

Feasibility Study Of Photovoltaic Rooftop For Electricity Of Trains On The Jakarta-Surabaya Line

Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Untuk Elektrifikasi Kereta Rel Listrik Jalur Jakarta-Surabaya

Rian Devrian^a, Ali Herman Ibrahim^b

Program Studi Magister Teknik Elektro Institut Teknologi PLN, Jakarta, indonesia^{a,b}

^arian2310525@itpln.ac.id, ^bali.ptemm@itpln.ac.id

Abstract

Railways have an important role in supporting people's mobility and logistics distribution, while offering a more environmentally friendly mode of transportation than other alternatives. However, rail electrification in Indonesia still relies on fossil energy. This study examines the feasibility of utilizing rooftop solar power plants to support the electrification of the Jakarta-Surabaya Railway (KRL) through technical compatibility and financial analysis. The technical study was conducted by calculating the average solar irradiation based on data from NASA which amounted to 56.459 kWh/m². Meanwhile, the estimated roof area of government buildings in 14 cities along the route, assuming the utilization of 25% of the total roof, was obtained at 652578.3 m², generating in a power of 482.68 MW per day. Its considered sufficient energy to support the operation of TEMU 2000 Series semi-fast electric trains (KRL) with a daily energy demand of 81.2 MW. Financial aspects were analyzed using Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PP) indicators at 10%, 12%, and 14% discount rate scenarios. The results of the calculations indicate that none of the train types achieves financial viability, as all scenarios yield negative Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BR) values below one, negative Internal Rate of Return (IRR), and payback periods exceeding 25 years. Therefore, the implementation of rooftop solar power plants for the electrification of the Jakarta-Surabaya railway line is considered technically feasible but financially unviable, making it impractical for implementation under the evaluated conditions.

Keywords: Rail Electrification, Jakarta-Surabaya, Rooftop PV, Feasibility Study.

Abstrak

Kereta api memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi logistik, sekaligus menawarkan moda transportasi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan alternatif lainnya. Namun, elektrifikasi jalur kereta di Indonesia masih bergantung pada energi fosil. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap untuk mendukung elektrifikasi Kereta Rel Listrik (KRL) lintasan Jakarta-Surabaya melalui analisis kesesuaian teknis dan finansial. Kajian teknis dilakukan dengan menghitung rata-rata iradiasi matahari berdasarkan data dari NASA yaitu sebesar 56,459 kWh/m². Sedangkan estimasi luas atap pada bangunan pemerintahan di 14 kota sepanjang jalur, dengan asumsi pemanfaatan 25% dari total atap didapatkan sebesar 652578,3 m², sehingga menghasilkan daya sebesar 482,68 MW per hari. Kapasitas tersebut dinilai cukup untuk menunjang operasi Kereta Rel Listrik (KRL) semi cepat tipe TEMU 2000 Series dengan kebutuhan energi harian 81,2 MW. Aspek finansial dianalisis menggunakan indikator *Net Present Value* (NPV), *Benefit Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PP) pada skenario tingkat diskonto 10%, 12%, dan 14%. Perhitungan menunjukkan semua tipe kereta belum mendapatkan nilai yang dikarenakan pada NPV seluruhnya menghasilkan nilai negatif pada seluruh skenario, BCR pun < 1, IRR pun memiliki nilai negatif dan periode pengembalian pada keseluruhan skenario memiliki waktu lebih dari 25 tahun. Dengan demikian, implementasi PLTS atap pada elektrifikasi jalur Jakarta-Surabaya dinilai layak secara teknis namun tidak secara finansial, sehingga menjadi hal yang tidak dapat diimplementasikan secara ekonomi.

Kata Kunci: Elektrifikasi Jalur Kereta, Jakarta-Surabaya, PLTS Atap, Studi Kelayakan.

1. Pendahuluan

Sektor transportasi memainkan peran vital dalam mendukung hampir seluruh sektor lainnya, menjadikannya elemen krusial dalam aktivitas ekonomi baik distribusi barang dan jasa, mobilitas masyarakat, dan mendorong investasi. Sistem transportasi yang baik juga akan meningkatkan aksesibilitas antar wilayah. Namun, di sisi lain, sektor ini juga menjadi salah satu pengguna terbesar bahan bakar minyak (BBM) dan berkontribusi besar terhadap polusi udara, terutama di wilayah perkotaan.

Secara global peningkatan volume transportasi di darat, laut, dan udara untuk aktivitas angkutan barang dan penumpang merupakan penyumbang utama pertumbuhan emisi karbon dioksida (CO₂) antara tahun 2000 hingga 2018 dengan kontribusi 14% (SLOCAT, 2021). Moda transportasi kereta api memiliki kontribusi emisi CO₂ paling kecil daripada yang lainnya, yaitu 1% untuk angkutan barang dan 4% untuk angkutan penumpang. Hal ini menjadikan kereta api sebagai peluang alternatif transportasi ramah lingkungan sangat terbuka lebar dan menjanjikan, terutama di Indonesia. Sejalan dengan tujuan pada masa mendatang yang tertuang pada aksi mitigasi sektor transportasi darat dan perkeretaapian bahwa efisiensi energi dapat dilakukan dengan merevitalisasi jalur Kereta Api (KA) melalui penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) berupa pemanfaatan PLTS pada infrastruktur/prasarana transportasi darat dan perkeretaapian (Kementerian Perhubungan, 2023).

Transportasi rel di Indonesia, khususnya di koridor Jakarta–Surabaya, merupakan tulang punggung logistik dan mobilitas masyarakat di pulau Jawa. Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia mencatat pola pertumbuhan penumpang pada perjalanan kereta selalu positif di setiap tahunnya, kecuali pada masa awal Covid-19 di tahun 2020, dikarenakan adanya Pembatasan Pergerakan Kegiatan Masyarakat (PPKM).

