

# Pengaruh Penggunaan Pendingin Air Terhadap Output Panel Surya Pada Sistem Tertutup

Ida Bagus Gde Widiantara<sup>✉</sup>, Nyoman Sugiarta

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali

<sup>✉</sup>bagusgdewidiantara@pnb.ac.id

**Abstrak:** Energi surya adalah sebuah sumber energi yang tidak terbatas ketersediaannya, ramah lingkungan dan di Indonesia persediannya sangat melimpah. Radiasi matahari di Indonesia rata-rata 4,8 kWh per meter persegi/hari tetapi kapasitas terpasang pada saat ini adalah 16,02 MW dan pemerintah menargetkan menjadi 6,4 GW tahun 2025. Salah satu kendala dalam penerapan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah rendahnya efisiensi dari panel surya serta kendala dalam penyimpanannya agar dapat dipergunakan pada malam hari. Pancaran energi matahari tidak seluruhnya diubah menjadi energi dimana terdapat pula energi panas. Melihat efektifitas panel surya bekerja pada suhu 25 derajat Celcius maka timbul keinginan untuk memanfaatkan panas lebih yang dihasilkan dengan mendinginkan panel surya dengan menyemprotkan air pada bagian bawah permukaannya. Hasil pengujian di dalam ruangan menunjukkan bahwa rancangan berjalan dengan baik dan diperoleh peningkatan daya luaran panel sebesar 4 W pada intensitas cahaya lampu 1000 W per meter persegi sedangkan pada intensitas cahaya yang lebih kecil yaitu 600 W per meter persegi, menunjukkan penurunan daya luaran panel sebesar 1 W. Melihat hasil tersebut penggunaan pendingin pada panel surya belum efektif karena terdapat penggunaan daya listrik untuk menghidupkan sistem pendingin sebelum panel surya mulai digunakan untuk mencapai suhu permukaan panel surya sebesar 25 derajat Celcius.

**Kata kunci:** energi surya, pembangkit listrik tenaga surya, pendinginan

**Abstract:** Solar energy is a renewable energy that is not limited to availability, environmentally friendly and in Indonesia is very abundant. Solar radiation in Indonesia averages 4.8 kWh per square meter /day but the installed capacity at present is 16.02 MW and the government is targeting to be 6.4 GW by 2025. One of the obstacles in applying solar power plant is the low efficiency of solar panels itself and constraints in storage so that it can be used at night. The radiant of solar energy is not entirely converted into energy where there is also thermal energy because the effectiveness of solar panel working is 25 degree Celcius. Hence, there are a desire to utilize the more heat generated by cooling the solar panel by spraying water on the bottom surface of the solar panel. The indoor test results show that the design went well and obtained an increase in output power of 4 W at a light intensity of 1000 W per square meter with cooling whereas at a smaller light intensity of 600 W per square shows a decrease of power by 1 W in the solar panel output. From these results, it seems that the use of cooling in solar panel is less useful due to the electrical power usage to turn on the cooling system before running the solar panel to achieve a surface temperature of 25 degree Celcius.

**Keywords:** cooling, solar energy, solar power plant

## I. PENDAHULUAN

Energi surya adalah sebuah sumber energi yang relatif tidak terbatas ketersediaannya, ramah lingkungan dan energi ini dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif yang akan diubah menjadi energi listrik. Menurut BPPT [1] Indonesia berada di daerah khatulistiwa dengan radiasi matahari rata-rata 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari memiliki potensi yang besar untuk penerapan PLTS. Potensi ini setara dengan kapasitas PLTS sebesar 112.000 GWp. Namun menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) kapasitas PLTS yang terpasang di Indonesia masih sangat kecil, yaitu baru mencapai 16,02 MW sampai dengan tahun 2016, sedangkan target penerapan PLTS oleh Kementerian ESDM adalah 6,4 GW pada tahun 2025 [2]. Untuk itu peluang untuk penerapan instalasi PLTS oleh masyarakat luas dan industri sangatlah terbuka. Melihat peluang tersebut, Politeknik Negeri Bali juga telah memasukkan dalam Rencana

