

Analisis Penyediaan Air Bersih Berkelanjutan di Kota Magelang Melalui Pemanfaatan Energi Surya Sampai Dengan Tahun 2033

Arbye, S^{1*}, Dimas Ardiansyah Halim², Anang Riawan³, Zaghlul 'Ayyasy⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, Jawa Tengah, Indonesia, 56116

*Email: arbye.s@untidar.ac.id

Revisi 2 Mei 2025; Diterima 3 juni 2025,; publikasi Online 30 Juni 2025

Abstrak. Penelitian ini menganalisis strategi penyediaan air bersih berkelanjutan di Kota Magelang hingga tahun 2033 melalui integrasi energi surya sebagai sumber energi terbarukan. Proyeksi pertumbuhan penduduk dan kebutuhan air bersih dilakukan menggunakan metode regresi linear berbasis data sekunder tahun 2013–2023. Estimasi kebutuhan air dihitung dengan asumsi konsumsi per kapita 140 liter/orang/hari dan cakupan pelayanan 80%. Konsumsi energi sistem dihitung dengan parameter Specific Energy Consumption (SEC) pada dua skenario: kondisi eksisting ($0,888 \text{ kWh/m}^3$) dan sistem efisiensi tinggi ($0,35 \text{ kWh/m}^3$). Simulasi ground mounted PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak Global Solar Atlas dengan input data lokasi, iradiasi surya Kota Magelang ($1.817,1 \text{ kWh/m}^2/\text{tahun}$) dan kapasitas PLTS terpasang. Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan air bersih meningkat dari 240,06 liter/detik (2025) menjadi 252,30 liter/detik (2033), dan penerapan sistem efisien dapat menekan konsumsi energi hingga 59%. Kapasitas PLTS yang dibutuhkan bervariasi dari 18,5 kWp hingga 381 kWp untuk memenuhi 1%–20% kebutuhan energi tahunan. Studi ini bersifat simulatif dengan sejumlah asumsi dan penggunaan data sekunder, sehingga hasilnya memerlukan validasi lebih lanjut jika akan diimplementasikan. Integrasi energi terbarukan dalam sistem penyediaan air bersih diharapkan dapat mendukung transisi energi bersih, pembangunan berkelanjutan, dan mitigasi risiko krisis air di Kota Magelang.

Kata kunci : Energi surya, Kota Magelang, Penyediaan air bersih, Photovoltaic (PV), Regresi linear.

1. Pendahuluan

Penyediaan air bersih merupakan salah satu aspek fundamental dalam pembangunan berkelanjutan yang memiliki dampak langsung terhadap kesehatan masyarakat, kelangsungan ekosistem, serta perkembangan sosial-ekonomi[1]. Akses yang memadai terhadap air bersih tidak hanya menentukan kualitas hidup individu, tetapi juga menjadi prasyarat penting bagi pencapaian berbagai tujuan pembangunan, termasuk pengentasan kemiskinan dan peningkatan produktivitas ekonomi. Di Indonesia, khususnya di kawasan perkotaan seperti Kota Magelang, pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi yang pesat telah menyebabkan meningkatnya permintaan air bersih secara signifikan dalam dekade terakhir. Ketersediaan air bersih yang memadai dan terjangkau menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kualitas hidup masyarakat[2]. Hal ini tentu saja menimbulkan tantangan dalam hal ketersediaan, distribusi, dan pengelolaan sumber daya air. Di sisi lain, proses penyediaan dan distribusi air bersih membutuhkan konsumsi energi yang tidak sedikit, terutama untuk pengoperasian pompa, instalasi pengolahan air, dan sistem distribusi. Oleh karena itu, pemenuhan kebutuhan energi yang andal, efisien, dan ramah lingkungan menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan air bersih yang berkelanjutan.

Data dari pemerintah Kota Magelang menunjukkan bahwa akses penyediaan air minum layak telah mencapai 100% pada tahun 2023, sebuah pencapaian yang penting sebagai indikasi peningkatan pelayanan publik[3]. Namun, meskipun capaian ini menggembirakan, sejumlah tantangan keberlanjutan tetap ada dan menjadi perhatian serius. Potensi krisis air yang dipicu oleh faktor-faktor seperti perubahan iklim, eksploitasi berlebihan terhadap sumber air tanah dan permukaan, serta kerugian teknis dalam sistem distribusi air, dapat mengancam ketersediaan air bersih jangka panjang. Selain itu, ketergantungan pada energi fosil untuk pengoperasian sistem penyediaan air berdampak pada emisi karbon dan ketidakstabilan biaya operasional.

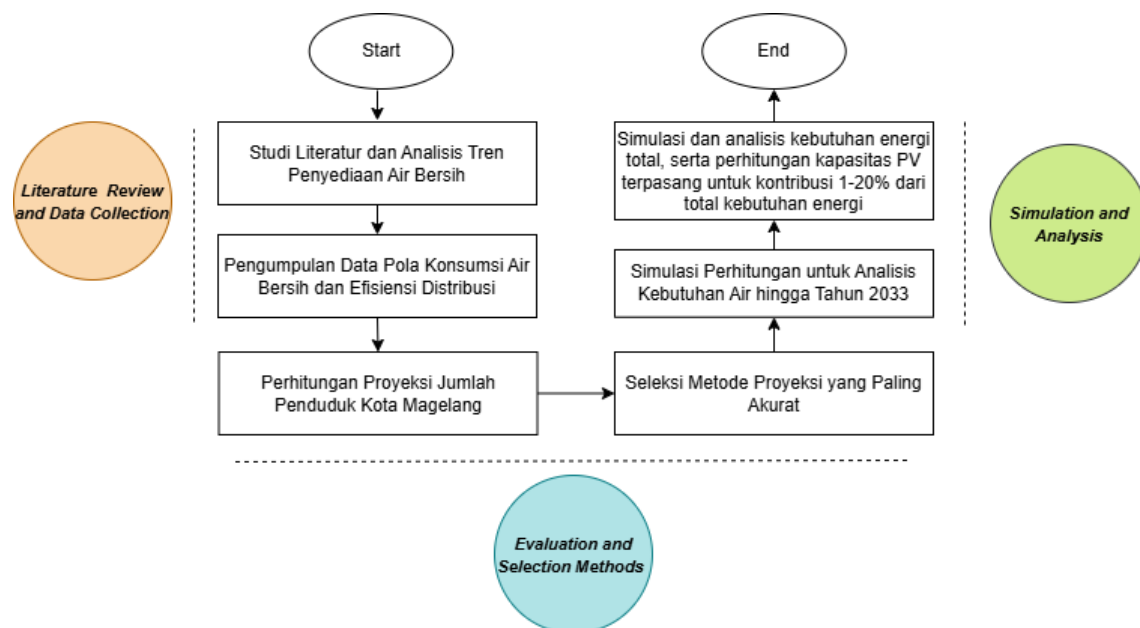
Dalam konteks tantangan tersebut, pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya, menawarkan solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem penyediaan