Sejalan dengan target *Net Zero Emission* tahun 2060, diperlukan inovasi elektrifikasi berbasis energi terbarukan seperti PLTS atap. Jalur kereta di Pulau Jawa telah terbentang dari Barat hingga ke Timur begitupun sama halnya dengan jaringan listrik milik PLN, sehingga memungkinkan untuk mengintegrasikannya menjadi sumber energi listrik untuk kereta rel listrik di sepanjang jalurnya

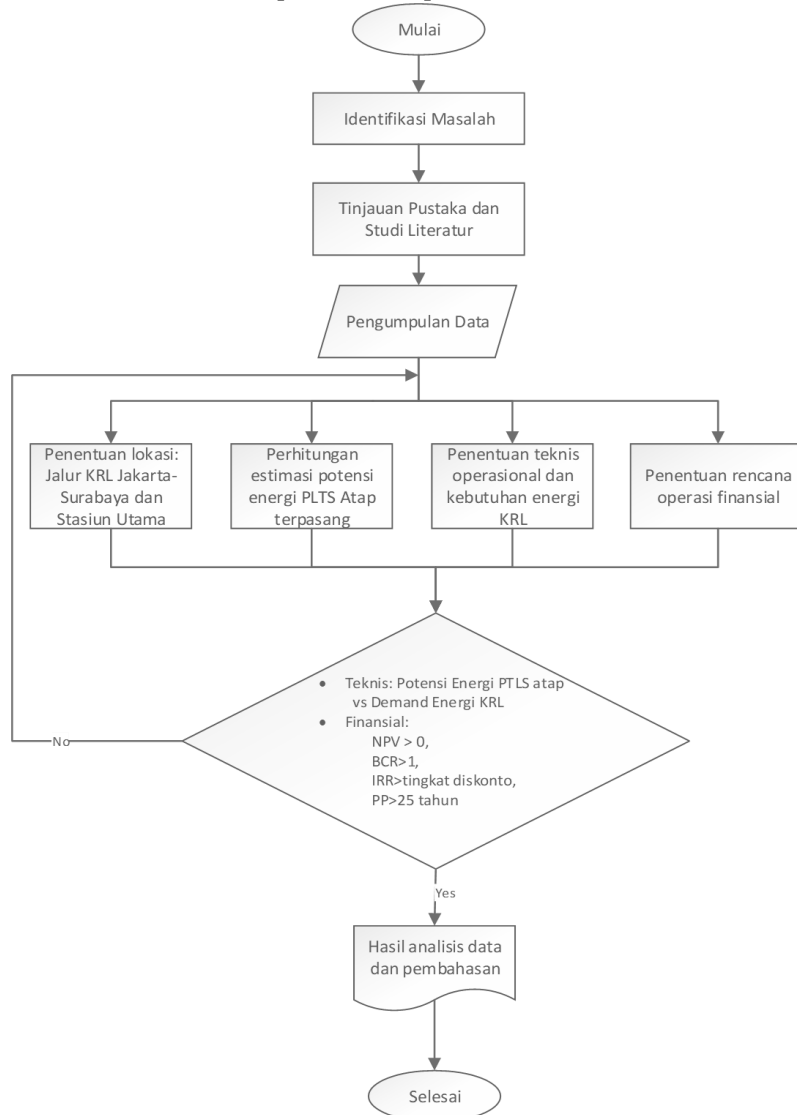
Pemasangan PLTS di atap stasiun, depo, dan bangunan penunjang lainnya seperti bangunan gedung pemerintahan pun memiliki potensi besar untuk menyuplai sebagian kebutuhan energi listrik kereta rel. Indonesia memiliki sumber daya energi surya yang sangat besar, dengan rata-rata intensitas radiasi harian mencapai 4–5 kWh/m² atau sekitar 112.000 GWp. Adapun kota-kota dengan stasiun besar yang dilalui jalur kereta dari Jakarta-Surabaya yang memiliki intensitas cahaya matahari yang baik seperti di Kota Surabaya sebesar 5,349 kWh/m² per hari, Semarang sebesar 5,225 kWh/m² per hari, Cirebon sebesar 5,326 kWh/m² dan di Jakarta sebesar 4,640 kWh/m² per hari.

Melalui pembahasan aspek teknis dan finansial penelitian ini bertujuan agar dapat membantu pemerintah mewujudkan target *roadmap* dalam pemanfaatan energi surya yang menargetkan kapasitas PLTS terpasang hingga tahun 2025 yaitu sebesar 0.87 GW atau sekitar 50 MWp/tahun serta pengaplikasian energi bersih pada transportasi umum.

2. Metode

Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif pada data sekunder dengan analisis teknis dan finansial. Sumber data mencakup data radiasi matahari, kebutuhan konsumsi listrik kereta, dan penentuan sistem operasional pada elektrifikasi rel kereta api. Konsep desain penangkapan sinar iradiasi menggunakan jenis PV *rooftop*/PLTS atap. Oleh karena itu jenis data lain yang diambil adalah potensi luas atap bangunan di area kota sepanjang jalur yang akan dilalui KRL. Adapun alur penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Desain Penelitian

Analisis dikerjakan dengan cara mengembangkan konsep desain penentuan lokasi jalur KRL yang akan dirancang, perhitungan potensi energi matahari dari data iradiasi matahari, potensi luasan atap bangunan, dan penentuan teknis operasional sarana dan prasarana serta perhitungan nilai finansialnya.

Analisis Potensi Radiasi Matahari

Perhitungan potensi radiasi matahari dilakukan dengan memanfaatkan data rata-rata intensitas radiasi matahari Direct Normal Irradiance (DNI) dalam waktu satu bulan yang bersumber dari situs resmi NASA Power Data Access. Energi listrik yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Messenger, R. A., Ventre, J, 2010):

$$E = G \times A \times \eta \quad (1)$$

Keterangan:

E	:	Energi listrik yang dihasilkan (kWh)
G	:	Rata-rata nilai iradiasi matahari (kWh/m ² /hari)
A	:	Luas efektif modul surya terpasang (m ²)
η	:	Efisiensi sistem (%)

Analisis Potensi Kurva Energi Listrik

Perkiraan potensi energi radiasi yang dihasilkan berbanding lurus dengan luas area yang dapat dipasang pada atap bangunan sekitar (bangunan milik pemerintah) di sepanjang jalur kereta Jakarta-Surabaya. Menurut Grafik Perjalanan Kereta Api (GAPEKA) di Jawa tahun 2025, rute Jakarta-Surabaya melewati paling banyak 13 stasiun di kota berbeda yaitu, Jakarta, Bekasi, Cikarang, Cirebon, Tegal, Pekalongan, Kendal, Semarang, Ngrombo, Cepu, Bojonegoro, Lamongan, dan Surabaya.

