

Simulasi Temperatur dan Performa Panel PV dengan Pendinginan Vakum Menggunakan Ansys dan Matlab

Naufal Putra Nabahan^{1*}, Suryanto^{2**}, dan Nur Hamzah^{3***}

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia
*putranabahan23@gmail.com, **suryanto@poliupg.ac.id, *** hamzah_said@poliupg.ac.id

Abstract: The aim of this research is to determine the temperature conditions and performance of PV using vacuum techniques which is a new passive cooling method cooling system that can maintain the ideal temperature of photovoltaic (PV) cells at optimum conditions. It can be simulated using computer numerical calculations, making it easier to research vacuum cooling techniques to be more dynamic in various pressure conditions in vacuum. The research method used was simulation with ANSYS software to obtain PV temperature that using vacuum cooling techniques and MATLAB to calculate panel power performance. For the simulation to produce accurate output, validation is needed by comparing it with experiments carried out by previous researchers in a journal entitled *The Vacuum Technique for Cooling PV Cells*. Based on the results of the research simulations carried out, there is approximately 10% difference in output from the actual experiment. With vacuum pressure applied for cooling variation ranging from 0.9 bar to 0.1 bar. At a pressure of 0.9 bar there is an increase in efficiency of 5.82% for a 10W load and an efficiency increase of 2.65% for a 20W load. With a pressure of 0.1 bar, it provides better cooling with an efficiency increase of 16.35% for a 10W load and an efficiency increase of 18.68% for a 20W load.

Keywords: Simulation; power plant; renewable energy; solar panel; photovoltaic; cooling; vacuum

Abstrak: Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi temperatur dan performa PV yang menggunakan teknik pendinginan vakum, yaitu sistem pendingin *passive cooling method* baru yang dapat mempertahankan suhu ideal sel *photovoltaic (PV)* pada kondisi optimum dapat disimulasikan dengan perhitungan numerik komputer sehingga memudahkan penelitian teknik pendingin vakum menjadi lebih dinamis diberbagai keadaan tekanan vakum. Metode penelitian yang dilakukan menggunakan simulasi dengan *software* ANSYS untuk mendapatkan suhu panel dengan teknik pendinginan vakum dan MATLAB untuk menghitung performa daya panel. Untuk simulasi menghasilkan *output* yang akurat, diperlukan validasi dengan membandingkannya dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dalam jurnal yang berjudul *The Vacuum Technique for Cooling PV Cell*. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, terdapat sekitar kurang lebih 10% selisih *output* dibandingkan hasil eksperimen. Dengan tekanan vakum yang diterapkan untuk simulasi pendinginan mulai 0,9 bar sampai 0,1 bar. Pada tekanan 0.9 bar terdapat peningkatan efisiensi sebesar 5.82% untuk beban 10W dan peningkatan efisiensi sebesar 2.65% untuk beban 20W. Dengan tekanan 0.1 bar memberikan pendinginan yang lebih baik dengan peningkatan efisiensi sebesar 16.35% untuk beban 10W dan peningkatan efisiensi sebesar 18.68% untuk beban 20W.

Kata kunci: Simulasi; pembangkit listrik; energi baru terbarukan; panel surya; *photovoltaic*; pendinginan; vakum

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu jenis pembangkit yang memanfaatkan kondisi alam yaitu kondisi radiasi matahari. Pembangkit yang memanfaatkan kondisi alam, menyebabkan energi listrik yang dihasilkan bersifat fluktuatif tergantung dari kondisi cuaca.

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi daya pada panel surya pada PLTS. Sehingga hal tersebut dapat dijadikan referensi yang dapat diambil oleh masyarakat dan pemerintah dalam pengembangan energi matahari di Indonesia. Suhu panel surya yang meningkat ketika mendapatkan tingkat radiasi yang tinggi pada siang hari dapat menurunkan efisiensi sel *photovoltaic PV*. Kenaikan Suhu mengakibatkan tegangan rangkaian terbuka (Voc) mengalami penurunan dan daya yang dihasilkan oleh panel surya menurun sehingga kenaikan suhu pada panel surya juga berpengaruh pada efisiensi listrik panel surya [1].

Sistem pendingin merupakan salah satu usaha untuk menghindari dampak tersebut. Selain berfungsi dalam peningkatan efisiensi, sistem pendingin membantu sistem untuk menghindari suhu permukaan yang berlebihan, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan kerusakan panel. Terdapat dua metode pendinginan panel surya yaitu *active cooling method* dan *passive cooling method*. Kata *active* mengacu pada penggunaan energi listrik untuk melakukan sistem pendinginan. Sumber energi dapat berasal dari energi yang dihasilkan atau dipasok secara mandiri dari baterai atau sumber listrik alternatif. Sedangkan, kata *passive* berarti tidak ada sifat listrik yang digunakan dalam sistem pendingin [2].

Teknik pendingin vakum merupakan sistem pendingin *passive cooling method* baru yang dapat mempertahankan suhu ideal sel PV pada kondisi optimum yaitu dengan penerapan teknik *casing* tekanan negatif dengan mengadopsi kondisi pegunungan yang dingin meskipun turun salju dan mendapat radiasi panas lebih banyak dibandingkan dengan daerah dataran rendah [3].

Dengan simulasi ini dilakukan, dapat diketahui perpindahan panas akibat pengaruh tekanan terhadap suhu PV, pengaruh perpindahan panas yang terjadi pada *casing* terhadap panel PV dan performa PV setelah menggunakan teknik pendinginan vakum dengan simulasi.

Kata “vakum” berasal dari bahasa Latin “*vacuo*”, yang berarti “kosong”. Dalam prakteknya, tidak ada ruang yang benar-benar kosong di alam ini atau tidak ada kondisi vakum sempurna (ideal). Dengan demikian, vakum adalah kondisi ruangan yang sebagian dari udara dan gas lainnya telah dikeluarkan sehingga tekanan di dalam ruangan tersebut di bawah tekanan atmosfer. Dengan kata lain, vakum berarti ruangan yang mempunyai kandungan kerapatan gas (partikel, atom dan molekul) atau tekanan gas yang tersebut lebih rendah dibandingkan kondisi di atmosfer. Jadi kondisi vakum adalah kondisi tekanan gas di dalam ruangan di bawah tekanan atmosfer. Daerah vakum yaitu daerah tekanan di bawah tekanan atmosfer hingga mencapai nol absolut atau tekanan negatif jika didasarkan tekanan atmosfer. Kondisi vakum dapat dinyatakan dengan tekanan didasarkan tekanan absolut maupun kevakuman. Tekanan absolut yaitu tekanan yang diukur dari kondisi nol absolut yang biasa dinyatakan dalam Torr, mbar (milibar) atau N/m^2 (newton. m^2 atau pascal). Pengukuran kevakuman (vakum) didasarkan dari tekanan 1 atmosfer absolut atau nol gauge (nol terukur) yang biasa juga dinyatakan dalam Torr, mbar atau N/m^2 [4].

