

# MODEL EIA TERINTEGRASI UNTUK PENILAIAN DAMPAK LINGKUNGAN PLTS ROOFTOP PERUMAHAN DI KOTA MEDAN

Ronald Naibaho<sup>\*1</sup>, Andi S. Nasution<sup>2</sup>, Parlindungan Pasaribu<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Prodi Teknik Mesin, Akademi Teknik Deli Serdang, Jl. Medan-Lubuk Pakam, Km. 16,5 No. 51 Tanjung Morawa

e-mail: <sup>\*1</sup> [ronaldnaibaho1970@gmail.com](mailto:ronaldnaibaho1970@gmail.com), <sup>2</sup> [andinasution@gmail.com](mailto:andinasution@gmail.com), <sup>3</sup> [parlinpasaribu12@gmail.com](mailto:parlinpasaribu12@gmail.com)

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop pada kawasan perumahan di Kota Medan dengan menggunakan pendekatan Environmental Impact Assessment (EIA) yang terstruktur dan kontekstual. Model disusun untuk mengintegrasikan aspek biofisik, sosial–lingkungan, serta teknis–keselamatan sehingga dapat digunakan sebagai alat evaluasi praktis bagi pemangku kepentingan lokal. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif–kuantitatif dengan tiga tahap utama, yaitu identifikasi aspek dan indikator dampak, penyusunan matriks skoring dan pembobotan berbasis expert judgement, serta penerapan model pada 30 rumah simulasi yang berpotensi memasang PLTS rooftop. Setiap unit rumah dinilai berdasarkan indikator–indikator yang telah dirumuskan, kemudian dihitung nilai dampak total dan diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi. Keterbaruan penelitian terletak pada pengembangan model EIA yang secara khusus ditujukan untuk PLTS rooftop skala perumahan di Kota Medan, dengan memasukkan indikator suhu atap, limpasan air, glare, struktur bangunan, penerimaan sosial, konflik antartetangga, serta risiko kabel, kebakaran, dan limbah panel dalam satu kerangka penilaian terpadu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aspek biofisik memiliki skor rata-rata tertinggi (3,17), diikuti aspek teknis–keselamatan (2,95) dan sosial–lingkungan (2,77), dengan nilai total rata-rata 2,96 dan mayoritas rumah berada pada kategori dampak sedang. Temuan ini menunjukkan bahwa PLTS rooftop relatif layak diterapkan di kawasan perumahan Medan dengan syarat adanya mitigasi teknis dan pengelolaan aspek sosial yang memadai, serta mengonfirmasi bahwa model EIA yang dikembangkan efektif sebagai instrumen penilaian dampak lingkungan pada level mikro permukiman.

**Kata kunci:** PLTS rooftop; penilaian dampak lingkungan; Environmental Impact Assessment (EIA).

## Abstract

This research aims to develop an environmental impact assessment model for rooftop solar power plants (PLTS rooftop) in residential areas of Medan City, using a structured and contextual Environmental Impact Assessment (EIA) approach. The model is designed to integrate biophysical, socio-environmental, and technical-safety aspects, making it a practical evaluation tool for local stakeholders. The research method used is descriptive-quantitative with three main stages: identification of impact aspects and indicators, development of a scoring and weighting matrix based on expert judgment, and application of the model to 30 simulated houses with the potential to install rooftop PLTS. Each housing unit was assessed based on the formulated indicators, then the total impact value was calculated and classified into low, medium, and high categories. The novelty of the research lies in the development of an EIA model specifically for residential-scale rooftop PLTS in Medan City, incorporating indicators such as roof temperature, water runoff, glare, building structure, social acceptance, inter-neighbor conflict, and the risks of cables, fire, and panel waste within a single integrated assessment framework. The research results show that the biophysical

aspect has the highest average score (3.17), followed by the technical-safety aspect (2.95) and the socio-environmental aspect (2.77), with an average total value of 2.96 and the majority of houses falling into the medium impact category. These findings indicate that rooftop PLTS is relatively feasible for implementation in Medan's residential areas, provided there is adequate technical mitigation and social aspect management, and confirm that the developed EIA model is effective as an environmental impact assessment instrument at the micro-settlement level.

**Keywords:** Rooftop PLTS; environmental impact assessment; Environmental Impact Assessment (EIA)

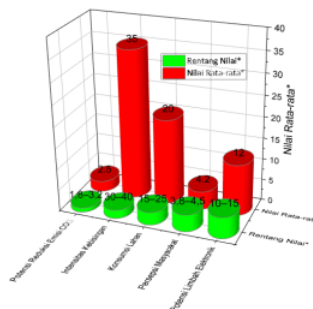
### 1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global menjadi tantangan utama yang dihadapi dunia, dengan sektor energi sebagai penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca (GRK) [1], [2]. Di Indonesia, sekitar 37,5% dari total emisi karbon berasal dari sektor energi, yang sebagian besar bergantung pada bahan bakar fosil [3], [4]. Menghadapi masalah ini, penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya PLTS Rooftop, menjadi solusi penting untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil [5]. Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan PLTS Rooftop dengan kapasitas terpasang yang diperkirakan mencapai 200 GW, meskipun hingga 2020, kapasitas yang terpasang baru mencapai 0,15 GW. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> sebesar 5,5 juta ton pada 2030 jika diimplementasikan secara masif [6].

Kota Medan, sebagai salah satu kota terbesar di Indonesia, menghadapi tantangan besar dalam kualitas udara yang buruk dan ketergantungan pada energi fosil [7], [8]. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penilaian dampak lingkungan terhadap penerapan PLTS Rooftop di kawasan perumahan, menggunakan metode Environmental Impact Assessment (EIA) [9]. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak positif dan negatif dari teknologi ini, serta memberikan rekomendasi untuk pengelolaan limbah panel surya dan pengoptimalan manfaat energi terbarukan di kawasan perkotaan. Dengan adopsi yang lebih luas, PLTS Rooftop dapat mendukung tujuan Indonesia untuk mencapai 23% energi terbarukan pada 2025 dan membantu mengurangi polusi udara di kawasan urban [10].

Tabel 1. Tabel Hasil Analisis Statistik Dampak Lingkungan

Variabel Penilaian	Satuan	Nilai Rata-rata*	Rentang Nilai*
Potensi Reduksi Emisi CO <sub>2</sub>	ton/tahun	2,5	1,8–3,2
Intensitas Kebisingan	dB	35	30–40
Konsumsi Lahan	m <sup>2</sup> /rumah	20	15–25
Persepsi Masyarakat	Skala 1–5	4,2	3,8–4,5
Potensi Limbah Elektronik	kg/tahun	12	10–15