Data lainnya seperti pengukuran luas dan orientasi atap bangunan yang menjadi potensi pemasangan PLTS Atap tersedia akan diambil sebesar 25% dari nilai luasan total, dikarenakan dari 4 arah mata angin hanya satu sisi bagian atap saja yang dapat menerima radiasi matahari secara maksimal.

Analisis Kesesuaian Sarana dan Prasarana

Penyediaan sumber energi listrik berasal dari panel surya tipe monokristalin yang ditempatkan di Gedung-gedung pemerintah sekitar diantaranya yaitu: Kantor Gubernur dan DPRD, Kantor dinas Walikota/Bupati/ Badan Provinsi, Rumah Sakit Umum Daerah/Pusat, Kantor-kantor penunjang seperti Polda, Dinas Tata Ruang, ESDM, Dinas Pendidikan, Gedung sekolah negeri dari jenjang SD, SMP dan SMA serta Universitas negeri.

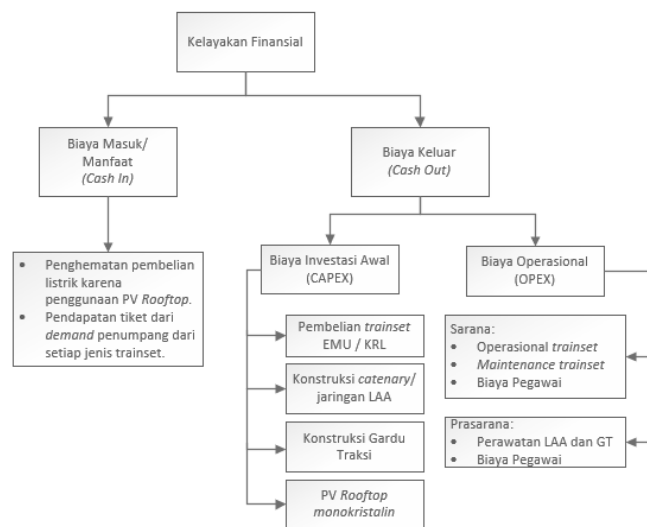
Dalam proses menyalurkan listrik ke KRL sebagai sarana transportasi maka dibutuhkan juga penyesuaian prasarana di sepanjang jalur rel kereta eksisting yaitu berupa jaringan Listrik Aliran Atas (LAA) dengan kapasitas tegangan 25 kV AC. Secara sederhana, kebutuhan komponen LAA terdiri dari tiang penyangga yang memikul beban konduktor dan berfungsi sebagai kawat kontak terhadap pantograf yang ada di *trainset*.

Analisis terhadap kebutuhan gardu traksi juga dilakukan untuk menilai kapasitas dan peranannya dalam mendukung elektrifikasi KRL yang dipasok dari PLTS atap maupun jaringan PLN. Gardu traksi berfungsi sebagai titik konversi daya dari jaringan transmisi PLN bertegangan tinggi menjadi tegangan operasional sistem traksi, yaitu 1.500 V DC atau 25 kV AC sesuai standar elektrifikasi yang digunakan. Berdasarkan data kebutuhan energi KRL jalur Jakarta-Surabaya, diperkirakan diperlukan sejumlah gardu traksi dengan kapasitas transformator 31,5-60 MVA yang ditempatkan pada interval tertentu dengan jarak antar gardu traksi/Traction Power Substation (TPS) optimal adalah 30-50 km.

Adapun sarana kereta api yang dipilih sebagai alternatif harus memiliki lebar ganda/roda yang disesuaikan dengan lebar rel eksisting (1067 mm) guna pemanfaatan jalur yang sudah ada. Begitu pula, dengan kecepatan maksimum operasi yang direncanakan adalah 160 km/jam (Kepala BPPN, 2017). Dengan catatan, harus dilakukan terlebih dahulu optimalisasi jaringan eksisting melalui program peningkatan jalur, rehabilitasi, dan reaktivasi lintas non operasi.

Analisis Kelayakan Finansial

Dasar perhitungan analisis finansial terdiri dari berbagai komponen penyusun harga investasi dan operasi. Komponen tersebut terdiri atas biaya masuk (*cash in*) dan biaya keluar (*cash out*), seperti yang ada pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Penyusun Analisis Finansial

Hasil perhitungan arus kas masuk dan keluar ini kemudian dianalisis menggunakan beberapa parameter kelayakan finansial, yaitu sebagai berikut:

- *Net Present Value* (NPV) merupakan yang merupakan metode penilaian investasi yang menghitung selisih antara nilai sekarang dari seluruh manfaat (arus kas masuk) dan seluruh biaya (arus kas keluar) yang dihasilkan selama umur proyek. Perhitungan *Net Present Value* (NPV) dihitung dengan rumus sebagai berikut (Mishra, R.C, Soota, 2005):

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} - I \quad (2)$$

- *Benefit Cost Ratio* (BCR) merupakan perbandingan antara nilai semua manfaat biaya terhadap nilai semua biaya pada masa sekarang yang menunjukkan efisiensi proyek dalam menghasilkan manfaat per unit biaya yang dikeluarkan (Ferianto Raharjo, 2007). Dihitung dengan rumus berikut:

$$BCR = \frac{PV_{benefit}}{PV_{cost}} \quad (3)$$

- *Internal Rate of Return* (IRR) merupakan tingkat suku bunga diskonto yang menghasilkan nilai NPV sama dengan nol. Perhitungan IRR dapat menggunakan persamaan berikut (Kadariah, dkk. 1978):

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (4)$$

Atau: $PV_{benefit} = PV_{cost}$

- *Payback Period* (PP) digunakan untuk menilai seberapa cepat suatu proyek mampu menghasilkan akumulasi arus kas yang cukup untuk menutupi total investasi awal (Gittinger, 1986), persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$PP = \frac{\text{Investasi Awal (I)}}{\text{Annual Benefit}} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan Potensi Iradiasi Matahari

Analisis potensi ini dilakukan dengan memanfaatkan data rata-rata iradiasi harian maupun tahunan dari basis data satelit seperti NASA Power Data Access, sehingga mampu merepresentasikan kondisi radiasi sepanjang lintasan Jakarta-Surabaya. Jumlah sebaran data radiasi yang diambil adalah lokasi-lokasi (14 kota) yang telah ditentukan sekaligus merupakan jalur di sepanjang rute kereta seperti yang ada pada Tabel 1.

