

Analisis Perbandingan Panel Surya *P-Type* dan *N-Type* untuk PLTS Atap Pabrik Karton Menggunakan PVsyst

Januar Sahrul Aryanto^{1*}, Budi Yanto Husodo¹

¹Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*sahrulariantio78@gmail.com

Abstrak— Pembangkit Listrik Tenaga Surya atap semakin banyak digunakan di sektor industri sebagai alternatif energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja panel surya *P-Type* dan *N-Type* pada sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung ke jaringan di sebuah pabrik karton di Kabupaten Tangerang. Analisis dilakukan berdasarkan simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst dengan mempertimbangkan produksi energi, kerugian energi, serta kelayakan ekonomi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa panel surya *N-Type* menghasilkan energi tahunan sebesar 547.063 kWh, lebih tinggi dibandingkan panel surya *P-Type* yang mencapai 523.446 kWh. Rasio produksi spesifik panel surya *N-Type* adalah 1.443 kWh/kWp/tahun dengan *performance ratio* 82,20%, sedangkan panel surya *P-Type* mencapai 1.379 kWh/kWp/tahun dengan *performance ratio* 78,5%. Kerugian energi pada panel surya *N-Type* tercatat 78.565,36 kWh lebih rendah dibandingkan panel surya *P-Type* sebesar 97.194,36 kWh. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa panel surya *N-Type* memiliki *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebesar 558,298 Rupiah per kWh, lebih rendah dibandingkan panel surya *P-Type* sebesar 682,46 Rupiah per kWh. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa panel surya *N-Type* lebih unggul dalam hal efisiensi energi dan stabilitas kinerja dalam jangka panjang, sehingga dapat menjadi pilihan yang lebih optimal untuk sistem pembangkit listrik tenaga surya atap di pabrik karton.

Kata Kunci—Efisiensi Energi, Kelayakan Investasi, PLTS Atap, Panel Surya *N-Type*, Panel Surya *P-Type*.

DOI: 10.22441/jte.2025.v16i2.008

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya tenaga surya, terus meningkat secara global sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca [1]. Di Indonesia, penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya atap (PLTS Atap) semakin dipertimbangkan sebagai solusi untuk mengurangi pengeluaran biaya listrik dan meningkatkan efisiensi energi. Selain itu panel surya memberikan daya yang hampir gratis tanpa merusak lingkungan [2]. Salah satu industri yang menghadapi tantangan tersebut adalah pabrik karton, yang tidak hanya harus menekan biaya operasional tetapi juga memenuhi tuntutan pelanggan untuk menggunakan energi bersih dalam proses produksinya.

Dalam sistem PLTS, pemilihan teknologi panel surya menjadi faktor utama yang menentukan efisiensi dan daya guna jangka panjang. Panel surya *P-Type* telah lama digunakan dan memiliki teknologi yang lebih matang. Sedangkan panel surya

N-Type menawarkan keunggulan dalam hal resistensi terhadap degradasi akibat cahaya (Light-Induced Degradation) dan performa yang lebih stabil pada suhu tinggi [3]. Urgensi penelitian ini muncul karena penentuan jenis panel yang tepat tidak hanya penting untuk mengoptimalkan kinerja dalam kondisi suhu tinggi, tetapi juga untuk meminimalkan kerugian energi dan menekan biaya investasi serta operasional, sehingga menghasilkan sistem PLTS Atap yang lebih efisien dan ekonomis.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja panel surya *P-Type* dan *N-Type* pada sistem PLTS Atap berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Analisis mencakup produksi energi, kerugian energi, serta aspek ekonomi, guna memberikan rekomendasi yang lebih jelas mengenai teknologi panel surya yang paling efisien dalam kondisi iklim tropis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi industri dalam memilih solusi energi terbarukan yang lebih optimal.

II. PENELITIAN TERKAIT

Yu et al. (2016) mengkaji performa listrik modul fotovoltaik bifacial *N-Type* dengan membandingkannya dengan modul konvensional. Studi tersebut menunjukkan bahwa, pada sistem inverter mikro dan string, output energi bulanan modul bifacial meningkat masing-masing sekitar 4,03% dan 3,21% dibandingkan dengan modul reguler [4].