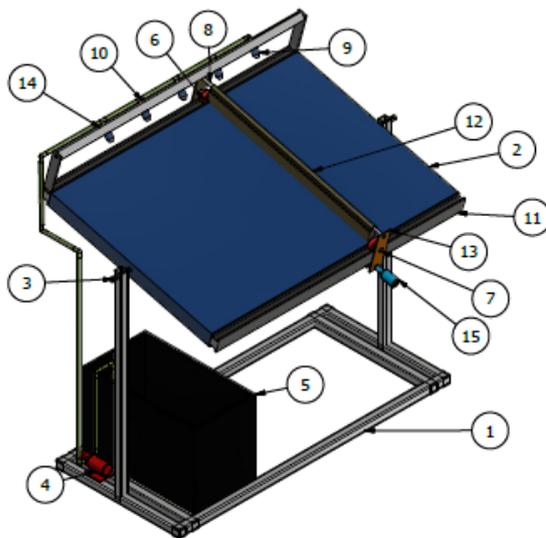
Induk Penelitian Politeknik Negeri Bali 2016-2020 [3] sebagai salah satu isu strategis dalam bidang keilmuan teknik adalah: "Teknologi berkelanjutan dengan energi baru dan terbarukan" dalam hal ini mengoptimalkan energi panas matahari yang ada di Indonesia.

Panel surya rata-rata mempunyai efektifitas kerja yang baik pada suhu 25 °C (sumber spesifikasi panel) sedangkan suhu rata-rata di Indonesia berkisar antara 30-35 °C. Mengingat hal tersebut perlu adanya pendinginan untuk menjaga efektifitas kerja panel surya. Dari penelitian terdapat beberapa variabel yang dapat direncanakan untuk mengoptimalkan penggunaan panel surya seperti pengaruh pendinginan panel surya pada sistem tertutup dengan pendingin air, analisis panas air pendingin serta pemanfaatan panas air pendinginan pada panel surya serta kemungkinan-kemungkinan lain mengingat suhu yang terlalu panas pada permukaan panel surya justru akan mengurangi kinerja dari panel surya atau yang sering disebut efek termal [4].

### A. State of the Art

Gambar 1 menunjukkan skematik rancang bangun purwarupa sistem pembersih dan pendingin panel surya yang terintegrasi dalam sistem PLTS *off-grid*. Sistem PLTS *off-grid* memiliki komponen utama, yaitu panel surya dan *balance of system* (BOS) seperti: *solar charge controller* (SCC), baterai dan DC/AC *inverter*.

Dalam penelitian ini, sistem pendingin panel surya dilengkapi juga dengan sistem pembersih (*wiper* sebagai piranti pembersih panel) dimana sistem pembersih ini dikerjakan dalam penelitian lain (Gambar 1). Dengan kata lain sistem pembersih dan pendingin yang dirancang merupakan sebuah rancang bangun secara terintegrasi dengan berfungsi secara semi otomatis. Sistem sirkulasi air adalah tertutup yang terdiri dari pompa, *check valve*, *stop valve*, pemipaan atau selang, tangki penyimpanan air dan filter. Air kotor yang bercampur dengan debu dari hasil pembersihan ditampung dan disalurkan kembali ke tangki penyimpanan air setelah sebelumnya dilewatkan pada sebuah filter. Deretan nosel jet dipasang di bawah panel dan menyemprotkan air tegak lurus terhadap panel surya.



