

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN MANDIRI



**Analisis Desain Atap Perumahan di Kota Gorontalo yang Dapat
Memaksimalkan Potensi PLTS Atap**

Tim Peneliti

Ketua : Abdi Gunawan Djafar, S.T., M.T. / 0023038703

Anggota : Niniek Pratiwi, S.T., M.T / 0020048804

Rahmayanti, S.T., M.T. / 0923088703

Nur Mutmainnah, S.T., M.Ars. / 0012039106

JURUSAN TEKNIK ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI GORONTALO
NOVEMBER 2023

**HALAMAN PENGESAHAN
PENELITIAN PENELITIAN MANDIRI SEMESTER GANJIL**

Judul Kegiatan : Analisis Desain Atap Perumahan di Kota Gorontalo yang Dapat Memaksimalkan Potensi PLTS Atap

KETUA PENELITIAN

A. Nama Lengkap : Abdi Gunawan Djafar, S.T., M.T.
B. NIDN : 0023038703
C. Jabatan Fungsional : Lektor
D. Program Studi : S1 Teknik Arsitektur
E. Nomor HP : 085240637202
F. Email : abdi_djafar@ung.ac.id

ANGGOTA PENELITIAN (1)

A. Nama Lengkap : Niniek Pratiwi, S.T., M.T.
B. NIDN : 0020048804
C. Perguruan Tinggi : UNIVERSITAS NEGERI GORONTALO

ANGGOTA PENELITIAN (2)

A. Nama Lengkap : Nur Mutmainnah, S.T. M.Ars.
B. NIDN : 0012039106
C. Perguruan Tinggi : UNIVERSITAS NEGERI GORONTALO

ANGGOTA PENELITIAN (3)

A. Nama Lengkap : Rahmayanti, S.T., M.T.
B. NIDN : 0923088703
C. Perguruan Tinggi : UNIVERSITAS NEGERI GORONTALO

Lama Penelitian Keseluruhan : 1 tahun
Penelitian Tahun Ke : 1
Biaya Penelitian Keseluruhan : Rp 1.000.000,-
Biaya Tahun Berjalan : - Diusulkan Ke Lembaga : Rp 1.000.000,-
- Dana Internal PT : -
- Dana Institusi Lain : -



Gorontalo, 7 November 2023
Ketua Peneliti,

(Abdi Gunawan Djafar, S.T., M.T.)
NIP/NIK. 198703232019031011

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
RINGKASAN.....	ii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Urgensi Penelitian.....	2
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	3
2.1 Atap Sebagai Tempat Peletakan PLTS.....	3
2.2 Atap Bangunan Perumahan	4
2.3 Road Map Penelitian	6
BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN.....	7
3.1 Tujuan Penelitian	7
3.2 Manfaat Penelitian.....	7
BAB IV METODE PENELITIAN.....	8
4.1 Metode Penelitian.....	8
4.2 Tahapan Penelitian.....	9
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	11
5.1 Hasil Simulasi.....	11
5.1.1 Simulasi Atap Pelana Bersusun	11
5.1.2 Simulasi Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras.....	17
5.1.3 Simulasi Atap Pelana-Perisai.....	23
5.2 Pembahasan Hasil Penelitian.....	29
BAB VI KESIMPULAN	32
6.1 Kesimpulan.....	32
DAFTAR PUSTAKA	33

RINGKASAN

Permintaan pemasangan PLTS Atap di sektor rumah tangga saat ini telah meningkat. PLTS Atap dipasang pada atap bangunan rumah. Bangunan rumah pada perumahan umumnya memiliki desain atap yang tipikal. Salah satu faktor yang memengaruhi besar produksi energi dari PLTS Atap adalah desain atap itu sendiri. Untuk dapat mengetahui besar potensi energi yang dapat dihasilkan maka diperlukan penelitian mengenai besaran radiasi sinar Matahari yang didapatkan oleh atap perumahan. Radiasi sinar matahari yang jatuh pada atap akan dipengaruhi oleh bentuk atap dan arah hadap bidang atap. Salah satu bentuk atap yang ditemukan di perumahan adalah bentuk atap bertingkat yang memungkinkan terjadinya efek peneduhan sendiri (self-shading). Hal ini dapat mengurangi perolehan radiasi panas pada atap. Selain itu desain atap juga dapat memengaruhi jumlah panel surya yang dapat menempati bidang atap. Penelitian ini akan dilakukan dengan metode simulasi menggunakan program Rhinoceros 3D. Objek simulasi adalah model atap perumahan yang ditemukan di kota Gorontalo. Simulasi memasukkan data cuaca Gorontalo sebagai faktor iklim yang memengaruhi besar radiasi pada atap. Hasil penelitian diharapkan dapat menemukan desain atap perumahan yang dapat memaksimalkan potensi PLTS Atap.

Kata Kunci: Desain Atap, Gorontalo, Perolehan Radiasi Matahari, Perumahan, PLTS Atap

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Target bauran energi baru terbarukan pada bauran energi nasional tahun 2025 adalah 23%, sementara pada tahun 2020 bauran energi baru terbarukan yang tercapai hanya sebesar 11,20% [1]. Peningkatan pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global ini sejalan dengan target SDGs yang ke 7. Untuk meningkatkan minat masyarakat terhadap pemasangan PLTS yaitu panel surya pada atap diterbitkanlah Permen ESDM No. 26 tahun 2021 dengan ketentuan ekspor listrik hingga 100% sebagai salah satu daya tariknya. Panel surya pada atap dapat dipasang baik pada bangunan besar hingga bangunan kecil. Pemasangan pada bangunan besar jauh lebih mudah dibandingkan dengan pada bangunan kecil seperti rumah, disebabkan oleh bidang atapnya yang luas. Pada bangunan kecil seperti rumah ataupun perumahan, akan perlu pertimbangan yang lebih dalam perencanaan pemasangannya.

Panel surya pada perumahan dapat memenuhi kebutuhan energi listrik untuk memberikan daya pada komputer, pompa, lampu, dan banyak peralatan elektronik lainnya. Energi terbarukan akan membantu orang-orang yang bekerja dari rumah (Working from Home), pekerja lepas (freelancer) yang bekerja jarak jauh, perusahaan-perusahaan start-up kecil, UMKM berbasis rumah, hingga kebutuhan harian pada umumnya. Permintaan pemasangan PV untuk sektor rumah tangga di Indonesia telah bertambah banyak. PLN melaporkan mulai dari akhir tahun 2018 hingga November 2021, jumlah pemasang panel surya atap meningkat lebih dari 7 kali lipat hingga 4500. Saat ini sudah terpasang 44 MW dari angka sebelumnya 1,5 MW [2]. Beberapa alasan yang mempengaruhi peningkatan penggunaan panel surya pada bangunan hunian di Indonesia antara lain 1. Tetangga-tetangga yang mulai memasang panel surya di atap, 2. Kepedulian terhadap lingkungan, 3. Panel surya menjadi tren teknologi yang sedang naik daun [3].

Perumahan memiliki berbagai desain yang berbeda-beda. Perbedaan desain ini ditujukan untuk memberikan penampilan yang bervariasi dan tidak monoton. Salah satu perbedaan dalam desain terletak pada bentuk atap perumahan. Bentuk atap yang berbeda-beda akan memengaruhi potensi produksi energi dari panel surya. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal, yang pertama adalah efek peneduhan sendiri (self-shading), dan yang kedua adalah

bentuk bidang atap yang tidak beraturan sehingga membatasi panel surya yang berbentuk persegi panjang untuk menempati bidang persegi panjang.

Penelitian ini akan menganalisis desain atap perumahan eksisting yang sesuai untuk pemasangan panel surya serta dapat memberikan produksi energi yang maksimal. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi arahan dalam menempatkan panel surya khususnya pada atap perumahan yang menjadi studi kasus dalam penelitian ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

- Bagaimana bentuk atap perumahan yang mendapatkan radiasi Matahari tinggi dan sesuai untuk pemasangan panel surya?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang tersebut maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan bentuk atap perumahan yang memperoleh radasi Matahari yang tinggi dan sesuai untuk pemasangan panel surya

1.4 Urgensi Penelitian

Penelitian ini mengulas beberapa atap yang ditemukan di banyak perumahan kota Gorontalo dan meneliti bagaimana potensinya ketika dipasangkan panel surya. Hasil penelitian akan diperlukan bagi masyarakat yang ingin memasang panel surya pada bangunan perumahannya.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Atap Sebagai Tempat Peletakan PLTS

Berbagai penelitian mengkaji atap sebagai tempat peletakan PLTS Atap. Berbagai variabel penelitian dipertimbangkan untuk menganalisis atap yang telah ada untuk dipersiapkan dalam pemasangan panel surya. Tujuannya agar panel surya yang dipasang pada atap dapat memproduksi energi listrik dengan optimal. Variabel-variabel pada atap yang dapat dipertimbangkan antara lain bentuk atap, dan bentuk bidang atap. Atap bangunan dapat berupa atas atap datar dan atap miring. Pada bangunan berlantai banyak, atapnya berupa bidang datar yang merupakan tempat peletakan fungsi-fungsi utilitas bangunan seperti tangki air, mesin pengkondisian udara, mesin lift, dan tempat pendaratan helikopter. Atap pada bangunan berlantai banyak ini cukup luas sehingga dapat digunakan untuk meletakkan panel surya.

Penelitian mengenai panel surya pada atap datar ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan berbagai pendekatan. Barbón et al, menemukan algoritma umum untuk mengoptimalkan pemasangan panel surya pada atap datar dengan bentuk tidak beraturan. Selain bentuk tidak beraturan, algoritma tersebut juga memasukkan pertimbangan seperti efek peneduhan sendiri oleh bagian-bagian pada atap, dan beberapa variabel penting [4]. Yang dimaksud dengan bentuk tidak beraturan adalah bentuk denah ruang teratas bangunan yang merupakan bentuk segi banyak. Pada bentuk segi banyak, akan timbul berbagai variasi dalam meletakkan rangkaian panel surya. Pembuatan algoritma dapat menyelesaikan masalah dalam membuat susunan panel surya pada bidang atap bangunan berlantai banyak yang bentuknya tidak beraturan.

Penelitian sejenis dilakukan oleh Bayón et al., yang membuat pengoptimalan distribusi panel surya pada atap bangunan lantai banyak yang bentuknya persegi panjang [5]. Sedangkan Ioannou et al., menunjukkan bagaimana konfigurasi susunan panel surya yang dipasang pada atap berbentuk persegi [6]. Selain itu, Barbón et al. [7] menunjukkan bagaimana penyebaran rangkaian panel surya pada berbagai bentuk atap yang sederhana. Berbagai riset di atas telah menunjukkan bagaimana bentuk bidang atap menjadi objek penelitian untuk memaksimalkan penyusunan panel surya khususnya pada bangunan berlantai banyak.

Pada penelitian mengenai panel surya di atas atap, riset yang dilakukan Esfahani et al., menemukan atap shed atau atap yang hanya memiliki 1 bidang miring akan mendapatkan energi dari Matahari secara maksimum [8]. Penelitian ini dilakukan di Perth Australia. Namun, atap shed bukanlah atap yang mudah ditemukan di Indonesia, atau sangat jarang perumahan di Indonesia dibangun dengan model atap shed. Sehingga hasil penelitian tersebut tidak bisa diterapkan di Indonesia, dimana atap shed belum tentu dapat menjadi atap yang disenangi masyarakat.

Terkait penelitian mengenai panel surya pada atap dan pembayangnya, Palmer et al, melakukan penelitian mengenai pembayangan oleh atap pada panel surya namun tidak mempertimbangkan pengaruh bentuk atap atau hubungan antara bentuk atap dengan penebusan sendiri. [9]. Penelitian-penelitian sebelumnya mengenai panel surya pada atap perumahan belum memberikan gambaran yang memuaskan tentang pengaruh desain atap pada pemasangan panel surya di atap perumahan, khususnya dalam konteks perumahan Indonesia.

2.2 Atap Bangunan Perumahan

Berdasarkan pengamatan pada perumahan-perumahan yang terdapat di kota Gorontalo, didapatkan beberapa bentuk atap pada berbagai perumahan sebagai berikut:

Tabel 1. Bentuk atap perumahan dan nama perumahannya.