Benick et al. (2017) meneliti sel surya silikon multicrystalline (mc) *N-Type* dengan modifikasi tekstur permukaan menggunakan teknologi black silicon dan kontak belakang TOPCon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi yang dicapai adalah 21,9%, meskipun terdapat keterbatasan yang disebabkan oleh sifat multicrystalline dari bahan dasar yang digunakan [5].

Efendi et al. (2019) menganalisis perbedaan performa panel surya antara panel monocrystalline, polycrystalline, dan thin film [6].

Hiswandi et al. (2023) menganalisis kelayakan investasi PLTS atap di pabrik minuman siap saji di Bekasi dari segi ekonomi, menggunakan parameter seperti IRR, DPP, dan NPV. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis dari kelayakan investasi PLTS atap on-grid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembangunan PLTS atap layak untuk dilaksanakan dengan IRR sebesar 16,28% [7].

Febriana Pratiwi et al. (2022) merancang sistem PLTS atap untuk memenuhi kebutuhan listrik pabrik. Penelitian ini juga membahas analisis ekonomi yang menunjukkan bahwa investasi

tersebut layak dilakukan, dengan *payback period* selama 7 tahun [8].

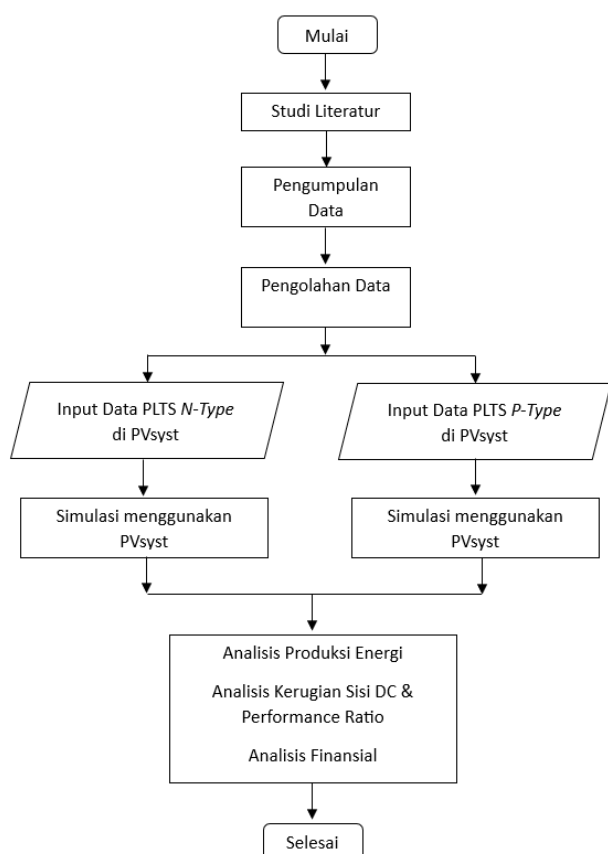
III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif berbasis simulasi yang dilakukan untuk membandingkan performa dan aspek ekonomi panel surya *P-Type* dan *N-Type* dalam sistem PLTS atap di lingkungan industri. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst, dengan data yang diperoleh melalui survei lapangan dan analisis sekunder dari sumber terpercaya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang lebih optimal bagi industri dalam memilih jenis panel yang sesuai dengan kebutuhan mereka.

Penelitian ini berlangsung selama periode September 2023 hingga Januari 2025 dan berlokasi di sebuah pabrik karton di Tangerang, Indonesia. Wilayah ini memiliki iklim tropis dengan potensi iradiasi matahari yang cukup tinggi, yang menjadi faktor penting dalam menganalisis performa panel surya. Sistem PLTS atap yang dikaji dalam penelitian ini memiliki kapasitas yang disesuaikan dengan luas area yang tersedia di pabrik karton. Data yang dikumpulkan mencakup konsumsi listrik industri, potensi energi matahari, serta spesifikasi teknis dari panel surya dan inverter yang akan digunakan dalam simulasi.