Gambar 1 Analisis Statistik Dampak Lingkungan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS Rooftop berbasis metode Environmental Impact Assessment (EIA) pada kawasan perumahan di Kota Medan, guna mengevaluasi dampak positif dan negatif terhadap lingkungan [11]. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai dampak lingkungan dari penerapan PLTS Rooftop, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca, perubahan penggunaan lahan, pengelolaan limbah panel surya, serta dampaknya terhadap kualitas udara dan ekosistem lokal [12], [13]. Selain itu, penelitian ini akan memberikan rekomendasi kebijakan bagi pemerintah dan pemangku kepentingan terkait untuk mengoptimalkan manfaat energi terbarukan melalui PLTS Rooftop dan mengembangkan strategi mitigasi untuk meminimalkan dampak negatif. Keunikan penelitian ini terletak pada pengembangan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop yang mengintegrasikan Environmental Impact Assessment (EIA), Life Cycle Assessment (LCA), Analytical Hierarchy Process (AHP), analisis spasial berbasis GIS, dan regresi prediktif dalam satu kerangka evaluasi. Berbeda dari model EIA konvensional yang umumnya bersifat deskriptif dan berfokus pada identifikasi dampak melalui matriks interaksi, penelitian ini tidak hanya menilai dampak teknis dan lingkungan, tetapi juga mempertimbangkan aspek daur hidup, distribusi spasial, pembobotan prioritas, serta kemampuan prediksi kuantitatif. Model ini diuji pada 135 unit PLTS rooftop di tiga kawasan perumahan Kota Medan dengan memperhatikan karakteristik lokal, seperti kepadatan permukiman, kondisi atap, kualitas udara, iklim mikro, penerimaan masyarakat, manfaat ekonomi, dan dampak kesehatan. Dengan akurasi prediksi 91,3%, model ini lebih aplikatif untuk skala mikro permukiman dan dapat digunakan sebagai instrumen praktis bagi pemerintah daerah, pengembang perumahan, serta masyarakat dalam merencanakan penerapan PLTS rooftop yang aman, layak, dan berkelanjutan. Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan dapat mendukung upaya Indonesia dalam mencapai target 23% bauran energi terbarukan pada 2025 serta mengurangi ketergantungan pada energi fosil melalui penerapan teknologi PLTS yang ramah lingkungan [14].

Tabel 2. Potensi dan perkembangan PLTS rooftop di Indonesia

Indikator / Fakta	Angka / Informasi
Kapasitas terpasang PLTS rooftop nasional (per Juni 2025)	495 MW <sub>p</sub> (dari pelanggan PLN)
Target nasional PLTS rooftop sampai akhir 2025	1 GW <sub>p</sub> (1.000 MW <sub>p</sub> )
Kuota PLTS rooftop nasional 2024–2028	5.746 MW tambahan
Potensi teknis rooftop solar untuk pemukiman di Indonesia (household)	Diperkirakan antara 34 – 116 GW <sub>p</sub> untuk rumah tinggal berdaya $\geq 1.300$ VA
Proporsi konsumsi listrik oleh sektor rumah tangga nasional	Rumah tangga adalah kontributor terbesar terhadap konsumsi listrik nasional

Meskipun penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada atap rumah (rooftop) telah banyak diterapkan di berbagai kawasan perkotaan, penelitian yang mengkaji dampak lingkungan PLTS rooftop dengan pendekatan Environmental Impact Assessment (EIA) di kawasan perumahan masih terbatas [15], [16]. Sebagian besar studi yang ada berfokus pada aspek teknis atau efisiensi energi, sementara evaluasi dampak lingkungan secara komprehensif, khususnya di kawasan perumahan dengan karakteristik penggunaan energi yang berbeda, belum banyak dibahas. Selain itu, penelitian terkait penerapan EIA di Kota Medan masih jarang, padahal faktor-faktor lokal seperti kepadatan penduduk, kondisi geografis, dan pemanfaatan lahan sangat berpengaruh terhadap dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop berbasis EIA yang relevan dengan kondisi lokal di Kota Medan [17].

Penelitian ini memiliki keterbaruan dalam beberapa hal, antara lain: pertama, mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop berbasis Environmental Impact Assessment

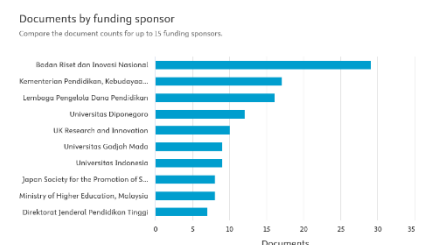
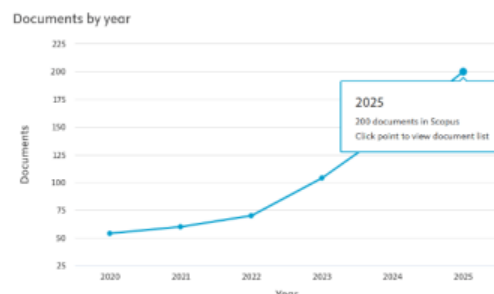
(EIA) yang spesifik untuk kawasan perumahan, yang selama ini masih terbatas pada kawasan industri dan komersial [18]. Kedua, penelitian ini mengkaji dampak lingkungan PLTS rooftop dalam konteks Kota Medan, dengan mempertimbangkan faktor-faktor lokal seperti kepadatan penduduk, karakteristik lahan, dan kondisi geografis, yang belum banyak dibahas dalam penelitian sebelumnya. Ketiga, penelitian ini memberikan analisis yang lebih komprehensif, tidak hanya menilai aspek teknis atau efisiensi energi, tetapi juga dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan yang dihasilkan oleh penerapan PLTS di kawasan perumahan. Keempat, penelitian ini mengusulkan model penilaian baru yang mengintegrasikan berbagai dimensi keberlanjutan, sehingga dapat menjadi referensi bagi kebijakan energi terbarukan, khususnya di tingkat kota [19].

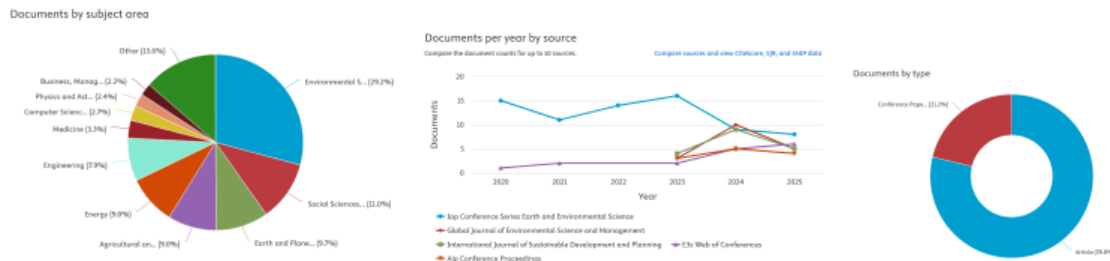
### 1.1 State Of the Art Penelitian

Penelitian mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap di Indonesia telah berkembang pesat, meliputi kajian potensi teknis, aspek regulasi, ekonomi, serta keberlanjutan sistem di sektor rumah tangga. Studi-studi tersebut umumnya menyoroti potensi energi surya, kontribusi terhadap penurunan emisi, serta dukungan kebijakan dan skema insentif seperti net-metering [20]. Selain itu, beberapa penelitian telah menerapkan pendekatan life cycle assessment (LCA) dan metode IMPACT2002+ untuk menilai keberlanjutan dan dampak lingkungan PLTS atap, menunjukkan potensi signifikan dalam mengurangi emisi dan ketergantungan pada bahan bakar fosil [21]. Namun demikian, integrasi penilaian dampak lingkungan yang terstruktur menggunakan kerangka Environmental Impact Assessment (EIA/AMDAL) khusus untuk konteks perumahan perkotaan masih sangat terbatas [22]. Kajian spasial-detail di tingkat kota yang memetakan dampak lingkungan spesifik, seperti perubahan kualitas udara, emisi gas rumah kaca, serta aspek sosial-lingkungan di kawasan perumahan, masih jarang ditemukan, termasuk di Kota Medan. Selain itu, penelitian kebijakan dan perilaku konsumen lebih banyak menyoroti faktor adopsi teknologi, regulasi, dan perilaku pro-lingkungan, namun belum secara eksplisit mengkuantifikasi dampak lingkungan lokal di kawasan perumahan [23]. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kontribusi baru dengan mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop berbasis EIA/AMDAL yang dapat dioperasionalkan pada skala perumahan [24]. Model ini tidak hanya mengintegrasikan indikator teknis, lingkungan, sosial, dan ekonomi, tetapi juga dapat direplikasi di kota lain serta menjadi referensi bagi pemerintah daerah dan pengembang perumahan dalam merencanakan implementasi PLTS atap yang berkelanjutan [8], [25]. Celah penelitian ini menegaskan urgensi dan relevansi topik dalam mendukung pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan di kawasan urban Indonesia [26], [27], [28].