Hukum Gay-Lussac dapat merujuk kepada salah satu dari dua hukum kimia yang dikemukakan oleh kimiawan Prancis Joseph Louis Gay-Lussac. Keduanya berhubungan dengan sifat-sifat gas. Hukum Perbandingan Volume (Gay-Lussac) yaitu volume gas-gas yang bereaksi dan volume gas-gas hasil reaksi yang diukur pada suhu dan tekanan yang sama berbanding sebagai bilangan bulat dan sederhana [5].

Pada 1802, Gay-Lussac menemukan bahwa: “Tekanan dari sejumlah tetap gas pada volume yang tetap berbanding lurus dengan temperturnya dalam kelvin”

Secara matematis dapat dinyatakan:

$$P \propto T \quad (1)$$

atau

$$\frac{P}{T} = k \quad (2)$$

dimana:

P = tekanan gas.

T = temperatur gas (dalam Kelvin).

k = sebuah konstanta.

Hukum ini dapat dibuktikan melalui teori kinetik gas, karena temperatur adalah ukuran rata-rata energi kinetik, di mana jika energi kinetik gas meningkat, maka partikel-partikel gas akan bertumbukan dengan dinding/wadah lebih cepat, sehingga meningkatkan tekanan. [5]

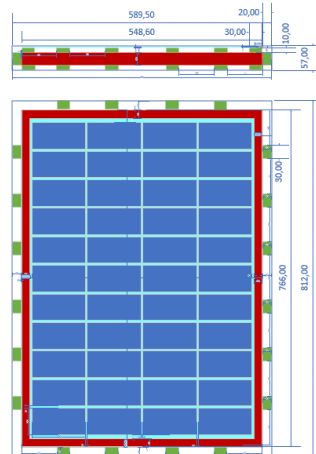
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pendekatan meniru sebaik mungkin kondisi aktual dari eksperimen yang dilakukan dalam artikel ilmiah (2022) oleh Suryanto & Firman yang berjudul "The Vacuum Technique for Cooling PV Cell" [3]. Model simulasi dirancang untuk mereplikasi kondisi eksperimental yang terdapat dalam penelitian tersebut, termasuk faktor-faktor seperti suhu, radiasi, tekanan, dan model geometri yang digunakan dalam eksperimen. Dengan memanfaatkan simulasi, penelitian ini berupaya untuk menggambarkan respons sistem pendingin sel surya menggunakan teknik vakum agar lebih dinamis dan menghemat biaya eksperimen.

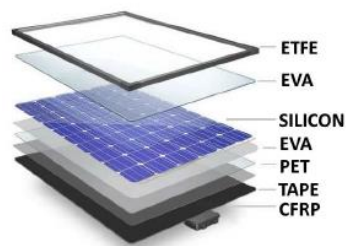
A. Tahap Persiapan Penelitian

Pada tahap ini, penelitian dimulai dengan langkah awal yaitu studi literatur dan pengumpulan referensi literatur terkait penelitian dan penyediaan perangkat keras dan perangkat lunak penelitian yang mendukung simulasi penelitian. Setelah itu penelitian dapat dilanjutkan ke langkah selanjutnya.

Desain *casing* dan *PV* direncanakan sesuai dengan spesifikasi fisik dari perangkat keras *PV* aktual dan *casing* yang mendukung *PV* tersebut. Pada perancangannya menggunakan *software* ANSYS DesignModeler 2023 dimulai dari perancangan *PV*, *casing* dan isolasi *casing-PV*. *Casing* mengisolasi termal panel *PV* menggunakan isolator panas (styrofoam) dengan dimensi 3x1x1cm sebanyak 12 buah pada sisi panjang panel *PV* dan sebanyak 8 buah pada sisi lebar panel *PV* pada 3 sisi frame panel *PV* yaitu sisi samping, atas, dan bawah. Perencanaan panel *PV* akan menggunakan konfigurasi lapisan panel *PV* dengan urutan pada Gambar 2.



Gambar 1. Draft Rancangan Desain *Casing* dan *PV*



Gambar 2. Lapisan Panel *PV* [6]

Selanjutnya persiapan untuk data input numerik untuk simulasi berasal dari referensi dan literatur, mencakup hal-hal sebagai berikut:

1. Parameter termal material.

Parameter termal material mengacu pada sifat-sifat termal suatu material yang mempengaruhi konduktivitas termal dan kapasitas termal material tersebut. Konduktivitas termal

menggambarkan kemampuan material untuk menghantarkan panas, sedangkan kapasitas termal menunjukkan jumlah panas yang dapat disimpan oleh material. Parameter-parameter ini penting dalam analisis termal pada *software* ANSYS saat beroperasi dalam kondisi termal yang berubah-ubah. Dengan memahami parameter termal material, dapat dilakukan pemilihan yang tepat dalam desain casing dan panel PV agar memenuhi kebutuhan aplikasi termal yang diinginkan.