air bersih. Salah satu solusi yang berkembang pesat adalah pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yaitu sistem konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan teknologi *photovoltaic* (PV). Teknologi PV telah terbukti mampu menyediakan energi listrik yang ramah lingkungan dan dapat diintegrasikan dalam berbagai skala sistem penyediaan air, mulai dari pompa air hingga instalasi pengolahan air minum[4]. Penggunaan energi surya dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta memperkuat ketahanan energi lokal. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa integrasi energi terbarukan dalam sistem air bersih tidak hanya berdampak positif pada aspek lingkungan, tetapi juga dapat memberikan manfaat ekonomi jangka panjang melalui pengurangan biaya operasional dan pemeliharaan[5]. Namun demikian, implementasi sistem ini memerlukan perencanaan yang matang berdasarkan proyeksi kebutuhan air dan potensi sumber energi setempat agar dapat berjalan optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan strategi penyediaan air bersih berkelanjutan di Kota Magelang dengan menilai potensi implementasi sistem energi surya terintegrasi. Melalui pendekatan analitis berbasis data sekunder dan simulasi potensi energi, penelitian ini secara khusus menganalisis beberapa komponen utama, yaitu: proyeksi pertumbuhan jumlah penduduk hingga tahun 2033, estimasi kebutuhan air bersih berdasarkan konsumsi per kapita dan cakupan pelayanan, perhitungan konsumsi energi sistem penyediaan air bersih dengan parameter efisiensi yang berbeda, serta simulasi kapasitas dan kontribusi sistem PV dalam pemenuhan kebutuhan energi tahunan. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan rekomendasi yang tepat bagi pengembangan infrastruktur air bersih yang efisien, ramah lingkungan, dan mampu mendukung pertumbuhan ekonomi serta kesejahteraan masyarakat Kota Magelang secara berkelanjutan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi analitis berbasis data sekunder, dengan fokus pada upaya perencanaan penyediaan air bersih yang berkelanjutan di Kota Magelang. Metode ini tidak secara langsung melakukan pengukuran lapangan maupun survei primer terkait kebutuhan air masyarakat, melainkan memanfaatkan literatur ilmiah, laporan instansi teknis, dan data proyeksi sebagai dasar analisis. Selain itu, studi ini mengkaji potensi pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi dalam sistem penyediaan air bersih, termasuk estimasi kebutuhan energi, proyeksi konsumsi air, dan potensi penerapan PV. Analisis dilakukan hingga batas waktu tahun 2033 sebagai proyeksi jangka menengah, dengan mempertimbangkan pertumbuhan populasi, kebutuhan air, dan potensi integrasi energi terbarukan. Pada Gambar 1 ditunjukkan tahapan penelitian yang dikerjakan.



Gambar 1. *Flow Chart* Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang ditampilkan pada Gambar 1, diuraikan dalam penjelasan sebagai berikut:

(i) *Literature review and data collection*

Tahap awal penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai kebijakan, tren, dan tantangan penyediaan air bersih, khususnya di Kota Magelang. Studi literatur ini mencakup telaah terhadap kebijakan, hasil-hasil penelitian sebelumnya, laporan teknis pemerintah, serta dokumen standar yang relevan. Melalui studi ini, peneliti memperoleh pemahaman menyeluruh tentang dinamika permintaan, proyeksi penduduk, tantangan distribusi, hingga potensi integrasi energi terbarukan dalam sistem air bersih. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data sekunder terkait, meliputi jumlah dan pertumbuhan penduduk per tahun (2013-2023), radiasi matahari, cakupan pelayanan, tingkat kebocoran dalam sistem distribusi, serta efisiensi operasional instalasi pengolahan air. Sumber data berasal dari Badan Pusat Statistik, PDAM setempat, instansi pemerintah daerah, serta publikasi dan basis data daring yang kredibel. Data-data tersebut dikumpulkan untuk mendapatkan gambaran awal terkait penelitian yang dikerjakan.

(ii) *Evaluation and Selection Methods*

Pada tahap ini, data aktual jumlah penduduk yang telah dikumpulkan (2013-2023) akan dikomparasi dengan hasil proyeksi empat metode berbeda, yaitu regresi linear, aritmatika, geometrik, dan eksponensial. Persamaan matematis yang digunakan untuk setiap metode adalah sebagai berikut:

- Regresi linear:

$$\hat{Y} = a + bX \quad (1)$$

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (3)$$

Dimana $\hat{Y}$ adalah Nilai Variabel yang diprediksi (jumlah penduduk dalam jiwa), x adalah Variabel independen (Tahun), y adalah Jumlah penduduk yang sudah diketahui (data eksisting dalam jiwa), a adalah Konstanta, b adalah Koefisien regresi (nilai peningkatan atau penurunan) [6].

- Aritmatika:

$$P_n = P_o + K_a (T_n - T_o) \quad (4)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

Dimana P_n adalah Jumlah penduduk pada tahun 2023 (jiwa), P_o adalah Jumlah penduduk pada tahun yang akan dihitung (jiwa), T_n adalah Tahun 2023, T_o adalah Tahun yang akan dihitung, K_a adalah Konstanta aritmatik, P_1 adalah Jumlah penduduk yang diketahui pada tahun ke-I (Tahun 2013), P_2 adalah Jumlah penduduk yang diketahui pada tahun ke-II (Tahun 2023), T_1 adalah Tahun ke-I yang diketahui (Tahun 2013), T_2 adalah Tahun ke-II yang diketahui (Tahun 2023) [6].

- Geometrik:

$$P_n = P_o (1+r)^n \quad (6)$$

Dimana P_n adalah Jumlah penduduk pada tahun 2023 (jiwa), P_o adalah Jumlah penduduk pada tahun yang akan dihitung (jiwa), n adalah Periode waktu proyeksi, r adalah rata-rata persentase pertumbuhan penduduk data eksisting (%) [6].