Nomor	Bentuk Atap	Nama Perumahan
1	Pelana	<ul style="list-style-type: none"> • Dulomo Indah • Bintang Permai 1 • Puri Manggis Residence • Griya Aan Lestari
2	Perisai	<ul style="list-style-type: none"> • Havair mas • Agrindo Tamalate • Griya Aan Lestari • Citra Garden Lestari
3	Pelana Pelana teras	<ul style="list-style-type: none"> • Tirta Kencana Indah • Griya Nabila Permai • Balkin • Tenilo Atas
4	Pelana bersusun	<ul style="list-style-type: none"> • Wongkaditi Permai • Griya Solaria Indah

Nomor	Bentuk Atap	Nama Perumahan
		<ul style="list-style-type: none"> • Elivar Damai • Bintang Permai 1 • Bintang Permai 4 • Perum Griya Otolomo • Farinasa • Padengo Permai
5	Pelana bersusun Pelana teras	<ul style="list-style-type: none"> • Wongkaditi Permai 3 • Pinan Jaya • Perum Fitrah Mandiri
6	Pelana Perisai teras	<ul style="list-style-type: none"> • Bali rasaindo • Balkin
7	Pelana dan perisai	<ul style="list-style-type: none"> • Anggrindo 2
8	Pelana bersusun Perisai teras	<ul style="list-style-type: none"> • Wongkaditi Permai • Wongkaditi Permai 2 • Misfalah • Bintang Permai 2
9	Perisai	<ul style="list-style-type: none"> • Zia Permai Delima
10	Perisai Pelana Samping	<ul style="list-style-type: none"> • Cendana Land
11	Perisai Pelana Teras	<ul style="list-style-type: none"> • Altira
12	2 Lantai Pelana bersusun Perisai	<ul style="list-style-type: none"> • Havair mas
13	Pelana samping Perisai tengah	<ul style="list-style-type: none"> • Rima Permai
14	Perisai samping Perisai tengah	<ul style="list-style-type: none"> • Rima Permai

(Sumber: Hasil survei peneliti, 2020)

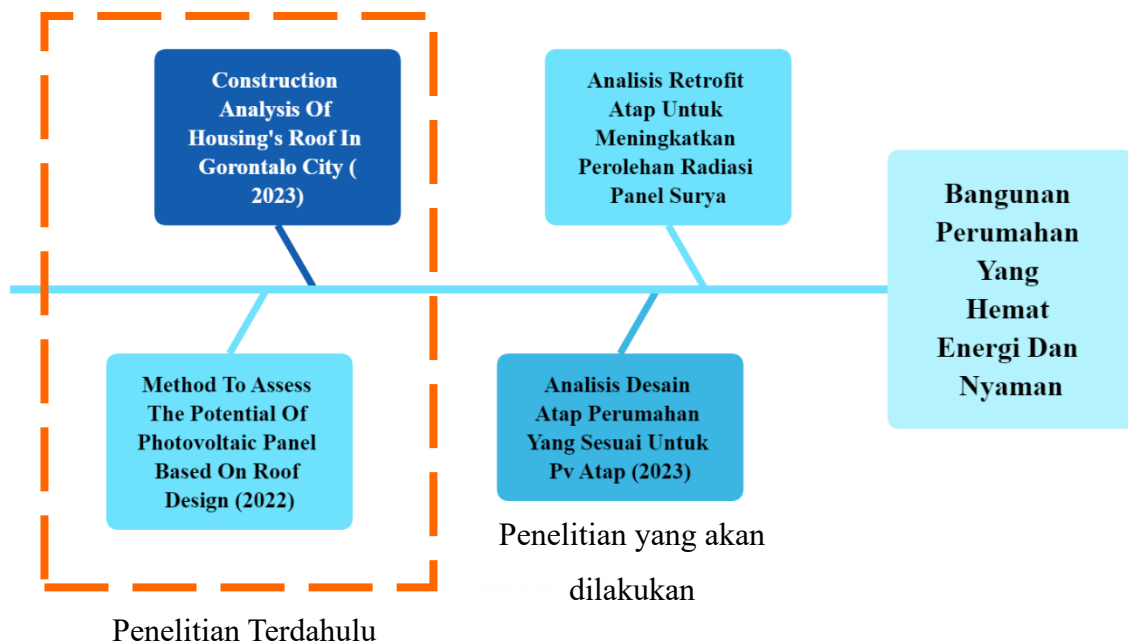
Hasil pengamatan terhadap 30 perumahan di kota Gorontalo menghasilkan kurang lebih 14 bentuk atap yang berbeda. Diantara bentuk atap yang ada, beberapa bentuk atap cukup sering ditemukan digunakan pada beberapa perumahan. Seperti atap pelana bersusun (nomor 4) yang dapat ditemukan pada 8 perumahan. Selain itu, bentuk atap seperti pelana, perisai, pelana-pelana teras, pelana bersusun-perisai teras, dapat ditemukan masing-masing pada 4 buah perumahan.

Perbedaan bentuk atap merupakan cara pengembang perumahan untuk memberikan produk yang berbeda dan dapat saling bersaing. Perbedaan ini menghasilkan desain yang beragam.

Hal ini menjadi bahan yang perlu diteliti untuk mendapatkan gambaran tentang bagaimana desain atap yang dapat memaksimalkan potensi energi surya.

2.3 Road Map Penelitian

Penelitian yang diusulkan merupakan lanjutan dari rangkaian penelitian mengenai instalasi panel surya pada atap. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan bangunan perumahan yang hemat energi dan nyaman digunakan. Dua penelitian telah dilakukan sebelumnya yaitu penelitian mengenai metode menilai potensi panel surya berdasarkan desain atap dan analisis konstruksi atap perumahan di kota Gorontalo.



Gambar 1. Road Map Penelitian

BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar perolehan panas dari radiasi Matahari pada berbagai desain atap perumahan. Besar radiasi Matahari pada atap didapatkan secara simulasi menggunakan program Rhinoceros. Setiap bidang atap dianalisis radiasi Matahari yang jatuh pada bidangnya. Ada bidang yang terbayangi atap, dan ada juga yang tidak terbayangi. Atap dengan perolehan radiasi Matahari yang terbaik menjadi desain atap perumahan yang terbaik untuk pemasangan panel surya dibanding atap lainnya.

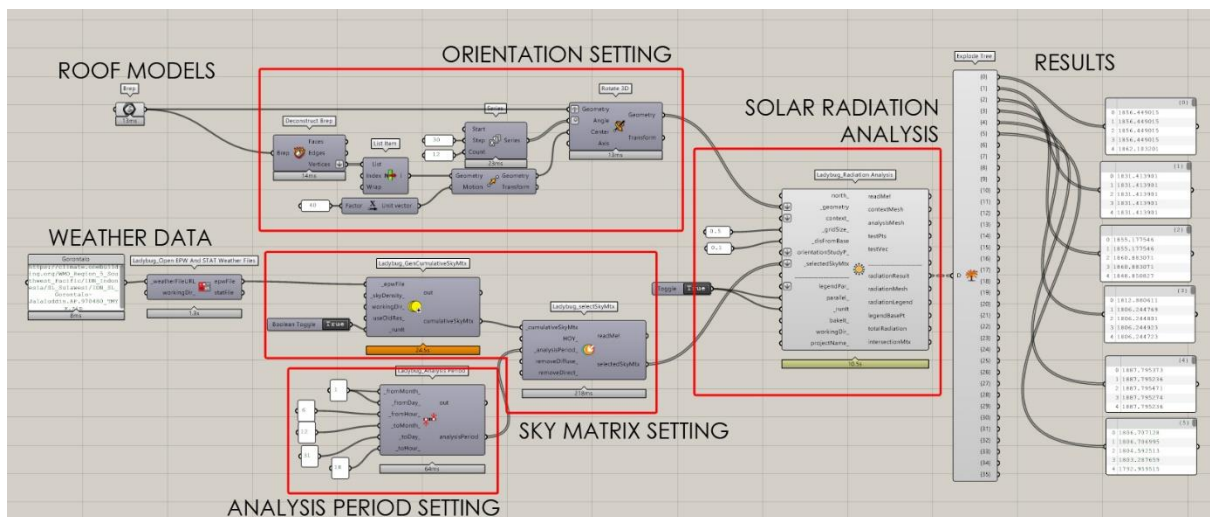
3.2 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk menilai seberapa siap bangunan perumahan di Gorontalo untuk menggunakan panel surya pada atap. Hasil penelitian akan mendapatkan desain atap yang terbaik untuk panel surya. Atap yang terpilih akan dinilai apakah merupakan desain yang mewakili sebagian besar atap di Gorontalo.

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif yang akan menilai kinerja atap berdasarkan perolehan radiasi panas Matahari sebagai indikator desain atap perumahan yang sesuai untuk pemasangan PV. Semakin besar radiasi Matahari yang didapatkan maka akan semakin besar juga energi listrik yang dihasilkan oleh PV. Untuk mendapatkan besar radiasi Matahari pada atap, maka digunakan program simulasi energi yaitu Ladybug. Program ini dapat menggunakan data cuaca dari berbagai daerah sebagai input nilai radiasi pada aplikasi. Data cuaca yang digunakan adalah data local Gorontalo. Alur tahapan proses simulasi hingga mendapatkan data yang akan dianalisis dapat dilihat pada gambar 2 di bawah.




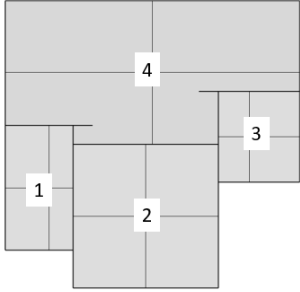
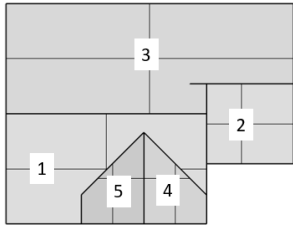
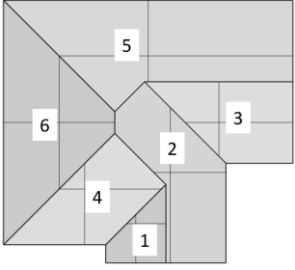


Gambar 2. Alur simulasi radiasi atap menggunakan program Ladybug

Penelitian dibatasi terhadap 3 objek bangunan perumahan yang dapat dilihat pada tabel 2. Ketiga objek perumahan dipilih berdasarkan bentuknya yang rumit. Ketiga atap mewakili bentuk atap yang didapatkan dari hasil survei perumahan di kota Gorontalo. Selain itu atap pelana bersusun sebagai atap dengan jumlah yang paling banyak ditemukan di kota Gorontalo menjadi pilihan yang juga disimulasi. Dua atap lainnya adalah atap dengan bentuk yang rumit atau merupakan gabungan dari bentuk bentuk atap sederhana. Atap pelana bersusun-Pelana teras merupakan gabungan dari atap pelana dimana atap pelana saling tegak lurus, yang satu menutupi badan bangunan dan yang satunya menutupi teras. Ditambah lagi

dengan bentuknya yang bersusun. Sedangkan atap pelana-perisai merupakan atap yang dihasilkan dari gabungan atap pelana dan atap perisai.

Tabel 2. Model Atap yang Diteliti

	Atap Pelana Bersusun	Atap Pelana Bersusun- Pelana Teras	Atap Pelana-Perisai
Foto			
Gambar Atap			

(Sumber: Hasil Analisis)

Model-model atap diputar menghadap 12 arah orientasi untuk mengetahui bagaimana besar radiasi yang diperoleh pada atap yang menghadap arah berbeda. Dua belas arah orientasi ini menjadi perwakilan dari atap bangunan yang sebenarnya menghadap berbagai arah matahari. Dengan demikian setiap desain atap memiliki 12 model dengan arah hadap yang berbeda, dan terdapat total 36 model yang disimulasi.

4.2 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan secara bertahap sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:
2. Melakukan survei lapangan, mengamati bentuk-bentuk atap perumahan di kota Gorontalo. Membuat dokumentasi perumahan tersebut.
3. Membuat model 3D atap perumahan menggunakan program Rhinoceros

4. Menganalisis model-model atap perumahan yang telah didapatkan, mengkategorikan bentuk-bentuk, menghitung jumlah perumahan yang menggunakan atap tersebut.
5. Memilih 3 model atap yang akan disimulasikan dalam penelitian
6. Melakukan simulasi radiasi Matahari pada atap menggunakan program Ladybug
7. Menganalisis hasil simulasi dengan cara menghitung nilai-nilai maksimum, minimum, standar deviasi pada tiap bidang atap. Membuat grafik box-plot dari hasil simulasi setiap bidang.
8. Menjelaskan kelebihan dan kekurangan dari tiap model atap.
9. Membuat kesimpulan hasil penelitian.

