

**PENGARUH GEOMETRI LUBANG *NOZZLE* PADA
SISTEM PENDINGIN *WATER SPRAY* UNTUK MENINGKATKAN
PERFORMA *PHOTOVOLTAIC***

TESIS

Disusun untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Mencapai Gelar Magister

Program Studi Teknik Mesin



Oleh:

SANTIKO WIBOWO

NIM S952108008

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA**

2024

**PENGARUH GEOMETRI LUBANG *NOZZLE* PADA
SISTEM PENDINGIN *WATER SPRAY* UNTUK MENINGKATKAN
PERFORMA *PHOTOVOLTAIC***





TESIS

Oleh:

SANTIKO WIBOWO

NIM S952108008

Tim Penguji

Jabatan	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
Ketua Penguji	Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, S.T., M.T. NIP. 197303082000031001		25/03 2024
Anggota Penguji	Dr. Ir. Rendy Adhi Rachmanto, S.T., M.T. NIP. 197101192000121006		14/3'2024
	Prof. Dr. Ir. Dwi Aries Himawanto S.T., M.T. NIP. 197403262000031001		20/3 '2024
	Dr. Ir. Wibawa Endra Juwana, S.T., M.T. NIP. 197009112000031001		26/3 2024

Telah dinyatakan memenuhi syarat
pada tanggal 27 Maret 2024

Dekan

Fakultas Teknik UNS



Dr. techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T.

NIP. 196710011997021001

PERNYATAAN KEASLIAN DAN PERSYARATAN PUBLIKASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa :

1. Tesis yang berjudul: **“PENGARUH GEOMETRI LUBANG *NOZZLE* PADA SISTEM PENDINGIN *WATER SPRAY* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA *PHOTOVOLTAIC*”** ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik serta tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis dengan acuan yang disebutkan sumbernya, baik dalam naskah karangan dan daftar pustaka. Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, maka saya bersedia menerima sanksi, baik tesis beserta gelar Magister saya dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.
2. Publikasi sebagian atau keseluruhan isi tesis pada jurnal atau forum ilmiah harus menyertakan tim pembimbing sebagai author dan Pascasarjana UNS sebagai institusinya. Apabila saya melakukan pelanggaran dari ketentuan publikasi ini, maka saya bersedia mendapatkan sanksi akademik yang berlaku.

Surakarta, 27 Februari 2024

Mahasiswa,



Santiko Wibowo

S952108008

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan ridho, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan tesis yang berjudul **“PENGARUH GEOMETRI LUBANG *NOZZLE* PADA SISTEM PENDINGIN *WATER SPRAY* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA *PHOTOVOLTAIC*”** dalam kurun waktu yang sudah ditentukan. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Mesin di Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

Penulis menyadari bahwa terselesainya tesis ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan arahan dari berbagai pihak. Maka dari itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
2. Dr. Nurul Muhayat, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
3. Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Pembimbing Akademik yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan selama proses penyusunan Tesis.
4. Dr. Ir. Rendy Adhi Rachmanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang turut memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan selama proses penyusunan Tesis.
5. Prof. Dr. Ir. Dwi Aries Himawanto S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Tesis yang turut memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan selama proses penyusunan Tesis.
6. Dr. Ir. Wibawa Endra Juwana, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Tesis yang turut memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan selama proses penyusunan Tesis.

7. Seluruh Dosen Magister Teknik Mesin Program Pascasarjana Universitas Sebelas Maret Surakarta yang telah memberikan bimbingan, ilmu, inspirasi, serta motivasi selama proses perkuliahan.
8. Segenap keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan penuh kepada penulis.
9. Rekan-rekan sejawat di prodi S1, S2 dan S3 Teknik Mesin UNS.

Penulis berharap semoga tesis ini dapat menjadi sumber inspirasi bagi pembaca sebagai tambahan wacana ilmu pengetahuan dan teknologi. Penulis juga menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna dikarenakan banyaknya kekurangan selama proses penyusunan. Maka dari itu, penulis mengharapkan saran dan kritikan yang bersifat membangun dari pihak-pihak yang membaca demi kesempurnaan penyusunan tesis ini.

Surakarta, 27 Februari 2024

Mahasiswa,



Santiko Wibowo

NIM S952108008

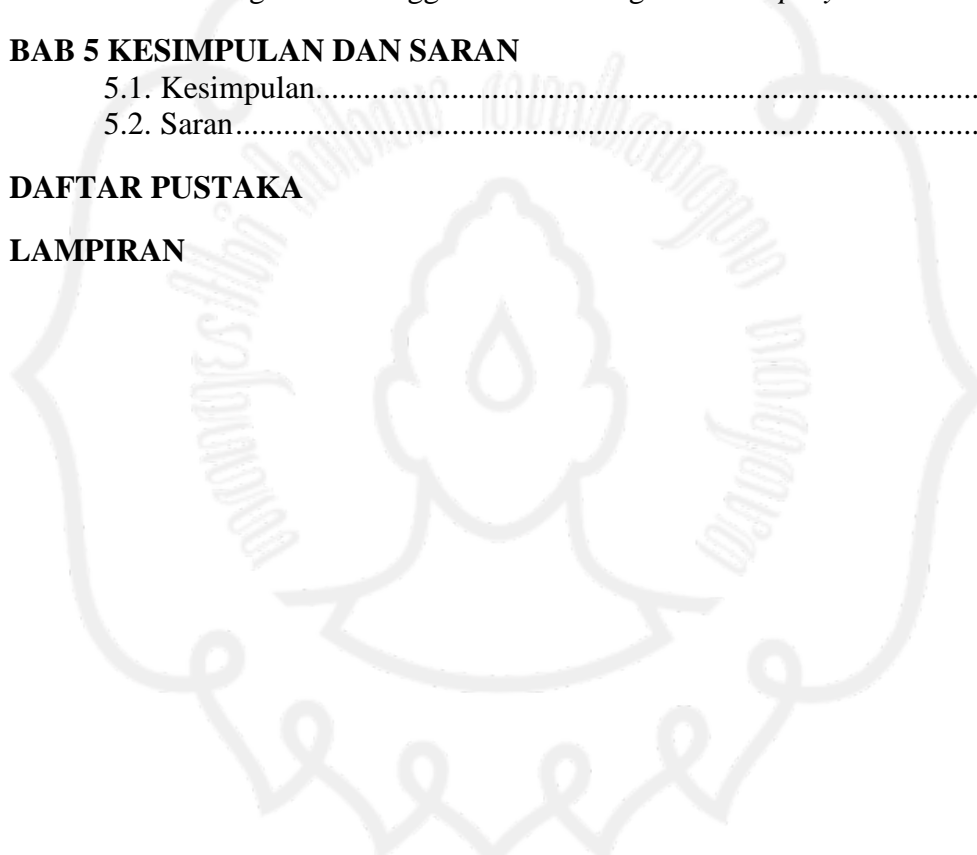
4.1.2. Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i> dengan Pendingin <i>Water Spray</i>	43
4.2. Radiasi Matahari Sepanjang Hari.....	46
4.3. Efek Penambahan Sistem Pendingin <i>Water Spray</i> terhadap Temperatur dan Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i>	47
4.4. Efek Penggunaan Jenis <i>Nozzle</i> yang Berbeda pada Sistem Pendingin <i>Water Spray</i> terhadap Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i>	49
4.5. Efek Penggunaan Diameter <i>Nozzle</i> yang Berbeda pada Sistem Pendingin <i>Water Spray</i> terhadap Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i>	56
4.6. Perpindahan Panas Konveksi pada Sistem Pendingin <i>Water Spray</i> ..	60
4.7. Perolehan Efisiensi Panel <i>Photovoltaic</i> dalam Satu Hari Tanpa Pendingin dan menggunakan Pendingin <i>Water Spray</i>	61

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	64
5.2. Saran.....	65

DAFTAR PUSTAKA

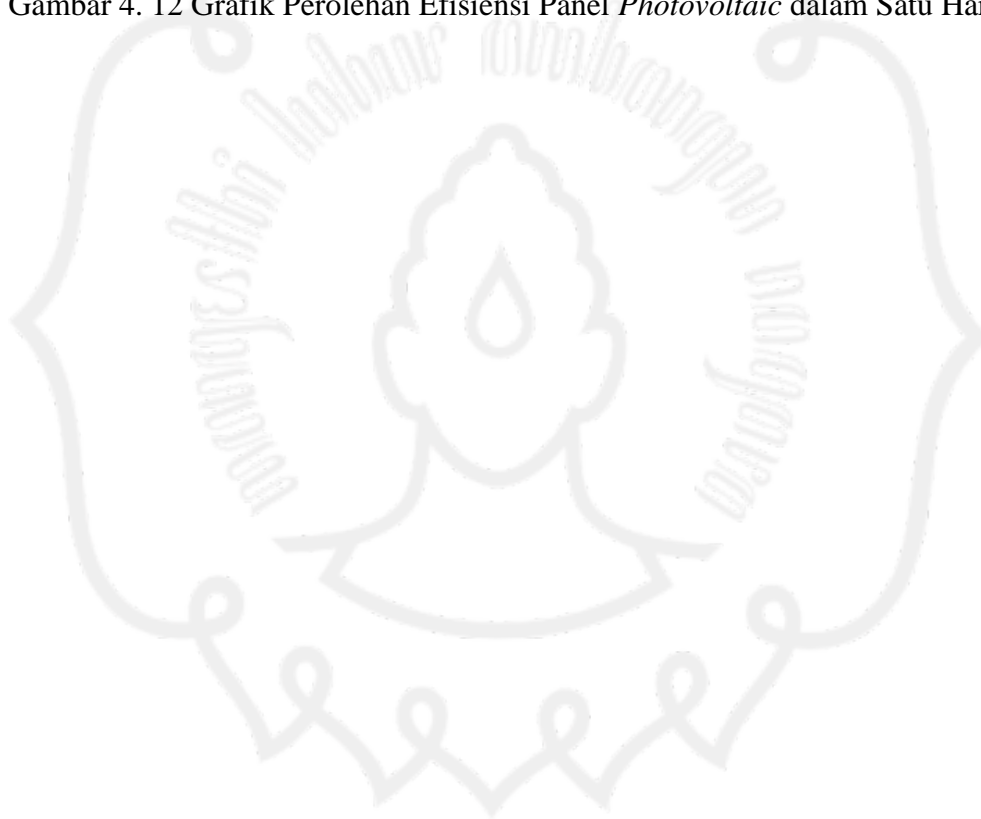
LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Variasi Radiasi Matahari Luar Angkasa dengan Waktu dalam Setahun.....	11
Gambar 2. 2 Efek <i>Photovoltaic</i> [12]	13
Gambar 2. 3 Generasi Panel <i>Photovoltaic</i> [12].....	14
Gambar 2. 4 Grafik Efisiensi Panel <i>Photovoltaic</i> (<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (NREL)).....	15
Gambar 2. 5 Grafik Efisiensi Panel <i>Photovoltaic</i> terhadap Kenaikan Temperatur [56].....	16
Gambar 2. 6 <i>Spray Cooling Application</i> [27]	17
Gambar 2. 7 Skema Kerja Pendinginan dengan <i>Water spray</i> [27]	18
Gambar 2. 8 Jenis <i>Nozzle</i> [49]	19
Gambar 2. 9 Skema Kerja <i>Water spray</i> pada Panel <i>Photovoltaic</i> [34].....	21
Gambar 2. 10 Konveksi Paksa dan Konveksi Bebas	22
Gambar 2. 11 Kerangka Berpikir	27
Gambar 3. 1 Panel <i>Photovoltaic</i>	30
Gambar 3. 2 Kerangka Sistem Pendinginan <i>Water Spray</i>	31
Gambar 3. 3 Multimeter	32
Gambar 3. 4 Pompa DC	33
Gambar 3. 5 <i>Nozzle</i>	34
Gambar 3. 6 Flow Meter	34
Gambar 3. 7 Termostat.....	35
Gambar 3. 8 <i>Dimmer</i>	35
Gambar 3. 9 <i>Rheostat</i>	36
Gambar 3. 10 <i>Data Logger</i>	36
Gambar 3. 11 Desain Penelitian.....	38
Gambar 3. 12 Peletakan Sensor Temperatur.....	38
Gambar 3. 13 Skema pengujian tegangan dan arus	39
Gambar 3. 14 Diagram Alur.....	41
Gambar 4. 1 Grafik Intensitas Radiasi Matahari terhadap Waktu Sepanjang Hari	46
Gambar 4. 2 Grafik Temperatur Panel <i>Photovoltaic</i> terhadap Waktu Sepanjang Hari	48
Gambar 4. 3 Grafik Efisiensi Panel <i>Photovoltaic</i> terhadap Waktu Sepanjang Hari	49
Gambar 4. 4 Kontur Distribusi Temperatur pada Panel <i>Photovoltaic</i> dengan (a) <i>Flat Fan Nozzle</i> , (b) <i>Hollow Cone Nozzle</i> , (c) <i>Full Cone Nozzle</i>	51
Gambar 4. 5 Grafik Temperatur Panel <i>Photovoltaic</i> terhadap Waktu Sepanjang Hari, (a) Diameter <i>Nozzle</i> 2 mm, (b) Diameter <i>Nozzle</i> 3 mm.....	52
Gambar 4. 6 (a) Grafik I-V Panel <i>Photovoltaic</i> Diameter Lubang <i>Nozzle</i> 2 mm, (b) Grafik I-V Panel <i>Photovoltaic</i> dengan Diameter Lubang <i>Nozzle</i> 3 mm	54

- Gambar 4. 7 (a) Grafik P-V Panel *Photovoltaic* Diameter Lubang *Nozzle* 2 mm,
(b) Grafik P-V Panel *Photovoltaic* dengan Diameter Lubang *Nozzle*
3 mm 54
- Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari
dengan, (a) Diameter *Nozzle* 2 mm, (b) Diameter *Nozzle* 3 mm 55
- Gambar 4. 9 Grafik Temperatur Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang
Hari dengan Jenis *Nozzle* (a) *Flat Fan Nozzle*, (b) *Hollow Cone*
Nozzle, dan (c) *Full Cone Nozzle* 57
- Gambar 4. 10 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu pada Setiap
Variasi Diameter *Nozzle* dengan (a) *Flat Fan Nozzle*, (b) *Hollow*
Cone Nozzle, dan (c) *Full Cone Nozzle* 59
- Gambar 4. 11 Grafik Nilai *Heat Transfer Coefficient* pada Setiap Variasi *Nozzle* 60
- Gambar 4. 12 Grafik Perolehan Efisiensi Panel *Photovoltaic* dalam Satu Hari ... 62



