuni. Dari penelitian terdahulu, tingkat konsumsi energi listrik dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu tipe rumah, tahun pembangunan rumah, luas lantai bangunan rumah, tinggi plafon, bahan dinding rumah, jumlah jendela/bukaan dan orientasi. Sehingga faktor tersebut akan menjadi kriteria dalam penelitian yang akan dilakukan terhadap rumah tinggal, yang bertujuan untuk menyusun kriteria rumah tinggal berkonsep ergo-ekologi dalam upaya peningkatan kenyamanan termal penghuni.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rumah Tinggal

Aspek-aspek yang mempengaruhi rumah tinggal adalah sebagai berikut [11]:

1. Radiasi sinar matahari
   Radiasi merupakan faktor utama terjadinya perpindahan kalor ke dalam ruangan. Hubungannya dengan orientasi bangunan adalah sifat-sifat dari peredaran matahri sepanjang tahun, dimana dalam wilayah iklim tropis lembab lintasan matahari hampir selalu berada di atas kepala dengan arah terbit dan terbenam selalu dari Timur ke Barat. Agar meniadakan radiasi langsung dari cahaya matahari sehingga suhu dalam ruangan tidak terlalu panas, maka orientasi bangunan sebaiknya menghadap ke Selatan-Utara.
2. Angin
   Pergerakan udara dalam ruangan secara terus menerus akan menciptakan kesejukan ruangan. Hal ini perlu diperhatikan dalam perancangan bangunan.
3. Temperatur
   Temperatur di siang hari untuk daerah tropis relatif panas, terutama jika ruang terbuka yang sedikit pepohonannya. Perlu ditempatkan pohon meneduh dengan tajuk lebar untuk mendapatkan iklim mikro yang sejuk. Akibat penyinaran matahari dan kegiatan yang terjadi di dalamnya, bangunan menerima dan melepas panas yang akan berpengaruh terhadap kondisi suatu ruang dalam bangunan.

2.2. Kenyamanan Termal

Menurut ASHRAE (1989), kenyamanan termal adalah suatu kondisi dimana ada kepuasan terhadap keadaan termal di sekitarnya. Dalam standar ini juga disyaratkan bahwa suatu kondisi dinyatakan nyaman apabila tidak kurang dari 90 persen responden yang diukur menyatakan nyaman secara termal.

Ada 6 faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal menurut ASHRAE [7]:

1. Temperatur udara
   Temperatur udara merupakan salah satu faktor yang paling dominan dalam menentukan kenyamanan termal. Satuan yang digunakan untuk temperatur udara adalah Celcius, Fahrenheit, Reamur, dan Kelvin. Manusia dikatakan nyaman apabila suhu tubuhnya sekitar 37%. Temperatur udara antara suatu daerah dengan daerah lainnya sangat berbeda. Hal ini disebabkan

adanya beberapa faktor, seperti sudut datang sinar matahari, ketinggian suatu tempat, arah angin, arus laut, awan, dan lamanya penyinaran.

2. Temperatur Radiant
   Temperatur radiant adalah panas yang berasal dari radiasi objek yang mengeluarkan panas, salah satunya yaitu radiasi matahari.
3. Kelembaban Udara
   Kelembaban udara merupakan kandungan uap air yang ada di dalam udara, sedangkan kelembaban relatif adalah rasio antara jumlah uap air di udara dengan jumlah maksimum uap air dapat ditampung di udara pada temperatur tertentu. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kelembaban udara, yakni radiasi matahari, tekanan udara, ketinggian tempat, angin, kerapatan udara, serta suhu.
4. Kecepatan Angin
   Kecepatan angin adalah kecepatan aliran udara yang bergerak secara mendatar atau horizontal pada ketinggian dua meter di atas tanah. Kecepatan angin dipengaruhi oleh karakteristik permukaan yang dilaluinya.
5. Insulasi Pakaian
   Jenis dan bahan pakaian yang dikenakan juga dapat mempengaruhi kenyamanan termal. Salah satu cara manusia untuk dapat beradaptasi dengan keadaan termal di lingkungan sekitarnya adalah dengan cara berpakaian. Satuan yang bisa digunakan untuk pengukuran insulasi pakaian adalah Clo. Batas nyaman untuk pakaian adalah n ≤ 0,5 Clo [12]. Total nilai Clo bisa dihitunng dengan menjumlahkan nilai Clo untuk setiap jenis pakaian. Nilai insulasi pakaian dapat dilihat pada Tabel 1.
6. Aktivitas
   Aktivitas yang dilakukan manusia akan meningkatkan metabolisme tubuhnya. Semakin tinggi intensitas aktivitas yang dilakukan, maka semakin besar pula peningkatan metabolisme yang terjadi di dalam tubuh, sehingga makin besar energi dan panas yang dikeluarkan. Metabolisme diukur dengan MET (1 MET = 58 W/m^2 permukaan tubuh). Manusia dewasa normal memiliki permukaan kulit 1,7 m^2 dan orang dalam kenyamanan termal dengan tingkat aktivitas 1 MET akan memiliki *hest loss* kira-kira 100 W. dalam menilai tingkat metabolism penting untuk menggunakan rata-rata aktivitas manusia yang telah ditunjukan dalam 1 jam terakhir. Nilai MET berbagai aktivitas dapat dilihat pada Tabel 2.

2.3. Skala PMV (Predicted Mean Vote)

Predicted Mean Vote (PMV) merupakan indek yang diperkenalkan oleh Fanger (1982) untuk mengindikasikan rasa dingin dan hangan yang dirasakan oleh manusia. PMV merupakan indek yang memperkirakan respon sekelompok besar manusia pada skala sensasi termal ASHRAE berikut:

+3 *hot*
+2 *warm*
+1 *slighty warm*
0 *neutral*
-1 *slighty cool*
-2 *cool*
-3 *cold*

Nilai PMV (*Predicted Mean Vote*) menentukan rentang sensasi temperatur yang dirasakan orang terhadap lingkungan di sekitarnya. Indeks PMV ini berkisar dari -3 (sangat dingin) sampai dengan +3 (sangat panas). Nilai nol adalah netralitas termal, bukan kenyamanan termal. Setelah faktor lingkungan dan faktor subyektif diukur, maka untuk sensasi termal untuk tubuh secara keseluruhan dapat diprediksi dengan cara menghitung indeks PMV yang didasarkan pada keseimbangan panas dari tubuh manusia, yang diberikan oleh persamaan (1) [8].

$$PMV = [0.303\exp(-0.036M) + 0.028]L \quad (1)$$

$$L = (M-W) - \{3.9\times10^{-8} f_{cl}\times[(t_{cl}+273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\} - 3.05[5.73 - 0.007(M-W) - p_a] - 0.42[(M-W) - 58.15] - 0.0173(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) \quad (2)$$

Dimana,

$$h_c = 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25}\ for\ 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V}\ for\ 2.38(t_{cl}-t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V} \quad (3)$$

$$f_{cl} = 1.0 + 0.2I_{cl}\ for\ I_{cl} < 0.5clo\ atau\ 1.0 + 0.1I_{cl}\ for\ I_{cl} > 0.5clo \quad (4)$$

Keterangan
M : Tingkat aktivitas (W/m^2)
W : Aktivitas luar (W/m^2), 0 untuk sebagian besar aktivitas
f_{cl} : Rasio permukaan tubuh orang ketika berpakaian dan tidak berpakaian
t_{cl} : Temperatur permukaan pakaian (^{0}C)
tr : Temperatur radiasi (^{0}C)
h_c : Konvektif heat transfer dalam (W/m^2 K)
t_a : Temperatur udara (^{0}C)
P_a : Kelembaban udara (Pa)
I_{cl} : Nilai insulasi pakaian (clo)
V : Kecepatan aliran udara (m/s)

Tabel 1. Nilai Insulasi Pakaian

Garment Description	clo	Garment Description	clo
Underwear		Trousers and Coveralls	
Men's briefs	0.04	Short shorts	0.06
Panties	0.03	Walking shorts	0.08
Bra	0.01	Straight trousers (thin)	0.15
T-shirt	0.08	Straight trousers (thick)	0.24
Full slip	0.16	Sweat Pants	0.28
Half slip	0.14	Overalls	0.3
Long underwear top	0.2	Coveralls	0.49
Long underwear bottom	0.15	Dresses and skirts	
Footwear		Skirts (thin)	0.14
Ankle-Length athletic socks	0.02	Skirts (thick)	0.23
Calf-Length socks	0.03	Long-sleeve shirt dress (thin)	0.33
Knee socks (thick)	0.06	Long-sleeve shirt dress (thick)	0.47
Panty hose stockings	0.02	Short-sleeve shirt dress (thin)	0.29
Sandals	0.02	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23
Slippers	0.03	Sleeveless, scoop neck (thick)	0.27
Boot	0.1	Sweaters	
Shirt and Blouses		Sleeveless vest (thin)	0.13
Sleveless	0.12	Sleeveless vest (thick)	0.22
Short sleeve, dresses	0.19	Long-sleeve (thin)	0.25
Long sleeve, dresses	0.25	Long-sleeve (thick)	0.36
Long sleeve, flannel shirt	0.34	Sleepwear and Robes	
Short sleeve, knit sport shirt	0.17	Sleeveless, short gown (thin)	0.18
Long sleeve, sweat shirt	0.34	Sleeveless, long gown (thin)	0.2
		Long-sleeve pajamas	0.57
		Short-sleeve pajamas	0.42

Sumber: ASHRAE [7]