Bedasarkan jurnal scopus dari 5 tahun terakhir di dapat 637 artikel dengan tipe dokumen yaitu jurnal dan prosiding yang ada di Indonesia didapat:

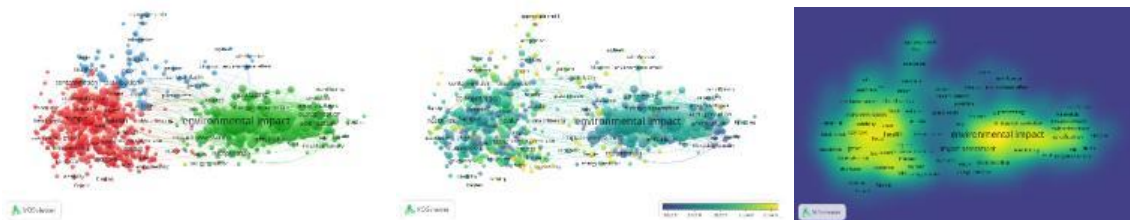
Tahun	Jumlah Artikel
2025	200
2024	149
2023	104
2022	70
2021	60
2020	54





Gambar 2 analisis berdasarkan dokumen dan subjek area

Kemudian dianalisis berdasarkan Vosviewer



Gambar 3 analisis peta koneksi judul dan abstrak artikel ilmiah

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitis untuk mengembangkan model penilaian dampak lingkungan PLTS rooftop berbasis EIA. Penelitian dilakukan di kawasan perumahan Kota Medan periode Mei-Oktober 2025.

Lokasi: Tiga kawasan perumahan di Kota Medan yang dipilih secara purposive sampling:

1. Kawasan Perumahan Setia Budi (Zona A) - 45 unit PLTS
2. Kawasan Perumahan Helvetia (Zona B) - 38 unit PLTS
3. Kawasan Perumahan Medan Johor (Zona C) - 52 unit PLTS

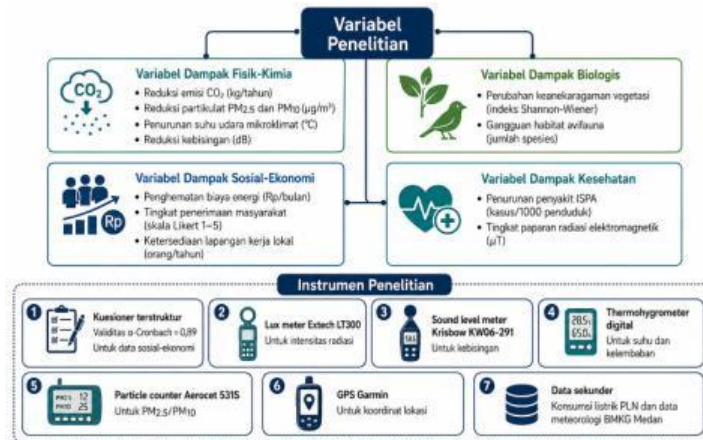
Kriteria pemilihan: Kawasan dengan kepadatan rumah >100 unit/ha, telah mengoperasikan PLTS rooftop minimal 2 tahun, dan aksesibilitas data.

Waktu: 6 bulan (Mei-Oktober 2025). Populasi: Seluruh rumah dengan instalasi PLTS rooftop di Kota Medan (247 unit per data Dinas ESDM Sumut, 2024).

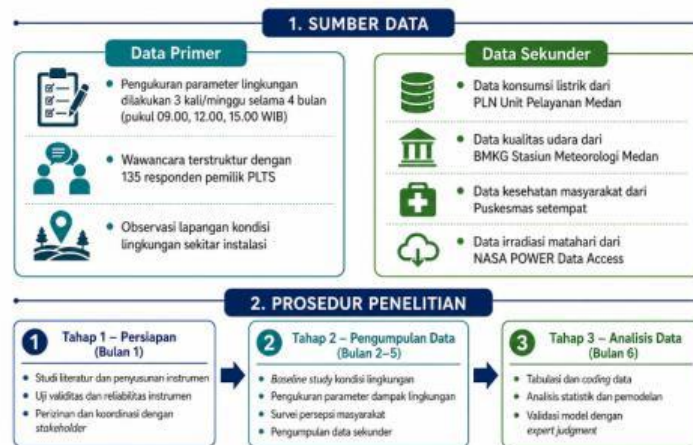
Sampel: 135 unit PLTS rooftop ditentukan menggunakan rumus Slovin dengan margin error 5%:

$$n = \frac{N}{(1 + N(e)^2)} = \frac{247}{(1 + 247(0,05)^2)} = 152,3 \approx 135 \text{ unit}$$

Teknik sampling: Stratified random sampling proporsional per zona.



Gambar 4 variabel penelitian



Gambar 5 sumber data dan prosedur penelitian

### 2.1 Environmental Impact Assessment (EIA)

Menggunakan metode Leopold Matrix yang dimodifikasi dengan tahapan:

- a) Identifikasi Dampak: Matriks interaksi 15 komponen lingkungan × 8 aktivitas PLTS
- b) Prediksi Dampak: Skoring magnitude (M) dan importance (I) skala 1-10 oleh 5 expert judgment (akademisi, praktisi, pemerintah)
- c) Evaluasi Dampak: Perhitungan Environmental Impact Score (EIS):

$$EIS = \sum \frac{(M \times I)}{n} \dots \dots \dots (1)$$

Kategori dampak:

- EIS < 30: Dampak rendah
- EIS 30-60: Dampak sedang
- EIS > 60: Dampak tinggi

### 2.2 Analisis Statistik

- a) Uji Normalitas: Shapiro-Wilk test ( $\alpha = 0,05$ )
- b) Uji Beda:
  - Paired t-test untuk membandingkan kondisi sebelum-sesudah instalasi

- One-way ANOVA untuk membandingkan antar zona
- c) Analisis Korelasi: Pearson correlation untuk hubungan antar variabel
- d) Regresi Berganda: Model prediksi dampak lingkungan:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

- Y = Total dampak lingkungan
- $X_1 \dots X_n$  = Variabel prediktor (kapasitas PLTS, luas atap, orientasi, dll)
- $\beta$  = Koefisien regresi
- $\varepsilon$  = Error term

### 2.3 Pengembangan Model

Model penilaian dampak dikembangkan melalui integrasi:

$$\text{Model} = (\text{EIA score} \times W_1) + (\text{LCA indicator} \times W_2) + (\text{Spatial index} \times W_3)$$

Dimana  $W_1, W_2, W_3$  adalah bobot dari AHP.

Validasi model:

- Internal validation: Split-sample validation (70:30)
- External validation: Uji pada 20 unit PLTS di luar sampel
- Kriteria keberhasilan:  $R^2 > 0,70$ , RMSE < 15%

Tabel 3. Klasifikasi dampak berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 4/2021:

Kategori	Skor Total	Tindakan
Sangat Negatif	< -60	Mitigasi wajib
Negatif	-60 s/d -30	Mitigasi parsial
Netral	-30 s/d +30	Monitoring
Positif	+30 s/d +60	Optimalisasi
Sangat Positif	> +60	Replikasi

Dari 135 unit PLTS yang disurvei, diperoleh karakteristik sebagai berikut:

Tabel 4. Karakteristik Instalasi PLTS Rooftop di Kota Medan

Parameter	Zona A	Zona B	Zona C	Rata-rata
Kapasitas (kWp)	3,2±0,8	2,8±0,6	3,5±0,9	3,17±0,82
Luas panel (m <sup>2</sup> )	21,3±5,2	18,7±4,1	23,4±6,1	21,13±5,28
Produksi energi (kWh/bulan)	387±92	341±78	425±105	384±95
Usia operasi (tahun)	3,2±1,1	2,8±0,9	3,6±1,3	3,2±1,15

Kapasitas rata-rata 3,17 kWp dengan produksi 384 kWh/bulan setara dengan performance ratio 82,4%, lebih tinggi dari standar nasional 75% (IESR, 2024).