Tabel 1. Potensi Radiasi Matahari

Bulan	Tanggal	Waktu/Jam	Rata-rata Data Iradiasi (Wh/m ²)													
			JAKARTA	BEKASI	CIKARANG	CIREBON	TEGAL	PEKALONGAN	KENDAL	SEMARANG	NGROMBO O (PORWODADH)	CEPU (BLORA)	BOJONEGORO	TUBAN	LAMONGAN	SURABAYA
Mei	01-31	6	37,12	46,95	51,69	73,44	107,52	72,27	114,22	123,06	231,05	134,75	192,95	153,97	231,05	231,05
		7	185,30	237,26	221,07	239,90	326,38	221,24	311,95	341,03	466,00	353,71	427,23	396,66	466,00	466,00
		8	304,72	340,78	333,74	351,35	432,92	366,79	451,38	486,70	573,72	487,23	566,47	548,54	573,72	573,72
		9	384,01	425,64	389,85	407,95	484,91	420,60	498,25	530,33	596,53	532,99	595,24	599,05	596,53	596,53
		10	344,24	411,34	390,03	405,17	449,48	443,26	567,98	583,46	538,07	535,01	551,49	581,76	538,07	538,07
		11	309,21	374,07	347,44	449,93	397,25	499,31	527,88	572,33	473,92	523,47	486,07	559,13	473,92	473,92
		12	287,76	347,09	318,87	452,66	370,97	469,88	500,83	531,63	479,96	509,76	466,88	603,39	479,96	479,96
		13	258,32	340,40	326,81	491,99	382,64	484,91	494,76	525,21	451,33	505,61	431,79	586,20	451,33	451,33
		14	174,59	259,66	250,29	406,97	300,99	409,36	423,09	436,98	400,08	416,87	387,21	475,58	400,08	400,08
		15	120,80	182,13	201,91	296,25	227,88	316,66	322,25	333,21	304,54	330,14	304,26	386,18	304,54	304,54
		16	57,63	71,90	109,92	170,57	88,52	161,28	137,40	143,83	98,30	163,17	87,10	157,30	98,30	98,30
Total		2463,71	3037,22	2941,62	3746,17	3569,45	3865,56	4350,01	4607,77	4613,50	4492,71	4496,69	5047,75	4613,50	4613,50	

Sumber: *Nasa Power Data Access*

Sehingga total jumlah potensi radiasi rata-rata yang dapat dimanfaatkan dalam sehari dari pk.06.00 sampai dengan pk.16.00 adalah 56459,15 Wh/m² atau 56,459 kWh/m²

Potensi Kurva Energi Listrik

Hasil pengukuran potensi luas atap bangunan yang terpasang panel surya didapatkan dari bangunan sekitar pada 14 kota potensial di sepanjang jalur kereta Jakarta-Surabaya. Data luas atap yang diambil adalah 25% dari luas total seperti yang pada Tabel 2

Tabel 2. Potensi Luas Atap

No.	Nama Bangunan	POTENSI LUAS AREA ATAP BANGUNAN UNTUK PANEL SURYA (m ²)						
		Jakarta	Bekasi	Cikarang	Cirebon	Tegal	Pekalongan	Kendal
1	Kantor gubernur dan DPRD	3384,28	1077,73	1267,94	201,94	140,75	236,55	200,09
2	Kantor dinas Walikota/Bupati/Bad	3611,72	1150,16	1353,15	215,51	150,21	252,45	213,54
3	RSUD/RSUP	23975,15	7634,92	8982,43	1430,57	997,12	1675,77	1417,51
4	Kantor-kantor penunjang							
a	Polda/Polres/Polsek	2710,35	863,12	1015,45	161,72	112,72	189,44	160,25
b	PUPR	855,25	272,36	320,43	51,03	35,57	59,78	50,57
c	ESDM	252,45	80,39	94,58	15,06	10,50	17,64	14,93
d	Dinas Pendidikan	969,14	308,62	363,09	57,83	40,31	67,74	57,30
5	Gedung Sekolah Negeri	94310,90	30033,44	35334,13	5627,44	3922,37	6591,98	5576,07
6	Universitas Negeri	100698,63	6413,52	0,00	1201,72	837,61	1407,69	0,00
	Total	230767,88	47834,26	48731,20	8962,82	6247,16	10499,04	7690,26

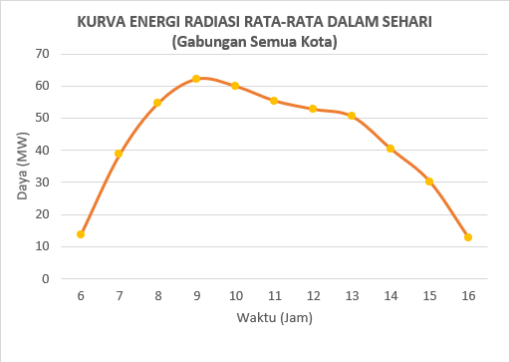
	Semarang	Ngrombo (Purwodadi)	Cepu (Blora)	Bojonegoro	Tuban	Lamongan	Surabaya	
1	Kantor gubernur dan DPRD	1894,44	405,10	370,34	131,64	109,01	20,69	1720,00
2	Kantor dinas Walikota/Bupati/Bad	2021,75	432,33	395,22	140,48	116,33	22,08	1835,59
3	RSUD/RSUP	13420,69	2869,85	2623,56	932,56	772,23	146,54	12184,90
4	Kantor-kantor penunjang							
a	Polda/Polres/Polsek	1517,19	324,43	296,59	105,42	87,30	16,57	1377,48
b	PUPR	478,75	102,37	93,59	33,27	27,55	8,35	434,67
c	ESDM	141,31	30,22	27,62	9,82	15,63	7,79	128,30
d	Dinas Pendidikan	542,50	116,01	106,05	37,70	31,22	5,92	492,55
5	Gedung Sekolah Negeri	52792,88	11289,11	10320,29	3668,39	3037,73	576,44	47931,65
6	Universitas Negeri	56368,56	2410,75	2203,86	783,37	0,00	123,10	51178,08
	Total	129178,06	17980,17	16437,13	5842,65	4197,00	927,47	117283,21