Tabel 2. Nilai MET Berbagai Aktivitas

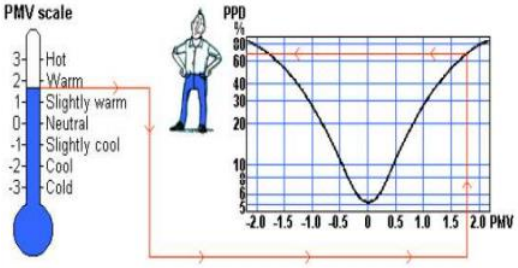
	$Btu/h.ft^2$	Met^*
Resting		
Sleeping	13	0.7
Reclining	15	0.8
Scated, quiet	18	1.0
Standing, relaxed	22	1.2
Walking (on level surface)		
2.9 fps (2 mph)	37	2.0
4.4 fps (3 mph)	48	2.6
5.9 fps (4 mph)	70	3.8
Office Activities		
Reading, seated	18	1.0
Writing	18	1.0
Typing	20	1.1
Filing, seated	22	1.2
Filing, standing	26	1.4
Walking about	31	1.7
Lifting/packing	39	2.1
Driving/Flying		
Car	18 to 37	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	22	1.2
Aircraft, instrument landing	33	1.8
Aircraft, combat	44	2.4
Heavy vehiele	59	3.2
Miscellancouse Occupational Activities		
Cooking	29 to 37	1.6 to 2.0
Housecleaning	37 to 63	2.0 to 3.4
Scated, heavy limb movement	41	2.2
Machine work		
sawing (table saw)	33	1.8
light (electrical industry)	37 to 44	2.0 to 2.4
heavy	74	4.0
Handling 110 lb bags	74	4.0
Pick and shovel work	74 to 88	4.0 to 4.8
Miscellancouse Leisure Activities		
Dancing, social	44 to 81	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	55 to 74	3.0 to 4.0
Tennis, singles	66 to 74	3.6 to 4.0
Basketball	90 to 140	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	130 to 160	7.0 to 8.7

Sumber: ASHRAE [7]

2.4. Skala PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*)

PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) merupakan banyaknya orang (dalam persentase) yang tidak puas terhadap keadaan termal di lingkungan sekitar. Orang diasumsikan tidak puas terhadap keadaan termal apabila indeks PMV yang dirasakannya adalah -3 (sangat dingin), -2 (dingin), +2 (panas), dan +3 (sangat panas). Semakin besar persentase PPD, maka semakin banyak penghuni yang merasa tidak puas. Fanger (1982) menghubungkan nilai PMV dan PPD seperti formula (5) [8].

$$PPD = 100 - 95exp - (10.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2) \quad (5)$$



Gambar 1. Hubungan antara PMV dan PPD
(Sumber: Innova, 1997)

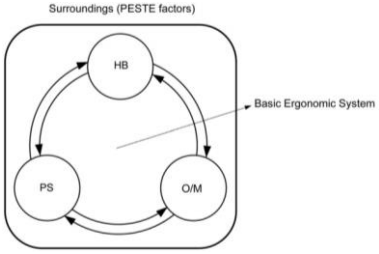
2.5. Ergo-ekologi

Dalam bahasa Yunani, ergo-ekologi berasal dari tiga kata yaitu: (1) ergo: yang berarti bekerja, aksi dari kerja-unit energi; (2) eko: yang berarti tempat tinggal, rumah, habitat; (3) logi: yang berarti penalaran, risalah, ilmu, doktrin atau teori.

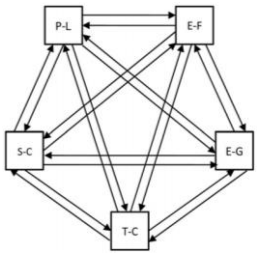
Ergo-ekologi adalah disiplin ilmu yang berhubungan dengan sistem ergonomis untuk faktor lingkungan, menekankan hubungan antara aspek ekologi-geografis dan aktivitas manusia [5]. Ergoekologi dikembangan untuk mengintegrasikan proses evaluasi dan intervensi umumnya yang digunakan oleh ergonomi dan sistem manajemen lingkungan. Dimana dari tampak depan, dari sebuah fokus yang sistematis untuk mempelajari manusia dan hubungannya dengan lingkungan melalui kegiatannya (kerja), untuk membentuk, menganalisis, mengurangi, mencegah, mengendalikan dan memperbaiki danpak (positif dan negatif) yang berasal dari hubungan tersebut.

Oleh karena itu, dalam kerangka yang berkelanjutan ergo-ekologi berusaha untuk mencapai produktivitas dan efisiensi system ergonomis dalam kaitannya dengan faktor lingkungan ekologi-geografi, melalui penggunaan energi, material dan informasi, yang akan membawa keseimbangan yang dinamis dan keseimbangan lingkungan [5].

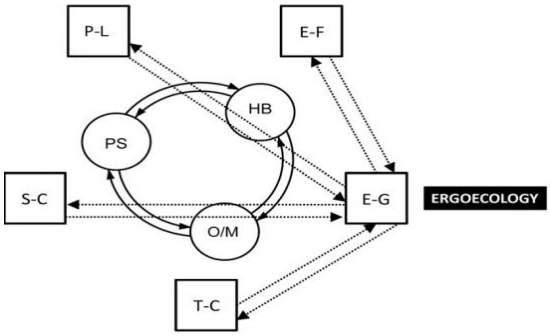
Atau ergo-ekologi bisa diartikan suatu bentuk interaksi antara Sistem Ergonomi dengan lima faktor PESTE, terutama faktor ekologi-geografis, seperti yang bisa dilihat dari Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4. Ini berarti bahwa hubungan yang harus dibangun adalah antara ergonomik, ekologi dan kelanjutannya.



Gambar 2. Dasar Sistem Ergonomi
(Sumber: Garci'a-Acosta, 2014)



Gambar 3. Lingkungan "Faktor PESTE"
(Sumber: Garci'a-Acosta, 2014)



Gambar 4. Ergo - Ekologi Mengenai Lingkungan (Faktor PESTE)
(Sumber: Garci'a-Acosta, 2014)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Metodelogi penelitian merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam melaksanakan sebuah penelitian. Langkah pertama dilakukan adalah dimulai dari studi literatur yang membantu dalam menentukan teori-teori yang berhubungan dengan penyusunan kriteria rumah tinggal yang berkonsep ergo-ekologi dalam peningkatan kenyamanan termal penghuni dan juga teori-teori pendukung lain yang berhubungan dengan permasalahan yang dihadapi. Berdasarakan penelitian pendahuluan dan studi literatur maka dapat ditentukan permasalahan yang berkaitan dengan penelitian ini.

Pada tahap pengumpulan data yang dilakukan adalah dengan menetapkan lima karakteristik rumah deret yang ada di Kota Batam yaitu luas lantai bangunan (≤ 36 m^2 dan > 36 m^2), tinggi plafon bangunan (≤ 3 m dan > 3 m), bahan bangunan (bata dan batako), luas bukaan (≤ 20% dari luas lantai dan > 20% dari luas lantai) dan orientasi (utara/selatan dan timur/barat). Dari 5 karakteristik rumah tersebut didapat 32 unit rumah dengan karakteristik berbeda-beda yang dijadikan sampel penelitian.

Data yang diukur adalah data yang mempengaruhi kenyamanan termal yaitu empat parameter lingkungkan yang mencakup temperatur udara menggunakan alat ukur *Thermometer Digital*, kelembaban udara menggunakan alat ukur *Glovemeter*, kecepatan angin menggunakan alat ukur *Anemometer*, dan temperatur radiasi menggunakan alat ukur *Humidity Longger*. Parameter lainnya adalah dua parameter individu yang meliputi nilai insulasi pakaian dan tingkat aktivitas dengan menggunakan alat ukut berupa kuesioner.

Pengukuran dilakukan pada 32 unit rumah deret yang menjadi kombinasi dari karakteristik termal dari faktor-faktor rumah

tinggal yang mempengaruhi konsumsi energi listrik, terlihat pada Tabel 3.

Pengukuran dilakukan di tiga titik pengukuran yaitu, luar rumah, dalam rumah dan kamar. Sedangkan waktu pengukuran dilakukan pada empat periode waktu, yaitu pada 07:00-09:00, 11:00-13:00, 15:00-17:00 dan 19:00-21:00.

Pengolahan data dilakukan dengan skala pengukuran PMV (*Predicted Mean Vote*), PPD (*Predicted Persentage of Dessatisfied)* dan tingkat kenyamanan aktual berdasarkan hasil kuesioner.

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui hasil penelitian yang telah dilakukan. Beberapa hal penting yang menjadi poin analisis adalah nilai PMV dengan model matematis Fanger dan nilai PMV dari hasil kuesioner yang di isi responden. Kemudian nilai PMV dan PPD hitung akan dibandingkan dengan nilai PMV dan PPD kuesioner *individual vote*. Analisis berikutnya yaitu menentukan zona nyaman dengan menggunakan metoda PMV, PPD dan pengujian dengan hitungan statistik untuk menentukan pengaruh karakteristik termal terhadap kenyamnan termal. Sehingga dapat direkomendasikan penyusunan kriteria rumah tinggal yang berkonsep Ergo-ekologi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data terbagi menjadi dua data yaitu data kuantitatif dan data kualitatif. Pengambilan data kuantitatif dilakukan dengan melakukan pengukuran secara langsung terhadap empat variabel kenyamanan termal yaitu temperatur udara, *glove temperature*, kelembaban dan kecepatan angin. Sedangkan data kualitatif diperoleh dari hasil kuesioner yang dibagikan kepada penghuni rumah untuk mengetahui sensasi termal yang dirasakan penghuni rumah saat berada dirumah.

