

## ANALISIS POTENSI ENERGI MATAHARI MENJADI ENERGI LISTRIK DI INDONESIA: PROYEKSI DAN PERAMALAN KAPASITAS TERPASANG PLTS DENGAN METODE *DOUBLE EXPONENTIAL SMOOTHING*

Hizkia Timotius<sup>1</sup>,

Program Studi Teknik Mesin, President University, Indonesia  
Email: hizkia.timotius@student.president.ac.id

Joni Welman Simatupang<sup>2</sup>

Program Studi Teknik Elektro, President University, Indonesia  
Koresponden Email: joniwsmtp@president.ac.id

Mutiara Andriani<sup>2</sup>,

Program Studi Teknik Elektro, President University, Indonesia  
Email: mutiara.andriani@student.president.ac.id

Praja Situmeang<sup>2</sup>,

Program Studi Teknik Elektro, President University, Indonesia  
Email: praja.situmeang@student.president.ac.id

Indra Ramos SM<sup>2</sup>,

Program Studi Teknik Elektro, President University, Indonesia  
Email: indra.sm@student.president.ac.id

Muamar Fauzi<sup>3</sup>,

Program Studi Teknik Lingkungan, President University, Indonesia  
Email: muamar.fauzi@student.president.ac.id

**ABSTRACTS:** *This study endeavors to assess the progression in the installed capacity of Solar Power Plants (PLTS) in Indonesia, given that the obtained data indicates a solar energy potential of 207,898 MW in the country. However, the installed capacity of Solar Photovoltaic (PV) Power Plants (PLTS) is still low compared to other types of power plants. In the projection for the National Electricity Supply Business Plan (RUPTL) 2021-2030, it is expected that the installed capacity of PLTS will increase to 4.7 GWp by 2030, but this is still far from the target projection of 800-840 GWp by 2050 according to IRENA. Through forecasting using three methods, namely moving average, single exponential smoothing, and double exponential smoothing, the projected installed capacity for the year 2050 significantly deviates from IRENA's projection. Historical data of installed capacity of PLTS from 2010 to 2022 was used as the basis for the forecasting. The results of the three forecasting methods were compared to assess their accuracy and performance in predicting the installed capacity of PLTS in the future years. This study suggests using the double exponential smoothing method as a feasible forecasting technique and emphasizes the need for further research on inhibiting factors and support from various stakeholders to successfully utilize solar energy as a source of electricity in Indonesia. The findings of this research provide guidance for the planning and development of PLTS in the future, as well as important implications for achieving the national renewable energy projection targets.*

**Keyword:** *Double exponential smoothing; Forecasting methods; Solar energy potential; Solar Photovoltaic Power Plants; Renewable energy projection.*

**ABSTRAK:** Studi ini berupaya untuk menilai perkembangan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia mengingat data yang diperoleh menunjukkan potensi energi surya sebesar 207.898 MW di Indonesia. Namun, kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) masih rendah dibandingkan jenis pembangkit lainnya. Dalam proyeksi RUPTL 2021-2030, diharapkan kapasitas terpasang PLTS meningkat menjadi 4,7 GWp pada tahun 2030, tetapi tetap jauh dari target proyeksi IRENA yang mencapai 800-840 GWp pada tahun 2050. Melalui peramalan menggunakan tiga metode, yaitu *moving average*, *single exponential smoothing*, dan *double exponential smoothing*, diperoleh hasil kapasitas terpasang pada tahun 2050 dengan selisih yang signifikan dari proyeksi IRENA. Data historis kapasitas terpasang PLTS dari tahun 2010 hingga 2022 diambil sebagai dasar peramalan. Hasil peramalan dari ketiga metode tersebut dibandingkan untuk menilai akurasi dan kinerjanya dalam memprediksi kapasitas terpasang PLTS pada tahun-tahun mendatang. Penelitian ini menyarankan penggunaan metode *double exponential smoothing* sebagai metode peramalan yang layak, dan menekankan perlunya penelitian lebih lanjut mengenai faktor penghambat dan dukungan dari berbagai pihak untuk berhasilnya pemanfaatan energi surya sebagai sumber tenaga listrik di Indonesia. Hasil penelitian ini memberikan panduan untuk perencanaan dan pengembangan PLTS di masa depan, serta implikasi penting dalam mencapai target proyeksi energi terbarukan nasional. **Kata Kunci:** *Double exponential smoothing; Metode peramalan; Potensi energi surya; Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS); Proyeksi energi terbarukan.*

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, President University, Cikarang, Jawa Barat

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Elektro, President University, Cikarang, Jawa Barat

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, President University, Cikarang, Jawa Barat

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak di daerah khatulistiwa dan beriklim tropis sehingga memiliki intensitas penyinaran matahari yang baik sepanjang tahun. Pemanfaatan energi matahari menjadi energi listrik, atau yang dikenal sebagai energi surya, memiliki potensi besar untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Potensi energi matahari di Indonesia sangat tinggi karena negara ini terletak di kawasan tropis dengan iklim yang panas. Menurut data yang didapatkan dari Dewan Energi Nasional (DEN), potensi energi matahari di Indonesia mencapai rata-rata 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari, atau setara dengan 207.898 MW [1][2].

■ **Tabel 1.** Tabel potensi radiasi surya di indonesia

No.	Provinsi	Potensi (MW)	No.	Provinsi	Potensi (MW)
1	Kalimantan Barat	20.113	18	Sumatera Barat	5.898
2	Sumatra Selatan	17.233	19	Kalimantan Utara	4.643
3	Kalimantan Timur	13.479	20	Sulawesi Tenggara	3.917
4	Sumatera Utara	11.851	21	Bengkulu	3.475
5	Jawa Timur	10.335	22	Maluku Utara	3.036
6	Nusa Tenggara Barat	9.931	23	Bangka Belitung	2.810
7	Jawa Barat	9.099	24	Banten	2.461
8	Jambi	8.847	25	Lampung	2.238
9	Jawa Tengah	8.753	26	Sulawesi Utara	2.113
10	Kalimantan Tengah	8.459	27	Papua	2.035
11	Aceh	7.881	28	Maluku	2.020
12	Kepulauan Riau	7.763	29	Sulawesi Barat	1.677
13	Sulawesi Selatan	7.588	30	Bali	1.254
14	Nusa Tenggara Timur	7.272	31	Gorontalo	1.218
15	Papua Barat	6.307	32	DI Yogyakarta	996
16	Sulawesi Tengah	6.187	33	Riau	753
17	Kalimantan Selatan	6.031	34	DKI Jakarta	225
<b>Rata-rata</b>				<b>207.898</b>	