Total potensi luas atap tersedia yang dapat dipasang panel surya adalah 652578,3 m². Dalam perancangannya PLTS atap ini direncanakan menggunakan tipe panel *monokristalin* yang memiliki rata-rata efisiensi (η) sebesar 21%. Sehingga didapatkan perhitungan produksi energi listrik dari data iradiasi dan luas di masing-masing kota yaitu menggunakan persamaan (1), sehingga hasilnya seperti yang terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Energi Listrik masing-masing Kota

Bulan	Tanggal	Waktu/Jam	Energi Listrik Rata-rata dari data Iradiasi (MegaWatt)													
			JAKARTA	BEKASI	CIKARANG	CIREBON	TEGAL	PEKALONGAN	KENDAL	SEMARANG	NGROMBO (PORWODADI)	CEPU (BLORA)	BOJONEGORO	TUBAN	LAMONGAN	SURABAYA
Mei	01-31	6	1,80	0,47	0,53	0,14	0,14	0,16	0,18	3,34	0,87	0,47	0,24	0,14	0,05	5,69
		7	8,98	2,38	2,26	0,45	0,43	0,49	0,50	9,25	1,76	1,22	0,52	0,35	0,09	11,48
		8	14,77	3,42	3,42	0,66	0,57	0,81	0,73	13,20	2,17	1,68	0,70	0,48	0,11	14,13
		9	18,61	4,28	3,99	0,77	0,64	0,93	0,80	14,39	2,25	1,84	0,73	0,53	0,12	14,69
		10	16,68	4,13	3,99	0,76	0,59	0,98	0,92	15,83	2,03	1,85	0,68	0,51	0,10	13,25
		11	14,98	3,76	3,56	0,85	0,52	1,10	0,85	15,53	1,79	1,81	0,60	0,49	0,09	11,67
		12	13,95	3,49	3,26	0,85	0,49	1,04	0,81	14,42	1,81	1,76	0,57	0,53	0,09	11,82
		13	12,52	3,42	3,34	0,93	0,50	1,07	0,80	14,25	1,70	1,75	0,53	0,52	0,09	11,12
		14	8,46	2,61	2,56	0,77	0,39	0,90	0,68	11,85	1,51	1,44	0,48	0,42	0,08	9,85
		15	5,85	1,83	2,07	0,56	0,30	0,70	0,52	9,04	1,15	1,14	0,37	0,34	0,06	7,50
		16	2,79	0,72	1,12	0,32	0,12	0,36	0,22	3,90	0,37	0,56	0,11	0,14	0,02	2,42
		Total	119,39	30,51	30,10	7,05	4,68	8,52	7,03	125,00	17,42	15,51	5,52	4,45	0,90	113,63

Dengan menggabungkan potensi iradiasi dari setiap kota maka kurva iradiasi yang dihasilkan dari 14 kota tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva Energi Iradiasi Gabungan Semua Kota Kesesuaian Sarana dan Prasarana

Kesesuaian sarana dan prasarana terdiri jenis dan spesifikasi kereta rel listrik, penyempurnaan pada Listrik Aliran Atas, penambahan Gardu Traksi dan Panel *Photovoltaic Rooftop*.

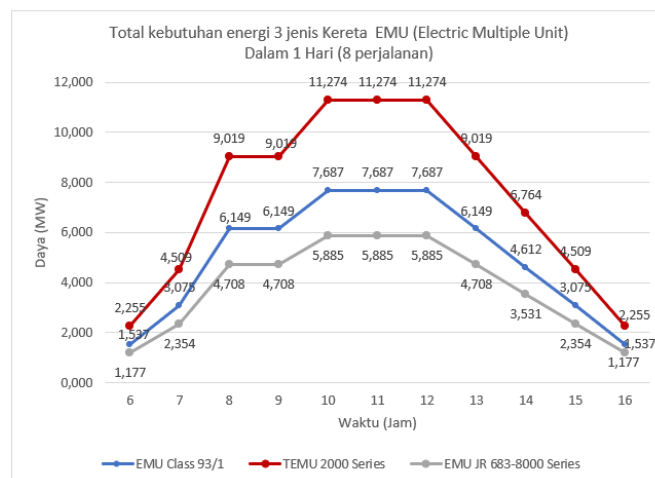
Jenis dan Spesifikasi Kereta Rel Listrik

Pemilihan jenis kereta rel listrik yang digunakan harus memiliki kemampuan beroperasi pada sistem elektrifikasi 20-25 kV AC, menyesuaikan dengan opsi skema elektrifikasi yang dipertimbangkan. Dari sekian banyak jenis kereta yang ada, terdapat beberapa tipe *trainset* yang paling mendekati kesesuaian kebutuhan di jalur Jakarta-Surabaya yaitu EMU Class 93/1, TEMU 2000 Series, dan EMU JR 683-8000 Series, dengan spesifikasi yang ada pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi Trainset

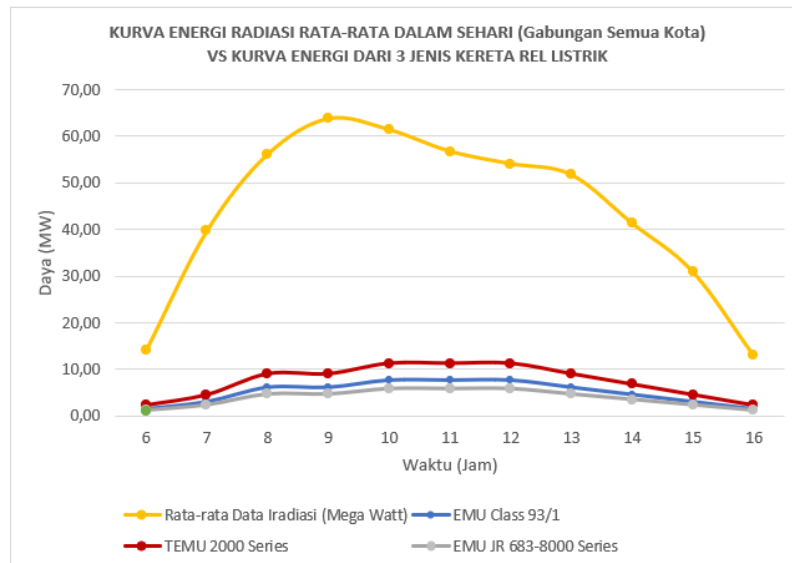
Data Teknis <i>Trainset</i>	Nama/Jenis Kereta Rel Listrik		
	EMU Class 93/1	TEMU 2000 Series	EMU JR 683-8000 Series
Produksi pabrik	CRRC Zhuzhou, China	Nippon Sharyō, Jepang	Hitachi, Kawasaki, Kinki Sharyō, Jepang
Kapasitas penumpang (seat)	320	372	264
Jumlah Gerbong	6	8	6
Jumlah motor (set)	16	16	8
Daya motor (kW)	160	220	245
Daya listrik <i>trainset</i> (MW)	2,56	3,52	1,96
Tegangan operasi (kV AC)	25	25	20
Kecepatan desain (km/jam)	160	150	160
Kecepatan operasi (km/jam)	145	130	145