Pengumpulan data dilakukan di tiga puluh dua unit rumah deret yang menjadi kombinasi dari karakteristik termal dilihat dari lima faktor-faktor rumah tinggal yang mempengaruhi konsumsi energi listrik di Batam. Tiga puluh dua unit rumah tersebut dikelompokan menjadi dua kategori utama yaitu pembagian berdasarkan tipe rumah, yang diwakili oleh luas lantainya. Dalam penelitian ini dinamakan rumah tipe ≤ 36 m^2 dan > 36 m^2.

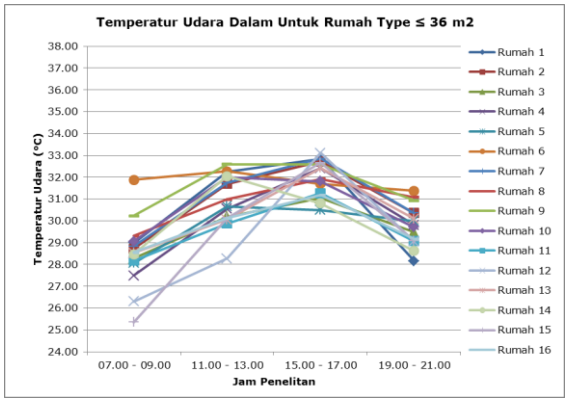
Sebelum mengukur nilai PMV, terlebih dahulu data fisik rumah seperti temperatur udara, kelembaban udara, temperature radiasi, dan kecepatan angin. Rata-rata temperatur udara dalam rumah dapat dilihat pada Tabel 4 dan secara grafis ditampilkan pada Gambar 5 untuk tipe ≤ 36 m^2, dan Gambar 6 untuk tipe ≤ 36 m^2.

Tabel 3. Kombinasi Rumah Deret Dari Karakteristik Termal

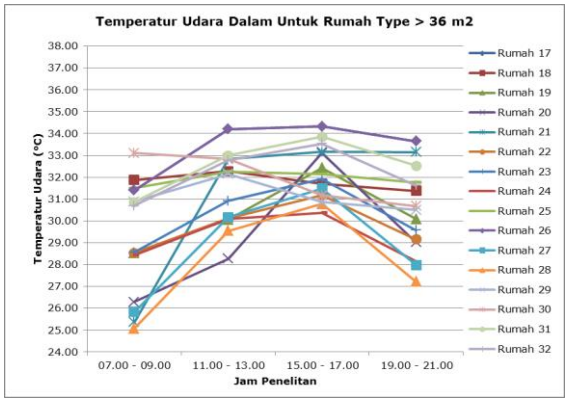
No	Luas Lantai Bangunan	Tinggi Dinding	Bahan Dinding Rumah	Luas Bukaan	Oreantasi
1	≤36 m	≤3 m	bata	≤ 20 %*LLB	timur/barat
2	≤36 m	≤3 m	bata	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
3	≤36 m	≤3 m	bata	> 20 %*LLB	timur/barat
4	≤36 m	≤3 m	bata	> 20 %*LLB	utara/selatan
5	≤36 m	≤3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	timur/barat
6	≤36 m	≤3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
7	≤36 m	≤3 m	low brick	> 20 %*LLB	timur/barat
8	≤36 m	≤3 m	low brick	> 20 %*LLB	utara/selatan
9	≤36 m	>3 m	bata	≤ 20 %*LLB	timur/barat
10	≤36 m	>3 m	bata	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
11	≤36 m	>3 m	bata	> 20 %*LLB	timur/barat
12	≤36 m	>3 m	bata	> 20 %*LLB	utara/selatan
13	≤36 m	>3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	timur/barat
14	≤36 m	>3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
15	≤36 m	>3 m	low brick	> 20 %*LLB	timur/barat
16	≤36 m	>3 m	low brick	> 20 %*LLB	utara/selatan
17	>36 m	≤3 m	bata	≤ 20 %*LLB	timur/barat
18	>36 m	≤3 m	bata	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
19	>36 m	≤3 m	bata	> 20 %*LLB	timur/barat
20	>36 m	≤3 m	bata	> 20 %*LLB	utara/selatan
21	>36 m	≤3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	timur/barat
22	>36 m	≤3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
23	>36 m	≤3 m	low brick	> 20 %*LLB	timur/barat
24	>36 m	≤3 m	low brick	> 20 %*LLB	utara/selatan
25	>36 m	>3 m	bata	≤ 20 %*LLB	timur/barat
26	>36 m	>3 m	bata	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
27	>36 m	>3 m	bata	> 20 %*LLB	timur/barat
28	>36 m	>3 m	bata	> 20 %*LLB	utara/selatan
29	>36 m	>3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	timur/barat
30	>36 m	>3 m	low brick	≤ 20 %*LLB	utara/selatan
31	>36 m	>3 m	low brick	> 20 %*LLB	timur/barat
32	>36 m	>3 m	low brick	> 20 %*LLB	utara/selatan

Tabel 4. Data Temperatur Udara Dalam Rumah

Temperatur Udara Dalam (°C)	Jam Penelitian			
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00
Rumah 1	28.98	32.24	32.82	28.16
Rumah 2	28.72	31.70	32.72	30.36
Rumah 3	28.28	30.19	31.04	29.48
Rumah 4	27.49	30.55	32.40	29.81
Rumah 5	28.06	30.66	30.49	30.00
Rumah 6	31.88	32.27	31.69	31.37
Rumah 7	28.83	31.74	32.85	30.36
Rumah 8	29.31	30.98	31.92	31.08
Rumah 9	30.23	32.59	32.59	30.93
Rumah 10	29.05	32.00	31.80	29.70
Rumah 11	28.17	29.87	31.26	29.07
Rumah 12	26.30	28.27	33.10	29.06
Rumah 13	28.53	30.06	32.42	30.09
Rumah 14	28.47	32.04	30.80	28.62
Rumah 15	25.36	30.13	32.66	29.08
Rumah 16	28.55	30.11	31.17	29.16
Rumah 17	31.40	34.20	34.32	33.65
Rumah 18	31.87	32.27	31.69	31.37
Rumah 19	28.53	30.06	32.42	30.09
Rumah 20	26.30	28.27	33.10	29.02
Rumah 21	25.36	32.84	33.16	33.15
Rumah 22	28.54	30.11	31.17	29.16
Rumah 23	28.56	30.91	31.92	29.57
Rumah 24	28.44	30.08	30.38	28.14
Rumah 25	31.50	32.27	32.14	31.77
Rumah 26	31.40	34.20	34.32	33.65
Rumah 27	25.83	30.17	31.48	27.98
Rumah 28	25.07	29.55	30.78	27.22
Rumah 29	30.90	32.14	30.86	30.50
Rumah 30	33.10	32.83	31.17	30.68
Rumah 31	30.86	33.00	33.86	32.52
Rumah 32	30.69	32.77	33.54	31.62

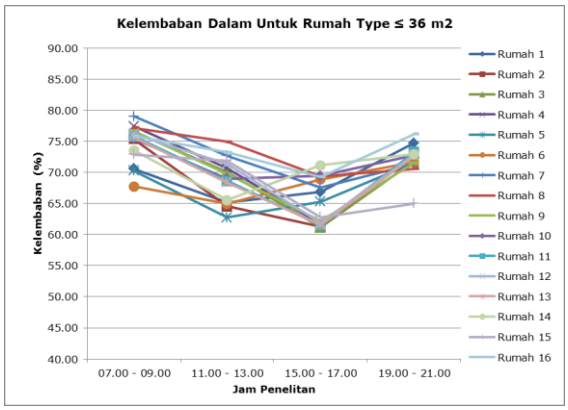


Gambar 5. Rata-Rata Temperatur Udara Dalam Rumah tipe ≤ 36 m^2



Gambar 6. Rata-Rata Temperatur Udara Dalam Rumah tipe > 36 m^2

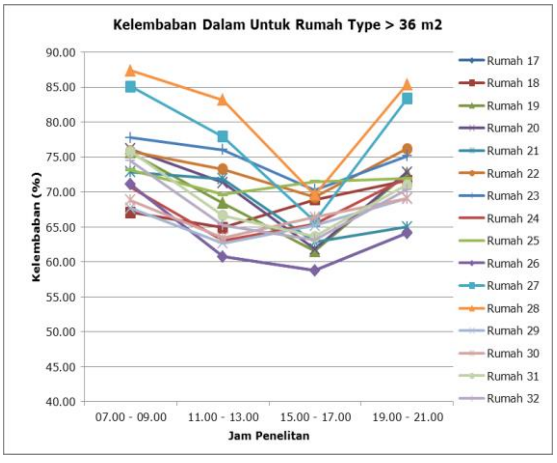
Rekapitulasi nilai kelembaban udara rata-rata untuk setiap periode waktu pengukuran pada bagian dalam rumah dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai ini diperoleh dari pengukuran selama empat periode waktu dalam sehari. Secara grafis, rata-rata kelembaban udara untuk setiap periode pengukuran dapat ditampilkan pada Gambar 7 untuk tipe ≤ 36 m^2, dan Gambar 8 untuk tipe ≤ 36 m^2.