Pada 2022, energi matahari telah menjadi bagian penting dari langkah Indonesia menuju emisi *net-zero* di tahun 2060. Penelitian dari ESDM, IEA, IRENA, dan IESR menyoroti peran utama energi matahari dalam dekarbonisasi, dengan perkiraan bahwa sekitar sepertiga pembangkit listrik pada 2060 berasal dari tenaga surya, dengan kapasitas terpasang sekitar 420 GW (sekitar 60% dari total kapasitas terpasang) [3]

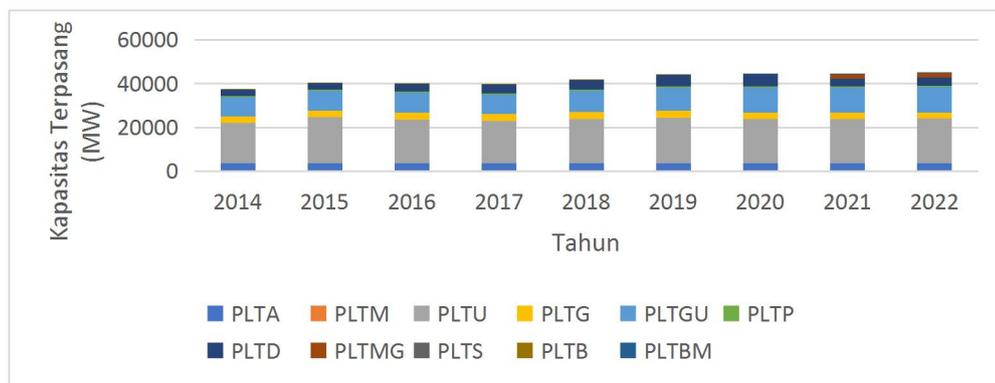
IRENA memproyeksikan bahwa energi matahari akan menjadi kunci dalam mencapai emisi *net-zero* Indonesia pada 2050. Dalam skenario 1,5-S, kapasitas tenaga surya diproyeksikan mencapai 800-840 GWp pada 2050, mewakili sekitar 79-84% dari total kapasitas terpasang. Penelitian lain juga mengeksplorasi skenario percepatan sejalan dengan 1,5 °C, di mana energi matahari diperkirakan akan menyumbang 88% dari pembangkitan listrik tenaga surya dan 1.500 GWp kapasitas terpasang pada 2050 [3]

Di 2022, setelah RUPTL 2021-2030, satu pelelangan tenaga surya terjadwal untuk program konversi dari diesel ke energi terbarukan pada Maret 2022. Fase pertama program ini bertujuan mengkonversi 212 MW dari pembangkit diesel di 183 lokasi menjadi proyek solar penyimpanan energi dalam 8 kelompok. Namun, penandatanganan PPA untuk dua kelompok, Jawa-Madura dan Kalimantan 1, tampaknya mengalami penundaan dari jadwal awal pada Oktober 2022 [3]. RUPTL-PLN (2021–2030) menyajikan data rencana penambahan kapasitas PLTS, baik milik PLN maupun swasta hingga 2030 di Indonesia (lihat Tabel 2 dan Gambar 2) [4].

■ **Tabel 2.** Penambahan kapasitas terpasang PT PLN dan swasta sampai 2030

Tahun	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
PLN (MW)	59	126	237	266	773	17	8	25	32	157
Swasta (MW)	1	161	1.071	358	858	110	140	140	140	0

Gambar 1 menunjukkan data dari PLN pada tahun 2014-2022 tentang statistik kapasitas terpasang milik PLN. Dapat dilihat bahwa Energi Baru Terbarukan (EBT) mulai mengambil peran yang cukup signifikan melalui pertumbuhan per tahun, dari tahun 2014-2022. Namun, jika kita lihat pada Gambar 1 tentang pertumbuhan kapasitas terpasang per tahun milik PLN, pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh PLTU, PLTGU dan PLTA sebagai 3 terbesar secara berurutan. Sebaliknya, 3 terendah berturut-turut dari yang paling rendah ke yang paling tinggi adalah PLTB, PLTBM, dan PLTS. Rata-rata laju pertumbuhan kapasitas terpasang PLTS per tahun hanya sekitar 0,0345% dibandingkan total kapasitas terpasang per tahun.



■ **Gambar 1.** Grafik pertumbuhan kapasitas terpasang PT PLN tahun 2014-2022 [5]

Berdasarkan data statistik PLN tahun 2021 dan 2022, terdapat data mengenai kapasitas terpasang mulai tahun 2011-2022, yang selanjutnya akan digunakan dalam penelitian ini menjadi data acuan untuk peramalan. Tabel 3 menunjukkan data kapasitas terpasang per tahun milik PLN [6], [7].

■ **Tabel 3.** Tabel kapasitas terpasang PT PLN tahun 2011-2022

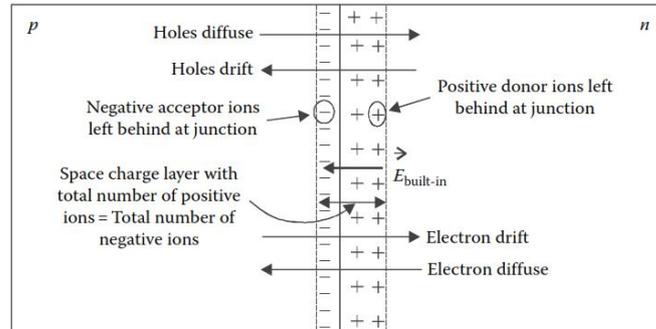
TAHUN	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
KAPASITAS TERPASANG (MW)	1,23	6,2	7,94	8,73	8,86	12,94	7,98	12,07	14,65	16,71	21,34	28,62

Dalam penelitian ini, peneliti ingin mencari korelasi pertumbuhan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia, mengingat potensi energi surya yang melimpah mencapai 207.898 MW, dan membandingkan dengan proyeksi kapasitas terpasang PLTS dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Nasional (RUPTL) 2021-2030 dan target proyeksi IRENA untuk tahun 2050. Peneliti juga bertujuan untuk mengevaluasi proyeksi kapasitas terpasang PLTS dalam RUPTL 2021-2030 dan mengidentifikasi sejauh mana pencapaian target proyeksi IRENA pada tahun 2050. Terakhir, melakukan peramalan kapasitas terpasang PLTS untuk tahun 2050 menggunakan metode *moving average*, *single exponential smoothing*, dan *double exponential smoothing*, serta membandingkan ketiga metode peramalan untuk menilai akurasi dan kinerjanya dalam memprediksi kapasitas terpasang PLTS di masa depan.