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Simulasi

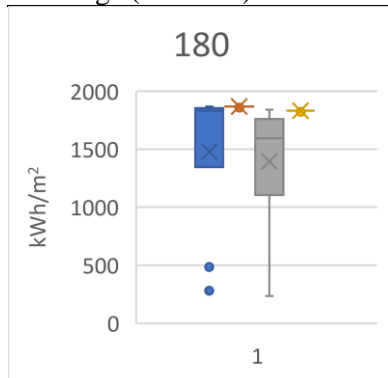
Untuk mendapatkan radiasi pada tiap bidang atap maka diberikan tanda berupa angka pada bidang atap. Tanda diberikan seperti pada tabel 2. Hasil simulasi radiasi Matahari pada setiap desain atap dan berbagai orientasi (12 arah) ditampilkan pada tabel-tabel berikut.

5.1.1 Simulasi Atap Pelana Bersusun

Hasil simulasi radiasi Matahari pada setiap bidang dari atap pelana bersusun disajikan melalui grafik box and plot. Setiap grafik mewakili 1 arah orientasi.

Tabel 3. Rekapitan nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 180°

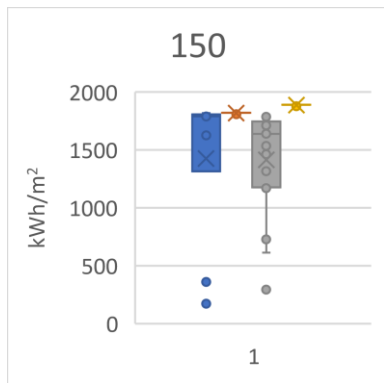
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1865.234	1867.596	1839.331	1831.438
Min Radiasi (kWh/m ²)	280.3174	1856.449	233.7097	1820.156
Standar Dev	569.063	3.242266	440.7527	2.923977
Average (kWh/m ²)	1476.025	1866.055	1394.13	1829.99



Gambar 3. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 180°

Tabel 4. Rekapitan nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 150°

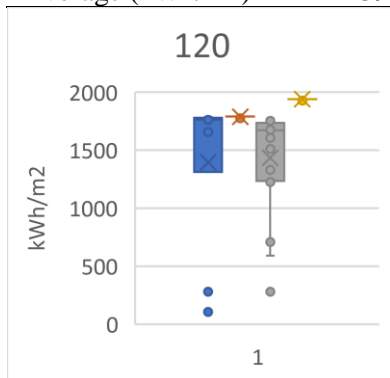
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1816.819	1819.194	1801.716	1887.799
Min Radiasi (kWh/m ²)	170.9062	1806.245	292.6628	1876.481
Standar Dev	597.1174	3.620105	428.3831	2.656601
Average (kWh/m ²)	1425.21	1817.562	1412.271	1886.513



Gambar 4. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 150°

Tabel 5. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 120°

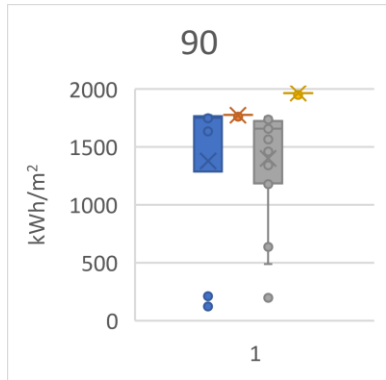
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1787.297	1789.166	1773.29	1938.426
Min Radiasi (kWh/m ²)	107.1747	1774.052	278.6505	1924.527
Standar Dev	627.4315	4.409832	424.1561	3.406778
Average (kWh/m ²)	1394.976	1787.066	1432.174	1936.785



Gambar 5. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 120°

Tabel 6. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 90°

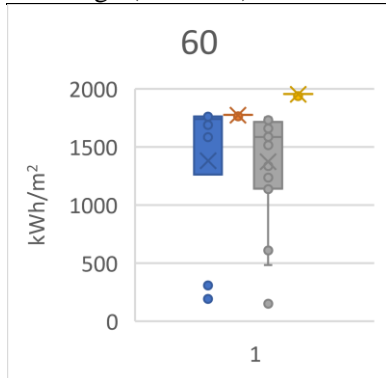
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1773.688	1775.577	1758.111	1963.504
Min Radiasi (kWh/m ²)	122.7229	1761.286	196.6306	1947.437
Standar Dev	639.5427	3.998531	458.1978	3.737077
Average (kWh/m ²)	1376.496	1773.776	1400.173	1961.698



Gambar 6. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 90°

Tabel 7. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 60°

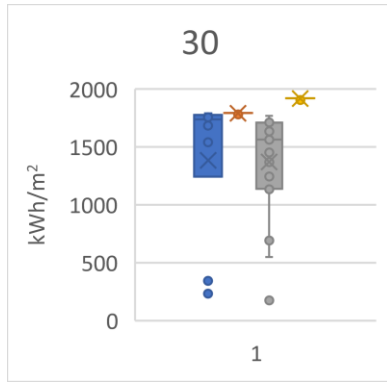
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1772.27	1774.099	1752.069	1955.206
Min Radiasi (kWh/m ²)	191.802	1762.109	150.8791	1936.34
Standar Dev	602.8758	3.499258	452.5891	4.945208
Average (kWh/m ²)	1379.101	1772.431	1370.875	1952.759



Gambar 7. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 60°

Tabel 8. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 30°

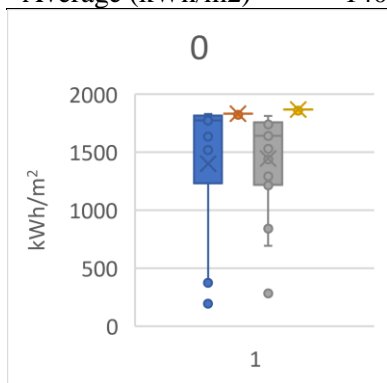
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1788.202	1790.389	1767.331	1918.274
Min Radiasi (kWh/m ²)	231.8448	1779.084	175.2528	1904.283
Standar Dev	586.1517	3.1758	438.659	3.134721
Average (kWh/m ²)	1384.066	1788.961	1369.428	1916.764



Gambar 8. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 30°

Tabel 9. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 0°

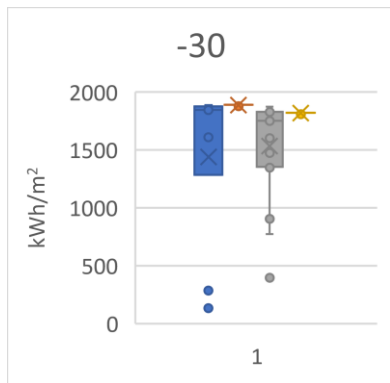
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1828.799	1831.414	1811.605	1867.596
Min Radiasi (kWh/m ²)	194.8361	1820.372	283.3868	1856.233
Standar Dev	591.7702	3.211791	400.5368	2.954633
Average (kWh/m ²)	1400.228	1829.888	1445.126	1866.156



Gambar 9. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi 0°

Tabel 10. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -30°

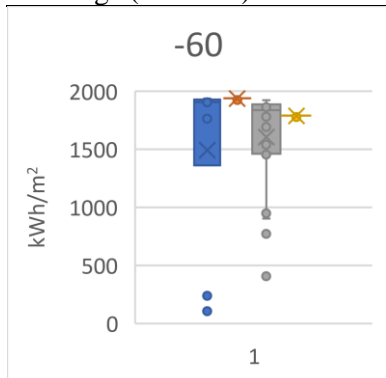
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1884.356	1887.798	1870.762	1819.198
Min Radiasi (kWh/m ²)	134.8373	1874.889	394.939	1807.773
Standar Dev	646.7893	3.624511	400.8122	2.681437
Average (kWh/m ²)	1437.875	1886.16	1532.948	1817.899



Gambar 10. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -30°

Tabel 11. Rekapian nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -60°

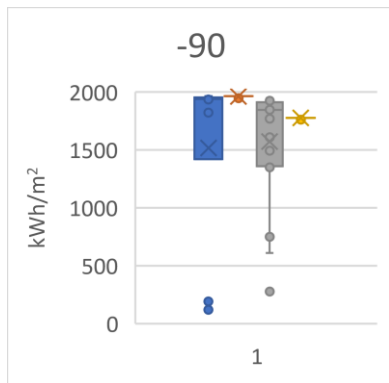
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m^2)	1936.513	1938.426	1922.706	1789.172
Min Radiasi (kWh/m^2)	106.0824	1922.741	406.1533	1775.215
Standar Dev	700.6608	4.564302	415.9267	3.41134
Average (kWh/m^2)	1490.007	1936.255	1603.735	1787.524



Gambar 11. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -60°

Tabel 12. Rekapian nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -90°

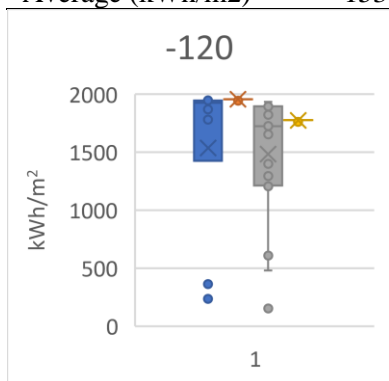
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m^2)	1961.599	1963.504	1946.161	1775.596
Min Radiasi (kWh/m^2)	120.3975	1944.276	277.5986	1760.115
Standar Dev	727.6791	5.494355	488.6117	3.622205
Average (kWh/m^2)	1515.208	1960.998	1569.621	1773.826



Gambar 12. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -90°

Tabel 13. Rekapian nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -120°

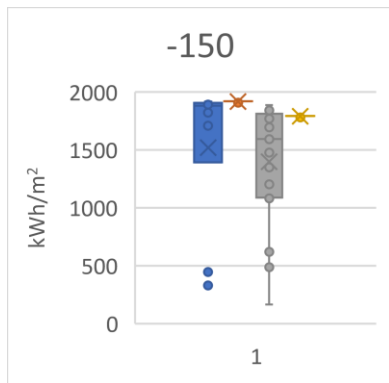
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1953.326	1955.169	1932.044	1774.103
Min Radiasi (kWh/m ²)	235.1326	1942.73	152.0923	1760.155
Standar Dev	657.7655	3.634511	517.9706	3.662248
Average (kWh/m ²)	1534.398	1953.438	1483.138	1772.309



Gambar 13. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -120°

Tabel 14. Rekapian nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -150°

	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4
Max Radiasi (kWh/m ²)	1916.099	1918.272	1886.321	1790.39
Min Radiasi (kWh/m ²)	329.8388	1906.834	166.0153	1778.12
Standar Dev	601.5095	3.209722	494.4479	2.930194
Average (kWh/m ²)	1517.329	1916.831	1396.543	1788.974



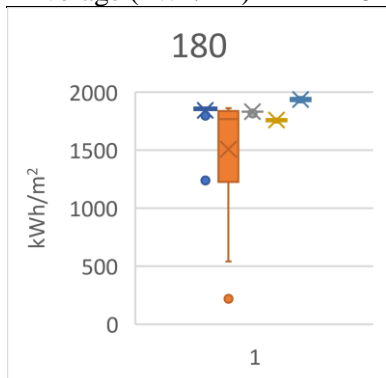
Gambar 14. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun orientasi -150°

5.1.2 Simulasi Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras

Hasil simulasi radiasi Matahari pada setiap bidang dari atap pelana bersusun-pelana teras disajikan melalui grafik box and plot. Setiap grafik mewakili 1 arah orientasi.