Gambar 7. Rata-Rata Kelembaban Udara Dalam Rumah tipe ≤ 36 m^2

Tabel 5. Data Kelembaban Udara Dalam Rumah

Kelembaban Udara Dalam (%)	Jam Penelitian			
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00
Rumah 1	70.56	65.20	66.84	74.70
Rumah 2	75.38	64.52	61.24	73.02
Rumah 3	76.58	70.06	61.16	71.82
Rumah 4	77.40	70.68	61.70	73.10
Rumah 5	70.26	62.72	65.28	71.54
Rumah 6	67.74	64.92	68.90	71.64
Rumah 7	79.00	72.66	67.58	71.36
Rumah 8	77.18	74.90	69.32	70.56
Rumah 9	76.64	69.72	62.18	71.54
Rumah 10	75.42	68.98	69.42	72.72
Rumah 11	75.80	68.62	61.48	73.26
Rumah 12	76.14	71.32	61.84	72.84
Rumah 13	75.66	68.40	61.53	72.66
Rumah 14	73.50	65.52	71.10	72.92
Rumah 15	72.88	71.86	62.80	65.00
Rumah 16	75.86	73.24	69.26	76.18
Rumah 17	71.10	60.74	58.77	64.10
Rumah 18	67.09	64.92	68.90	71.64
Rumah 19	75.66	68.40	61.53	72.66
Rumah 20	76.14	71.32	61.84	72.84
Rumah 21	72.88	71.86	62.80	65.00
Rumah 22	75.86	73.24	69.26	76.18
Rumah 23	77.78	76.06	70.32	75.14
Rumah 24	70.68	63.00	65.40	72.02
Rumah 25	73.18	69.64	71.50	71.92
Rumah 26	71.10	60.74	58.77	64.10
Rumah 27	85.10	77.92	65.82	83.38
Rumah 28	87.38	83.16	69.58	85.40
Rumah 29	67.68	62.68	65.18	69.12
Rumah 30	68.80	63.40	66.40	69.04
Rumah 31	75.80	66.62	63.60	71.02
Rumah 32	74.44	65.26	63.16	70.36



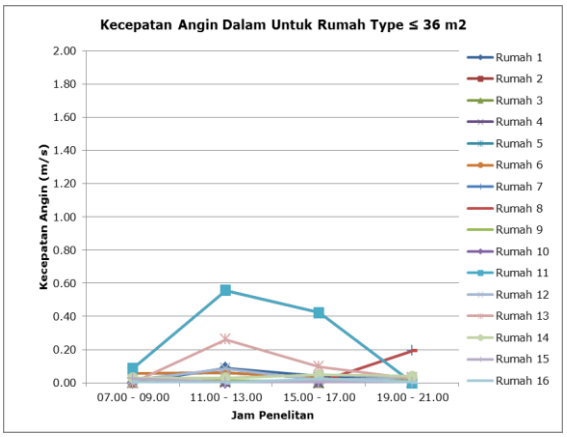
Gambar 8. Rata-Rata Kelembaban Udara Dalam Rumah tipe > 36 m^2

Data rata-rata nilai kecepatan angin untuk setiap periode waktu pengukuran pada bagian dalam rumah dapat dilihat pada Tabel 6 dan

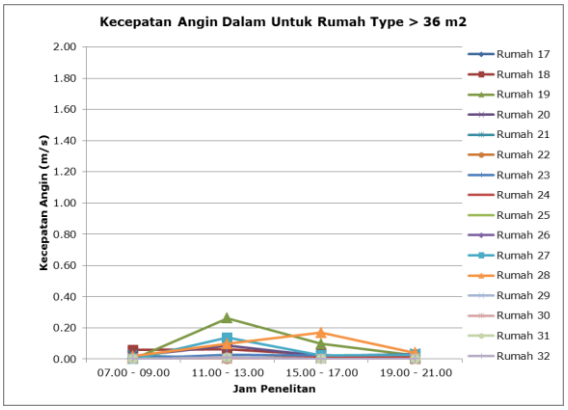
grafik perbandingan nilai kecepatan angin untuk masing-masing periode pengukuran dapat ditampilkan pada Gambar 9 untuk tipe ≤ 36 m^2, dan Gambar 10 untuk tipe ≤ 36 m^2.

Tabel 6. Data Kecepatan Angin Dalam Rumah

Kecepatan Angin Dalam (m/s)	Jam Penelitian			
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00
Rumah 1	0.00	0.09	0.04	0.03
Rumah 2	0.09	0.56	0.42	0.00
Rumah 3	0.00	0.01	0.00	0.01
Rumah 4	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 5	0.06	0.06	0.03	0.00
Rumah 6	0.06	0.06	0.03	0.00
Rumah 7	0.00	0.00	0.00	0.19
Rumah 8	0.00	0.00	0.00	0.19
Rumah 9	0.00	0.01	0.01	0.01
Rumah 10	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 11	0.09	0.56	0.42	0.00
Rumah 12	0.02	0.09	0.02	0.03
Rumah 13	0.00	0.26	0.10	0.03
Rumah 14	0.03	0.03	0.05	0.04
Rumah 15	0.03	0.00	0.00	0.00
Rumah 16	0.00	0.00	0.03	0.00
Rumah 17	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 18	0.06	0.06	0.03	0.00
Rumah 19	0.00	0.26	0.10	0.03
Rumah 20	0.02	0.09	0.02	0.03
Rumah 21	0.03	0.00	0.00	0.00
Rumah 22	0.00	0.00	0.03	0.00
Rumah 23	0.00	0.03	0.03	0.00
Rumah 24	0.00	0.00	0.01	0.01
Rumah 25	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 26	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 27	0.00	0.14	0.03	0.03
Rumah 28	0.02	0.10	0.17	0.04
Rumah 29	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 30	0.00	0.00	0.00	0.00
Rumah 31	0.00	0.01	0.00	0.00
Rumah 32	0.00	0.01	0.00	0.00



Gambar 9. Rata-Rata Kecepatan Angin Dalam Rumah tipe ≤ 36 m^2

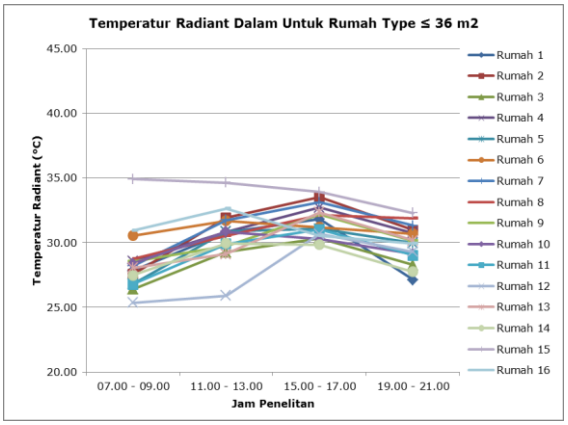


Gambar 10. Rata-Rata Kecepatan Angin Dalam Rumah tipe > 36 m^2

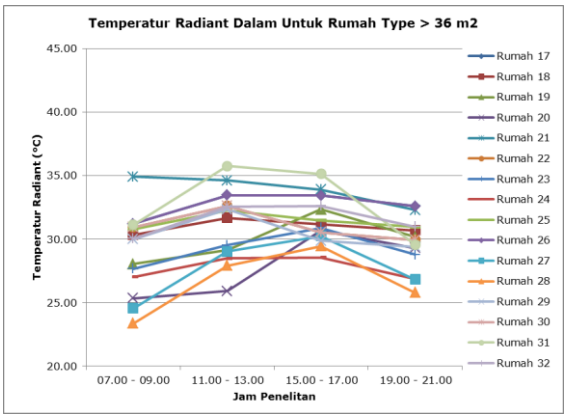
Pengukuran *glove temperature* dilakukan untuk mengetahui temperatur radiant di dalam tenda. Data rata-rata nilai *glove temperature* untuk setiap periode waktu pengukuran pada bagian dalam rumah dapat dilihat pada Tabel 7 dan grafik perbandingan nilai temperatur radiant untuk masing-masing periode pengukuran dapat ditampilkan pada Gambar 11 untuk tipe ≤ 36 m^2, dan Gambar 12 untuk tipe ≤ 36 m^2.

Tabel 7. Data Temperatur Radiant Dalam Rumah

Temperatur Radiant Dalam (°C)	Jam Penelitian			
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00
Rumah 1	27.84	30.76	31.82	27.12
Rumah 2	27.55	31.92	33.54	30.98
Rumah 3	26.41	29.26	30.33	28.28
Rumah 4	28.58	30.84	32.71	30.75
Rumah 5	26.80	30.88	31.06	29.98
Rumah 6	30.55	31.68	31.20	30.69
Rumah 7	28.19	31.75	33.11	31.31
Rumah 8	28.76	30.54	32.11	31.89
Rumah 9	28.55	29.76	32.18	30.14
Rumah 10	28.37	30.84	30.29	29.14
Rumah 11	26.78	29.89	31.02	29.02
Rumah 12	25.35	25.91	30.67	29.30
Rumah 13	28.04	29.14	32.35	30.18
Rumah 14	27.48	29.96	29.84	27.76
Rumah 15	34.92	34.64	33.91	32.30
Rumah 16	30.95	32.63	30.54	29.95
Rumah 17	31.20	33.46	33.45	32.59
Rumah 18	30.35	31.68	31.20	30.69
Rumah 19	28.04	29.14	32.35	30.18
Rumah 20	25.35	25.91	30.67	29.30
Rumah 21	34.92	34.64	33.91	32.30
Rumah 22	30.95	32.63	30.54	29.95
Rumah 23	27.69	29.53	30.89	28.79
Rumah 24	27.02	28.48	28.58	26.89
Rumah 25	30.76	32.27	31.50	30.98
Rumah 26	31.20	33.46	33.45	32.59
Rumah 27	24.56	29.05	30.26	26.83
Rumah 28	23.37	27.92	29.46	25.80
Rumah 29	30.01	32.36	29.89	29.42
Rumah 30	30.95	32.63	30.54	29.95
Rumah 31	31.15	35.76	35.14	29.59
Rumah 32	30.06	32.58	32.63	30.99



Gambar 11. Rata-Rata Temperatur Radiant Dalam Rumah tipe ≤ 36 m^2



Gambar 12. Rata-Rata Temperatur Radiant Dalam Rumah tipe > 36 m^2

Nilai PMV dihitung dengan menggunakan model yang dikembangkan oleh Fanger, dengan persamaan 1 sampai persamaan 4. Nilai PMV merupakan skala yang menunjukkan nilai kenyamanan termal yang dirasakan seseorang pada sebuah kondisi termal. Data-data yang telah didapatkan dari hasil pengukuran yaitu temperatur udara, temperature radiant, kelembaban udara, dan kecepatan angin.

