

TEKNIK PENDINGINAN CELL PHOTO VOLTAIC DENGAN TEKANAN NEGATIF

Suryanto¹, Firman²

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk menerapkan teknik pendinginan pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) khususnya pada modul Photo Voltaic PV untuk mempertahankan cell PV bekerja pada kondisi optimal. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen dengan mengkondisikan (PV) berada pada keadaan bertekanan negatif (tekanan < 1 bar). Suatu casing dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan modul PV berada dalam kondisi tekanan negative dengan radiasi cahaya matahari tetap dapat menembus ke dalamnya pada sisi permukaan atas cell dengan menggunakan material yang tembus cahaya dan yang dapat menahan tekanan negatif. Pengujian dilakukan diluar ruangan dengan kondisi radiasi matahari dan temperatur udara sekitar. Pengukuran parameter tekanan, temperatur, tingkat radiasi, tegangan dan arus semuanya menggunakan instrument yang dilengkapi data logger. Jenis modul PV yang digunakan pada pengujian dari jenis monocrystalline. Hasil pengujian menunjukkan produksi listrik dari modul PV yang dikondisikan dalam kondisi tekanan negative effisiensinya lebih besar 2.8 % dibanding dengan modul PV yang berada pada kondisi tekanan atmosfer. Demikian juga temperature cell PV berkisar 29 sampai dengan 30 °C sementara pada cell PV kondisi referensi, temperaturnya dapat mencapai 51 °C.

Kata Kunci: *Cell_PV, tekanan_negative, teknik_pendinginan, temperature, efisiensi.*

ABSTRACT

This study aims to apply cooling techniques to the installation of a Solar Power Plant (PLTS), especially the Photo Voltaic PV module, to maintain the PV cells working in optimal conditions. The research was carried out using an experimental method by conditioning (PV) to be in a state of negative pressure (pressure < 1 bar). A casing is designed in such a way as to allow the PV module to be in a negative pressure condition with the sun's radiation still being able to penetrate it on the top surface of the cell by using a material that is translucent and which can withstand negative pressure. The test was carried out outdoors under solar radiation and ambient air temperature conditions. Measurement of parameters of pressure, temperature, radiation level, voltage, and current all use instruments equipped with data loggers. The type of PV module used in the test is the monocrystalline type. The test results show that the efficiency of PV modules conditioned under negative pressure is 2.8% greater than that of PV modules under atmospheric pressure. Likewise, the temperature of the PV cell ranges from 29 to 30 °C, while in the reference condition PV cell, the temperature can reach 51 °C.

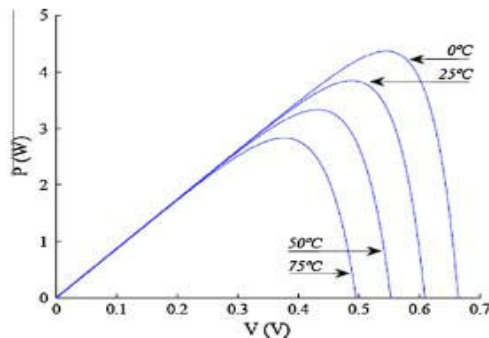
Keywords: *Cell_PV, negative_pressure, cooling_technique, temperature, efficiency.*

1. Pendahuluan

Sumber energi terbarukan menjadi semakin populer, apalagi kalau dihubungkan dengan masalah polusi/lingkungan global dan semakin menipisnya cadangan energy konvensional. Salah satu sumber daya yang paling melimpah adalah energi matahari, yang langsung sebagai radiasi matahari, atau tidak langsung sebagai energi angin dan energi biomassa. Ada dua jenis energi yang dapat diperoleh dari radiasi langsung matahari yaitu energi listrik dan energi termal. Cara paling efisien untuk mendapatkan energi listrik yang berasal dari penyinaran matahari langsung yaitu melalui cell photovoltaik (cell PV). Secara kasar efisiensi cell PV atau modul PV yang ada dipasaran, maksimum berkisar antara 11% -20 %, merujuk kepenulis [1,2,3].

Karakteristik efisiensi cell photovoltaic cenderung turun signifikan dengan peningkatan suhu cell, terutama pada kondisi tingkat radiasi matahari tinggi atau pada kondisi peak. Tingkat penurunan berkisar dari 0,25% hingga 0,5% per derajat Celcius, tergantung pada sel bahan yang digunakan [4]. Hubungan antara daya (P) dan tegangan (V) dari cell PV dengan pengaruh temperature yang bervariasi dari 0 sampai 75 °C, dapat dilihat pada Gambar 1, yang mengadopsi hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis [5]. Daya maksimum solar cell berkurang dengan naiknya temperatur cell pada pemberian tingkat radiasi yang sama.

