

Analisis Perancangan dan Pemasangan PLTS Kapasitas 1,1 MWp pada Pabrik Farmasi di Kota Semarang

RIZKY ADI NUGRAHA, MOCHAMMAD FACTA, ABDUL SYAKUR

Program Magister Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Indonesia
Email: nugraha.adi.rizky@gmail.com

Received 26 September 2023 | Revised 1 November 2023 | Accepted 12 Desember 2023

ABSTRAK

Biaya utilitas adalah salah satu komponen terbesar dalam biaya produksi sebuah pabrik farmasi. Dari total biaya utilitas, 63% berasal dari pemakaian energi listrik. Jika energi listrik tersebut dapat diperoleh dari Energi Baru Terbarukan (EBT) hingga 10.65%, maka akan berdampak positif bagi biaya produksi. EBT yang dapat dipakai adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan memanfaatkan atap gedung produksi. Selain penghematan perlu diperhatikan dampak interkoneksi PLTS terhadap arah aliran daya, kestabilan sistem kelistrikan saat gangguan, dan potensi terhadap sambaran petir ke instalasi PLTS. Optimalisasi desain PLTS dengan Helioscope menunjukkan kapasitas PLTS yang dapat dipasang hingga 1,1 MWp. Hasil analisis aliran daya dengan ETAP menunjukkan bahwa daya reaktif yang mengalir balik ke jaringan PLN sangat kecil. Sistem kelistrikan dengan injeksi daya dari PLTS ini dapat stabil setelah mengalami gangguan. Berdasarkan metode sudut perlindungan maka untuk 9 bangunan yang dipasang PLTS tersebut diperlukan proteksi petir level IV.

Kata kunci: energi surya, kestabilan sistem tenaga, aliran daya, perlindungan sambaran petir

ABSTRACT

Utility costs are one of the largest components in the production expenses of a pharmaceutical plant. Among utility costs, 63% of total cost takes from electricity consumption. If this electricity can be supplied from Renewable Energy (RE) up to 10.65%, it will have a positive impact on production costs. The viable RE source is PhotoVoltaic Solar Power (PV) by utilizing the building's production area rooftop. The others impact must be given to the PV system's effects on power flow direction, electrical system stability during disturbances, and susceptibility to lightning strikes on the PV installation. Optimization result of the PV system design using Helioscope indicates a capacity of up to 1,1 MWp. Power flow analysis using ETAP results demonstrate minimal reactive power flowing back to the grid. The electrical system with power injection from the PV system regains stability after disturbance. Based on the angle protection method, a lightning protection level IV is required for the 9 buildings with PV systems.

Keywords: Solar energy, power system stability, power flow, lightning strike protection.

1. PENDAHULUAN

Objek dalam penelitian ini adalah pabrik farmasi di kota Semarang. Pada proses produksi obat terdapat tiga aspek yang mempengaruhi biaya produksi diantaranya biaya material, upah kerja dan utilitas. Dari ketiga aspek tersebut hanya biaya utilitas yang mampu di tekan. Total 63% dari biaya utilitas sendiri berasal dari konsumsi listrik dan sisanya untuk steam (35%), solar (1%) dan air (1%). Berdasarkan data tahun 2022 total konsumsi listrik mencapai 13,33 GWh dan seluruhnya disupply oleh PLN. Energi listrik yang mungkin diperoleh melalui pemanfaatan EBT adalah dengan melakukan pemasangan PLTS. Dengan ketersediaan atap gedung produksi yang ada maka PLTS dengan kapasitas 1,1 MWp yang akan dipasang mampu menghasilkan listrik pertahun sebesar 1,42 MWh atau 10,65% dari total biaya listrik. Pemerintah memberikan keleluasaan kapasitas pemasangan PLTS. Namun dalam perancangan instalasi PLTS terinterkoneksi dengan sistem jaringan PLN wajib memperhatikan keamanan dan keandalan operasi jaringan tenaga listrik (**Republik Indonesia, 2021**). Serta dampak lain yang ditimbulkan dengan luas area peletakan modul surya yaitu potensi sambaran petir.

Dalam merancang instalasi PLTS, Helioscope adalah *software* yang banyak digunakan dalam membantu desain. Helioscope memberikan kemudahan dalam pembuatan desain karena dilakukan secara tiga dimensi ditunjang dengan tampilan visual yang realistis berdasarkan google map (**Solar, 2023**). Total terdapat 8.416 tempat parkir di negara bagian Amerika akan dibangun *Solar Canopies* dan nilai total produksi energi yang dihasilkan dihitung berdasarkan koordinat lokasi sehingga data simulasi dapat mewakili kondisi saat rencana di realisasikan (**Rudge, 2021**). Visakhapatnam, India, desain PLTS Apung sebesar 2 MWp di atas sebuah waduk dan terdapat surplus energi hingga 38,55% bila dibandingkan dengan aktual pengukuran. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan suhu pada permukaan laut yang berdampak pada modul surya tidak dapat disimulasikan oleh Helioscope (**Kumar, dkk, 2022**). Amerika, PLTS merupakan salah satu pembangkit EBT yang akan dipasang pada fasilitas pemulihan sumber daya air. Total energi yang dapat dihasilkan sebesar 649,6 kW dengan memasang 1.864 modul surya 420 Wp (**Mohamed, dkk, 2022**). Turki, sebuah universitas disimulasikan akan memasang PLTS yang terhubung dengan tiga pembangkit tenaga gas dan jala - jala dengan sekenario kapasitas 94,2 kWp, 123,9 kWp, dan 157,5 kWp. Diperkirakan mampu menghasilkan energi dengan biaya produksi sebesar 0,061\$/kWh dengan masa pengembalian investasi 6,47 tahun (**Şevik, 2022**). Berdasarkan penelitian - penelitian tersebut berfokus pada energi yang dihasilkan berdasarkan analisis keekonomian dan pengaruh lingkungan. Belum dibahas bagaimana dampak pada saat energi yang dihasilkan terinterkoneksi ke sistem tenaga yang supply utamanya berasal dari jala - jala.

Perusahaan Listrik di Nigeria telah memasang PLTS sebagai sumber energi alternatif. Listrik yang dihasilkan PLTS efektif menutupi kekurangan supply dari jala - jala setempat. Energi listrik yang dihasilkan PLTS juga dipengaruhi perubahan suhu pada saat peralihan musim di Nigeria (**Amole, dkk, 2023**). Di Mesir, desain sistem tenaga darurat dengan PLTS sebagai sumber energi cadangan untuk menjaga kestabilan pasokan daya mesin pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Dilakukan analisis *transien* berupa gangguan tiga fase selama 0,2 detik untuk mengetahui dampak pemadaman terhadap kestabilan sistem tenaga darurat yang dibuat. Parameter yang dibaca diantaranya tegangan nominal, daya aktif, daya reaktif dan arus (**Kotb, dkk, 2022**). Gangguan tiga fase terjadi akibat adanya arus hubung singkat dengan nilai magnitudo tinggi sehingga menimbulkan stress termal pada peralatan yang berpotensi menyebabkan kerusakan. Disisi lain pada saat gangguan nilai tegangan seketika menjadi nol dan meskipun sistem kembali normal masih memungkinkan terjadi osilasi (**Mohammedali, dkk, 2021**). Analisis aliran daya dapat digunakan untuk menentukan titik interkoneksi dan besarnya kapasitas PLTS yang dipasang secara optimal (**Kamaruzaman,**