Tabel 15. Rekapitan nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 180°

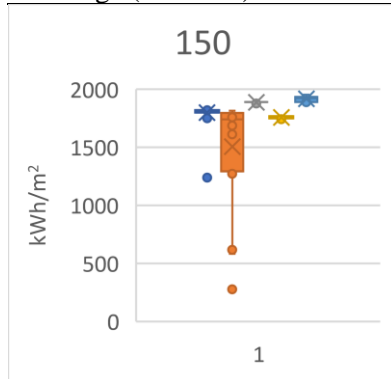
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1867.601	1861.016	1831.423	1772.817	1957.822
Min Radiasi (kWh/m ²)	1238.418	217.8054	1814.724	1736.897	1909.575
Standar Dev	75.07978	475.0686	4.19957	10.92964	15.24128
Average (kWh/m ²)	1842.737	1507.097	1829.245	1757.781	1933.996



Gambar 15. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 180°

Tabel 16. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 150°

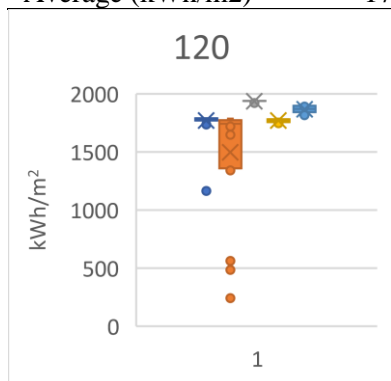
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1819.194	1813.844	1887.799	1769.898	1950.534
Min Radiasi (kWh/m ²)	1238.726	278.4747	1875.303	1736.912	1887.994
Standar Dev	69.1572	443.6429	4.100962	10.06916	21.58698
Average (kWh/m ²)	1796.784	1505.279	1885.709	1756.811	1916.17



Gambar 16. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 150°

Tabel 17. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 120°

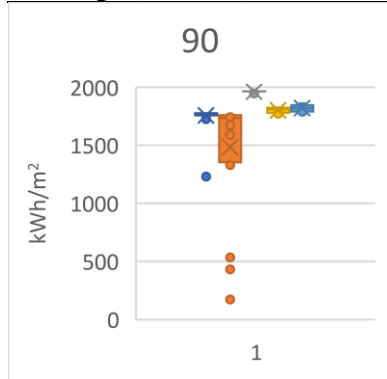
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1789.165	1785.33	1938.427	1787.063	1910.318
Min Radiasi (kWh/m ²)	1162.756	241.8857	1918.808	1745.352	1814.397
Standar Dev	73.8105	459.5332	5.161663	13.38098	31.07947
Average (kWh/m ²)	1768.267	1497.247	1935.767	1768.476	1866.626



Gambar 17. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 120°

Tabel 18. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 90°

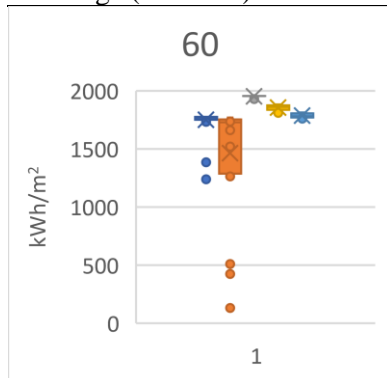
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1775.578	1770.719	1963.507	1825.408	1860.474
Min Radiasi (kWh/m ²)	1230.339	172.8368	1944.276	1764.264	1787.991
Standar Dev	64.44704	472.0074	5.899807	20.54906	27.9302
Average (kWh/m ²)	1756.646	1482.702	1960.503	1800.68	1819.458



Gambar 18. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 90°

Tabel 19. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 60°

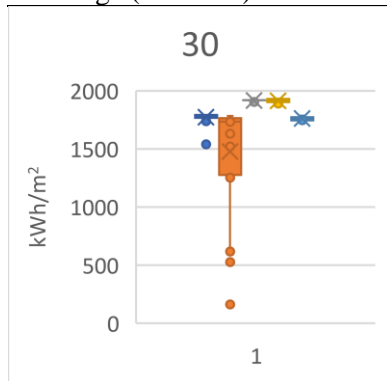
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1774.103	1769.856	1955.171	1883.052	1812.54
Min Radiasi (kWh/m ²)	1236.963	132.0425	1927.867	1810.308	1759.562
Standar Dev	76.925	479.9993	6.711648	23.34502	18.42456
Average (kWh/m ²)	1749.326	1462.962	1951.709	1854.043	1785.443



Gambar 19. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 60°

Tabel 20. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 30°

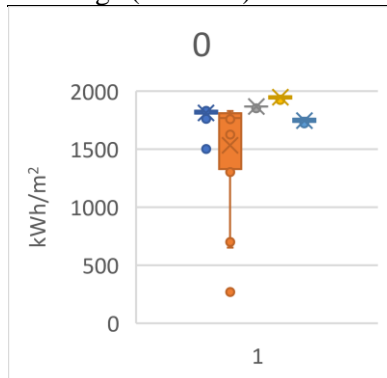
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1790.396	1783.865	1918.273	1933.711	1784.917
Min Radiasi (kWh/m ²)	1538.916	162.3934	1904.283	1869.747	1745.658
Standar Dev	32.52607	453.403	4.505654	16.65686	13.48379
Average (kWh/m ²)	1772.934	1477.943	1915.989	1913.936	1761.497



Gambar 20. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 30°

Tabel 21. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 0°

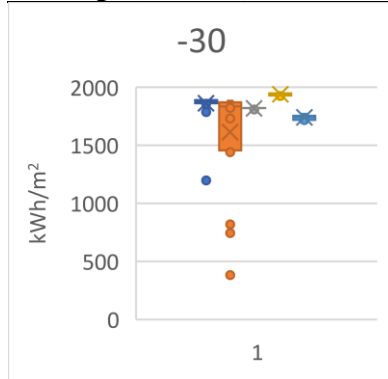
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1831.416	1826.624	1867.604	1960.721	1769.841
Min Radiasi (kWh/m ²)	1501.511	267.8574	1850.728	1922.875	1721.175
Standar Dev	42.69993	429.7833	4.241482	11.5171	15.39955
Average (kWh/m ²)	1809.546	1531.562	1865.405	1945.113	1745.831



Gambar 21. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi 0°

Tabel 22. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -30°

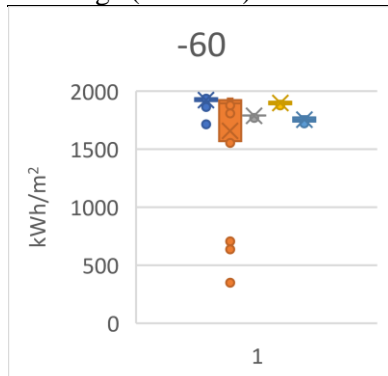
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1887.803	1882.626	1819.201	1950.934	1769.467
Min Radiasi (kWh/m ²)	1197.455	381.3317	1806.709	1917.598	1715.97
Standar Dev	82.92225	416.1385	4.131907	10.19802	18.13116
Average (kWh/m ²)	1860.178	1611.387	1817.091	1937.687	1738.531



Gambar 22. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -30°

Tabel 23. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -60°

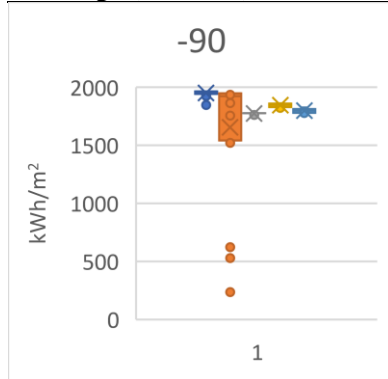
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1938.431	1934.632	1789.178	1914.947	1782.712
Min Radiasi (kWh/m ²)	1713.607	347.7866	1769.466	1875.895	1721.481
Standar Dev	30.94264	463.7012	5.172221	12.2573	20.21125
Average (kWh/m ²)	1920.754	1655.375	1786.501	1897.829	1752.454



Gambar 23. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -60°

Tabel 24. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -90°

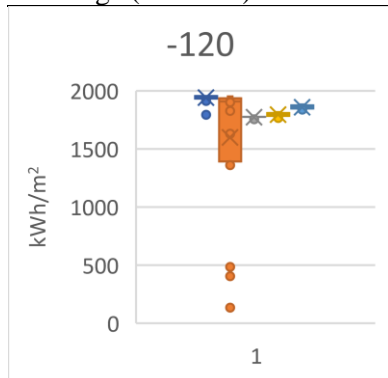
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1963.505	1958.695	1775.574	1861.872	1826.117
Min Radiasi (kWh/m ²)	1845.894	235.4387	1760.116	1814.997	1777.011
Standar Dev	18.78465	507.7858	5.36468	14.69264	17.45191
Average (kWh/m ²)	1949.867	1654.345	1772.84	1843.476	1797.36



Gambar 24. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -90°

Tabel 25. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -120°

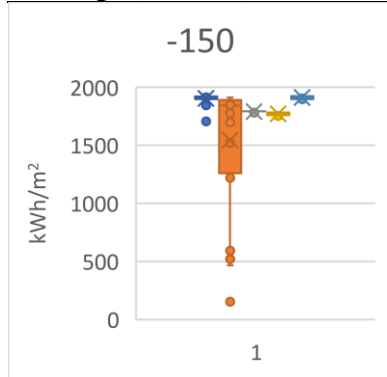
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1955.17	1950.919	1774.114	1815.76	1881.569
Min Radiasi (kWh/m ²)	1792.614	133.2996	1753.286	1766.728	1836.3
Standar Dev	22.75087	549.0611	5.167499	15.03028	14.89928
Average (kWh/m ²)	1940.951	1598.686	1771.427	1795.683	1858.62



Gambar 25. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -120°

Tabel 26. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -150°

	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5
Max Radiasi (kWh/m ²)	1918.273	1911.456	1790.39	1784.621	1934.231
Min Radiasi (kWh/m ²)	1703.931	152.9321	1778.12	1743.151	1895.639
Standar Dev	29.95356	514.9279	4.298121	12.14012	13.22522
Average (kWh/m ²)	1900.663	1541.865	1788.202	1769.2	1911.152



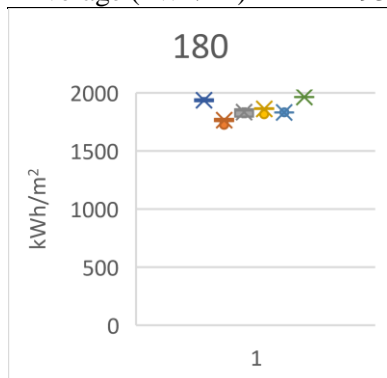
Gambar 26. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana Bersusun-Pelana Teras orientasi -150°

5.1.3 Simulasi Atap Pelana-Perisai

Hasil simulasi radiasi Matahari pada setiap bidang dari atap pelana bersusun-pelana teras disajikan melalui grafik box and plot. Setiap grafik mewakili 1 arah orientasi.

Tabel 27. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 180°

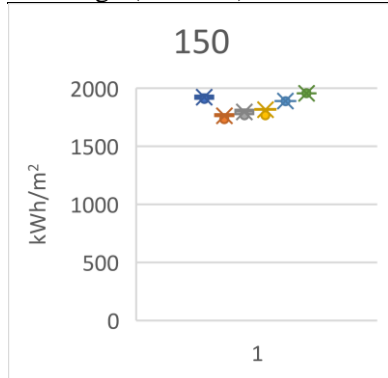
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1954.674	1775.573	1867.599	1867.598	1831.43	1963.502
Min radiasi (kWh/m ²)	1924.239	1723.227	1787.988	1816.051	1831.41	1963.499
Standar deviasi	10.51147	14.8876	28.05247	12.07418	0.002495	0.000659
Average (kWh/m ²)	1936.375	1763.581	1833.616	1860.855	1831.415	1963.5



Gambar 27. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 180°

Tabel 28. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 150°

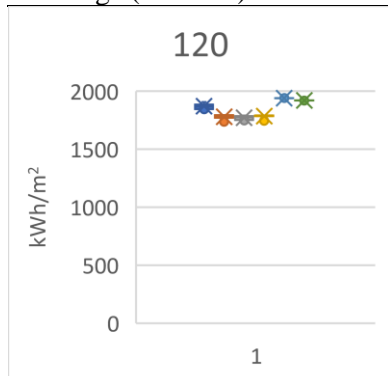
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1946.653	1774.099	1816.966	1819.202	1887.807	1955.171
Min radiasi (kWh/m ²)	1887.999	1731.25	1765.266	1766.732	1887.785	1955.161
Standar deviasi	16.57184	13.85911	18.26265	11.94176	0.002474	0.001279
Average (kWh/m ²)	1920.893	1762.618	1795.769	1812.633	1887.795	1955.168



Gambar 28. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 150°

Tabel 29. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 120°

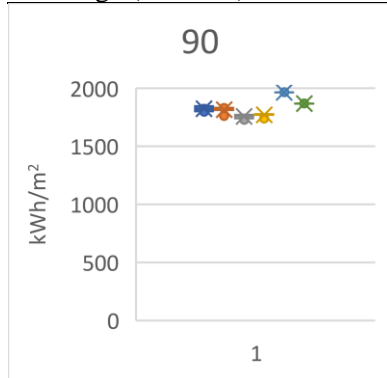
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1905.415	1790.392	1789.165	1789.169	1938.433	1918.276
Min radiasi (kWh/m ²)	1842.685	1734.237	1745.658	1744.516	1938.418	1918.253
Standar deviasi	21.5571	16.80853	14.1157	10.41058	0.00174	0.002605
Average (kWh/m ²)	1868.116	1777.06	1770.311	1783.338	1938.424	1918.271