- Eksponensial:

$$P_n = P_o \times e^{r \cdot n} \quad (7)$$

Dimana P_n adalah Jumlah penduduk pada tahun 2023 (jiwa), P_o adalah Jumlah penduduk pada tahun yang akan dihitung (jiwa), N adalah Periode waktu proyeksi, r adalah rata-rata persentase pertumbuhan penduduk data eksisting (%) [6].

Hasil perhitungan jumlah penduduk setiap metode akan dievaluasi dengan menggunakan parameter standar deviasi dan koefisien korelasi terhadap data aktual (2013-2023) guna mengukur tingkat akurasi masing-masing metode. Untuk menghitung standar deviasi nilai korelasi digunakan Persamaan (8) dan (9) [7][8]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{(n)}} \quad (8)$$

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum Y)(\sum X)}{\sqrt{[n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2][n(\sum X^2) - (\sum X)^2]}} \quad (9)$$

Dimana Y_i menyatakan nilai proyeksi jumlah penduduk pada tahun ke- i , $\bar{Y}$ adalah nilai rata-rata dari seluruh hasil proyeksi, dan n adalah jumlah total data (tahun pengamatan). Sedangkan X adalah nilai jumlah penduduk aktual, dan Y adalah nilai proyeksi. Standar deviasi (s) menggambarkan tingkat

penyimpangan antara data proyeksi dan data aktual, di mana nilai yang lebih kecil menandakan bahwa hasil proyeksi lebih mendekati kenyataan. Sementara itu, koefisien korelasi (r) merepresentasikan sejauh mana hubungan linear antara kedua data tersebut, dengan nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan antara data aktual dan proyeksi semakin kuat dan konsisten [6]. Selanjutnya dilakukan juga pengujian *error* untuk proses evaluasi performa dari masing-masing metode, pengujian ini menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebagai indikator utama akurasi prediksi. Persamaan yang digunakan untuk menghitung MAPE, yaitu [9]:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \times 100 \% \quad (10)$$

Di mana, Y_i adalah nilai aktual (jumlah penduduk sebenarnya), $\hat{Y}_i$ merupakan nilai proyeksi (hasil metode), dan n adalah jumlah data. Metode dengan nilai deviasi terkecil, korelasi paling kuat, dan rata-rata MAPE terkecil dipilih sebagai metode yang digunakan untuk perhitungan proyeksi jumlah penduduk tahun 2024-2033. Proyeksi ini nanti kemudian digunakan untuk memperkirakan kebutuhan air bersih di kota Magelang pada masa depan.

(iii) *Simulation and Analysis*

Tahap ini adalah tahap inti dari penelitian ini, data proyeksi jumlah penduduk tahun 2024-2033 yang dihitung dengan metode terpilih dari tahap evaluasi akan digunakan sebagai preferensi untuk menghitung kebutuhan air. Untuk menghitung total kebutuhan air digunakan Persamaan (11)-(18) [10]:

$$C_p = 0,8 \times P_n \quad (11)$$

$$S_l = 0,8 \times C_p \times 140 \text{ liter/orang/hari} \quad (12)$$

$$S_b = 0,2 \times C_p \times 140 \text{ liter/orang/hari} \quad (13)$$

$$K_n = 15\% \times (S_l + S_b) \quad (14)$$

$$L_o = 0,2 \times P_r \quad (15)$$

$$P_r = S_l + S_b + K_n + L_o \quad (16)$$

$$S_s = f_1 \times P_r \quad (17)$$

$$Q_p = f_2 \times P_r \quad (18)$$

Dimana C_p menyatakan cakupan pelayanan air bersih, dengan mengacu pada nilai rata-rata tingkat nasional Indonesia yaitu sebesar 80% dari jumlah P_n (jumlah penduduk pada tahun proyeksi ke- n). S_l mengacu pada konsumsi air per kapita bagi pengguna dengan sambungan langsung, nilai yang digunakan sebagai preferensi yaitu 140 liter/orang/hari, sesuai dengan standar Direktorat Jenderal Cipta Kerja, untuk penduduk 100.000-500.000 jiwa, maka prediksi kebutuhan air hariannya adalah 130-150 liter/jiwa/hari [11]. Selain itu, S_b menggambarkan kebutuhan air untuk bak umum dalam satuan yang sama. Untuk kebutuhan air di luar rumah tangga atau non-domestik, digunakan variabel K_n , yang juga dinyatakan dalam liter per detik. P_r merupakan total proyeksi kebutuhan air bersih dalam liter per detik yang diperoleh dari akumulasi seluruh komponen kebutuhan. Sementara itu, L_o menunjukkan kehilangan air akibat kebocoran atau inefisiensi sistem distribusi. Untuk mengantisipasi lonjakan penggunaan, diperhitungkan pula S_s , yaitu kebutuhan harian maksimum, dan Q_p , yaitu debit pada waktu puncak. Kedua parameter ini disesuaikan dengan faktor koreksi, yaitu f_1 sebagai faktor pengali untuk kebutuhan harian maksimum (dengan nilai 1,2), dan f_2 sebagai faktor pengali untuk kebutuhan pada jam puncak (dengan nilai 1,6).

Setelah melakukan perhitungan estimasi kebutuhan air sampai dengan tahun 2033 yang dilakukan dengan mengalikan jumlah penduduk proyeksi dengan standar kebutuhan air per kapita (liter/orang/hari), maka tahapan berikutnya adalah melakukan perhitungan konsumsi energi, dengan menggunakan preferensi nilai parameter *Specific Energy Consumption* (SEC) dalam satuan kWh/m³. Kebutuhan energi tahunan dihitung dengan mengalikan kebutuhan air tahunan dengan standar nilai parameter SEC. Selanjutnya, Simulasi PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/map>) untuk memperkirakan kapasitas PV yang dibutuhkan guna memenuhi kebutuhan energi tahunan sistem penyediaan air bersih. Parameter input meliputi data radiasi surya Kota Magelang, konsumsi energi tahunan, dan target kontribusi energi terbarukan pada rentang 1–20%.

