

## ANALISIS ALTERNATIF ASPEK TEKNIS DAN FAKTOR PENENTU KINERJA PENGEMBANGAN PLTS ATAP DI GEDUNG SEKRETARIAT DPRD PROVINSI JAWA TENGAH

Nanang Aribowo<sup>1\*)</sup>, Mochammad Facta<sup>2</sup> dan Singgih Saptadi<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Magister Energi, Sekolah Pasca Sarjana Universitas Diponegoro Semarang

<sup>2</sup> Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

<sup>3</sup> Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

<sup>\*)</sup> E-mail: nanangaribowo@students.undip.ac.id

### Abstrak

Pemanfaatan PLTS atap merupakan strategi penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan mendukung transisi menuju energi terbarukan di Gedung Sekretariat DPRD Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan menentukan konfigurasi aspek teknis PLTS atap yang paling optimal pada area I–K–O dan P–Q–R melalui kombinasi jenis modul PV, jenis inverter, dan kapasitas inverter. Sebanyak 18 alternatif dianalisis menggunakan simulasi PVsyst dengan mempertimbangkan produksi energi, performa ratio (PR), losses, dan kebutuhan luas atap. Hasil analisis menunjukkan bahwa jenis modul PV memiliki pengaruh lebih besar terhadap performa PLTS atap dibandingkan jenis maupun kapasitas inverter. Dalam pemilihan konfigurasi yang sesuai dengan kebutuhan gedung, hasil pembobotan kriteria menggunakan metode AHP menunjukkan bahwa parameter arus dan tegangan output memiliki bobot tertinggi. Berdasarkan analisis teknis dan pembobotan, alternatif terbaik yang direkomendasikan adalah konfigurasi PV modul Longi LR7 dengan inverter Growatt 36 kW untuk area I–K–O, serta Longi LR7 dengan Growatt 110 kW untuk area P–Q–R. Kedua konfigurasi ini diproyeksikan mampu memenuhi sekitar 40% kebutuhan energi gedung dengan kinerja yang optimal.

*Kata kunci: PLTS Atap, PV Modul, Inverter, metode AHP, Gedung Sekretariat DPRD Jawa Tengah*

### Abstract

*The utilization of rooftop photovoltaic (PV) systems is an important strategy to improve energy efficiency and support the transition toward renewable energy at the Secretariat Building of the Central Java Provincial Parliament (DPRD). This study aims to determine the optimal technical configuration aspects of rooftop PV systems for the I–K–O and P–Q–R areas by combining PV module type, inverter type, and inverter capacity. A total of 18 alternatives were analyzed using PVsyst simulations, considering energy production, performance ratio (PR), losses, and required roof area. The analysis results indicate that the PV module type has a greater influence on system performance compared to inverter type or capacity. In selecting a configuration that meets the building's energy needs, the weighting of criteria using the Analytic Hierarchy Process (AHP) shows that output current and voltage parameters have the highest priority. Based on technical analysis and criteria weighting, the recommended configurations are the Longi LR7 PV module paired with a 36 kW Growatt inverter for the I–K–O area, and the Longi LR7 with a 110 kW Growatt inverter for the P–Q–R area. These two configurations are projected to meet approximately 40% of the building's energy demand with optimal performance.*

*Keywords: rooftop PV system, PV module, inverter, AHP method, Secretariat Building of Central Java*

### 1. Pendahuluan

Indonesia melalui kebijakan Enhanced Nationally Determined Contributions (ENDC) dengan optimis mampu penurunan emisi GRK menjadi sebesar 31,89% dengan upaya sendiri dan 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 [1]. Pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi langkah utama yang dilakukan dalam rangka mencapai target ENDC dan NZE tersebut. Indonesia telah menetapkan target bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 sebagai bagian dari komitmen dalam mengurangi emisi gas

rumah kaca [2]. Sebagai turunan dari kebijakan energi nasional, dari sektor ketenagalistrikan mendukung transisi energi hijau tersebut melalui penyusunan Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN). Dokumen ini menetapkan target bauran energi baru dan terbarukan (EBT) minimum 23% pada tahun 2025, dan terus ditingkatkan hingga 25% pada tahun 2038 [3].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menunjukkan potensi energi terbarukan yang paling implematif. Teknologi ini bekerja berdasarkan efek fotovoltaiik. Modul fotovoltaiik (PV) menjadi komponen utama PLTS, di mana

luas modul yang terpasang sangat menentukan besarnya energi listrik yang dihasilkan. Oleh karena itu, kebutuhan lahan yang luas untuk pemasangan panel menjadi salah satu tantangan pengembangan PLTS, terutama di daerah dengan keterbatasan ruang terbuka [4]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pengembangan PLTS atap menjadi solusi strategis dengan memanfaatkan atap bangunan yang ada sebagai lokasi instalasi. Fokus utama model PLTS Atap adalah pemenuhan kebutuhan listrik internal bangunan, sehingga cocok untuk perumahan, gedung pemerintah, dan industri yang ingin mandiri energi [5].

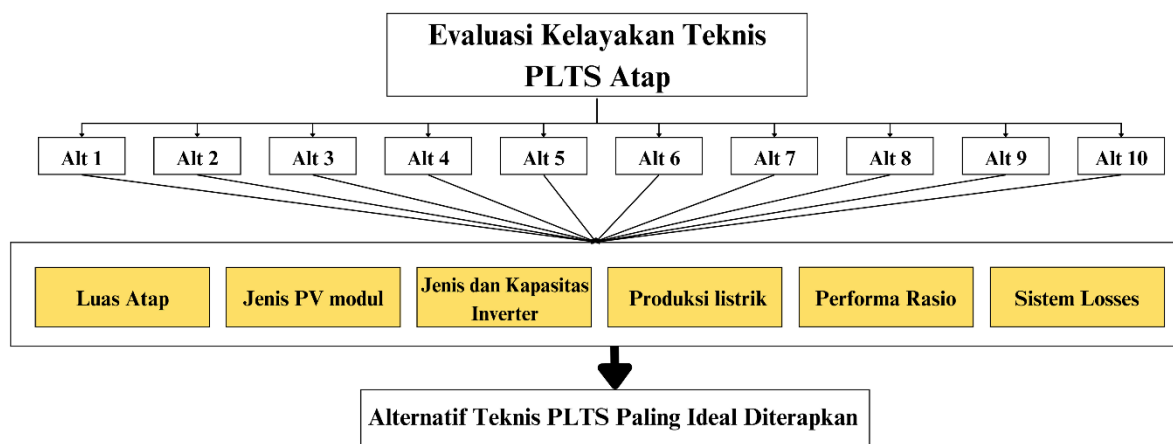
Gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah telah dilengkapi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap berkapasitas 30 kWp sejak tahun 2019. PLTS atap ini terintegrasi secara on-grid dengan jaringan PLN berkapasitas 865 kVA. Sebagai sumber cadangan, gedung ini juga dilengkapi dengan genset berkapasitas 500 kVA [6]. PLTS atap tersebut hanya memanfaatkan area seluas 174 m<sup>2</sup> atau sekitar 11% dari total luas atap bangunan 1.646 m<sup>2</sup>. Sisa luas atap yang masih tersedia menunjukkan potensi untuk pengembangan kapasitas PLTS.