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian sistem pendinginan PV dengan <i>water spray</i>	9
Tabel 3. 1 Waktu Penelitian	29
Tabel 3. 2 Spesifikasi Panel <i>Photovoltaic</i>	30
Tabel 3. 3 Spesifikasi Solar Power Meter	31
Tabel 3. 4 Spesifikasi Sensor Temperatur	32
Tabel 3. 5 Spesifikasi Pompa DC	33
Tabel 3. 7 Data <i>Power Output</i> Panel PV	40
Tabel 4. 1 Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i> tanpa Pendingin.....	43
Tabel 4. 2 Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i> dengan <i>Flat Fan Nozzle</i>	43
Tabel 4. 3 Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i> dengan <i>Hollow Cone Nozzle</i>	44
Tabel 4. 4 Unjuk Kerja Panel <i>Photovoltaic</i> dengan <i>Full Cone Nozzle</i>	45
Tabel 4. 5 Tabel Hasil Perolehan Efisiensi Panel <i>Photovoltaic</i> dalam Satu Hari dengan Durasi Pengujian Pukul 08:00-17:00 WIB	61



INTISARI

Bahan bakar fosil yang ketersediaannya semakin menurun masih menjadi sumber energi utama dalam beberapa dekade terakhir. Penggunaan energi fosil juga memberikan dampak bagi buruk bagi lingkungan diantaranya adalah produksi gas berbahaya seperti CO₂, efek rumah kaca, dan produksi gas lainnya sehingga memerlukan sumber energi terbarukan yang tentunya ramah bagi lingkungan. Energi cahaya matahari merupakan salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik. Panel *photovoltaic* merupakan alat yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Panel *photovoltaic* sendiri memiliki kelemahan yaitu efisiensi kerja yang menurun apabila temperatur sel diatas temperatur kerja sehingga memerlukan metode pendinginan untuk menjaga temperatur sel dalam panel *photovoltaic*.

Sistem pendingin *water spray* dapat diaplikasikan untuk mendinginkan panel *photovoltaic*. Dalam kasus ini pemilihan *nozzle* sangat mempengaruhi dari performa pendinginan dengan sistem *water spray*. Penelitian ini membahas tentang bagaimana pengaruh geometri *nozzle* yaitu jenis dan diameter *nozzle* terhadap performa pendinginan dan unjuk kerja panel *photovoltaic* yang dilakukan secara eksperimen dengan cahaya matahari langsung. Penelitian ini menggunakan beberapa jenis *nozzle* yaitu *full cone*, *hollow cone*, dan *flat fan* dengan masing-masing diameter lubang yaitu 2 dan 3 mm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendingin *water spray* dapat menurunkan temperatur panel dari 61,96 menjadi 36,51 °C dan meningkatkan efisiensi dari 10,98 menjadi 14,47 % pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m². Penggunaan jenis *nozzle* yaitu *full cone nozzle* dapat memberikan performa pendinginan yang paling baik daripada *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* sehingga dapat menghasilkan efisiensi panel *photovoltaic* yang lebih tinggi. Hasil pengujian temperatur panel *photovoltaic* dengan jenis *nozzle full cone*, *hollow cone*, dan *flat fan* menggunakan besar diameter lubang *nozzle* yang sama 2 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m² adalah 36,27; 37,78; dan 41,42 °C dan menghasilkan efisiensi sebesar 14,47; 13,95; dan 13,05 %. Penggunaan diameter *nozzle* sebesar 2 mm menghasilkan performa pendinginan yang lebih baik jika dibandingkan dengan diameter *nozzle* 3 mm pada setiap variasi jenis *nozzle* yang digunakan sehingga *full cone nozzle* dengan diameter lubang 2 mm menghasilkan performa pendinginan yang paling baik dan menghasilkan efisiensi panel *photovoltaic* yang paling tinggi.

Kata kunci: *Photovoltaic*, sistem pendingin *water spray*, *nozzle*, efisiensi

ABSTRACT

Fossil fuels, whose availability is decreasing, have remained the main energy source in the last few decades. The use of fossil energy also has a negative impact on the environment, including the production of dangerous gases such as CO₂, the greenhouse effect, and the production of other gases, so it requires renewable energy sources which are of course friendly to the environment. Solar light energy is one source of energy that can be utilized to become electrical energy. Photovoltaic panels are devices that can convert sunlight energy into electrical energy. The photovoltaic panel itself has a weakness, namely that work efficiency decreases if the cell temperature is above working temperature, so it requires a cooling method to maintain the cell temperature in the photovoltaic panel.

A water spray cooling system can be applied to cool photovoltaic panels. In this case, the choice of nozzle greatly influences the cooling performance of the water spray system. This research discusses the influence of nozzle geometry, namely the type and diameter of the nozzle, on the cooling performance and performance of photovoltaic panels carried out experimentally in direct sunlight. This research uses several types of nozzles, namely full cone, hollow cone and flat fan with hole diameters of 2 and 3 mm respectively.

The research results show that the water spray cooling system can reduce panel temperature from 61.96 to 36.51 °C and increase efficiency from 10.9 to 14.47% at 11:00 WIB with a solar radiation intensity of 1000 W/m². Using a nozzle type, namely a full cone nozzle, can provide the best cooling performance compared to a hollow cone nozzle and a flat fan nozzle so that it can produce higher photovoltaic panel efficiency. The temperature test results of photovoltaic panels with full cone, hollow cone and flat fan nozzles using the same nozzle hole diameter of 2 mm at 11:00 WIB with a solar radiation intensity of 1000 W/m² were 36.27; 37.78; and 41.42 °C and produces an efficiency of 14.47; 13.95; and 13.05 %. Using a nozzle diameter of 2 mm produces better cooling performance when compared to a nozzle diameter of 3 mm for each variation of nozzle type used so that a full cone nozzle with a hole diameter of 2 mm produces the best cooling performance and produces the highest photovoltaic panel efficiency.

Keywords: *Photovoltaic, water spray cooling system, nozzle, efficiency*

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan energi semakin meningkat dan sebagian besar masih bergantung pada energi fosil. Energi fosil yang banyak digunakan adalah batu bara, minyak, dan gas alam yang merupakan sumber energi yang sangat penting dan dibutuhkan bagi dunia [1]–[3]. Terdapat permasalahan serius dalam penggunaan energi fosil, yaitu menyebabkan masalah lingkungan seperti produksi gas berbahaya seperti CO₂, efek rumah kaca, dan produksi gas lainnya yang berpotensi merusak lingkungan [4]. Ketersediaan akan sumber energi fosil yang semakin menurun juga menjadi salah satu masalah lain sehingga mendorong peneliti untuk mencari sumber energi terbarukan yang ketersediaannya melimpah dan tentunya ramah bagi lingkungan [5]. Sumber energi terbarukan diantaranya adalah matahari, angin, air, biomassa, geothermal dll yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik.

Matahari dapat menghasilkan energi listrik dan *thermal* melalui radiasi. Radiasi matahari tersebut dapat dimanfaatkan secara langsung dan tidak langsung [6]. Berbagai lokasi di dunia mulai intensif untuk memanfaatkan energi sinar matahari untuk mengurangi ketergantungan sumber daya fosil sebagai sumber energi listrik [7]–[9]. Lokasi negara dengan potensi radiasi matahari yang tinggi seperti negara Indonesia mendapatkan keuntungan lebih dalam memanfaatkan sumber energi matahari sebagai sumber energi listrik.

Pemanfaatan energi matahari menjadi sumber energi listrik dapat dilakukan dengan menggunakan sel surya *photovoltaic* (PV) [10]–[12]. Ada beberapa jenis sel surya PV yang dapat digunakan untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, diantaranya adalah *monocrystalline*, *polycrystalline*, dan film tipis [13]–[15]. Pada umumnya hasil efisiensi sel surya PV dalam konversi listrik adalah 15 - 20% dan 80 - 85 % diubah menjadi panas [16], [17]. Energi panas tersebut membuat temperatur sel surya PV meningkat. Sel surya PV memiliki temperatur kerja ideal untuk menghasilkan daya listrik yang maksimal. Temperatur kerja ideal sel surya

PV adalah 25°C dan dalam keadaan yang sesungguhnya temperatur lingkungan bervariasi dan dapat di atas temperatur kerja ideal [16], [18]. Peningkatan temperatur sel surya PV di atas temperatur ideal menyebabkan penurunan *power output* dan efisiensi kerja [19]. Penurunan *power output* dan efisiensi tersebut merupakan tantangan utama dalam pemanfaatan panel *photovoltaic* sehingga memerlukan suatu sistem pendingin yang bertujuan untuk menurunkan dan mengontrol temperatur.

Berbagai peneliti telah berusaha untuk menemukan solusi untuk menurunkan dan mengontrol temperatur sel surya PV sehingga dapat menghasilkan daya dan efisiensi yang optimal [10], [20]. Secara umum metode pendinginan untuk panel *photovoltaic* dapat diklasifikasikan sebagai pendinginan aktif dan pasif [20]–[22]. Metode pendinginan aktif dan pasif memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing. Metode pendinginan pasif tidak memerlukan sumber energi tambahan dalam menjalankan proses pendinginan, namun performa pendinginan pasif dinilai kurang signifikan. Sehingga dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai metode pendinginan aktif pada panel *photovoltaic*. Pendinginan aktif dapat menghasilkan performa pendinginan yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode pendinginan pasif [23].

Salah satu pendinginan aktif yang dapat digunakan sebagai pendinginan pada panel *photovoltaic* adalah sistem pendingin *water spray* [24]. Sistem pendingin *water spray*, memiliki banyak parameter yang harus disesuaikan antara lain: pemilihan spesifikasi jenis *nozzle*, banyaknya *nozzle*, kecepatan air, tekanan air, waktu penyemprotan, dan posisi peletakan *nozzle* [25]. Pemilihan *nozzle* dalam sistem pendingin *water spray* merupakan salah satu komponen penting yang mempengaruhi hasil performa pendinginan [26], [27]. Pemilihan jenis *nozzle* memiliki efek yang menentukan distribusi semburan air, karakteristik semburan air, besar sudut semburan air, dan diameter semburan air. Sementara itu, karakteristik semburan air sangat mempengaruhi dan menentukan kinerja performa pendinginan dengan *water spray* [28]. Berdasarkan permasalahan tersebut, dalam mendesain metode pendinginan dengan *water spray* perlu memperhatikan pemilihan

spesifikasi *nozzle* yang tepat. Setiap jenis *nozzle* memiliki bentuk profil semburan yang berbeda pada setiap jenis *nozzle*. Pemilihan besarnya diameter *nozzle* juga penting untuk dilakukan karena memiliki pengaruh terhadap besarnya sudut semburan dan ukuran droplet air pada setiap jenis *nozzle*, sehingga mempengaruhi besarnya area yang dapat dicakup. Pemilihan jenis dan besarnya diameter *nozzle* yang tepat berdampak pada terciptanya pendinginan yang merata pada semua sisi panel *photovoltaic*. Pendinginan yang merata pada setiap sisi panel akan mengurangi area *hot spot* sehingga performa pendinginan dapat lebih maksimal. Performa pendinginan yang baik dan optimal oleh *water spray* nantinya juga dapat mengoptimalkan *power output* dan efisiensi pada panel *photovoltaic*.

Berdasarkan dari permasalahan dan penjelasan yang sudah diuraikan sebelumnya, penggunaan *water spray* sebagai metode pendinginan panel *photovoltaic* merupakan hal yang menjanjikan untuk diintegrasikan dan diteliti lebih lanjut. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait pengaruh geometri lubang *nozzle* pada sistem pendingin *water spray* untuk meningkatkan performa *photovoltaic*. Dalam penelitian ini, konfigurasi sistem pendingin *water spray* diuji secara eksperimental dengan beberapa variabel yang telah ditentukan berdasarkan studi literatur. Hasil data yang didapatkan kemudian dianalisis untuk menentukan konfigurasi sistem pendinginan dengan *water spray* yang paling baik sehingga dapat menghasilkan *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* yang paling optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perumusan masalah pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.
2. Bagaimana pengaruh penggunaan jenis *nozzle* (*full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, *flat fan nozzle*) pada sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.

3. Bagaimana pengaruh penggunaan diameter *nozzle* yang berbeda pada sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijabarkan, maka tujuan penelitian pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan jenis *nozzle* (*full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, *flat fan nozzle*) pada sistem *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.
3. Mengetahui pengaruh penggunaan diameter *nozzle* yang berbeda pada sistem *water spray* terhadap temperatur, *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini berfokus pada pengujian variasi jenis dan diameter *nozzle* pada sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur dan kinerja panel *photovoltaic*. Penggunaan jenis dan diameter *nozzle* yang berbeda memberikan efek pendinginan yang berbeda sehingga tentunya mempengaruhi hasil akhir dari *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic*. Hasil penelitian ini akan menganalisis efek penggunaan jenis dan diameter *nozzle* yang berbeda terhadap temperatur dan *power output* yang dihasilkan pada panel *photovoltaic* dengan batasan-batasan penelitian berikut ini:

1. Panel *photovoltaic* yang digunakan dianggap memiliki karakteristik yang sama.
2. Pengambilan data dilakukan pada pukul 08:00 – 17:00 WIB.
3. Parameter lingkungan diasumsikan pada kondisi ideal.
4. Peletakan panel *photovoltaic* menghadap utara dengan sudut kemiringan 12°.
5. Hasil pengukuran *power output* berupa hasil daya dan efisiensi panel *photovoltaic*.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat bagi peneliti dan pembaca secara umum. Manfaat teoritis dan praktis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis
 - a) Sebagai tambahan referensi terhadap pengembangan panel *photovoltaic* di dunia.
 - b) Menambah kepustakaan di lingkungan Universitas Sebelas Maret.
 - c) Sebagai bahan perbandingan dan pertimbangan bagi penelitian sejenis di waktu yang akan datang.
2. Manfaat Praktis
 - a) Meningkatkan pengembangan energi baru terbarukan di dunia.
 - b) Memberi salah satu solusi dalam meningkatkan pengembangan potensi sumber energi matahari sebagai pembangkit listrik di dunia.