Secara umum, alur penelitian ini dimulai dari perhitungan peningkatan jumlah penduduk di Kota Magelang yang secara langsung mendorong kenaikan kebutuhan air bersih, dimana juga berakibat pada kondisi peningkatan konsumsi energi untuk pengolahan dan distribusi air. Bertambahnya konsumsi energi ini juga menambah beban pada infrastruktur penyediaan air bersih dan berpotensi memberi dampak

lingkungan terutama jika masih bergantung pada sumber energi konvensional. Pemahaman terhadap keterkaitan antar variabel ini penting agar perencanaan sistem air bersih dapat dilakukan secara terpadu dan berkelanjutan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain penggunaan data sekunder tanpa pengumpulan data primer secara langsung, yang dapat memengaruhi ketepatan proyeksi dan estimasi kebutuhan air. Selain itu, asumsi nilai konsumsi per kapita dan cakupan pelayanan dianggap konstan selama periode proyeksi, sehingga belum memperhitungkan kemungkinan perubahan pola konsumsi atau kebijakan layanan di masa depan. Simulasi sistem PLTS juga belum memasukkan analisis keekonomian secara detail maupun integrasi sistem penyimpanan energi, sehingga hasilnya masih bersifat proyeksi dan perlu divalidasi lebih lanjut dalam konteks implementasi riil.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Analisis Proyeksi Penduduk

Kota Magelang merupakan salah satu kota di Provinsi Jawa Tengah, dengan luas wilayah sekitar 18,56 km². Secara administratif, Kota Magelang terbagi menjadi tiga kecamatan, yaitu Kecamatan Magelang Utara, Magelang Tengah, dan Magelang Selatan, yang secara keseluruhan terdiri dari 17 kelurahan[12]. Pada Tabel 1 ditampilkan jumlah penduduk Kota Magelang dari tahun 2013-2023.

Tabel 1. Data Jumlah Penduduk Kota Magelang Tahun 2013-2023[13]

Tahun	Kecamatan Magelang Utara	Kecamatan Magelang Tengah	Kecamatan Magelang Selatan	Total	Pertumbuhan Jumlah Penduduk	
					Persentase (%)	Jiwa
2013	36.310	43.356	40.541	120.207	-	-
2014	36.325	43.903	40.477	120.615	0.34	408
2015	36.339	44.022	40.591	120.952	0.28	337
2016	36.445	44.144	40.704	121.293	0.28	341
2017	36.502	44.208	40.764	121.474	0.15	181
2018	36.624	44.349	40.899	121.872	0.33	398
2019	36.699	44.433	40.979	122.111	0.20	239
2020	37.086	44.225	40.215	121.526	-0.48	-585
2021	37.556	48.278	42.012	127.846	5.20	6320
2022	37.423	48.278	41.983	127.684	-0.13	-162
2023	37.617	48.476	42.171	128.264	0.45	580

Data jumlah penduduk Kota Magelang periode 2013–2023 menunjukkan adanya fluktuasi dengan kecenderungan peningkatan secara umum, meskipun tidak konsisten setiap tahunnya. Analisis fluktuasi jumlah penduduk menunjukkan adanya anomali pada tahun 2020 yang mengalami penurunan sebesar -0,48%, diikuti dengan lonjakan besar pada tahun 2021 sebesar 5,20%. Penurunan jumlah penduduk pada tahun 2020 dapat dikaitkan dengan dampak pandemi COVID-19 yang mengakibatkan penurunan mobilitas penduduk, migrasi yang terbatas, serta pengaruh kebijakan pembatasan sosial yang diterapkan di seluruh Indonesia. Sementara itu, lonjakan pada tahun 2021 kemungkinan besar dipengaruhi oleh migrasi besar-besaran setelah pelonggaran pembatasan sosial, serta pembaruan data administrasi kependudukan yang terjadi setelah situasi pandemi mulai terkendali. Ketidakstabilan ini mencerminkan dinamika demografis yang kompleks, namun tren jangka panjang menunjukkan arah pertumbuhan yang positif. Dengan proyeksi hingga tahun 2033, peningkatan jumlah penduduk yang terus terjadi diperkirakan akan memberikan tekanan tambahan terhadap kebutuhan dan ketersediaan air bersih di Kota Magelang. Proyeksi jumlah penduduk menjadi tahap awal yang sangat penting dalam merancang pengelolaan sistem air bersih. Untuk itu, pada tahap awal penelitian dilakukan pemilihan metode proyeksi terbaik dari empat alternatif yang tersedia. Proses seleksi ini menggunakan indikator statistik berupa standar deviasi dan nilai korelasi, guna menentukan metode yang paling sesuai dan representatif terhadap data pertumbuhan penduduk Kota Magelang. Pada Tabel 2 disajikan informasi mengenai hasil perhitungan 4 metode proyeksi menggunakan persamaan (1)-(7) untuk tahun 2013-2023.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Perhitungan dengan 4 Metode Proyeksi Berbeda dan Data Eksisting

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	Proyeksi Jumlah Penduduk (jiwa)			
		Regresi Linear	Aritmatika	Geometrik	Eksponensial
2013	120.207	118.970	120.207	120.098	120.072

2014	120.615	119.791	121.013	120.891	120.867
2015	120.952	120.613	121.819	121.688	121.667
2016	121.293	121.434	122.624	122.492	122.473
2017	121.474	122.255	123.430	123.300	123.284
2018	121.872	123.077	124.236	124.114	124.100
2019	122.111	123.898	125.041	124.933	124.921
2020	121.526	124.719	125.847	125.758	125.748
2021	127.846	125.540	126.653	126.589	126.581
2022	127.684	126.362	127.458	127.425	127.419
2023	128.264	127.183	128.264	128.264	128.264

Hasil perhitungan nilai standar deviasi dan koefisien korelasi terhadap kinerja empat metode proyeksi jumlah penduduk menggunakan persamaan (8)-(9), disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Standar deviasi dan Korelasi data perhitungan Tahun 2013-2023

	Metode Proyeksi				Hasil (Urutan Peringkat)
	Regresi Linear	Aritmatik	Geometrik	Eksponensial	
Nilai Standar Deviasi	2.597,18 (1)	2.798,96 (4)	2.793,38 (2)	2.795,01 (3)	Regresi Linear (1) – Geometrik (2) – Eksponensial (3) – Aritmatik(4)
Nilai Korelasi	0,86	0,86	0,86	0,86	Regresi Linear = Geometrik = Eksponensial = Aritmatik