Pengembangan PLTS atap memerlukan kajian evaluasi kelayakan teknis yang mempertimbangkan beberapa kriteria teknis. Kelayakan teknis PLTS atap dianalisis berdasarkan 4 aspek utama yaitu kompatibilitas, efisiensi, keandalan, dan ketersediaan [7]. Dalam konteks gedung sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah, pemilihan aspek teknis PLTS atap perlu memenuhi standar teknis sekaligus disesuaikan dengan kebutuhan konsumsi energi gedung penelitian ini menerapkan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) sebagai pendekatan sistematis untuk mendukung proses pengambilan keputusan multi-kriteria.

### 1.1. Konseptual Penelitian

Fokus penelitian ini yaitu memilih aspek teknis instalasi pengembangan PLTS Atap terbaik yang paling ideal dengan kebutuhan atau beban gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah. Aspek lain seperti kelayakan finansial, lingkungan, dan kebijakan tidak menjadi pertimbangan dalam pemilihan aspek teknis instalasi PLTS Atap pengembangan. Memodifikasi aspek kelayakan teknis yang dikemukakan Ghasempour et al., 2022 [7], pada penelitian ini kelayakan teknis dianalisis berdasarkan penilaian aspek luas area atap yang tersedia, jenis PV modul, jenis dan kapasitas inverter, performance ratio dan system losses, serta produksi listrik yang diperoleh. Faktor-faktor tersebut memiliki dampak langsung terhadap kinerja dan efisiensi sistem. Kerangka konseptual disajikan pada Gambar 1.

- Luas area atap menjadi faktor pembatas pertama karena produksi listrik PLTS bergantung pada total luas modul pv yang dapat di instal di area atap [4].
- Berdasarkan bahan penyusunnya, PV modul terbagi menjadi tiga jenis yaitu mono-crystalline, poly-crystalline, dan amorphous silicon. Modul mono-crystalline memiliki efisiensi tertinggi pada kondisi radiasi standar 1000 W/m<sup>2</sup> sebesar 15,27%, serta menunjukkan kinerja yang relatif stabil [8]. Ukuran (panjang x lebar) tiap modul juga beragam sehingga perlu disesuaikan dengan ketersediaan luas atap.
- Inverter berfungsi sebagai penghubung antara sisi DC panel PV dengan sisi AC jaringan listrik [9], Untuk menghindari clipping losses, kapasitas inverter (AC) dibuat sedikit lebih besar biasanya dibuat sedikit lebih besar dari kapasitas produksi PV modul [10].



Gambar 1. Kerangka Konseptual Penelitian

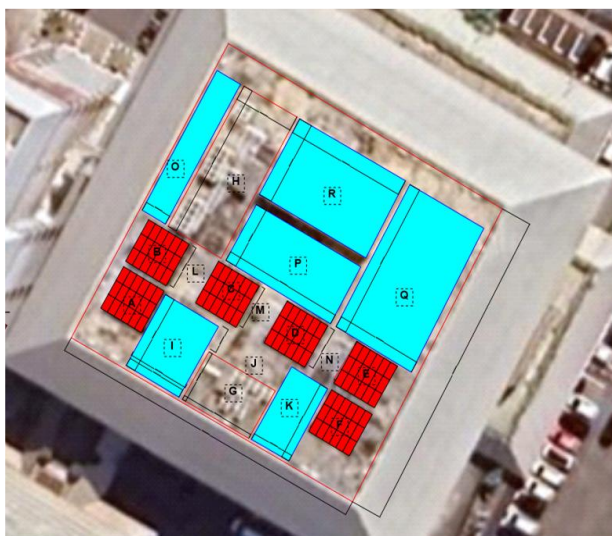
- Performance ratio (PR) menggambarkan kinerja sistem PLTS secara keseluruhan termasuk pengaruh parameter lingkungan seperti temperatur, bayangan, dan cuaca yang tidak dibahas detail dalam penelitian.
- Sistem lossess (SL) menggambarkan penurunan kinerja sistem PLTS akibat parameter komponen sistem seperti kabel, konfigurasi array, maupun komponen lain yang penyebab penurunan produksi listrik.
- Produksi listrik dari PLTS atap harus disesuaikan dengan kebutuhan listrik gedung. Pada sistem on-grid tanpa baterai, surplus produksi tidak dapat disimpan dan berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024, surplus listrik yang dialirkan ke jaringan PLN juga tidak memperoleh kompensasi finansial [11].

## 2. Metode

### 2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah yang secara astronomis berada pada koordinat 6° 59' 35" LS dan 110° 25' 16" BT, atau salah satu gedung yang berada pada kompleks gedung kantor pemerintah provinsi jawa tengah yang berlokasi di Jl Jl. Pahlawan No.9, Mugassari Kota Semarang.

Dalam memenuhi kebutuhan energinya, gedung ini disupply dari tiga sumber energi yaitu yang utama dari jaringan PLN berkapasitas 865 kVA, kedua untuk menghemat pemakaian listrik dari PLN terinstal juga PLTS atap on-grid berkapasitas 30 kWp, terakhir sebagai cadangan energi saat terjadi pemadaman PLN tersambung secara lokal genset berkapasita 500 kVA. Pengembangan PLTS atap dilakukan untuk memaksimalkan potensi atap gedung guna meningkatkan potensi penghematan energi. Kondisi luas atap gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah dijelaskan dalam Gambar 2 dan Tabel 1.



**Gambar 2. Kondisi Atap Gedung Sekertariat DPRD Jawa Tengah**

**Tabel 1. Kondisi Luas Atap Gedung**

| Area  | Panjang (m) | Lebar (m) | Luas (m <sup>2</sup> ) | Keterangan                 |
|-------|-------------|-----------|------------------------|----------------------------|
| A     | 5,3         | 5,5       | 29,2                   | Area Atap Eksisting        |
| B     | 5,6         | 5,7       | 31,9                   | Area Atap Eksisting        |
| C     | 5,4         | 6,0       | 32,4                   | Area Atap Eksisting        |
| D     | 5,3         | 6,3       | 33,4                   | Area Atap Eksisting        |
| E     | 5,5         | 6,0       | 33,0                   | Area Atap Eksisting        |
| F     | 5,2         | 6,0       | 31,2                   | Area Atap Eksisting        |
| G     | 6,7         | 9,7       | 65,0                   | Sarana Prasarana Eksisting |
| H     | 19,7        | 7,7       | 151,7                  | Sarana Prasarana Eksisting |
| I     | 10,0        | 7,8       | 78,0                   | Potensi PLTS pengembangan  |
| J     | 3,2         | 9,8       | 31,4                   | Sarana Prasarana Eksisting |
| K     | 5,5         | 10,1      | 55,6                   | Potensi PLTS pengembangan  |
| L     | 5,6         | 3,4       | 19,0                   | Sarana Prasarana Eksisting |
| M     | 5,5         | 3,3       | 18,2                   | Sarana Prasarana Eksisting |
| N     | 5,4         | 3,4       | 18,4                   | Sarana Prasarana Eksisting |
| O     | 19,6        | 3,4       | 66,6                   | Potensi PLTS pengembangan  |
| P     | 7,8         | 15,4      | 120,1                  | Potensi PLTS pengembangan  |
| Q     | 19,8        | 11,1      | 219,8                  | Potensi PLTS pengembangan  |
| R     | 10,6        | 15,5      | 164,3                  | Potensi PLTS pengembangan  |
| Total | 40,6        | 41,1      | 1668,7                 |                            |