Tabel 1. Parameter Termal Panel PV [6]

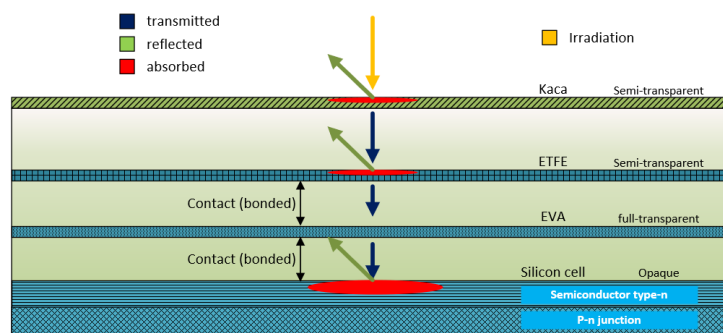
| Material | Thickness (mm) | Density (kg/m ³) | Specific heat (J/kgK) | Thermal conductivity (W/mK) |
|---------------|----------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ETFE | 0,28 | 1730 | 1172 | 0,24 |
| EVA | 0,20 | 945 | 2090 | 0,35 |
| Silicon cells | 0,15 | 2330 | 700 | 148 |
| PET | 0,20 | 1350 | 1275 | 0,275 |
| CFRP | 2,00 | 1490 | 1130 | 6,83 |
| Tape | 0,14 | 1012 | 2000 | 0,19 |

2. Parameter sumber panas.

Parameter sumber panas mengacu pada karakteristik dan sifat panas yang dihasilkan oleh sumber energi tertentu. Sumber panas ini dapat berupa radiasi matahari, udara sekitar, refleksi sinar matahari, dan sumber panas lainnya yang dapat mempengaruhi suhu pada suatu sistem atau komponen. Parameter sumber panas meliputi intensitas, distribusi, dan durasi panasnya. Sumber panas ini berasal dari data percobaan dalam referensi “Suryanto & Firman. 2023. *The Vacuum Technique for Cooling PV Cell*” yaitu besar irradiasi matahari dan temperatur lingkungan selama 5 jam (11.40-15.00 WITA) [3].

3. Perhitungan *heat transfer* oleh irradiasi matahari.

Pada simulasi ini, dimodelkan irradiasi matahari datang pada sudut bidang normal dari material yang akan dikenai radiasi dengan urutan dan sifat materialnya [7] sebagai berikut: 1) Kayu/casing (*opaque*); Kaca casing (*Semitransparent*); ETFE (*Semitransparent*); EVA (*fulltransparent*); Silicon cells (*opaque*). Perhitungan *heat transfer* merujuk pada rujukan [8].



Gambar 3. Proses Radiasi pada Casing dan Panel PV

Tabel 2. Hasil Perhitungan *heat transfer* oleh irradiasi matahari

| Material | Kayu/casing (Opaque) | Kaca (Semi-transparent) | ETFE (Semi-transparent) | EVA (Fulltransparent) | Silicon cells (Opaque) |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Absorptivity (α) | 0.95 | 0.09 | 0.01 | - | 0.93 |
| Reflectivity (ρ) | 0.05 | 0.07 | 0.08 | - | 0.03 |
| Transmissivity (τ) | - | 0.84 | 0.92 | 1 | - |

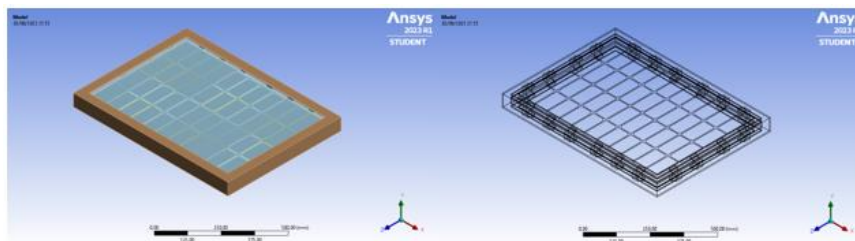
4. Perhitungan konveksi lingkungan dan vakum

Casing berada pada lingkungan luar dengan kontak langsung dengan udara luar. Rugi konveksi pada permukaan panel surya ada dua yaitu konveksi paksa dan konveksi alami,

maka besar konveksi gabungan yang akan dihitung [7]. Untuk konveksi dalam ruang vakum, karena disebabkan oleh variasi densitas molekul fluida. Jelas bahwa berbagai tekanan menyebabkan perpindahan panas konveksi yang berbeda [9]. Sedangkan pada *boundary condition* untuk konveksi dalam *casing* (vakum), nilai temperatur udara *real* akibat tekanan vakum perlu didefinisikan sesuai dengan keadaan aktualnya. Sehingga digunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan nilai temperatur udara *real* yang sesuai. Maka didapatkan nilai temperatur udara vakum adalah sebesar 5°C pada tekanan 0,5 bar.

B. Tahap Perencanaan *Casing* untuk Simulasi

Model part yang perlu didesain mencakup model panel PV dan casing, model casing harus didesain sedemikian rupa sehingga memiliki kemampuan untuk menjaga keadaan dalam casing tetap vakum, mencegah udara luar untuk masuk sehingga mengurangi tingkat kevakumannya dan dapat mengisolasi panas terhadap panas dari lingkungan. Model geometri dibangun menggunakan ANSYS DesignModeler dengan merujuk perencanaan PV dan casing pada Gambar 1 dengan dimensi yang telah ditentukan menyesuaikan pengukuran aktual dan perencanaan ukuran casing.



Gambar 4. Geometri *Casing* dan PV

C. Tahap Simulasi Penelitian

Setelah tahap desain selesai, tahap selanjutnya adalah tahap simulasi penelitian. Tahap ini melibatkan pemodelan dan simulasi kinerja panel PV dan casing dengan menggunakan software ANSYS. Dalam tahap simulasi ini, model panel PV dan casing akan diproses dengan kondisi vakum dan sumber panas untuk memperoleh informasi tentang distribusi panas pada permukaan panel PV.

1. Membuat diagram skematik penelitian.

Pada Ansys workbench 2023, diperlukan dua buah skematik yaitu “geometri” dimana berisi data geometri dan “*transient thermal*” sebagai analisis *thermal transient* yang akan dilakukan.

2. Penginputan *Engineering Data*.

Engineering Data berisi parameter data teknik material-material (panel PV) yang akan mendefinisikan karakteristik termal material pada simulasi. Parameter-parameter yang telah ada diinput dengan memperhatikan unit satuannya dan digunakan data literatur yang berasal dari eksperimen sebelumnya. Sedangkan untuk material lain (material casing) menggunakan data teknik dari data library ANSYS GRANTA. Dalam hal ini, jika diperlukan, parameter material harus diperbaiki agar hasil simulasi sesuai dengan kondisi aplikasi nyata.

3. Proses *Connection*.

Connection dalam konteks ANSYS merujuk pada proses menghubungkan berbagai komponen atau bagian dalam sebuah simulasi. Hal ini penting untuk memodelkan interaksi dan respons yang realistis antara elemen-elemen yang terlibat. Jenis *contact* yang digunakan adalah *contact bonded*. Metode *connection* yang tepat memungkinkan kita untuk memodelkan interaksi fisik yang benar antara komponen, termasuk transfer panas antara elemen-elemen yang berbeda. Hal ini memungkinkan untuk mengetahui jalur *connection* tiap bagian. Sehingga memungkinkan untuk analisis yang lebih akurat dan relevan dalam simulasi.

