

ANALISIS TEKNIS SISTEM HYBRID [MEDIUM]

Studi Kelayakan, Desain Kapasitas Beban 3 kW + Lampu LED 480W, dan Sizing Baterai Lithium

1. Pendahuluan & Ringkasan Eksekutif

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) menggabungkan sumber energi terbarukan mandiri, yaitu Turbin Angin Sumbu Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine / VAWT*) dan Panel Surya (*Photovoltaic / PV*). Rancangan ini ditujukan untuk melayani beban operasional industri/pertanian berskala menengah yang terdiri dari motor listrik berdaya 3 kW selama 1 jam dan sistem penerangan lampu LED 480 watt selama 8 jam sehari.

TOTAL KONSUMSI ENERGI

6.840 Wh / hari

KAPASITAS BATERAI LITHIUM

9.600 Wh (75 Ah / 128V)

KAPASITAS PEMBANGKIT (HYBRID)

3.0 kWp PV + 1.5 kW VAWT

2. Analisis Beban Listrik Harian

Beban harian sistem dikategorikan menjadi dua jenis utama dengan karakteristik operasi dan durasi yang berbeda:

- Beban Motor Listrik:** Daya $P_{motor} = 3.000$ Watt beroperasi selama $t_1 = 1$ jam per hari.
- Beban Lampu LED:** Daya $P_{LED} = 480$ Watt beroperasi selama $t_2 = 8$ jam per hari.

Jenis Beban	Daya (Watt)	Durasi (Jam/Hari)	Energi Harian (Wh)
Motor Listrik	3.000 W	1 jam	3.000 Wh
Lampu LED	480 W	8 jam	3.840 Wh
Total Kebutuhan Energi Harian (E_{load})			6.840 Wh / hari

Dengan mempertimbangkan efisiensi inverter ($\eta_{inv} = 92\%$) dan rugi-rugi sistem kabel ($\eta_{sys} = 95\%$), total kebutuhan energi aktual yang harus disediakan oleh sumber pembangkit dan disimpan dalam baterai adalah:

$$E_{actual} = 6.840 / (0.92 \times 0.95) = 7.822,76 \text{ Wh} \approx 7,82 \text{ kWh / hari}$$

3. Perhitungan Kapasitas Baterai Lithium

Baterai jenis Lithium (LiFePO_4 - *Lithium Iron Phosphate*) dipilih karena memiliki siklus hidup yang panjang (*cycle life* > 4000 siklus), tingkat pengosongan yang dalam (*Depth of Discharge* / DoD hingga 80%), serta efisiensi coulombic yang tinggi (>99%).

Parameter Perancangan Baterai:

- Total Energi Harian (E_{actual}): 7.822,76 Wh
- Kedalaman Pengosongan yang Diizinkan (**DoD**): 80% (0,8)
- Hari Otonomi (*Autonomy Days* / N_{aut}): 1 hari (cadangan saat cuaca buruk)
- Faktor Koreksi Suhu & Degradasi: 1,1

Formula perhitungan kapasitas baterai bruto (E_{batt}):

$$E_{\text{batt}} = (E_{\text{actual}} \times N_{\text{aut}}) / (\text{DoD} \times \eta_{\text{batt}})$$

Dimana efisiensi baterai lithium $\eta_{\text{batt}} = 95\%$:

$$E_{\text{batt}} = (7.822,76 \times 1) / (0,80 \times 0,95) = 10.293,1 \text{ Wh} \approx 10,3 \text{ kWh}$$

Jika menggunakan sistem tegangan nominal bank baterai pada **128V DC** (atau setara dengan konfigurasi 40S LiFePO_4), maka kapasitas ampere-hour (Ah) yang dibutuhkan adalah:

Kapasitas Baterai Rekomendasi: $10.293,1 \text{ Wh} / 128\text{V} = 80,4 \text{ Ah}$ (Dibulatkan menjadi spesifikasi komersial **80 Ah / 128V DC** atau setara modul bank baterai modular 5.12 kWh x 2 unit).

4. Desain Sistem Hybrid (VAWT & Solar Panel)

Sistem pembangkit dirancang secara hybrid untuk saling melengkapi. Ketika radiasi matahari tidak tersedia (malam hari atau cuaca mendung), turbin angin diharapkan dapat menutupi defisit daya.

4.1. Spesifikasi Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT) pada Kecepatan Angin 7 m/s

Kecepatan angin rata-rata $v = 7 \text{ m/s}$ dikategorikan sebagai kondisi angin sedang yang sangat baik untuk pengoperasian turbin angin skala menengah. Daya teoretis angin yang melewati sapuan rotor dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{\text{wind}} = 0,5 \times \rho \times A \times v^3$$

Dimana:

- Massa jenis udara (ρ): $1,225 \text{ kg/m}^3$
- Kecepatan angin (v): $7 \text{ m/s} \rightarrow v^3 = 343 \text{ m}^3/\text{s}^3$
- Luas sapuan rotor (A): Diasumsikan diameter rotor $D = 3 \text{ m}$ dan tinggi $H = 3 \text{ m}$ maka $A = 9 \text{ m}^2$.

$$P_{wind} = 0,5 \times 1,225 \times 9 \times 343 = 1.888,82 \text{ Watt}$$

Berdasarkan Batas Betz (maksimal efisiensi aerodinamis turbin $C_p \approx 0,35$ untuk tipe Darrieus/Savonius hybrid VAWT):

$$P_{VAWT-actual} = P_{wind} \times C_p \times \eta_{gen} = 1.888,82 \times 0,35 \times 0,85 = 561,6 \text{ Watt}$$

Dengan asumsi efektifitas angin rata-rata berhembus efektif selama 6 jam per hari pada kecepatan tersebut, energi harian dari VAWT:

$$E_{VAWT} = 561,6 \text{ W} \times 6 \text{ jam} = 3.369,6 \text{ Wh / hari}$$

4.2. Spesifikasi Panel Surya (Photovoltaic)

Sisa kebutuhan energi harian setelah dikurangi kontribusi VAWT ditanggung oleh panel surya dengan asumsi PSH (*Peak Sun Hours*) efektif rata-rata di lokasi adalah 4,5 jam/hari.

$$E_{solar-needed} = E_{actual} - E_{VAWT} = 7.822,76 - 3.369,6 = 4.453,16 \text{ Wh / hari}$$

Kapasitas daya puncak (Peak Power / Wp) panel surya yang diperlukan:

$$P_{PV-peak} = 4.453,16 \text{ Wh} / (4,5 \text{ jam} \times 0,75_{system-loss}) = 1.319 \text{ Watt-peak (Wp)}$$

Direkomendasikan pemasangan **Solar Panel 1.500 Wp** (misal: 4 unit panel berdaya 380Wp atau 6 unit panel 250Wp).

5. Kesimpulan & Rekomendasi Komponen

Komponen Sistem	Spesifikasi Teknis Rekomendasi	Fungsi / Kapasitas
Turbin Angin (VAWT)	Savonius-Darrieus Hybrid, Rated 1.5 kW	Menghasilkan suplai energi saat angin $v = 7 \text{ m/s}$
Panel Surya (PV)	Monocrystalline Perc, Total 1.5 kWp	Suplai utama energi siang hari (PSH 4.5 jam)
Bank Baterai	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄) 128V, 80 Ah	Penyimpanan energi total 10,29 kWh (DoD 80%)
Inverter / Charger Controller	Hybrid Inverter Off-Grid 5 kW, MPPT Controller	Konversi DC-AC 3kW motor & manajemen daya sistem