* Korespondensi penulis: Suryanto, email : suryanto@poliupg.ac.id



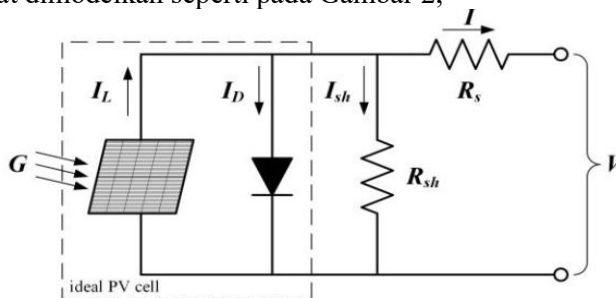
Gambar 1. Karakteristik daya(P) dan tengangan (V) sebagai fungsi dari temperature, [5]

Peneliti lain juga menemukan bahwa daya berkurang 0,47 % untuk kenaikan suhu cell 1 °C pada pemberian tingkat radiasi yang sama pada suatu cell PV [6]. Selain itu suhu yang tinggi dapat mengurangi waktu ekonomis sistim PV. Hal-hal tersebut menjadi persoalan yang mendasar pada sistim pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang dapat mengurangi produksi listrik yang cukup signifikan pada proses konversi energi radiasi matahari kebentuk energi listrik.

Proposal penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan metode pendingin yang dapat mempertahankan temperatur ideal cell PV berada pada kondisi optimum dengan metode baru yakni penerapan teknik casing tekanan negative dengan mengadopsi kondisi pegunungan yang dingin bahkan bersalju walaupun mendapat radiasi panas disbanding daerah dataran rendah. Hal ini sejalan dengan Renstra Penelitian Politeknik Negeri Ujung Pandang Tahun 2021 - 2025, dimana pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan menjadi salah satu fokus utama yang menjadi perhatian dan merupakan salah satu bidang penelitian unggulan.

2. Tinjauan Pustaka

Suatu cell photovoltaic dapat dimodelkan seperti pada Gambar 2,



Gambar 2 Gambar pemodelan sirkuit cell PV

secara matematis sirkuit cell PV dapat diformulasikan seperti pada persamaan (1), merujuk kepenulis [7], sebagai berikut,

$$I = I_L - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_s} \tag{1}$$

Dimana $V_T = kT/q$ sebagai tegangan thermal, T adalah temperature module, k konstanta Boltzman, dan q adalah jumlah elektron elementer. Dari persamaan (1) dapat dikatakan bahwa arus (I) berbanding terbalik dengan temperatur. Sedangkan Suhu modul T secara teoritis dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [8],

$$T = T_{amb} + (NOCT - 20)G/800 \tag{2}$$

Dimana temperature module (Tm), temperature sekitar (Tamb), tingkat radiasi matahari (G) sedangkan NOCT dapat ditulis sebagai,

$$NOCT = 20^\circ\text{C} + T_{Rise}$$

Jadi temperature module adalah fungsi dari tingkat radiasi, temperature sekitar dan NOCT. Pada eksperimen dengan menggunakan alat ukur presisi, diperoleh fakta bahwa persamaan (2) hanya mempunyai kesalahan 5 %, yang telah diuji oleh peneliti [4]. Pengaruh suhu pada suatu bahan PV didefinisikan sebagai koefisien suhu. Untuk panel PV polykristalin misalnya, jika suhu turun sebesar satu derajat Celsius, tegangan meningkat sebesar 0,12 V dan begitu juga sebaliknya, sehingga koefisien suhunya adalah 0,12 V/0C. Adapun persamaan umum untuk memperkirakan tegangan cell pada suhu tertentu adalah sebagai berikut;

$$V_{OC,new} = 0,12 \left[\frac{V}{C} \right] \times (25(^{\circ}C) - T_{ambient}(^{\circ}C) + V_{OC,rated} (V) \quad (3)$$

Adapun efisiensi cell PV (η) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times A} \quad (4)$$

Dimana A merupakan luasan cell photovoltaic, Pmax adalah daya yang dihasilkan oleh cell PV, dan G tingkat radiasi yang mengenai permukaan cell PV. Karena kenaikan temperature cell PV dapat menurunkan efisiensi cell sebagaimana telah dibuktikan oleh banyak peneliti, maka usaha untuk mendinginkan cell sebagai usaha mengoptimalkan produksi listrik perlu dilakukan.

Pada prinsipnya terdapat dua jenis pendinginan PV yang dikategorikan sebagai: 1) pendinginan aktif, yang mengkonsumsi energi (pompa, dan kipas angin) dan 2) pendinginan pasif, yang menggunakan konveksi/konduksi alami untuk mengaktifkan ekstraksi panas.