A. Alur Pelaksanaan Penelitian

Adapun alur pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Alur Pelaksanaan Penelitian

Metodologi penelitian ini disusun secara sistematis dan terstruktur, diawali dengan kajian literatur untuk menganalisis karakteristik panel surya *N-Type* dan *P-Type* beserta berbagai faktor yang memberikan pengaruh terhadap kinerjanya. Tahap berikutnya meliputi pengumpulan data melalui observasi lapangan yang kemudian diolah dan dipersiapkan untuk keperluan simulasi. Selanjutnya, data tersebut diimplementasikan ke dalam perangkat lunak PVsyst guna melaksanakan simulasi pada dua skenario panel surya yang berbeda. Hasil simulasi tersebut kemudian dianalisis berdasarkan tiga aspek fundamental, yaitu: Pertama, evaluasi produksi energi yang mencakup perhitungan total energi yang dihasilkan sistem. Kedua, analisis kerugian energi dan Performance Ratio yang bertujuan untuk mengukur tingkat efisiensi sistem secara keseluruhan. Ketiga, kajian aspek finansial yang meliputi perhitungan dan perbandingan *Levelized Cost of Energy* (LCOE), *Internal Rate of Return* (IRR), serta periode pengembalian modal (*payback period*).

B. Pengumpulan Data

Data atap diperoleh dari survei lapangan, atap pabrik menggunakan Spandek *Metal* tipe *Trapezoidal* dengan kemiringan 15 derajat dan azimuth 90° serta 270°, menghadap barat dan timur. Dimensi atap masing-masing adalah 23,6 m x 70 m untuk Gedung 1 dan 23,6 m x 46 m untuk Gedung 2. Informasi ini digunakan dalam perencanaan tata letak panel surya guna mengoptimalkan pemanfaatan ruang atap dan memaksimalkan produksi energi.

Potensi energi matahari di lokasi penelitian menggunakan data *Global Horizontal Irradiance* (GlobHor) dari *database* *Meteonorm 8.1* dalam PVsyst. Rata-rata harian iradiasi matahari mencapai 4,9 kWh/m², dengan nilai tertinggi pada bulan Oktober sebesar 5,56 kWh/m² dan terendah pada bulan Januari sebesar 4,42 kWh/m². Data ini ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Potensi Energi Matahari

Bulan	Data Bulanan (kWh/m ²)	Data Harian (kWh/m ²)
Januari	137	4,42
Februari	141,7	5,06
Maret	157,1	5,07
April	147,6	4,92
Mei	145,1	4,68
Juni	141,6	4,72
Juli	148,1	4,78
Agustus	154,6	4,99
September	155,5	5,18
Oktober	172,4	5,56
November	146,7	4,89
Desember	140,4	4,53
Total	1787,9	4,9

Konsumsi listrik pabrik dianalisis berdasarkan data *Energy Meter* pada Panel Utama Tegangan Rendah. Beban harian menunjukkan fluktuasi antara 401 kW hingga 429 kW, dengan beban bulanan yang relatif stabil, berkisar antara 359 kW hingga 440 kW. Data beban harian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsumsi Listrik Harian

Waktu (WIB)	Beban (KW)
06.00	425
07.00	429
08.00	430
09.00	401
10.00	431
11.00	417
12.00	422
13.00	416
14.00	429
15.00	428
16.00	424
17.00	425
18.00	422

Konsumsi listrik yang konsisten pada Tabel 2 menjadi acuan dalam menentukan kapasitas PLTS agar dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa surplus energi yang terbuang.

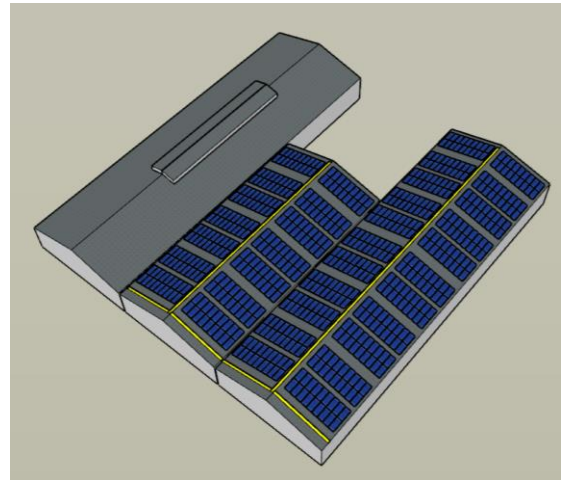
C. Pengolahan Data

Pemilihan panel surya dilakukan berdasarkan ketersediaan di distributor lokal dan standar kualitas. Panel yang digunakan berasal dari produsen Tier 1 menurut daftar *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF) [9] serta telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI) [10]. Panel yang dipilih memiliki daya 555 Wp untuk *P-Type* dengan dimensi 2384 mm x 1096 mm dan 585 Wp untuk *N-Type* dengan dimensi 2278 mm x 1134 mm. Spesifikasi Panel Surya yang dipakai disajikan pada Tabel 3 dibawah ini.