**Gambar 1.** Skematik rancangan sistem pendingin panel surya

Keterangan:

No	Jumlah	Deskripsi
1	1	Dinamo
2	1	Dudukan Spray
3	2	Penyangga Roda
4	1	Pembersih Panel
5	2	Rel
6	1	Selang
7	5	Spray
8	1	Karet Wiper
9	4	As Roda
10	4	Roda
11	1	Supply
12	1	Pompa
13	1	As Panel
14	1	Panel
15		Rangka

Pembersihan dan pendinginan permukaan panel surya secara teratur merupakan salah satu strategi operasional pada sistem PLTS untuk meningkatkan daya luaran dan efisiensi sistem. Abdolzadeh dan Ameri [5] mengembangkan sistem pendinginan untuk permukaan atas panel surya menggunakan sistem semprot (*spray*). Mereka menggunakan panel surya tipe *polycrystalline* ( $45 \times 2$  W) dengan efisiensi 13,5 % dan sebuah pompa air dengan motor DC permanen. Daya yang dihasilkan panel surya juga digunakan untuk menggerakkan motor pompa yang memiliki kapasitas maksimum 1000 L/h dan *head* maksimum 45 m untuk memompakan air dari tangki. Untuk menyemprotkan air pada bagian atas maka sebuah pipa dengan lubang-lubang kecil ditempatkan pada bagian atas panel surya dan pada bagian bawah panel dengan menggunakan nosel sebagai alat penyemprotnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan semprotan air pada permukaan atas panel surya maka efisiensi panel surya, subsistem dan total meningkat sebesar 3,26 %, 1,4 % dan 1,35 % dengan *head* pompa 16 m.

Sementara itu Rahimi *et al.* [6] menggunakan dua jenis *micro-channel* yaitu dengan *header* tunggal dan *multi header* dengan diameter hidrolis yang sama untuk mengalirkan air pendingin pada permukaan bawah panel surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur rata-rata panel surya pada *header* tunggal lebih tinggi dibandingkan dengan pada *multi header*. Sedangkan pelepasan panas pada *multi header* lebih tinggi 19% jika dibandingkan dengan *header* tunggal. Schiro *et al.* [7] mengembangkan sebuah model *steady-state* sebuah sistem penyemprotan air untuk mendinginkan panel surya dan melakukan pengujian eksperimental. Mereka menggunakan sebuah panel surya kapasitas 220 W berukuran 1,6 m<sup>2</sup>, satu pipa distribusi dengan 7 buah nosel dan sistem pemompaan air dengan tangki. Penyemprotan hanya dilakukan pada bagian permukaan atas panel surya. Dengan berdasarkan tipe nosel, posisi nosel dan laju aliran air maka fenomena pecahnya lapisan *film* air, konsentrasi aliran lokal air dan pembentukan *droplet* lokal dapat diamati dan hasil terbaik yang diperoleh adalah dengan menempatkan 9 buah nosel dan sudut sebaran air 90<sup>0</sup> dengan total aliran air sebesar 0,09 L/(s.m<sup>2</sup>).

Smith *et al.* [8] menggunakan sistem pemompaan air untuk membersihkan dan mendinginkan panel surya. Mereka menggunakan sebuah *head emitter* yang diletakkan di atas panel surya untuk menyemprotkan air. Dengan cara ini temperatur panel dapat dipertahankan di bawah 40 °C. Di samping peningkatan efisiensi, permukaan panel yang bersih juga diperoleh dengan menggunakan teknik ini. Niz'etic' *et al.* [4] menggunakan teknik semprotan air pada kedua sisi panel surya secara simultan. Peningkatan daya luaran dan efisiensi panel surya masing-masing sebesar 16,3 % dan 14,1 % diperoleh pada kondisi radiasi matahari maksimum sedangkan penurunan temperatur panel adalah dari 54 °C menjadi 24 °C. Baloch *et al.* [9] mengembangkan sistem pendinginan inovatif

menggunakan penukar kalor dengan saluran konvergen pada bagian bawah panel surya. Mereka menemukan bahwa sudut konvergensi saluran sebesar  $2^{\circ}$  memberikan distribusi temperatur dan temperatur rata-rata panel surya yang terbaik. Daya luaran dan efisiensi meningkat sebesar 35,5 % dan 36,1 % dan temperatur panel menurun dari 48,3 °C menjadi 36,4 °C. Di samping itu biaya energi berkurang hingga 19 %.