dkk, 2018). Sebagai contoh Australia dengan tegangan operasi 0,416 kV yang terhubung pada jaringan tegangan menengah 11 kV hanya mampu menerima interkoneksi PLTS sebesar 38% beban (**Abideen, dkk, 2019**). Ethiopia, sistem tenaga 34 bus secara optimal PLTS ditempatkan pada bus terjauh dengan kapasitas maksimum yang bisa diterima 48% beban sistem (**Kamaruzaman, dkk, 2018**). Sejalan dengan hal tersebut penempatan PLTS pada busbar dengan tegangan operasi terendah mampu meningkatkan kestabilan sistem secara menyeluruh (**Refaat, dkk, 2018**). Sedangkan disisi kestabilan sistem tenaga dapat dilihat melalui perubahan nilai profil tegangan, frekuensi, sudut rotor, daya aktif dan daya reaktif (**Upadhyay & Jamnani, 2022**). Namun pada penelitian penelitian tersebut tidak secara spesifik membahas mengenai desain PLTS dan penentuan kapasitas PLTS yang akan dibangun hanya berdasarkan persentase total beban.

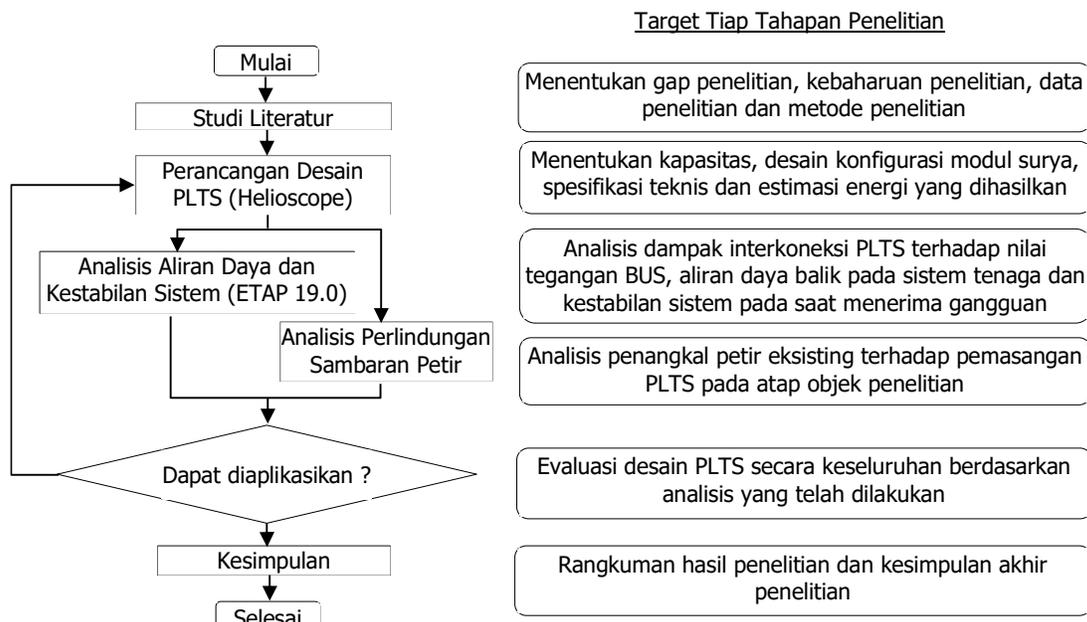
Dampak lain dari dibangunnya PLTS adalah luasan area yang dibutuhkan memiliki potensi gangguan alam yang tidak dapat dihindari yaitu sambaran petir. Terdapat dua perlindungan yaitu melalui perlindungan eksternal dengan menangkap sambaran petir dan menyalurkan ke tanah melalui penangkal petir. Atau perlindungan internal dengan menambahkan *surge protection device* (SPD) dalam sistem PLTS yang berfungsi menyalurkan arus dan tegangan tinggi sambaran petir yang gagal ditangkap oleh penangkal petir (**Hetita, dkk, 2022**). IEC 62305 adalah standart yang dapat digunakan dalam penentuan penempatan instalasi perlindungan eksternal. Salah satu metode yang digunakan adalah metode sudut perlindungan (**Singhasathein & Sumanonta, 2020**). Pada penelitian ini berfokus pada perbandingan cakupan sudut perlindungan antar kelas level proteksi dan belum dalam tahap implementasi pada sebuah objek skala besar. Pada penelitian ini kebaharuan yang diangkat adalah pabrik farmasi yang diambil sebagai objek penelitian memiliki potensi pembangkitan EBT dengan skala besar yaitu 1,1 MWp. Penelitian dilakukan secara berkesinambungan dimulai dari perancangan dan evaluasi desain pemasangan PLTS, analisis aliran daya dan kestabilan sistem tenaga saat menerima gangguan serta analisis sudut perlindungan PLTS yang akan dipasang terhadap potensi sambaran petir.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alur Penelitian

Pada penelitian ini akan mengambil objek pabrik farmasi yang berada di kota Semarang. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Perancangan desain PLTS akan menggunakan *software* Helioscope dengan data primer berupa data beban, *single line diagram*, denah gedung beserta penempatan peralatan dan spesifikasi modul surya dan inverter. Untuk data sekunder berupa koordinat Gedung, iradiasi dan benda berpotensi menghasilkan bayang – bayang. Hasil keluaran dari proses ini dibagi dua yaitu Desain Konfigurasi Sistem PLTS dan Desain Pemasangan Modul Surya pada atap. Desain Konfigurasi Sistem PLTS digunakan kembali sebagai masukan pada Analisis Aliran Daya dan kestabilan sistem menggunakan *software* ETAP 19.0. Pada proses analisis aliran daya yang dilakukan terdapat diantaranya: validasi sistem yang dimodelkan, aliran daya yang dihasilkan PLTS pada sistem tenaga, pengaruh integrasi PLTS terhadap profil tegangan pada seluruh bus dan simulasi gangguan untuk mengetahui kestabilan sistem tenaga pada masing – masing variasi kondisi sumber kelistrikan. Variasi kondisi sumber kelistrikan tersebut selanjutnya diistilahkan dengan sumber berasal dari PLN dan PLN - PLTS. Desain Pemasangan Modul Surya memuat lokasi modul surya akan dipasang pada atap Gedung Pabrik Farmasi. Evaluasi terhadap perlindungan sambaran petir menggunakan metode perhitungan sudut perlindungan. Pada tahap kesimpulan akan membahas hasil dari analisis perancangan desain PLTS, analisis aliran daya, kestabilan sistem terhadap gangguan dan analisis sudut perlindungan sambaran petir terhadap sistem PLTS yang telah dirancang.

Analisis Perancangan dan Pemasangan PLTS Kapasitas 1,1 MWp pada Pabrik Farmasi di Kota Semarang



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Perancangan Desain PLTS

2.2.1 Spesifikasi Modul Surya dan Inverter

Pemilihan modul surya dan inverter didasarkan pada kemudahan mendapatkan material di pasaran dan akses dalam memperoleh *datasheet*. Spesifikasi modul surya dan inverter dapat dilihat pada Tabel 1. Hal – hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan diantaranya kesesuaian antara tegangan (V_{MPP}) dan arus (I_{MPP}) keluaran dari modul surya dengan batas toleransi tegangan (V_{DC}) dan arus (I_{DC}) pada inverter.