Sementara untuk nilai resistansi pakaian dan tingkat aktivitas responden ditentukan berdasarkan kondisi responden pada saat penelitian. Jenis pakaian yang digunakan pada penghuni rumah berdasarkan kebiasaan sehari-hari adalah:

Insulasi Pakaian = *panties* + *bra* + *T-shirt* + *short shorts*

Sehingga dapat dihitung nilai resistansi pakainnya adalah :

= 0,03 + 0,01 + 0,08 + 0.06
= 0,18 clo

Nilai tingkat aktivitas yang digunakan pada perhitungan = 1, hal ini dikarenakan selama berada di rumah, penghuni rumah banyak menghabiskan waktu dirumah dengan duduk, membaca, ataupun menonton. Kegiatan tersebut nilai tingkat aktivitasnya adalah 1.

Untuk mempermudah perhitungan dan mengurangi resiko *human error*, maka perhitungan PMV dilakukan dengan kalkulator PMV yang dikembangkan oleh Luma Sense Technologies yang telah memenuhi standar ISO 7730, dan telah diakui secara resmi oleh ASHRAE.

Berdasarkan nilai PMV yang telah didapat untuk masing-masing tenda pada setiap periode waktu, maka dapat ditampilkan nilai PMV dan PPD rata-rata untuk masing-masing rumah pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Rekapitulasi Data Hasil Pengukuran PMV

Rumah	Jam Penelitian				Rata-rata PMV
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00	
Rumah 1	0.61	2.02	2.46	0.22	1.33
Rumah 2	0.36	1.68	2.55	1.74	1.58
Rumah 3	0.14	1.24	1.63	0.85	0.97
Rumah 4	0.43	1.74	2.56	1.55	1.57
Rumah 5	0.00	1.60	1.67	1.40	1.17
Rumah 6	1.92	2.27	2.07	1.94	2.05
Rumah 7	0.74	2.30	2.81	1.50	1.84
Rumah 8	1.00	1.84	2.36	1.87	1.77
Rumah 9	1.19	1.94	2.46	1.98	1.89
Rumah 10	0.81	2.09	1.91	1.13	1.49
Rumah 11	0.05	0.48	1.39	0.94	0.71
Rumah 12	-0.68	-0.28	2.19	0.96	0.55
Rumah 13	0.59	0.78	2.38	1.44	1.30
Rumah 14	0.37	1.81	1.50	0.45	1.04
Rumah 15	1.26	2.58	2.92	1.63	2.10
Rumah 16	1.28	2.10	1.79	1.21	1.59
Rumah 17	2.05	2.98	3.00	2.82	2.71
Rumah 18	1.86	2.27	2.07	1.94	2.04
Rumah 19	0.59	0.78	2.38	1.44	1.30
Rumah 20	-0.70	-0.21	2.19	0.94	0.56
Rumah 21	1.27	3.00	3.00	2.64	2.48
Rumah 22	1.27	2.10	1.79	1.21	1.59
Rumah 23	0.53	1.56	2.08	1.03	1.30
Rumah 24	0.26	0.97	1.10	0.15	0.62
Rumah 25	1.98	2.50	2.31	2.12	2.23
Rumah 26	2.05	0.00	3.00	2.82	1.97
Rumah 27	-0.92	1.12	1.75	0.18	0.54
Rumah 28	-1.42	0.76	1.23	-0.26	0.08
Rumah 29	1.60	2.42	1.53	1.38	1.73
Rumah 30	2.33	2.66	1.78	1.54	2.08
Rumah 31	1.95	3.00	3.00	1.92	2.47
Rumah 32	1.63	2.64	2.80	2.06	2.28

Perhitungan PMV dan PPD juga dilakukan berdasarkan jawaaban responden (*Individual Vote*) yang telah dilakukan sebelumnya dengan memberikan kuesioner yang berhubungan dengan kenyamanan termal. Perhitungan PMV berdasarkan hasil *individual vote* terlihat pada Tabel 10.

Tabel 9. Rekapitulasi Data Hasil Pengukuran PPD

Rumah	Jam Penelitian				Rata-rata PPD
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00	
Rumah 1	13.14	77.40	92.12	7.39	47.51
Rumah 2	10.14	59.33	92.68	63.68	56.46
Rumah 3	6.18	37.63	57.99	20.54	30.58
Rumah 4	9.58	63.35	94.39	53.52	55.21
Rumah 5	6.26	55.87	60.03	45.76	41.98
Rumah 6	72.29	86.61	79.56	73.89	78.09
Rumah 7	16.91	86.26	97.66	56.70	64.38
Rumah 8	26.50	68.17	81.64	66.02	60.58
Rumah 9	35.37	73.87	92.05	71.81	68.28
Rumah 10	20.35	79.32	72.12	32.31	51.03
Rumah 11	7.50	18.24	47.29	24.10	24.28
Rumah 12	15.39	14.93	83.62	24.88	34.70
Rumah 13	12.56	23.86	88.51	47.71	43.16
Rumah 14	8.56	66.39	51.28	12.36	34.64
Rumah 15	38.55	94.03	98.58	57.88	72.26
Rumah 16	39.70	80.56	66.32	36.00	55.65
Rumah 17	78.06	98.97	99.12	97.92	93.52
Rumah 18	69.36	86.61	79.56	73.89	77.36
Rumah 19	12.56	23.86	88.51	47.71	43.16
Rumah 20	15.61	12.10	83.62	24.44	33.94
Rumah 21	38.93	99.12	99.09	95.88	83.25
Rumah 22	39.54	80.56	66.32	36.00	55.61
Rumah 23	11.67	53.96	79.37	29.29	43.57
Rumah 24	6.60	25.40	30.48	5.94	17.10
Rumah 25	75.98	93.14	88.50	81.84	84.86
Rumah 26	77.93	0.00	99.12	97.92	68.74
Rumah 27	23.28	33.34	64.37	6.35	31.84
Rumah 28	46.70	21.06	38.35	7.36	28.37
Rumah 29	55.87	90.63	52.65	44.47	60.91
Rumah 30	86.94	93.87	66.18	53.30	75.07
Rumah 31	71.38	99.12	99.13	71.69	85.33
Rumah 32	57.77	95.76	97.69	78.68	82.48

Tabel 10. Rekapitulasi Hasil Kuesioner PMV

Unit Rumah	Jam Penelitian				Rata-rata	Sensasi Termal
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00		
Rumah 1	2	3	3	2	2.5	panas
Rumah 2	1	2	3	2	2	panas
Rumah 3	0	2	2	1	1.25	panas
Rumah 4	0	1	2	1	1	sedikit panas
Rumah 5	2	3	3	3	2.75	sedikit panas
Rumah 6	2	3	3	2	2.5	panas
Rumah 7	0	2	3	2	1.75	panas
Rumah 8	1	2	2	2	1.75	panas
Rumah 9	1	2	2	2	1.75	panas
Rumah 10	1	2	2	1	1.5	panas
Rumah 11	-1	0	1	1	0.25	sedikit panas
Rumah 12	-1	0	2	1	0.5	sedikit panas
Rumah 13	0	1	2	2	1.25	panas
Rumah 14	1	2	2	0	1.25	panas
Rumah 15	1	3	3	2	2.25	sangat panas
Rumah 16	1	2	2	1	1.5	panas
Rumah 17	2	3	3	2	2.5	sangat panas
Rumah 18	2	2	2	2	2	panas
Rumah 19	0	1	2	1	1	sedikit panas
Rumah 20	-1	0	2	1	0.5	sedikit panas
Rumah 21	2	3	3	3	2.75	sangat panas
Rumah 22	1	3	2	2	2	panas
Rumah 23	1	2	2	1	1.5	panas
Rumah 24	0	1	1	0	0.5	sedikit panas
Rumah 25	2	3	2	2	2.25	sangat panas
Rumah 26	2	3	3	2	2.5	sangat panas
Rumah 27	-1	1	2	0	0.5	sedikit panas
Rumah 28	-1	1	1	0	0.25	sedikit panas
Rumah 29	2	2	2	1	1.75	panas
Rumah 30	2	3	2	2	2.25	sangat panas
Rumah 31	2	3	3	2	2.5	sangat panas
Rumah 32	2	3	1	2	2	panas

Tabel 11. Rekapitulasi Hasil Kuesioner PPD

Unit Rumah	Jam Penelitian				Rata-rata	Persentase
	07.00-09.00	11.00-13.00	15.00-17.00	19.00-21.00		
Rumah 1	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 2	0	0	1	1	0.5	50%
Rumah 3	0	0	0	0	0	0%
Rumah 4	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 5	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 6	1	1	1	1	1	100%
Rumah 7	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 8	0	1	1	1	0.75	75%
Rumah 9	0	1	1	1	0.75	75%
Rumah 10	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 11	0	0	0	0	0	0%
Rumah 12	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 13	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 14	0	1	0	0	0.25	25%
Rumah 15	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 16	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 17	1	1	1	1	1	100%
Rumah 18	1	1	1	1	1	100%
Rumah 19	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 20	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 21	0	1	1	1	0.75	75%
Rumah 22	0	1	1	0	0.5	50%
Rumah 23	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 24	0	0	0	0	0	0%
Rumah 25	1	1	1	1	1	100%
Rumah 26	1	1	1	1	1	100%
Rumah 27	0	0	1	0	0.25	25%
Rumah 28	0	0	0	0	0	0%
Rumah 29	1	1	1	0	0.75	75%
Rumah 30	1	1	1	0	0.75	75%
Rumah 31	1	1	1	1	1	100%
Rumah 32	1	1	1	1	1	100%

Sedangkan hasil perhitungan PPD *individual vote* untuk masing-masing rumah dapat dilihat pada Tabel 11. Hasil yang didapat dari PMV dan PPD model selanjutnya dibandingkan dengan hasil PMV dan PPD kuesioner *individual vote* yang dirasakan oleh penghuni rumah terhadap kenyamanan termal yang mereka rasakan, sebagai instrument validasi dari keabsahan model yang digunakan. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 12.