### B. Komponen Sistem Panel Surya

Berikut adalah komponen kelistrikan sistem panel surya:

1. Modul panel surya  
Panel surya atau *solar cells* adalah komponen utama pada pembangkit listrik tenaga surya. *Solar cells* berfungsi untuk merubah tenaga matahari menjadi listrik. Tanpa komponen ini energi listrik tidak dapat dihasilkan.
2. Solar Charge Controller (SCC)  
*Solar charge controller* adalah komponen di dalam sistem PLTS berfungsi sebagai pengatur arus listrik (*current regulator*) baik terhadap arus yang masuk dari panel maupun arus keluar atau arus yang digunakan. Bekerja untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan (*overcharge*), ini mengatur tegangan dan arus dari panel surya ke baterai. Fungsi dan fitur *solar charge controller* sebagai berikut: Saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka *controller* akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah *overcharge*, dengan demikian ketahanan baterai akan jauh lebih tahan lama. Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka *controller* berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban. Dalam kondisi tegangan tertentu (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), maka pemutusan arus beban dilakukan oleh *controller*. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel-sel baterai. Pada *controller* tipe-tipe tertentu dilengkapi dengan tampilan digital meter dengan indikator yang lebih lengkap untuk memonitor berbagai macam kondisi yang terjadi pada sistem PLTS agar dapat terdeteksi dengan baik.
3. Svs Inverter  
Inverter adalah alat yang merupakan rangkaian komponen elektronika yang digunakan untuk mengubah arus DC (*direct current*) menjadi arus AC (*alternating current*). Inverter dapat dijumpai pada berbagai jenis peralatan elektronika. Tanpa alat ini arus DC yang dihasilkan oleh panel surya tidak dapat digunakan secara langsung oleh peralatan listrik yang membutuhkan arus AC sebagai sumber daya utamanya.

### C. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Terdapat beberapa hal yang mempengaruhi kinerja panel surya dalam menghasilkan daya. Kondisi iklim

(awan dan kabut) mempunyai efek yang signifikan. Hal lain yang sangat penting untuk diperhatikan agar efisiensi kinerja panel surya dapat dimaksimalkan.

1. Temperatur panel surya  
Tegangan listrik yang dihasilkan oleh suatu panel surya tidak hanya tergantung kepada besarnya intensitas radiasi yang diterimanya, namun kenaikan temperatur pada permukaan panel surya juga dapat menurunkan besar tegangan listrik tersebut. Untuk mengatasi hal ini, cara pemasangan panel surya harus diperhatikan. Berikan ruang yang cukup di bawah panel surya, sehingga aliran udara dapat menurunkan suhu panel surya pada saat suhu udara dalam puncak tertinggi.
2. Radiasi matahari  
Semakin besar intensitas penyinaran matahari, maka semakin tinggi kinerja panel surya. Apabila jumlah energi cahaya matahari yang diterima panel surya berkurang atau intensitas cahayanya melemah maka besar tegangan dan arus listrik yang dihasilkan juga akan menurun. Secara umum untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari di Indonesia. Saat ini telah terdapat sebuah aplikasi yang dapat menentukan pola atau gerak sinar matahari dimana panel surya akan dipasang.
3. Kecepatan angin  
Kecepatan tiup angin di sekitar lokasi panel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca panel surya. Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari panel surya.
4. Bayangan  
Lokasi terbaik adalah posisi yang tidak memiliki objek penghalang yang dapat menghasilkan bayangan pada panel surya terpasang. Terutama untuk penggunaan panel tipe polycrystalline, bayangan dapat mempengaruhi produksi daya keseluruhan yang dihasilkan panel surya.
5. Posisi atau kemiringan panel surya  
Orientasi dari panel surya ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut kemiringan dari panel surya juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. Sedangkan untuk kemiringan panel surya yang disarankan di Indonesia adalah antara  $5^{\circ}$  hingga  $15^{\circ}$ .