Asumsi frekuensi perjalanan harian sebagai pengganti kereta diesel Argo Bromo Anggrek, maka jumlah perjalanan minimal dalam sehari yaitu terjadwal dalam 4 waktu. Skema perjalanan KRL ini akan dioperasikan pada jam 06.00 hingga 16.00. Dengan jumlah perjalanan kereta dalam sehari dapat dimaksimalkan menjadi 8 perjalanan sehari pada waktu pengopersian yang telah direncanakan serta okupansi penumpang per perjalanan adalah 85% dan kenaikan 6,9% per tahun dalam 25 tahun ke depan. Sehingga hasil perhitungan kebutuhan energi listrik dari masing-masing jenis kereta per hari yaitu 55,3 MW untuk EMU Class 93/1, 81,2 MW untuk TEMU 2000 Series, dan 42,4 MW untuk EMU JR 683-8000 Series, dengan detail sebaran beban seperti yang ada pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva Beban Listrik Ketiga Jenis Trainset Dalam Sehari

Lalu dari data beban listrik *trainset* dalam sehari tersebut, apabila dibandingkan dengan potensi ketersediaan energi listrik dari PLTS atap, dapat diketahui tingkat kontribusi energi surya dalam mendukung operasional KRL, seperti pada kurva yang ada pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva energi Iradiasi Gabungan vs Kebutuhan Energi Trainset
Sumber: Analisis Data

Hasil perbandingan pada kurva iradiasi menunjukkan bahwa produksi energi PLTS atap berpotensi menutupi semua kebutuhan energi dari setiap jenis *trainset* dalam sehari sesuai dengan jadwal operasional rencana. Pada periode di luar jam rencana, maka suplai energi harus tetap ditopang oleh pasokan PLN yang diperoleh dari pembangkitan fosil atau dapat juga dari sistem penyimpanan energi. Analisis ini menegaskan bahwa kontinuitas operasional KRL menggunakan PLTS Atap pada jam operasional tertentu tetap dapat terjaga tanpa mengurangi keandalan layanan. Kelebihan suplai pada siang hari yang tidak terpakai oleh sistem operasional *trainset*, dapat digunakan untuk sistem non-traksi di stasiun dan depo. Oleh karena itu, integrasi pola operasi membutuhkan strategi manajemen energi yang melibatkan sinkronisasi antara suplai PLTS, jaringan PLN, serta opsi penyimpanan energi.

Listrik Aliran Atas (LAA)

Listrik Aliran Atas (LAA) menunjukkan bahwa sistem ini memegang peranan penting dalam menjamin keberlangsungan pasokan daya bagi KRL pada lintas Jakarta–Surabaya sepanjang 720,62 km. LAA yang digunakan yaitu sesuai dengan tegangan kerja sesuai standar sistem kereta semi cepat yaitu 25 kV AC. Dari hasil kajian teknis, penyesuaian LAA pada jalur eksisting diperlukan untuk memastikan kompatibilitas dengan jenis kereta semi-cepat yang digunakan. Integrasi PLTS atap dengan jaringan LAA dilakukan melalui gardu induk dan gardu traksi, di mana energi listrik hasil konversi dari PLTS dapat disalurkan ke jaringan untuk mendukung operasional KRL.

Sebagaimana diatur dalam PM 50 Tahun 2018. Komponen penyusun LAA pada sistem 25 kV AC terdiri dari:

- Kawat Kontaktor (*Contact Wire*), Kawat Penyangga (*Messenger Wire/Catenary Wire*), Kawat Gantung (*Dropper Wire*)

- Isolator Tegangan Tinggi
- Tiang Penyangga (*Mast/Portal Frame*)
- Perangkat Penegang (*Tensioning Device*)
- *Neutral Section / Sectioning Device*
- *Arrester & Proteksi Petir*
- *Switchgear & Circuit Breaker*
- *Feeder Line*

Listrik aliran atas secara total yang dibutuhkan adalah sepanjang 720,62 km untuk menunjang jaringan listrik rel ganda dari Jakarta-Surabaya.

Gardu Traksi/*Traction Power Substation (TPS)*

Salah satu komponen utama yang harus diperhitungkan adalah kebutuhan gardu traksi. Gardu traksi berfungsi menurunkan dan menyalurkan tegangan dari sistem transmisi 150 kV ke tegangan operasi 25 kV AC yang digunakan oleh kereta rel listrik. Komponen yang diperlukan dalam pembangunan gardu traksi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Komponen Gardu Traksi

No.	Komponen Utama	Satuan	Jumlah
A Pengadaan Peralatan			
1	Trafo Daya 150/25 kV – 31,5 MVA	unit	2
2	Peralatan Primer (CB, CT, VT, DS, LA)	set	2
3	Relay & Panel Proteksi, BCU, RTU	set	1
4	SCADA & Telekomunikasi (MUX. SDH. ODF. FO)	set	1
5	Sistem Grounding, Panel LV, DC charger	set	1
6	Kabel Power MV 25 kV	meter	200
7	Kabel Power LV	meter	400
8	Kabel Kontrol	meter	1000
9	Kabel FO	meter	300
B Instalasi Peralatan Gardu			
1	Trafo Daya 150/25 kV – 31,5 MVA	unit	2
2	Peralatan Primer (CB, CT, VT, DS, LA)	set	2
3	Relay & Panel Proteksi, BCU, RTU	set	1
4	SCADA & Telekomunikasi (MUX. SDH. ODF. FO)	set	1
5	Sistem Grounding, Panel LV, DC charger	set	1
6	Kabel Power MV 25 kV	meter	200
7	Kabel Power LV	meter	400
8	Kabel Kontrol	meter	1000
9	Kabel FO	meter	300

No.	Komponen Utama	Satuan	Jumlah
C	Pekerjaan Sipil & Mekanikal (pondasi. gantry. shelter)	set	1
D	Pekerjaan Tes & Komisioning	LS	1

Dengan panjang lintasan Jakarta-Surabaya sepanjang 720,62 km, kebutuhan gardu traksi dihitung dengan mempertimbangkan panjang jalur, distribusi beban, dan jarak rata-rata optimal antar gardu sekitar 40 km, maka jumlah yang dibutuhkan adalah sebanyak 18 gardu traksi.