1.6 Kebaruan Penelitian

Penelitian ini mengaplikasikan metode pendinginan aktif pada panel *photovoltaic* dengan menggunakan sistem pendingin *water spray* sebagai pengontrol temperatur. Berdasarkan penelitian sebelumnya telah diteliti pengaruh penambahan *water spray* sebagai pengontrol suhu dan memaksimalkan *power output* panel *photovoltaic* [29], [30]. Penelitian yang dilakukan oleh [31], [32] tentang penggunaan *water spray* sebagai metode pendinginan panel *photovoltaic* hanya meneliti efek penambahan sistem pendingin terhadap performa panel *photovoltaic* dan masih banyak parameter yang dapat dioptimalkan.

Parameter pada sistem pendingin *water spray* yang dapat dioptimalkan adalah penggunaan jenis *nozzle*, diameter *nozzle*, jumlah *nozzle*, posisi *nozzle*, debit air, waktu nyala sistem, dan penambahan *heat exchanger*. Komponen *nozzle* pada pendinginan *water spray* merupakan komponen yang sangat penting. Pemilihan spesifikasi *nozzle* menentukan bagaimana distribusi semburan air dan inilah yang menentukan performa pendinginan dengan *water spray*. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian terkait penggunaan jenis *nozzle* penting untuk dilakukan [27].

Tabel 1.1 menunjukkan data penelitian tentang pendinginan panel *photovoltaic* dengan *water spray* yang sudah dilakukan.

Tabel 1. 1 Data Penelitian Pendinginan *Panel Photovoltaic* dengan *Water Spray*

Peneliti	Diameter Nozzle	Jenis Nozzle	Jumlah Nozzle	Posisi Nozzle	Debit Air	Waktu nyala air	Cahaya matahari
Nižetić et al [30]	-	-	-	✓	✓	-	-
Zilli et al [33]	-	-	-	-	-	✓	✓
Yang et al [24]	-	-	-	-	-	-	✓
Hadipour et al [34]	-	-	-	-	✓	-	✓
Javidan & Moghadam [35]	✓	-	✓	✓	✓	-	-
Raju et al [36]	-	-	-	-	✓	-	-
Zhao et al [37]	-	-	-	-	✓	-	-
Altegoer et al [38]	-	✓	✓	✓	✓	-	-

Penelitian yang dilakukan Altegoer et al [38] meneliti penggunaan jenis *nozzle* yang berbeda yaitu *pin jet nozzle* dan *hollow cone nozzle* terhadap efek pendinginan panel *photovoltaic* yang dilakukan secara eksperimen dengan cahaya lampu. Kesimpulan yang didapatkan oleh penelitian [38] penggunaan jenis *nozzle* yang dapat memberikan semburan air yang merata memiliki performa pendinginan yang paling baik. Penelitian lain yang dilakukan Javidan & Moghadam [35] meneliti efek variasi diameter *nozzle* terhadap performa pendinginan panel *photovoltaic* yang dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan cahaya lampu. Kesimpulan yang didapatkan oleh [35] adalah diameter *nozzle* memiliki pengaruh terhadap distribusi semprotan air, penggunaan diameter *nozzle* yang lebih kecil dapat menghasilkan efek pendinginan yang lebih merata pada kecepatan dan tekanan input air yang sama. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya masih perlu dikembangkan lebih lanjut mengenai penggunaan jenis dan diameter *nozzle* pada sistem *water spray* untuk mengoptimalkan sistem agar dapat bekerja secara optimal.

Penelitian yang akan penulis lakukan adalah mengembangkan metode pendinginan panel *photovoltaic* dengan menggunakan *water spray*. Penelitian mengenai metode pendinginan *water spray* pada panel *photovoltaic* yang telah dilakukan sebelumnya, belum ada yang mengkombinasikan dengan jenis *nozzle* yaitu: *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, dan *flat fan nozzle* dengan beberapa diameter yang berbeda. Lokasi pengujian secara langsung di lingkungan dengan menggunakan cahaya matahari dan posisi peletakan panel *photovoltaic* dengan sudut kemiringan 12° menghadap utara sesuai dengan lokasi pengujian dapat memberikan gambaran bagaimana sistem pendinginan *water spray* jika diaplikasikan pada keadaan yang sesungguhnya di lingkungan.

Metode pendinginan panel *photovoltaic* dengan *water spray* masih perlu diteliti dan dikembangkan lebih lanjut tentang penggunaan jenis dan diameter *nozzle* untuk mengoptimalkan performa pendinginan dan penggunaan air yang efisien. Pemilihan jenis dan diameter *nozzle* dengan penyemprotan yang aktif pada waktu tertentu masih perlu dilakukan penelitian kembali untuk mengetahui kombinasi yang baik dalam pendinginan dengan *water spray*.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan Pustaka penelitian ini menguraikan *state of the art* dan posisi penelitian, studi literatur, kerangka berpikir, dan hipotesis penelitian berdasarkan latar belakang yang telah disajikan pada bab sebelumnya. Tinjauan pustaka ini, akan dikaji lebih lanjut mengenai radiasi matahari, teknologi sel surya *photovoltaic*, pendinginan panel *photovoltaic*, *water spray* sebagai pendingin panel *photovoltaic*, perpindahan panas panel *photovoltaic*, dan perhitungan daya dan efisiensi panel *photovoltaic*.

2.1. *State of the Art* dan Posisi Penelitian

Sel surya *photovoltaic* (PV) merupakan teknologi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Pada penelitian beberapa tahun terakhir telah dikembangkan berbagai cara untuk mengoptimalkan hasil *power output* dan efisiensi Sel surya PV. Penambahan metode pendingin sebagai kontrol temperatur pada panel PV banyak diterapkan karena kelemahan sel surya PV yaitu menurunnya efisiensi ketika temperatur sel melebihi temperatur kerja [39], [40]. Secara umum metode pendinginan yang dapat diterapkan adalah metode pendinginan aktif dan pendinginan pasif [41], [42].

Salah satu metode pendinginan aktif yang dapat diterapkan sebagai pendingin panel PV adalah sistem pendingin *water spray* [43]. Sistem pendingin *water spray* dipilih karena memiliki performa pendingin yang baik karena tidak ada hambatan kontak termal dan mudah untuk diterapkan. Kelebihan lain dari sistem *water spray* adalah sistem ini juga dapat membersihkan panel PV dari debu akibat pemasangan panel PV di lingkungan [44]. Dimana, debu yang terdapat pada panel PV juga dapat berdampak pada penurunan performa panel PV [45], [46]. Pada Tabel 2.1 di bawah ini menunjukkan penelitian terkait efek pendinginan panel PV dengan menggunakan sistem *water spray* terhadap temperature, *power output*, dan efisiensi panel PV.

Tabel 2. 1 Penelitian Sistem Pendinginan PV dengan *Water Spray*

Peneliti	Metode Pendinginan	Metode Penelitian	Temperatur PV	<i>Power output</i> dan Efisiensi
Chen et al., 2022 [47]	<i>Water spray</i> dengan konsentrator	Eksperimen	-	Efisiensi panel meningkat 25%
Bevilacqua et al., 2022 [48]	<i>Water Spray</i>	Eksperimen	Penurunan temperatur 28,2%	Efisiensi panel meningkat 7,8%
Zhao et al 2022 [37]	<i>Water spray</i> dengan konsentrator	Eksperimen	Penurunan temperatur 10 K	<i>Power output</i> meningkat 7,3%
Raju et al., 2022 [36]	<i>Water Spray</i>	Simulasi	-	Efisiensi tertinggi sebesar 15,73%
Javidan M et al., 2021 [35]	<i>Water spray</i>	Eksperimen	Penurunan temperatur dari 63,95 °C menjadi 33,95 °C	<i>Power output</i> meningkat 47,67%
Laseinde & Ramere, 2021 [32]	<i>Water Spray</i>	Eksperimen	-	Efisiensi panel PV meningkat 16,65%
Hadipour et al., 2021 [34]	<i>Water Spray</i>	Eksperimen	Penurunan temperatur dari 63,95 °C menjadi 33,68 °C	Efisiensi panel PV meningkat 33,3%
Yang et al., 2019 [24]	<i>Water Spray</i> dan <i>shallow geothermal heat exchanger</i>	Eksperimen	Penurunan temperatur 45 °C menjadi 35 °C	Efisiensi panel PV meningkat 14,3%
Zilli et al., 2018	<i>Water Spray</i>	Eksperimen	-	Efisiensi tertinggi adalah 12,7%
Nizetić et al., 2016 [30]	<i>Water Spray</i>	Eksperimen	Penurunan temperatur dari 54 °C menjadi 24 °C	Efisiensi panel PV meningkat 7,7%

Sistem pendingin *water spray*, terdapat banyak parameter-parameter yang harus disesuaikan antara lain: pemilihan spesifikasi *nozzle*, kecepatan air, tekanan air, waktu penyemprotan, dan posisi peletakan *nozzle*. Pemilihan *nozzle* dalam sistem pendingin *water spray* merupakan salah satu komponen penting yang menciptakan distribusi semburan air sehingga mempengaruhi hasil performa pendinginan [49]. *Nozzle* memiliki berbagai tipe yang memiliki bentuk profil semburan yang berbeda-beda pada setiap tipe dan hal tersebut paling menentukan distribusi semburan air. Saat ini banyak jenis *nozzle* yang dapat digunakan untuk pendinginan *water spray*, diantaranya adalah *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, dan *flat fan nozzle*. Penelitian terkait tentang sistem pendinginan *water spray* diketahui bahwa hasil

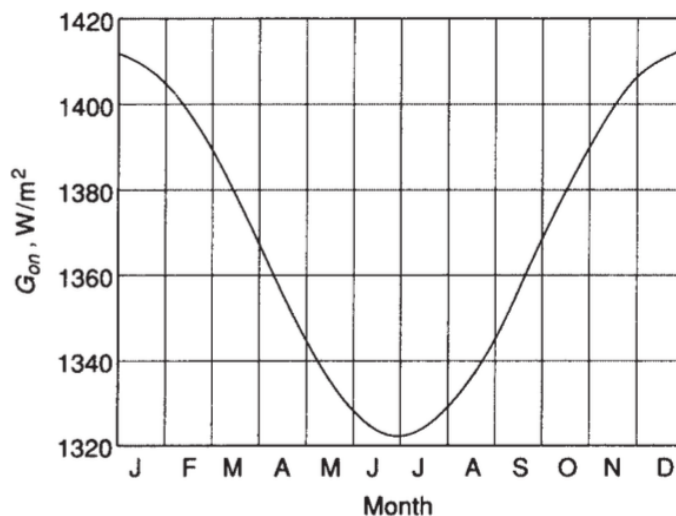
pendinginan yang paling baik didapat apabila semburan air dapat menyebar penuh pada seluruh area yang akan didinginkan [38].

Selain pemilihan jenis *nozzle*, pemilihan diameter *nozzle* juga penting untuk dilakukan karena berpengaruh terhadap besar sudut semburan dan ukuran droplet air [35], [50]. Penelitian terkait yang sudah dilakukan pada pendinginan *water spray* yang menggunakan *nozzle* dengan diameter terkecil yang digunakan pada penelitian tersebut dapat menghasilkan semburan dan pendinginan yang baik [35]. Kombinasi jenis *nozzle* dan diameter *nozzle* yang tepat nantinya akan menghasilkan performa pendinginan yang baik dan merata pada semua permukaan yang akan didinginkan. Pemilihan spesifikasi *nozzle* penting dilakukan untuk mengetahui konfigurasi geometri *nozzle* yang paling optimal dalam penelitian pendinginan dengan *water spray*. Performa pendinginan yang optimal nantinya juga dapat menghasilkan *power output* yang optimal pada panel *photovoltaic*.

2.2. Kerangka Teoritis

2.2.1. Radiasi Matahari

Matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan. Matahari memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Energi radiasi tersebut tercipta akibat adanya beberapa reaksi fusi yang berlangsung secara terus menerus, dengan gas-gas penyusunnya sebagai bejana berisi yang ditahan oleh gaya gravitasi. Beberapa reaksi fusi telah diusulkan untuk memasok energi yang dipancarkan oleh matahari. Reaksi fusi tersebut diantaranya adalah proses di mana hidrogen (yaitu, empat proton) bergabung untuk membentuk helium (yaitu, satu inti helium); massa inti helium kurang dari empat proton, massa telah hilang dalam reaksi dan diubah menjadi energi. Besarnya energi radiasi yang dipancarkan tegak lurus terhadap satu meter persegi oleh matahari di luar atmosfer bumi (*extraterrestrial*) disebut sebagai konstanta matahari atau *solar constant* (G_{sc}). Menurut *World Radiation Centre* (WRC) besaran konstanta matahari harganya sama dengan 1367 W/m^2 dengan nilai toleransi sebesar 1%.



Gambar 2. 1 Variasi Radiasi Matahari Luar Angkasa dengan Waktu dalam Setahun

Dalam analisisnya, energi surya sangat erat hubungannya dengan nilai konstanta matahari (G_{on}). Konstanta matahari (G_{on}) dipengaruhi oleh jarak matahari ke bumi sepanjang tahun, sehingga memiliki nilai yang berubah ubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Besarnya nilai Konstanta matahari (G_{on}) diperoleh dengan Persamaan 2.1.