Teknik pendinginan pasif dapat dibagi tiga yaitu: pendinginan pasif udara, pendinginan pasif air, dan pendinginan pasif konduktif. Pendinginan konduktif sebagian besar dengan pendinginan pasif udara, tetapi perbedaan penting adalah bahwa mekanisme perpindahan panas yang berlaku dari sel PV bersifat konduktif. Cuce dkk. [9] yang telah melakukan studi eksperimental pada sel PV polikristalin dalam kondisi terkontrol. Dua Sel PV digunakan: satu dengan sirip aluminium sebagai heat sink, dengan pelumas termal dan satu tanpa heat sink. Iluminasi bervariasi dari 200 hingga 800 W/m². Peningkatan efisiensi listrik diperoleh sebesar 0.9% dibanding yang tidak mendapat perlakuan pendinginan. Sementara R. M.Hernandez dkk.[10] telah menyelidiki bahwa kedalaman saluran aliran di bawah sel PV berpengaruh signifikan pada pendinginan pasif. Hasil menunjukkan bahwa temperatur modul PV 5-6 °C lebih rendah dibandingkan dengan modul PV tanpa pendingin.

Jenis khusus dari pendinginan konduktif pasif adalah pendinginan bahan perubah fasa, atau dikenal sebagai Phase Change Material (PCM). Penulis [11] telah melaporkan bahwa, dengan jenis bahan PCM yang tepat, penurunan sebesar 5 °C relatif terhadap sel PV referensi dapat dicapai, untuk jangka waktu 5 jam, pada tingkat radiasi 1000 W/m². Modul PV dengan daya nominal 65W digunakan, dengan PCM ketebalan 50 mm yang ditempatkan pada sisi bawah PV, dengan sirip aluminium vertikal untuk meningkatkan konduksi. Keuntungannya adalah kekuatan lebih tinggi sebesar 1% dibandingkan dengan modul PV referensi. Potensi global PCM diamati oleh peneliti[13]. Pendinginan pasif air agak lebih efisien, terutama karena kapasitas termal air (Cp) yang lebih tinggi.

Beberapa penelitian pasif air telah dilakukan dengan pendingin pada permukaan depan dan belakang PV. Rosa-Clot et Al. [14] menggunakan teknik terendam untuk mendinginkan modul PV monokristal dalam air. Efeknya memiliki keberhasilan yang terbatas: suhu dipertahankan pada 30 °C yang pada gilirannya menghasilkan peningkatan efisiensi relatif sebesar 2%, tetapi intensitas radiasi yang sampai ke cell PV turun dengan kedalaman. Namun, pada kedalaman 4 cm, efisiensi relatif meningkat sebesar 1,1%. El - Seesy dkk. [15] mencoba mendinginkan sel PV dengan termosifon efek. Modul silikon polikristalin, dengan luas total 0,260 m digunakan, bersama dengan lembaran tembaga dan tabung dipasang di bagian belakang modul, dan air termosyphon sistem dengan kapasitas air 80 liter. Peningkatan efisiensi relatif adalah 1,9%. Sementara itu Chandrasekar dkk. [16] menggunakan efek kapiler untuk mendinginkan bagian belakang monokristalin Modul PV. Efek kapiler dihasilkan melalui struktur sumbu kapas dibungkus secara spiral di bagian belakang modul, dan direndam dalam cairan. Kapiler cairan nano pendinginan juga dicoba, tetapi gagal meningkatkan efek pendinginan bila dibandingkan dengan air. Peningkatan efisiensi maksimum mencapai 1,4% jika dibandingkan dengan yang tidak berpendingin modul. Hasil serupa dicapai pada [17]. Han dkk. [18] membandingkan perendaman dalam cairan pendingin yang berbeda. Perendaman berlangsung dalam cairan isolasi, air de-ionisasi dan tiga cairan organik yang berbeda. Peningkatan efisiensi relatif naik hingga 1,5%.

Metode pendinginan aktif: metode pendinginan aktif dapat dianggap sebagai metode yang terus menerus mengkonsumsi daya untuk mendinginkan modul PV. Sebagian besar metode yang digunakan didasarkan pada pendinginan udara atau air. Oleh karena itu, sistem konsumsi utama adalah pompa atau kipas yang dibutuhkan untuk menjaga cairan bersirkulasi. Secara umum, metode pendinginan aktif menghasilkan lebih banyak daya yang dihasilkan dan lebih banyak lagi energi panas yang dapat diakses, tetapi konsumsi daya juga dibutuhkan.