### DASAR TEORI

Photovoltaic (PV) adalah cara langsung mengkonversi sinar matahari menjadi listrik tanpa pemanas. Perangkat PV padat, simpel dalam desain, tahan lama, dan memerlukan sedikit pemeliharaan. Keunggulan utamanya adalah dapat dibangun dalam skala mikro hingga megawatt. Digunakan untuk

kalkulator, jam tangan, hingga pembangkit listrik megawatt, PV juga cocok untuk bangunan terpencil, komunikasi, satelit, kendaraan luar angkasa. Modul PV dibuat dari bahan seperti silikon (Si), arsenida galium (GaAs), tembaga indium diselenida (CIS), telurida kadmium (CdTe), dan bahan lainnya. Sel PV berbasis konsep p-n junction atau Schottky junction yang mengubah sinar matahari menjadi listrik, dengan lapisan n-type Si yang terhubung dengan lapisan p-type Si tanpa mengganggu struktur kristal Si saat melintasi junction. Gambar 2 menjelaskan konsep p-n junction [7].

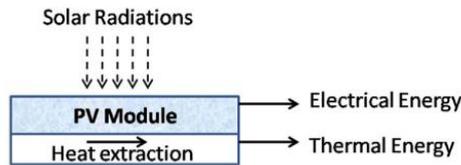


■ **Gambar 2.** Konsep *p-n junction*[8]

Lapisan n memiliki jumlah elektron bebas yang berlimpah dan lapisan p memiliki jumlah lubang bebas yang berlimpah. Dalam kondisi keseimbangan termal, artinya suhu adalah satu-satunya variabel eksternal yang mempengaruhi populasi lubang dan elektron bebas, hubungan antara kepadatan lubang,  $p$ , dan kepadatan elektron,  $n$ , di setiap titik dalam material, dirumuskan menjadi  $np = n_i^2$ , dimana  $n_i$  adalah kira-kira kepadatan elektron atau lubang dalam material intrinsik (bebas kotoran). Ketika kotoran hadir, maka  $n \cong N_d$  dan  $p \cong N_a$ , di mana  $N_d$  dan  $N_a$  adalah kepadatan kotoran donor dan akseptor. Untuk Si,  $n_i \cong 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  pada  $T = 300 \text{ K}$ , sementara  $N_d$  dan  $N_a$  dapat sebesar  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Oleh karena itu, sebagai contoh, jika  $N_d = 10^{18}$  di sisi n-junction, maka  $p = 2,25 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$  [8].

Pemanfaatan panel surya memiliki tiga jenis utama: *on grid* (terhubung dengan jaringan listrik), *off grid/stand-alone* (tidak terhubung ke jaringan PLN), dan *hybrid* (menggabungkan beberapa sumber energi). Solar PV *on grid* terhubung ke jaringan PLN dengan inverter yang mengubah tegangan untuk transmisi listrik[9], [10]. PV *off grid* hanya bergantung pada energi matahari, cocok untuk daerah terpencil. PV *hybrid* menggabungkan beberapa sumber energi untuk keandalan dan efisiensi[9]–[11]. Selain itu, ada juga teknologi PLTS berbasis ST, seperti CSP yang menggunakan cermin untuk mengarahkan sinar matahari ke penerima cairan, menghasilkan uap untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Terdapat juga variasi seperti *Parabolic Through*, *Solar Tower*, dan *Linear Fresnel Reflector* yang memiliki keunggulan masing-masing dalam efisiensi dan kapasitas produksi[12]. Selain itu, ada inovasi seperti PLTS Hybrid PVT yang mengekstraksi panas dari modul fotovoltaik untuk digunakan dalam sistem termal terpisah, meskipun teknologi ini masih dalam pengembangan[9], [12].

Sistem kombinasi fotovoltaik-termal (PVT) dianggap sebagai inovasi menarik dalam teknologi surya. Pada sistem ini, panas dari modul fotovoltaik diekstraksi menggunakan berbagai teknik, kemudian panas yang diekstraksi digunakan dalam sistem termal secara terpisah. PVT telah dikonsepsikan pada pertengahan tahun 1970-an [13], dan awalnya menggunakan air dan udara untuk mengekstraksi panas dari modul PV. Teknologi ini telah berkembang dalam tiga dekade terakhir, termasuk penelitian terbaru mengenai PVT dengan filter spektrum. Walaupun konsep PVT sudah berusia hampir lima dekade, teknologi ini belum sepenuhnya dikomersialkan. Penting untuk membahas perkembangan terkini dalam teknologi ini dan memberikan arah pengembangan di masa depan [9]. Gambar 3 menjelaskan bagaimana konsep awal dari rancangan inovasi PVT.



■ **Gambar 3.** Konsep awal PVT [9]

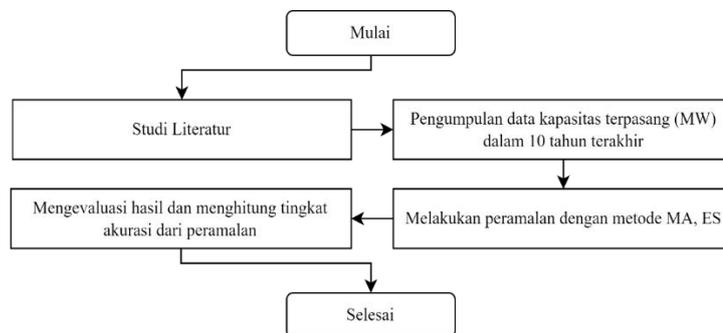
Pada penelitian sebelumnya di tahun 2016, Huide dkk melakukan studi komparatif tiga jenis teknologi pemanfaatan energi matahari untuk bangunan [14]. Kami merangkum nilai efektifitas dari ketiga sistem ini untuk menghasilkan energi listrik dan panas yang ditunjukkan pada Tabel 4.