Tabel 1. Spesifikasi Modul Surya dan Inverter

| Komponen | Tipe | Spesifikasi | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|---|-------------------|---|----------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| Modul Surya | Trinasolar TSM-DE19 550 Wp | P_{MAX} 550 wattpeak Toleransi 0 sampai dengan + 5 watt V_{MPP} 31.6 Volt I_{MPP} 17.37 ampere Efisiensi 21 % | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Inverter | Huawei SUN2000 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>60KTL-M0</th> <th>100KTL-M1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>V_{DC} max 1100 Volt</td> <td>V_{DC} max 1100 Volt</td> </tr> <tr> <td>V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt</td> <td>V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt</td> </tr> <tr> <td>I_{DC} max 22 ampere</td> <td>I_{DC} max 26 ampere</td> </tr> <tr> <td>V_{AC} 400 Volt</td> <td>V_{AC} 400 Volt</td> </tr> <tr> <td>P_{AC} 60 kW / 66 kVA</td> <td>P_{AC} 100 kW / 110 kVA</td> </tr> <tr> <td>f_{AC} 50 / 60 hz</td> <td>f_{AC} 50 / 60 hz</td> </tr> </tbody> </table> | 60KTL-M0 | 100KTL-M1 | V_{DC} max 1100 Volt | V_{DC} max 1100 Volt | V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt | V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt | I_{DC} max 22 ampere | I_{DC} max 26 ampere | V_{AC} 400 Volt | V_{AC} 400 Volt | P_{AC} 60 kW / 66 kVA | P_{AC} 100 kW / 110 kVA |
| 60KTL-M0 | 100KTL-M1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| V_{DC} max 1100 Volt | V_{DC} max 1100 Volt | | | | | | | | | | | | | | | |
| V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt | V_{DC} mpp 200 – 1000 Volt | | | | | | | | | | | | | | | |
| I_{DC} max 22 ampere | I_{DC} max 26 ampere | | | | | | | | | | | | | | | |
| V_{AC} 400 Volt | V_{AC} 400 Volt | | | | | | | | | | | | | | | |
| P_{AC} 60 kW / 66 kVA | P_{AC} 100 kW / 110 kVA | | | | | | | | | | | | | | | |
| f_{AC} 50 / 60 hz | f_{AC} 50 / 60 hz | | | | | | | | | | | | | | | |

2.2.3 Konfigurasi Modul Surya

Desain konfigurasi modul surya menjadi salah satu hal penting dalam perancangan sistem PLTS. Desain konfigurasi seri parallel secara optimal mampu mengurangi resiko kerugian terhadap gangguan (**Satpathy, dkk, 2023**). Kapasitas maksimum PLTS dapat ditentukan melalui konfigurasi modul surya. Pembentukan *string* secara seri mampu meningkatkan total tegangan keluaran modul surya. Selanjutnya *string* di susun secara paralel membentuk *array* untuk meningkatkan arus keluaran dari modul surya. Melalui Persamaan (3) besarnya daya yang dihasilkan (P_{MAX}) oleh modul surya dapat dihitung. Dimana besarnya tegangan keluaran

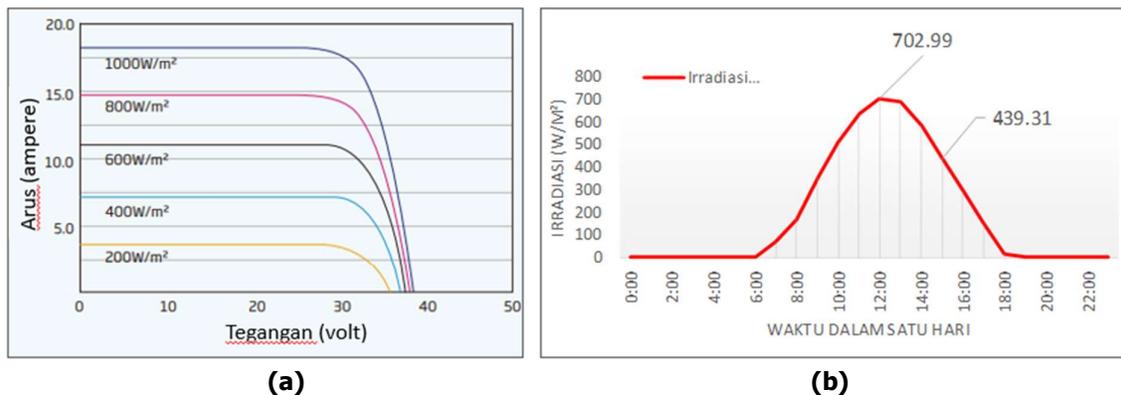
(V_{MPP}) string modul surya dapat diketahui melalui Persamaan (1) dan arus maksimal (I_{MPP}) array melalui Persamaan (2).

$$Total V_{MPP} = V_{MPP}^1 + V_{MPP}^2 + V_{MPP}^3 + \dots + V_{MPP}^n \quad (1)$$

$$Total I_{MPP} = I_{MPP}^1 + I_{MPP}^2 + I_{MPP}^3 + \dots + I_{MPP}^n \quad (2)$$

$$P_{MAX} = Total V_{MPP} * Total I_{MPP} \quad (3)$$

Besarnya tegangan dan arus keluaran modul surya dipengaruhi dengan nilai iradiasi. Pada Gambar 2.(a) nampak kondisi optimum modul surya dapat dicapai ketika menerima iradiasi 1.000 w/m² sehingga menghasilkan tegangan dan arus sebesar 31,6 Volt dan 17,4 Volt. Maka daya maksimum yang dapat dihasilkan sebesar 549,84 Wp.



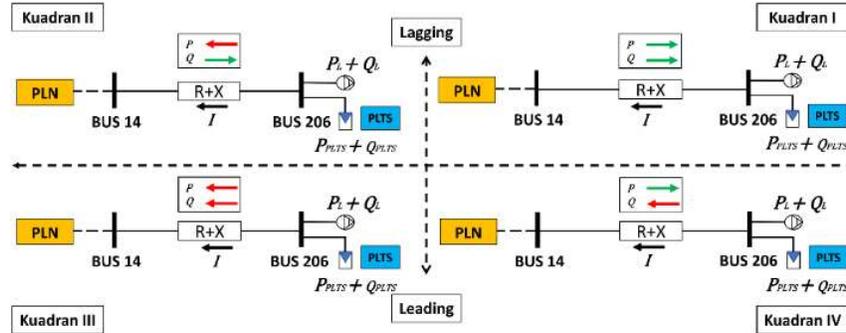
Gambar 2. (a) Grafik I-V Modul Surya Trina Solar 550wp, (b) Nilai Iradiasi Pabrik Farmasi

Nilai iradiasi setiap lokasi dapat berbeda dan bergantung pada kondisi iklim dan waktu. Pabrik Farmasi terletak di Lintang -6.997232521977552 dan Bujur 110.39624894661162. Berdasarkan data yang diambil dari PhotoVoltaic Geographical Information System (**PVGIS, 2013**) yang ditampilkan Gambar 2. (b), data iradiasi di wilayah Pabrik Farmasi pada pukul 12:00 dapat menghasilkan energi pucak hingga 702,99 W/m² dan pada kondisi beban puncak pada pukul 15:00 sebesar 439.31 W/m².