Teo dkk. [19] mendinginkan empat modul PV polikristalin dengan udara paksa, dari sisi belakang. Luas permukaan PV modul adalah 0,78 m². Saluran aliran khusus dibuat dan analisis CFD digunakan untuk mengoptimalkan bentuknya. Perolehan efisiensi total sekitar 1%, tergantung dari penyinaran dibandingkan

dengan PV yang tidak mendapat perlakuan. Aliran udara optimal di bawah panel adalah 0,055 kg/s, meskipun tidak ada suhu lingkungan yang diberikan. Namun demikian, informasi ini dapat berharga ketika mencoba mengevaluasi jumlah udara yang dibutuhkan untuk mendinginkan modul PV standar. Farhana et al [20] menggunakan sel PV polikristalin 0,924 m² dengan efek pendinginan udara. Dua sel dibandingkan, yang satu tanpa pendinginan. Pendingin memiliki casing aluminium di sisi belakang, yang bertindak sebagai saluran aliran. Arcuri et al [21] mendinginkan panel PV polikristalin 1 m² dengan udara paksa. Pendinginan diberikan pada sisi belakang panel, melalui saluran aliran yang dibangun khusus. Saluran aliran terdiri dari aluminium lembaran setebal 1 mm di bagian belakang pelat, dan selubung kayu di sekelilingnya. Aliran massa udara rata-rata sekitar 0,016 kg/s ditetapkan. Aliran massa dibuat melalui kipas heliks dengan daya 3,6 W konsumsi. Rata-rata peningkatan efisiensi total adalah sekitar 0,6%, tergantung pada tingkat radiasi.

Sedangkan untuk pendinginan air paksa, 2 teknik berbeda dapat diterapkan: sisi depan dan sisi belakang pendinginan. Hosseini dkk. [22] membuat film air tipis di sisi depan PV monokristalin panel dan memperoleh peningkatan efisiensi total sekitar 1%. Luas total panel adalah 0,44 m² dan debit air maksimum sekitar 1 liter/menit. Pompa yang digunakan mengkonsumsi 0,25 hp. Penurunan suhu 12°C tercapai. Tidak disebutkan jumlah panas yang dikeluarkan oleh penguapan, yang harus diperhitungkan saat pendinginan dilakukan dari sisi depan. Dua dkk. [23] menggunakan sel PV monokristalin pekat 0,152 m². Teknik pendinginan yang digunakan adalah pendinginan sisi belakang melalui 2 pipa aluminium. Keuntungan efisiensi puncak adalah 0,8% untuk aliran massa 0,035 kg/s air. Suhu puncak PV adalah sekitar 60 °C. Bahaidarah dkk. [24] mendinginkan PV mono-kristal modul dengan luas 1,24 m² dari sisi belakang, melalui selubung tertutup dimana aliran air terbentuk. Pompa air mengkonsumsi daya 0,5 hp. Aliran massa maksimum adalah 0,06 kg/s. Peningkatan efisiensi maksimum, jika dibandingkan dengan modul non-pendingin adalah total sebesar 2,8%, dan penurunan suhu modul sebesar 10 °C.

Dari referensi di atas diperoleh fakta bahwa, penelitian yang telah dilakukan baik secara metode pasif maupun metode aktif sampai saat ini belum mampu menurunkan kondisi dibawah temperatur udara sekitar. Dari hasil penelitian yang sudah dilaporkan, juga dapat disimpulkan bahwa pendinginan paksa dengan menggunakan air adalah yang terbaik dibandingkan dengan metode yang lain, namun jika diperhitungkan daya yang diperlukan untuk sirkulasi air paksa maka keuntungan bersih produksi listrik relative kecil. Selain itu hal lain yang paling sulit untuk penerapan pendinginan air, jika diterapkan didaerah padang pasir yang kurang air.

Kenyataan bahwa temperatur pegunungan dengan ketinggian diatas 6000 m diatas permukaan bumi menjadi rendah bahkan permukaannya selalu diselimuti es seperti pegunungan Himalaya dan beberapa gunung di dunia temperaturnya dibawah nol. Padahal kenyataannya radiasi yang diterima ditempat seperti itu lebih tinggi dibandingkan radiasi pada dataran rendah. Turunnya temperatur ditempat ketinggian pegunungan disebabkan oleh tekanan yang rendah dimana tekanan semakin menurun seiring dengan tingginya permukaan suatu lokasi di atas permukaan bumi. Turunnya tekanan disebabkan oleh semakin renggangnya molekul udara sebagai fungsi dari ketinggian dari permukaan bumi.