Dari hasil pengujian yang dilakukan dengan menggunakan SPSS dengan uji Tanda (*Sign*) hasil uji beda antara PMV hitung dengan PMV *individual vote* maka didapat nilai Sig. adalah 0.860 > dari nilai α 0.05 artinya H_0 diterima maka tidak ada perbedaan yang signifikan antara nilai PMV hitung dengan nilai PMV *individual vote*.

Sedangkan dari hasil uji beda antara PPD hitung dengan PPD *individual vote* didapat nilai Sig. adalah 0.112 > dari nilai α 0.05 artinya H_0 diterima maka tidak ada perbedaan yang signifikan antara nilai PPD hitung dengan nilai PPD *individual vote*.

Tabel 12. Perbandingan Kenyamanan Termal pada 32 Unit Rumah di Batam.

Unit Rumah	PMV		PPD	
	Hitung	*Individual Vote*	Hitung	*Individual Vote*
Rumah 1	0.00	2.50	0.00	50
Rumah 2	0.00	2.00	0.00	50
Rumah 3	0.00	1.25	0.00	0
Rumah 4	0.00	1.00	0.00	50
Rumah 5	0.00	2.75	0.00	25
Rumah 6	0.00	2.50	0.00	100
Rumah 7	0.00	1.75	0.00	50
Rumah 8	0.00	1.75	0.00	75
Rumah 9	0.00	1.75	0.00	75
Rumah 10	0.00	1.50	0.00	50
Rumah 11	0.00	0.25	0.00	0
Rumah 12	0.00	0.50	0.00	25
Rumah 13	0.00	1.25	0.00	25
Rumah 14	0.00	1.25	0.00	25
Rumah 15	0.00	2.25	0.00	50
Rumah 16	0.00	1.50	0.00	50
Rumah 17	0.00	2.50	0.00	100
Rumah 18	0.00	2.00	0.00	100
Rumah 19	0.00	1.00	0.00	25
Rumah 20	0.00	0.50	0.00	25
Rumah 21	0.00	2.75	0.00	75
Rumah 22	0.00	2.00	0.00	50
Rumah 23	0.00	1.50	0.00	25
Rumah 24	0.00	0.50	0.00	0
Rumah 25	0.00	2.25	0.00	100
Rumah 26	0.00	2.50	0.00	100
Rumah 27	0.00	0.50	0.00	25
Rumah 28	0.00	0.25	0.00	0
Rumah 29	0.00	1.75	0.00	75
Rumah 30	0.00	2.25	0.00	75
Rumah 31	0.00	2.50	0.00	100
Rumah 32	0.00	2.00	0.00	100

Tidak adanya perbedaan yang signifikan antara PMV dan PPD hitung dengan PMV dan PPD *individual vote* menunjukan bahwa model kenyamanan termal yang diwakili oleh persamaan PMV dan PPD cukup valid dalam memprediksikan kenyamanan termal yang dirasakan oleh pengguna ruangan. PMV rata-rata yang diperoleh melalui perhitungan 1,52 dan melalui kuesioner termal adalah 1,70. Sedangkan nilai PPD hitung dan PPD individual vote adalah 55,74 % dan 47,65%.

Hal ini menunjukan bahwa saat dilakukan pengukuran, penghuni merasakan kondisi termal yang cukup panas. Pengukuran dilakukan pada saat rumah dikondisikan dengan ventilasi natural. Untuk meningkatkan kenyamanan termal yang lebih baik, pada umumnya penghuni rumah memanfaatkan ventilasi mekanis berupa kipas angin dan *air conditioner* (AC). Dengan hasil PMV dan PPD yang diperoleh dalam penelitian ini, dan dengan struktur dan/atau model tipe rumah yang diobservasi selama penelitian ini, maka sulit sekali memperoleh kenyamanan termal yang diharapkan oleh pengguna tanpa penggunaan ventilasi mekanis. Oleh karena itulah hampir disemua rumah deret yang ditemukan di Kota Batam terdapat AC atau minimal kipas angin terpasang sebagai bentuk kompensasi ketidaknyamanan.

Dalam penelitian ini ada 32 rumah yang diteliti dan 32 rumah tersebut memiliki struktur fisik bangunan yang berbeda sehingga memberikan faktor kenyamanan yang berbeda pula. Meskipun secara umum nilai PMV yang diperoleh sebesar 1,53, namun perlu dievaluasi beberapa karakteristik rumah yang memiliki nilai PMV mendekati netral (0). Tujuannya adalah agar diperoleh sejumlah alternatif yang dapat dijadikan rujukan dalam menyusun pola-pola struktur rumah yang mampu meningkatkan kenyaman termal pengguna. Dalam penelitian ini 32 rumah tersebut dapat dikelompokan berdasarkan luas lantai bangunan. Variabel luas lantai ini menjadi faktor kontrol dalam penelitian ini karena pada kenyataannya dalam pembangunan rumah deret, pembeli tidak memiliki kebebasan dalam menentukan luas lantai dari rumah yang akan dibeli, tapi ditentukan oleh pengembang atau kontraktor berdasarkan luas lahan dan harga jual. Dengan pertimbangan ini, maka dalam penelitian ini, pengembangan model karakteristik rumah dalam rangka meningkatkan kenyamanan termal penghuni dilakukan berdasarkan luas lantai bangunan. Luas lantai yang paling umum dikembangkan oleh pengembang/developer adalah tipe rumah dengan luas lantai ≤ 36 m^2 dan > 36 m^2. Sedangkan variable lainnya yaitu tinggi plafon, bahan bangunan, banyak bukaan dan orientasi dapat disesuaikan dan dikombinasikan yang mana nilai optimum dari kombinasi variable tersebut disusun berdasarkan nilai PMV yang diperoleh dari hasil penelitian ini.

Rumah 1 sampai dengan Rumah 16 merupakan kelompok rumah yang memiliki luas lantai ≤ 36 m^2, sedangkan Rumah 17 sampai dengan Rumah 32 merupakan kelompok rumah yang memiliki luas lantai > 36 m^2. Nilai PMV secara hitung diambil dari 3 rumah yang memiliki nilai PMV mendekati nilai 0 (netral) dari masing-masing kelompok rumah terlihat pada Tabel 13 untuk kelompok rumah yang memiliki luas lantai ≤ 36 m^2 dan Tabel 14 untuk kelompok rumah yang memiliki luas lantai > 36 m^2.

Karakteristik dari ketiga rumah yang memiliki nilai PMV yang mendekati 0 (netral) ini akan didiskusikan berikut ini:

1. Material Bangunan

   Dari Tabel 11 ataupun Tabel 12 terlihat bahwa untuk kedua kelompok rumah maka variabel jenis material dinding juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan kenyamanan termal penghuni. Dari ke tiga rumah yang memiliki nilai PMV terkecil, ketiga tiganya memiliki material dinding

yang terbuat dari bata. Pemilihan bahan yang sesuai, membantu membuat ruangan menjadi lebih sejuk dikarenakan kemampuan material dinding yang lebih lama dalam melepaskan panas yang diterima dari luar. Bata merah yang umum di pakai di Indonesia sebagai bahan penyusun dinding rumah deret, memiliki *thermal transmittance*/penghantar panas yang lebih kecil dibanding material dinding lainnya seperti low-brick, dimana nilainya 1.52 W/m^{o}C untuk bata merah dan 2.55 W/m^{o}C untuk low brick/bataco [8]. Sehingga panas yang diterima oleh bata merah ini melalui dinding bagian luar lebih lambat dan membutuhkan waktu yang lama untuk bisa mencapai dinding bagian dalam rumah.

Akibatnya, temperatur nyaman di dalam rumah dapat dipertahankan lebih lama jika menggunakan bata merah dibandingkan penggunaan material lain seperti low-brick. Jadi sangat disarankan dalam pembangunan rumah yang mempertimbangkan aspek kenyamanan penghuni, pemilihan bata merah atau material lainnya yang memiliki nilai penghantar panas yang lebih kecil sangat direkomendasikan untuk area dinding dan atap karena pada area inilah paparan panas paling banyak diterima selama waktu siang hari.