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Dimana G_{on} adalah konstanta matahari pada bidang normal terhadap radiasi panas n (urutan hari yang dihitung mulai dari 1 Januari). Radiasi matahari global yang diterima pada panel *photovoltaic* $G_{tot,pv}$ sama dengan jumlah penyinaran matahari pada permukaannya tanpa reflektor $G_{net,pv}$ ($G_{net,pv}$ sama dengan jumlah penyinaran matahari langsung $G_{dir,pv}$, radiasi matahari menyebar dari langit $G_{sky,pv}$, dan radiasi matahari yang dipantulkan dari tanah $G_{gr,pv}$) dan jumlah radiasi matahari yang dipantulkan dari semua reflektor $G_{refl,pv}$ seperti pada persamaan:

$$G_{tot,pv} = G_{net,pv} + G_{refl,pv} \quad (2.2)$$

Dimana $G_{net,pv}$ dan $G_{dir,pv}$ diberikan pada referensi [51]:

$$G_{net,pv} = G_{dir,pv} + G_{sky,pv} + G_{gr,pv} \quad (2.3)$$

θ adalah sudut datang matahari, yaitu sudut antara radiasi sinar pada permukaan. Persamaan yang berkaitan dengan sudut datang radiasi sinar pada permukaan diberikan pada persamaan 2.4 [51]

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dimana β adalah sudut antara bidang permukaan yang bersangkutan dan horizontal, ϕ adalah garis lintang lokasi dan γ adalah sudut azimuth. Kemudian α_s adalah sudut ketinggian matahari yang didapatkan dengan persamaan 2.5 dan δ adalah sudut deklinasi matahari dan n adalah hari dalam setahun dihitung dengan persamaan 2.6 [51]:

$$\alpha_s = \sin^{-1} [\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \sin \delta \cdot \sin \phi] \quad (2.5)$$

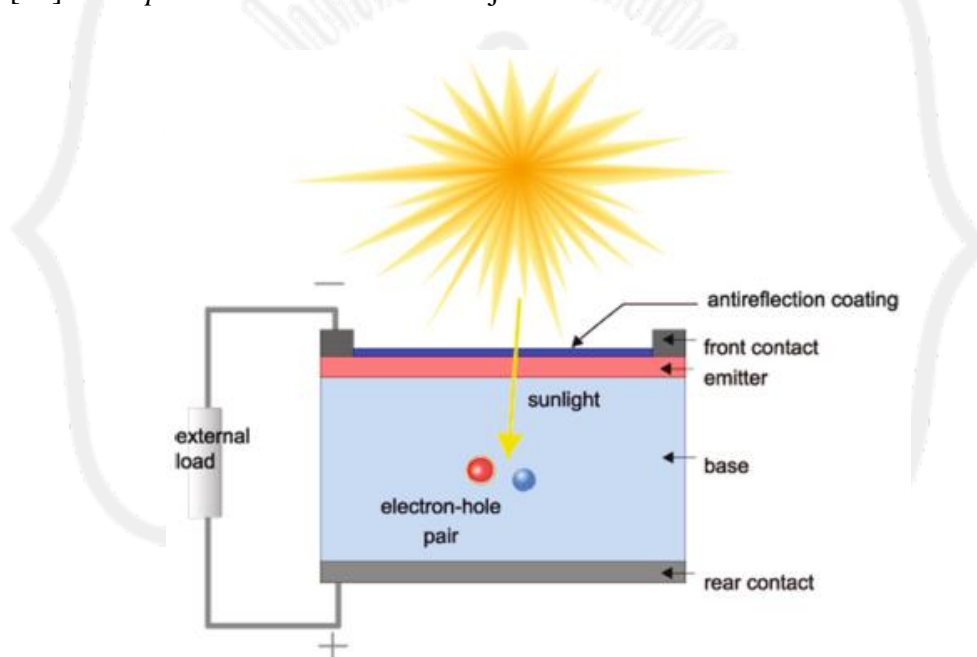
$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.6)$$

2.2.2. Sel Surya *Photovoltaic*

Sel surya *photovoltaic* (PV) merupakan teknologi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik [13]. Teknologi sel surya *photovoltaic* telah dikembangkan sejak akhir 1970 sebagai solusi terhadap krisis minyak dan gas sebagai sumber energi yang tidak dapat terbaharui. Sel surya *photovoltaic* sangat menarik untuk dipelajari karena langsung mengubah radiasi matahari menjadi listrik tanpa adanya gerakan rotasi generator atau konversi suhu yang tinggi menjadi uap atau gas buang melalui turbin gas [12]. Kenaikan permintaan energi listrik dan ketergantungan akan sumber energi listrik oleh sumber daya minyak dan batubara yang semakin menipis menambah ketertarikan peneliti untuk meneliti sel surya *photovoltaic* sebagai energi baru terbarukan [2]. Potensi energi matahari secara global diprediksi lebih dari 1200 GW pada akhir 2022 perlu untuk dimanfaatkan lebih lanjut sebagai salah satu sumber energi [41].

Sel surya *photovoltaic* mendapatkan manfaat dari kemajuan dalam pembuatan dan teknologi pemrosesan bahan semikonduktor. Sel surya *photovoltaic* bekerja secara terbalik dengan dioda yang dipancarkan cahaya (LED), yang merupakan perangkat

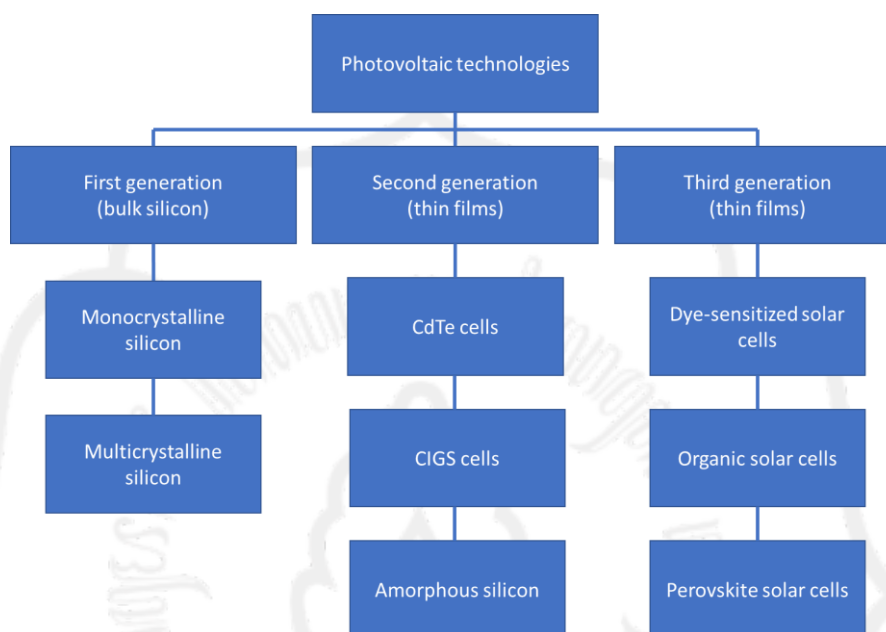
berbasis silikon yang dibangun sebagai sambungan positif dan negatif dari boron dan fosfor yang didoping dengan silikon murni (99,9999999% atau 9 N) [12]. Sel surya *photovoltaic* mengubah radiasi elektromagnetik yang berasal dari matahari menjadi listrik di dalam bahan yang direkayasa secara tepat yang disimpan dan digabungkan dengan teknologi yang canggih. Prinsip kerja sel surya *photovoltaic* memanfaatkan efek *photovoltaic* yang diteliti pertama kali oleh Alexdanre Edmond Becquerel pada tahun 1839. Efek *photovoltaik* adalah proses ketika cahaya matahari menerpa lapisan batas bahan semikonduktor yang mengakibatkan elektron dari semikonduktor terpisah sehingga menghasilkan beda potensial pada semikonduktor tersebut, akibatnya terjadilah beda potensial dan arus listrik dapat tercipta [12], [15]. Efek *photovoltaic* tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2. 2 Efek *Photovoltaic* [12]

Terdapat tiga generasi sel surya *photovoltaic* yang telah dikembangkan untuk saat ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Generasi pertama sel surya *photovoltaic* yang telah dikembangkan adalah silikon (Si) *solar cells* yang terdiri dari *monocrystals* dan *polycrystals* sebagai generasi pertama, jenis ini merupakan yang paling umum digunakan serta memiliki efisiensi sekitar 14-20 %. Umumnya, sel pada panel *photovoltaic* generasi pertama dapat bertahan lebih lama dan

memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sel panel *photovoltaic* lainnya. Namun, biaya proses pembuatannya lebih tinggi baik dalam hal konsumsi energi dan tenaga kerja, dan kinerjanya mudah menurun pada kondisi suhu yang lebih tinggi.

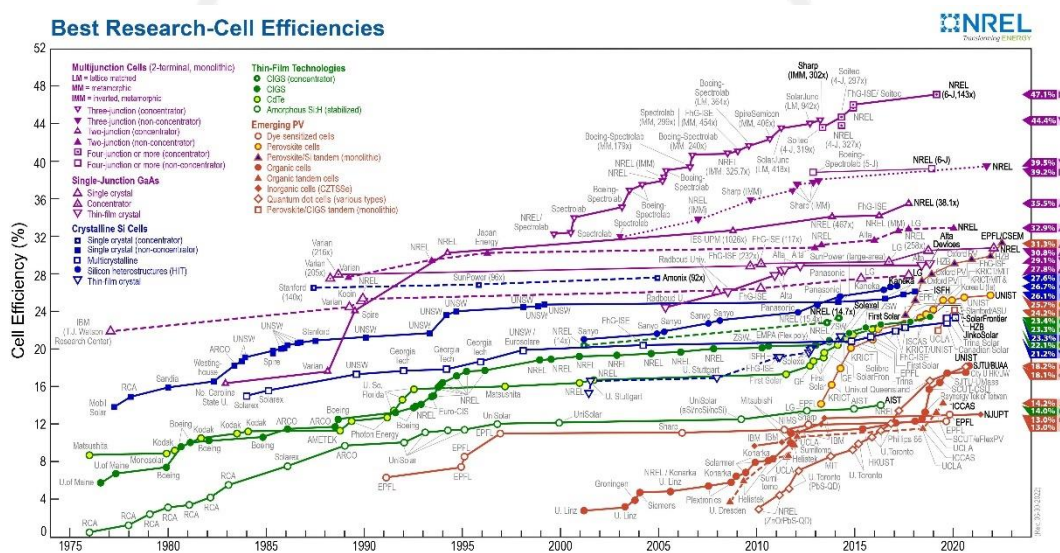


Gambar 2. 3 Generasi Panel *Photovoltaic* [12]

Generasi kedua sel surya *photovoltaic* menggunakan bahan dasar yang bukan berasal dari silikon. Bahan dasar yang digunakan pada generasi kedua adalah *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), *copper indium gallium selenide* (CIGS). Teknologi pada generasi kedua ini menggunakan teknologi *thin-films* PV. Biaya untuk proses manufaktur menjadi lebih murah dan menggunakan sedikit material semikonduktor. Ketebalan yang dihasilkan oleh panel PV dengan teknologi *thin films* menjadi lebih tipis sehingga dari segi ukuran dapat lebih ringkas. Namun, efisiensi yang dihasilkan oleh teknologi *thin films* menjadi lebih rendah dari generasi pertama karena berkurangnya absorpsi matahari karena ketebalan yang lebih tipis.

Terakhir, sel surya *photovoltaic* generasi ketiga diperkenalkan untuk menggantikan bahan dan proses konvensional dan memungkinkan pembuatan sel surya yang lebih

baik. Dimulai dengan sel surya tersensitisasi pewarna yang meniru respons tanaman terhadap radiasi yang terjadi. Sehingga efek *photovoltaic* organik dan akhirnya, sel surya perovskit yang memberikan efisiensi yang dapat menyamai dan bahkan melebihi sel pada panel *photovoltaic* silikon [21]. Ini terbukti dalam grafik Gambar 2.4 yang diterbitkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) setiap tahun tentang status efisiensi teknologi sel surya *photovoltaic*. Meskipun perangkat generasi ketiga menunjukkan potensi yang menjanjikan, masa pakai dan stabilitasnya belum dapat dibandingkan dengan teknologi berbasis silikon [9].

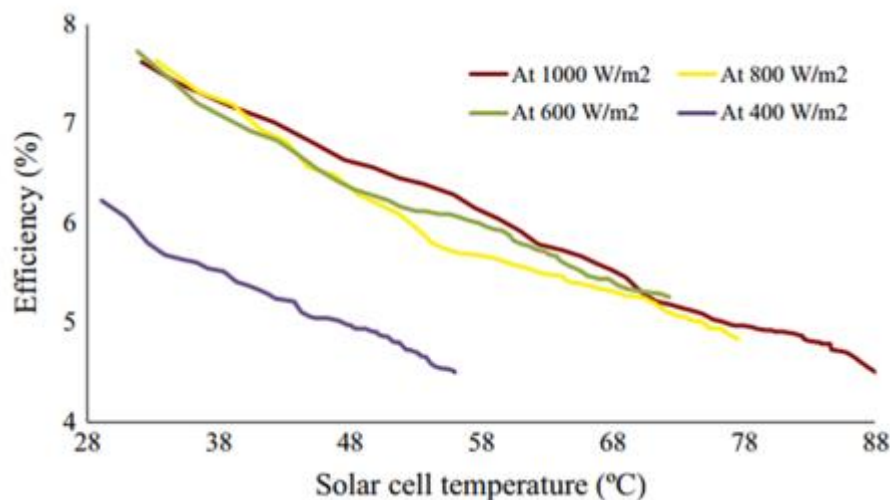


Gambar 2. 4 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* (National Renewable Energy Laboratory (NREL))

2.2.3. Pendinginan Panel *Photovoltaic*

Panel *photovoltaic* (PV) memiliki kelemahan yaitu terjadi penurunan efisiensi ketika temperatur panel *photovoltaic* melebihi temperatur kerja. Temperatur kerja normal panel PV adalah pada suhu 25°C [37]. Pada radiasi matahari 1000 W/m² ketika suhu panel *photovoltaic* melebihi temperatur kerja, efisiensi menurun sebesar 0,5 % pada setiap kenaikan 1 °C yang terjadi pada sel surya *photovoltaic* jenis *crystalline silicon* [52], [53]. Penurunan efisiensi panel PV yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 [54]. Peningkatan temperatur kerja panel *photovoltaic* yang disebabkan oleh tingkat penyinaran matahari yang terlalu tinggi tersebut juga dapat mempengaruhi umur pakai, kerusakan dan kendala jangka panjang lainnya [10],

[20], [52]. Berapa kasus peningkatan temperatur panel *photovoltaic* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kasus kebakaran pada panel *photovoltaic*.