Proposal pengajuan untuk cooling PV yang diimplementasikan mengadopsi kondisi pegunungan yakni dengan menerapkan tekanan disekitar modul PV dibawah kondisi tekanan 1 atmosfer (tekanan negative). Teknik pendinginan ini dapat dikategorikan kedalam jenis teknik pendinginan pasif sehingga tidak membutuhkan daya yang kontinyu untuk proses kerjanya. Secara teoritis jika tekanan turun pada volume konstan maka temperature udara akan turun mengikuti hukum Gay Lussac (Gay Lussac law's equation). Secara matematis hukum Gay Lussac dapat ditulis sebagai,

$$\frac{P}{T} = k \quad (5)$$

Dimana P adalah tekanan absolute gas atau udara, T adalah temperature absolut gas dan k adalah konstanta gas.

3. Metode Penelitian

Metode yang dikembangkan untuk mencapai tujuan dan target luaran penelitian adalah dengan metode eksperimen yang didahului oleh desain model dan dilanjutkan dengan proses manufaktur objek penelitian yang dikembangkan.

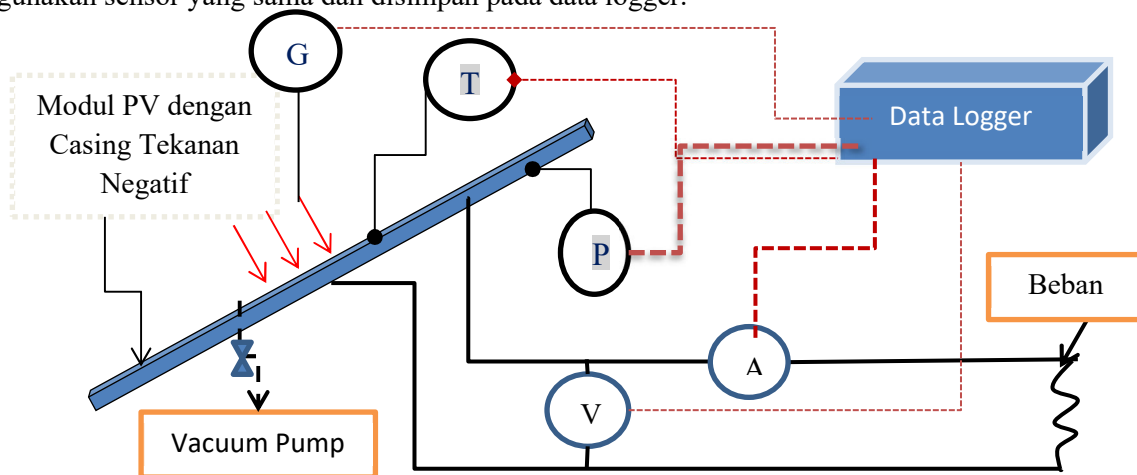
Perangkat Pengujian (Set up experiment)

Dua modul PV dari jenis modul *monocrystalline monofacial* dengan daya maksimum 100 Wp digunakan. Diagram skematik dari penelitian eksperimental ditunjukkan pada Gambar 3, dimana modul PV

berada di dalam casing pada kondisi tekanan negatif. Satu modul PV lainnya tidak diberi perlakuan casing tekanan negative sebagai pembanding. Terdapat suatu pompa vakum untuk menurunkan tekanan dalam casing cell PV. Parameter suhu, tekanan, tingkat radiasi, tegangan, dan arus dimonitor dan disimpan secara real time pada suatu data logger.

Rangka casing dibuat dari besi hollow 35x 35 mm dengan ketebalan 2 mm dari bahan baja atau bahan aluminium dan bagian bawah ditutup oleh plat St. steel. Ukuran casing menyesuaikan dengan ukuran dimensi PV. Casing dilengkapi dengan katup satu arah untuk memungkinkan udara diisap dari casing agar dapat dibuat vakum. Pada bagian atas casing ditutup dengan kaca dengan ketebalan 5 mm dari jenis yang cukup kuat untuk menahan tekanan negative.