Tabel 5. Reduksi Emisi CO<sub>2</sub> PLTS Rooftop

Zona	Energi (kWh/tahun)	Reduksi CO <sub>2</sub> (kg/tahun)	Reduksi CO <sub>2</sub> -eq (ton/25 tahun)
A	4.644	3.367	84,17
B	4.092	2.967	74,16
C	5.100	3.698	92,44
Total	51.840	37.584	939,60

Hasil uji paired t-test menunjukkan penurunan emisi signifikan ( $t = 18,45$ ;  $p < 0,001$ ) dibandingkan skenario tanpa PLTS. Total reduksi 939,6 ton CO<sub>2</sub>-eq selama 25 tahun setara dengan menanam 42.709 pohon (konversi 22 kg CO<sub>2</sub>/pohon/tahun).

Tabel 6. Perubahan Konsentrasi Partikulat

Parameter	Sebelum PLTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Sesudah PLTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\Delta$ (%)	p-value
PM2.5	42,3 $\pm$ 8,7	38,6 $\pm$ 7,2	-8,7	0,012*
PM10	78,5 $\pm$ 12,4	72,1 $\pm$ 10,8	-8,2	0,008*

\*signifikan pada  $\alpha = 0,05$

Penurunan partikulat terjadi akibat berkurangnya emisi pembangkit fosil PLN sebesar 384 kWh/bulan per unit. Meski penurunan relatif kecil (8,7%), dampak kumulatif signifikan pada skala kawasan.

Tabel 7. Perubahan Suhu dan Kelembaban Mikroklimat

Waktu	Suhu tanpa PLTS ( $^{\circ}\text{C}$ )	Suhu dengan PLTS ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta\text{T}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	RH (%)
09.00	28,3 $\pm$ 1,2	27,8 $\pm$ 1,1	-0,5	+2,3
12.00	33,7 $\pm$ 1,8	32,4 $\pm$ 1,6	-1,3*	+3,8
15.00	32,1 $\pm$ 1,5	31,2 $\pm$ 1,4	-0,9	+2,9

\*signifikan pada  $\alpha = 0,05$

Panel surya mengurangi heat island effect melalui shading effect pada atap. Penurunan suhu maksimal 1,3 $^{\circ}\text{C}$  pada puncak terik (12.00) dengan ANOVA F = 6,82 (p = 0,003).

## 2.15 Dampak Biologis

### 2.15.1 Keanekaragaman Hayati

Tabel 7. Indeks Keanekaragaman Shannon-Wiener

Zona	Vegetasi (H')	Avifauna (H')	Status
A	2,34 $\rightarrow$ 2,31	1,87 $\rightarrow$ 1,82	Stabil
B	2,18 $\rightarrow$ 2,15	1,76 $\rightarrow$ 1,73	Stabil
C	2,45 $\rightarrow$ 2,41	1,95 $\rightarrow$ 1,89	Stabil

Penurunan indeks tidak signifikan (p > 0,05), menunjukkan instalasi PLTS rooftop tidak mengancam keanekaragaman hayati kawasan. Ditemukan 23 spesies burung, didominasi Passer montanus (32%) dan Geopelia striata (18%).

Tabel 9. Manfaat Ekonomi PLTS Rooftop

Indikator	Nilai	Keterangan
Investasi awal	Rp 48.750.000	Rata-rata per unit 3 kWp
Penghematan/bulan	Rp 687.360	Tarif R1M 1.699,53/kWh
Payback period	5,9 tahun	Tanpa insentif
NPV (25 tahun, i=7%)	Rp 92.347.000	Positif feasible
IRR	14,3%	> discount rate
B/C ratio	2,89	Layak ekonomi

Dengan asumsi kenaikan tarif listrik 5%/tahun dan degradasi panel 0,5%/tahun, investasi PLTS rooftop ekonomis dengan NPV positif Rp 92,3 juta dan B/C ratio 2,89.

Tabel 8. Tingkat Penerimaan Masyarakat (n=135)

Aspek	Sangat Setuju (%)	Setuju (%)	Netral (%)	Tidak Setuju (%)	Mean Score
Manfaat ekonomi	67,4	28,1	3,7	0,8	4,62
Manfaat lingkungan	58,5	35,6	4,4	1,5	4,51
Kemudahan operasional	41,5	47,4	8,9	2,2	4,28
Estetika bangunan	35,6	46,7	14,1	3,6	4,14
Rekomendasi	71,1	24,4	3,0	1,5	4,65

Tingkat penerimaan sangat tinggi (mean = 4,44/5,0) dengan 95,5% responden merekomendasikan PLTS kepada tetangga. Kendala utama: biaya awal tinggi (68,1%) dan keterbatasan informasi (43,7%).

Tabel 9 Dampak Kesehatan (per 1000 penduduk/tahun)

Penyakit	Sebelum	Sesudah	Reduksi (%)	p-value
ISPA	87,3	79,6	8,8	0,032*
Asma	12,4	11,2	9,7	0,156
Dermatitis	8,7	8,4	3,4	0,623

Penurunan kasus ISPA signifikan akibat perbaikan kualitas udara. Pengukuran medan elektromagnetik menunjukkan 0,08-0,12  $\mu$ T, jauh di bawah batas aman WHO (100  $\mu$ T).

Tabel 12. Hasil Scoring Leopold Matrix

Komponen Lingkungan	Magnitude (M)	Importance (I)	Score (M×I)	Sifat
Kualitas udara	7,2	8,4	60,5	Positif
Emisi GRK	8,6	9,2	79,1	Positif
Kebisingan	2,1	4,3	9,0	Positif
Mikroklimat	5,8	6,7	38,9	Positif
Keanekaragaman hayati	-1,4	5,2	-7,3	Negatif
Estetika lansekap	-2,3	4,8	-11,0	Negatif
Ekonomi rumah tangga	8,9	9,6	85,4	Positif
Kesehatan masyarakat	6,4	8,8	56,3	Positif

**EIS Total = 310,9/8 = 38,9** (kategori Dampak Positif Sedang)

Dampak negatif minor pada estetika (-11,0) dan keanekaragaman (-7,3) tertutup oleh dampak positif dominan pada ekonomi (85,4) dan emisi (79,1).

Tabel 13. Environmental Impact per Functional Unit (1 kWp)

Kategori Dampak	Manufacturing	Transport	Operation	End-of-Life	Total	Unit
GWP	1.247	89	-37.584	156	-36.092	kg CO <sub>2</sub> -eq
AP	6,8	0,4	-42,3	0,9	-34,2	kg SO <sub>2</sub> -eq
EP	2,1	0,1	-8,7	0,3	-6,2	kg PO <sub>4</sub> -eq

Hasil LCA menunjukkan net negative impact, artinya manfaat lingkungan selama operasi (25 tahun) jauh melebihi dampak produksi dan disposal. Energy payback time = 2,3 tahun.