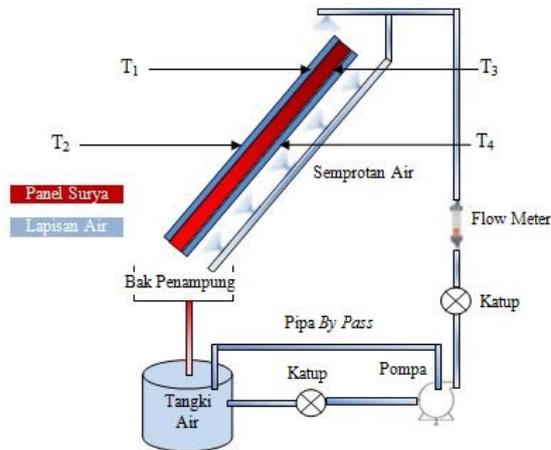
## II. METODE PENELITIAN

### A. Jenis dan Rancangan Penelitian

Jenis penelitian ini merupakan perpaduan antara penelitian rancang bangun yaitu purwarupa sistem pembersih dan pendingin panel surya dan penelitian eksperimental kinerja sistem panel surya *off-grid* untuk kondisi berdebu dan setelah dibersihkan.

Penelitian rancang bangun berupa perancangan, pembuatan dan pengujian sebuah sistem PLTS off-grid dengan panel surya yang dilengkapi dengan sistem

pembersihan dan pendinginan menggunakan teknik semprotan air. Tahapan rancang bangun sebagai berikut: Studi literatur tentang beberapa teknik dan desain semprotan air (*nozzle jet*), menyusun spesifikasi komponen-komponen dalam sistem, dan membuat rancangan sistem menggunakan program Autocad.



**Gambar 2.** Rancangan sistem pendingin panel surya.

Rancangan sistem pembersihan dan pendinginan panel surya dilengkapi dengan sistem pemompaan air dan tangki penyimpanan air serta deretan nosel yang tersusun pada pipa *header* yang diletakkan pada bagian permukaan atas panel surya (Gambar 2). Proses pembersihan dan pendinginan dilakukan secara simultan dengan menggunakan kontrol *switch* pompa.

Dalam penelitian ini data yang diambil adalah intensitas radiasi cahaya, temperatur dan kelembaban lingkungan, temperatur permukaan panel, tegangan dan arus listrik keluar panel. Prototipe diuji di dalam ruangan (*indoor*) menggunakan simulator cahaya lampu halogen.

#### B. Identifikasi Variabel

Variabel penelitian terdiri atas variabel terikat dan variabel bebas. Parameter yang termasuk dalam variabel terikat: energi dan daya output sistem PLTS, temperatur permukaan panel surya. Sedangkan parameter yang merupakan variabel bebas adalah: temperatur dan kelembaban lingkungan, intensitas cahaya lampu dan debit air.

#### C. Instrumen Penelitian

Instrumen dan perlengkapan penelitian yang diperlukan dan digunakan dalam penelitian ini adalah program Autocad untuk desain konstruksi sistem pembersihan dan pendinginan panel surya dengan *nozzle jet*. Pencatatan data temperatur dan kelembaban udara menggunakan termometer dan higrometer digital. Tang amper dan multimeter untuk pengukuran tegangan dan arus listrik sedangkan solar power meter untuk mengukur intensitas cahaya lampu halogen.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Perancangan Purwarupa Alat dan Pemilihan Komponen

Setelah melakukan survei dan studi literatur terhadap berbagai metode pembersihan dan pendinginan panel surya, langkah selanjutnya adalah melakukan perancangan purwarupa alat. Komponen-komponen utama purwarupa sistem pembersih dan pendingin panel surya ditentukan secara purposive dan berdasarkan ketersediaannya di pasaran.