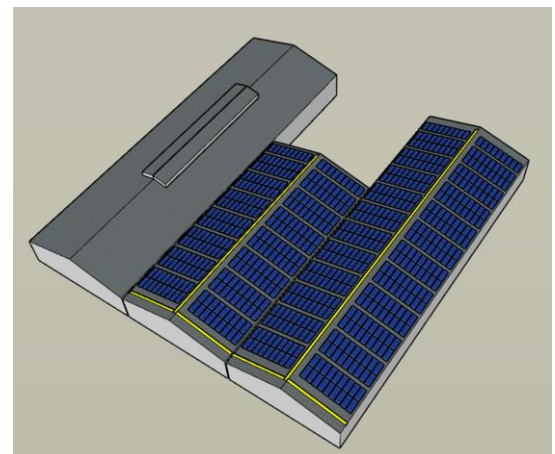
Tabel 3. Spesifikasi Panel Surya

<i>P-Type</i> panel	Daya (Wp)	Dimensi (mm)	Tegangan Maks (Voc)	Arus Maks (Isc)
<i>P-Type</i>	555	2384 x 1096	38,1V	18,56A
<i>N-Type</i>	585	2278 x 1134	51,16V	14,55A

Berdasarkan data survei lapangan, jumlah panel surya *N-Type* yang dapat dipasang adalah sebanyak 648 unit. Total kapasitas dalam Layout tersebut adalah 379,08 kWp. Panel-panel tersebut disusun ke dalam 36 *array*. Gambar *PV Layout N-Type* dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2. *PV Layout N-Type*

Sedangkan untuk *P-Type* jumlah panel surya *P-Type* yang dapat dipasang adalah sebanyak 684 unit. Total kapasitas dalam Layout tersebut adalah 379,62 kWp. Panel-panel tersebut disusun ke dalam 40 *array* seperti pada Gambar 3 dibawah ini.

Gambar 2. *PV Layout P-Type*

Konfigurasi inverter disesuaikan dengan kapasitas PV array yang dirancang, yakni 379,08 kWp untuk *N-Type* dan 379,62 kWp untuk *P-Type*. Inverter yang digunakan memiliki kapasitas 100 kW per unit, sehingga dibutuhkan tiga inverter untuk setiap sistem. Rasio DC/AC dirancang dalam rentang optimal 1,1–1,3 guna menjaga efisiensi konversi daya.

Tabel 4. Spesifikasi Inverter

Max. Input Voltage	1,100V
Max. Current per MPPT	30A
Max. Current per Input	20A
Max. Short Circuit Current per MPPT	40A
Start Voltage	200V
MPPT Operating Voltage Range	200V ~ 1.000V
Number of MPP trackers	10
Full-load MPPT voltage range	540-800V

Konfigurasi string disesuaikan dengan tegangan dan arus inverter. Untuk *N-Type*, jumlah modul per string adalah 13–19 unit agar tegangan berada dalam kisaran MPPT 540–800V. Sementara itu, *P-Type* memerlukan 17–25 modul per string, memungkinkan jumlah string lebih sedikit dibandingkan *N-Type*. Data konfigurasi string ini selanjutnya digunakan dalam simulasi PVsyst untuk menganalisis efisiensi sistem dan potensi kerugian daya akibat panjang kabel dan faktor lainnya.

Perhitungan dan simulasi analisis ekonomi memanfaatkan perangkat lunak PVsyst pada submenu *Economic Evaluation* untuk menghasilkan indikator finansial utama seperti LCOE, NPV, IRR, dan *payback period*.