■ **Tabel 4.** Perbandingan efisiensi tiga sistem (PV, ST & PV/T) [14]

Sistem	Hasil Penelitian	$\eta_{pv}$ , % (Energi Listrik)	$\eta_w$ , % (Energi Panas)
PV	Eksperimen	12,7	-
	Simulasi	13,4	-
ST	Eksperimen	-	67,8
	Simulasi	-	68,0
PV/T	Eksperimen	11,0	51,3
	Simulasi	10,9	51,2

#### METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode studi pustaka dan metode peramalan. Studi beberapa penelitian tentang potensi dan aplikasi PLTS yang telah dilakukan sebelumnya [15]. Selanjutnya penelitian ini menggunakan kombinasi pendekatan kuantitatif, dalam perhitungan potensi PLTS, dan komparatif, dalam membandingkan data peramalan kapasitas terpasang yang dibuat; juga memberikan keterkaitan dengan RUPTL hingga 2030 dan proyeksi IRENA. Data yang digunakan adalah data sekunder yang dikumpulkan dari data statistik PLN pada periode 2011 – 2022 dan menggunakan data tersebut sebagai data acuan dalam peramalan. Pemilihan penggunaan data statistik PLN karena merupakan sebuah badan usaha milik negara Indonesia yang bergerak di bidang ketenagalistrikan, sehingga dapat dinyatakan sebagai perusahaan listrik terbesar. Selanjutnya, perhitungan peramalan dalam penelitian ini, penulis menggunakan metode *Moving average* dan *Exponential Smoothing*. Metode *Moving average* dan *Exponential Smoothing* adalah dua teknik peramalan yang umum digunakan dalam analisis deret waktu untuk memprediksi nilai di masa depan berdasarkan data historis.



■ **Gambar 4.** Diagram alir penelitian

Metode *Moving average (MA)* adalah teknik sederhana yang merata-ratakan sejumlah observasi data terakhir untuk menghasilkan peramalan. Konsep utamanya adalah untuk menghaluskan fluktuasi acak dalam data dan mengidentifikasi tren yang mungkin tersembunyi. Metode ini memiliki sifat khusus yaitu, dalam peramalan dibutuhkan data historis dalam jangka waktu tertentu, semakin panjang

periode yang digunakan untuk peramalan, maka hasil MA akan semakin halus. Berikut adalah formula peramalan menggunakan metode MA [3][16]:

$$M_T = \frac{Y_T + Y_{T-1} + \dots + Y_{T-N+1}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{t=T-N+1}^T Y_t \quad (1)$$

Di mana:

- $M_T$  adalah data observasi pada waktu  $t$ .
- $N$  adalah jumlah observasi data yang digunakan dalam perhitungan *Moving average*.
- $Y_t$  pada periode  $t$  adalah nilai observasi data actual dan peramalan untuk waktu berikutnya ( $t+1$ ).

Semakin besar nilai  $N$ , semakin halus peramalannya, tetapi juga semakin lambat merespons perubahan tren aktual. Sebaliknya, semakin kecil nilai  $N$ , peramalan akan lebih responsif terhadap fluktuasi data, tetapi dapat menghasilkan peramalan yang lebih volatil.

Metode *Single Exponential Smoothing (SES)* dan *Double exponential smoothing (DES)* adalah dua variasi dari teknik *Exponential Smoothing* yang digunakan untuk melakukan peramalan dalam analisis deret waktu. Kedua metode ini memperhitungkan pola tren dalam data historis untuk menghasilkan peramalan di masa depan.

Metode *single exponential smoothing* adalah teknik peramalan yang memberikan bobot yang berbeda pada data terbaru dan menggunakan pendekatan eksponensial dalam peramalannya. Metode ini dapat dikatakan sebagai prosedur yang mengulang perhitungan secara terus-menerus yang menggunakan data terbaru. Setiap data diberi bobot, di mana bobot yang digunakan disimbolkan dengan  $\alpha$ . Bobot  $\alpha$  adalah konstanta yang bisa ditentukan secara bebas, yang mengurangi *forecast error*. Nilai konstanta pemulusan,  $\alpha$ , dapat dipilih di antara nilai 0 dan 1 atau  $0 < \alpha < 1$  [3]. Berikut adalah formula peramalan menggunakan metode *single exponential smoothing*:

$$F_{t+1} = F_t + \alpha(Y_t - F_t) = \alpha Y_t + (1 - \alpha)F_t \quad (2)$$

Di mana:

- $F_{t+1}$  adalah data peramalan pada periode  $t+1$
- $F_t$  adalah data peramalan pada periode  $t$
- $\alpha$  adalah konstanta pemulusan
- $Y_t$  pada periode  $t$  adalah nilai data aktual

Semakin besar  $\alpha$ , semakin besar bobot data terbaru, yang membuat peramalan lebih sensitif terhadap perubahan data terbaru. Sebaliknya, semakin kecil  $\alpha$ , peramalan menjadi lebih stabil dan kurang responsif terhadap fluktuasi data.

*Double exponential smoothing (DES)* adalah pengembangan dari SES yang juga memperhitungkan pola tren linear dalam data historis. Metode ini cocok untuk data yang menunjukkan tren linier, yaitu kenaikan atau penurunan yang konstan dari waktu ke waktu. Dalam metode Holt, tren tidak diperhalus secara langsung melalui pemulusan ganda. Sebaliknya, proses pemulusan tren dilakukan dengan memanfaatkan parameter yang berbeda dari yang digunakan dalam pemulusan data aslinya [17]. Peramalan dalam metode Holt's menggunakan dua konstanta pemulusan,  $\alpha$  dan  $\beta$  (dan masing-masing memiliki besaran antara 0 dan 1), dan tiga persamaan utama. Berikut adalah formula peramalan menggunakan metode DES [3][18][19]:

$$\text{Level} \quad : \quad l_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (3.1)$$

$$\text{Growth} \quad : \quad b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (3.2)$$

$$\text{Forecast} \quad : \quad F_t = l_t + (h)b_t \quad (3.3)$$

Di mana:

- $F_t$  adalah data peramalan pada periode t
- $Y_t$  adalah data aktual pada periode t
- $\alpha$  adalah konstanta pemulusan pada persamaan level
- $\beta$  adalah konstanta pemulusan pada persamaan growth
- $h$  adalah horizon peramalan (1,2,3,dst)

DES menggunakan dua konstanta pemulusan,  $\alpha$  untuk level dan  $\beta$  untuk tren. Konstanta  $\alpha$  menentukan bobot data terbaru dalam peramalan level, sedangkan konstanta  $\beta$  menentukan seberapa cepat tren dapat berubah.