Analisis potensi pengembangan PLTS atap dilakukan berdasarkan identifikasi luasan area atap yang tersedia menggunakan citra satelit Google Earth dengan historical imagery tanggal 31 Juli 2024. Dari total luas atap Gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah sebesar 1.668,7 m<sup>2</sup>, area yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan PLTS dikurangi dengan luasan PLTS atap eksisting serta bagian atap yang telah digunakan untuk sarana prasarana lainnya. Diketahui bahwa terdapat potensi area pengembangan PLTS atap seluas 704,4 m<sup>2</sup>, yang terbagi menjadi dua lokasi, yaitu 200 m<sup>2</sup> di area I-K-O dan 504 m<sup>2</sup> di area P-Q-R. Analisis alternatif konfigurasi pengembangan PLTS atap difokuskan pada dua area potensial ini.

Kebutuhan energi pengembangan maksimal Gedung Berliah dihitung berdasarkan perbedaan antara konsumsi energi maksimum pada periode Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dengan produksi energi dari sistem PLTS atap eksisting. Konsumsi energi pada LWBP digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan energi pengembangan karena produksi energi dari PLTS atap terjadi pada jam-jam siang hari yang bertepatan dengan periode LWBP [12].

Dari hasil analisis invoice pembayaran tagihan listrik, diketahui nilai beban LWBP rata-rata Gedung sebesar 129.470 Wh, beban minimal 75.737 Wh dan beban maksimal 164.561 Wh pada pemakaian Januari 2020 - Desember 2024. Produksi PLTS atap eksisting 30 kWp

yang didapatkan dari data monitoring server.growatt.com selama Januari 2020 – Desember 2024 sebesar 10.782 Wh.

Untuk menentukan kapasitas pengembangan PLTS atap yang ideal, dilakukan analisis terhadap produksi maksimal energi PLTS pengembangan yang dibutuhkan. Energi maksimal yang dibutuhkan dari sistem PLTS pengembangan dihitung menggunakan persamaan 1.

$$E_{\text{pengembangan}} = E_{\text{LWBP Gedung}} - E_{\text{PLTS eksisting}} \quad (1)$$

$$E_{\text{pengembangan maksimal}} = E_{\text{LWBP maksimal Gedung}} - E_{\text{PLTS eksisting}}$$

$$= 164.561 - 10.872$$

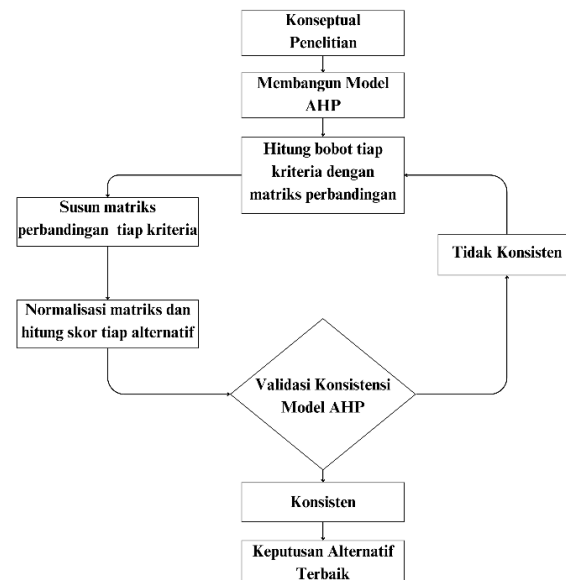
$$= 153.779 \text{ Wh}$$

## 2.2. Alternatif Spesifikasi PLTS Atap

Alternatif spesifikasi PLTS atap disusun berdasarkan kombinasi jenis panel surya dan inverter yang diterapkan pada dua lokasi pemasangan, yakni Area I-K-O dan Area P-Q-R. Dua jenis panel yang digunakan adalah LR7-72HVVH 670M dan ISGM10-HCTC620, sedangkan inverter yang dipertimbangkan terdiri atas merek Huawei dan Growatt. Pada Area I-K-O, kapasitas inverter yang diuji terdiri dari dua varian, yaitu 36 kW dan 40 kW. Sementara itu, pada Area P-Q-R terdapat empat varian kapasitas inverter, yaitu 110 kW, 111 kW, 120 kW, dan 125 kW. Kombinasi dari seluruh komponen tersebut menghasilkan delapan alternatif konfigurasi teknis untuk Area I-K-O dan sepuluh alternatif untuk Area P-Q-R, dijelaskan dalam Tabel 2.

Seluruh alternatif kemudian dianalisis menggunakan simulasi perangkat lunak PVsyst 7.2 untuk mengevaluasi performa teknis masing-masing alternatif konfigurasi. Melalui simulasi ini, diperoleh nilai-nilai penting seperti produksi listrik, rasio arus DC/AC, Performance Ratio (PR), serta sistem losses, yang selanjutnya digunakan sebagai kriteria evaluasi.

menggambarkan masalah secara keseluruhan. Evaluasi kelayakan aspek teknis PLTS Atap pengembangan dilakukan bertujuan untuk mengetahui alternatif teknis PLTS atap terbaik atau ideal diterapkan. Langkah proses AHP selanjutnya disajikan dalam Gambar 3.



**Gambar 3. Alur Proses Analisis Hirarki Proses (AHP)**

Kriteria penentu kelayakan teknis PLTS atap yang di evaluasi dalam penelitian ini yaitu luas area, jenis panel PV, jenis inverter, produksi listrik, performance ratio, serta sistem losses. Seluruh kriteria ini kemudian dibandingkan tingkat kepentingannya secara berpasangan untuk menentukan bobot relatifnya. Perbandingan tiap kriteria dilakukan berdasarkan pendapat dari ahli atau stakeholder yang relevan. Proses ini menggunakan sembilan skala kepentingan yang dikenal sebagai skala Saaty [14], dengan ketentuan sesuai dengan Tabel 3.