Panel Photovoltaic (PV) Rooftop

Panel PV rooftop merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit energi surya yang berfungsi mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik. Modul PV yang digunakan dalam perencanaan adalah jenis panel monokristalin yang memiliki efisiensi penyerapan energi sebesar 21%. Adapun komponen yang diperlukan dalam pemasangan panel PV rooftop pada Tabel 6.

Tabel 6. Komponen PV Rooftop

No.	Komponen Utama	Satuan	Qty per kWp
1	Modul PV Monokristalin 550 Wp	Set	1
2	Inverter On-Grid (String)	Set	1
3	Mounting (rail, clamp, barcket, fastener)	Set	1
4	DC BOS (Combiner/isolator/fuse, dll)	Set	1
5	AC BOS (panel AC, MCB/MCCB, dll)	Set	1
6	Kabel & Aksesoris (konektor, conduit, grounding, dll)	Set	1
7	Jasa Desain, Instalasi & Commisioning	Set	1

Dengan demikian, kebutuhan minimal untuk pemasangan PV rooftop di bangunan-bangunan milik pemerintah disesuaikan dengan konsumsi daya maksimum setiap jenis trainset yang menjadi beban listrik dalam setahun yaitu:

1. 20.200.420 kWp untuk EMU Class 93/1
2. 29.627.282 kWp untuk TEMU 2000 Series
3. 15.465.946 kWp untuk EMU JR 683-8000 Series

Kelayakan Finansial

Komponen penyusun analisis finansial terdiri dari biaya pendapatan *Cash In* dan *Cash Out*, sehingga mendapatkan hasil perhitungan finansial dari setiap jenis kereta rel listrik terhadap NPV, BCR, IRR dan PP seperti yang ada pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Analisis Kelayakan Finansial

Indikator Analisis Finansial		Discount Factor		
		10%	12%	14%
A	Net Present Value (NPV)	(dalam juta Rupiah)		
1	EMU Class 93/1	-Rp 334.140.023,49	-Rp 336.214.509,79	-Rp 337.742.378,19
2	TEMU 2000 Series	-Rp 332.218.217,54	-Rp 334.704.222,68	-Rp 336.538.881,78
3	EMU JR 683-8000 Series	-Rp 259.248.012,60	-Rp 260.846.038,58	-Rp 262.017.344,18
B	Benefit Cost Ratio (BCR)			
1	EMU Class 93/1	0,03	0,02	0,02

Indikator Analisis Finansial		Discount Factor		
		10%	12%	14%
2	TEMU 2000 Series	0,04	0,03	0,02
3	EMU JR 683-8000 Series	0,03	0,02	0,02
C Internal Rate of Return (IRR)				
1	EMU Class 93/1	-10,24%	-10,24%	-10,24%
2	TEMU 2000 Series	-9,49%	-9,49%	-9,49%
3	EMU JR 683-8000 Series	-10,16%	-10,16%	-10,16%
D Payback Period (PP)				
1	EMU Class 93/1	Tahun > 25	Tahun > 25	Tahun > 25
2	TEMU 2000 Series	Tahun > 25	Tahun > 25	Tahun > 25
3	EMU JR 683-8000 Series	Tahun > 25	Tahun > 25	Tahun > 25

Dari Tabel 7 dapat dilihat secara umum bahwa hasilnya menunjukkan sebagai berikut:

1. Nilai *Net Present Value* (NPV)

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semua tipe kereta tidak menemukan hasil NPV positif pada seluruh tingkat diskonto (10%, 12%, dan 14%). Hal ini mengindikasikan bahwa investasi tersebut akan mengalami kerugian dan memiliki risiko yang tinggi secara finansial.

2. Nilai *Benefit Cost Ratio* (BCR)

Hasil perhitungan jika dilihat dari rasio biaya-manfaat, semua tipe kereta tidak mencatatkan nilai BCR di atas 1, bahkan pada tingkat diskonto terendah pun masih bernilai < 1. Kondisi ini menegaskan efisiensi biaya dan manfaat adalah sangat tidak layak.

3. *Internal Rate of Return* (IRR)

Berdasarkan perhitungan IRR, semua tipe kereta kembali mengalami nilai negatif sehingga memiliki margin kelayakan yang masih jauh dari asumsi suku bunga yang direncanakan.

4. *Payback Period* (PP)

Hasil analisis untuk periode pengembalian investasi juga menunjukkan bahwa semua tipe kereta memiliki titik pengembalian modal lebih lama dari hingga lebih dari 25 tahun yang merupakan umur rencana.

4. Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dilakukan maka kesimpulan yang dapat diambil pada studi kelayakan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap untuk elektrifikasi kereta rel listrik jalur Jakarta-Surabaya, adalah sebagai berikut:

1. Total potensi energi surya dari sistem PLTS atap yang dapat dimanfaatkan adalah sebesar 56,459 kWh/m² dalam sehari dimulai dari pukul 06.00 sampai dengan pukul 16.00. Bangunan penunjang pemerintah yang berpotensi dipasang sistem PLTS atap berasal dari 14 kota di sepanjang area jalur kereta Jakarta-Surabaya.
2. Hasil kurva integrasi radiasi matahari pada 14 kota di sepanjang jalur kereta wilayah dari Barat Jawa (Jakarta) sampai ke Timur Jawa (Surabaya) menghasilkan potensi energi sebesar 482,68 MW, lebih baik dibandingkan energi terbesar yang dihasilkan pada 1 kota yaitu 125 MW.
3. Secara teknis, kesesuaian dalam pemanfaatan PLTS atap di bangunan pemerintahan untuk mendukung elektrifikasi jalur kereta Jakarta-Surabaya dinilai layak dan potensial sebagai sumber energi kereta rel listrik. Perhitungan ketersediaan potensi energi matahari dapat memenuhi kebutuhan energi listrik yang dibutuhkan kereta rel listrik dalam sehari sebanyak 8 perjalanan yang dimulai

dari pukul 06.00 sampai dengan pukul 16.00, yaitu sebesar 81,171 MW per hari untuk kereta tipe TEMU 2000 Series.