Dalam melakukan peramalan, terdapat beragam metode yang dapat diterapkan sesuai dengan karakteristik studi kasus yang sedang diteliti. Penelitian ini memfokuskan pada penggunaan tiga metode khusus untuk menghitung akurasi peramalan, yang dipilih secara hati-hati berdasarkan kecocokan dan relevansinya terhadap lingkup studi kasus yang sedang dijalankan. Metode-metode ini menjadi fokus dalam analisis untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap proses peramalan yang akan dilakukan. Dalam penelitian ini penulis menggunakan tiga metode untuk melakukan perhitungan akurasi, yaitu *Mean Absolute Deviation*, *Mean Square Error* dan *Mean Absolute Percentage Error*.

*Mean Absolute Deviation* (MAD) adalah metrik evaluasi untuk mengukur tingkat kesalahan rata-rata antara nilai-nilai aktual dan nilai-nilai peramalan. Ini adalah ukuran absolut dari selisih antara nilai aktual dan nilai peramalan, yang kemudian dihitung rata-ratanya. MAD mengukur kesalahan tanpa mempertimbangkan arah positif atau negatif dari selisih, sehingga menghindari pembatalan kesalahan positif dan negatif [3].

$$\text{Rumus MAD: } MAD = \text{mean}(|e_t|) = \sum \frac{|Actual-Forecast|}{n} \quad (4)$$

Di mana:

- $e_t$  adalah nilai absolut dari nilai aktual dikurangi nilai peramalan
- Actual adalah nilai aktual.
- Forecast adalah nilai peramalan.
- Mean adalah rata-rata atau jumlah nilai data dibagi jumlah total data.
- n adalah jumlah data.

MAD menghasilkan nilai dalam unit data yang sama dengan nilai aslinya, sehingga mudah untuk diinterpretasikan. Semakin rendah nilai MAD, semakin akurat peramalan model.

*Mean Square Error* (MSE) adalah metrik evaluasi yang mengukur rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai peramalan. MSE menekankan perbedaan antara nilai aktual dan nilai peramalan yang besar karena selisih dikuadratkan sebelum dihitung rata-ratanya [3].

$$\text{Rumus MSE: } MSE = \text{mean}(e_t^2) = \sum \frac{(Actual-Forecast)^2}{n} \quad (5)$$

Di mana:

- $e_t^2$  adalah nilai aktual dikurangi nilai peramalan yang dikuadratkan
- Actual adalah nilai aktual.
- Forecast adalah nilai peramalan.
- Mean adalah rata-rata atau jumlah nilai data dibagi jumlah total data.
- n adalah jumlah data.

MSE menghasilkan nilai dalam unit kuadrat dari nilai aslinya. Semakin rendah nilai MSE, semakin akurat peramalan model. MSE lebih sensitif terhadap perbedaan yang besar antara nilai aktual dan nilai peramalan.

*Mean Absolute Percent Error* (MAPE) adalah metrik evaluasi yang mengukur kesalahan persentase rata-rata antara nilai aktual dan nilai peramalan. MAPE mengukur akurasi peramalan sebagai persentase kesalahan rata-rata dari nilai aktual [3].

$$\text{Rumus MAPE: } MAPE = \text{mean}(|p_t|) = \frac{\sum \frac{|Actual - Forecast|}{Actual} \times 100}{n} \quad (6)$$

Di mana:

- $p_t$  adalah nilai persentasi dari nilai aktual dikurangi nilai peramalan
- *Actual* adalah nilai aktual sedangkan *Forecast* adalah nilai peramalan.
- *Mean* adalah rata-rata atau jumlah nilai data dibagi jumlah total data.
- $n$  adalah jumlah data.

MAPE menghasilkan nilai dalam bentuk persentase. Semakin rendah nilai MAPE, semakin akurat peramalan model. Nilai MAPE dapat dikategorikan sesuai pada Tabel 5.

**■ Tabel 5.** Kategori penilaian MAPE

MAPE	Signifikansi
<b>&lt;10%</b>	Kemampuan peramalan sangat baik
<b>10-20%</b>	Kemampuan peramalan baik
<b>20-50%</b>	Kemampuan peramalan layak/memadai
<b>&gt;50%</b>	Kemampuan peramalan buruk

### HASIL DAN DISKUSI

Data yang digunakan dalam penelitian ini, diambil dari data statistik PLN tentang kapasitas terpasang PLTS tahun 2011-2022. Data dapat dilihat pada tabel 3, dan ditunjukkan dalam Gambar 5.



**■ Gambar 5.** Kapasitas terpasang per tahun PT PLN 2011-2022

Peramalan pertama yang dilakukan adalah menggunakan metode MA. Peramalan dengan menggunakan 3 periode terakhir dari periode yang dicari nilai ramalannya. Dengan menggunakan rumus (1) dan berdasarkan data aktual pada Tabel 3 maka perhitungan akan menghasilkan data pada Gambar 6.



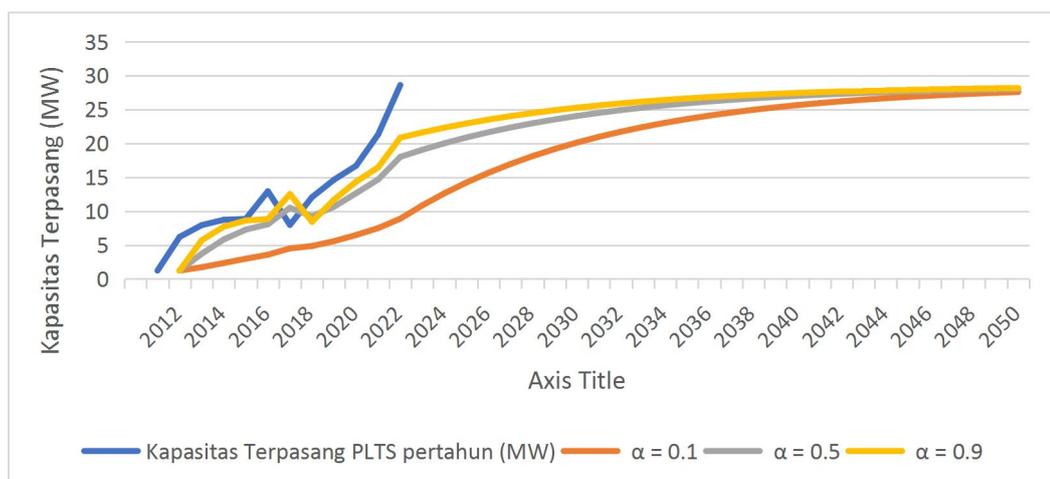
■ **Gambar 6.** Kapasitas terpasang per tahun PT PLN 2011-2022

Hasil peramalan menggunakan rata-rata dari 3 periode dalam metode ini menunjukkan hasil yang kurang tepat untuk peramalan jangka panjang, karena terhitung mulai peramalan tahun 2024-2050 data menunjukkan hasil stabil. Dari hasil peramalan menggunakan metode ini, didapatkan prediksi pada tahun 2050 adalah 24,21 MW.