Gambar 29. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 120°

Tabel 30. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 90°

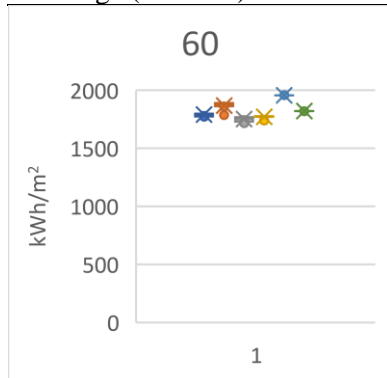
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1856.128	1831.415	1773.675	1775.577	1963.512	1867.599
Min radiasi (kWh/m ²)	1787.991	1758.821	1728.113	1736.894	1963.498	1867.594
Standar deviasi	23.86164	24.35308	15.06163	9.037583	0.001765	0.000895
Average (kWh/m ²)	1821.792	1812.881	1756.119	1770.484	1963.501	1867.595



Gambar 30. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 90°

Tabel 31. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 60°

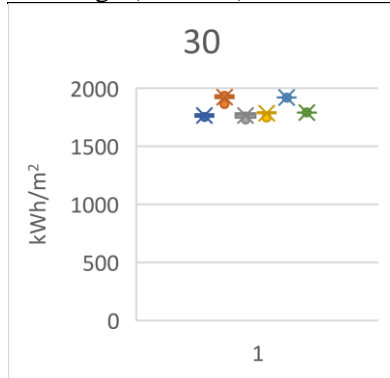
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1809.977	1887.798	1774.098	1774.104	1955.175	1819.197
Min radiasi (kWh/m ²)	1770.785	1785.978	1715.986	1736.607	1955.161	1819.185
Standar deviasi	13.70258	27.86494	18.00673	8.820027	0.001763	0.001703
Average (kWh/m ²)	1788.018	1866.897	1750.685	1769.074	1955.168	1819.193



Gambar 31. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 60°

Tabel 32. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 30°

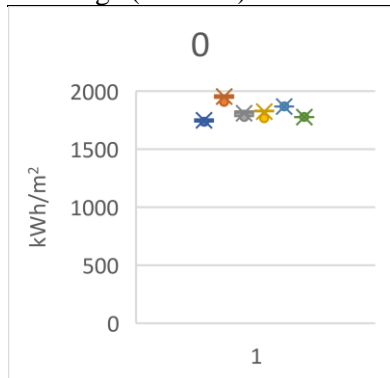
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1782.037	1938.428	1787.719	1790.394	1918.28	1789.169
Min radiasi (kWh/m ²)	1745.663	1862.08	1730.529	1745.357	1918.267	1789.144
Standar deviasi	11.03304	22.19004	19.76184	10.39634	0.001283	0.002853
Average (kWh/m ²)	1763.839	1921.23	1764.974	1784.643	1918.271	1789.163



Gambar 32. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 30°

Tabel 33. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 0°

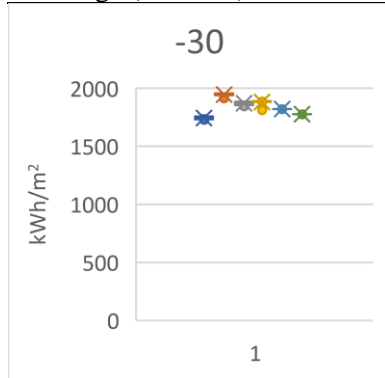
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1766.68	1963.501	1831.418	1831.422	1867.61	1775.574
Min radiasi (kWh/m ²)	1735.874	1905.971	1777.008	1765.267	1867.592	1775.57
Standar deviasi	10.64578	16.23367	17.99395	15.4222	0.002372	0.000946
Average (kWh/m ²)	1748.182	1950.693	1807.801	1823.383	1867.596	1775.572



Gambar 33. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi 0°

Tabel 34. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -30°

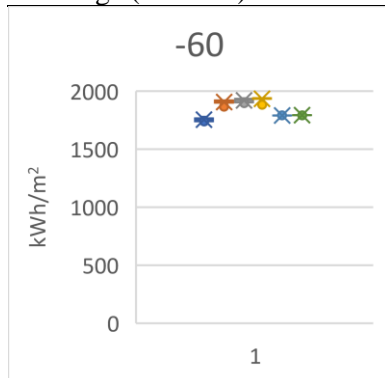
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1765.539	1955.17	1885.671	1887.8	1819.203	1774.1
Min radiasi (kWh/m ²)	1715.986	1911.795	1841.984	1810.31	1819.184	1774.086
Standar deviasi	14.49345	14.04302	14.90961	16.82183	0.002351	0.001914
Average (kWh/m ²)	1741.82	1943.55	1868.013	1879.063	1819.193	1774.096



Gambar 34. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -30°

Tabel 35. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -60°

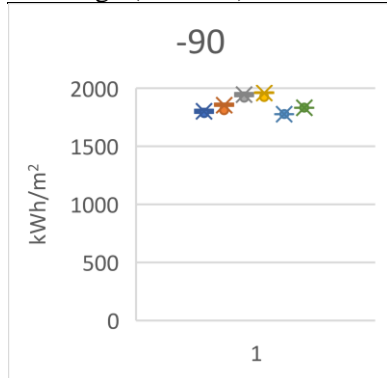
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1779.035	1918.275	1938.425	1938.429	1789.171	1790.393
Min radiasi (kWh/m ²)	1736.71	1864.64	1895.637	1882.658	1789.157	1790.371
Standar deviasi	14.53383	15.85406	13.89106	12.8406	0.001983	0.002569
Average (kWh/m ²)	1753.735	1905.474	1919.823	1931.471	1789.163	1790.387



Gambar 35. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -60°

Tabel 36. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -90°

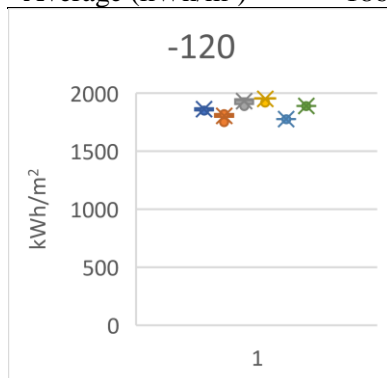
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1822.662	1867.596	1961.621	1963.505	1775.588	1831.418
Min radiasi (kWh/m ²)	1777.011	1809.504	1916.41	1922.873	1775.568	1831.412
Standar deviasi	14.4395	18.9403	14.91997	9.448441	0.002546	0.000954
Average (kWh/m ²)	1799.931	1852.171	1944.209	1958.212	1775.572	1831.414



Gambar 36. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -90°

Tabel 37. Rekap nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -120°

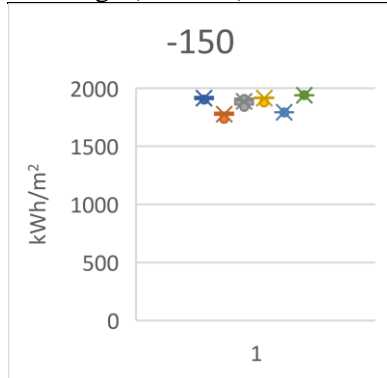
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1878.811	1819.197	1955.169	1955.174	1774.108	1887.798
Min radiasi (kWh/m ²)	1847.449	1748.799	1887.999	1917.174	1774.086	1887.784
Standar deviasi	10.74267	19.46387	19.85511	8.930797	0.002572	0.001883
Average (kWh/m ²)	1860.349	1803.774	1930.541	1950.088	1774.096	1887.795



Gambar 37. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -120°

Tabel 38. Rekapitan nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -150°

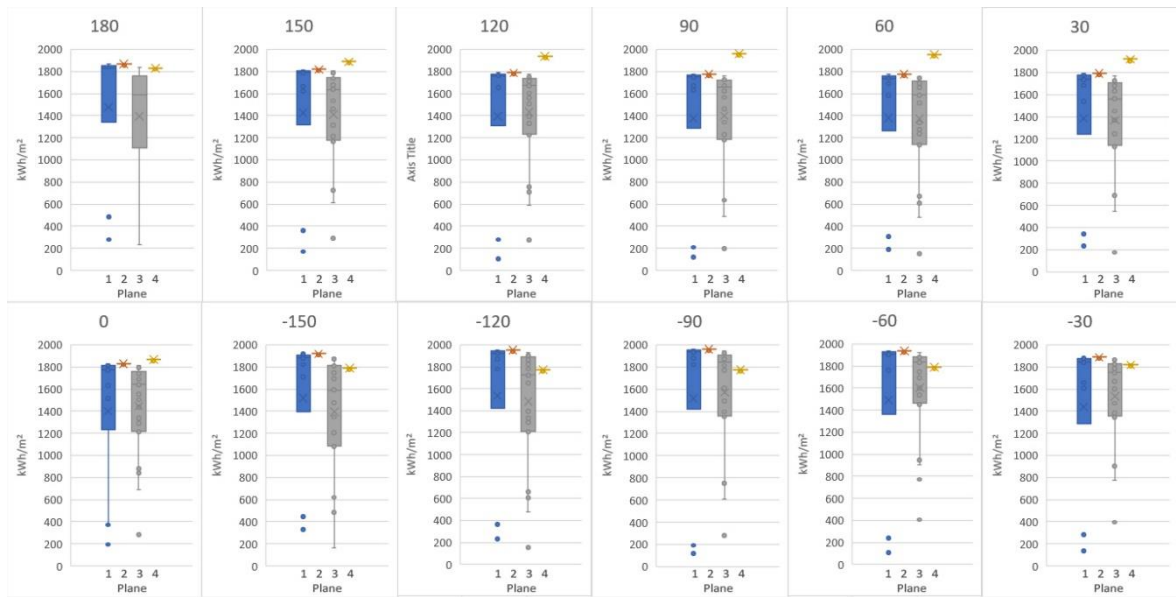
	Bidang 1	Bidang 2	Bidang 3	Bidang 4	Bidang 5	Bidang 6
Max radiasi (kWh/m ²)	1931.369	1789.168	1915.579	1918.276	1790.397	1938.428
Min radiasi (kWh/m ²)	1895.642	1735.983	1836.208	1875.909	1790.38	1938.414
Standar deviasi	10.88385	16.74747	28.14094	9.842193	0.002174	0.001779
Average (kWh/m ²)	1913.371	1775.518	1885.241	1912.724	1790.387	1938.424



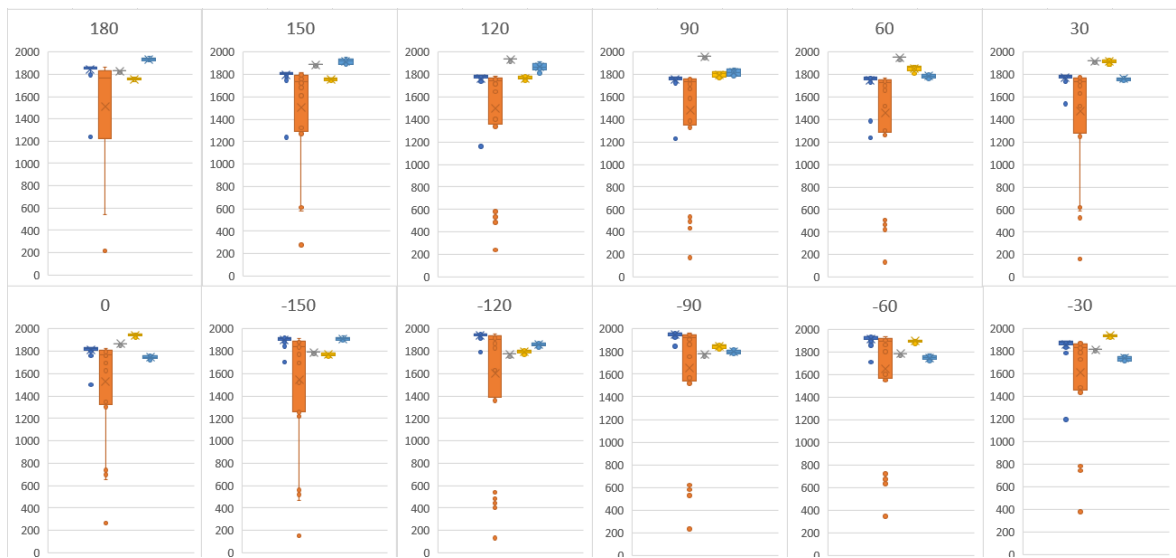
Gambar 38. Grafik box and plot nilai radiasi Matahari Atap Pelana-Perisai orientasi -150°