Harga panel surya *N-Type* adalah 0,131 USD/Wp sedangkan *P-Type* lebih murah dengan harga 0,125 USD/Wp [11]. Untuk komponen selain panel surya, harga yang digunakan sama untuk kedua *P-Type* panel surya dan data diperoleh dari beberapa distributor lokal di Indonesia serta mengacu kepada *benchmark* yang diterbitkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) [12]. Rincian harga masing-masing komponen dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Biaya Investasi Awal

Item	<i>N-Type</i>	<i>P-Type</i>
Panel surya [11]	Rp870.625.450,00	Rp904.040.170,00
Struktur Mounting [12]	Rp184.549.536,00	Rp171.305.222,00
Kabel DC [12]	Rp92.306.000,00	Rp109.127.200,00
Inverter [12]	Rp203.700.000,00	Rp203.700.000,00
Komponen Lainnya [12]	Rp870.609.913,00	Rp868.257.121,00
Total Biaya	Rp2.221.790.899,00	Rp2.256.429.713,00

Perbedaan biaya panel surya disebabkan oleh perbedaan harga per Wp antara *N-Type* dan *P-Type*. Perbedaan biaya

struktur mounting terjadi karena jumlah panel surya *P-Type* lebih banyak dibandingkan *N-Type*. Sementara itu, biaya kabel DC berbeda karena jumlah string panel surya *N-Type* lebih banyak dibandingkan *P-Type*. Biaya inverter sama untuk kedua tipe modul karena menggunakan model inverter yang sama. Semua biaya yang tercantum telah mencakup biaya pengadaan dan instalasi.

Analisis biaya operasional dalam penelitian ini didasarkan pada panduan dari National Renewable Energy Laboratory (NREL) yang memberikan kerangka kerja standar untuk menghitung biaya operasional sistem PLTS [13]. Biaya tenaga kerja disesuaikan dengan upah minimum regional (UMR) di lokasi instalasi sebagai dasar estimasi. Sedangkan proyeksi biaya jangka panjang mempertimbangkan tren inflasi sepuluh tahun terakhir yang diterbitkan oleh Bank Indonesia. Rincian biaya operasional tahunan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Biaya Operasional Tahunan

Item	<i>N-Type</i>	<i>P-Type</i>
Preventiv	Rp49.397.495,12	Rp47.240.648,36
Korektif	Rp17.021.977,94	Rp16.841.111,20
Asset Management	Rp4.091.416,35	Rp4.085.596,41
Operations administration	Rp6.535.885,62	Rp6.530.065,69
Asuransi	Rp26.672.620,88	Rp27.831.113,75
Total	Rp103.719.395,91	Rp102.528.535,40

Tabel 6 menunjukkan total biaya operasional tahunan, yaitu Rp103.719.395,91 untuk *P-Type* dan Rp102.528.535,40 untuk *N-Type*. Biaya ini mencakup berbagai komponen, termasuk upah pekerja dan biaya pembersihan panel surya, dengan sedikit perbedaan akibat jumlah panel yang berbeda. Selain itu, perbedaan biaya asuransi disebabkan oleh nilai investasi awal yang lebih tinggi pada panel *N-Type*.

IV. HASIL DAN ANALISIS

Hasil simulasi PVsyst menunjukkan produksi listrik tahunan dari kedua jenis panel. Panel surya *P-Type* menghasilkan total energi sebesar 523.446 kWh per tahun, sedangkan panel surya *N-Type* menghasilkan 547.063 kWh per tahun. *Specific yield* untuk panel *P-Type* adalah 1.379 kWh/kWp/tahun, sementara *N-Type* memiliki *specific yield* sebesar 1.443 kWh/kWp/tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa panel *N-Type* memiliki produksi energi lebih tinggi dibandingkan *P-Type*.

Tabel 7. Produksi Listrik Bulanan PLTS

Bulan	Produksi <i>P-Type</i> (kWh)	Produksi <i>N-Type</i> (kWh)
Januari	39.856	41.707
Februari	41.479	43.350
Maret	45.745	47.850
April	43.109	45.074
Mei	42.772	44.654
Juni	41.997	43.817
Juli	43.781	45.695
Agustus	45.361	47.398
September	45.355	47.423
Oktober	50.146	52.445
November	42.737	44.690
Desember	41.108	42.961
Total	523.446	547.063

Kerugian energi pada sistem PLTS terdiri dari dua bagian utama, yaitu kerugian pada iradiasi dan kerugian pada energi listrik. Persentase masing-masing jenis kerugian iradiasi yang terjadi pada panel *P-Type* dan *N-Type* dapat dilihat pada Tabel 2 berikut. Kerugian iradiasi meliputi *transposition loss*, *near shading loss*, *incidence angle modifier (IAM) loss* dan *soiling loss*. Secara keseluruhan, total kerugian pada PLTS *P-Type* adalah 7,88%, sedangkan pada PLTS *N-Type* adalah 7,85%. Perbedaan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa kedua jenis panel mengalami penurunan iradiasi yang hampir sama.