Peralaman selanjutnya menggunakan metode *single exponential smoothing* dengan di tetapkan nilai  $\alpha = 0,1, 0,5, \text{ dan } 0,9$ . Dengan menerapkan rumus (2) dapat dilihat hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 dan Gambar 7.

■ **Tabel 6.** Kapasitas terpasang per tahun PT PLN 2011-2022

Tahun	Kapasitas Terpasang PLTS pertahun (MW)	Ft		
		$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$
2011	1,23			
2012	6,2	1,23	1,23	1,23
2013	7,94	1,73	3,72	5,70
2014	8,73	2,35	5,83	7,72
2015	8,86	2,99	7,28	8,63
2016	12,94	3,57	8,07	8,84
2017	7,98	4,51	10,50	12,53
2018	12,07	4,86	9,24	8,43
2019	14,65	5,58	10,66	11,71
2020	16,71	6,49	12,65	14,36
2021	21,34	7,51	14,68	16,47
2022	28,62	8,89	18,01	20,85



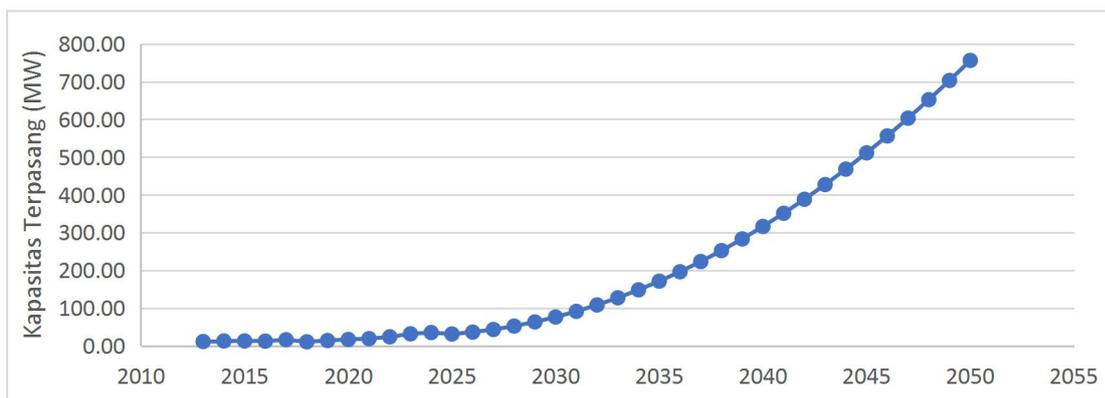
■ **Gambar 7.** Perbandingan hasil peramalan *single exponential smoothing*

Perbedaan data peramalan menggunakan tiga nilai  $\alpha$  terlihat cukup signifikan pada periode awal peramalan. Sementara, untuk peramalan jangka panjang grafik menunjukkan hasil yang stabil, sehingga metode ini kurang tepat untuk peramalan jangka panjang. Warna merah menunjukkan grafik peramalan menggunakan nilai  $\alpha = 0,1$ , warna hijau untuk nilai  $\alpha = 0,5$  dan warna ungu untuk nilai  $\alpha = 0,9$ . Grafik 8 juga membuktikan bahwa teori diatas benar. Semakin besar nilai  $\alpha$ , maka data akan terlihat lebih fluktuatif dengan perubahan data, sedangkan semakin kecil nilai  $\alpha$ , maka grafik terlihat lebih halus dan kurang akurat. Dari hasil peramalan menggunakan metode ini, didapatkan prediksi pada tahun 2050 untuk ketiga  $\alpha$  dari yang terkecil adalah 27,59 MW, 28,07 MW dan 28,21 MW.

Peramalan terakhir menggunakan metode *double exponential smoothing* dengan di tetapkan nilai  $\alpha = 0.9$  dan  $\beta = 0.2$ . Dengan menerapkan rumus (3.1), (3.2), (3.3) dapat dilihat hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 8. Dari hasil peramalan, didapatkan prediksi kapasitas terpasang pada tahun 2050 adalah sebesar 756,12 MW.

■ **Tabel 7.** Hasil peramalan *double exponential smoothing*

Tahun	Kapasitas Terpasang PLTS pertahun (MW)	Lt	Bt	Ft
2011	1,23			
2012	6,2	6,20	4,97	
2013	7,94	8,26	4,39	11,17
2014	8,73	9,12	3,68	12,65
2015	8,86	9,25	2,97	12,80
2016	12,94	12,87	3,10	12,23
2017	7,98	8,78	1,66	15,97
2018	12,07	11,91	1,96	10,44
2019	14,65	14,57	2,10	13,86
2020	16,71	16,71	2,10	16,67
2021	21,34	21,09	2,56	18,81
2022	28,62	28,12	3,46	23,65



■ **Gambar 8.** Grafik peramalan hingga tahun 2050 menggunakan *double exponential smoothing*

Selanjutnya, dilakukan perhitungan akurasi dari setiap metode peramalan. Perhitungan akurasi yang pertama adalah dengan menerapkan rumus (4), (5) dan (6), untuk menghitung nilai akurasi pada peramalan dengan metode *moving average* maka didapat hasil yang ditunjukkan pada Tabel 8.