**Tabel 2. Alternatif Usulan Teknis Pengembangan PLTS Atap di Gedung Pemerintah Provinsi Jawa Tengah**

| Lambang       | Area I-K-O                     | Area P-Q-R                      |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Alternatif 1  | LR7-72HVVH 670M, Huawei 36 kW  | LR7-72HVVH 670M, Huawei 110 kW  |
| Alternatif 2  | LR7-72HVVH 670M, Huawei 40 kW  | LR7-72HVVH 670M, Huawei 111 kW  |
| Alternatif 3  | LR7-72HVVH 670M, Growatt 36 kW | LR7-72HVVH 670M, Huawei 125 kW  |
| Alternatif 4  | LR7-72HVVH 670M, Growatt 40 kW | LR7-72HVVH 670M, Growatt 110 kW |
| Alternatif 5  | ISGM10-HCTC620, Huawei 36 kW   | LR7-72HVVH 670M, Growatt 120 kW |
| Alternatif 6  | ISGM10-HCTC620, Huawei 40 kW   | ISGM10-HCTC620, Huawei 110 kW   |
| Alternatif 7  | ISGM10-HCTC620, Growatt 36 kW  | ISGM10-HCTC620, Huawei 111 kW   |
| Alternatif 8  | ISGM10-HCTC620, Growatt 40 kW  | ISGM10-HCTC620, Huawei 125 kW   |
| Alternatif 9  | -                              | ISGM10-HCTC620, Growatt 110 kW  |
| Alternatif 10 | -                              | ISGM10-HCTC620, Growatt 120 kW  |

## 2.3. Analisis Hirarki Proses (AHP) Alternatif Aspek Teknis PLTS Atap

AHP adalah suatu metode analisis yang digunakan untuk menentukan urutan prioritas suatu rencana [13]. Proses AHP dimulai dengan membangun struktur hierarki yang

Penilaian dilakukan terhadap enam kriteria utama yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap ahli memberikan pendapat dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan (pairwise comparison), yang kemudian digabungkan menggunakan metode rata-rata geometrik untuk

mendapatkan nilai konsensus. Profil para ahli yang menjadi narasumber penelitian disajikan dalam Tabel 4.

**Tabel 3. Skala Saaty**

| Nilai        | Definisi   | Penjelasan  |
|--------------|--|---|
| 1            | Sama pentingnya  | Kedua aktivitas memberikan kontribusi yang sama terhadap tujuan.  |
| 3            | Agak lebih penting   | Pengalaman dan penilaian sedikit lebih menyukai satu aktivitas dibandingkan yang lain.  |
| 5            | Sangat penting   | Pengalaman dan penilaian sangat menyukai satu aktivitas dibandingkan yang lain.   |
| 7            | Sangat penting dan terbukti  | Aktivitas sangat disukai dan dominasinya telah terbukti dalam praktik.  |
| 9            | Sangat penting sekali  | Bukti yang mendukung satu aktivitas dibandingkan yang lain adalah pada tingkat tertinggi yang mungkin.  |
| 2,4,6,8      | Nilai antara   | Ketika diperlukan kompromi antara dua penilaian yang berdekatan.  |
| Timbal balik | Jika aktivitas i diberi salah satu angka di atas, dibandingkan dengan aktivitas j, maka j memiliki nilai sebaliknya. | Jika kita memberikan nilai tertentu pada aktivitas A saat dibandingkan dengan aktivitas B, maka nilai pada aktivitas B saat dibandingkan aktivitas A adalah kebalikannya. |

**Tabel 4. Profil Para Ahli (Narasumber)**

| Ahli | Jabatan  | Lokasi Tugas                                   |
|------|--|--|
| 1    | Kepala Biro Infrastruktur dan SDA Setda Provinsi Jawa Tengah                       | Kantor Sekretariat Daerah Provinsi Jawa Tengah |
| 2    | Teknisi Kantor Sekretariat Daerah  |  |
| 3    | Analisis Kebijakan Ahli Muda Biro Infrastruktur dan SDA Setda Provinsi Jawa Tengah |  |

Dalam analisis AHP, kualitas dari latarbelakang pemilihan ahli sebagai narasumber lebih diutamakan dibandingkan kuantitas atau jumlah ahli yang terlibat sebagai narasumber [15]. Keterlibatan tiga ahli dalam penelitian ini dianggap cukup, mengingat profil keahlian dan pengalaman teknis langsung dalam pengelolaan sistem kelistrikan di Kantor Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah.

Perhitungan bobot tiap kriteria kemudian dilakukan terhadap hasil tabel perbandingan yang diperoleh dari pendapat para ahli. Perhitungan tersebut dilakukan dengan persamaan 2.

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^n c_{kj}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Nilai Alt (1)} = & (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{Luas}) + (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{PV}) \\ & + (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{Inverter}) + (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{produksi listrik}) \\ & + (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{PR}) \\ & + (Skor_{Alt\ 1} \times Bobot_{Losses}) \end{aligned} \quad (4)$$

Perhitungan lanjutan dilakukan dengan membandingkan nilai indeks konsistensi (CI) dengan random index (RI), sehingga diperoleh nilai Rasio konsistensi (CR) untuk mengevaluasi kebenaran hasil pembobotan setiap aspek penentu keputusan (Persamaan 2). Indeks Acak (RI) berasal dari sampel 500 matriks timbal balik yang dihasilkan secara acak [16], seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai CR harus kurang dari 0,10 atau 10% jika lebih dari itu maka skala penilaian bobot dianggap tidak konsisten atau tidak valid [14].

$$\lambda_{max} = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n c_{ij} \times w_j}; CI = \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1}; CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

**Tabel 5. Nilai RI berdasarkan banyaknya kriteria**

| n  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0,52 | 0,88 | 1,11 | 1,25 | 1,34 | 1,40 |

Penilaian terhadap alternatif aspek teknis dilakukan dengan menggunakan skala skor 1 hingga 5. Penentuan skor didasarkan pada kinerja masing-masing alternatif PLTS atap serta tingkat kesesuaiannya dengan kebutuhan daya gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah. Tabel 5 menjelaskan kriteria penilaian untuk setiap parameter pada rentang skor 1 hingga 5.