Tabel 13. Kelompok Rumah dengan Luas Lantai ≤ 36 m^2 dengan Nilai PMV Mendekati 0 (Netral)

Karakteristik Rumah	Rumah 3	Rumah 11	Rumah 12
Luas Lantai Bangunan	≤ 36 m^2	≤ 36 m^2	≤ 36 m^2
Tinggi Dinding	≤ 3m	> 3m	> 3m
Bahan Bangunan	bata	bata	bata
Jumlah Bukaan	>20%*LLB	>20%*LLB	>20%*LLB
Orientasi	timur/barat	timur/barat	utara/selatan
Nilai PMV	**0.97**	**0.71**	**0.55**

Tabel 14. Kelompok Rumah dengan Luas Lantai > 36 m^2 dengan Nilai PMV Mendekati 0 (Netral)

Karakteristik Rumah	Rumah 20	Rumah 27	Rumah 28
Luas Lantai Bangunan	> 36 m^2	> 36 m^2	> 36 m^2
Tinggi Dinding	≤ 3m	> 3m	> 3m
Bahan Bangunan	bata	bata	bata
Jumlah Bukaan	>20%*LLB	>20%*LLB	>20%*LLB
Orientasi	utara/selatan	timur/barat	utara/selatan
Nilai PMV	**0.56**	**0.54**	**0.08**

2. Area Bukaan

   Variable kedua yang memberikan pengaruh terhadap besarnya panas yang dirasakan didalam bangunan adalah jumlah bukaan. Dari Tabel 11 dan Tabel 12 terlihat bahwa untuk kedua kelompok rumah maka variabel luas bukaan menjadi faktor penting dalam meningkatkan kenyamanan termal penghuni. Dari ke tiga rumah yang memiliki nilai PMV mendekati 0 (netral), ketiga tiganya memiliki luas bukaan > 20% dari luas lantai.

   Jumlah bukaan ventilasi pada bangunan berperan penting dalam memberikan rasa nyaman dan sehat bagi para penghuni bangunan. Ventilasi diperlukan untuk menyediakan oksigen ke dalam ruang, untuk pertukaran udara di dalam ruang dan untuk menukar udara kotor (udara polusi) yang termasuk di dalamnya karbon dioksida dan bau ruangan. Ventilasi juga berfungsi untuk mempertahankan kualitas udara yang baik dan sejuk di dalam ruangan dengan mengeluarkan udara-udara kotor yang kemudian digantikan dengan udara bersih yang masuk dari luar ruangan.

   Sebagai fungsi tambahan, ventilasi digunakan untuk pendingin udara alami dan (biasanya di rumah-rumah) menyediakan oksigen yang cukup. Sistem ventilasi yang baik berperan penting dalam kenyamanan dan kesehatan pengguna bangunan. Sehingga semakin besar ukuran luas bukaan (ventilasi) maka akan semakin baik terhadap pertukaran udara didalam rumah. Luas bukaan (jendela, ventilasi dan pintu yang berhadapan dengan ruang luar) dimana berdasarkan syarat-syarat minimum luas bukaan dalam SNI Departemen Pekerjaan Umum bahwa, sebuah ruang pada rumah tinggal harus memiliki ventilasi tidak kurang dari 5% dari luas lantai ruangan dan jendela 20% dari luas lantai ruangan.

3. Tinggi Plafon

   Variable ketiga yang memberi pengaruh cukup besar terhadap kenyamanan termal ruangan adalah tinggi plafon. Dari Tabel 13 dan Tabel 14 juga terlihat bahwa untuk kedua kelompok rumah maka variabel tinggi plafon juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan kenyamanan termal penghuni.

   Dari ke tiga rumah yang memiliki nilai PMV mendekati 0 (netral), dua rumah memiliki tinggi plafon > 3. Sehingga tinggi plafon memberi pengaruh cukup besar terhadap kenyamanan termal ruangan. Plafon *rumah* sebaiknya memiliki ketinggian minimal 3 meter dari lantai. Dengan ketinggian tersebut volume ruangan akan lebih besar dan akan membantu meningkatkan sirkulasi udara yang lebih baik, sehingga akumulasi

udara panas yang berada di area sekitar plafon tidak diteruskan lagi ke dalam ruangan di bawahnya. Akan lebih baik lagi jika ruangan antara plafon dan atap yang biasa juga disebut loteng (*attic*) memiliki area bukaan/ventilasi yang cukup untuk membuang panas yang terakumulasi di daerah ini ke udara luar. Karena udara yang panas yang terkurung di area loteng, akan mudah diteruskan ke area ruang duduk melalui material plafon seperti eternit, GRC, dan lain-lain. Sehingga semakin tinggi jarak plafon dari lantai, maka akan semakin baik kenyamanan termal dalam ruangan asalkan faktor-faktor pendukung kenyamanan termal lainnya juga diperhatikan.

4. Orientasi Bangunan

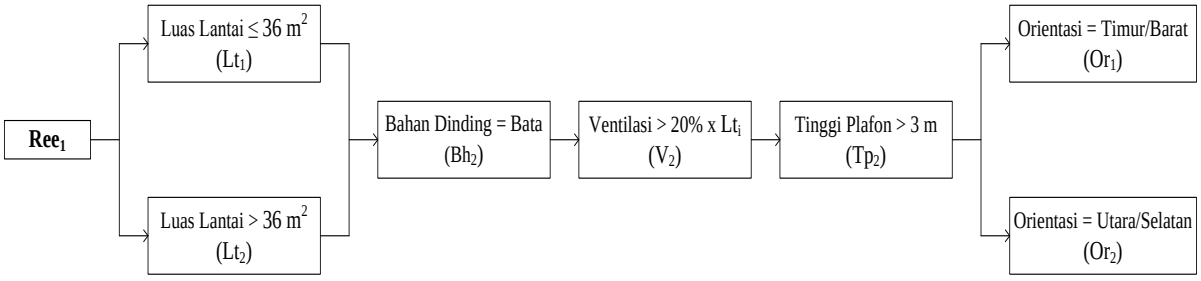
   Dari Tabel 13 terlihat bahwa untuk luas lantai bangunan ≤ 36 m^2 pada Rumah 3 dan Rumah 11 memiliki orientasi Timur/Barat dan Rumah 12 memiliki orientasi Utara/Selatan. Pada penelitian ini, meskipun Rumah 3 dan Rumah 11 memiliki orientasi Timur/Barat, tapi karena ada parameter lain yang digunakan oleh pemilik rumah untuk memblokir radiasi panas langsung dari matahari yaitu ketersediaan canopy (*Shading*). Jika dibandingkan nilai PMV Rumah 11 dan Rumah 12 yang memiliki karakteristik struktur rumah yang sama, maka Rumah 12 yang memiliki orientasi Utara/Selatan memperoleh nilai PMV yang lebih baik dibanding Rumah 3 dan Rumah 11 yang berorientasi Timur/ Barat.
   Sedangkan pada Tabel 14 untuk luas lantai bangunan ≤ 36 m^2, 2 rumah memiliki orientasi Utara/Selatan dan satu rumah memiliki orientasi Timur/Barat. Dua rumah yang memiliki orientasi Utara/Selatan memiliki nilai PMV yang rendah khususnya pada Rumah 28 yang memiliki nilai PMV paling rendah yaitu 0.08, sehingga terlihat bahwa orientasi juga berpengaruh terhadap kenyamanan termal ruangan.

   Orientasi bangunan menentukan berapa lama dan seberapa besar intensitas matahari yang menyinari bangunan rumah yang nantinya akan berdampak kepada perpindahan panas radiasi dari dinding dan atap rumah ke udara di dalam ruangan. Bangunan yang memiliki orientasi Utara/Selatan menerima intensitas matahari pada dinding dalam jumlah yang lebih sedikit dibanding orientasi Timur/Barat, terutama di waktu pagi dan sore hari. Dengan orientasi ini, maka intensitas panas yang dilepaskan oleh dinding rumah di malam hari ke area ruang di dalam rumah juga lebih sedikit. Oleh karena itu, orientasi Utara/Selatan lebih direkomendasikan sebagai orientasi rumah yang lebih baik karena waktu paparan sinar matahari terhadap hadapan ini lebih pendek sehingga panas yang tersimpan di dinding dan atap bangunan tidak sebesar jika rumah memiliki orientasi Timur/Barat.

Dari keempat variable yang mempengaruhi kenyamanan termal dalam rumah, maka tinggi plafon, area bukaan, dan bahan/material dinding rumah menjadi faktor utama yang perlu diperhatikan dalam membangun rumah yang berkonsep ergo-ekologi, yaitu rancangan rumah yang memberikan tingkat kenyamanan termal yang lebih baik. Sedangkan variable terakhir yaitu orientasi rumah merupakan faktor masih bisa diterima seandainya tidak tersedia pilihan untuk memiliki hadapan Utara/Selatan, karena variable orientasi bangunan ini masih dapat disiasati dengan berbagai teknik arsitektur seperti pemasangan canopy, penanaman pohon disekitaran rumah untuk mengurangi radiasi panas matahari yang mengenai area dinding rumah.