5.2 Pembahasan Hasil Penelitian

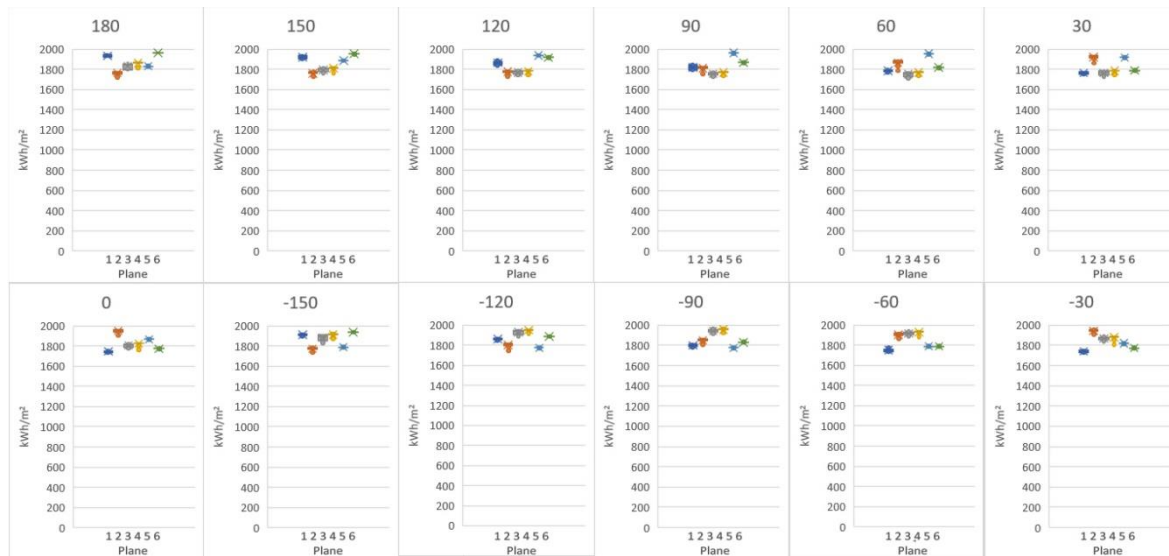
Seluruh grafik pada tiap simulasi radiasi atap dijejerkan untuk melihat perbandingan kinerja setiap atap. Dari hasil perbandingan didapatkan bahwa hasil bidang 1 pada atap pelana bersusun memiliki hasil yang sangat beragam dari 106 hingga 1961 kWh/m². Bidang atap 3 pada atap pelana bersusun juga memiliki nilai radiasi yang bervariasi dari 150 hingga 1946 kWh/m². Demikian halnya dengan bidang 1 pada atap pelana bersusun-pelana teras yang memiliki nilai bervariasi dari 106 hingga 1961 kWh/m², sedangkan bidang 2 nilainya mulai dari 152 hingga 1955 kWh/m². Namun pada atap pelana-perisai, tidak ada besar nilai radiasi yang memiliki rentang sebesar seperti yang ditemukan pada pelana bersusun dan atap pelana bersusun-pelana teras. Pada berbagai arah mata angin, besar perolehan panas pada atap pelana-perisai berkisar antara 1715 hingga 1963 kWh/m².



Gambar 39. Perbandingan besar perolehan panas Matahari berbagai orientasi atap dan bidang pada atap pelana bersusun



Gambar 40. Perbandingan besar perolehan panas Matahari berbagai orientasi atap dan bidang pada atap pelana bersusun-pelana teras.



Gambar 41. Perbandingan besar perolehan panas Matahari berbagai orientasi atap dan bidang pada atap pelana-perisai.

Besarnya perbedaan perolehan radiasi Matahari pada atap pelana bersusun dan atap pelana bersusun-pelan teras disebabkan pengaruh efek peneduhan sendiri. Tidak konsistennya hasil perolehan radiasi Matahari pada bidang menyebabkan kinerja panel surya di atap menjadi rendah. Disarankan untuk memasang panel surya pada atap dengan nilai deviasi yang rendah untuk memaksimalkan produksi energi listrik. Sebagai akibatnya bidang 2 dan 4 direkomendasikan untuk meletakkan panel surya pada atap pelana bersusun. Bidang 2, 3, dan 4 direkomendasikan untuk atap pelana bersusun-pelana teras. Atap pelana-perisai tidak memiliki efek peneduhan sendiri pada atap, dan semua bidangnya dapat dipasangi panel surya.

BAB VI KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Atap pelana bersusun merupakan bentuk atap yang banyak ditemukan pada rancangan perumahan di Gorontalo. Beberapa bentuk atap seperti atap pelana yang rumit, dan atap perisai yang rumit juga ditemukan di perumahan kota Gorontalo. Bentuk-bentuk tersebut dapat dibedakan atas bentuk bidang, arah hadap, dan keberadaan efek peneduhan sendiri. Penelitian potensi panel surya pada 3 atap menghasilkan atap pelana bersusun sebagai bentuk atap terbaik untuk memberikan energi baru terbarukan pada perumahan, dengan syarat panel surya tidak dipasang pada bidang-bidang yang terbayangi oleh bagian atap lainnya. Atap perisai yang rumit memiliki bidang-bidang yang menghadap 4 arah. Tidak ada efek peneduhan sendiri pada atap perisai dan semua bidangnya cocok untuk pemasangan panel surya. Namun adanya bentuk-bentuk trapezium dan bentuk-bentuk bidang tidak beraturan dapat menjadi hambatan untuk pemasangan panel surya yang lebih besar sehingga membatasi produksi energi yang lebih besar pula.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Humas EBTKE, “Forum Kehumasan Dewan Energi Nasional: Menuju Bauran Energi Nasional Tahun 2025,” Apr. 08, 2021. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/04/09/2838/forum.kehumasan.dewan.energi.nasional.menuju.bauran.energi.nasional.tahun.2025> (accessed Aug. 05, 2022).
- [2] G. Suroyo and B. Christina, “Coal-dependent Indonesia starts tapping huge solar power potential,” *Reuters*, Jan. 06, 2022.
- [3] F. N. Haryadi, D. F. Hakam, S. R. Ajija, A. A. Simaremare, and I. A. Aditya, “The analysis of residential rooftop PV in Indonesia’s electricity market,” *Economies*, vol. 9, no. 4, pp. 1–10, 2021, doi: 10.3390/economies9040192.
- [4] A. Barbón, M. Ghodbane, L. Bayón, and Z. Said, “A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes,” *J. Clean. Prod.*, vol. 365, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132774.
- [5] C. Bayón-Cueli, A. Barbón, A. Fernández-Conde, and L. Bayón, “Optimal distribution of PV modules on roofs with limited space,” 2021, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584710.
- [6] A. K. Ioannou, N. E. Stefanakis, and A. G. Boudouvis, “Design optimization of residential grid-connected photovoltaics on rooftops,” *Energy Build.*, vol. 76, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.019.
- [7] A. Barbón, C. Bayón-Cueli, L. Bayón, and C. Rodríguez-Suanzes, “Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications,” *Appl. Energy*, vol. 305, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117802.
- [8] S. K. Esfahani, A. Karrech, R. Cameron, M. Elchalakani, R. Tenorio, and F. Jerez, “Optimizing the solar energy capture of residential roof design in the southern hemisphere through Evolutionary Algorithm,” *Energy Built Environ.*, vol. 2, no. 4, pp. 406–424, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ENBENV.2020.09.004.
- [9] D. Palmer, I. Cole, B. Goss, T. Betts, and R. Gottschalg, “DETECTION OF ROOF SHADING FOR PV BASED ON LIDAR DATA USING A MULTI-MODAL APPROACH,” in *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2015, no. September.

LAMPIRAN



abdi djafar <abdi_djafar@ung.ac.id>

**The 1st International Online Conference on Buildings: Payment received
IOCBD2023-025248**

1 pesan

info@sciforum.net <info@sciforum.net>

8 September 2023 pukul 13.23

Balas Ke: iocbd2023@mdpi.comKepada: abdi_djafar@ung.ac.id

Dear Abdi Djafar,

We would like to confirm that your payment for the registration fees for your participation to The 1st International Online Conference on Buildings have been received. This message acts as your official receipt of payment. Please print out or save this message.

Receipt of payment for The 1st International Online Conference on Buildings registration fees

Invoice ID: IOCBD2023-025248

Amount received: SGD 45.88

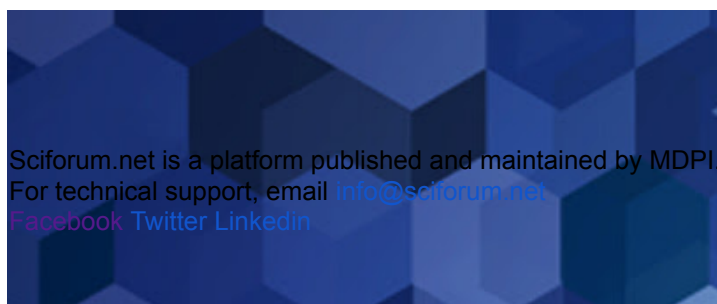
Date received: 7 September 2023

Payer information

Abdi Djafar (abdi_djafar@ung.ac.id)

For any inquiries related to the event, please contact iocbd2023@mdpi.com.

Your IOCBD2023 Organizing Team

iocbd2023@mdpi.com

Analysis of Suitable Roof Designs for PV Panel: Case Study of Housing Roof in Gorontalo [†]

Abdi Gunawan Djafar ^{1,*}, Niniek Pratiwi ¹, Rahmayanti ² and Nur Mutmainnah ²

¹ Department of Building Architecture, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo 96115, Indonesia; email1@email.com

² Department of Architecture Engineering, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo 96554, Indonesia; email2@email.com (R.); email3@email.com (N.M.)

* Correspondence: abdi_djafar@ung.ac.id; Tel.: +62-85240637202

[†] Presented at the 1st International Online Conference on Buildings, 24–26 October 2023; Available online: <https://iocbd2023.sciforum.net/>.

Abstract: The demand of PV on roof installation in household sector is increasing. In this paper, an investigation in optimizing the energy performance of PV on housing roof is conducted. Three housing roof designs found in Gorontalo city are selected as the mounting planes for PV on roof. The designs represent stacked gable roof, complex gable roof, and complex hip roof. The purpose of the research is to find which roof shape is better for PV mounting in terms of sun radiation gain and access, mountable spaces, and orientation flexibility. This research employs Rhinoceros 3D to model the three roofs. The models are designed to face 12 directions from 0° to 330°. Radiation analysis using Ladybug is utilized to study the roof performance in obtaining solar radiation in all the 12 directions. It is found that the complex hip roof has more evenly distributed solar radiation on the roof planes, flexible for PV mounting in any orientation, but few mountable spaces. The stacked gable roof has 2 out of 4 suitable planes to gain solar radiation, but they are spacious. The complex gable roof has only 1 out of 5 suitable planes since they are prone to self-shading and narrow. Overall, stacked gable roof provides a better option for PV installation compared to the other roof shapes.

Keywords: housing; mounting space; PV on roof; roof space; solar radiation gain

Citation: Djafar, A.G.; Pratiwi, N.; Rahmayanti; Mutmainnah, N. Analysis of Suitable Roof Designs for PV Panel: Case Study of Housing Roof in Gorontalo. *Eng. Proc.* **2023**, *53*, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor(s): Name

Published: 24 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Indonesian government has set a national energy plan to use of a minimum of 25% of the roof area for building solar power plants roofs on residential buildings [1]. However, roof of Indonesian housings is varied in design. There is no specific instruction in the obligation to install solar panels on roof. People will be facing problems such as where should they put their renewable energy facilities on their house. Housing developers construct their housing roof in a variety of roof shape to attract buyers. Some of them are irregular roof shape, and become a hindrance for PV on roof installation [2].