**Tabel 6. Kriteria Penilaian Skor Alternatif Spesifikasi PLTS Atap Gedung**

| Parameter                    | Skor 1                                 | Skor 2         | Skor 3        | Skor 4  | Skor 5                         |
|------------------------------|--|----------------|---------------|---------|--------------------------------|
| Luas Area Modul              | Sangat tidak efisien (perlu area luas) | Kurang efisien | Cukup efisien | Efisien | Sangat efisien (minim area)    |
| Jenis Modul PV               | Sangat tidak efisien                   | Kurang efisien | Cukup efisien | Efisien | Sangat efisien                 |
| Jenis dan kapasitas Inverter | Sangat tidak stabil                    | Kurang stabil  | Cukup stabil  | Stabil  | Sangat stabil                  |
| Produksi Listrik             | Sangat tidak sesuai dengan kebutuhan   | Kurang sesuai  | Cukup sesuai  | Sesuai  | Sangat sesuai dengan kebutuhan |
| Performanc e Ratio           | Sangat rendah                          | Rendah         | Sedang        | Tinggi  | Sangat tinggi                  |
| Total Losses                 | Sangat besar                           | Besar          | Sedang        | Kecil   | Sangat kecil                   |

Secara matematis pengambilan keputusan alternatif aspek teknis PLTS atap yang paling ideal untuk dikembangkan, dihitung menggunakan rumus persamaan 4. Total nilai alternatif tertinggi merupakan keputusan yang terbaik atau paling ideal yang akan dipilih.

### 3. Hasil dan Analisis

#### 3.1. Hasil Simulasi

Gambar 2 menunjukkan bahwa atap gedung terbagi menjadi dua area, yakni I-K-O dan P-Q-R, sehingga pengembangan PLTS atap dirancang dengan dua array terpisah. Untuk area I-K-O disimulasikan delapan alternatif aspek, sedangkan area P-Q-R memiliki sepuluh alternatif aspek. Hasil simulasi terhadap 18 alternatif aspek, yang mengombinasikan jenis modul, inverter, dan kapasitasnya, menunjukkan adanya perbedaan performa PLTS atap tiap alternatif spesifikasi pada kedua area.

##### 3.1.1. Hasil Simulasi Area I-K-O

Simulasi teknis pengembangan sistem PLTS atap pada area I-K-O dilakukan untuk delapan alternatif konfigurasi yang disusun berdasarkan kombinasi dua jenis panel surya dan dua jenis inverter dengan masing-masing kapasitas 36 kW dan 40 kW. Jenis panel yang digunakan terdiri atas Longi LR7 dan ISGM10, sementara inverter yang diuji meliputi Huawei dan Growatt pada kapasitas 36 dan 40 kW. Tabel 7 menunjukkan hasil simulasi dari tiap alternatif.

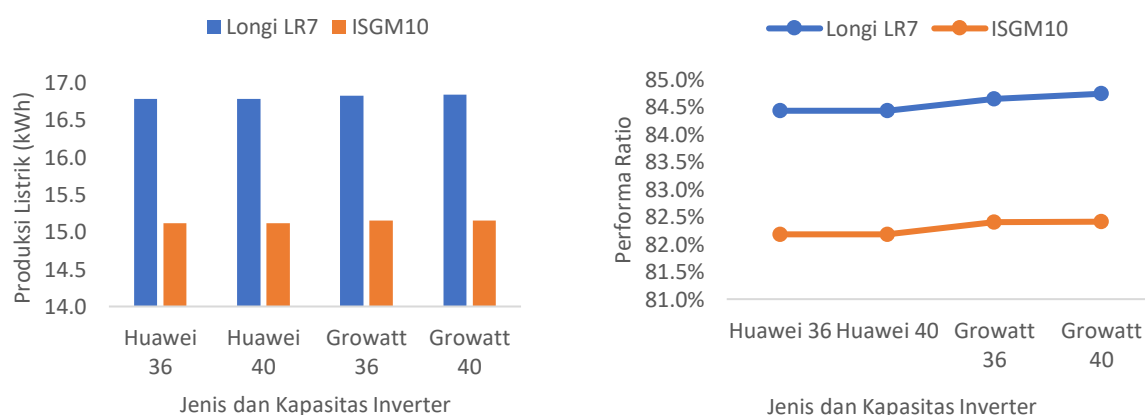
Alternatif dengan modul PV Longi LR7 secara konsisten menghasilkan produksi listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan modul PV ISGM10 pada semua kombinasi inverter, dengan selisih sekitar 1,6 kWh / hari. Dari sisi jenis inverter, perbedaannya terhadap produksi listrik relatif kecil, baik inverter Huawei maupun Growatt.

Namun, jika dilihat dari nilai performa ratio, inverter Growatt cenderung memberikan nilai yang lebih baik dibandingkan Huawei, terutama pada kapasitas 40 kW. Secara keseluruhan, analisis lebih detail mengenai pengaruh jenis modul PV, jenis inverter, dan kapasitas inverter terhadap performa PLTS atap di area I-K-O dapat dilihat pada Gambar 4.

Rasio DC/AC berpengaruh nyata terhadap kinerja sistem. Nilai rasio mendekati 1 cenderung lebih efektif. Nilai rasio DC/AC ideal berkisar antara 1.1–1.3 untuk memaksimalkan pemanfaatan inverter tanpa overloading [17]. Seluruh alternatif konfigurasi pada Area I-K-O memiliki nilai rasio DC/AC yang tergolong ideal. Alternatif 1 dan 3 memiliki rasio tertinggi yaitu 1,27, yang berpotensi mengurangi efisiensi inverter karena kapasitas inverter lebih kecil dibanding daya puncak panel [10].

Tabel 7. Hasil simulasi tiap alternatif pada area I-K-O

| Aspek Teknis          | Alternatif Spesifikasi PLTS Atap |           |           |           |        |        |         |         |
|-----------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|---------|---------|
|                       | 1                                | 2         | 3         | 4         | 5      | 6      | 7       | 8       |
| Luas area (m2)        | 184                              | 184       | 184       | 184       | 190    | 190    | 190     | 190     |
| Jenis Modul PV        | Longi LR7                        | Longi LR7 | Longi LR7 | Longi LR7 | ISGM10 | ISGM10 | ISGM10  | ISGM10  |
| Inverter              | Huawei                           | Huawei    | Growatt   | Growatt   | Huawei | Huawei | Growatt | Growatt |
|                       | 36 kW                            | 40 kW     | 36 kW     | 40 kW     | 36 kW  | 40 kW  | 36 kW   | 40 kW   |
| Rasio DC/AC           | 1,27                             | 1,14      | 1,27      | 1,14      | 1,17   | 1,05   | 1,17    | 1,05    |
| Performance Ratio (%) | 84,43%                           | 84,43%    | 84,65%    | 84,74%    | 82,18% | 82,18% | 82,40%  | 82,41%  |
| Total losses (%)      | 15,22%                           | 15,23%    | 14,99%    | 14,88%    | 18,41% | 18,41% | 18,13%  | 18,14%  |
| Produksi Listrik (Wh) | 16.782                           | 16.782    | 16.824    | 16.843    | 15.113 | 15.113 | 15.155  | 15.155  |
| Kapasitas PLTS (kWp)  | 45,6                             | 45,6      | 45,6      | 45,6      | 42,2   | 42,4   | 42,2    | 42,2    |



Gambar 4. Pengaruh Kombinasi Modul PV dan Inverter terhadap Performa PLTS Area I-K-O



### 3.1.2. Hasil Simulasi Area P-Q-R

Pengembangan PLTS atap pada area P-Q-R disimulasikan dengan sepuluh alternatif konfigurasi, yang merupakan kombinasi dari dua jenis modul surya (Longi LR7 dan ISGM10), dua merek inverter (Huawei dan Growatt), serta empat kapasitas inverter yang berbeda (110 kW, 111 kW, 120 kW, dan 125 kW). Hasil simulasi dari tiap alternatif aspek teknis disajikan dalam Tabel 8.