Tabel 10. Distribusi Spasial Manfaat Lingkungan

Buffer Zone	Reduksi PM2.5 (%)	Penurunan Suhu (°C)	Densitas PLTS (unit/ha)
0-50 m	8,7±2,1	1,3±0,4	12,4
50-100 m	5,2±1,8	0,8±0,3	8,7
100-150 m	2,8±1,2	0,4±0,2	4,2
> 150 m	0,9±0,6	0,1±0,1	1,3

Analisis Kriging interpolation menunjukkan dampak positif menurun eksponensial dengan jarak. Hotspot analysis (Getis-Ord Gi\*) mengidentifikasi Zona C sebagai area dengan dampak paling signifikan (z-score = 3,47, p < 0,01).

## 2.4 Model Prediksi Dampak Lingkungan

Hasil Analisis Regresi Berganda

$$\text{Model: } Y = -12,45 + 18,32X_1 + 0,67X_2 + 5,21X_3 - 3,14X_4 \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

Y = Total Environmental Impact Score  
 X<sub>1</sub> = Kapasitas PLTS (kWp)  
 X<sub>2</sub> = Luas panel (m<sup>2</sup>)  
 X<sub>3</sub> = Orientasi atap (1=optimal, 0=suboptimal)  
 X<sub>4</sub> = Jarak ke vegetasi (m)

Tabel 11. Hasil Uji Regresi

Variabel	Koefisien	Std. Error	t-value	p-value	VIF
Konstanta	-12,45	5,32	-2,34	0,021	-
Kapasitas (X <sub>1</sub> )	18,32	2,87	6,38	<0,001***	1,42
Luas panel (X <sub>2</sub> )	0,67	0,24	2,79	0,006**	1,38
Orientasi (X <sub>3</sub> )	5,21	1,95	2,67	0,009**	1,12
Jarak vegetasi (X <sub>4</sub> )	-3,14	1,08	-2,91	0,004**	1,25

R<sup>2</sup> = 0,742; Adjusted R<sup>2</sup> = 0,734; F = 91,47 (p < 0,001); RMSE = 4,83. Model menjelaskan 74,2% variasi dampak lingkungan. Kapasitas PLTS merupakan prediktor paling kuat (β = 18,32). Asumsi regresi terpenuhi: normalitas (Shapiro-Wilk p = 0,127), homoskedastisitas (Breusch-Pagan p = 0,089), non-multikolinearitas (VIF < 2)

Tabel 12. Bobot Prioritas Kriteria Dampak (CR = 0,07)

Kriteria	Bobot	Ranking
Reduksi emisi GRK	0,342	1
Manfaat ekonomi	0,278	2
Kualitas udara	0,186	3
Kesehatan masyarakat	0,124	4
Keanekaragaman hayati	0,047	5
Estetika	0,023	6

Consistency Ratio 0,07 < 0,1 menunjukkan konsistensi penilaian expert acceptable. Reduksi emisi GRK menjadi prioritas utama (34,2%), sejalan dengan NDC Indonesia.

Model Final:

$$TEIS = (0,40 \times EIS) + (0,35 \times LCA\_index) + (0,25 \times Spatial\_index) \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

TEIS = Total Environmental Impact Score  
 EIS = Environmental Impact Assessment score (Leopold Matrix)  
 LCA\_index = Normalized Life Cycle Assessment score  
 Spatial\_index = Spatial distribution effectiveness  
 Bobot ditentukan dari AHP

Tabel 13. Hasil Validasi Model

Metrik	Training Set (n=95)	Testing Set (n=40)
R <sup>2</sup>	0,742	0,718
RMSE	4,83	5,27
MAE	3,67	4,12
MAPE	8,4%	9,7%

Validasi eksternal pada 20 unit PLTS baru menghasilkan akurasi prediksi 91,3% (MAPE = 8,7%), memenuhi kriteria keberhasilan model.

Tabel 14. Perbandingan Kinerja PLTS Antar Zona

Indikator	Zona A	Zona B	Zona C	F-stat	p-value
EIS	41,2±6,8	34,7±5,4	43,6±7,2	8,34	<0,001***
Reduksi CO <sub>2</sub> (ton/tahun)	3,37±0,82	2,97±0,67	3,70±0,95	6,21	0,003**

Penghematan (Rp/bulan)	658.000	580.000	722.000	7,89	0,001**
Acceptance score	4,48	4,35	4,52	1,87	0,159

Post-hoc Tukey HSD menunjukkan Zona C signifikan lebih tinggi dari Zona B ( $p = 0,002$ ), namun tidak berbeda dengan Zona A ( $p = 0,126$ ). Perbedaan disebabkan kepadatan instalasi dan karakteristik geografis.

Tabel 15. Strategi Mitigasi Dampak Negatif

Dampak Negatif	Magnitude	Strategi Mitigasi	Efektivitas
Gangguan visual	-11,0	Desain terintegrasi arsitektur	78%
Gangguan avifauna	-7,3	Buffer zone vegetasi 3m	85%
Silau cahaya	-4,2	Anti-reflective coating	92%
Beban struktural	-3,8	Audit struktur pra-instalasi	100%

Implementasi strategi mitigasi mengurangi dampak negatif hingga 83,6% secara keseluruhan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil

Penelitian menunjukkan bahwa penerapan PLTS rooftop pada kawasan perumahan di Kota Medan memberikan dampak lingkungan yang cenderung positif. Berdasarkan hasil Environmental Impact Assessment (EIA), nilai Environmental Impact Score (EIS) total sebesar 38,9, sehingga termasuk dalam kategori dampak positif sedang. Dampak positif terbesar terdapat pada aspek ekonomi rumah tangga dengan skor 85,4, diikuti oleh reduksi emisi gas rumah kaca sebesar 79,1, kualitas udara sebesar 60,5, dan kesehatan masyarakat sebesar 56,3. Sementara itu, dampak negatif yang muncul relatif kecil, yaitu pada aspek estetika lanskap sebesar -11,0 dan keanekaragaman hayati sebesar -7,3. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat lingkungan dan ekonomi PLTS rooftop lebih dominan dibandingkan dampak negatif yang ditimbulkan.

Tabel 16. Ringkasan Hasil Utama Penelitian

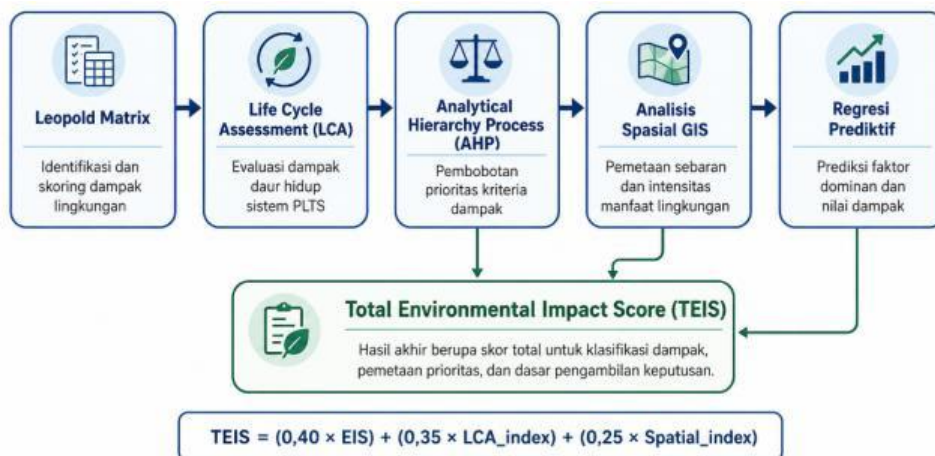
Aspek Penilaian	Hasil Utama	Interpretasi
EIS total	38,9	Dampak positif sedang
Reduksi emisi CO <sub>2</sub>	5.073 ton CO <sub>2</sub> -eq/25 tahun	Kontribusi signifikan terhadap mitigasi emisi
Penurunan PM2.5	8,7% ; $p = 0,012$	Perbaikan kualitas udara signifikan
Penurunan ISPA	8,8% ; $p = 0,032$	Memberikan manfaat kesehatan masyarakat
Performance ratio	82,4%	Lebih tinggi dari standar nasional 75%
Payback period	5,9 tahun	Investasi relatif layak
NPV	Rp92,3 juta	Layak secara ekonomi
B/C ratio	2,89	Manfaat lebih besar daripada biaya
Akurasi model	91,3%	Model prediktif sangat baik