2.3 Sistem Tenaga

2.3.1 Pemodelan Sistem Tenaga

Pada penelitian ini sistem tenaga Pabrik Farmasi dimodelkan dalam sistem tenaga 29 BUS dengan menggunakan software ETAP. Pemasok listrik utama pabrik farmasi berasal dari jala-jala PLN. Bersumber dari Gardu Induk Kalisari (BUS 1) rating tegangan diturunkan dari 150 kV menjadi 20 kV (BUS 2), Pabrik Farmasi disupply dari FEEDER 11 (BUS 2) dimana pada jalur tersebut terdapat pelanggan PT. KJU (BUS 3A) dan beberapa pelanggan lain (BUS 3B). Dari BUS 2 listrik disalurkan dengan rating tegangan 20kV menuju Pabrik Farmasi sejauh 1.5 kms melalui kabel udara tipe AAAC 240mm². Selanjutnya di sisi pabrik yakni di BUS 4 tegangan diturunkan menjadi 0.4 kV melalui dua buah transformator (T3 dan T4). Traffo T3 berfungsi untuk mencatu kelompok beban Fasilitas Umum di BUS 5 sedangkan traffo T4 berfungsi untuk mencatu kelompok beban produksi di BUS 6. Pada kebutuhan produksi terdiri dari 6 kelompok produksi dan 1 kelompok *utility* yang semuanya terhubung pada masing-masing *Power Distribution Panel* (PDP). Maka Pabrik Farmas total memiliki 7 kelompok beban yaitu PDP Produksi 1 (BUS 14), PDP Produksi 2 (BUS 13), PDP Produksi 3 (BUS 12), PDP Produksi 4 (BUS 11), PDP Produksi 5 (BUS 15), PDP *Utility* (BUS 16) dan PDP Fasilitas Umum (BUS 7).



Gambar 5. Grafik Berbandingan Aliran Daya Sistem Tenaga Terinterkoneksi dengan PLTS

Pada saat daya yang dihasilkan PLTS lebih kecil dari kebutuhan daya beban maka terdapat empat kondisi yang dapat terjadi yaitu kondisi *Lagging* Kuadran I dengan nilai daya dan kondisi *Leading* Kuadran IV dengan nilai daya P (kW) – jQ (kVAR). Sedangkan saat daya yang dihasilkan PLTS lebih besar dari kebutuhan beban maka dapat terjadi kondisi *Leading* Kuadran III dengan nilai daya $-P$ (kW) – jQ (kVAR) dan kondisi *Lagging* Kuadran II dengan nilai daya $-P$ (kW) + jQ (kVAR).

Salah satu dampak dari interkoneksi PLTS adalah perubahan nilai profil tegangan pada bus (**Khenissi, dkk, 2020**). Mengacu pada Gambar 4 tegangan pada BUS 206 (V_{206}) dapat dihitung dari besarnya tegangan pada bus di atasnya yakni: BUS 14 (V_{14}) ditambah dengan rugi-rugi tegangan pada kabel melalui perkalian nilai tahanan kabel ($R + jX$) dengan arus yang mengalir pada kabel (I).

$$V_{206} = V_{14} + (R + jX) * I \quad (4)$$

$$\Delta V = \frac{P * R + Q * X}{V_1} \approx \frac{P * R + Q * X}{V_2} \quad (5)$$

Perubahan tegangan (ΔV) dapat dicari melalui Persamaan (5) dimana nilai P diperoleh dari selisih daya aktif yang dihasilkan PLTS terhadap kebutuhan beban ($P_{PLTS} - P_L$). Dan nilai Q diperoleh dari selisih daya reaktif yang dihasilkan PLTS terhadap kebutuhan beban ($Q_{PLTS} - Q_L$). Mengacu pada SPLN No. 74 variasi pada profil tegangan yang diperbolehkan adalah +5% sampai dengan -10% (**Syafii, dkk, 2019**).

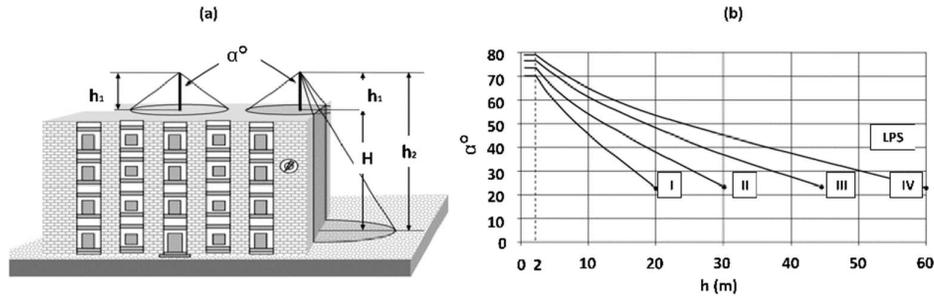
2.3.4 Kestabilan Sistem Tenaga

Pada penelitian ini kestabilan sistem tenaga akan di analisis melalui langkah berikut

1. Menentukan variasi kondisi sistem tenaga berdasarkan sumber kelistrikan yaitu:
 - a. PLN, variasi kondisi dimana sistem tenaga dengan sumber kelistrikan dari PLN
 - b. PLN-PLTS, variasi Kondisi saat PLTS terinterkoneksi untuk mengurangi sumber kelistrikan PLN.
2. Membandingkan nilai frekuensi, profil tegangan, daya aktif, daya reaktif dan arus pada dua variasi kondisi tersebut.
3. Menentukan titik analisis yaitu BUS 2, BUS 3A dan 3B untuk mengetahui dampak di sisi jala-jala dan pabrik sekitar.
4. Melakukan simulai gangguan transien berupa gangguan tiga fase selama 0.3 detik pada sistem tiga fasa pada 11 grup PLTS.
5. Mengamati kestabilan sistem tenaga terhadap gangguan yang terjadi

2.4 Perlindungan Sambaran Petir Metode Sudut Perlindungan

Dengan mengetahui nilai sudut perlindungan (α°) dan tinggi penangkal petir dipasang (h_2) yang merupakan penjumlahan tinggi bangunan (H) dengan tinggi batang penangkal petir (h_1) maka area perlindungan sambaran petir dapat diketahui.



Gambar 6. (a) Metode Sudut Perlindungan, (b) Penentuan Nilai Sudut (α°)

Berdasarkan Gambar 6.b besarnya nilai sudut proteksi α° ditentukan berdasarkan level proteksi atau *Class of LPS (Lighting Protection System)* dari suatu bangunan. Sebuah bangunan dengan tinggi penangkal eksternal 20 meter pada level LPS I memiliki sudut proteksi ($\alpha^\circ = 22^\circ$), lebih kecil dari pada LPS II ($\alpha^\circ = 37^\circ$). Metode perhitungan dalam penentuan LPS mengacu pada standart IEC 1024-1-1 (**Sriyanto, dkk, 2018**). Nilai efisiensi (E) menunjukkan pembagian level LPS sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2 Klasifikasi level proteksi berdasarkan nilai efisiensi

| Level Proteksi | Effisiensi |
|----------------|------------|
| LPS I | 0.98 |
| LPS II | 0.95 |
| LPS III | 0.90 |
| LPS IV | 0.80 |

Penentuan kebutuhan sistem proteksi diperoleh berdasarkan perbandingan antara nilai frekuensi rata-rata sambaran tahunan ($N_c = 0.1$) dengan nilai frekuensi sambaran petir langsung (N_d).