■ **Tabel 8.** MAD, MSE dan MAPE untuk metode *moving average*

Tahun	Kapasitas Terpasang PLTS pertahun (MW)	Mt	Absolute Deviation	Square Error	APE
2011	1,23				
2012	6,2				
2013	7,94				
2014	8,73	5,12	3,61	13,01	41,31
2015	8,86	7,62	1,24	1,53	13,96
2016	12,94	8,51	4,43	19,62	34,23
2017	7,98	10,18	2,20	4,83	27,53
2018	12,07	9,93	2,14	4,59	17,76
2019	14,65	11,00	3,65	13,35	24,94
2020	16,71	11,57	5,14	26,45	30,78
2021	21,34	14,48	6,86	47,11	32,16
2022	28,62	17,57	11,05	122,18	38,62
<b>Rata-rata</b>			<b>4,48</b>	<b>28,07</b>	<b>29,03</b>

Perhitungan akurasi selanjutnya menerapkan rumus (4), (5) dan (6), untuk menghitung nilai akurasi pada peramalan dengan metode *single exponential smoothing* maka didapat hasil yang ditunjukkan pada Tabel 9.

■ **Tabel 9.** MAD, MSE dan MAPE untuk metode *single exponential smoothing*

Tahun	MW*	Absolute Deviation			Square Error			MAPE		
		0,1	0,5	0,9	0,1	0,5	0,9	0,1	0,5	0,9
2011	1,23									
2012	6,2	4,970	4,970	4,970	24,701	24,701	24,701	80,161	80,161	80,161
2013	7,94	6,213	4,225	2,237	38,601	17,851	5,004	78,249	53,212	28,174
2014	8,73	6,382	2,903	1,014	40,726	8,425	1,028	73,101	33,247	11,612
2015	8,86	5,874	1,581	0,231	34,498	2,500	0,054	66,293	17,847	2,611
2016	12,94	9,366	4,871	4,103	87,725	23,723	16,836	72,382	37,640	31,709
2017	7,98	3,470	2,525	4,550	12,038	6,374	20,700	43,478	31,638	57,014
2018	12,07	7,213	2,828	3,635	52,022	7,996	13,213	59,756	23,427	30,116
2019	14,65	9,071	3,994	2,944	82,289	15,951	8,664	61,920	27,262	20,092
2020	16,71	10,224	4,057	2,354	104,534	16,459	5,543	61,186	24,278	14,089
2021	21,34	13,832	6,658	4,865	191,318	44,335	23,672	64,816	31,202	22,800
2022	28,62	19,729	10,609	7,767	389,218	112,556	60,319	68,933	37,069	27,137
<b>Rata-rata</b>		<b>8,76</b>	<b>4,47</b>	<b>3,52</b>	<b>96,15</b>	<b>25,53</b>	<b>16,34</b>	<b>66,39</b>	<b>36,09</b>	<b>29,59</b>

\*Kapasitas Terpasang PLTS Per Tahun

Perhitungan akurasi terakhir menerapkan rumus (4), (5) dan (6), untuk menghitung nilai akurasi pada peramalan dengan metode *double exponential smoothing* maka didapat hasil yang ditunjukkan pada Tabel 10.

■ **Tabel 10.** MAD, MSE dan MAPE untuk metode *double exponential smoothing*

Tahun	MW*	Lt	Tt	Yt	AD	SE	APE
2011	1,23						
2012	6,2	6,20	4,97				
2013	7,94	8,26	4,39	11,17	3,23	10,43	40,68
2014	8,73	9,12	3,68	12,65	3,92	15,38	44,92
2015	8,86	9,25	2,97	12,80	3,94	15,56	44,52

<b>2016</b>	12,94	12,87	3,10	12,23	0,71	0,51	5,51
<b>2017</b>	7,98	8,78	1,66	15,97	7,99	63,83	100,12
<b>2018</b>	12,07	11,91	1,96	10,44	1,63	2,65	13,49
<b>2019</b>	14,65	14,57	2,10	13,86	0,79	0,62	5,37
<b>2020</b>	16,71	16,71	2,10	16,67	0,04	0,00	0,25
<b>2021</b>	21,34	21,09	2,56	18,81	2,53	6,40	11,85
<b>2022</b>	28,62	28,12	3,46	23,65	4,97	24,73	17,37
<b>Rata-rata</b>					<b>2,97572</b>	<b>14,01135</b>	<b>28,40902</b>