There are many researches on the potential of PV roof to generate energy with the emphasis on roof shapes. Barbón et al., found a general algorithm to optimize the deployment of photovoltaic panels installed on irregular flat roof shapes. The algorithm takes into account the irregular rooftop shape, the self-shading of photovoltaic panels, and some essential variabls [3]. Bayón et al. provided the optimal distribution of PV panels on rectangular rooftop shapes. [4]. Moreover, Ioannou et al. presented the optimal configuration of the PV panel rows installed on a square rooftop shape [5]. In addition, Barbón et al. [6] determined the optimal distribution of PV panels on simple shapes of rooftops. Unfortunately, researches with the topic of PV on roof mentioned above, consider only a flat rooftop as the place to set up PV.

In terms of PV on housing, Esfahani et al., find shed roof gains maximum solar energy in Perth Australia [7]. However, shed roof is a simple 1 plane roof, and can hardly be found in Indonesia's housing. Hachem et al. conducted a study on the effect of housing geometric form on façade BIPV solar potential [8]. The research did not consider PV on the housing roof. Palmer et al., identify the most suitable buildings based on roof shading but does not take into account the roof shape [9].

The previous articles deal with the optimization of PV panels on regular rooftop shape, and regular pitch roof shape. There is the need to study PV installation on the irregular pitch roof shape. This paper discusses PV potential on the complex shape of housing roof found in Indonesia. The aim is to evaluate suitable roof for PV installation on common housing roof style found in Gorontalo, Indonesia, with addition the influence of the annual Sun movement around the equator.

2. Materials and Methods

Three complex designs of housing roof are selected to assess the suitability of PV panel installation as can be seen in Figure 1. They are stacked gable roof (A), complex gable roof (B), and complex hip roof (C). Stacked gable roof is the most roof type found in housing of Gorontalo city [10]. Roof A is consisted of 3 rectangular planes, and an irregular plane. Roof B has a rectangular plane, 2 trapezoid planes, and 2 irregular planes. Roof C has 4 trapezoid planes, and 2 irregular planes. Roof A and B have a higher roof part and providing shade to the lower roof part. Planes on roof A only face 2 directions, while B and C face 4 directions. Each roof shapes have advantages and disadvantages for PV installation. Rectangular planes provide fittable shape for the common rectangular PV panel. While PV panel is more difficult to fit in trapezoid and irregular plane.

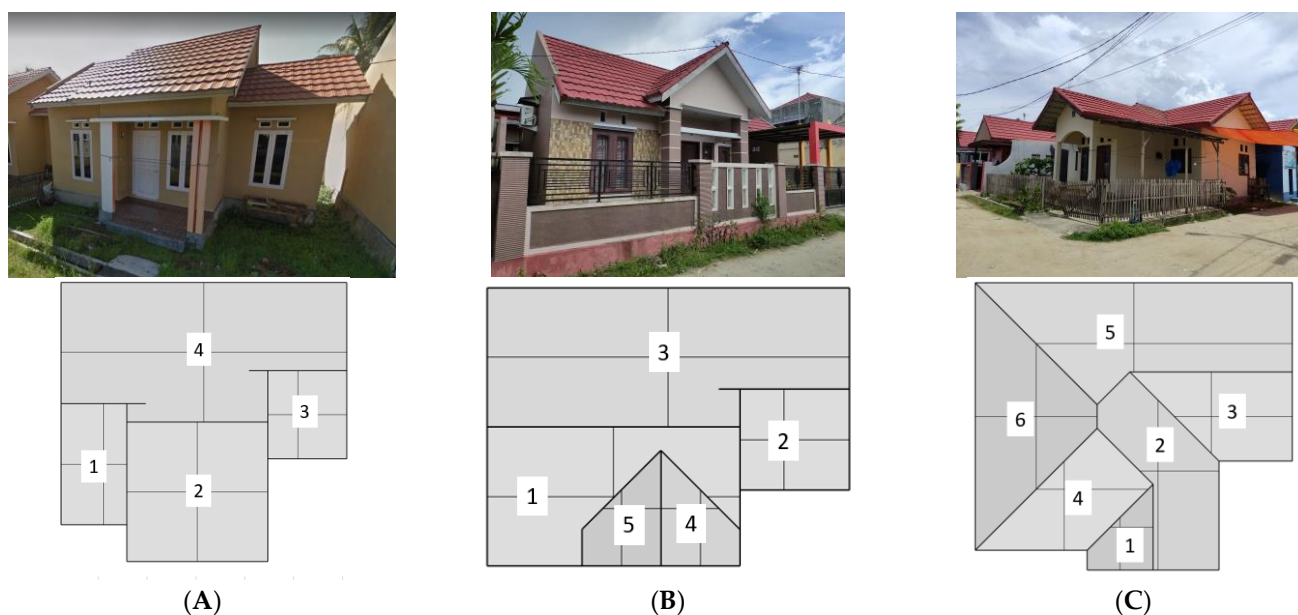


Figure 1. Housing found in Gorontalo city, and the roof plan. Roof (A) is stacked gable roof, (B) is complex gable roof, and (C) is complex hip roof.

Prior to this study, an investigation on the best roof orientation in Gorontalo show West facing surfaces obtain the most solar radiation compared to the other orientation [11]. Housing roof could be facing any direction, but among the 3 roofs, roof B and C have the favor of one of its planes to face West. However, even though the planes are facing West, the existence of self-shading on roof A and B could reduce the annual solar radiation gains. Therefore, a study of solar radiation gains on several directions of the selected housing is necessary to find out which roof shape provide the most suitable space for PV installation on roof.

The study in this article deals with radiation gain on pitch roof under the following conditions: (i) irregular roof shapes; (ii) self-shading of the roof; (iii) roof orientations. The roofs performance will be simulated using Ladybug’s components in Rhinoceros 3D. Simulation flow can be seen in Figure 2. Roof models are set to face 12 directions from 0° to 330°. In this paper the directions will be expressed in azimuth (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° –30°, –60°, –90°, –120°, –150°, 180°). Simulation is done for a year-round analysis, from 6 to 18. The performance indicator is annual solar radiation (kWh/m²) falling on grid points of roof planes. The grid size is 0.5 m, the visualization of grid size on roof plane is given in Figure 3. Each plane from a roof is numbered, thus the performance of each plane is comparable. The simulation results of each roof types and orientations plotted into box and whisker charts and then compared. To analyse the plane for mounting capacity, a packing method is employed to determine how much PV can fit in a roof plane. A 550 Wp panel (size of 2279 mm × 1135 mm) is selected as the size to fit in the plane area. The above analysis objective is to find which housing roof shape provide more consistent solar gain, and which roof shape provide more space for PV panels.

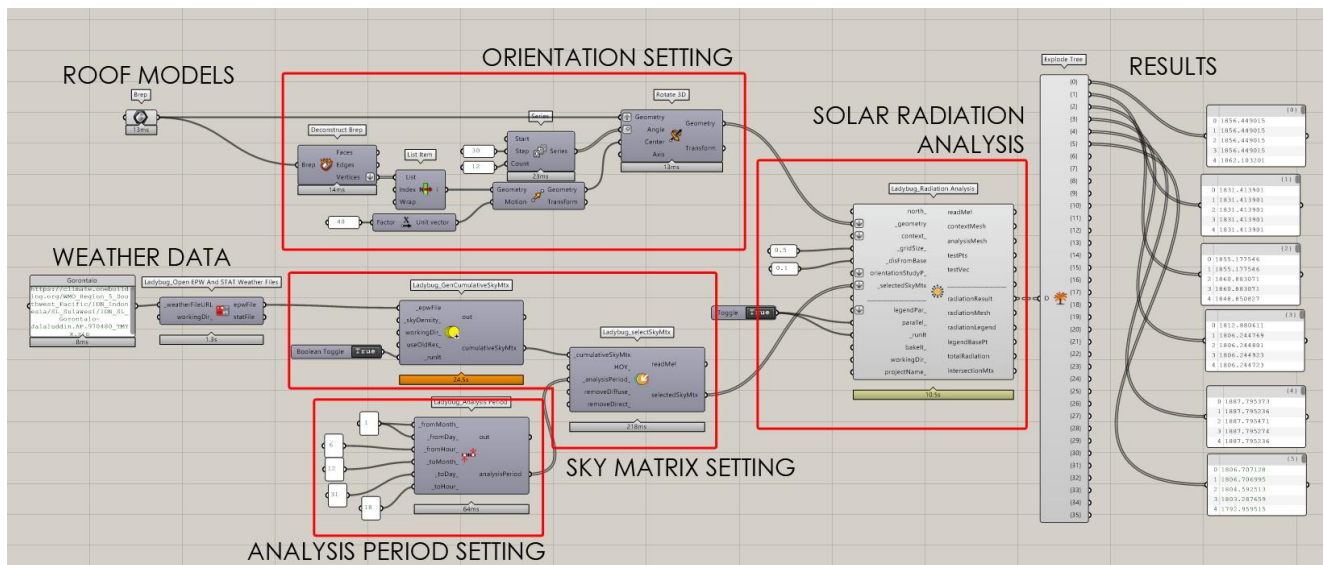


Figure 2. Simulation flow using Ladybug.

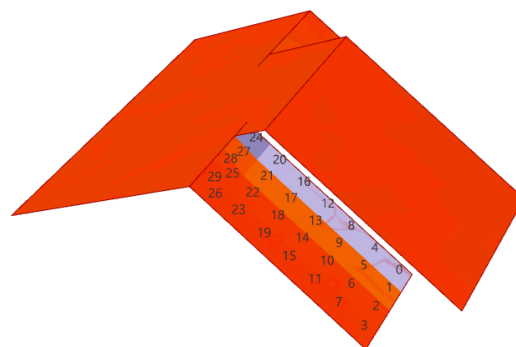


Figure 3. Grid points with the grid size of 0.5 on plane 1 of roof A.

3. Results and Discussion

Analysis of Suitable Roof Design for PV installation is discussed in 2 subsections. The first part reviews solar radiation gain on the planes of the 3 housing roof designs. The second part examines the mounting capacity of the roof planes.

3.1. Analysis of Solar Radiation Gain

The comparison of simulation result on 12 directions can be seen in Figures 4–6. From the charts below, it can be noticed that the annual solar radiation gain on plane 1 in roof A have a wide span of value ranging from 106 to 1961 kWh/m². Plane 3 in roof A also delivers quite the same result, from 150 to 1946 kWh/m². Likewise, plane 1 in roof B has varying values from 106 to 1961 kWh/m², while plane 2 in roof B from 152 to 1955 kWh/m². On the other hand, there is no specific plane in roof C which has such large interval of values. Even though on different directions, the solar radiation gain on the planes of roof C show different result, the values are generally ranging from 1715 to 1963 kWh/m².

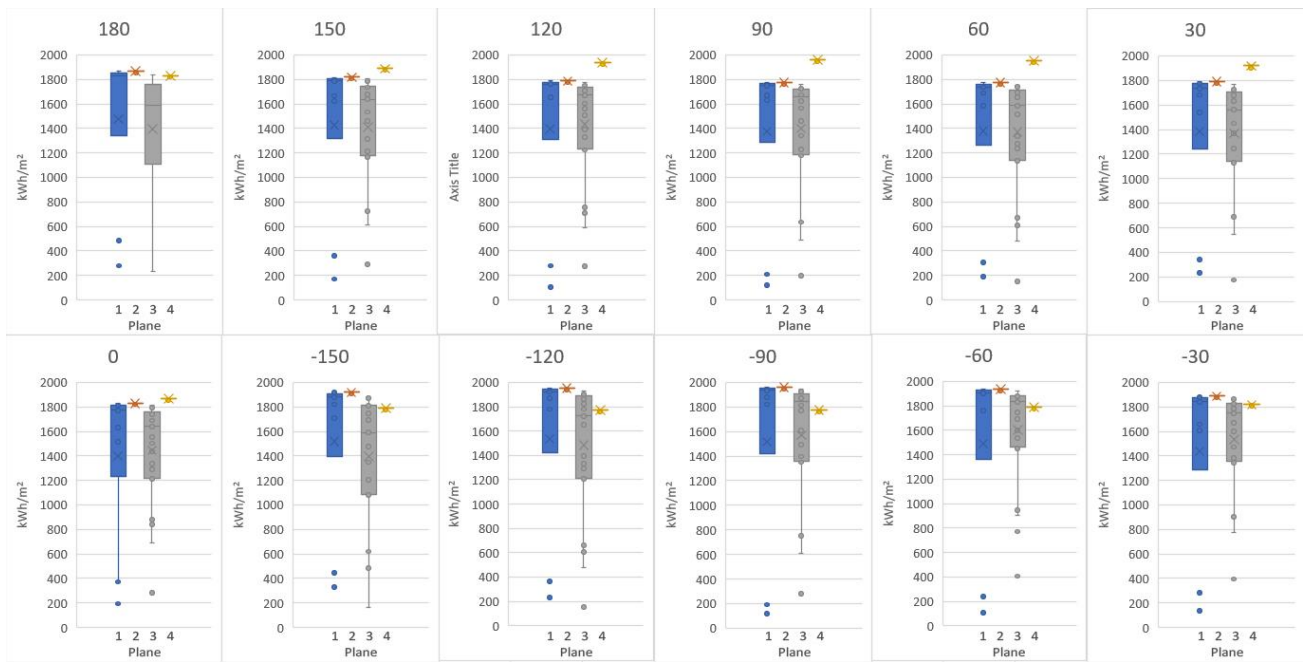


Figure 4. Annual solar radiation gain on Roof A.