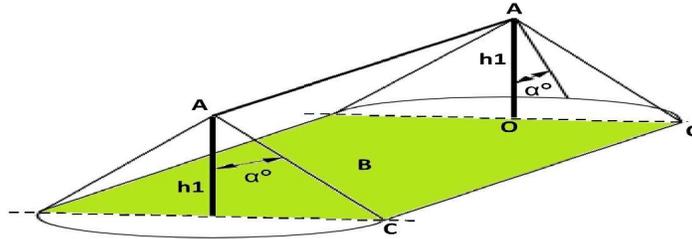
$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (6)$$

Jika $N_d \leq N_c$ maka tidak diperlukan sistem proteksi namun jika $N_d > N_c$ maka diperlukan penambahan sistem proteksi dengan level proteksi berdasarkan nilai efisiensi (E) yang diperoleh dari Persamaan (6).

$$N_d = 0,04 T^{1,25} * (ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2) * 10^{-6} \quad (7)$$

Untuk nilai N_d dapat diperoleh dengan mengetahui nilai jumlah hari guruh per tahun (T) sebesar 148 hari guruh per tahun dan informasi dimensi bangunan yang akan dilindungi yaitu Panjang (a), lebar (b) dan tinggi bangunan (h). Pada tahap implementasi penambahan terminasi udara antar dua penangkal petir (A-A) dapat menghasilkan sudut proteksi yang sama dengan yang terbentuk pada titik penangkal petir. Pada Gambar 7 area arsir hijau (B) adalah alas prisma yang terbentuk dari terminasi udara tersebut. Dengan mengetahui ketinggian penangkal petir eksisting (h_1) dan sudut proteksinya (α°) maka radius proteksi yang diproyeksikan sebagai jari-jari alas kerucut R (OC) dapat dihitung menggunakan Persamaan (8).

$$R = \tan \alpha^\circ * h_1 \quad (8)$$



Gambar 7. Desain Pemasangan Terminasi Udara Antar Penangkal Petir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Perancangan Desain PLTS

Sistem PLTS Pabrik Farmasi dibagi dalam 11 kelompok. Tabel 3 menunjukkan konfigurasi jumlah *string* dan modul surya masing – masing kelompok. Total kapasitas PLTS optimal yang dapat dipasang di Pabrik Farmasi adalah 1102.2 kWp yang terdiri dari 2004 buah modul surya 550 WP, 3 buah inverter 60 kW dan 8 buah inverter 100 kW. Total energi yang dapat dihasilkan adalah 1424,66 MWh/tahun.

Tabel 3. Hasil Simulasi Helioscope

| Lokasi PV | Lokasi Panel | Modul Surya (buah) | | | Kapasitas Total Modul Surya kWp | Kapasitas Inverter kVA | Energi / tahun MWh |
|---------------------|--------------|--------------------|------|---------|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| | | Total | Seri | Paralel | | | |
| Gedung E | BUS 238 | 192 | 28 | 3 | 105.6 | 100 | 129.2 |
| | | | 27 | 4 | | | |
| Gedung I | BUS 221 | 192 | 28 | 3 | 105.6 | 100 | 133.2 |
| | | | 27 | 4 | | | |
| Gedung J | BUS 235 | 248 | 28 | 5 | 136.4 | 100 | 166.1 |
| | | | 27 | 4 | | | |
| Gedung J & K | BUS 236 | 188 | 28 | 3 | 103.4 | 100 | 134.5 |
| | | | 26 | 4 | | | |
| Gedung K | BUS 104 | 128 | 28 | 2 | 70.4 | 60 | 87.74 |
| | | | 24 | 3 | | | |
| Gedung L#1 | BUS 232 | 120 | 24 | 5 | 66 | 60 | 91.22 |
| Gedung L#2 | BUS 230 | 200 | 25 | 8 | 110 | 100 | 134.4 |
| Gedung M#1 | BUS 115 | 156 | 26 | 6 | 85.8 | 60 | 109.2 |
| Gedung M#2 | BUS 218 | 192 | 28 | 3 | 105.6 | 100 | 136.7 |
| | | | 27 | 4 | | | |
| Gedung N,O | BUS 206 | 212 | 27 | 4 | 116.6 | 100 | 144 |
| | | | 26 | 4 | | | |
| Gedung T, U, Kantin | BUS 223 | 176 | 23 | 4 | 96.8 | 100 | 158.4 |
| | | | 28 | 3 | | | |
| Total | | 2004 | | | 1102.2 | 980 | 1424.7 |

Untuk desain penempatan modul surya, pembagian kelompok modul surya dan titik lokasi penempatan inverter menggunakan software Helioscope. Luasan modul surya yang dapat dipasang di Pabrik Farmasi dapat dilihat pada Gambar 8. Dengan tampilan google map maka Helioscope berhasil memberikan gambaran rencana pemasangan PLTS di Pabrik Farmasi. Peletakan modul surya telah memperhitungkan sudut atap, sudut azimuth, jarak antar modul

surya dan peletakan inverter. Evaluasi dampak bayangan terhadap energi yang dihasilkan modul surya telah dilakukan. Terlihat pada atap Gedung J#1 tidak menyeluruh karena terhalang oleh Gedung H. Begitu juga pada gedung – gedung lain karena terhalang pohon.



Gambar 8. Simulasi Pemasangan PLTS di Pabrik Farmasi Menggunakan Helioscope

3.2 Analisis Aliran Daya

3.2.1 Validasi Pemodelan Sistem Tenaga

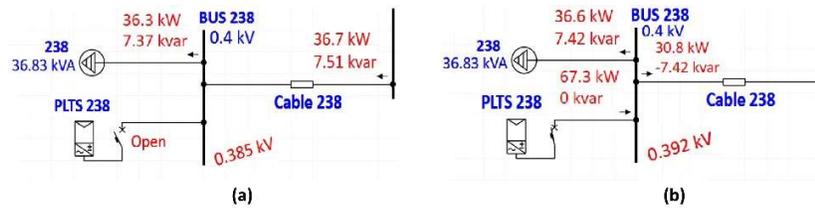
Untuk memastikan pemodelan dapat mewakili kondisi aktual maka perlu validasi. Tabel 4 menunjukkan hasil dari validasi dengan membandingkan nilai pada saat kondisi aktual (A) dan kondisi simulasi (S) pada beberapa titik bus. Data tersebut menunjukkan bahwa model yang digunakan dalam penelitian ini memiliki toleransi error (E) -2.4 sampai dengan 3.7%. Validasi dilakukan mengacu pada pukul 12:00 WIB dimana nilai irradiansi mencapai puncak.