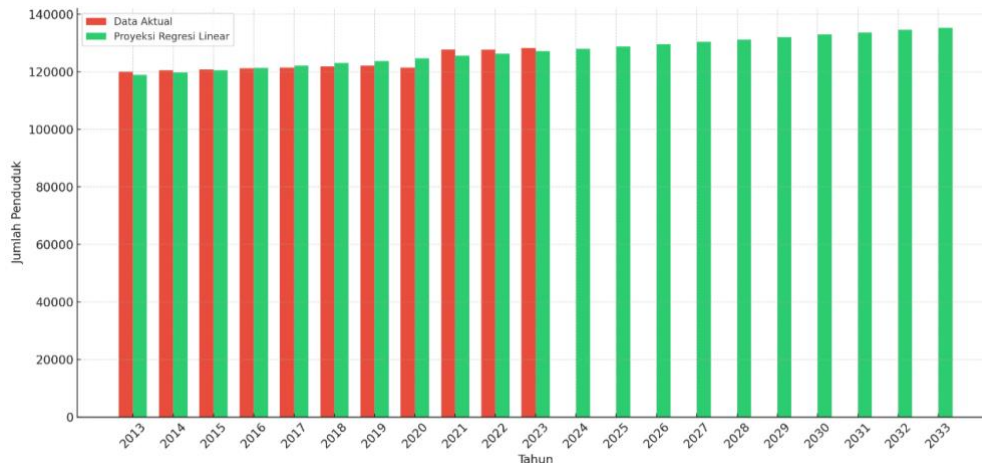
Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa metode regresi linear memiliki nilai standar deviasi paling kecil dibandingkan dengan ketiga metode lainnya, yaitu 2.597,18. Hal ini menunjukkan bahwa hasil proyeksi dari metode ini paling mendekati data aktual jumlah penduduk Kota Magelang selama periode 2013–2023. Selain itu, nilai koefisien korelasi untuk semua metode bernilai sama, yakni 0,86, yang mengindikasikan adanya hubungan yang sangat kuat antara data proyeksi dan data aktual. Meskipun telah dilakukan perhitungan standar deviasi dan korelasi untuk mengevaluasi kecocokan antara proyeksi dan data aktual, penelitian ini juga menggunakan metrik *error* absolut, yaitu *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai akurasi model proyeksi. Hasil Perhitungan dengan menggunakan Persamaan (10) disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan MAPE untuk 4 Metode Proyeksi

Tahun	MAPE Regresi Linear (%)	MAPE Aritmatika(%)	MAPE Geometrik(%)	MAPE Eksponensial(%)
2013	1,03	0	0,09	0,11
2014	0,68	0,33	0,23	0,21
2015	0,28	0,72	0,61	0,59
2016	0,12	1,10	0,99	0,97
2017	0,64	1,61	1,50	1,49
2018	0,99	1,94	1,84	1,83
2019	1,47	2,40	2,31	2,30
2020	2,63	3,56	3,49	3,48
2021	1,80	0,93	0,98	0,99
2022	1,03	0,18	0,20	0,21
2023	0,84	0	0	0
Rata-Rata	1,05	1,16	1,11	1,11

Berdasarkan hasil perhitungan MAPE yang disajikan pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa seluruh metode proyeksi memberikan tingkat akurasi yang cukup tinggi terhadap data jumlah penduduk Kota Magelang periode 2013–2023, dengan nilai rata-rata MAPE berkisar antara 1,05% hingga 1,16%. Metode regresi linear memiliki nilai MAPE terendah, hal ini menunjukkan bahwa regresi linear mampu menghasilkan prediksi jumlah penduduk yang paling mendekati data aktual. Berdasarkan parameter nilai standar deviasi, korelasi, dan MAPE, diketahui bahwa regresi linear merupakan metode paling optimal untuk digunakan dalam melakukan proyeksi jumlah penduduk Kota Magelang hingga tahun 2033. Namun, perlu diketahui bahwa regresi linear juga memiliki beberapa kelemahan, di antaranya sensitivitas terhadap *outlier* yang dapat mempengaruhi akurasi proyeksi jika terdapat data yang jauh menyimpang dari tren umum. Selain itu, regresi linear mengasumsikan adanya hubungan linier yang terus berlanjut, padahal

dalam konteks proyeksi jangka panjang, tren pertumbuhan populasi bisa berubah seiring dengan perubahan kebijakan, kondisi ekonomi, atau fenomena sosial lainnya. Oleh karena itu, meskipun regresi linear memberikan hasil yang baik dalam proyeksi ini, penting untuk mempertimbangkan faktor ketidakpastian yang dapat mempengaruhi tren tersebut setelah tahun 2033.



Gambar 2. Hasil Proyeksi Penduduk dengan Metode Regresi Linear Sampai Dengan Tahun 2033

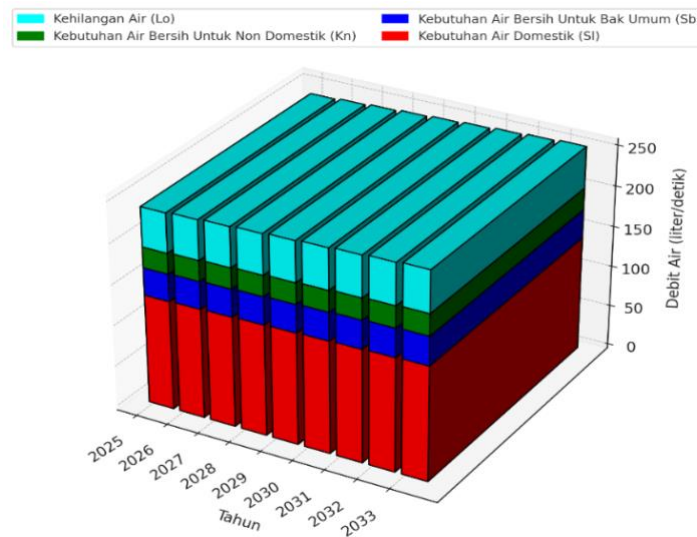
Gambar 2 disajikan informasi mengenai hasil proyeksi jumlah penduduk Kota Magelang menggunakan regresi linear hingga tahun 2033, yang diperkirakan mencapai sekitar 135.397 jiwa. Secara umum, grafik menunjukkan kecenderungan peningkatan jumlah penduduk dari tahun ke tahun. Tidak terdapat perubahan pola atau lonjakan ekstrem pada periode proyeksi, sehingga tren pertumbuhan penduduk dinilai stabil. Kenaikan jumlah penduduk ini secara umum akan memberikan tekanan tambahan terhadap kebutuhan infrastruktur dan layanan dasar, khususnya penyediaan air bersih. Informasi proyeksi jumlah penduduk ini selanjutnya dimanfaatkan sebagai acuan dalam perhitungan kebutuhan air bersih di masa mendatang, yang dibahas pada sub bab 3.2.