Gambar 2. 5 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Kenaikan Temperatur [56]

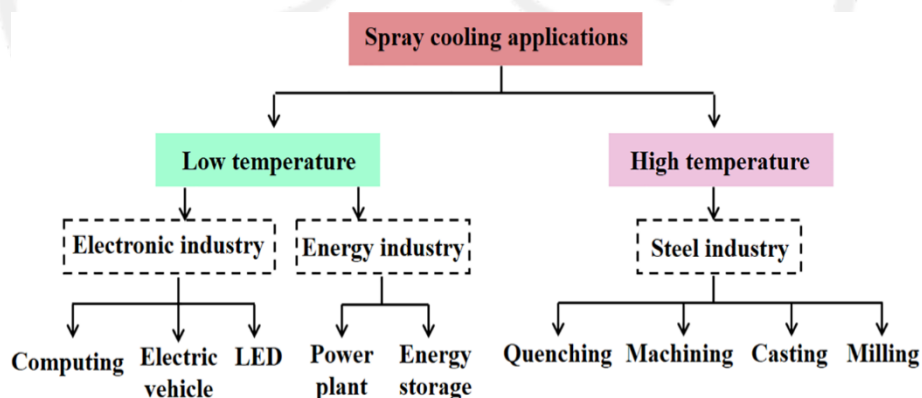
Upaya mengatasi peningkatan temperatur kerja pada panel *photovoltaic* yang diakibatkan oleh sinar matahari yang tidak dapat sepenuhnya dikonversi menjadi energi listrik ini, perlu adanya suatu sistem pendinginan untuk menjaga temperatur kerja panel *photovoltaic*. Sistem pendinginan bertujuan untuk mempertahankan kinerja optimal pada panel *photovoltaic* [20], [52]. Secara umum metode pendinginan yang dapat diterapkan untuk mengontrol temperatur panel *photovoltaic* adalah metode aktif, pasif, dan kombinasi antara pendinginan aktif dan pasif [53].

Sistem pendingin pasif tidak memerlukan sumber tenaga tambahan untuk menjalankan fungsi sebagai pendinginan panel *photovoltaic*. Panas dari panel *photovoltaic* diekstraksi dengan sirkulasi alami. Panas yang bersumber dari panel *photovoltaic* dialirkan ke lingkungan secara konduksi dan konveksi alami. Sistem pendingin menyerap panas dari permukaan dan mentransfernya ke lingkungan, sedangkan sistem pendingin aktif memerlukan energi tambahan untuk menjalankan

perangkat seperti kipas atau pompa untuk mengekstrak panas dari permukaan panel *photovoltaic*. Efek penggunaan komponen aktif (misalnya kipas dan pompa), pendinginan aktif menunjukkan kemampuan penghilangan panas yang tinggi dari panel *photovoltaic* dan terbukti lebih efektif dibandingkan dengan pendinginan pasif, sehingga dapat menghasilkan efisiensi listrik panel *photovoltaic* yang lebih tinggi [7].

2.2.4. Water Spray sebagai Pendingin Panel *Photovoltaic*

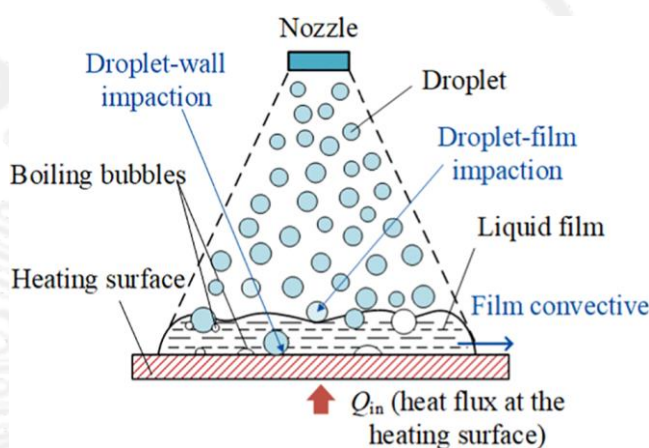
Seiring perkembangan teknologi modern telah mendorong perangkat elektronik berdaya tinggi, konversi energi dengan efisiensi tinggi, dan material logam berperforma tinggi. Berdasarkan hal tersebut, membangkitkan penelitian terkait metode pendinginan dengan performa pendinginan yang tinggi. Teknik pendinginan dengan udara dan air yang paling banyak diadopsi. Metode pendinginan dengan air dapat menunjukkan kapasitas laju pendinginan yang lebih baik daripada metode pendinginan dengan udara sehingga menjadi pilihan yang baik sebagai metode pendinginan [27], [57]. Sistem pendingin *water spray* merupakan salah satu metode pendinginan yang memanfaatkan air sebagai media pendinginnya. Penggunaan *spray cooling* sebagai media pendingin dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2. 6 *Spray Cooling Application* [27]

Salah satu pemanfaatan *water spray* sebagai metode pendinginan pada pembangkit listrik adalah pengaplikasiannya pada panel *photovoltaic* [36], [58]. Pendinginan dengan *water spray* merupakan teknik pendinginan dengan cairan bertekanan yang

dipaksa melalui lubang kecil (*nozzle*) sehingga menjadi droplet kecil, kemudian semburan droplet tersebut diarahkan kepada permukaan yang akan didinginkan [59]. Pada pendinginan dengan *water spray*, air sebagai cairan pendingin diubah menjadi droplet dengan *nozzle* dan tekanan. Pendinginan dengan *water spray* memberikan alternatif yang menarik sebagai metode pendinginan dengan efisiensi tinggi, kinerja perpindahan panas yang tinggi, dan tidak ada hambatan kontak termal [57], [49]. Skema kerja dari pendinginan dengan *water spray* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



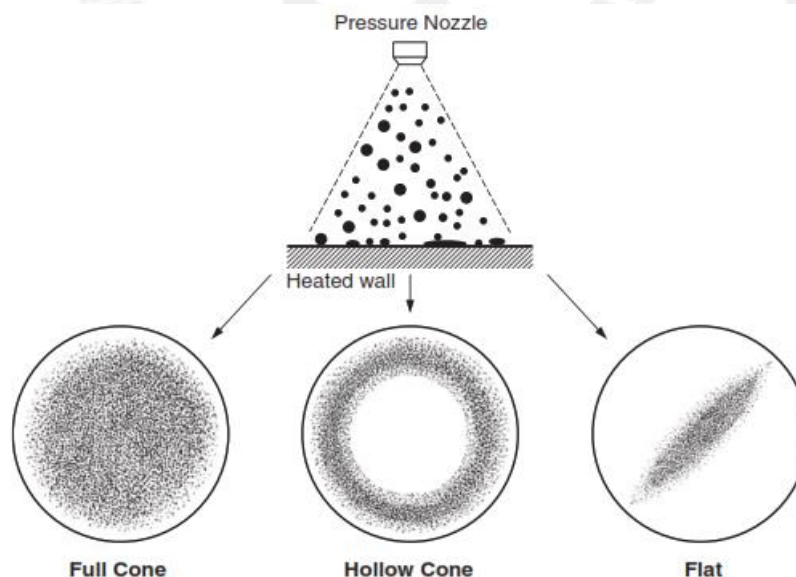
Gambar 2. 7 Skema Kerja Pendinginan dengan *Water spray* [27]

Dalam sistem pendingin *water spray*, pompa digunakan untuk memompa dan memberikan tekanan pada air yang mengalir ke *nozzle* penyemprot dari tangki air melalui pipa hisap. Pipa hisap terdiri dari katup dan saringan satu arah untuk menghindari tersedotnya partikel kotoran yang dapat membuat tersumbatnya *nozzle* dan untuk melindungi pompa dari kerusakan akibat adanya kotoran yang masuk. Saat menyembrotkan droplet air ke permukaan panel *photovoltaic*, temperatur panel akan menurun dan hasil *power output* meningkat sehingga efisiensi juga meningkat [60]. Secara umum komponen *water spray* yang diperlukan sebagai media pendingin adalah : (1) panel *photovoltaic* (2) tangki air, (3) pompa, (4) filter air, (5) *nozzle* dan (6) pipa drainase.

Komponen *nozzle* dalam metode pendinginan *water spray* merupakan bagian yang paling penting dalam menghasilkan bentuk semburan droplet air dan efeknya

terhadap performa pendinginan dengan *water spray* [61]. Terdapat berbagai macam jenis *nozzle* yang ada pada saat ini. Namun, tidak semua jenis *nozzle* sesuai jika digunakan sebagai media pendingin *water spray* [62]. *Pressure spray nozzle* lebih cocok untuk digunakan sebagai media pendinginan *water spray* karena ketergantungannya pada momentum cairan saja untuk mencapai droplet yang diinginkan [49]. *Pressure spray nozzle* diklasifikasikan berdasarkan bentuk profil semburan yang dihasilkan. Beberapa contoh yang biasa dipakai sebagai media pendingin adalah *full cone*, *hollow cone*, and *flat* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.

Full cone nozzle memiliki bentuk profil semburan lingkaran secara penuh dan jenis *nozzle* ini lebih disukai ketika diaplikasikan sebagai pendingin. Berbeda dengan *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* memiliki bentuk profil semburan lingkaran yang memusat pada sisi luar saja atau berongga sehingga semburan tidak memenuhi seluruh area. Di sisi lain, *flat nozzle* memiliki bentuk profil semburan yang cenderung datar atau oval dan area yang terkena semburan cenderung sempit [49]. Pada Gambar 2.8 ditunjukkan beberapa jenis *nozzle* dan bentuk profil semburan.

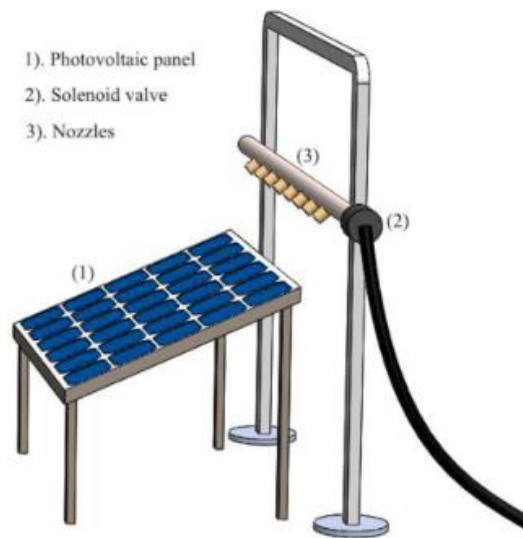


Gambar 2. 8 Jenis *Nozzle* [49]

Pemilihan besar tekanan dan kecepatan laju aliran air dapat mempengaruhi performa pendinginan dengan *water spray*. Pada penelitian oleh [63] membandingkan performa pendinginan *water spray* dengan tekanan tinggi dan tekanan rendah. Hasil yang didapatkan adalah performa pendinginan dan laju evaporasi dengan tekanan yang lebih tinggi pada *water spray* dapat menghasilkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tekanan yang lebih rendah.

Besar diameter *nozzle* berpengaruh terhadap besar sudut semburan dan ukuran droplet air pada setiap jenis *nozzle* [64]. Diameter *nozzle* yang lebih kecil dapat memberikan hasil evaporasi air yang lebih tinggi karena ukuran droplet yang dihasilkan lebih kecil sehingga droplet yang disemprotkan dapat dengan mudah menguap saat mengenai target [65]. Namun, jika sumber air yang digunakan mengandung banyak partikel kotoran, debu, dan tanah akan menjadi masalah karena dikhawatirkan dapat menyumbat *nozzle* dengan diameter yang lebih kecil. Diameter *nozzle* yang lebih kecil membutuhkan ukuran filter air yang lebih halus untuk menyaring partikel kotoran agar tidak masuk ke dalam *nozzle* yang dikhawatirkan dapat menyumbat *nozzle*.

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, sistem pendingin *water spray* terbukti efektif untuk menurunkan temperatur panel *photovoltaic* dan dapat meningkatkan efisiensi. Pada penelitian Bahaidarah [29] menggunakan *water spray cooling* sebagai metode pendinginan panel *photovoltaic* dapat menurunkan suhu panel dari 69,7 °C menjadi 31,1 °C – 36 °C. Pada penelitian lain dari Javidan and Moghadam 2021 [35] menggunakan sistem *water spray* yang dipasang pada bagian bawah PV dapat menurunkan suhu rata-rata panel *photovoltaic* dari 63,95 °C menjadi 33,68 °C. Peningkatan efisiensi kerja panel *photovoltaic* sebesar 33,3% dapat diperoleh dengan pulsed-spray water pada penelitian Hadipour et al., 2021 [34]. Contoh pengaplikasian sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* dapat dilihat pada Gambar 2.9 mengenai skema kerja *water spray* pada panel *photovoltaic*.



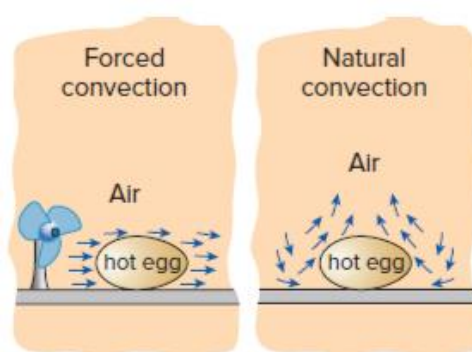
Gambar 2. 9 Skema Kerja *Water spray* pada Panel *Photovoltaic* [34]

2.2.5. Perpindahan Panas Panel *Photovoltaic*

Proses metode pendinginan panel *photovoltaic* dengan metode aktif dan pasif sudah pasti terjadi perpindahan panas. Perpindahan panas yang terjadi pada pendinginan panel *photovoltaic* dengan *water spray* yaitu perpindahan panas konduksi, konveksi, radiasi, dan evaporasi. Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan energi yang terjadi antara permukaan dua benda padat tanpa adanya gerakan partikel. Perpindahan panas secara konduksi lebih dipengaruhi oleh tahanan *thermal* dan konduktivitas pada bahan padat.

Perpindahan panas konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur yang menyebabkan gerakan acak antarmolekul dan *bulk motion* dari fluida. Semakin cepat pergerakan fluida, maka semakin besar laju perpindahan panas konveksi yang terjadi. Perpindahan panas konveksi dapat terjadi dalam dua cara, salah satunya yaitu konveksi bebas yang terjadi karena perbedaan densitas yang dihasilkan dari gradien suhu, kemudian menciptakan daya apung internal. Proses ini pada dasarnya dipengaruhi oleh sifat fluida dan kondisi proses, terutama di daerah dekat dinding. Perpindahan panas konveksi yang kedua adalah konveksi paksa.