Tabel 8. Kerugian pada Iradiasi

Jenis Losses	<i>P-Type</i> (%)	<i>N-Type</i> (%)
<i>Transposition Loss</i>	1,81%	1,81%
<i>Near Shading Loss</i>	0,76%	0,80%
<i>Incidence Angle Modifier (IAM) Loss</i>	2,28%	2,27%
<i>Soiling Loss</i>	3%	3%
Total Kerugian	7,85%	7,88%

Kerugian energi listrik meliputi *PV loss due to temperature*, *light-induced degradation (LID)*, *ohmic wiring loss*, *module array mismatch loss*, *inverter loss*, dan *AC ohmic loss*. Jumlah energi yang hilang akibat masing-masing jenis kerugian energi disajikan dalam Tabel 9. Total kerugian energi listrik untuk panel *P-Type* mencapai 97.414 kWh per tahun, sementara panel *N-Type* mengalami kerugian sebesar 77.231 kWh per tahun.

Tabel 9. Total Kerugian Energi Listrik

Bulan	Panel Surya <i>P-Type</i>	Panel Surya <i>N-Type</i>
Januari	7.479,83	6.031,79
Februari	7.683,05	6.199,45
Maret	8.787,99	7.097,69
April	8.149,41	6.584,12
Mei	7.581,20	6.136,33
Juni	7.297,40	5.907,36
Juli	7.711,21	6.239,12
Agustus	8.471,74	6.858,08
September	8.680,75	7.017,82
Oktober	9.788,96	7.920,57
November	8.114,00	6.556,62
Desember	7.448,82	6.016,41
Total	97.194,36	78.565,36

Berdasarkan hasil simulasi selama satu tahun, panel surya *N-Type* memperlihatkan *Performance Ratio* (PR) yang konsisten lebih tinggi dibandingkan *P-Type* setiap bulannya, dengan rata-rata tahunan mencapai 82,2% berbanding 78,5%. Hal ini mengindikasikan efisiensi konversi energi yang lebih optimal pada panel *N-Type* meski menerima intensitas radiasi matahari (GlobInc) yang sama. Data PR dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 10. *Performance Ratio*

Bulan	GlobInc (kWh/m ²)	<i>PR P-Type</i>	<i>PR N-Type</i>
Januari	134,7	77,90%	81,70%
Februari	139,2	78,50%	82,20%
Maret	154,3	78,10%	81,80%
April	145,1	78,30%	82,00%
Mei	142,6	79,00%	82,60%
Juni	139,1	79,60%	83,10%
Juli	145,4	79,30%	82,90%
Agustus	151,8	78,70%	82,40%
September	152,7	78,20%	81,90%
Oktober	169,1	78,10%	81,80%
November	143,8	78,30%	82,00%
Desember	137,9	78,60%	82,20%
Total	1755,5	78,50%	82,20%

Analisis finansial menunjukkan perbandingan kelayakan investasi antara panel surya *P-Type* dan *N-Type* berdasarkan hasil simulasi PVsyst yang ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan Analisis Finansial

Kategori	<i>P-Type</i>	<i>N-Type</i>
LCOE	Rp682,46/kWh	Rp558,29/kWh
NPV	Rp4.902.781.957,00	Rp7.143.913.586,00
IRR	13,52%	16,07%
<i>Payback Period</i>	6,4 Tahun	5,7 Tahun

Berdasarkan hasil simulasi, panel surya *N-Type* menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam semua parameter. LCOE panel *N-Type* lebih rendah sebesar Rp558,29/kWh dibandingkan *P-Type* sebesar Rp682,46/kWh, menunjukkan biaya produksi energi yang lebih ekonomis. NPV panel *N-Type* mencapai Rp7.143.913.586,00, jauh lebih tinggi dibandingkan *P-Type* yang sebesar Rp4.902.781.957,00, mengindikasikan nilai investasi yang lebih menguntungkan. IRR panel *N-Type* sebesar 16,07% juga lebih besar dibandingkan *P-Type* yang hanya 13,52%, menunjukkan tingkat pengembalian yang lebih menarik. Selain itu, *Payback Period* panel *N-Type* lebih cepat yaitu 5,7 tahun dibandingkan *P-Type* yang memerlukan waktu 6,4 tahun untuk mengembalikan investasi awal.