Pada area P-Q-R, modul PV Longi LR7 kembali menunjukkan keunggulan produksi listrik dibandingkan ISGM10 pada semua kombinasi inverter, dengan selisih produksi harian sekitar 6 kWh. Rata-rata produksi listrik Longi LR7 berkisar di angka 44,5–44,7 kWh per hari, sedangkan ISGM10 hanya berada di kisaran 38,8–39,1 kWh. Hal ini konsisten dengan perbedaan efisiensi modul, di mana Longi LR7 memiliki kemampuan konversi energi matahari yang lebih tinggi serta karakteristik termal yang lebih stabil.

Pada ISGM10, PR sedikit menurun pada Huawei 111 tetapi kembali meningkat pada skenario Growatt, menunjukkan bahwa efisiensi internal inverter Growatt lebih mampu mempertahankan stabilitas performa pada kapasitas tinggi. Pengaruh jenis modul PV, jenis inverter, dan kapasitas inverter terhadap performa PLTS atap di area P-Q-R dapat dilihat pada Gambar 5.

Jenis inverter dan kapasitasnya memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap produksi listrik. Pada Longi LR7, peningkatan kapasitas inverter dari 110 kW ke 125 kW atau perpindahan dari Huawei ke Growatt tidak memberikan kenaikan produksi listrik yang signifikan. Namun demikian, performa ratio (PR) menunjukkan pola yang sedikit berbeda. Nilai PR Longi LR7 cenderung meningkat dengan kapasitas inverter yang lebih besar dan lebih stabil pada Growatt, dengan kisaran 84,2–84,5%.

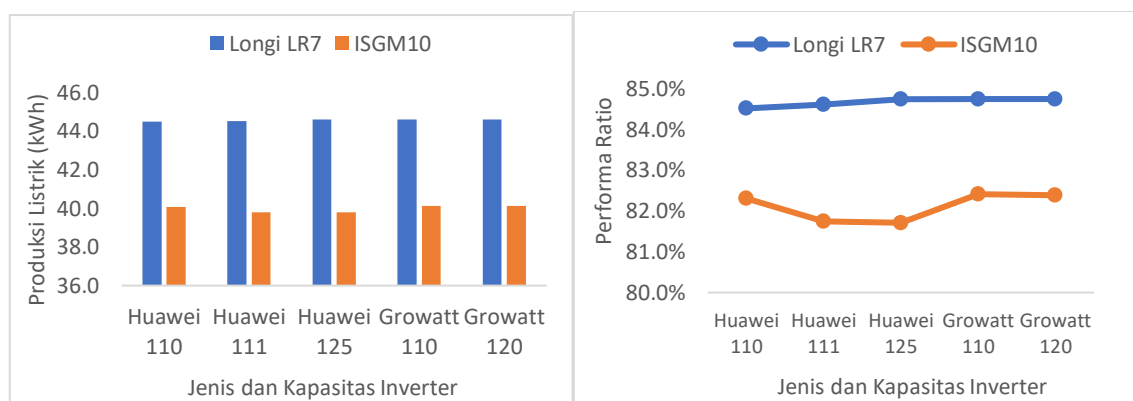
Rasio DC/AC merupakan parameter penting yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan PLTS atap. Alternatif dengan rasio DC/AC mendekati 1,00, seperti pada alternatif 5 (1,00) dan 6 (1,01), menunjukkan kinerja optimal. Sebaliknya, rasio yang terlalu rendah, di mana inverter bekerja pada beban rendah menyebabkan efisiensi sistem menurun [10]. Seperti yang terjadi pada alternatif 8 (0,89), produksi listrik menurun hingga hanya 39.791 Wh dan memiliki performa ratio terendah sebesar 81,71%.

### 3.2. Pembobotan Kriteria

Bobot kriteria diperoleh dari hasil sintesis pendapat tiga orang ahli menggunakan metode Analytic Hierarchy Process (AHP). Proses penggabungan dilakukan dengan pendekatan rata-rata geometrik terhadap nilai perbandingan berpasangan tiap ahli.

**Tabel 1. Hasil simulasi pada area P-Q-R**

| Parameter             | Alternatif Spesifikasi PLTS Atap |           |           |           |           |          |          |          |          |          |
|-----------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                       | 1                                | 2         | 3         | 4         | 5         | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| Luas area (m2)        | 486                              | 486       | 486       | 486       | 486       | 503      | 503      | 503      | 503      | 503      |
| Jenis Modul PV        | Longi LR7                        | Longi LR7 | Longi LR7 | Longi LR7 | Longi LR7 | ISGM10   | ISGM10   | ISGM10   | ISGM10   | ISGM10   |
| Inverter              | Huawei                           | Huawei    | Huawei    | Growatt   | Growatt   | Huawei   | Huawei   | Huawei   | Growatt  | Growatt  |
|                       | 110 kW                           | 111 kW    | 125 kW    | 110 kW    | 120 kW    | 110 kW   | 111 kW   | 125 kW   | 110 kW   | 120 kW   |
| Rasio DC/AC           | 1,10                             | 1,09      | 0,96      | 1,10      | 1         | 1,01     | 1        | 0,89     | 1,01     | 0,93     |
| Performance Ratio (%) | 84,51                            | 84,61     | 84,73     | 84,74     | 84,74     | 82,30    | 81,75    | 81,71    | 82,41    | 82,39    |
| Total losses (%)      | 15,14                            | 15,02     | 14,89     | 14,87     | 14,87     | 18,27    | 18,93    | 18,97    | 18,14    | 18,15    |
| Produksi Listrik (Wh) | 44.467,6                         | 44.513,9  | 44.583,3  | 44.583,3  | 44.583,3  | 40.069,4 | 39.791,7 | 39.791,7 | 40.115,7 | 40.115,7 |
| Kapasitas PLTS (kWp)  | 112                              | 112       | 112       | 112       | 112       | 112      | 112      | 112      | 112      | 112      |



**Gambar 1. Pengaruh Kombinasi Modul PV dan Inverter terhadap Performa PLTS Area P-Q-R**

Nilai Consistency Ratio (CR) sebesar -0,006 menunjukkan bahwa hasil pembobotan tersebut konsisten, karena berada di bawah ambang batas 0,1 sebagaimana disyaratkan dalam metode AHP (<0,1). Tabel 9 menunjukkan hasil pembobotan untuk enam kriteria yang digunakan dalam penilaian alternatif spesifikasi teknis PLTS atap.