Purwarupa sistem pendinginan panel surya ditunjukkan pada Gambar 3. Panel surya yang dipilih sebagai obyek utama dalam penelitian ini adalah tipe polycrystalline kapasitas 120 Wp dengan spesifikasi dan dimensi (1225 mm × 665 mm × 30 mm), nosel air, pompa air DC 12V, 60-65W dilengkapi rotameter dengan tekanan 220-280 kPa, jangkauan semprot 0,7-0,9 m dan debit 8-10 L/jam.

#### B. Hasil Pengujian

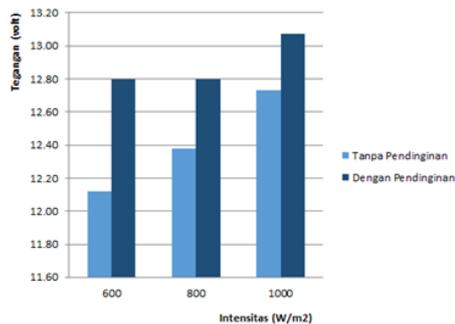
Pada pembahasan ini akan penulis menampilkan gabungan data yang merupakan rata-rata dari data pada Tabel 1 untuk membandingkan arus, tegangan dan daya. Untuk mencapai suhu efektif kerja solar panel sebesar 25 °C diperlukan waktu yang cukup lama dan media pendingin (air) yang cukup banyak sebesar 2,5 L/menit dimana dengan intensitas cahaya sebesar 600 W/m<sup>2</sup> diperlukan waktu kurang lebih 30 menit untuk mencapai suhu tersebut mengingat suhu ruangan sudah lebih tinggi dari 25 °C yaitu sebesar 27 °C. Demikian pula halnya untuk intensitas yang lebih tinggi yaitu diperlukan waktu berturut-turut sebesar 1 jam dan 2,5 jam untuk mendinginkan solar panel sebelum akhirnya permukaan solar panel mempunyai kisaran suhu efektif kerja sebesar 25 °C.



**Gambar 3.** Purwarupa pendingin panel surya.

**Tabel 1.** Data perbandingan perolehan tegangan.

	Tegangan (V)		
	600	800	1000
Intensitas cahaya (W/m <sup>2</sup> )	600	800	1000
Tanpa pendinginan	12,12	12,38	12,73
Dengan pendinginan	12,79	12,80	13,08

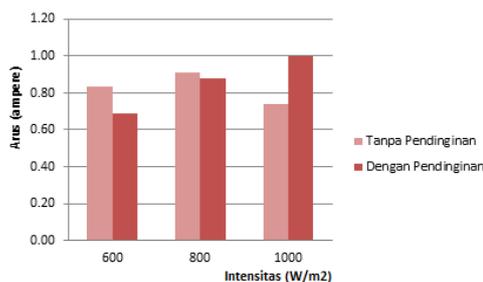


**Gambar 4.** Perbandingan perolehan tegangan pada intensitas cahaya tertentu dengan dan tanpa pendinginan.

Gambar 4 menunjukkan bahwa perolehan tegangan dengan pendinginan meningkat dibandingkan dengan tanpa pendinginan yaitu sebesar 0,4 V pada intensitas cahaya 600 W/m<sup>2</sup> dan 800 W/m<sup>2</sup> dan 0,2 V pada intensitas cahaya 1000 W/m<sup>2</sup>.

**Tabel 2.** Data perbandingan perolehan arus.

Intensitas cahaya (W/m <sup>2</sup> )	Arus (A)		
	600	800	1000
Tanpa pendinginan	0,84	0,91	0,74
Dengan pendinginan	0,69	0,88	1,00

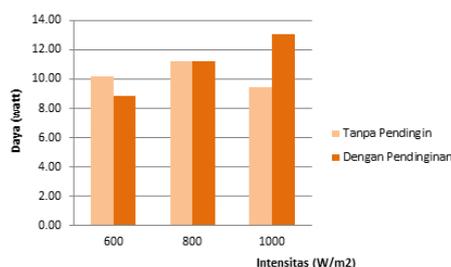


**Gambar 5.** Perbandingan perolehan arus pada intensitas cahaya tertentu dengan dan tanpa pendinginan.

Demikian juga halnya dengan arus seperti diperlihatkan pada Gambar 5, diperoleh arus yang lebih besar pada intensitas cahaya 1000 W/m<sup>2</sup> sebesar 1 A tetapi pada kondisi intensitas 600 W/m<sup>2</sup> dan 800 W/m<sup>2</sup> diperoleh arus yang lebih rendah.