3.2 Analisis Proyeksi Kebutuhan Air

Analisis proyeksi kebutuhan air yang didasarkan pada jumlah penduduk bertujuan untuk memperkirakan volume air yang akan dibutuhkan pada masa mendatang seiring dengan pertumbuhan populasi. Seiring meningkatnya jumlah penduduk, kebutuhan air pun akan bertambah untuk menunjang berbagai aktivitas. Kebutuhan air secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu kebutuhan air domestik dan non-domestik. Kebutuhan domestik mencakup penggunaan air dalam rumah tangga, seperti untuk minum, memasak, mandi, serta mencuci, yang cenderung bersifat personal dan bervariasi. Sementara itu, kebutuhan air non-domestik mencakup pemakaian di sektor industri, pertanian, kawasan perkotaan, hingga kegiatan pariwisata. Pada Gambar 3 disajikan hasil perhitungan SI, Sb, Kn, dan Lo untuk tahun 2025-2033.

Berdasarkan data proyeksi, total kebutuhan air bersih (P_r) di Kota Magelang menunjukkan tren peningkatan dari tahun 2025 hingga 2033. Dimulai dari 240,06 liter/detik pada tahun 2025, kebutuhan ini terus meningkat setiap tahunnya hingga mencapai 252,30 liter/detik pada tahun 2033. Kenaikan ini mencerminkan peningkatan permintaan air bersih yang sejalan dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan aktivitas masyarakat, baik untuk keperluan domestik maupun non-domestik. Kapasitas produksi PDAM saat ini berdasarkan Dokumen Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum (RISPAM) Kota Magelang Tahun 2022 yaitu sebesar 950 liter/detik, secara teknis kapasitas produksi eksisting masih jauh di atas kebutuhan proyeksi hingga tahun 2033, sehingga infrastruktur pengolahan air pada prinsipnya mampu mengakomodasi pertumbuhan permintaan di masa depan. Namun demikian, perlu tetap diwaspadai, bahwa dari lima sumber mata air utama yang menjadi andalan pasokan air bersih Kota Magelang, hanya satu sumber yakni Sumber Mata Air Tuk Pecah yang secara geografis berada di dalam wilayah Kota Magelang. Sementara itu, empat sumber lainnya berlokasi di luar kawasan kota, sehingga distribusi air bersih sangat bergantung pada infrastruktur interkoneksi antardaerah serta pengelolaan lintas wilayah administrasi. Oleh karena itu, rekomendasi penguatan infrastruktur tetap diperlukan, terutama pada aspek efisiensi distribusi, monitoring kehilangan air, serta pengembangan jaringan perpipaan untuk memastikan layanan air bersih tetap andal dan berkelanjutan. Upaya mitigasi, seperti memperluas sumber air alternatif dan memanfaatkan

inovasi teknologi, menjadi hal yang krusial. Salah satu solusi yang dapat mendukung keberlanjutan penyediaan air bersih adalah penggunaan energi terbarukan, misalnya dengan memanfaatkan energi surya melalui sistem *photovoltaic* (PV) sebagai sumber daya untuk mengoperasikan instalasi air secara efisien dan ramah lingkungan.



Gambar 3. Hasil Proyeksi Kebutuhan Air Kota Magelang Tahun 2025-2033

3.3 Analisis Kebutuhan Energi untuk Sistem Penyediaan Air Bersih

Kebutuhan energi sistem penyediaan air bersih di Kota Magelang hingga tahun 2033 dihitung berdasarkan proyeksi debit air bersih tahunan yang dikalikan dengan *Specific Energy Consumption* (SEC). Dalam analisis ini digunakan dua skenario nilai SEC, yaitu 0,888 kWh/m³ sebagai kondisi eksisting dan 0,35 kWh/m³ sebagai asumsi sistem efisien[14]. Hasil perhitungan konsumsi energi untuk pemenuhan kebutuhan air bersih di Kota Magelang sampai dengan tahun 2033 disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konsumsi Energi Penyediaan Air Bersih di Kota Magelang Sampai dengan Tahun 2033

Tahun	Kebutuhan air bersih (liter/detik)	Kebutuhan air bersih dalam 1 tahun (m ³ /tahun)	Kebutuhan Energi untuk air bersih (MWh/tahun)	
			*SEC=0,888 kWh/m ³	**SEC=0,35 kWh/m ³
2025	240,06	7.570.532	6.722,63	2.649,69
2026	241,59	7.618.782	6.765,48	2.666,57
2027	243,13	7.667.348	6.808,61	2.683,57
2028	244,65	7.715.282	6.851,17	2.700,35
2029	246,18	7.763.532	6.894,02	2.717,24
2030	247,71	7.811.782	6.936,87	2.734,12
2031	249,25	7.860.338	6.980,11	2.751,12
2032	250,77	7.908.230	7.022,91	2.767,88
2033	252,3	7.956.486	7.065,97	2.784,77

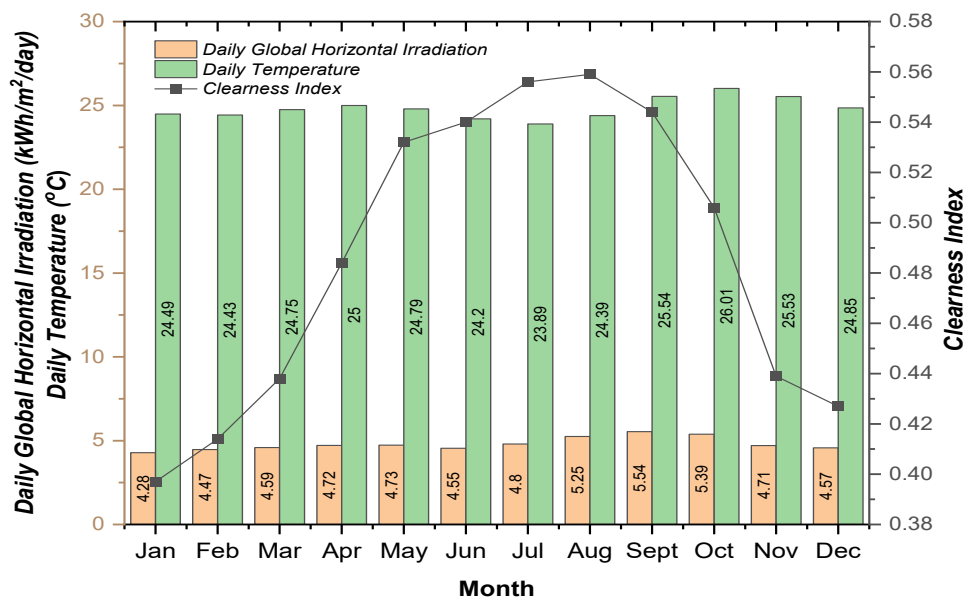
*SEC 0,888 kWh/m³ merupakan data eksisting saat tahun 2020