Tabel 9. Bobot tiap kriteria

| Kriteria                     | %      | Normalisasi |
|------------------------------|--------|-------------|
| Luas Atap                    | 7,25   | 0,25        |
| Jenis PV modul               | 24,76  | 0,86        |
| Jenis dan Kapasitas Inverter | 10,88  | 0,38        |
| Produksi listrik             | 28,90  | 1,00        |
| Performa Rasio               | 19,66  | 0,68        |
| Sistem Losses                | 8,56   | 0,30        |
| CR                           | -0,006 |             |

Aspek Produksi listrik ini berkaitan dengan kemampuan sistem PLTS atap dalam memenuhi kebutuhan listrik gedung, yang mencapai maksimum 153.779 Wh (Persamaan 1). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total produksi listrik dari seluruh kombinasi alternatif pada skenario IKO dan PQR masih berada di bawah kebutuhan maksimum tersebut. Oleh karena itu, Produksi Listrik (28,90%) memperoleh bobot tertinggi, karena alternatif dengan nilai produksi terbesar dianggap paling mendekati pemenuhan kebutuhan energi gedung.

Aspek Jenis PV Modul (24,76%) berkaitan dengan efisiensi konversi energi dan stabilitas keluaran daya. Diketahui modul PV jenis monocrystalline memiliki efisiensi konversi lebih tinggi dibandingkan jenis modul PV lainnya [8]. Dalam penelitian ini baik spesifikasi PV Longi LR7 maupun ISGM10 tersusun dari jenis modul monocrystalline. Namun berdasarkan informasi produksi jenis PV modul Longi LR7 memiliki efisiensi 24,8 %, sedikit lebih besar dari jenis ISGM10 yang sebesar 22%. Selain itu PV modul jenis Longi LR7 juga terbukti lebih stabil dikombinasikan dengan berbagai

Performa Rasio yang berkaitan dengan kualitas kinerja sistem setelah mendapat pengaruh dari berbagai parameter lain termasuk lingkungan. Kriteria Performa Rasio memiliki bobot 19,66%, nilai yang cukup besar karena pengaruh-pengaruh diluar 6 aspek teknis dalam penelitian ini sangat memengaruhi kinerja produksi listrik dari PLTS atap pengembangan yang direncanakan.

Sementara itu, Jenis dan Kapasitas Inverter memperoleh bobot sedang (10,88%), mengindikasikan bahwa meskipun inverter penting dalam menjaga stabilitas daya, pemilihannya tidak sekrusial modul PV dalam konteks studi ini yang mengutamakan pemenuhan kebutuhan energi gedung yang besar.

Aspek System Losses yang berkaitan dengan kehilangan energi akibat kabel, rangkaian, atau komponen sistem memiliki bobot rendah yaitu 8,56% dalam penelitian ini.

Secara teknis kerugian dalam sistem masih dapat dikendalikan melalui upgrade desain sistem, pemilihan komponen yang sesuai, serta pemeliharaan rutin. Sebaliknya, faktor eksternal seperti radiasi matahari, suhu, maupun bayangan (dalam penelitian ini diwakili oleh PR) lebih sulit untuk dikendalikan dan memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap performa keseluruhan sistem.

Luas Atap (7,25%) mendapat bobot paling rendah. Rendahnya bobot pada kriteria luas atap disebabkan oleh asumsi ketersediaan area sebesar 704,4 m<sup>2</sup> yang relatif cukup untuk seluruh alternatif spesifikasi, sehingga tidak menjadi pembatas utama. Fokus pembobotan diarahkan pada upaya meningkatkan efisiensi teknis sistem, agar kapasitas PLTS atap yang dirancang dapat memenuhi kebutuhan energi gedung secara optimal pada kondisi on-grid tanpa baterai.

### 3.3. Skoring dan Hirarki

Skoring (skala 1 hingga 5) diberikan berdasarkan hasil simulasi PVSyst pada Tabel 7 dan 8 serta Gambar 5 dan 6. Alternatif dengan nilai terbaik berdasarkan Persamaan 4, merupakan yang paling direkomendasikan untuk dipilih. Hasil ranking atau hirarki tiap alternatif spesifikasi pada area I-K-O disajikan dalam Tabel 10, sedangkan pada area P-Q-R disajikan dalam Tabel 11.

Dari delapan alternatif yang disimulasikan pada area I-K-O, kombinasi modul Longi LR7 dengan inverter Growatt 36 kW (Alternatif 3) menjadi pilihan terbaik. Konfigurasi ini mencatat produksi energi tertinggi sebesar 16.824,07 Wh, performa ratio (PR) tertinggi (84,65%), losses terendah (14,99%), serta luas atap paling efisien (184 m<sup>2</sup>). Sebaliknya, Alternatif 6 dan 8, dengan modul ISGM10-HCTC620 dan inverter 40 kW, berada di peringkat terbawah karena menghasilkan PR di bawah 82,5%, losses tertinggi, dan kebutuhan luas area terbesar (190 m<sup>2</sup>). Urutan lengkap peringkat alternatif spesifikasi teknis pada area I-K-O dari terbaik hingga terendah adalah: 3, 4, 1, 2, 5, 7, 6, dan 8.

Sementara itu, pada area P-Q-R, hasil skoring menunjukkan bahwa Alternatif 4, yang menggunakan modul Longi LR7 dengan inverter Growatt 110 kW, menempati posisi tertinggi dengan nilai skor 452,35. Konfigurasi ini mampu menghasilkan energi tahunan sebesar 44.583,3 Wh, PR 84,74%, dan losses hanya 14,87%. Sebaliknya, Alternatif 8, dengan modul ISGM10 dan inverter Growatt 125 kW, berada di peringkat terakhir. Rendahnya performa Alternatif 8 ini disebabkan oleh efisiensi modul PV yang lebih rendah dan kapasitas inverter yang terlalu besar sehingga kurang optimal. Urutan peringkat alternatif spesifikasi teknis pada area P-Q-R dari terbaik hingga terendah adalah: 4, 5, 3, 1, 2, 6, 9, 10, 7, dan 8.