4. Proses *Meshing*.

Proses *meshing* bertujuan untuk membagi *solution domain* menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang disebut dengan *cell*. Keakuratan dan perhitungan tergantung dari dan ukuran serta struktur *cell*. Proses perhitungan yaitu melalui iterasi diantara *cell-cell* dalam *mesh*. Jumlah pembagian *mesh* ini nantinya akan menentukan keakuratan dari hasil komputasi numerik yang dilakukan. Semakin halus hasil *meshing* maka hasil komputasi numerik akan semakin akurat, namun waktu proses komputasi numerik akan menjadi lebih lama [10].

5. Penentuan *boundary condition*.

Boundary condition atau kondisi batas adalah informasi atau batasan yang diberikan pada suatu sistem atau domain dalam analisis simulasi numerik. Dalam konteks analisis *transient* termal pada panel *PV*, *boundary condition* menggambarkan bagaimana panas berinteraksi pada sistem, seperti aliran perpindahan panas konveksi dan radiasi, beban sumber panas, atau kondisi termal lainnya yang dapat mempengaruhi distribusi panas dalam sistem.

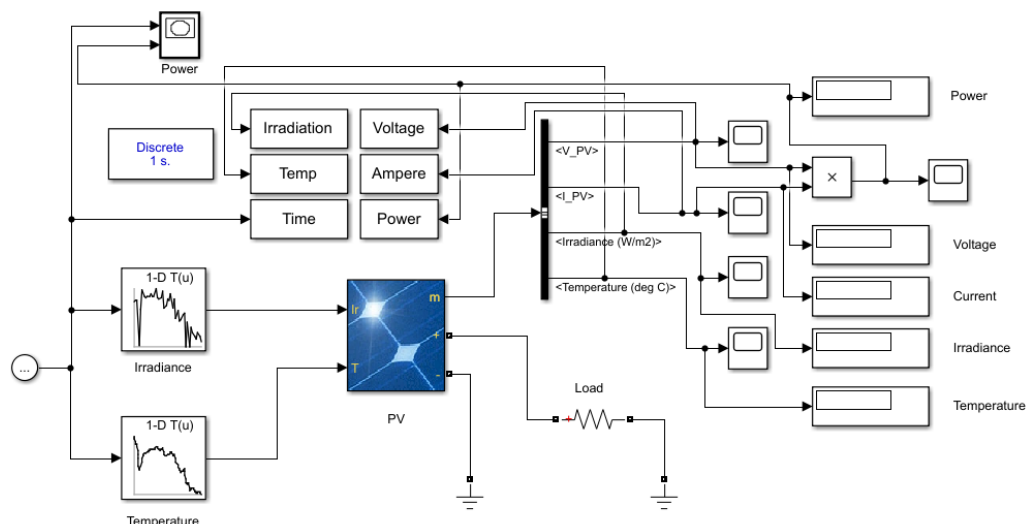
6. *Solution*.

Tahap terakhir adalah *Solution*. *Solution* adalah proses simulasi yang dilakukan ansys untuk mendapatkan parameter yang diinginkan. Dalam penelitian ini, parameter yang ingin didapatkan adalah distribusi panas pada panel *PV* dan pengaruh *casing* terhadap panel *PV* dengan perhitungan menggunakan *software* ANSYS.

D. Perhitungan Performa Panel PV menggunakan MATLAB

Tahap selanjutnya adalah perhitungan performa panel *PV* dengan MATLAB Simulink. Dalam hal ini, perlu dimasukkan data hasil simulasi suhu permukaan *PV* oleh Ansys. Pada tahap ini dibutuhkan sebuah *block* yang mempresentasikan kerja panel *PV*. Untuk menambah *block* ini perlu membuka panel *Simulink Library Browser*, pada list Simscape→Power Systems→Specialized Technology→Renewables. Kemudian *drag block* untuk memasukkan *block* ke Simulink. Setelah menyiapkan *Block* yang diperlukan, kemudian disusun seperti pada Gambar 5.

Kemudian perlu mengatur block *PV array* sesuai dengan *PV* yang digunakan untuk simulasi yang terlihat pada Tabel 3. Sebelum menjalankan perhitungan, perlu mengoneksikan blok-blok yang telah ditambahkan sesuai dengan aliran yang sesuai. Kemudian klik *Run* atau F5 untuk menjalankan perhitungan. Hasil perhitungan dapat dilihat dalam bentuk grafik dan tabel berupa plot tegangan, arus, dan daya terhadap waktu.



Gambar 5. Gambar Rangkaian *Block* MATLAB Simulink

Tabel 3. Tabel Parameter Listrik Panel PV

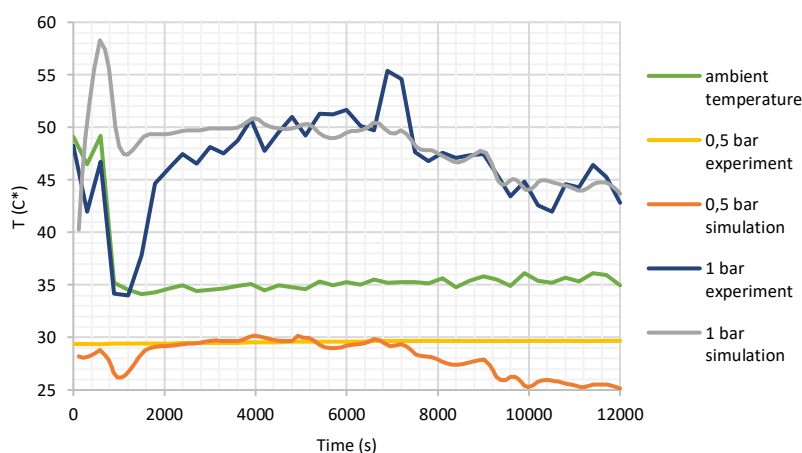
| | |
|--|--------|
| Parallel strings | 1 |
| Series-connected modules per string | 1 |
| Cells per module (Ncell) | 44 |
| Open circuit voltage Voc (V) | 21.8 |
| Short-circuit current Isc (A) | 5.81 |
| Voltage at maximum power point Vmp (V) | 18.24 |
| Current at maximum power point Imp (A) | 5.48 |
| Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) | -0.323 |
| Temperature coefficient of Isc (%/deg.C) | 0.037 |