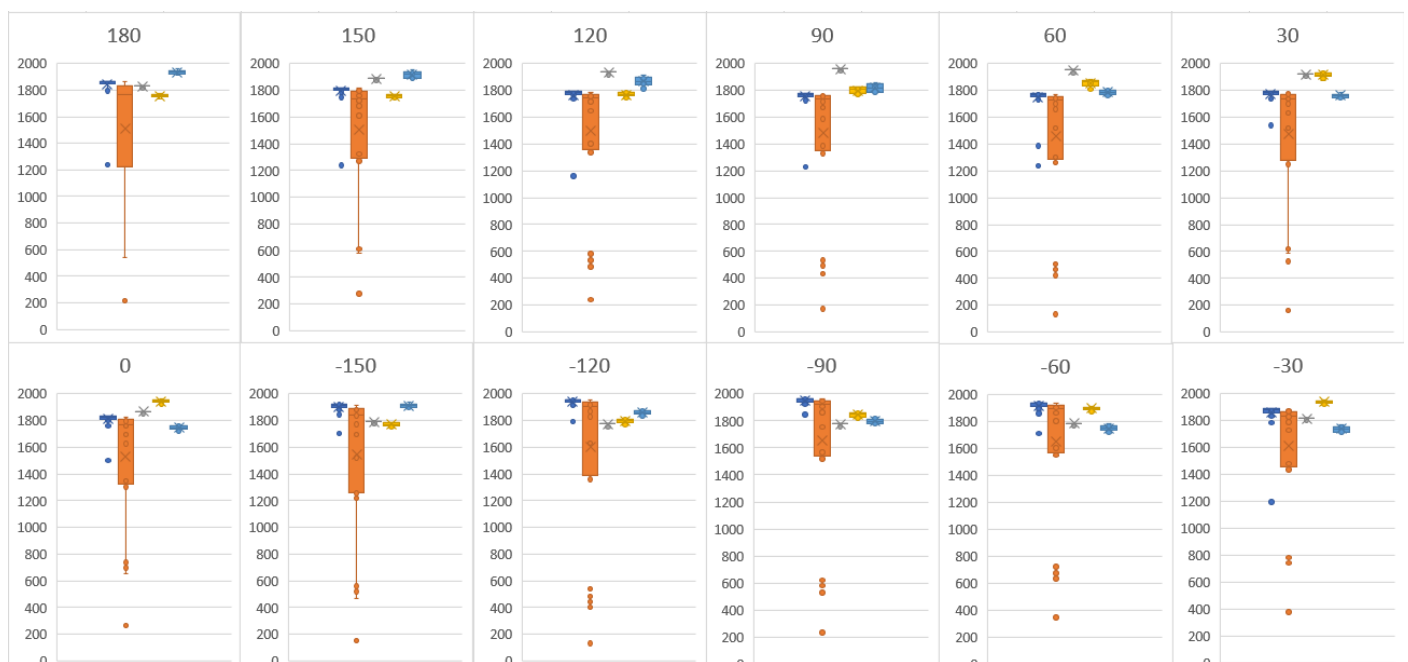


Figure 5. Annual solar radiation gain on Roof B.

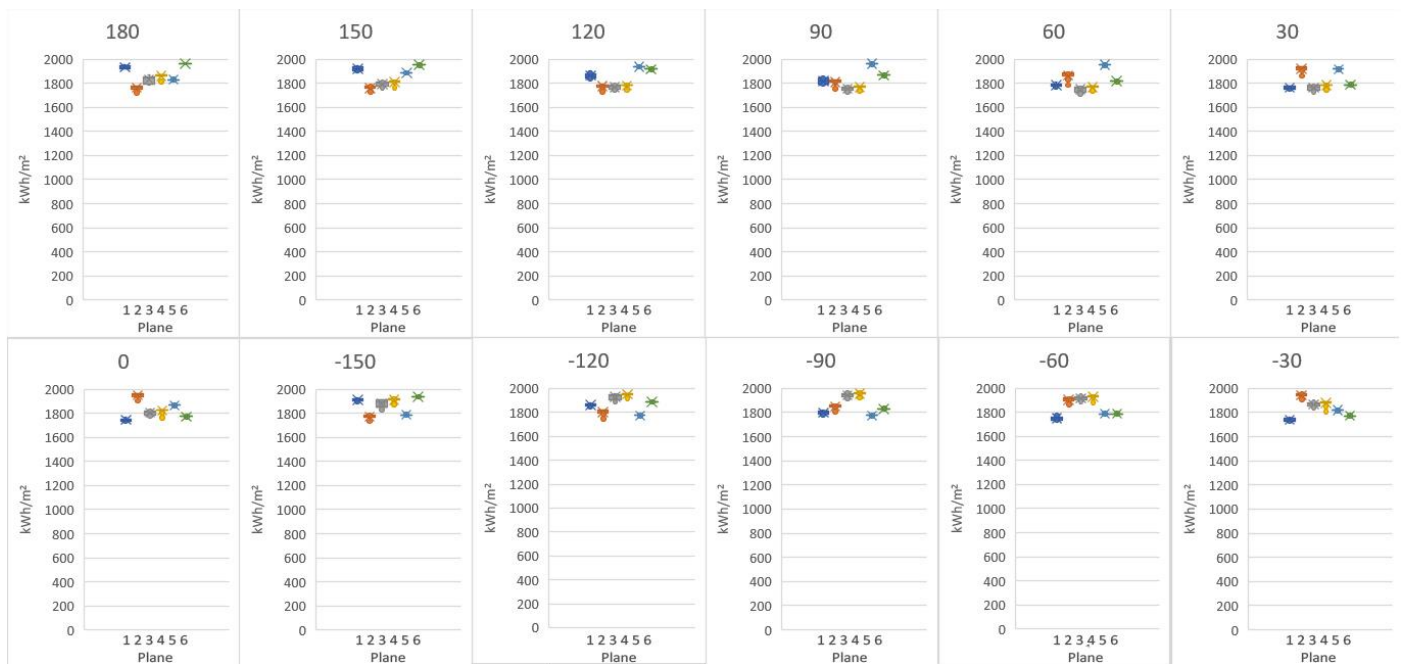


Figure 6. Annual solar radiation gain on Roof C.

The enormous deviation of solar radiation gain in roof A and B is provided by the effect of self-shading. The inconsistency of solar radiation gain on plane renders the roof solar performance low. It is preferable to install PV panel on roof with lower deviation to maximize energy production. Consequently, plane 2 and 4 are recommended as PV installation plane for roof A. Plane 2, 3, and 4 are recommended for roof B. As for roof C, there is no self-shading effect found on the roof, all of the planes are acceptable for PV installation.

3.2. Analysis of PV Mounting Capacity

There is only a slight difference of solar radiation gain in different orientation of roof C which promotes it as the high-performance roof compared to the other roof design. However, when it comes to PV mounting, there are unmountable planes due to the trapezoidal and irregular plane shape in roof C. Roof planes for PV mounting are selected based on the area with no self-shading. As can be seen in Figure 7, there are more space to mount PVpanels on roof A compared to roof B and C. The utilized method of PV packing on roof as demonstrated below is still lacking, as some occupable space is not filled with PV panels. Still the results favor roof A.

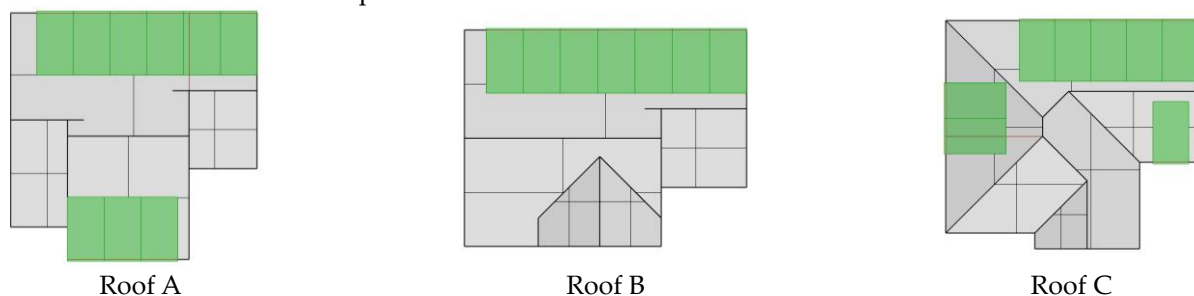


Figure 7. PV mounting capacity on each roof. There are 9 PV panels on roof A, 7 on roof B, and 8 on roof C.

4. Conclusions

Stacked gable roof is the most roof shape found in the design of detached housing in Gorontalo. Some roof shapes such as complex gable, and complex hip roof also observed

in the city. They can be differentiated by the plane shape, directions, and the existence of self-shading. Research on the potential of PV installation on the 3 roofs resulting in stacked gable roof as the best roof shape to provide renewable energy to the housing with a condition, PV panels should not be mounted on the planes which shaded by the other roof parts.

Complex hip roof has planes facing 4 directions. There is no self-shading effect in the roof and all of the planes are suit for PV installation. Nevertheless, the presence of trapezoid and irregular planes poses a hindrance for the installation of bigger PV panels size and limit larger energy production

Author Contributions: Conceptualization, Methodology A.G.D.; Formal Analysis A.G.D. and N.P.; Writing—original draft, A.G.D. and R.; Visualization, Writing—review & editing, N.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Peraturan Presiden Republik Indonesia. Rencana Umum Energi Nasional. 2017.
2. León, E.Z.; Alvarado, R.G.; Arriagada, R.S.; Baeriswy, S. Assessment of integrated performance and roof geometry for solar energy. *Open House Int.* **2016**, *41*, 73–81. <https://doi.org/10.1108/ohi-04-2016-b0010>.
3. Barbón, A.; Ghodbane, M.; Bayón, L.; Said, Z. A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes. *J. Clean. Prod.* **2022**, *365*, 132774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132774>.
4. Bayón-Cueli, C.; Barbón, A.; Fernández-Conde, A.; Bayón, L. Optimal distribution of PV modules on roofs with limited space. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Bari, Italy, 7–10 September 2021. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584710>.
5. Ioannou, A.K.; Stefanakis, N.E.; Boudouvis, A.G. Design optimization of residential grid-connected photovoltaics on rooftops. *Energy Build.* **2014**, *76*, 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.019>.
6. Barbón, A.; Bayón-Cueli, C.; Bayón, L.; Rodríguez-Suanzes, C. Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications. *Appl. Energy* **2022**, *305*, 117802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117802>.
7. Esfahani, S.K.; Karrech, A.; Cameron, R.; Elchalakani, M.; Tenorio, R.; Jerez, F. Optimizing the solar energy capture of residential roof design in the southern hemisphere through Evolutionary Algorithm. *Energy Built Environ.* **2021**, *2*, 406–424. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2020.09.004>.
8. Hachem, C.; Athienitis, A.; Fazio, P. Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Sol. Energy* **2011**, *85*, 1864–1877. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2011.04.027>.
9. Palmer, D.; Cole, I.; Goss, B.; Betts, T.; Gottschalg, R. Detection of Roof Shading for PV Based on Lidar Data Using a Multi-Modal Approach. In Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 14–18 September 2015.
10. Djafar, A.G.; Rahmayanti; Saputra, W.; Kaharu, A. Construction Analysis of Housing's Roof in Gorontalo City. *J. Build. Archit.* **2023**, *1*, 10–15. <https://doi.org/10.56190/jba.v1i1.6>.
11. Djafar, A.G.; Mohamad, Y. Method to assess the potential of photovoltaic panel based on roof design. *Int. J. Appl. Power Eng.* **2022**, *11*, 186. <https://doi.org/10.11591/ijape.v11.i3.pp186-198>.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.