**Tabel 2. Hasil Ranking tiap alternatif pada area I-K-O**

| Kriteria                     | Bobot | Alternatif I-K-O |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |       | 1                | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Luas Atap                    | 7,25  | 4                | 4     | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Jenis PV modul               | 24,76 | 4                | 4     | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Jenis dan Kapasitas Inverter | 10,88 | 4                | 3     | 4     | 3     | 4     | 3     | 4     | 3     |
| Produksi listrik             | 28,90 | 4                | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     |
| Performa Rasio               | 19,66 | 4                | 4     | 5     | 5     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Sistem Losses                | 8,56  | 4                | 4     | 5     | 5     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Total (Skor * Bobot)         |       | 400              | 389,1 | 428,2 | 417,3 | 339,8 | 328,9 | 339,8 | 328,9 |
| Ranking                      |       | III              | IV    | I     | II    | V     | VII   | V     | VII   |

**Tabel 3. Hasil Ranking tiap alternatif pada Area P-Q-R**

| Kriteria                     | Bobot | Alternatif P-Q-R |     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |       | 1                | 2   | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Luas Atap                    | 7,25  | 4                | 4   | 4     | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Jenis PV modul               | 24,76 | 4                | 4   | 4     | 4     | 4     | 3     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Jenis dan Kapasitas Inverter | 10,88 | 5                | 4   | 3     | 5     | 4     | 4     | 4     | 2     | 4     | 3     |
| Produksi listrik             | 28,90 | 4                | 4   | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     | 4     |
| Performa Rasio               | 19,66 | 4                | 4   | 5     | 5     | 5     | 3     | 2     | 2     | 3     | 3     |
| Sistem Losses                | 8,56  | 4                | 4   | 5     | 5     | 5     | 3     | 2     | 2     | 3     | 3     |
| Total (Skor * Bobot)         |       | 410,9            | 400 | 417,3 | 439,1 | 428,2 | 339,8 | 311,6 | 289,8 | 339,8 | 328,9 |
| Ranking                      |       | IV               | V   | III   | I     | II    | VI    | IX    | X     | VI    | VIII  |

## 4. Kesimpulan

Hasil analisis grafik produksi energi dan performa ratio (PR) menunjukkan bahwa jenis modul PV merupakan faktor paling dominan dalam menentukan performa PLTS atap. Modul Longi LR7 secara konsisten menghasilkan produksi energi harian lebih tinggi dibandingkan modul ISGM10-HCTC620. Sementara itu, jenis dan kapasitas inverter berpengaruh relatif kecil terhadap produksi energi, namun memengaruhi nilai PR.

Berdasarkan hasil skoring dan analisis teknis secara menyeluruh, Alternatif 3 pada area I-K-O dan Alternatif 4 pada area P-Q-R dipilih sebagai konfigurasi terbaik karena mampu memberikan kombinasi kinerja teknis yang optimal, efisiensi penggunaan luas atap, serta kesesuaian dengan kebutuhan daya gedung. Secara akumulatif, kapasitas produksi energi harian dari kedua konfigurasi terpilih mencapai sekitar 40% dari total kebutuhan energi pengembangan maksimal gedung, dengan kontribusi terbesar berasal dari area P-Q-R. Urutan peringkat alternatif spesifikasi teknis pada area P-Q-R dari terbaik hingga terendah adalah: 4, 5, 3, 1, 2, 6, 9, 10, 7, dan 8.

## Referensi

- [1]. KLHK, "LAPORAN INVENTARISASI GAS RUMAH KACA (GRK) DAN MONITORING, PELAPORAN, VERIFIKASI (MPV)," Jan. 2024. Accessed: Dec. 10, 2024. [Online]. Available: <https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/frontend/pedoman/detail/100>.
- [2]. PP RI No. 79, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79, no. Tentang Kebijakan Energi Nasional. Indonesia, 2014. Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/PP%20No.%2079%20Thn%202014.pdf>
- [3]. Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, RUPTL PT PLN. 2021. Accessed: Apr. 30, 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- [4]. L. Asdiyan, S. Ayu, I. G. A. Ayu, D. Giriantari, N. D. Setiawan, and I. N. Setiawan, "ANALISIS UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP ON-GRID 11,2 KWP DI RESIDENSIAL BUKIT GADING MEDITERANIA, JAKARTA UTARA," Jurnal SPEKTRUM, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259495668>
- [5]. A. Torres-Rivas, M. Palumbo, L. Jiménez, and D. Boer, "Self-consumption possibilities by rooftop PV and building retrofit requirements for a regional building stock: The case of Catalonia," Solar Energy, vol. 238, pp. 150–161, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.036>.
- [6]. A. Ariawan, J. Windarta, and S. Dwiarmoko, "Rooftop PV Plant Development Planning at the Central Java Provincial DPRD Secretariat Office," Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, vol. 13, pp. 43–52, Jun. 2022, doi: 10.21771/jrtppi.2022.v13.no1.p43-52.
- [7]. R. Ghasempour, M. A. Nazari, M. Ebrahimi, M. H. Ahmadi, and H. Hadiyanto, "Multi-criteria decision making (MCDM) approach for selecting solar plants site and technology: A review," International Journal of Renewable Energy Development, vol. 8, no. 1, pp. 15–25, Feb. 2019, doi: 10.14710/ijred.8.1.15-25.

- [8]. F. Nayan, S. M. S. Ullah, and S. Saif, Comparative analysis of PV module efficiency for different types of silicon materials considering the effects of environmental parameters. 2016. doi: 10.1109/CEEICT.2016.7873089.
- [9]. J. Fahmi, J. Windarta, and A. Wardaya, “Studi Awal Penerapan Distributed Generation untuk Optimalisasi PLTS Atap On Grid pada Pelanggan PLN Sistem Jawa Bali untuk Memenuhi Target EBT Nasional,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, pp. 1–13, Mar. 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.10038.
- [10]. J. Good and J. X. Johnson, “Impact of inverter loading ratio on solar photovoltaic system performance,” *Appl Energy*, vol. 177, pp. 475–486, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.134>.
- [11]. ESDM, Permen ESDM No. 2 Tahun 2024. 2024.
- [12]. M. Fahmi Amrillah, D. Pratama Yuda, and P. Transportasi Sungai Danau dan Penyeberangan Palembang, “Economic Impact of 300 KWp PV Rooftop Penetration on Soy Sauce Companies,” *TELKA*, vol. 8, no. 2, pp. 158–164, 2022.
- [13]. S. Chamdra, M. R. Pellokila, and D. R. Ramang, “ANALISIS TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH DI KUPANG DENGAN PROSES HIRARKI ANALITIK DAN METODE VALUASI KONTINGENSI (Analysis of Waste Treatment Technology in Kupang with Analytic Hierarchy Process and Contingent Valuation Method),” 2015.
- [14]. M. Bayraktar, M. Pamik, M. Sokukcu, and O. Yuksel, “A SWOT-AHP analysis on biodiesel as an alternative future marine fuel,” *Clean Technol Environ Policy*, vol. 25, no. 7, pp. 2233–2248, 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02501-7.
- [15]. T. L. Saaty and S. M. Ozdemir, “How Many Judges Should There Be in a Group?,” *Annals of Data Science*, vol. 1, Jan. 2015, doi: 10.1007/s40745-014-0026-4.
- [16]. F. C. Brito et al., “Consumer-driven selection of low-emission vehicles for sustainable urban centers: An AHP-based approach,” *Science of The Total Environment*, vol. 955, p. 176993, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176993>.
- [17]. S. Chandel, M. Naik, and R. Chandel, “Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 163–175, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.019.