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

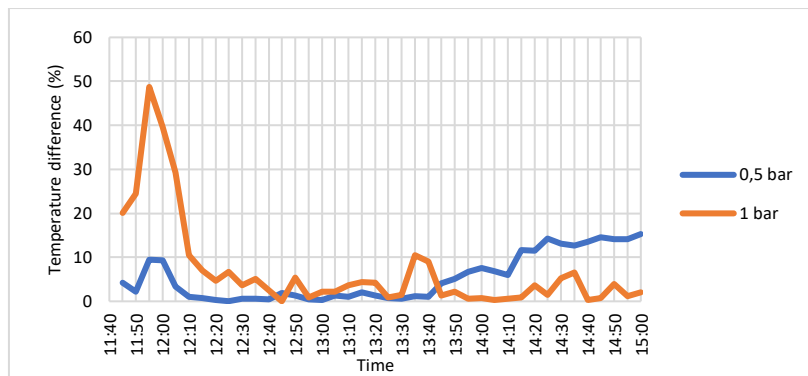
Validasi simulasi dari eksperimen aktual merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa hasil simulasi numerik sesuai dengan realitas di lapangan. Dalam proses validasi ini, hasil simulasi yang telah diperoleh dari model matematika atau numerik dibandingkan dengan data eksperimen yang diperoleh dari pengukuran atau percobaan fisik yang sebenarnya. Validasi ini bertujuan untuk menguji keakuratan dan validitas model serta memastikan bahwa simulasi dapat menggambarkan fenomena fisik dengan tepat. Jika hasil simulasi cocok dengan data eksperimen, maka model dan simulasi tersebut dianggap valid dan dapat digunakan sebagai simulasi yang lebih dinamis. Namun, jika terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan data eksperimen, maka model dan simulasi tersebut perlu dikoreksi atau diperbaiki untuk mencapai akurasi yang lebih baik dan mencerminkan keadaan sebenarnya secara lebih tepat.

Dari grafik pada Gambar 6, terlihat bahwa terdapat selisih hasil antara data simulasi dan data eksperimen sekitar $\pm 10\%$. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi belum sepenuhnya cocok dengan data eksperimen aktual. Kemungkinan adanya faktor-faktor tertentu yang tidak dipertimbangkan dalam model matematika atau simulasi numerik dapat menjadi alasan terjadinya selisih tersebut. Seperti perhitungan sudut datang radiasi yang kurang tepat, arah dan kecepatan angin yang perlu divariasikan, parameter material yang kurang sesuai, dan faktor-faktor lainnya.

Untuk hasil simulasi pada jam 11.40-12.10 terlihat besar selisih yang cukup besar, hal ini dikarenakan temperatur awal T_0 yang didefinisikan untuk seluruh komponen geometri adalah 28°C dimana keadaan ini tidak menggambarkan seperti kondisi awal dari eksperimen aktualnya, sehingga diperlukan waktu untuk mencapai *thermal equilibrium* atau kesetimbangan termalnya.



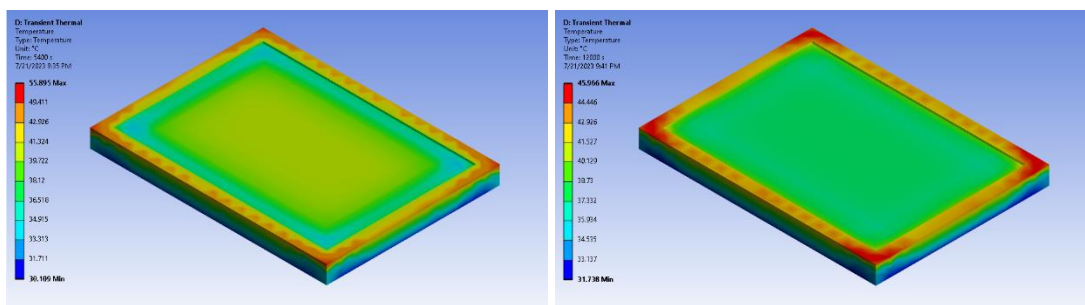
Gambar 6. Grafik Hasil Simulasi untuk Validasi



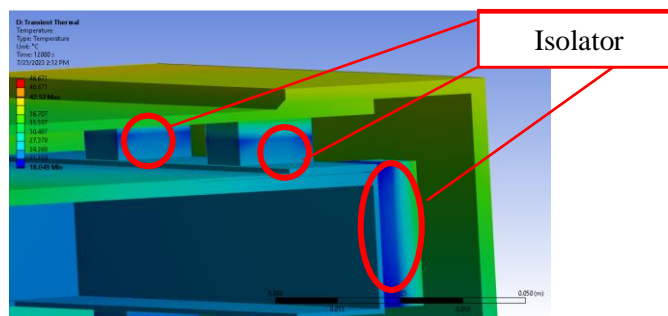
Gambar 7. Selisih Hasil Temperatur Simulasi dan Eksperimen aktual

A. Hasil distribusi temperatur casing

Dari hasil simulasi pada Gambar 8 menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan luar casing dengan sisi atas terpapar sinar matahari. Terlihat dari zona panasnya, pada material kayu, menyerap lebih banyak panas daripada material kaca dengan zona panas tertinggi berada pada ujung sudut casing. Sedangkan pada Gambar 9 menunjukkan distribusi temperatur pada isolator panel PV terhadap casing. Terlihat bahwa isolator mencegah transfer panas konduksi dari casing maupun sebaliknya.