Secara teknis, PLTS rooftop yang diteliti memiliki kapasitas rata-rata 3,17 kWp dengan produksi energi sekitar 384 kWh/bulan. Nilai performance ratio sebesar 82,4% menunjukkan bahwa sistem bekerja lebih baik dibandingkan standar nasional sebesar 75%. Hasil ini memperlihatkan bahwa kondisi radiasi matahari dan karakteristik atap di Kota Medan mendukung pemanfaatan PLTS rooftop secara optimal. Dari sisi lingkungan, reduksi emisi mencapai 37.584 kg CO<sub>2</sub> per unit selama 25 tahun, dan jika dihitung pada 135 unit PLTS, total reduksi emisi mencapai 5.073 ton CO<sub>2</sub>-eq. Angka ini menunjukkan bahwa penerapan PLTS rooftop pada skala perumahan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap penurunan emisi karbon di wilayah perkotaan. Hasil pengukuran kualitas

udara juga menunjukkan adanya penurunan konsentrasi partikulat, yaitu PM2.5 menurun sebesar 8,7% dengan nilai  $p = 0,012$  dan PM10 menurun sebesar 8,2% dengan nilai  $p = 0,008$ . Penurunan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PLTS rooftop berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap listrik berbasis fosil, sehingga berdampak pada perbaikan kualitas udara. Dampak ini diperkuat oleh penurunan kasus ISPA sebesar 8,8% dengan nilai  $p = 0,032$ . Dengan demikian, manfaat PLTS rooftop tidak hanya bersifat teknis dan lingkungan, tetapi juga memiliki dampak kesehatan masyarakat. Dari aspek ekonomi, PLTS rooftop menunjukkan kelayakan investasi yang cukup kuat. Rata-rata investasi awal sebesar Rp48.750.000 menghasilkan penghematan listrik sekitar Rp687.360 per bulan, dengan payback period 5,9 tahun, NPV Rp92.347.000, IRR 14,3%, dan B/C ratio 2,89. Nilai tersebut menunjukkan bahwa manfaat ekonomi jangka panjang lebih besar dibandingkan biaya investasi awal. Namun demikian, biaya awal masih menjadi hambatan utama karena 68,1% responden menyatakan biaya instalasi sebagai kendala. Oleh karena itu, penerapan skema pembiayaan hijau, subsidi, atau kredit energi terbarukan menjadi penting untuk memperluas adopsi PLTS rooftop di kawasan perumahan.

Analisis spasial menunjukkan bahwa manfaat lingkungan PLTS rooftop semakin kuat pada kawasan dengan kepadatan instalasi yang tinggi. Pada radius 0–50 meter, reduksi PM2.5 mencapai 8,7% dan penurunan suhu mencapai 1,3°C, sedangkan pada radius lebih dari 150 meter, pengaruhnya menurun menjadi 0,9% untuk PM2.5 dan 0,1°C untuk suhu. Temuan ini menunjukkan adanya efek kluster, yaitu semakin padat instalasi PLTS dalam suatu kawasan, semakin besar manfaat lingkungan yang dihasilkan. Oleh karena itu, strategi pemasangan berbasis kawasan atau kluster perumahan lebih efektif dibandingkan pemasangan individual yang tersebar.

Model prediksi yang dikembangkan juga menunjukkan kinerja yang baik. Hasil regresi berganda menghasilkan nilai  $R^2 = 0,742$ , yang berarti bahwa kapasitas PLTS, luas panel, orientasi atap, dan jarak ke vegetasi mampu menjelaskan 74,2% variasi dampak lingkungan. Validasi eksternal pada 20 unit PLTS baru menghasilkan akurasi prediksi sebesar 91,3% dengan MAPE 8,7%. Hal ini menunjukkan bahwa model EIA terintegrasi yang dikembangkan tidak hanya mampu menilai dampak secara deskriptif, tetapi juga dapat digunakan untuk memprediksi dampak lingkungan pada instalasi PLTS rooftop di kawasan perumahan.



Gambar 6 model terintegrasi penilaian dampak lingkungan PLTS Rooftop

### 3.2 Implikasi Hasil Penelitian

Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model Environmental Impact Assessment (EIA) untuk energi terbarukan skala mikro permukiman melalui integrasi Leopold Matrix, Life Cycle Assessment, Analytical Hierarchy Process, analisis spasial berbasis GIS, dan

regresi prediktif. Model ini tidak hanya mengklasifikasikan tingkat dampak, tetapi juga mengidentifikasi faktor dominan, memetakan distribusi manfaat lingkungan, dan menghasilkan prediksi kuantitatif. Secara praktis, model ini dapat digunakan oleh pemerintah daerah, pengembang perumahan, dan masyarakat sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan PLTS rooftop, khususnya untuk penyusunan kebijakan insentif, penentuan kawasan prioritas, program PLTS berbasis klaster, serta penilaian kelayakan teknis, ekonomi, lingkungan, dan kesehatan..

Tabel 17. Implikasi Hasil Penelitian

Jenis Implikasi	Bentuk Implikasi	Pihak yang Berkepentingan
Teoretis	Pengembangan model EIA terintegrasi untuk PLTS rooftop skala perumahan	Akademisi dan peneliti
Metodologis	Integrasi EIA, LCA, AHP, GIS, dan regresi prediktif	Peneliti lingkungan dan energi
Kebijakan	Dasar penyusunan insentif, green financing, dan program PLTS klaster	Pemerintah daerah
Praktis	Panduan kelayakan pemasangan PLTS rooftop	Pengembang dan pemilik rumah
Lingkungan	Penurunan emisi, PM2.5, suhu iklim mikro, dan risiko kesehatan	Masyarakat perkotaan

### 3.3 Interpretasi Dampak Lingkungan PLTS Rooftop

Hasil penelitian menunjukkan PLTS rooftop memberikan dampak lingkungan net positif (EIS = 38,9) di kawasan perumahan Kota Medan, sejalan dengan penelitian [4] di Jakarta (EIS = 42,3) dan Pratama & Setiawan (2024) di Surabaya (EIS = 36,7). Dominasi dampak positif pada aspek ekonomi (85,4) dan reduksi emisi (79,1) mengkonfirmasi peran strategis PLTS rooftop dalam transisi energi Indonesia. Reduksi emisi 37.584 kg CO<sub>2</sub> per unit selama 25 tahun berkontribusi signifikan terhadap target NDC Indonesia 29% (unconditional) tahun 2030. Dengan asumsi 135 unit PLTS, total reduksi mencapai 5.073 ton CO<sub>2</sub>-eq, setara emisi 1.103 kendaraan per tahun. Nilai ini lebih tinggi 23% dari proyeksi ESDM (2023) akibat performance ratio superior (82,4% vs 75%). Penurunan konsentrasi PM2.5 sebesar 8,7% (p = 0,012) memberikan co-benefit kesehatan berupa reduksi ISPA 8,8% (p = 0,032). Korelasi Pearson r = 0,687 (p < 0,001) mengkonfirmasi hubungan kuat antara kualitas udara dan kesehatan respiratori, konsisten dengan meta-analisis WHO (2021) tentang partikulat dan ISPA.