Konveksi paksa terjadi karena adanya pergerakan fluida secara paksa yang bukan terjadi secara alamiah. Pergerakan fluida biasanya digerakkan oleh alat bantu pompa ataupun kipas. Fluida yang bergerak memiliki kecepatan tertentu yang bisa diukur oleh suatu sistem sesuai keadaan yang dikehendaki. Konveksi paksa sering digunakan pada perpindahan panas konveksi di suatu industri maupun di bidang otomotif. Konveksi paksa dan konveksi bebas ditunjukkan pada Gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2. 10 Konveksi Paksa dan Konveksi Bebas

Proses perpindahan panas yang melibatkan perubahan fase cairan juga dianggap sebagai proses konveksi karena gerakan fluida yang diinduksi selama proses seperti munculnya gelembung uap selama mendidih atau jatuhnya tetesan cairan selama kondensasi [66], [67]. Laju perpindahan panas secara konveksi \dot{Q}_{conv} dapat ditentukan dari hukum pendinginan newton, yang dinyatakan sebagai :

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_f) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_f) \text{ [W]} \quad (2.8)$$

Persamaan lain untuk mencari perpindahan panas konveksi adalah :

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (2.9)$$

dimana \dot{m} merupakan laju aliran massa, C_p merupakan *specific heat capacities*, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, A adalah luas permukaan di mana perpindahan panas terjadi, T_s adalah suhu permukaan, dan T_f adalah suhu fluida yang jauh dari permukaan, di mana di permukaan, suhu fluida sama dengan suhu permukaan padat tersebut [67]. Koefisien perpindahan panas konveksi h bukan merupakan sifat fluida. Hal ini adalah parameter yang ditentukan secara

eksperimental yang nilainya tergantung pada semua variabel yang mempengaruhi konveksi seperti geometri permukaan, sifat gerakan fluida, sifat-sifat fluida, dan kecepatan fluida. Nilai h , yang dinyatakan dalam $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Dimana nilai h menurut [66] dapat diketahui dengan :

$$h_{conv} = \frac{Nu \times k}{A} \quad (2.10)$$

keterangan :

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Nu = Bilangan nusselt

A = Luas area (m^2)

k = Konduktivitas thermal ($W/m \cdot C$)

Persamaan bilangan nusselt menurut [66] adalah sebagai berikut :

Persamaan bilangan nusselt pada aliran laminar ($Re_L < 5 \times 10^5$, dan $Pr > 0.6$)

$$Nu = 0,664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (2.11)$$

Persamaan bilangan nusselt pada aliran turbulen ($5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$, dan $0.6 \leq Pr \leq 60$)

$$Nu = 0,037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (2.12)$$

Perpindahan panas yang terjadi selanjutnya adalah perpindahan panas radiasi.

Persamaan perpindahan panas radiasi menurut [30], [68] adalah sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_p \cdot F_{xy} \cdot (T_x^4 - T_y^4) \quad (2.13)$$

Dimana =

σ = Konstanta stefan-boltzman ($W/m^2 \cdot K^4$)

ε = Emisivitas permukaan ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

A_p = Luas permukaan (m^2)

Total *heat loss* pada evaporasi dipengaruhi oleh suhu aliran air pada *water spray* dan juga kelembaban dan suhu udara di sekitar panel [30]. Secara umum persamaan untuk total *heat loss* evaporasi adalah sebagai berikut ini:

$$\dot{Q}_{evap} = e \cdot A_p \cdot (p_s - p_d) \cdot r \quad (2.14)$$

Dimana e merupakan faktor penguapan, A_p merupakan luasan area kontak, p_s & p_d merupakan partial pressure dan r merupakan panas laten dari evaporasi [68].

2.2.6. Perhitungan Daya dan Efisiensi Panel *Photovoltaic*

Panel *photovoltaic* ini merupakan perangkat yang kokoh dan sederhana serta hanya memerlukan sedikit perawatan. Keuntungan terbesar dari sistem ini adalah konstruksinya sebagai pembangkit energi yang mampu berdiri sendiri untuk skala kecil hingga besar, mulai dari aplikasi rumahan, satelit, hingga pembangkit listrik berskala megawatt [69]. Dalam hal ini, menurut Guardian et al. (2020) dan Pinheiro et al. (2019), parameter kinerja panel *photovoltaic* terdiri dari:

- Tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}), merupakan kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai bila tidak ada arus yang mengalir pada rangkaian.
- Arus hubung singkat (I_{SC}), merupakan listrik maksimum bila tidak ada hambatan pada rangkaian. Hubungan antara arus (I) dan tegangan keluaran (V) pada panel PV dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$I = I_{SC} \left(1 - e^{\frac{V-V_{OC}}{m \cdot V_T}} \right) \quad (2.15)$$

Keterangan:

I_{SC} = Arus hubung singkat (A)

V = Tegangan keluaran panel *photovoltaic* (V)

V_{OC} = Tegangan sirkuit terbuka (V)

V_T = Tegangan termal (V)

m = Faktor idealitas dioda

- Titik Daya Maksimum (P_{MPP}), merupakan titik pada kurva I-V yang menghasilkan perkalian arus (I_{MPP}) dan tegangan (V_{MPP}) maksimum, dengan persamaan berikut:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} \quad (2.16)$$

di mana,

$$I_{MPP} = \frac{G}{G^r} \times I_{MPP}^r \quad (2.17)$$

$$V_{MPP} = m \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{SC} - I_{MPP}}{I_0} \right) \quad (2.18)$$

Keterangan:

G = Radiasi matahari di lokasi (W/m^2)

G^r = Radiasi matahari pada *Standard Test Condition* (STC) (W/m^2)

I_{MPP}^* = Arus maksimal pada STC (A)

m = Faktor idealitas diode

V_T = Tegangan termal (V)

I_{SC} = Arus hubung singkat (A)

I_{MPP} = Arus maksimal (A)

I_0 = Arus saturasi (mA)

- d. *Fill factor* (FF), merupakan pembagian daya maksimum (P_{MPP}) pada V_{OC} dan I_{SC} . Persamaan FF dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}} = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (2.19)$$

- e. Efisiensi (η), merupakan perbandingan antara daya maksimum (P_{MPP}) dengan daya radiasi matahari yang diterima panel *photovoltaic* (P_{light}). Persamaan yang digunakan untuk mencari Efisiensi ditunjukkan di bawah ini:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{I_{light}} = \frac{P_{MPP}}{I_{rad} \times A} = \frac{I_{SC} \times V_{OC} \times FF}{I_{rad} \times A} \quad (2.20)$$

2.3. Kerangka Berpikir

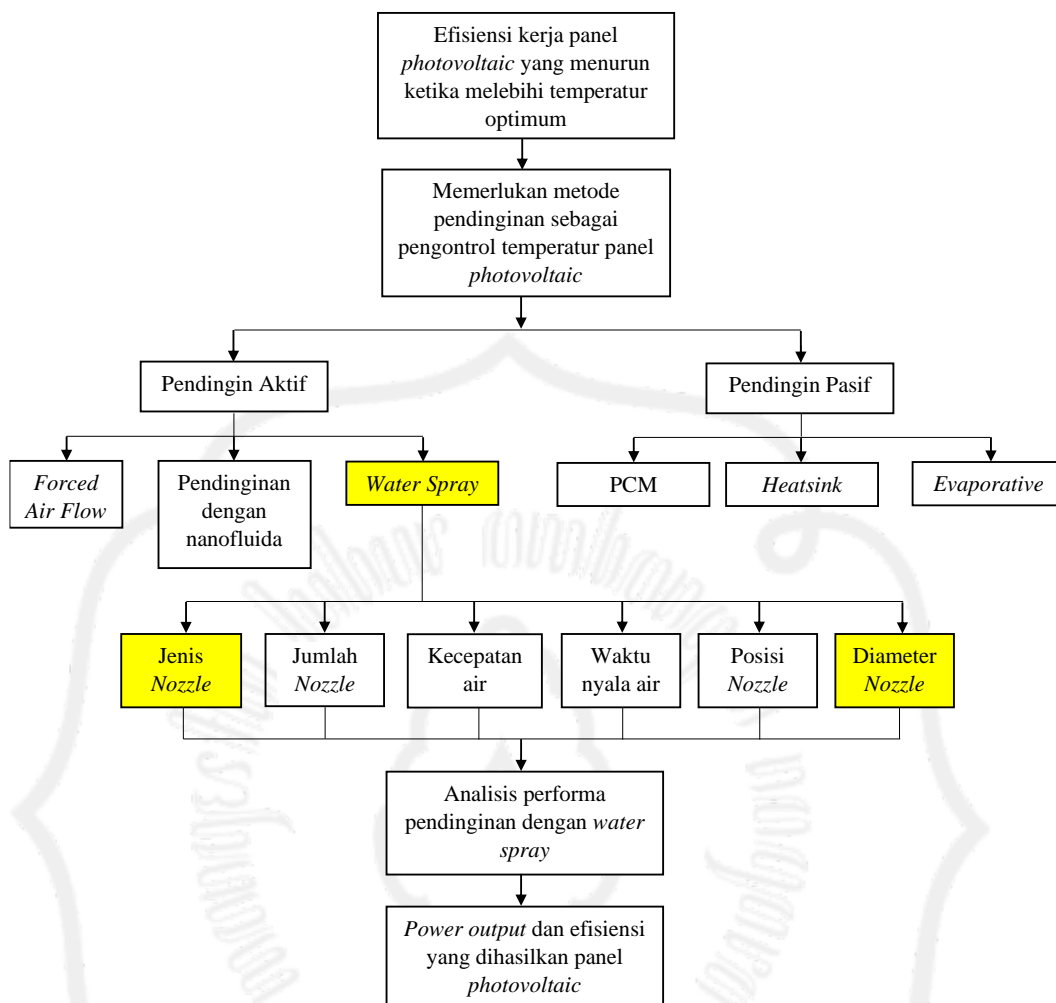
Kebutuhan energi baru terbarukan beberapa tahun terakhir semakin mengalami peningkatan. Energi surya merupakan salah satu energi baru terbarukan yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi. Energi surya dapat dimanfaatkan panasnya dengan menggunakan *thermal collector* dan menjadi sumber energi listrik dengan menggunakan panel *photovoltaic*. Terdapat kendala yang dialami oleh panel *photovoltaic* yaitu efisiensi kerja yang menurun ketika temperatur sel lebih tinggi dari temperatur kerja. Berdasarkan permasalahan tersebut berbagai penelitian terkait pendinginan yang dapat diterapkan untuk mengontrol temperatur sel sudah dilakukan. Secara umum metode pendinginan yang dapat diterapkan adalah metode pendinginan aktif, pasif, maupun kombinasi dari keduanya.

Pendinginan pasif memiliki kelebihan yaitu tidak memerlukan sumber energi tambahan untuk menjalankan proses pendinginan. Namun, dalam beberapa penelitian penurunan temperatur yang dihasilkan tidak dapat menurun dengan signifikan. Sedangkan metode pendinginan aktif dapat memberikan performa pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan metode pendinginan pasif

sehingga dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Metode pendinginan dengan *water spray* merupakan salah satu pendinginan aktif yang dapat dilakukan sebagai pengontrol temperatur panel *photovoltaic*. Pengaplikasian *water spray* sebagai metode pendinginan panel *photovoltaic* memiliki berbagai konfigurasi jenis *nozzle*, jumlah *nozzle*, posisi *nozzle*, diameter *nozzle*, dan kecepatan air dapat diterapkan.

Bentuk semburan air pada setiap jenis *nozzle* seperti *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, *flat fan nozzle* memiliki bentuk profil semburan air yang berbeda. Hal tersebut berdampak kepada seberapa besar area yang dapat terkena semburan air pada panel *photovoltaic*. Pemerataan area yang dapat terkena semburan air akan mempengaruhi seberapa cepat pendinginan dapat berlangsung dan menghindari area *hot spot* pada panel *photovoltaic* karena pendinginan yang tidak merata. Besarnya diameter pada tiap konfigurasi jenis *nozzle* berpengaruh terhadap besarnya sudut semburan dan ukuran droplet air. Besarnya sudut semburan air ini juga berdampak pada seberapa besar area yang dapat dicakup pada tiap konfigurasi jenis *nozzle* pada panel *photovoltaic*, sehingga pemilihan besar diameter berpengaruh pada performa pendinginan pada panel *photovoltaic*. Berbagai kecepatan air dapat diterapkan untuk mengoptimalkan performa pendinginan dengan *water spray* pada panel *photovoltaic*. Semakin besar kecepatan air yang digunakan maka semakin cepat juga performa pendinginannya, akan tetapi konsumsi air yang digunakan juga semakin meningkat.

Berdasarkan permasalahan yang sudah diuraikan tersebut perlu diteliti lebih lanjut mengenai konfigurasi jenis *nozzle*, diameter *nozzle* pada pendinginan Panel *photovoltaic* dengan *water spray* untuk mengoptimalkan performa pendinginan. Gambar 2.11 menunjukkan kerangka berpikir dari penelitian pendinginan panel *photovoltaic* menggunakan sistem *water spray*. Performa pendinginan yang optimal akan berdampak juga meningkatnya *power output* dan efisiensi pada panel *photovoltaic*.