Gambar 8. Distribusi Temperatur Casing pada (a) Jam 13.10 dan (b) jam 15.00

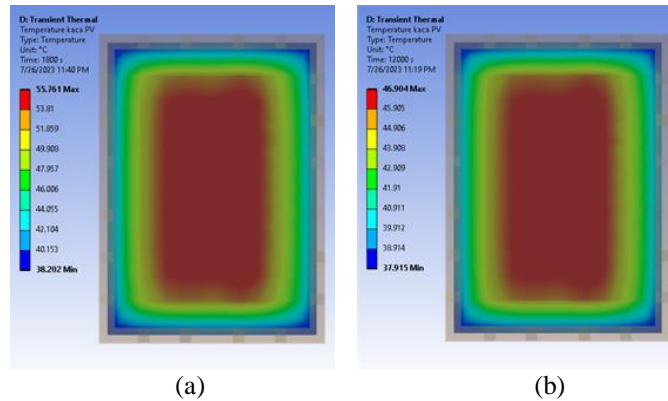


Gambar 9. Distribusi Temperatur Isolator

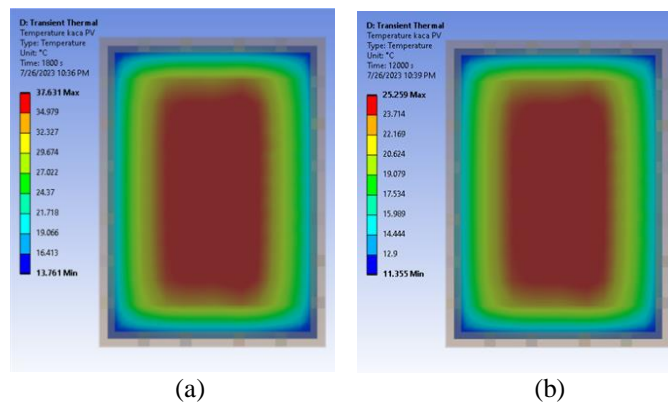
Untuk hasil distribusi temperatur panel PV ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan distribusi temperatur kaca panel PV pada dua keadaan temperatur yaitu tekanan normal (1 bara) dan tekanan vakum (0,5 bara). Terlihat zona panasnya memiliki gradien panas yang sama pada kedua keadaan tersebut tetapi dengan nilai temperatur yang berbeda. Dengan zona panas tertinggi berada pada tengah kaca dan zona panas terendah berada pada ujung sudut kaca panel PV.

Terlihat zona distribusi panas yang tidak homogen walaupun seluruh bagian PV cell dikenai irradiasi matahari, hal ini disebabkan oleh konduksi antar PV cell yang berdekatan. Hal ini dapat

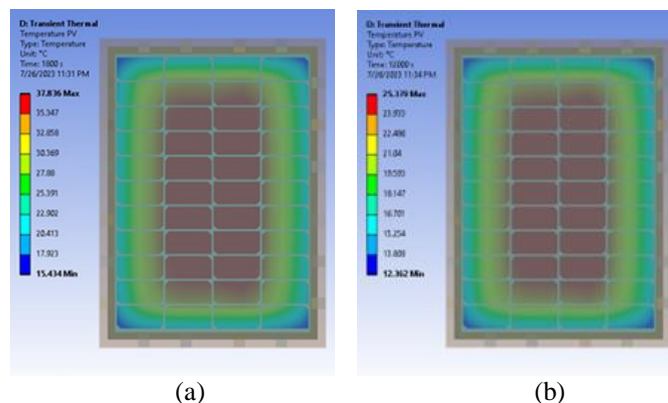
terlihat dari zona panas tertinggi berada pada bagian tengah dimana PV cell saling berdekatan yang ditunjukkan pada hasil simulasi pada Gambar 12.



Gambar 10. Distribusi Panas Kaca Panel PV Tekanan 1 bar Normal pada (a) Jam 12.10, dan (b) Jam 15.00



Gambar 11. Distribusi Panas Kaca Panel PV Tekanan 0,5 bar pada (a) Jam 12.10, (b) Jam 15.00

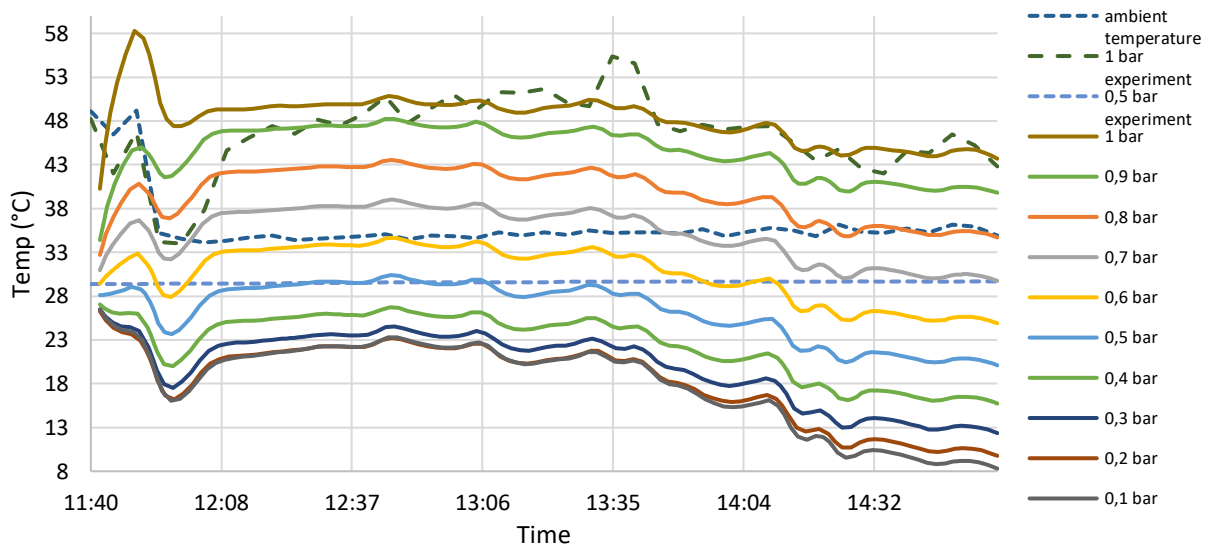


Gambar 12. Distribusi Panas PV cell Tekanan 0,5 bar pada (a) Jam 12.10, dan (b) Jam 15.00