**SEC 0,35 kWh/m³ diasumsikan sudah dilakukan perbaikan dan semakin efisien (standar nilai SEC efisien yaitu < 0,4 kWh/m³)

Hasil dalam Tabel 4 menunjukkan bahwa kebutuhan energi tahunan meningkat seiring dengan naiknya volume air bersih, dari 7.570.532 m³ pada tahun 2025 menjadi 7.956.486 m³ pada tahun 2033. Pada kondisi eksisting (SEC 0,888), konsumsi energi mencapai 6.722,63 MWh di tahun 2025 dan meningkat menjadi 7.065,97 MWh di tahun 2033. Sementara itu, dengan asumsi efisiensi optimal (SEC 0,35), konsumsi energi dapat ditekan menjadi 2.649,69 MWh hingga 2.784,77 MWh pada tahun yang sama. Selisih antara kedua skenario memperlihatkan peluang penghematan energi yang signifikan, yaitu sekitar 59%. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan efisiensi sistem pengolahan dan distribusi air bersih dapat memberikan dampak besar dalam menurunkan konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan, sekaligus memperkuat arah kebijakan menuju pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan.

3.4 Perencanaan Sistem Penyediaan Energi Melalui Pemanfaatan Energi Surya

Dalam rangka mendukung sistem penyediaan air bersih yang berkelanjutan, diperlukan perencanaan sistem energi yang bersumber dari energi terbarukan, khususnya energi surya. Fokus perencanaan ini mengacu pada skenario kebutuhan energi berdasarkan nilai SEC sebesar $0,35 \text{ kWh/m}^3$, yang diasumsikan telah memenuhi standar efisiensi sistem pengolahan dan distribusi air. Disisi lain, berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa potensi pemanfaatan energi matahari di Kota Magelang cukup menjanjikan, terutama melalui sistem PLTS atap. Estimasi produksi energi dari sistem PLTS atap berkapasitas 80 kWp dapat mencapai output hingga 11.000 kWh per bulan, yang mengindikasikan efisiensi tinggi dan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi lokal[15]. Informasi mengenai potensi radiasi matahari, suhu dan *clearness* indeks di Kota Magelang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Data GHI, *Clearness Index*, dan Suhu lingkungan di Kota Magelang[15]

Berdasarkan hasil simulasi dari *Global Solar Atlas* pada koordinat -07.477075° , 110.218216° (Kota Magelang, Jawa Tengah), potensi radiasi surya tahunan sebesar $1.817,1 \text{ kWh/m}^2$ menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki kelayakan untuk pembangunan sistem PLTS. Dengan potensi tersebut, sistem PLTS dapat menjadi solusi efektif dalam menyediakan energi listrik untuk pengoperasian pompa air, instalasi pengolahan, serta kebutuhan distribusi air bersih yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Estimasi produksi energi dari sistem PV dengan konfigurasi *ground-mounted*, azimuth 0° dan kemiringan 12° menghasilkan daya sekitar 1.43 MWh/tahun per 1 kWp. Hasil perhitungan kebutuhan kapasitas PV terinstal disajikan pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa proyeksi kebutuhan energi untuk memenuhi 1% hingga 20% dari total kebutuhan tahunan sistem penyediaan air bersih di Kota Magelang berkisar antara 26,50 MWh hingga 556,95 MWh selama periode 2025 hingga 2033. Dengan mempertimbangkan potensi radiasi surya tahunan sebesar $1817,1 \text{ kWh/m}^2$ di wilayah Magelang (hasil simulasi dari *Global Solar Atlas*), dan asumsi bahwa setiap 1 kWp sistem PLTS dapat menghasilkan rata-rata 1,46 MWh per tahun, maka kebutuhan kapasitas PLTS terinstal pada skenario 1% adalah sekitar 18,5 kWp (37 panel surya dengan kapasitas 500 Wp) pada tahun 2025 dan naik menjadi 19,5 kWp (39 panel surya dengan kapasitas 500 Wp) pada tahun 2033. Sementara itu, untuk skenario pemenuhan 20% kebutuhan energi, kapasitas yang dibutuhkan mencapai 363 kWp (726 panel surya dengan kapasitas 500 Wp) di tahun 2025 dan meningkat menjadi 381 (762 panel surya dengan kapaistas 500 Wp) kWp di tahun 2033. Visualisasi hasil simulasi pada Gambar 5 memberikan gambaran kontribusi relatif dari masing-masing skenario terhadap total kapasitas PV yang dibutuhkan. Informasi ini sangat penting untuk mendukung perencanaan sistem energi terbarukan yang terintegrasi dengan infrastruktur penyediaan air bersih di tingkat kota.



Gambar 5. Kebutuhan Energi untuk Air Bersih (MWh/tahun) dan Kapasitas PV Terinstal (kWp)