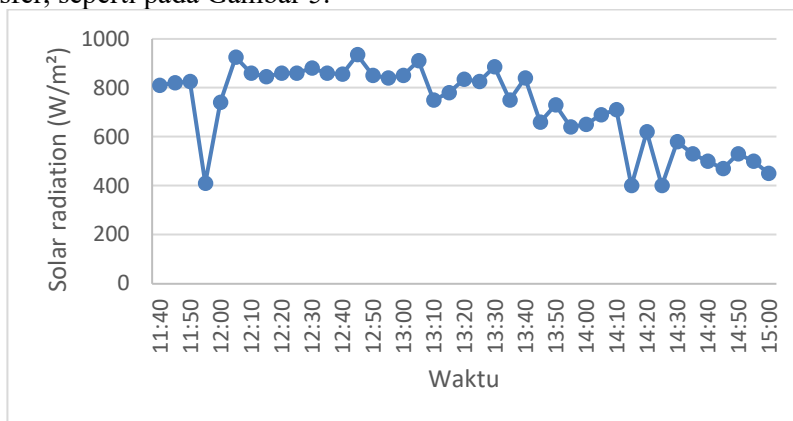
Pada pengujian lain dilakukan pada modul PV dari jenis dan spesifikasi yang sama tanpa perlakuan kondisi tekanan negative. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan respon suhu, arus dan tegangan modul PV dengan dan tanpa pendinginan pada tingkat radiasi tertentu. Parameter seperti tingkat radiasi, temperature luar casing, temperatur udara sekitar, arus dan tegangan keluaran juga dimonitor secara real time dengan menggunakan sensor yang sama dan disimpan pada data logger.



Gambar 3. Diagram skema Pengujian Experimental Set up

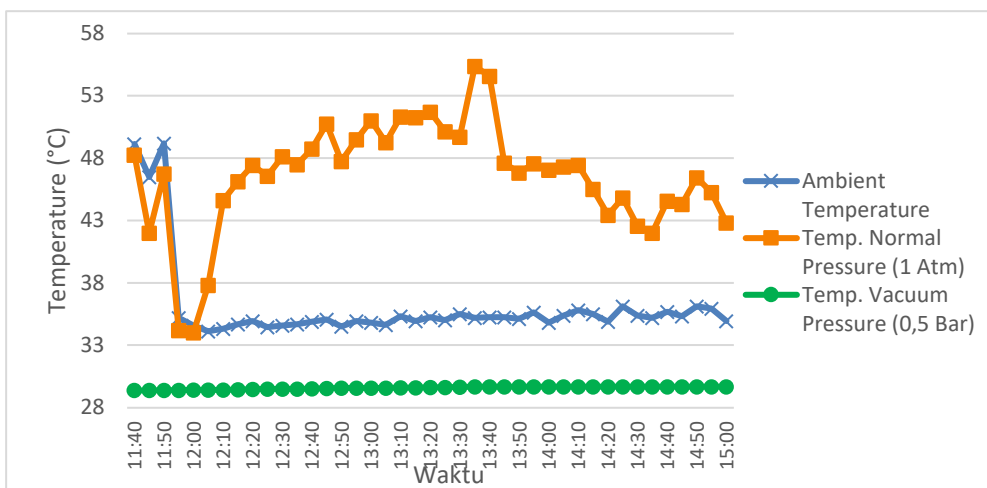
4. Hasil dan Pembahasan

Cuaca di lokasi penelitian yaitu Kota Makassar sangat cerah dengan tingkat radiasi yang tinggi berkisar antara 700 w/m² hingga 950 w/m² pada jam 11.00 sampai dengan jam 15.00 waktu setempat, seperti terlihat pada gambar 4. Temperatur udara sekitar objek penelitian pada periode waktu percobaan berkisar (35-36) °C, pada tekanan 1 atmosfer, seperti pada Gambar 5.



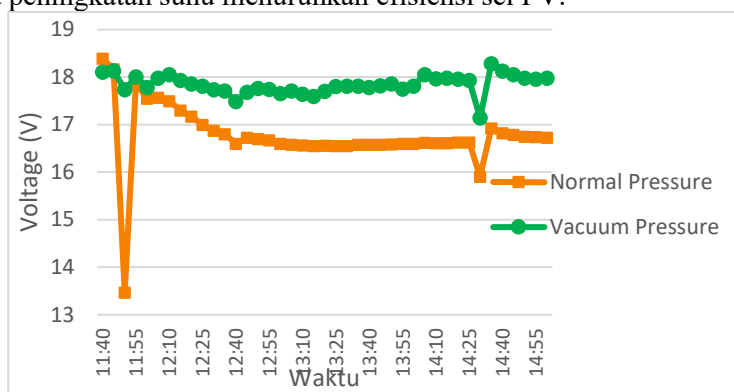
Gambar 4. Tingkat radiasi matahari pada kondisi puncak

Setelah mendapat paparan radiasi matahari terhadap objek penelitian, maka terdapat perbedaan temperatur permukaan panel dalam kondisi vakum dengan temperatur permukaan panel PV pada kondisi normal (tekanan atmosfer). Gambar 5 menunjukkan temperatur permukaan atas panel PV pada kondisi tekanan normal berkisar antara (44-45) °C, sedangkan temperatur permukaan atas panel PV pada kondisi tekanan vakum berkisar antara (29-30) °C. Ini konsisten dengan teori Gay Lussac, di mana jika tekanan udara turun maka suhunya juga turun pada volume tertentu.