V. KESIMPULAN

Panel *N-Type* menunjukkan keunggulan signifikan dalam berbagai aspek. Dari segi produksi energi, *N-Type* menghasilkan total 547.063 kWh (1.443 kWh/kWp/tahun), lebih tinggi dibandingkan *P-Type* yang mencapai 523.446 kWh (1.379 kWh/kWp/tahun). Total kerugian energi pada *N-Type* juga lebih rendah, yaitu 81.842,4 kWh dibandingkan 98.725,37 kWh pada *P-Type*. Efisiensi konversi energi panel *N-Type* lebih optimal, dengan *Performance Ratio* 82,2%, lebih tinggi dibandingkan *P-Type* yang hanya 78,5%. Secara finansial, panel *N-Type* lebih unggul dengan LCOE Rp558,29/kWh dibandingkan *P-Type* Rp682,46/kWh. Selain itu, NPV panel *N-Type* mencapai Rp7.143.913.586,00, lebih tinggi dibandingkan *P-Type* sebesar Rp4.902.781.957,00. Panel *N-Type* juga memiliki IRR 16,07%, lebih tinggi dari *P-Type* yang hanya 13,52%, serta *Payback Period* yang lebih cepat, yaitu 5,7 tahun dibandingkan 6,4 tahun pada *P-Type*. Dengan berbagai keunggulan ini, panel *N-Type* lebih layak diimplementasikan pada proyek PLTS atap di pabrik karton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Bukit, T. Andromeda, and E. W. Sinuraya, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Untuk Analisis Biaya Dan Potensi Daya Di Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 215–221, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.215-221.
- [2] M. Boxwell and S. Glaseby, *Solar Electricity Handbook - 2014 Edition*. 2013.
- [3] TrinaSolar, "210VertexN_Product_Whitepaper_2.0," 2023.
- [4] B. Yu *et al.*, "A study on electrical performance of *N-Type* bifacial PV modules," *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 129–133, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.011.
- [5] J. Benick *et al.*, "High-Efficiency *N-Type* HP mc Silicon Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 5, pp. 1171–1175, 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2714139.
- [6] M. Efendi, Y. S. Indartono, M. Ali, and B. Yulianto, "Performance Analysis of Commercial PV for Remote Area in Tropical Island," in *5th International Conference on Computing Engineering and Design, ICCED 2019*, 2019, pp. 3–7, doi: 10.1109/ICCED46541.2019.9161089.
- [7] M. F. Hiswandi, F. Iswahyudi, and W. M. Soeroto, "Analisis Kelayakan Investasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap Dengan Sistem on-Grid Di Pabrik Minuman Siap Saji," *Sebatik*, vol. 27, no. 1, pp. 22–29, 2023, doi: 10.46984/sebatik.v27i1.2246.
- [8] N. Febriana Pratiwi, A. Pudim, and W. B. Mursanto, "Perancangan PLTS Atap On Grid Kapasitas 163,8 kWp untuk Suplai Daya Industri Tekstil," 2022.
- [9] BloombergNEF, "BloombergNEF Tier 1 Solar Module Maker Methodology," pp. 1–4, 2024.
- [10] Kementerian ESDM, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 2 tahun 2021 tentang Penerapan Standar Kualitas Modul Fotovoltaik Silikon Kristalin," no. 3, pp. 1–33, 2021.
- [11] BNEF, "Global PV Market Outlook," pp. 55–56, 2023.
- [12] V. Ramasamy *et al.*, "U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023," *Tech. Rep. NREL*, no. September, p. 52, 2023, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/87303.pdf>
- [13] A. Walker *et al.*, "Model of Operation-and-Maintenance Costs for Photovoltaic Systems, Technical Report NREL," *Nrel*, no. June, 2020.