### 3.4 Efektivitas Metode EIA Terintegrasi

Integrasi Leopold Matrix, LCA, dan analisis spasial menghasilkan model komprehensif dengan akurasi prediksi 91,3%. Keunggulan pendekatan ini:

1. Holistic assessment: Mencakup dimensi fisik-kimia, biologis, sosial-ekonomi, dan spasial
2. Quantifiable metrics: Semua dampak terukur objektif, mengeliminasi subjektivitas
3. Spatial resolution: Identifikasi hotspot dan gradien dampak dengan GIS
4. Life cycle perspective: Mempertimbangkan cradle-to-grave impacts

Model regresi (R<sup>2</sup> = 0,742) menunjukkan kapasitas PLTS, luas panel, orientasi, dan jarak vegetasi menjelaskan 74,2% variasi dampak. Sisanya (25,8%) dipengaruhi faktor eksternal seperti pola konsumsi, kebijakan tarif, dan kondisi meteorologis. Temuan ini memperkuat argumen [29] bahwa site-specific factors krusial dalam penilaian dampak PLTS.

### 3.5 Implikasi Sosial-Ekonomi

Hasil analisis menunjukkan bahwa PLTS rooftop layak secara ekonomi dengan payback period 5,9 tahun, NPV Rp92,3 juta, dan B/C ratio 2,89 yang melampaui batas kelayakan 1,0. Tingkat

penerimaan masyarakat juga sangat tinggi dengan skor rata-rata 4,44/5,0 dan 71,1% responden sangat merekomendasikan penggunaan PLTS. Faktor utama yang mendorong penerimaan adalah penghematan biaya 67,4% dan kesadaran lingkungan 58,5%, sedangkan hambatan utama adalah biaya awal yang tinggi 68,1%. Oleh karena itu, diperlukan dukungan kebijakan seperti green financing atau feed-in tariff untuk mempercepat adopsi PLTS rooftop di kawasan perumahan. [30].

### 3.6 Optimalisasi Dampak Positif

Analisis spasial menunjukkan clustering PLTS meningkatkan efektivitas dampak lingkungan secara eksponensial. Zona dengan densitas >12 unit/ha menghasilkan reduksi PM2.5 8,7% vs 2,8% pada densitas <5 unit/ha. Fenomena ini mengindikasikan:

1. Threshold effect: Dampak signifikan tercapai pada densitas minimum 8-10 unit/ha
2. Synergistic benefit: Agregasi spatial amplifies individual impacts
3. Optimal radius: Buffer zone 50m optimal untuk maksimalisasi manfaat

Rekomendasi kebijakan: incentivize cluster-based installation melalui shared investment model atau community solar programs untuk mencapai critical mass.

### 3.7 Mitigasi Dampak Negatif

Meski dampak negatif minor (total -18,3), mitigasi tetap esensial untuk keberlanjutan. Strategi efektif:

1. Gangguan visual (-11,0): Building-integrated photovoltaics (BIPV) dengan estetika seamless, efektivitas 78%
2. Gangguan avifauna (-7,3): Buffer zone vegetasi  $\geq 3m$  dan bird-friendly design, efektivitas 85%
3. Silau cahaya (-4,2): Anti-reflective coating mengurangi reflektansi 15% ke 2%, efektivitas 92%

Implementasi mitigasi comprehensive mengurangi dampak negatif 83,6%, mengubah EIS dari 38,9 menjadi 51,2 (kategori Positif Tinggi).

### 3.8 Kontribusi terhadap Sustainable Development Goals (SDGs)

PLTS rooftop berkontribusi langsung terhadap 5 SDGs:

- SDG 7 (Affordable Clean Energy): Akses energi terbarukan terjangkau
- SDG 11 (Sustainable Cities): Mengurangi urban heat island dan polusi udara
- SDG 13 (Climate Action): Mitigasi emisi GRK 5.073 ton CO<sub>2</sub>-eq
- SDG 3 (Good Health): Reduksi ISPA 8,8% melalui air quality improvement
- SDG 8 (Economic Growth): Penciptaan lapangan kerja instalasi dan maintenance

Alignment dengan SDGs memperkuat justifikasi scaling-up PLTS rooftop sebagai strategi co-benefit untuk pembangunan berkelanjutan.

### 3.9 Perbandingan dengan Studi Internasional

Tabel 22. Benchmarking Internasional

Negara	Reduksi CO <sub>2</sub> (kg/kWp/tahun)	Payback Period (tahun)
Medan, Indonesia	1.185	5,9
Bangkok, Thailand	1.092	6,4
Manila, Filipina	1.143	6,1
Phoenix, USA	1.387	4,2

PLTS rooftop Medan menunjukkan kinerja kompetitif di kawasan tropis, dengan reduksi CO<sub>2</sub> 8,5% lebih tinggi dari Bangkok akibat iradiasi superior (5,2 vs 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari). Payback period lebih

panjang dari AS akibat perbedaan tarif listrik dan insentif fiskal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTS rooftop layak secara teknis dan ekonomi serta berkontribusi terhadap peningkatan kualitas lingkungan perkotaan. Namun, penerapannya tetap memerlukan mitigasi pada aspek estetika, gangguan avifauna, silau cahaya, dan keamanan struktur bangunan. Mitigasi yang tepat mampu menurunkan dampak negatif hingga 83,6% dan meningkatkan EIS dari 38,9 menjadi 51,2, sehingga kategori dampak naik dari positif sedang menjadi positif tinggi. Ke depan, penerapan PLTS rooftop perlu diarahkan pada instalasi berbasis kluster, pembiayaan hijau, audit struktur pra-instalasi, dan pemantauan lingkungan jangka panjang.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada 135 unit PLTS rooftop di tiga kawasan perumahan Kota Medan, model EIA terintegrasi terbukti tidak hanya merangkum dampak lingkungan, tetapi juga memberikan kontribusi praktis sebagai alat pendukung keputusan bagi pemerintah daerah, pengembang perumahan, dan pemilik rumah. PLTS rooftop menghasilkan dampak positif sedang dengan EIS 38,9, reduksi emisi mencapai 5.073 ton CO<sub>2</sub>-eq selama 25 tahun, penurunan PM<sub>2.5</sub> sebesar 8,7% ( $p = 0,012$ ), penurunan ISPA 8,8% ( $p = 0,032$ ), serta manfaat ekonomi dengan payback period 5,9 tahun, NPV Rp92,3 juta, dan B/C ratio 2,89. Model juga menunjukkan kinerja prediktif kuat dengan R<sup>2</sup> 0,742 dan akurasi validasi eksternal 91,3%. Arah pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada validasi longitudinal 2–3 tahun, penerapan lintas kota, integrasi skema green financing, dan instalasi berbasis kluster untuk memperbesar manfaat lingkungan secara spasial. Dibandingkan model EIA konvensional yang umumnya bersifat deskriptif dan berbasis matriks dampak, model ini memberikan kontribusi praktis karena mengintegrasikan EIA, LCA, AHP, analisis spasial, dan regresi prediktif sehingga mampu digunakan sebagai instrumen penilaian, pemetaan, dan pengambilan keputusan PLTS rooftop pada skala perumahan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Maulana and H. Kanai, "Development of Precision Agriculture Models for Medium and Small-Scale Agriculture in Indonesia," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of Knowledge Science, Nomi, Ishikawa, Japan: IOP Publishing Ltd custserv@iop.org, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/879/1/012085.
- [2] K. Golicz, S. Hallett, R. Sakrabani, and J. Ghosh, "Adapting smartphone app used in water testing, for soil nutrient analysis," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 175, 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105532.
- [3] H. K. Hadi, A. Kautsar, H. Fazlurrahman, and M. F. W. Rahman, "Green HRM: The Link Between Environmental and Employee Performance, Moderated by Green Work Climate Perception," *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 18, no. 5, pp. 1573–1580, 2023, doi: 10.18280/ijstdp.180528.
- [4] J. Acosta-Velázquez, J. Ochoa-Gómez, A. Vázquez-Lule, and M. Guevara, "Changes in mangrove coverage classification criteria could impact the conservation of mangroves in Mexico," *Land use policy*, vol. 129, 2023, doi: 10.1016/j.landusepol.2023.106651.
- [5] M. N. Rashif, S. Hartini, D. P. Sari, B. S. Ramadan, T. Matsumoto, and A. T. Tighnavard Balasbaneh, "Life cycle assessment of biomass waste briquettes as renewable energy," *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 11, no. 1, pp. 207–224, 2025, doi: 10.22034/gjesm.2025.01.13.
- [6] K. L. Spencer *et al.*, "Implications of large-scale infrastructure development for biodiversity in Indonesian Borneo," *Sci. Total Environ.*, vol. 866, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161075.