4. Berdasarkan hasil analisis finansial, penggunaan PLTS atap belum dapat mengakomodir dengan layak sebagai suplai prasarana jaringan listrik aliran atas dan gardu traksi serta penggunaan sarana kereta rel listrik yang sesuai pada semua jenis tipe kereta yang dianalisis. Tidak satu pun indikator finansial seperti NPV, BCR, IRR dan PP yang memiliki nilai positif dalam rangka investasi.

5. Referensi

- Anggreni, Reni., Muliadi., Adriat, Riza. (2018). *Analisa Pengaruh Tutupan Awan Terhadap Radiasi Matahari di Kota Pontianak*. PRISMA FISIKA, Vol 6, No.3 (2018) Hal. 214-219.
- ArcGIS Online. (n.d.). *Solar resource map application*. <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=27b7119dc6754d3e9e584a4fa71e5744>.
- Assagaf, Aminullah., Ali, Hapzi. (2017). *Determinants of Financial Performance of State-Owned Enterprises with Government Subsidy as Moderator*. Dergipark Akademik
- Dephub. (2024). *Transportasi Umum Massal Indonesia Menuju Zero Emission*. Kemenhub RI. <https://dephub.go.id/post/read/transportasi-umum-massal-indonesia-menuju-zero-emission#:~:text=Komitmen Tinggi Pemerintah Menurunkan GRK>.
- Dwi Raharjo, Rachmad., Prabowo, Eri., Herman Ibrahim, Ali. (2024). *Studi Kelayakan Rencana Elektrifikasi Daerah Operasi 1 Jakarta Untuk Kereta Rel Listrik Jalur Cikarang Sampai Cikampek*. IT PLN.
- Gautama Karisma. (2013). *PLTS: Daya dan energi*. <https://gautamakarisma.wordpress.com/2013/11/27/plts-daya-dan-energi/>
- Ilham, Richi., Batih, Hakimul. (2023). *Analisa Dampak Kebijakan Implementasi PLTS Atap pada Gedung Pemerintahan menggunakan Skenario Proyeksi*. Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik. DOI: <http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v11i4.834>
- Iwnicki, Simon. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Taylor&Francis Group.
- IRENA. (2024). *Renewable Energy Statistics 2024*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Institut Teknologi PLN. (2021). *Buku Pengenalan PLTS*. IT PLN.
- Johar Damiri, Dhami., Richard Laksana L., Robertus. (2023). *Design and Simulation of On-Grid Rooftop Solar Power Plant (Rooftop PV) System on Office Buildings with a PLN Grid System*. Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik. DOI:<https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i1.231>
- Kementerian ESDM. (2025). *Keputusan Menteri ESDM Nomor 188.K/TL.04/MEM.L/2025 tentang Rencana Usaha Penediaan Tenaga Listrik (RUPTL)*. PLN
- Kementerian Perhubungan, D. J. P. (2011). *Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (PM No.43 Tahun 2011)*. Rencana Induk Perkeretaapian Nasional, 8, 1–85. Menteri Perhubungan Republik Indonesia
- Kementerian Perhubungan.(2024). *Keputusan Direktur Jenderal Perkeretaapian Nomor: KP-DJKA 224 Tahun 2024 tentang Grafik Perjalanan Kereta Api pada Jaringan Jalur Kereta Api Nasional di Jawa Tahun 2025*. Menteri Perhubungan Republik Indonesia

- Kementerian Perhubungan. (2023). Keputusan Menteri Perhubungan Nomor KM 8 Tahun 2023 Tentang Penetapan Aksi Mitigasi Perubahan Iklim Sektor Transportasi Untuk Pencapaian Target Kontribusi Yang Ditetapkan Secara Nasional. Kepmenhub No.08 Tahun 2023, VIII(I), 1–19. Menteri Perhubungan Republik Indonesia Tahun 2018 Tentang Persyaratan Teknis Instalasi Listrik Perkeretaapian. Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 13.
- Kementrian Perhubungan. (2012). Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. Menteri Perhubungan Republik Indonesia
- Menteri Perhubungan. (2010). Menteri perhubungan Republik Indonesia. 2011, 1–17.
- Mishra, R.C, Soota, T. (2005). *Modern Project Management. In Proceedings of the National Academy of Sciences* (Vol. 3, Issue 1).
- NASA Power. (n.d.). Power data access viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- PLN. (2023). Buku Pedoman Pengawasan Proyek PLTS. PT PLN Pusat Manajemen Konstruksi
- Republik Indonesia. (2022). Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik
- Rahman, Z, H., Perwitasari, Dian., Andreas, Azaria,. (2018). *The Impact of LRT Batam Technology Selection on Financial Feasibility Anlysis. CSID Journal of Sustainable City and Urban Development.*
- Setiawan, Y. (2024). Study On The Planning Needs For Traction Substations To Support The Electrification Of The Yogyakarta – Kutoarjo Railway Line. *Ayan*, 15(1), 37–48.
- SLOCAT. (2021). *Tracking Trends in a Time of Change: The Need for Radical Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation. Transport and Climate Change Global Status Report, 2*, 1–12. www.tcc-gsr.com
- Solar GIS. (2024). *Solar irradiance difference map of 2024.* <https://solargis.com/resources/blog/solargis-news/solar-irradiance-difference-map-of-2024>
- Sugianto,.A.A, Hafidz., Oetomo, Panji. (2023). *Studi Kelistrikan Pada Sistem Kereta Rel Listrik.* Sinusoida Vol: XXV No. 1, Juli 2023.
- Syamsudin, Z. (2018). *Perencanaan Penggunaan PLTS di Stasiun Kereta Api Cirebon Jawa Barat.* Energi & Kelistrikan, 9(1), 70–83. <https://doi.org/10.33322/energi.v9i1.58>