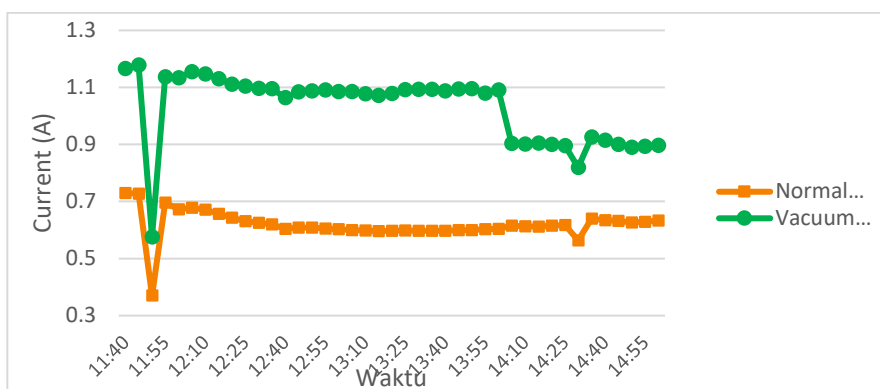
Gambar 5. Kondisi perbedaan temperature Cell PV dan udara luar

Tingkat produksi listrik yang dihasilkan oleh kedua panel dengan tingkat radiasi yang sama berbeda karena efek temperature. Produksi listrik yang dihasilkan oleh panel PV dalam kondisi vakum lebih besar daripada listrik yang dihasilkan oleh panel PV dalam kondisi normal. Hal ini sesuai dengan hasil beberapa peneliti sebelumnya [5], bahwa peningkatan suhu menurunkan efisiensi sel PV.



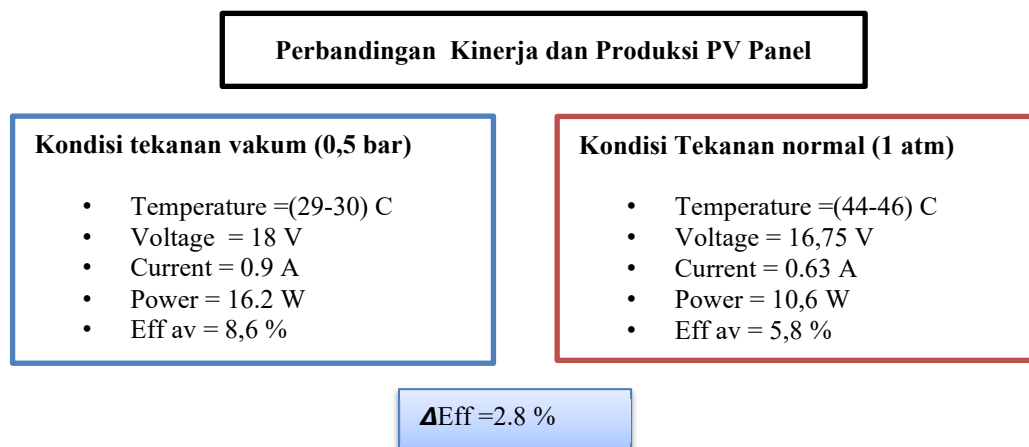
Gambar 6. Perbandingan Tegangan keluaran dari cell PV

Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa tegangan keluaran rata-rata panel dalam kondisi tekanan vakum rata-rata menghasilkan 18 Volt, sedangkan tegangan keluaran panel pada tekanan atmosfer berkisar 16,75 Volt. Demikian juga arus yang dihasilkan oleh panel di bawah tekanan vakum lebih besar dibandingkan arus yang dihasilkan oleh panel PV pada tekanan atmosfer. Terlihat pada Gambar 7, dimana arus yang dihasilkan panel PV pada tekanan 1 atm hanya berkisar antara 0,625 ampere, sedangkan arus keluaran pada panel dalam kondisi vakum berkisar antara 0,89 ampere hingga 0,91 ampere.



Gambar 7. Perbandingan keluaran arus panel PV

Pada kondisi tekanan yang berbeda (dengan tingkat radiasi yang sama), maka panel yang berada dalam kondisi tekanan vakum 0.5 bar dengan temperature permukaan berkisar (29 sampai 30) °C, mempunyai efisiensi lebih besar dibandingkan dengan panel PV yang berada pada kondisi referens (tekanan normal 1 atm).