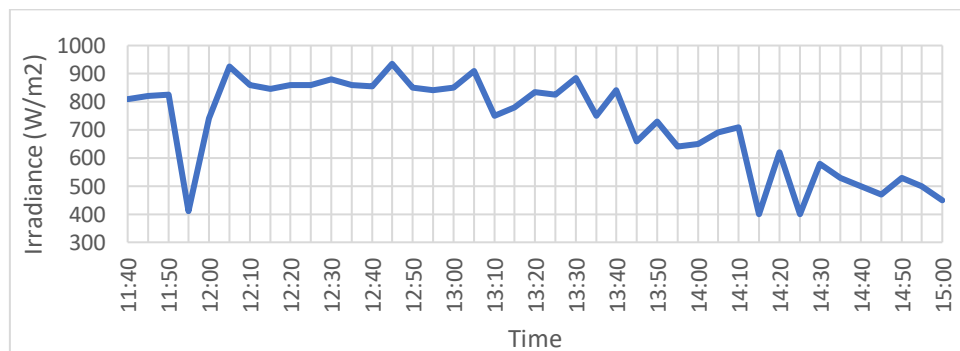
Dari hasil distribusi temperatur yang telah dilakukan, pada pendinginan tekanan yang berbeda, distribusi panas yang dihasilkan memiliki gradien panas yang sama dan hasil distribusi panasnya adalah tidak homogen. Oleh karena itu, nilai rata-rata (*average*) temperatur yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan performa listrik panel PV. Nilai rata-rata (*average*) yang dimaksud adalah nilai rata-rata temperatur berdasarkan luas permukaan. Sehingga seluruh permukaan yang dimaksud

memiliki distribusi panas yang homogen. Hasil temperatur rata-rata dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 13 untuk tekanan pendinginan yang bervariasi. Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 13 menunjukkan bentuk perubahan temperatur yang sama dengan perubahan irradiansi yang ditunjukkan pada Gambar 14 Hal ini disebabkan oleh panas yang timbul akibat radiasi matahari.

Pada tekanan 0,2 bar dan 0,1 bar menunjukkan semakin kecil tekanan pendinginannya, maka semakin kecil juga perbedaannya pada tekanan pendinginan sebelumnya. Walaupun dengan tekanan pendinginannya semakin kecil dapat meraih temperatur udara yang lebih rendah untuk menghasilkan pendinginan yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh karakteristik udara vakum, semakin vakum udara tersebut maka *heat transfer coefficient* pada konveksi semakin kecil sehingga perpindahan panas untuk pendinginan semakin kecil.



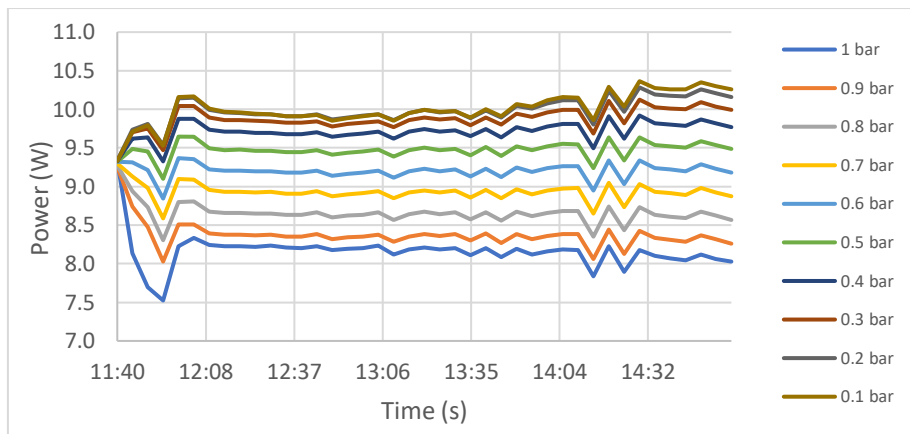
Gambar 13. Hasil Temperatur Simulasi terhadap Tekanan



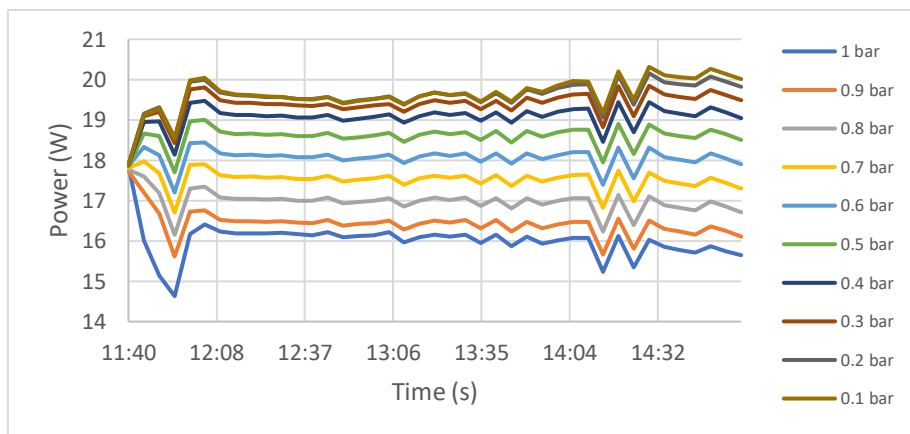
Gambar 14. Data Irradiansi pada Eksperimen

B. Hasil Performa Listrik Panel PV

Hasil menunjukkan bahwa hasil daya listrik yang dihasilkan oleh panel PV pada eksperimen aktual selama 5 jam (jam 11.40-15.00), terlihat adanya peningkatan daya yang dihasilkan karena pengaruh dari tekanan. Terlihat pada Gambar 15 dan Gambar 16 merupakan hasil daya listrik dihasilkan oleh panel PV selama 5 jam dengan input data temperatur dan data irradiansi dengan beban listrik 21,8V daya 10W dan 20W, terlihat adanya peningkatan daya yang dihasilkan karena pengaruh dari tekanan.