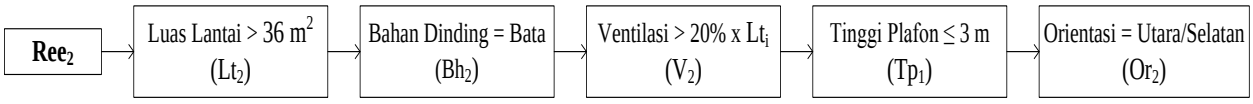
Dari masing-masing kelompok rumah yang memiliki nilai PMV yang mendekati 0 (netral) maka dapat dikembangkan model untuk menyusun kriteria rumah berkonsep ergo-ekologi sebagai berikut:

1. Model Persamaan 1



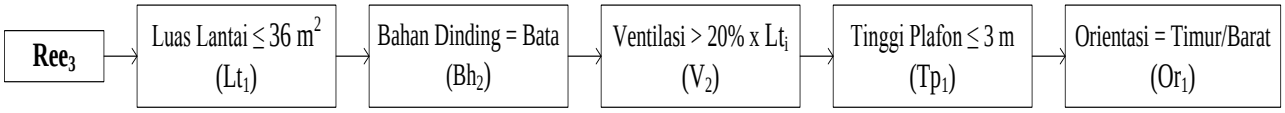
$$\mathbf{Ree_1 = f\{Lt_i, Bh_1, V_2, Tp_2, Or_i\}} \quad (1)$$

2. Model Persamaan 2



$$\mathbf{Ree_2 = f\ \{Lt_2, Bh_1, V_2, Tp_1, Or_2\}} \quad (2)$$

3. Model Persamaan 3



$$\mathbf{Ree_3 = f\ \{Lt_1, Bh_1, V_2, Tp_1, Or_1\}} \quad (3)$$

Dimana,
Ree = Rumah dengan konsep ergoekologi
Lt_i = Luas lantai, i = 1,2
Lt_1 = Luas lantai ≤ 36 m^2
Lt_2 = Luas lantai > 36 m^2
Bh_i = Bahan dinding rumah, i = 1,2
Bh_1 = Jenis material yang memiliki nilai perpindahan panas ≤ 1.52 W/m^{o}C
Bh_2 = Jenis material yang memiliki nilai perpindahan panas > 1.52 W/m^{o}C
V_i = Ventilasi/area bukaan, i = 1,2
V_1 = Area bukaan ≤ 20% x Lt_i
V_2 = Area bukaan > 20% x Lt_i
Tp_i = Tinggi plafon, i = 1,2
Tp_1 = Tinggi plafon ≤ 3 m
Tp_2 = Tinggi plafon > 3 m
Or_i = Orientasi rumah, i = 1,2
Or_1 = hadap Timur/Barat
Or_2 = hadap Utara/Selatan

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan nilai PMV (*Predicted Mean Vote*) dan PPD (*Predicted Persentage of Dessatisfied*) yang dihitung melalui model persamaan dengan nilai PMV dan PPD yang diperoleh melalui kuesioner termal *individual vote* menunjukan tidak terdapat perbedaan secara statistik dari kedua perhitungan tersebut. Artinya PMV dan PPD model yang digunakan dalam penelitian ini dapat dinilai valid untuk mengukur kenyamanan termal penghuni rumah deret di Kota Batam.
2. Secara keseluruhan untuk 32 rumah yang diteliti, nilai rata-rata PMV (*Predicted Mean Vote*) yang diperoleh dari pengujian adalah 1.52 artinya kondisi termal yang dirasakan oleh penghuni rumah cenderung panas. Sedangkan untuk nilai rata-rata PPD (*Predicted Persentage of Dessatisfied*) hasil yang diperoleh adalah 55.74%. Hasil ini menunjukan bahwa dengan kondisi struktur rumah yang diobservasi selama penelitian dan dengan tanpa menggunakan ventilasi mekanis, maka diperkirakan 50% penghuni rumah merasakan ketidaknyamanan dengan kondisi termal yang ada. Dengan hasil temuan ini, secara umum sangat sulit untuk memperoleh kenyamanan termal dengan rancangan rumah deret saat ini yang dibangun oleh pengembang/developer di Kota Batam. Akibatnya pemakaian ventilasi mekanis seperti *Air Conditioner* (AC) yang membutuhkan energy listrik yang besar menjadi pilihan yang sulit dihindari.
3. Dari 32 rumah yang diobservasi, dikelompokan menjadi dua bagian utama berdasarkan luas lantai (LT), yaitu rumah dengan LT ≤ 36 m^2 dan LT > 36 m^2. Kriteria luas lantai dijadikan faktor kontrol karena variable ini bersifat tetap, dibatasi oleh luas lahan, tipe rumah dan harga rumah, oleh karena itu sulit untuk dikendalikan. Sedangkan variable lainnya yang masih bisa diubah dan dikendalikan dalam mewujudkan kenyamanan termal hunian adalah Tinggi Plafon (Tp), Area Bukaan (V), Material Dinding (Bh) dan Orientasi (Or).
4. Analisis lebih dalam dilakukan terhadap sejumlah rumah deret yang memiliki nilai PMV terkecil atau mendekati nilai 0 (netral). Nilai 0 dalam skala termal PMV menunjukan kondisi optimum yang diharapkan dapat dicapai dengan rancangan rumah saat ini, tanpa penggunaan ventilasi mekanis. Untuk

rumah yang memiliki luas lantai ≤ 36 m^2 didapatkan tiga rumah dengan nilai PMV terendah yang mendekati nilai 0 (netral) yaitu Rumah 3, 11 dan 12 dengan nilai PMV masing-masingnya 0.97, 0.71, dan 0.55. Sedangkan kelompok rumah yang memiliki luas lantai > 36 m^2 didapatkan tiga rumah dengan nilai PMV terendah yang mendekati nilai 0 (netral) yaitu Rumah 20 = 0.557, Rumah 27 = 0.535 dan Rumah 28 = 0.076.

5. Dari tiga rumah dari masing-masing kelompok berdasarkan luas lantai bangunan yang nilai PMV mendekati 0 (netral) maka variable yang mempengaruhi kenyaman termal adalah material dinding yang terbuat dari bata merah, area bukaan > 20% dari luas lantai, dan tinggi plafon > 3 m menjadi faktor utama yang perlu diperhatikan dalam membangun rumah yang berkonsep ergo-ekologi. Sedangkan variable terakhir yaitu orientasi rumah merupakan faktor masih bisa diterima seandainya tidak tersedia pilihan untuk memiliki hadapan Utara/Selatan, karena variable orientasi bangunan ini masih dapat disiasati dengan berbagai teknik arsitektur seperti pemasangan canopy, penanaman pohon disekitaran rumah untuk mengurangi radiasi panas matahari langsung yang mengenai area dinding rumah.
6. Dari hasil penelitian ini dapat dirumuskan model rancangan rumah deret dengan konsep ergo-ekologi yakni rancangan rumah yang diharapkan dapat memenuhi harapan kenyamanan termal penghuni dengan penggunaan energi yang minimal. Model yang diperoleh adalah:
   a. $R_{ee} = f \{Lt_i, Bh, V, Tp_2, Or_i\}$
   b. $R_{ee} = f \{Lt_2, Bh, V, Tp_1, Or_2\}$
   c. $R_{ee} = f \{Lt_1, Bh, V, Tp_1, Or_1\}$

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disarankan beberapa hal untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Melakukan evaluasi kenyamanan termal dengan mempertimbangkan variabel lain seperti orientasi area bukaan, jenis material dinding yang berbagai jenis, karakteristik bentuk rumah, dan aliran udara dalam ruangan.
2. Mempertimbangkan faktor individu lainnya selain insulasi pakaian dan aktivitas metabolic, seperti kemampuan adaptif dalam merespon kondisi termal lingkungan (*adaptive thermal comfort*).

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ronim, Azizah (2014). *Kajian Kenyaman Termal Pada Rumah Tinggal Dengan Model Innercourt*. Jurnal Arsitektur NALARs Volume 13 No 2: 73-88 Juli 2014.

[2] Sukarno, H. Matsumoto, L. Susanti, and R. Kimura (2015). *Urban Energy Consumption in a City of Indonesia.* General Overview. Vol. 5 No. 1: 360–373.

[3] Sindikia, Annise (2015). *Analisis Pengaruh Struktur Fisik Rumah Tinggal Dan Pemakaian Peralatan Listrik Terhadap Konsumsi Energi Listrik Sektor Rumah Tangga di Indonesia*. Skripsi Universitas Andalas, Padang.

[4] Balai Besar Teknologi Energi BPPT (2012). *Perencanaan Efisiensi dan Elestisitas Energi 2012*. Jakarta: BPPT.

[5] Garcia, Acosta (2014). *Ergoecology: Fundamentals of a New Multidisciplinary field*. Taylor and Francis. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2014.

[6] Garcia, Acosta (2012). *Ergoecology: Evolution and Challenges*. IOS Press. DOI: 10.3233/WOR-2012-1017-2133.

[7] Udrea, Ioana. et al (2016). *Thermal Comfort in a Romanian Passive House: Preliminary Results*. Science Direct. Energy Procedia 85 (2016) 575-583.

[8] ASHRAE. Handbook of Fundamental Chapter 8. *Physiological Principles, Comfort, and Health ASHRAE.* USA. 1989.

[9] L. Susanti. et al. 2007. *A Laboratory Experiment On Natural Ventilation Through A Roof Cavity For Reduction Of Solar Heat Gain.* Science Direct. Energy and Buildings xxx (2008) xxx-xxx.

[10] M.N.F. Alfata. et al (2015). *Field Investigation Of Indoor Thermal Environments In Apartments Of Surabaya, Indonesia: Potential Passive Cooling Strategies For Middle-Class Apartments.* Energy Procedia 78 (2015) 2947-2952.

[11] Widjayanti (2007). *Profil Konsumsi Energi Listrik pada Hunian Rumah Tinggal Studi Kasus Rumah Desain Minimalis Ditinjau dari Aspek Pencahayaan Minimalis.* Jurnal Ilmiah Perancangan Kota dan Permukiman.

[12] H. Frick (2008). *Ilmu Fisika Bangunan, Seri Kontruksi Arsitektur 8.* Yogyakarta: Penerbit Kanisius.