Gambar 2. 11 Kerangka Berpikir

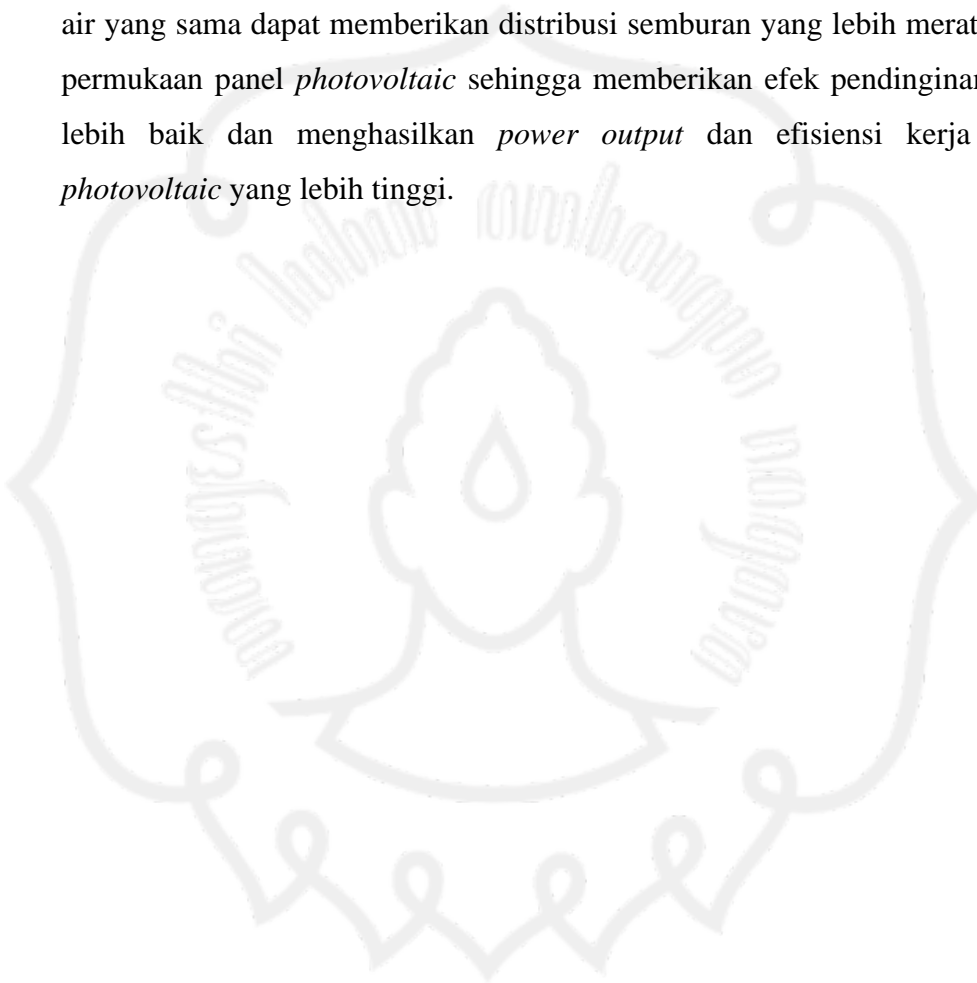
2.4. Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka dan kerangka berpikir yang telah ditulis sebelumnya dalam penelitian ini, dapat dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

1. Peningkatan temperatur diatas temperatur kerja ideal panel *photovoltaic* mengakibatkan menurunnya performa *photovoltaic*. Adanya penambahan sistem pendingin pada panel *photovoltaic* dapat meningkatkan hasil *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic*.
2. Setiap variasi jenis *nozzle* memiliki bentuk profil semburan air yang berbeda sehingga memberikan performa pendinginan yang berbeda. Pendinginan *water spray* dengan menggunakan *full cone nozzle* dapat memberikan performa

pendinginan yang paling baik karena dapat menghasilkan semburan air yang lebih merata pada permukaan panel *photovoltaic*. Pendinginan yang baik dapat menghasilkan *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic* yang lebih tinggi.

3. Besar diameter *nozzle* mempengaruhi performa pendinginan pada panel *photovoltaic*. Penggunaan *nozzle* dengan diameter yang lebih kecil pada debit air yang sama dapat memberikan distribusi semburan yang lebih merata pada permukaan panel *photovoltaic* sehingga memberikan efek pendinginan yang lebih baik dan menghasilkan *power output* dan efisiensi kerja panel *photovoltaic* yang lebih tinggi.



BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1. Tempat Penelitian

Pembuatan alat uji eksperimen dilakukan di Laboratorium Energi Surya Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Pengujian dan pengambilan data dilakukan di *rooftop* UNS Inn yang berlokasi di Surakarta dengan menggunakan cahaya matahari langsung.

3.1.2. Waktu Penelitian

Alokasi waktu yang direncanakan dalam penelitian, penyusunan tesis, hingga revisi laporan tesis adalah mulai dari bulan Januari 2023 s/d Januari 2024. Adapun rincian dan detail kegiatan dari waktu pelaksanaan penelitian, penyusunan tesis, dan revisi laporan tesis ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No.	Kegiatan	2023												2024	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
1	Pengajuan Judul	■													
2	Penyusunan Proposal	■	■	■											
3	Seminar Proposal			■											
4	Revisi Proposal				■										
5	Pengajuan Izin Penelitian				■										
6	Pelaksanaan Penelitian dan Analisis Data				■	■	■	■							
7	Penyusunan Hasil Penelitian						■	■	■						
8	Seminar Kemajuan dan Revisi									■					
9	Seminar Hasil dan Revisi										■				
10	Ujian Tesis												■		
11	Revisi Laporan Tesis													■	

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

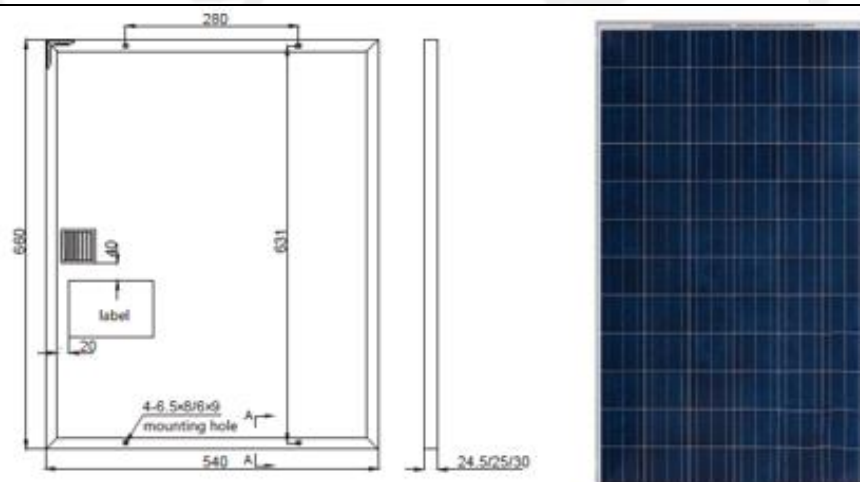
Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Panel *Photovoltaic*

Panel *photovoltaic* digunakan untuk mengeksitasi paparan sinar matahari menjadi energi listrik. Jenis panel *photovoltaic* yang digunakan pada penelitian ini adalah panel polikristal 50 Wp (Watt peak). Panel *photovoltaic* pada Gambar 3.1 diproduksi oleh Sunwatt Aust. Pty. Lty dengan spesifikasi yang dijabarkan pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Spesifikasi Panel *Photovoltaic*

Spesifikasi	Keterangan
Tipe Sel Surya	<i>Polycrystalline Silicon</i>
<i>Open-Circuit Voltage (Voc)</i>	21,24V
<i>Short-Circuit Current (Isc)</i>	3,11 A
<i>Maximum Power (Pmpp)</i>	50 Wp
<i>Current at Pmax (Imp)</i>	2,77 A
<i>Voltage at Pmax (Vpm)</i>	18,0 V
Efisiensi	17,6%
Dimensi	670mm x 530mm x 30mm



Gambar 3. 1 Panel *Photovoltaic*

2. Kerangka Sistem Pendinginan *Water Spray* pada Panel *Photovoltaic*

Kerangka yang telah didesain dalam penelitian ini ditunjukkan seperti pada Gambar 3.2 di bawah ini. Kerangka tersebut didesain dengan sudut kemiringan panel photovoltaic sebesar 12° menghadap utara. Kerangka ini memiliki dimensi 70 x 60 x 100 cm.



Gambar 3. 2 Kerangka Sistem Pendinginan *Water Spray*

3. Solar Power Meter

Solar power meter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur besarnya intensitas radiasi matahari (W/m^2). Solar power meter yang digunakan adalah Lutron SPM-1116SD yang memiliki akurasi $\pm 5\%$. Solar power meter diatur untuk merekam data intensitas radiasi matahari setiap menit selama periode pengukuran. Spesifikasi solar power meter ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3. 3 Spesifikasi Solar Power Meter

<i>Range</i>	2000 W/m^2 , 634 Btu/ (ft ² x h)
<i>Spectral response</i>	400 to 1100 nm
<i>Function</i>	<i>Solar Power, Power Integration, Transmission</i>
<i>SD card capacity</i>	1 GB to 16 GB, <i>SD card is optional</i>
<i>Application</i>	<i>Solar radiation measurement, solar power research, physics and optical laboratories solar transmission measurement</i>
<i>Connection</i>	RS-232/USB <i>computer interface</i>
<i>Power units</i>	W/m^2 or Btu / (ft ² xh)
<i>Brutto Weight</i>	0,8 kg

4. Sensor Temperatur

Sensor temperatur digunakan untuk mengukur temperatur panel PV. Sensor temperatur yang digunakan dalam penelitian ini merupakan thermocouple type-K dengan rentang pengukuran -270°C hingga 1260°C . Spesifikasi sensor temperatur ditunjukkan pada Tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3. 4 Spesifikasi Sensor Temperatur

Type K Temperature Range	
<i>Thermocouple grade wire</i>	-270 to 1260°C
<i>Extension wire</i>	0 to 20°C
Type K Accuracy	
<i>Standard</i>	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ or $\pm 0,75\%$
<i>Special Limits of Error</i>	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ or $0,4\%$

5. Multimeter

Multimeter merupakan alat ukur listrik yang digunakan untuk mengukur tiga jenis besaran listrik yaitu arus listrik, tegangan listrik dan hambatan. Pada penelitian ini alat ukur multimeter digunakan untuk mengukur arus listrik (I) dan tegangan listrik (V) sebagai daya output panel PV. Multimeter yang digunakan adalah Heles UX838-TR yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dibawah ini. Multimeter ini memiliki nilai error $\pm 3\%$ untuk arus DC dan $\pm 0,8\%$ untuk tegangan DC.



Gambar 3. 3 Multimeter

6. Pompa DC

Pompa adalah mesin untuk menggerakkan fluida. Pompa menggerakkan fluida dari tempat bertekanan rendah ke tempat dengan tekanan yang lebih tinggi. Pada penelitian ini menggunakan pompa DC Sakai ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.5 dan dibawah ini.

Tabel 3. 5 Spesifikasi Pompa DC

Spesifikasi	Keterangan
Tipe	Pompa air DC
Tegangan	12 V
Kuat arus	3,31 A
Aliran air	4 Lpm
Tekanan	80 Psi / 5,5 bar

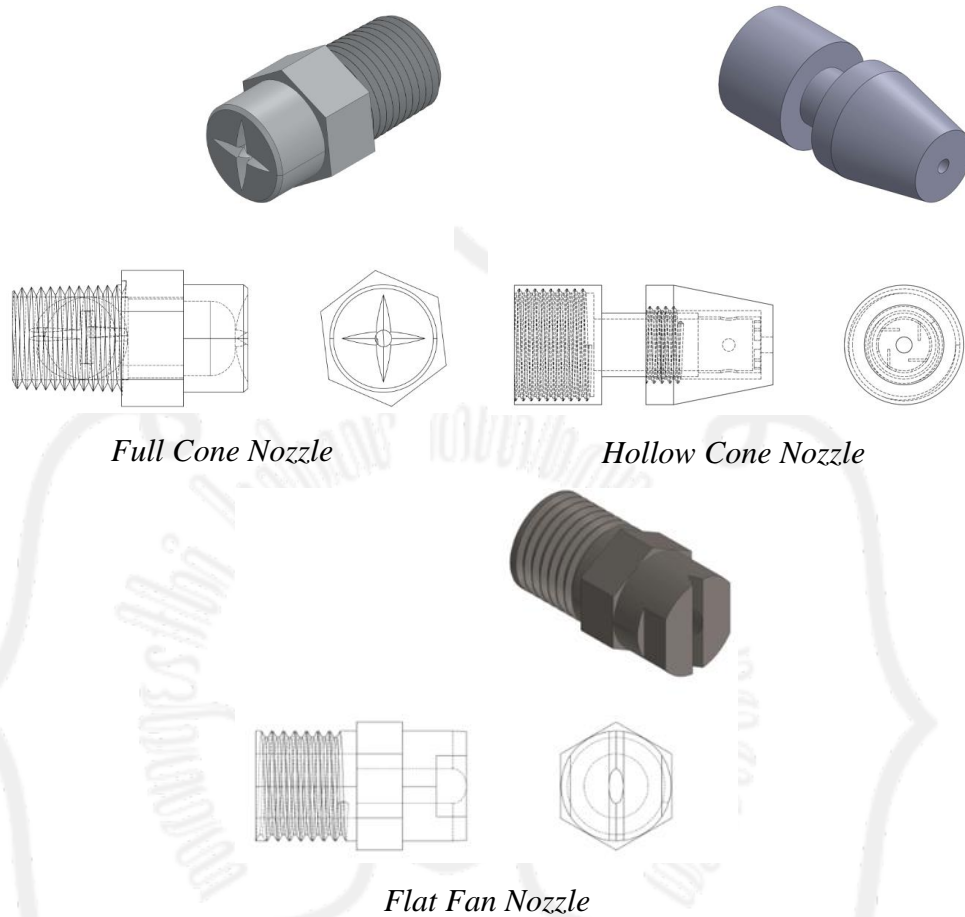


Gambar 3. 4 Pompa DC

7. Nozzle

Nozzle adalah alat atau perangkat yang dirancang untuk mengontrol arah atau karakteristik dari aliran fluida (terutama untuk meningkatkan kecepatan) saat keluar (atau memasuki) sebuah ruang tertutup atau pipa. *Nozzle* yang digunakan pada penelitian ini adalah *nozzle* dengan tipe *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat nozzle* ditunjukkan pada Gambar 3.5. *Flat fan nozzle* yang digunakan terbuat dari plastik ABS yang memiliki sudut semburan 65° dan koneksi ulir 1/4 inch. *Full cone nozzle* tipe SS304 yang digunakan memiliki sudut semburan $40^\circ - 120^\circ$ dan koneksi

ulir $\frac{1}{4}$ inch dengan ukuran 23×15 mm. *Hollow cone nozzle* yang digunakan terbuat dari kuningan dengan koneksi ulir $\frac{1}{4}$ inch.



Gambar 3. 5 Nozzle

8. Flow meter

Flow meter merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur besarnya aliran fluida pada suatu waktu. Pada penelitian ini flow meter digunakan untuk mengukur besarnya debit air pada sistem *water spray* yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Flow Meter

9. Termostat

Termostat merupakan alat yang digunakan sebagai pengontrol suhu yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Alat ini digunakan sebagai pengontrol suhu panel PV. Ketika suhu panel PV tinggi dan mencapai batas yang sudah ditentukan, alat ini akan menghidupkan sistem pendingin *water spray* sampai waktu yang sudah ditentukan.