Tabel 4. Data Validasi Pemodelan Sistem Tenaga

| Objek | kVA | | | A | | | VLL | | |
|----------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | A | S | E | A | S | E | A | S | E |
| BUS 2 | 3588 | 3593 | -0.1% | 101 | 101 | 0.1% | 20.50 | 20.51 | 0.0% |
| BUS 3A | 340 | 333 | 1.9% | 10 | 9 | 2.8% | 20.31 | 20.46 | -0.7% |
| BUS 3B | 1348 | 1314 | 2.5% | 38 | 37 | 2.5% | 20.50 | 20.48 | 0.1% |
| BUS 4 | 1894 | 1939 | 2.4% | 54 | 55 | -2.1% | 20.36 | 20.47 | -0.5% |
| BUS 2500 | 1584 | 1526 | 3.7% | 2330 | 2273 | 2.5% | 0.39 | 0.39 | 1.3% |
| BUS 1250 | 409 | 402 | 1.7% | 602 | 598 | 0.6% | 0.39 | 0.39 | 1.3% |

3.2.2 Simulasi Sistem Tenaga

Simulasi aliran daya pada sistem tenaga dilakukan pada waktu puncak PLTS dimana daya yang dihasilkan maksimal. Gambar 9 menunjukkan dampak interkoneksi terhadap aliran daya. Pada kondisi normal (Gambar 9.a) untuk memenuhi kebutuhan beban BUS 238 (Gedung E) sebesar 36,83 kVA dibutuhkan daya 36,3 kW dan 7,37 kVAR melewati saluran *Cable* 238. Kemudian PLTS dengan kapasitas 105,6 kWp terinterkoneksi pada bus tersebut dan menghasilkan daya 67,3 kW dan 0 kVAR. Dapat dilihat pada Gambar 9.b bahwa terjadi aliran daya balik yang disebabkan daya PLTS lebih besar dari daya beban sehingga terdapat selisih sebesar -30,8 kW dan 7,42 kVAR. Mengacu pada Gambar 5 maka kondisi ini masuk kedalam Kuadran II bersifat *lagging* dimana aliran daya kembali menuju jaringan karena daya yang dihasilkan PLTS lebih besar dari kebutuhan beban.



Gambar 9. Perbandingan Aliran Daya Sebelum dan Sesudah Interkoneksi PLTS pada BUS 238

Pada simulasi ETAP daya aktif (P) selalu bernilai positif sehingga daya yang mengalir menjadi 30.8 kW dan -7.42kVAR. Nampak terjadi perubahan polaritas pada daya reaktif (Q) menjadi negatif menunjukkan bahwa terjadi aliran daya menuju jaringan karena interkoneksi PLTS dengan kapasitas melebihi beban. Tabel 5 menunjukkan simulasi aliran daya secara keseluruhan pada sistem tenaga. Pembacaan dilakukan di tiga kelompok peralatan yaitu pada saluran dimana PLTS terinterkoneksi (Cable 104, 115, 206, 218, 221, 223, 230, 232, 235,236 dan 238), jaringan PLN pada saluran SUTM (Line 1, 3 dan 5) dan traffo baik di sisi Pabrik Farmasi (T3 dan T4) atau milik PLN (T5). Berdasarkan hasil simulasi menunjukkan terdapat perubahan polaritas daya reaktif pada beberapa titik bus (BUS 104, 115, 218, 223, 236 dan 238) menunjukkan bahwa pada titik tersebut daya yang dihasilkan PLTS melebihi kebutuhan beban. Data pada Line 1 menunjukkan bahwa secara optimal interkoneksi PLTS mampu mengurangi penggunaan beban 3586.8 kW menjadi 2866.9 kW. Secara komulatif daya reaktif yang mengalir ke sistem jaringan penurunan dari -0.22 menjadi -41.09 kVAR. Penurunan terjadi juga pada saluran menuju Pabrik KJU (Line 2) dan Pabrik Lain (Line 5). Penurunan daya reaktif berkaitan dengan nilai faktor daya. Namun dengan nilai yang relatif kecil perubahan tersebut dapat diabaikan. Aliran daya reaktif juga nampak terlihat pada traffo baik pada traffo milik Pabrik Farmasi (T3 dan T4) maupun traffo milik PLN pada Feeder 11. Nilainya juga relatif kecil sehingga dapat diabaikan.

Tabel 5. Analisis Aliran Daya pada Saluran

| ID | Lokasi | Kapasitas PLTS (kWp) | kW Flow | | kvar Flow | | Amp Flow | |
|-----------|---------------------|----------------------|---------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | | | PLN | PLN-PLTS | PLN | PLN-PLTS | PLN | PLN-PLTS |
| Cable 104 | Gedung K | 70.40 | 30.27 | 14.58 | 6.13 | -6.11 | 45.94 | 23.30 |
| Cable 115 | Gedung M#1 | 85.80 | 41.60 | 12.44 | 8.56 | -8.35 | 63.17 | 22.13 |
| Cable 206 | Gedung N,O | 116.60 | 101.80 | 27.32 | 20.78 | 20.63 | 154.70 | 50.78 |
| Cable 218 | Gedung M#2 | 105.60 | 40.89 | 26.44 | 8.34 | -8.30 | 62.15 | 41.00 |
| Cable 221 | Gedung I | 105.60 | 76.22 | 8.57 | 47.00 | 46.97 | 133.40 | 70.82 |
| Cable 223 | Gedung T, U, Kantin | 127.60 | 72.44 | 8.14 | 14.76 | -14.53 | 110.10 | 24.67 |
| Cable 230 | Gedung L#2 | 110.00 | 81,15 | 12.05 | 16.50 | 16.40 | 123.30 | 30.19 |
| Cable 232 | Gedung L#1 | 66.00 | 50.25 | 8.35 | 10.24 | 10.07 | 76.38 | 19.40 |
| Cable 235 | Gedung J | 136.40 | 170.00 | 82.69 | 35.58 | 34.65 | 258.60 | 133.00 |
| Cable 236 | Gedung J&K | 103.40 | 30.06 | 34.82 | 6.14 | -6.11 | 45.69 | 52.35 |
| Cable 238 | Gedung E | 105.60 | 36.70 | 30.76 | 7.51 | -7.42 | 55.66 | 46.59 |

Analisis Perancangan dan Pemasangan PLTS Kapasitas 1,1 MWp pada Pabrik Farmasi di Kota Semarang

| ID | Lokasi | Kapasitas PLTS (kWp) | kW Flow | | kvar Flow | | Amp Flow | |
|-------|--------------------|----------------------|---------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | | | PLN | PLN-PLTS | PLN | PLN-PLTS | PLN | PLN-PLTS |
| Line1 | Pabrik Farmasi PQR | | 3586.80 | 2866.90 | -0.22 | -41.09 | 101.20 | 80.71 |
| Line3 | Pabrik KJU | | 1646.90 | 1647.30 | 0.43 | 0.12 | 46.47 | 46.46 |
| Line5 | Pabrik Lain | | 333.30 | 333.40 | 0.71 | 0.65 | 9.41 | 9.40 |
| T3 | Fasum | | 404.20 | 305.00 | -0.30 | -3.59 | 11.40 | 8.60 |
| T4 | Produksi | | 1534.80 | 909.70 | -0.86 | -45.11 | 43.29 | 25.67 |
| T5 | Feeder 11 | | 3593.80 | 2867.30 | 39.32 | -23.75 | 13.83 | 11.04 |