Dari hasil peramalan menggunakan ketiga metode tersebut, kami coba membandingkan hasilnya dengan proyeksi dari IRENA. IRENA memproyeksikan sampai 2050, Indonesia memiliki 800-840GWp atau setara 640-672 GW. Apabila kami membandingkan dengan hasil peramalan kami menggunakan ketiga metode, maka Indonesia akan memiliki kapasitas terpasang PLTS pada tahun 2050 sebesar 24.2 MW dengan metode *moving average*, 27.58-28.21 MW dengan metode *single exponential smoothing* dan 756.13 MW dengan metode *double exponential smoothing*. Maka Indonesia baru memenuhi 0.004%-0.119% dari proyeksi IRENA. Hasil dari peramalan dengan metode MA dan SES terpaut jauh dengan hasil dengan metode DES, ini dikarenakan untuk peramalan menggunakan metode DES menggunakan dua konstanta pemulusan,  $\alpha$  dan  $\beta$ . Pada metode ini nilai alpha ( $\alpha$ ) dan beta ( $\beta$ ) berproses secara dinamis sesuai dengan jumlah kuadrat galat (SSE) terkecil yang dihasilkan, menyebabkan nilai tren eksponensial yang lebih akurat dibandingkan dengan metode SES. Dan apabila kita membandingkan hasil pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8, terlihat pada Gambar 6 dan Gambar 7, pada data peramalan terlihat stabil dibandingkan Gambar 8. Sehingga, dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa metode *double exponential smoothing* lebih tepat untuk meramalkan kapasitas terpasang hingga tahun 2050 [18][20]. Namun, peneliti menegaskan bahwa hasil peramalan belum tentu akurat dengan hasil aktual, karena ada faktor lainnya yang tidak diperhitungkan dalam penelitian ini. Dengan sedikitnya data historis maka terbatas metode peramalan yang dapat digunakan.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyoroti bahwa cahaya matahari merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah dan tidak akan habis selama masa hidup Bumi, potensi energi matahari di Indonesia bahkan mencapai 207.898 MW. Berdasarkan hasil persentase kapasitas terpasang per tahun PT PLN tahun 2014-2022 dari semua kategori pembangkit listrik, PLTS memiliki persentase yaitu 0.0345% dan termasuk dalam deretan tiga terendah. Pembangkit listrik dengan kapasitas terpasang terbesar adalah PLTU. Namun, apabila RUPTL 2021-2030 terwujud, maka tahun 2030 Indonesia memiliki kapasitas terpasang PLTS sebesar 4.7 GWp atau setara 3.75 GW. Dalam proyeksi IRENA untuk Indonesia yaitu 800-840GWp, maka masih banyak selisih yang perlu dikejar. Selanjutnya, dengan peramalan menggunakan tiga metode, *moving average*, *single exponential smoothing* dan *double exponential smoothing*, didapatkan hasil kapasitas terpasang pada tahun 2050 secara berturut adalah 24,2 MW, 28.21 MW dan 756.12 MW. Data peramalan ini menunjukkan bahwa pada tahun 2050, Indonesia hanya memenuhi 0.119% dari proyeksi IRENA, artinya 99.881% selisih yang perlu dikejar. Penelitian ini mendapatkan hasil akurasi MAPE terendah dengan menggunakan metode *double exponential smoothing* yaitu 28.4% dan masuk kategori peramalan layak. Metode *moving average* dan *single exponential smoothing* kurang tepat untuk peramalan jangka panjang, sehingga untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk tidak menggunakan metode tersebut. Untuk peramalan jangka panjang, metode *double exponential smoothing* lebih tepat digunakan. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8, menunjukkan adanya tren pada peramalan dan hasil akurasi MAPE paling rendah dibandingkan metode *moving average* dan *single exponential smoothing*. Sekali lagi penulis menekankan bahwa data peramalan ini belum tentu akurat dengan data aktual nantinya. Sehingga, perlu penelitian dan pembahasan lebih lanjut dan menyeluruh mengenai data pendukung dan faktor penghambat, untuk mendapatkan peramalan yang lebih tepat. Keberhasilan pemanfaatan energi surya sebagai sumber tenaga listrik juga bergantung pada dukungan dari banyak pihak, tidak hanya PT PLN sendiri. Pada penelitian ini, penulis hanya berfokus pada data historis PT PLN dan peramalannya berdasarkan data tersebut, tanpa menghiraukan faktor penghambat lainnya.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Lembaga Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (LRPM) Universitas Presiden untuk dukungan internal dalam penelitian dan publikasi ilmiah baik yang bertaraf nasional maupun internasional.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Usman, *Bauran Energi Nasional 2020*. Jakarta Selatan: Dewan Energi Nasional, 2020.
- [2] N. A. Adistia, R. A. Nurdiansyah, J. Fariko, V. Vincent, and J. W. Simatupang, "Potensi Energi Panas Bumi, Angin, Dan Biomassa Menjadi Energi Listrik Di Indonesia," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 2, p. 105, 2020, doi: 10.24912/tesla.v22i2.9107.
- [3] R. J. Hyndman, A. B. Koehler, J. K. Ord, and R. D. Snyder, *Forecasting with Exponential Smoothing: The State Space Approach*. Springer, 2008.
- [4] IESR, *Indonesia Energy Transition Outlook 2023: Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia: Pursuing Energy Security in the Time of Transition*. Jakarta: Institute for Essential Services Reform (IESR), 2023.
- [5] PT. PLN (PERSERO), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030," *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030*, pp. 2019–2028, 2021.
- [6] PT PLN, "Statistik PLN 2021," *Stat. PLN 2021*, vol. 01001–2206, no. Juni, pp. 49–58, 2021.
- [7] PT PLN (Persero), "Statistik PLN 2022," *Stat. PLN*, no. 03001, p. 98, 2023.
- [8] F. Goswami, D. Yogi; Kreith, *Energy conversion, Second Edition*. CRC Press, 2017.
- [9] S. S. Joshi and A. S. Dhoble, "Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. May, pp. 848–882, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.067.
- [10] K. T. . S. Mauriraya, *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*, Cetakan Pe. Jakarta Barat: Institut Teknologi PLN, 2021.
- [11] J. W. Simatupang and D. A. Faskayana, "Feasibility Study of Photovoltaic - Diesel Hybrid Power System as Renewable Energy Source," *Ijireeice*, vol. 7, no. 3, pp. 56–63, 2019, doi: 10.17148/ijireeice.2019.7312.
- [12] N. Safitri, P. N. Lhokseumawe, T. Rihayat, and P. N. Lhokseumawe, *BUKU TEKNOLOGI PHOTOVOLTAIC*, no. June 2020. Yayasan Puga Aceh Riset, 2019.
- [13] M. Wolf, "Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences," *Energy Convers.*, vol. 16, no. 1–2, pp. 79–90, 1976, doi: 10.1016/0013-7480(76)90018-8.
- [14] F. Huide, Z. Xuxin, M. Lei, Z. Tao, W. Qixing, and S. Hongyuan, "A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.059.
- [15] M. R. S. Ramadhan, M. Ikhsan, R. M. Putra, J. W. Simatupang, S. Mau, and E. R. Kaburuan, "Waste-to-Energy Potential Using Municipal Solid Waste as One Implementation of Jakarta Smart City," *J. Serambi Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 2382–2394, 2021, doi: 10.32672/jse.v6i4.3499.
- [16] W. Sari, "Perbandingan Metode Double Exponential Smoothing, Simple Moving Average dan Least Square untuk Forecasting Penjualan Semen," pp. 1–83, 2020.
- [17] R. Fajri and T. M. Johan, "IMPLEMENTASI PERAMALAN DOUBLE EXPONENTIAL SMOOTHING PADA KASUS KEKERASAN ANAK DI PUSAT PELAYANAN TERPADU PEMBERDAYAAN PEREMPUAN DAN ANAK," vol. 4, pp. 6–13, 2017.
- [18] S. I. Rahayu and J. Arifin, "Penerapan Metode Double Exponential Smoothing dan Regresi Linier pada Peramalan Persediaan Packaging di PT . XYZ."
- [19] D. P. Rusy Ariyanto, "Penerapan Metode Double Exponential Smoothing Pada," *J. Inform. Polinema*, vol. 4, no. 1, pp. 57–62, 2017.
- [20] H. D. P. Habsari, I. Purnamasari, and D. Yuniarti, "Forecasting Uses Double Exponential Smoothing Method and Forecasting Verification Uses Tracking Signal Control Chart (Case Study: Ihk Data of East Kalimantan Province)," *BAREKENG J. Ilmu Mat. dan Terap.*, vol. 14, no. 1, pp. 013–022, 2020, doi: 10.30598/barekengvol14iss1pp013-022.