**Tabel 3.** Data perbandingan perolehan daya.

Intensitas cahaya (W/m <sup>2</sup> )	Daya (W)		
	600	800	1000
Tanpa pendinginan	10,15	11,24	9,42
Dengan pendinginan	8,82	11,25	13,03



**Gambar 6.** Perbandingan perolehan daya pada intensitas cahaya tertentu dengan dan tanpa pendinginan.

Gambar 6 menunjukkan bahwa perolehan daya sebesar 13 W pada intensitas cahaya 1000 W/m<sup>2</sup> walaupun pada intensitas cahaya yang lebih rendah yaitu 600 W/m<sup>2</sup> diperoleh penurunan daya sampai dengan 9 W.

Melihat fenomena yang terjadi bahwa terjadi peningkatan daya pada intensitas cahaya yang lebih tinggi tetapi tidak terlalu signifikan mengingat daya yang harus dikeluarkan untuk mendinginkan panel cukup besar pula tentunya ini akan berakibat pada pemborosan energi perolehan oleh panel surya.

#### IV. KESIMPULAN

Dari kegiatan yang telah dilaksanakan dapat ditarik simpulan bahwa efek pendinginan pada sel surya dapat berjalan dengan baik tetapi melihat dari segi efisiensi penggunaan energi tidak begitu menguntungkan. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh peningkatan daya sebesar 4 W pada intensitas 1000 W/m<sup>2</sup> dengan pendinginan tetapi pada intensitas cahaya yang lebih kecil, 600 W/m<sup>2</sup>, menunjukkan penurunan daya sebesar 1 W pada luaran panel surya. Hal lain yang diperoleh adalah penggunaan pendingin pada panel surya belum efektif mengingat terdapat penggunaan daya listrik untuk menghidupkan sistem pendingin sebelum sel surya mulai digunakan untuk memperoleh suhu permukaan sel surya sebesar 25 °C.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPPT, *Outlook energy Indonesia 2017*, Jakarta: BPPT, 2017.
- [2] Ministry of Energy and Mineral Resources of Republic of Indonesia (MEMR), *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2017*, Jakarta: MEMR, 2017.
- [3] P3M PNB, *Rencana induk penelitian (RIP) Politeknik Negeri Bali 2016-2020*, Politeknik Negeri Bali, 2016.
- [4] S. Niz'etic', D. C'oko, A. Yadav, and F.G. C'abo, "Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response", *Energy Conversion and Management*, pp. 287-296, 2016.
- [5] M. Abdolzadeh and M. Ameri, "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells", *Renewable Energy*, pp. 91-96, 2009.
- [6] M. Rahimi, M. Asadi, and N. Karami, "A comparative study on using single and multiheader microchannels in a hybrid PV cell cooling", *Energy Conversion and Management*, pp. 1-8, 2015.
- [7] F. Schiro, A. Benato, A. Stoppato, and N. Destro, "Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach", *Energy*, pp. 798-810, 2017.

- [8] M.K. Smith, H. Selbak, C.C. Wamser, N.U. Day, M. Krieske, D.J. Sailir, and T.N. Rosenstiel, "Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules, *Journal of Solar Energy Engineering*, pp. 034503-1 - 034503-4, 2014.
- [9] A.A.B. Baloch, H.M.S. Bahaidarah, and P. Gandhidasan, "Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling, *Energy Conversion and Management*, pp. 14-27, 2015.