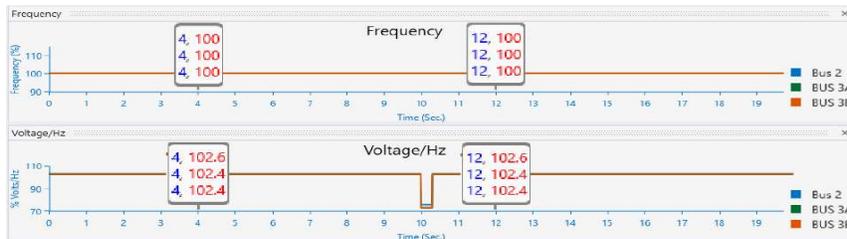
3.2.3 Dampak Integrasi PLTS Pada Variasi Kondisi PLN dan PLN-PLTS

Gambar 10 menunjukkan pengaruh integrasi PLTS pada sistem tenaga terhadap profil tegangan pada seluruh bus. Saat kondisi PLN-PLTS menunjukkan bahwa lokasi dimana PLTS terinterkoneksi (Bus 104, 115, 206, 218, 221, 223, 230, 232, 235, 236 dan 238) mengalami peningkatan profil tegangan. Nampak juga bahwa pemasangan PLTS berpengaruh terhadap profil tegangan pada pabrik disekitar. Terjadi peningkatan profil tegangan pada BUS 2 sebesar 0.02%, BUS 3A sebesar 0.06% dan BUS 3B sebesar 0.06%. Untuk kestabilan sistem tenaga dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11.

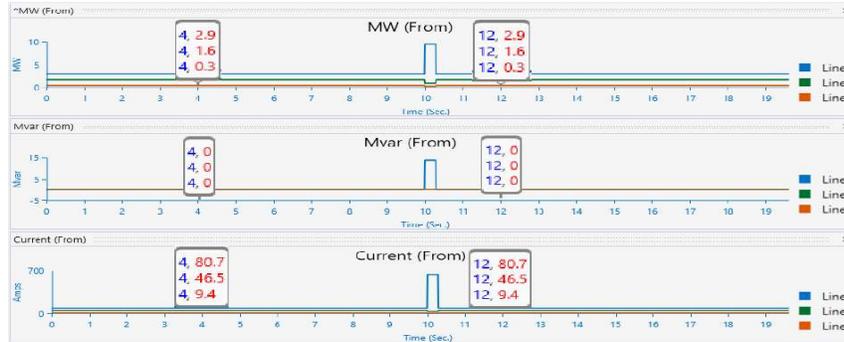


Gambar 10. Pembacaan Nilai Tegangan Bus pada Kondisi PLN dan PLN-PLTS

Hasil simulasi setelah terjadi gangguan menunjukkan sistem tenaga mampu kembali pada kondisi awal sebelum terjadi gangguan. Pada Gambar 11 terlihat frekuensi dan profil tegangan setelah terjadi gangguan kembali stabil dan tidak terjadi osilasi.



Gambar 11. Grafik Pengaruh Gangguan Terhadap Frekuensi dan Profil Tegangan



Gambar 12. Grafik Pengaruh Gangguan Terhadap Daya Aktif, Daya Reaktif dan Arus

Gambar 12 menunjukkan kestabilan daya yang dialirkan PLN menuju konsumen (Line 1) kembali pada kondisi normal begitu juga pada Pabrik KJU (Line 3) dan Pabrik Lain (Line 5). Nilai daya aktif, daya reaktif dan arus setelah terjadi gangguan kembali stabil.

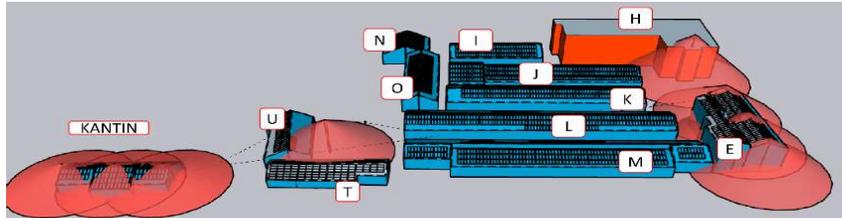
3.3 Analisis Perlindungan Sambaran Petir

Tabel 6 adalah hasil perhitungan area proteksi menggunakan metode sudut perlindungan. Berdasarkan perhitungan diperoleh klasifikasi gedung – gedung yang berada di pabrik farmasi memiliki level proteksi IV dan khususnya Gedung T dan U tidak memerlukan proteksi karena memiliki nilai $N_d < N_c$.

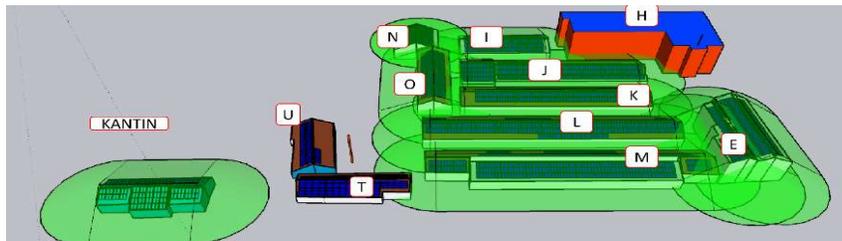
Tabel 6. Analisis Sudut Proteksi Sambaran Petir

| Parameter | Gedung | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|
| | E | H | I | J | K | L | M | N | O | T | U | Kantin | |
| Aktual | a | 24 | 34.4 | 16.8 | 81.4 | 80 | 103 | 107 | 18.4 | 45.5 | 42 | 29.6 | 37.7 |
| | b | 42.3 | 66.5 | 41.5 | 19.5 | 15.5 | 16 | 19 | 20.8 | 14.4 | 12.9 | 16.9 | 15.1 |
| | h | 16.4 | 18.9 | 8.5 | 9.8 | 7.8 | 9.6 | 9.1 | 11 | 9.6 | 7.4 | 8.2 | 10 |
| | T | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 | 148 |
| | N_d | 0.31 | 0.49 | 0.12 | 0.21 | 0.15 | 0.23 | 0.23 | 0.13 | 0.14 | 0.09 | 0.10 | 0.14 |
| | E | 0.68 | 0.80 | 0.15 | 0.53 | 0.35 | 0.56 | 0.57 | 0.24 | 0.28 | -0.07 | -0.03 | 0.26 |
| | LPS | IV | - | - | IV |
| | h_2 | 18 | 26.2 | - | - | - | - | - | 11.5 | - | 18.2 | - | 11 |
| α° | 54 | 47 | - | - | - | - | - | 64 | - | 53 | - | 65 | |
| R | 25 | 28 | - | - | - | - | - | 24 | - | 24 | - | 24 | |
| Rekomendasi | Jumlah Penangkal | 3 | | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | 3 |
| | h_2 | 19 | | 10 | 11 | 10 | 11 | 11 | 12 | 11 | | | 11 |
| | α° | 54 | | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 64 | 65 | | | 65 |
| | R | 26 | | 21 | 24 | 21 | 24 | 24 | 25 | 24 | | | 24 |

Setelah mengetahui masing – masing level proteksi Gedung maka mengacu pada Gambar 6.b sudut proteksinya dapat ditentukan. Pada kondisi eksisting penangkal petir hanya terpasang di beberapa Gedung diantaranya Gedung E, H, N, T dan Kantin. Data – data tersebut kemudian disimulasikan menggunakan bantuan software Sketchup agar dapat dianalisis secara visual. Gambar 13 menunjukkan area yang berada didalam bangun kerucut berwarna merah adalah area gedung yang terlindungi. Pada Gedung E dan kantin telah dipasang penangkal petir sejumlah tiga buah pada atap dan berdasarkan simulasi masih terdapat beberapa area atap yang tidak terlindungi. Pada Gedung H area perlindungan hanya mencakup depan Gedung saja. Dan diantara Gedung U dan T hanya sebagian atap saja yang terlindungi. Secara visual dapat disimpulkan bahwa penangkal petir eksisting tidak mampu memberikan PLTS perlindungan terhadap sambaran petir.