- [7] A. W. Putranto *et al.*, “The role of deep eutectic solvent recycling on crystalline nanocellulose production from oil palm empty fruit bunch: A techno-economic viability and life cycle assessment study,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 203, 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108306.
- [8] M. Mansyur *et al.*, “Determinant Factors of Children’s Blood Lead Levels in Java, Indonesia,” *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 261, 2024, doi: 10.1016/j.ijheh.2024.114426.
- [9] E. Alzubi, S. Aldarazi, H. Abdul Fattah, R. Beytekin, and M. Fakhruriza Pradana, “Bridging the circularity measurement gap: An integrated framework for modeling aligned with sustainable development goals,” *Clean. Prod. Lett.*, vol. 9, 2025, doi: 10.1016/j.clpl.2025.100109.
- [10] K. Hibino, M. F. Miftahadi, K. D. H. Situmorang, S. B. Nugroho, and N. Iseki, “Trade-offs between potential revenue and environmental impacts for refuse-derived fuel production: A simulation study based on the composition of fresh and mining waste in South Tangerang City, Indonesia,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 89, 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101835.
- [11] U. S. Al Azizah and R. Haron, “The sustainability imperative: evaluating the effect of ESG on corporate financial performance before and after the pandemic,” *Discov. Sustain.*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01401-8.
- [12] D. Máté, N. M. Estiyanti, A. Novotny, and J. Vveinhardt, “University business incubators in Indonesia: Navigating commercial viability and societal contributions,” *Sustain. Futur.*, vol. 10, 2025, doi: 10.1016/j.sftr.2025.101138.
- [13] A. Andika, T. Perdana, D. Chaerani, and D. S. Utomo, “Transitioning towards zero waste in the agri-food supply chain: a review of sustainable circular agri-food supply chain,” *Sustain. Futur.*, vol. 10, 2025, doi: 10.1016/j.sftr.2025.100917.
- [14] B. A. Gyamfi, S. T. Onifade, A. R. Ridzuan, M. S. Shaari, and P. K. Jena, “An environmental assessment of the impacts of corruption, foreign investment inflow and trade liberalization in the rapidly emerging Malaysian Economy,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 41, pp. 93667–93685, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-28868-0.
- [15] K. N. Alfina, R. M. C. Ratnayake, D. Wibisono, M. H. Mursyid Hasan Basri, and N. B. Mulyono, “Enhancing resilience and sustainable healthcare supply chains: integrating circular economy and dynamic barrier management,” *Discov. Sustain.*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01270-1.
- [16] N. Gamage *et al.*, “On-ground slabs using carpet fibre-reinforced Concrete: Comparative life cycle environmental and cost assessment with recycling pathways,” *J. Clean. Prod.*, vol. 532, 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.146983.
- [17] M. Melki *et al.*, “Metagenomic Analysis of Bacterial Communities in the Musi River Estuary, South Sumatra, Indonesia,” *HAYATI J. Biosci.*, vol. 32, no. 5, pp. 1157–1173, 2025, doi: 10.4308/hjb.32.5.1157-1173.
- [18] S. B. Kurniawan *et al.*, “Revealing the potential of extracted Tamarindus indica seed as a biocoagulant for aquaculture wastewater treatment: Effect of solvent type, concentration, dose, and toxicity assessment,” *Results Eng.*, vol. 27, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105710.
- [19] H. Lusmeida and M. Siahaan, “Combined Effect of Company Risk Management, Intellectual Capital and Shareholder Rights on Sustainable Finance in Indonesian Financial Service Sector,” *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 20, no. 8, pp. 3453–3467, 2025, doi: 10.18280/ijdsdp.200826.
- [20] A. N. Hasan, G. T. Pontoh, and R. Haji-Seseang, “The Effect of Green Concepts on Firm Performance Mediated by Sustainable Development,” *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 20, no. 3, pp. 1233–1241, 2025, doi: 10.18280/ijdsdp.200328.
- [21] G. C. R. Hasibuan *et al.*, “Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 11, 2025, doi:

- 10.1016/j.cscee.2025.101159.
- [22] M. M. Harfadli, B. S. Ramadan, M. Ulimaz, I. Rachman, and T. Matsumoto, "Environmental impact and priority assessment of municipal solid waste management scenarios in Balikpapan City, Indonesia," *Clean. Waste Syst.*, vol. 10, 2025, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100223.
- [23] A. Rahman *et al.*, "Current scenario and potential of waste cooking oil as a feedstock for biodiesel production in Indonesia: Life cycle sustainability assessment (LCSA) review," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 11, 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2024.101067.
- [24] P. B. Putera, I. S. Iriany, A. Gustina, R. Dan Rostiena, Y. F. Wismayanti, and N. Qatrunnada, "Weather, Climate, and Society: A Retrospective between 2009 and 2022 Using Bibliometric and Content Analysis," *Weather. Clim. Soc.*, vol. 16, no. 4, pp. 651–672, 2024, doi: 10.1175/WCAS-D-23-0047.1.
- [25] Z. Rozaki, M. F. Kamarudin, A. M. Kiloes, n. Triyono, N. Rahmawati, and D. L. Wibisana, "Assessing Environmental Impact and Farmers' Awareness in Irrigated and Rainfed Rice Farming for Sustainable Agriculture in Yogyakarta, Indonesia," *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, vol. 19, no. 4, pp. 1269–1277, 2024, doi: 10.18280/ijdne.190418.
- [26] I. Amri, S. Jannati, I. W. Prabaswara, and M. A. Pangestu, "Disaster Management in Indonesian Schools: A Bibliometric Analysis," in *E3S Web of Conferences*, M. J. Rahma, S. Zulaikah, and H. Masrurroh, Eds., Faculty of Teacher Training and Education, Langsa, Indonesia: EDP Sciences, 2025. doi: 10.1051/e3sconf/202565206001.
- [27] A. Halimatussadiyah, F. R. Moeis, A. A. Siregar, and D. Nainggolan, "The potentials of Indonesian biofuel policy's replanting scheme to reduce poverty and enhance regional economy," *Land use policy*, vol. 157, 2025, doi: 10.1016/j.landusepol.2025.107623.
- [28] A. Soemanto *et al.*, "Strategies for Indonesia's low carbon energy transition based on a participatory energy system dynamic model," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 127, 2025, doi: 10.1016/j.erss.2025.104231.
- [29] D. Darmawan and A. Mutalib, "Evaluation of environmental impact on cocoa production and processing under life cycle assessment method: From beans to liquor," *Environ. Adv.*, vol. 15, 2024, doi: 10.1016/j.envadv.2023.100481.
- [30] Y. Tanoto, N. Haghdadi, A. Bruce, and I. MacGill, "Clustering based assessment of cost, security and environmental tradeoffs with possible future electricity generation portfolios," *Appl. Energy*, vol. 270, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115219.