Gambar 15. Performa Daya Listrik Beban 10W dari Simulasi

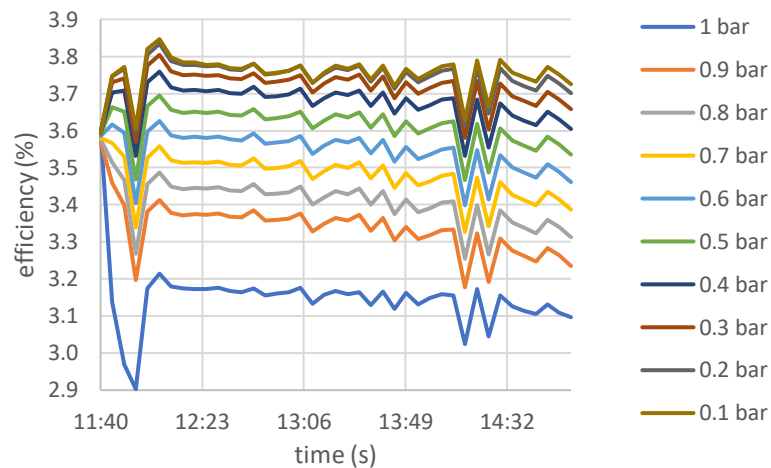


Gambar 16. Performa Daya Listrik Beban 20W dari Simulasi

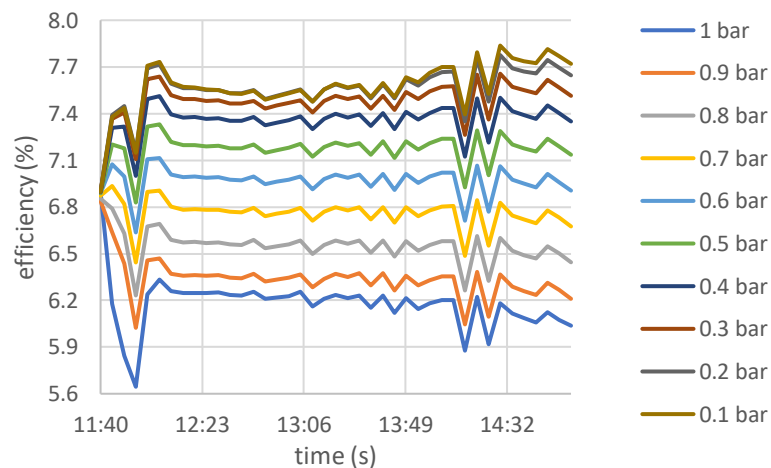
Pada waktu 900 detik (jam 11.55) di kedua grafik pada Gambar 15 dan Gambar 16, terdapat penurunan daya yang dihasilkan, hal ini diakibatkan karena nilai irradiansi saat itu sangat turun yaitu sebesar 410W/m^2 .

Dari data daya listrik yang telah dianalisis di atas, maka dapat dihitung besar efisiensi panel surya terhadap irradiansi matahari, disajikan pada grafik pada Gambar 17 dan Gambar 18. Grafik menunjukkan besar efisiensi terbesar pada tekanan vakum 0.1 bar dengan efisiensi rata-rata 3,76% pada beban 10W dan efisiensi rata-rata 7,59% pada beban 20W. Dengan besar peningkatan efisiensi dibandingkan dengan tekanan normal (1 bara) disajikan pada

Tabel 4.



Gambar 17. Efisiensi Panel PV dengan Beban 10W diberbagai Tekanan Pendinginan



Gambar 18. Efisiensi Panel PV dengan Beban 20W diberbagai Tekanan Pendinginan

Tabel 4. Peningkatan Efisiensi Panel PV

| Tekanan Vakum (bar) | Beban Daya 10W | Beban Daya 20W |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Peningkatan Eff. (%) | Peningkatan Eff. (%) |
| 0.9 | 5.82 | 2.65 |
| 0.8 | 7.80 | 5.85 |
| 0.7 | 9.66 | 8.81 |
| 0.6 | 11.40 | 11.54 |
| 0.5 | 13.05 | 14.08 |
| 0.4 | 14.49 | 16.22 |
| 0.3 | 15.48 | 17.61 |
| 0.2 | 16.14 | 18.48 |
| 0.1 | 16.35 | 18.68 |

C. Perbandingan Performa dengan Sistem Pendinginan Lain

Salah satu metode sistem pendinginan panel surya active cooling method yaitu dengan sistem mengalirkan air ke permukaan PV. Dengan metode ini didapatkan peningkatan efisiensi sebesar 2.47%

berdasarkan percobaan (2022) Tri Rahajoeningroem dan Ichsan Jatnika pada artikel ilmiah “Sistem Pendingin Otomatis Panel Surya Untuk Peningkatan Daya Output Berbasis Mikrokontroler”.

Jika dibandingkan dengan performa teknik pendinginan vakum, teknik ini memiliki peningkatan efisiensi yang sama dengan teknik pendinginan vakum pada tekanan 0,9 bar. Dengan peningkatan efisiensi lebih tinggi pada penurunan tekanan vakum lebih lanjut hingga pada tekanan vakum 0.1 bar menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 18.68% dari efisiensi panel surya tanpa pendinginan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan Hasil dan Simulasi yang telah dilakukan maka dengan ini dapat diberi kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi distribusi temperatur pada panel PV tidak homogen, pada tekanan 0,5 bar dengan irradiasi tertinggi 935 W/m^2 dengan zona panas tertinggi berada di tengah sebesar $39,9^\circ\text{C}$ dan zona panas terendah berada pada ujung sudut panel sebesar $14,4^\circ\text{C}$.
2. Hasil simulasi distribusi temperatur pada panel PV nilainya semakin rendah akibat penurunan tekanan pendinginan vakum, dengan irradiasi tertinggi 935 W/m^2 mendapatkan temperatur PV rata-rata pada tekanan 1 bar ialah $50,9^\circ\text{C}$ dan tekanan 0,9 bar ialah $48,2^\circ\text{C}$.
3. Performa daya listrik panel PV dari hasil simulasi meningkat akibat penurunan tekanan pendinginan vakum. Dengan besar peningkatan tertinggi yang dapat dicapai sebesar 18,68% pada tekanan 0,1 bar dengan beban 20W.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. K. Tiyas and M. Widyartono, “Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya,” Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, 2020.
- [2] R. Harahap and Suherman, “Active Versus Passive Cooling Systems In Increasing Solar Panel Output,” Universitas Sumatera Utara, Medan, 2021.
- [3] Suryanto and Firman. , "The Vacuum Technique for Cooling PV Cell," Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, 2022.
- [4] I. Suprpto and S. Widodo, Pengenalan Teknologi Vakum, Yogyakarta: Pustaka Pelajar Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2017.
- [5] Wikipedia, “Hukum Gay-Lussac,” Desember 2022. [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_Gay-Lussac. [Diakses 30 Januari 2023].
- [6] A. Pavlovic, C. Fragassa, M. Bertoldi and V. Mikhnych, "Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells: A Numerical and Experimental Investigation on the Module Encapsulation Materials," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2021.
- [7] P. Dr. Saud T. Al-Jadir, "ANSYS Thermal Analysis Course of Solar PV Module," 2023. [Online]. Available: <https://www.udemy.com/course/ansys-thermal-analysis-course-of-solar-pv-module/>.
- [8] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [9] M. Saidi and R. H. Abardeh, "Air Pressure Dependence of Natural-Convection Heat Transfer," *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II*, 2010.
- [10] ANSYS Inc., ANSYS Meshing User's Guide, Canonsburg: ANSYS Inc., 2010.