Gambar 13. Evaluasi Penangkal Petir Eksisting Terhadap Rencana Pemasangan PLTS



Gambar 14. Hasil Simulasi Rekomendasi Penambahan Penangkal Petir

Berikut ini beberapa rekomendasi yang dapat diberikan oleh peneliti: Pertama, pada gedung kantin dengan menambahkan terminasi udara yang menghubungkan tiga buah penangkal petir yang sudah ada. Kedua, penambahkan penangkal petir pada masing-masing bangunan beserta terminasi udara yang saling terhubung dengan ketentuan mengacu pada rekomendasi pada Tabel 6. Gambar 14 menunjukkan simulasi setelah dilakukan penambahan penangkal petir pada masing-masing bangunan.

4. KESIMPULAN

Total kapasitas PLTS yang dapat dipasang di Pabrik Farmasi adalah 1102,2 kWp dengan energi yang dihasilkan 1424,66 MWh/tahun. Komponen yang digunakan adalah 2004 buah modul surya 550 kWp Trina solar TSM-DE19, 3 buah inverter 60 kW Huawei SUN2000 60KTL-M0 dan 8 buah inverter 100 kW Huawei SUN2000 100KTL-M1 yang terbagi dalam 11 kelompok PLTS. Hasil simulasi menunjukkan terdapat aliran daya reaktif menuju jaringan PLN dan pabrik sekitar namun nilainya sangat kecil dan tidak berpengaruh signifikan pada faktor daya. Telah terjadi perbaikan profil tegangan pada seluruh bus sebagai dampak interkoneksi PLTS. Hasil analisis area perlindungan sambaran petir menggunakan metode sudut perlindungan menunjukkan bahwa penangkal petir eksisting tidak dapat memberikan perlindungan pada seluruh modul surya PLTS yang akan di pasang. Dari total 9 gedung harus di berikan proteksi dengan level proteksi IV.

DAFTAR RUJUKAN

- Almaktar, M., Falah, A., Hasan, Z., Elbreki, A. M., & Mohamed, F. A. (2022). Power Quality Assessment of Karabuk University'S Grid-Connected Microgrid under High Penetration of PV Generation. *ISMSIT 2022 - 6th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Proceedings*, (pp. 472–477).
- Amole, A. O., Oladipo, S., Olabode, O. E., Makinde, K. A., & Gbadega, P. (2023). Analysis of grid/solar photovoltaic power generation for improved village energy supply: A case of Ikose in Oyo State Nigeria. *Renewable Energy Focus*, 44, 186–211.

- Solar, A. (2023). *Helioscope Software and Application*. Retrieved from www.helioscope.aurorasolar.com
- D Chaturangi, U. J., & S Perera, A. A. (2019). Evaluation of Maximum Solar PV Penetration: Deterministic Approach for Over Voltage Curtailments. *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*.
- Hetita, I., Zalhaf, A. S., Mansour, D. E. A., Han, Y., Yang, P., & Wang, C. (2022). Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: A review. *Renewable Energy, 184*, 134–148.
- Kamaruzaman, M. Z., Wahab, N. I. A., & Nasir, M. N. M. (2018). Reliability Assessment of Power System with Renewable Source using ETAP. *International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends*, (pp. 236–242).
- Khenissi, I., Sellami, R., Fakhfakh, M. A., Neji, R., & Derbel, F. (2020). Effects of high PV penetration level on voltage and frequency profile of a distribution network. *Proceedings of the 17th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2020*, (pp. 559–564).
- Kotb, S. A., Zaky, M. M., Elbaset, A. A., & Morad, M. (2022). Application of hybrid renewable energy for supplying the emergency power supply system in case of station blackout in nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy, 175*.
- Kumar, N. M., Chakraborty, S., Yadav, S. K., Singh, J., & Chopra, S. S. (2022). Advancing simulation tools specific to floating solar photovoltaic systems – Comparative analysis of field-measured and simulated energy performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52*.
- Mohamed, A., Kanwhen, O., & Bobker, M. (2022). Distributed energy resources for water resource recovery facilities: A metropolitan city case study. *Applied Energy, 327*.
- Mohammedali, A. F. G., Hamouda, M., & Touhami, G. (2021). Dynamic Impact Analysis of Integrating a 6 MW Solar Photovoltaic Power Plant into Medium Voltage Distribution Network. *European Journal of Electrical Engineering, 23*(5), 417–422.
- Refaat, S. S., Abu-Rub, H., Sanfilippo, A. P., & Mohamed, A. (2018). Impact of grid-tied large-scale photovoltaic system on dynamic voltage stability of electric power grids. *IET Renewable Power Generation, 12*(2), 157–164.
- Republik Indonesia, M. E. S. D. M. (2021). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Npmptr 26 Tahun 2021 Tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Umum*.

- Rudge, K. (2021). The potential for community solar in Connecticut: A geospatial analysis of solar canopy siting on parking lots. *Solar Energy*, *230*, 635–644.
- Satpathy, P. R., Aljafari, B., Thanikanti, S. B., & Madeti, S. R. K. (2023). Electrical fault tolerance of photovoltaic array configurations: Experimental investigation, performance analysis, monitoring and detection. *Renewable Energy*, *206*, 960–981.
- Şevik, S. (2022). Techno-economic evaluation of a grid-connected PV-trigeneration-hydrogen production hybrid system on a university campus. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(57), 23935–23956.
- Singhasathein, A., & Sumanonta, K. (2020). The Analytical of Penetration Distance due to the Lightning Flash for the Photovoltaic Module. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, (pp. 669–672).
- Sriyanto, N. N., Warsito, A., & Syakur, A. (2018). Simulasi Penentuan Kebutuhan Bangunan Terhadap Sistem Proteksi Petir Eksternal Pada Gedung ICT Center. *TRANSIENT*, *1*(3), 701–708.
- Syafii, El Gazaly, A., & Abadi, A. (2019). Load Flow Analysis of PV System Integration in Universitas Andalas Distribution System. *Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 17–20.
- PVGIS, the E. C. (2013). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. Retrieved from www.re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR
- Upadhyay, T., & Jamnani, J. G. (2022). Simulation and analysis of solar photovoltaic penetration in conventional power system. *Materials Today: Proceedings*, *62*(P13), 7281–7287.
- Zain Ul Abideen, M., Ellabban, O., Refaat, S. S., Abu-Rub, H., & Al-Fagih, L. (2019). A Novel Methodology to Determine the Maximum PV Penetration in Distribution Networks. Dalam *2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*.