Dari tabel diatas diperoleh perbedaan efisiensi sebesar 2, 8 % jika panel PV dikondisikan pada tekanan vakum dibandingkan dengan tidak dilakukan perlakuan atau berada pada kondisi normal tekanan 1tm. Hal ini akan menyebabkan produksi listrik yang dihasilkan akan lebih besar jika panel PV dikondisikan pada tekanan vakum.

5. Kesimpulan

Teknik pendinginan sel PV telah dilakukan dengan mengkondisikan panel dalam kondisi vakum untuk menerapkan hukum Gay Lussac. Hasil percobaan menunjukkan bahwa suhu sel PV yang terkena radiasi matahari intensitas tinggi dapat diturunkan karena benda berada dalam media vakum. Oleh karena itu, dalam kondisi tingkat radiasi yang tinggi, efisiensi sel PV tetap dapat dipertahankan untuk bekerja secara optimal. Dengan metode pendinginan ini, suhu sel PV dapat diturunkan di bawah suhu udara sekitar. Biaya investasi tambahan untuk pengkondisian sel PV di bawah vakum akan dievaluasi dalam studi berikutnya.

6. Ucapan Terima Kasih

Riset ini didukung oleh hibah dari Direktorat Vokasi Pendidikan Tinggi Indonesia dan Kontrak no. 087/SPK/D4/PPK.01.APTV/VI/2022.

Daftar Pustaka

- [1] REN21 2018, Renewables 2018 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat)
- [2] NREL <https://www.nrel.gov/pv/>
- [3] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, Warta W and Dunlop E. D., 2016, Solar cell efficiency tables (version 47) Prog Photovolt: Res Appl 24 pp. 3–11
- [4] Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, El-Sherif, H.A. H. 2013, Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, Ain Shams Engineering Journal,
- [5] Rodrigues EMG, Melicio R, Mendes VMF, Catalao JPS., 2011, Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model. In: International conference on renewable energies and power quality, Spain.
- [6] A G Lupu, V M Homutescu, D T Balanescu and A Popescu, 2016, A review of solar photovoltaic systems cooling technologies, The 8th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, doi:10.1088/1757-899X/444/8/082016.
- [7] Tian H, Mancilla-David F, Ellis K, Muljadi E and Jenkins P., 2012, A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels Sol Energy 86 pp 2695-2706.
- [8] Alonso Garcia MC, Balenzategui JL., 2018, Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculation. Renewable Energy.
- [9] Cuce, E., Bali, T., and Sekucoglu, S. A., , 2017, Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells, International Journal of Low-Carbon Technologies.p 299–308
- [10] Mazón-Hernández, R. et al. Improving the Electrical Parameters of a Photovoltaic Panel by Means of an Induced or Forced Air Stream, International Journal of Photoenergy, 2013.
- [11] Hassan, A., 2010, Phase Change Materials for Thermal Regulation of Building Integrated Photovoltaics, Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology.
- [12] Maiti, S., et al., Self-regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix, Solar Energy, 1805–1816.

- [13] Smith, C. J., et al., 2014, Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling, *Applied Energy* 126, p21–28.
- [14] Rosa-Clot, M., et al., 2010, Submerged photovoltaic solar panel: SP2, *Renewable Energy* 35 p.1862–1865
- [15] El-Seesy, I. E., Khalil, T., Ahmed, M. T., 2012, Experimental Investigations and Developing of Photovoltaic/Thermal System, *World Applied Sciences Journal* 19(9), p1342-1347.
- [16] Chandrasekar, M., et al., 2013, Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures, *Energy Conversion and Management* 71, p 43–50.
- [17] Alami, A. H., 2014, Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules, *Energy Conversion and Management* 77, p 668–679.
- [18] Han, X., Wang, Y., Zhu, L., 2013, The Performance and Long-term Stability of Silicon Concentrator Solar Cells Immersed in Dielectric Liquids, *Energy Conversion and Management* 66, p 189–198.
- [19] Teo, H.G., Lee, P.S., Hawlader M.N.A., An active cooling system for photovoltaic modules, *Applied energy* 90 (2012) 309–315.
- [20] Farhana, Z., et al., 2012, Experimental Investigation of Photovoltaic Modules Cooling System, *IEEE Symposium on Computers & Informatics*.
- [21] Arcuri, N., Reda, F., De Simone, 2014, Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air, *Solar Energy* 105 147–156.
- [22] Hosseini, R., Hosseini, N., Khorasanizadeh, H. 2011, An Experimental Study of Combining a Photovoltaic System with a Heating System, *World Renewable Energy Congress*, – Sweden.
- [23] Du, B., Hu, E., Kolhe, M. 2012, Performance Analysis of Water Cooled Concentrated Photovoltaic (CPV) System, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 6732–6736.
- [24] Bahaidarah, H., 2013, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy* 59 445-453.