Dengan asumsi kebutuhan ruang sebesar 12–14 m² untuk setiap 1 kWp sistem PV (termasuk jarak antar panel), maka untuk skenario maksimum 20% pada tahun 2033 (381 kWp), total lahan yang dibutuhkan berkisar antara 4.572 m² hingga 5.334 m². Hal ini perlu menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan tata ruang dan pemanfaatan lahan terbuka di area fasilitas pengolahan air. Peningkatan kapasitas ini menunjukkan bahwa sistem PLTS memiliki potensi tinggi untuk diterapkan dalam penyediaan energi air bersih yang efisien dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Hasil proyeksi menunjukkan bahwa jumlah penduduk Kota Magelang hingga tahun 2033 terus meningkat, sehingga diperkirakan akan mendorong kenaikan kebutuhan air bersih hingga sekitar 5,1% dibandingkan kondisi saat ini. Analisis performa proyeksi menunjukkan bahwa metode regresi linear, dengan nilai standar deviasi 2.597,18, nilai korelasi sebesar 0,86, dan MAPE rata-rata 1,05%, memberikan akurasi terbaik dalam memproyeksikan populasi Kota Magelang hingga tahun 2033. Dengan penerapan nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) efisien sebesar 0,35 kWh/m³, konsumsi energi dapat ditekan hingga 59% dibandingkan kondisi eksisting. Potensi energi surya yang signifikan di wilayah ini memungkinkan integrasi sistem *photovoltaic* (PV) sebagai sumber energi terbarukan, dengan kebutuhan kapasitas PLTS terinstal yang dapat disesuaikan antara 1% hingga 20% dari kebutuhan energi tahunan, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi karbon. Namun demikian, studi ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain ketidakpastian proyeksi populasi jangka panjang, variabilitas potensi energi surya secara musiman, serta penggunaan nilai SEC yang diasumsikan tetap selama periode proyeksi. Penelitian lanjutan disarankan untuk mencakup analisis biaya-manfaat sistem PV, integrasi penyimpanan energi (*battery*), serta studi kelayakan sosial dan kebijakan guna memperkuat implementasi di tingkat daerah. Melalui penelitian ini, dapat dilihat bahwa integrasi teknologi energi terbarukan dalam sistem penyediaan air bersih menjadi solusi strategis yang mendesak untuk memastikan keberlanjutan sumber daya dan peningkatan kualitas hidup masyarakat di Kota Magelang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Tidar atas dukungan pendanaan melalui dana DIPA Tahun 2025, yang telah memungkinkan terlaksananya penelitian ini dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] L. G. I. Fatristya, W. Saimah, I. Hadi, and E. Aryanti, "Peran Air Bersih dan Sanitasi dalam

- Meningkatkan Kualitas Hidup : Tinjauan Literatur terhadap Pencapaian Tujuan SDGs 2030,” *J. Pendidikan, Sains, Geol. dan Geofis.*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] R. Syahputra, R. R. Marpaung, I. W. Putri, and A. Nurfadillah, “Analisis Ketersediaan dan Akses Air Bersih menuju Kesehatan Masyarakat yang Berkelanjutan di Kelurahan Tanjung Harapan Kabupaten Indragiri Hilir,” vol. 2, no. 2, pp. 30–37, 2024.
- [3] Pemerintah Kota Magelang, “Akses Air Minum Layak di Kota Magelang Sudah Mencapai 100 Persen,” 2025. <https://magelangkota.go.id/view/akses-air-minum-layak-di-kota-magelang-sudah-mencapai-100-persen-2> (accessed Mar. 11, 2025).
- [4] C. G. Irianto, M. Widjaya, I. Kasim, S. Abduh, and D. N. N. Putri, “Aplikasi Sistem Pompa Air Tenaga PV Surya Atap 2x150 Wp Untuk Kantin Karfati Di Gedung E, Universitas Trisakti,” *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 18, no. 2, pp. 149–168, 2021, doi: 10.25105/jetri.v18i2.9345.
- [5] R. fatah S.A., W. Kurniawan T., and Yanuar, “Rancang Bangun Integrasi Energi Terbarukan Demi Kebelangsungan Air Bersih Menggunakan Desalinasi Pada Pesisir Pantai Cibutun,” in *PROSIDING SNTTM XXII 2024*, 2024, vol. 22, pp. 275–291, doi: 10.71452/590798.
- [6] S. Arbye, A. Aziizudin, A. Purnomo, and C. W. Yogiswara, “Studi Penyediaan Air Bersih di Desa Sulamu Menggunakan Teknologi Photovoltaic- Sea Water Reverse Osmosis,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 9, no. 2, pp. 214–228, 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i2.520.
- [7] S. Chandra Astiti, “Penerapan Metode Least Square Dalam Perhitungan Proyeksi Jumlah Penduduk,” *Sepren*, vol. 4, no. 02, pp. 147–154, 2023, doi: 10.36655/sepren.v4i02.1131.
- [8] Siswanto, Andy Hendri, and Winda Indriani, “Analisis Sistem Jaringan Pipa Distribusi SPAM di Kecamatan Inuman Kabupaten Kuantan Singingi,” *J. Teknol. dan Rekayasa Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 10–17, 2022, doi: 10.56208/jtrs.v1.i1-hal10-17.
- [9] H. Noviyanto and A. Fauzi, “Prediksi Pertumbuhan Penduduk di Indonesia Menggunakan Metode Least Square,” *MAP (Mathematics Appl. J.)*, vol. 4, no. 2, pp. 155–162, 2022, doi: 10.15548/map.v4i2.4835.
- [10] Verrdy Chrisna Primandani, Novi Andhi Setyo Purwono, and Atiyah Barkah, “Analisis Kebutuhan Dan Ketersediaan Air Bersih Di Wilayah Pelayanan Instalasi Pengolahan Air Gunung Tugel PDAM Tirta Satria Banyumas,” *Padur. J. Tek. Sipil Univ. Warmadewa*, vol. 11, no. 1, pp. 112–121, 2022, doi: 10.22225/pd.11.1.4469.112-121.
- [11] A. F. Salni, Z. Hasan, and M. A. Yusuf, “Analisis Permasalahan Kualitas, Kontinuitas dan Kuantitas Air Bersih di Kabupaten Aceh Besar,” *J. Ilm. Mhs. Arsit. dan Perenc.*, vol. 8, no. 2, pp. 139–156, 2024, doi: 10.24815/jimap.v8i2.25418.
- [12] Sujatmiko, A. Wisnu Susilo Putra, and J. Tarigan, “Analisis Mitigasi Bencana Alam Dengan Pendekatan Sistem Informasi Geografis Di Magelang,” *J. Tek. Sipil Pertahanan*, vol. 11, no. 2, pp. 155–162, 2024, [Online]. Available: www.inageoportal.com.
- [13] Bada Pusat Statistik (BPS), “Kota Magelang Dalam Angka,” Magelang.
- [14] M. Burhanuddin, “Audit Energi pada Pompa Submersible di PDAM Guna Memperoleh Peluang Penghematan Energi,” Universitas Tidar, 2022.
- [15] S. Arbye, A. Aziizudin, A. Purnomo, and D. A. Halim, “Analysis of Rooftop Solar Power Plant Development Potential in Magelang City : A Case Study of Office Buildings , Universities , And Hotels,” *J. Renew. Energy Mech.*, vol. 8, no. 01, pp. 10–26, 2025, doi: 10.25299/rem.2025.vol8(01).20775.