Gambar 3. 7 Termostat

10. Dimmer

Dimmer merupakan alat tambahan yang digunakan untuk mengontrol besarnya kecepatan motor listrik yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. Pada penelitian ini *dimmer* berfungsi sebagai pengontrol kecepatan pompa yang nantinya juga akan mengatur besarnya kecepatan air.



Gambar 3. 8 *Dimmer*

11. Rheostat

Rheostat atau disebut hambatan merupakan salah satu jenis resistor variabel yang berguna untuk mengendalikan arus yang mengalir dan merubah resistansi dalam suatu rangkaian elektronik. Jenis *rheostat* yang digunakan merupakan tipe *sliding* yang memiliki spesifikasi kondisi kerja pada hambatan hingga 50 Ohm dan arus 5

Ampere. *Sliding rheostat* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.9 di bawah ini.



Gambar 3. 9 Rheostat

12. Data Logger

Data logger yang digunakan pada penelitian ini adalah Tasi TA612. *Data logger* ini digunakan untuk mencatat data temperatur secara realtime dan memberikan data yang lengkap dari *thermocouple* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10. Data loger ini memiliki 4 channel yang bisa dipasang *thermocouple* tipe J dan K. Tasi TA612 dapat merekam pengambilan data temperatur secara realtime dengan durasi tertentu dan dapat dihubungkan langsung ke PC menggunakan kabel micro USB untuk pengambilan data maupun memindah hasil data yang sudah di rekam.



Gambar 3. 10 Data Loger

3.3. Tatalaksana Penelitian

3.3.1. Variabel Penelitian

a. Variabel Bebas

Variabel bebas dari penelitian ini adalah jenis *nozzle* yang dipakai (*full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, *flat fan nozzle*) dan diameter *nozzle* (2 mm, 3 mm) pada sistem pendinginan panel *photovoltaic* dengan *water spray*.

b. Variabel Terikat

Variabel terikat atau *dependent variable* adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dari penelitian ini adalah temperatur panel *photovoltaic*, dan daya dan efisiensi yang dihasilkan panel *photovoltaic*.

c. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang menjadi setup penelitian yang memastikan penelitian dilakukan pada standar yang sama. Variabel kontrol yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Panel *photovoltaic* jenis polikristaline 50Wp (Watt peak) yang diproduksi oleh Sunwatt Aust. Pty. Ltd.
- 2) Sudut kemiringan panel *photovoltaic* adalah 12° menghadap utara sesuai dengan lokasi pengujian di kota Surakarta.
- 3) Debit air yang digunakan adalah 1,5 Lpm.
- 4) Durasi waktu sekali penyemprotan adalah 1 menit.
- 5) Pengujian dengan intensitas cahaya matahari pukul 08:00 – 17:00 WIB.

3.3.2. Prosedur Penelitian

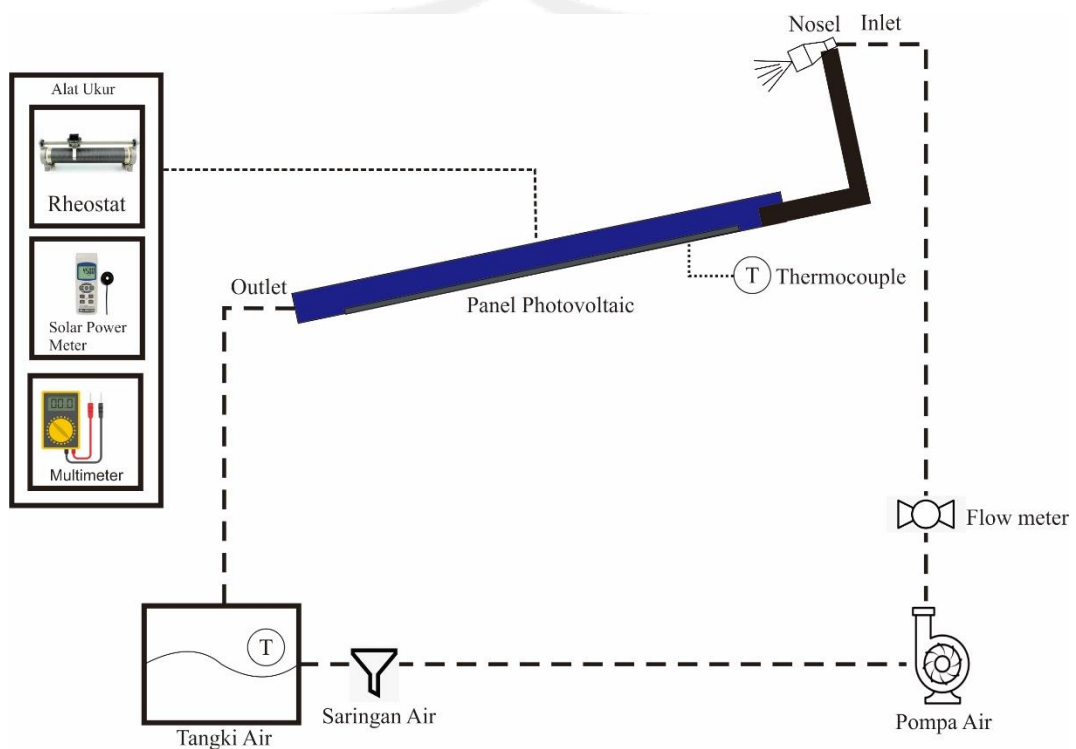
a. Persiapan Setup Eksperimen

Pada tahap persiapan eksperimen ini dimulai dengan mempersiapkan semua alat dan bahan yang dibutuhkan selama penelitian. Memposisikan sistem *water spray* berada di atas panel *photovoltaic* dan semua sensor pada tempat yang sudah ditentukan. Memperhatikan seluruh perangkat dapat bekerja dengan baik dan normal. Kalibrasi semua alat ukur agar pembacaan alat ukur dapat akurat selama proses penelitian.

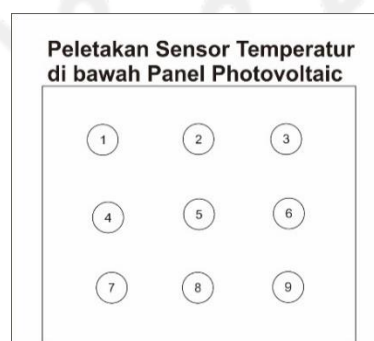
b. Pengujian Sistem

Pada penelitian ini pengujian sistem dilakukan dengan cara sebagai berikut :

- 1) Membuat kerangka yang akan dipasang panel *photovoltaic* dan sistem pendingin *water spray*.
- 2) Pemasangan panel *photovoltaic*, sistem pendingin *water spray*, dan sensor pada tempat dan lokasi yang sudah ditentukan seperti pada Gambar 3.11 dan Gambar 3.12.

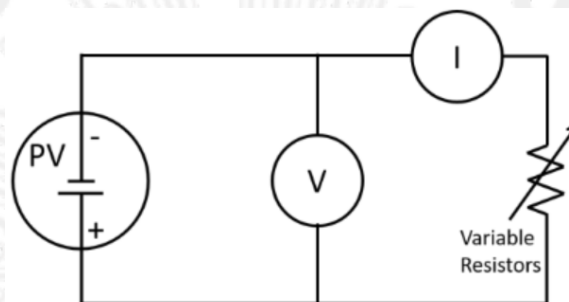


Gambar 3. 11 Desain Penelitian



Gambar 3. 12 Peletakan Sensor Temperatur

- 3) Penelitian dilakukan dengan menggunakan intensitas cahaya matahari pada pukul 08:00 – 17:00 WIB. Sistem pendingin *water spray* menyala selama 1 menit dalam interval waktu 1 jam sekali pada setiap variasi jenis *nozzle* dan diameter *nozzle*.
- 4) Menulis data hasil pengukuran intensitas radiasi matahari, temperatur, *power output* panel PV, dan debit air.
- 5) Perhitungan *power output* dan efisiensi panel PV. Pengujian karakteristik berupa kurva I-V dan P-V dilakukan dengan menggunakan *rheostat* pada setiap intensitas iradiasi dan variabel. Gambar skema pengujian tegangan dan arus yang dihasilkan panel PV dapat dilihat pada Gambar 3.13 dibawah ini.



Gambar 3. 13 Skema pengujian tegangan dan arus

- 6) Mengulangi langkah 1 – 5 pada setiap variasi jenis *nozzle* dan diameter *nozzle*.

c. Metode Pengambilan Data

Pada penelitian ini sistem pendinginan dengan *water spray* aktif selama 1 menit pada interval waktu 1 jam sekali. Intensitas cahaya matahari yang digunakan adalah pukul 08:00 – 17:00 WIB. Pengambilan data dilakukan setelah sistem pendingin *water spray* selesai mendinginkan panel *photovoltaic*. Pengambilan data temperatur menggunakan sensor *thermocouple* yang secara otomatis merekam data temperatur dengan datalogger pada panel PV. Pengambilan data *power output* menggunakan *rheostat* dan multimeter. Tabel 3.7 merupakan tabel untuk menulis hasil data I dan V yang dihasilkan panel *photovoltaic* dengan menggunakan *rheostat* dan multimeter.

Tabel 3. 6 Data *Power Output* Panel PV

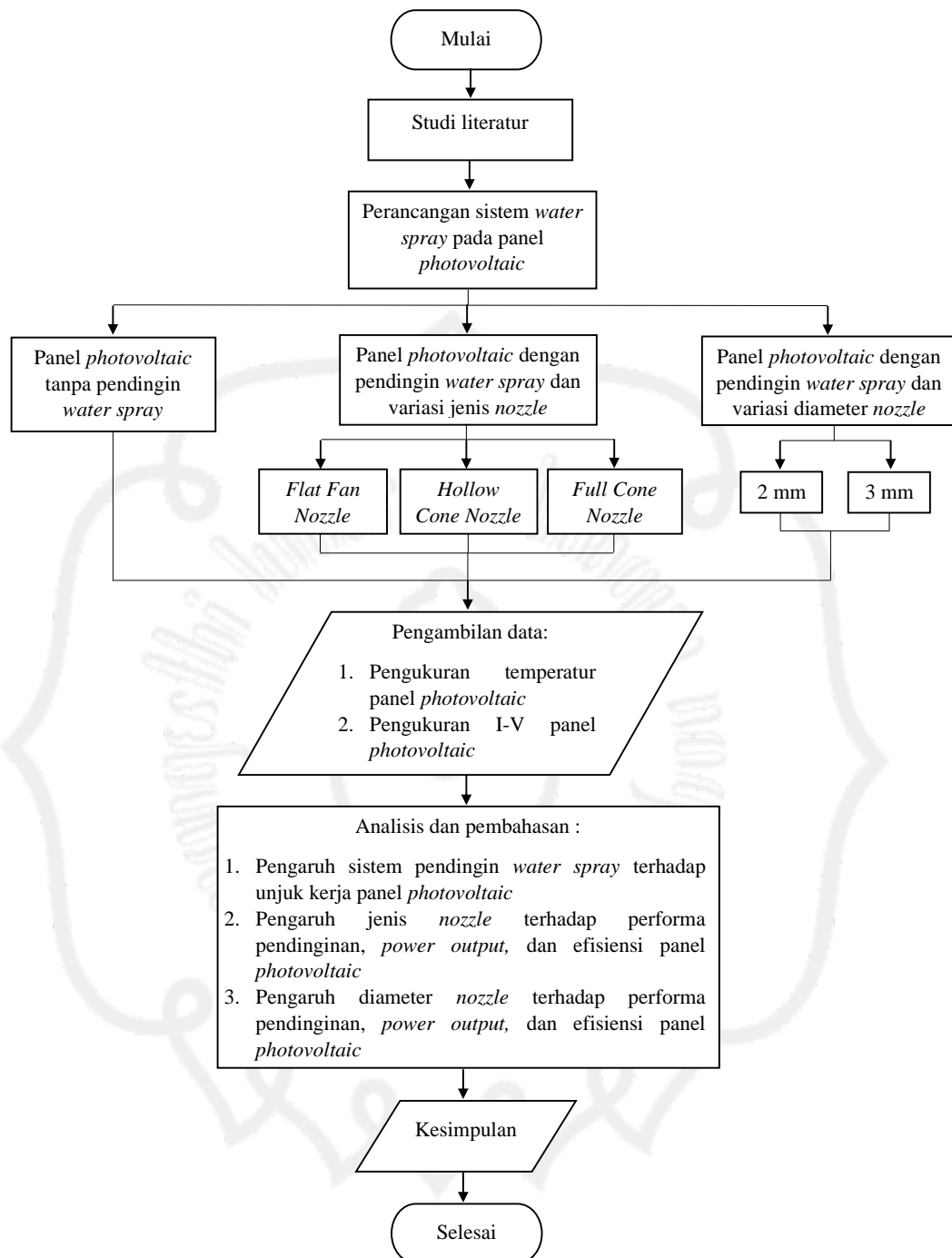
Pukul	08-00		09-00		10-00		11-00		12-00		13-00		14-00		15-00		16-00		17-00	
Intensitas																				
Power Output	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				

d. Metode Analisis Data

Metode analisis data menggunakan studi komparatif yaitu membandingkan hasil performa pendinginan, *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* pada setiap konfigurasi jenis dan diameter *nozzle*. Masing-masing variasi jenis dan diameter *nozzle* diuji pada rentang jam yang sama sehingga mendapatkan intensitas cahaya matahari pada pukul yang sama. Data yang sudah didapatkan dari hasil penelitian akan dianalisis lebih lanjut secara kuantitatif deskriptif.

e. Alur Penelitian

Alur penelitian yang dilaksanakan dapat dilihat secara lebih jelas dalam diagram alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.14 di bawah ini:



Gambar 3. 14 Diagram Alur

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Proses pembuatan dan pengujian prototipe pendinginan panel *photovoltaic* dengan menggunakan sistem pendingin *water spray* sudah dilakukan untuk mengetahui efek pendinginan terhadap temperatur dan unjuk kerja panel *photovoltaic*.

4.1. Hasil Data Pengujian

Penelitian ini menggunakan jenis dan diameter *nozzle* yang berbeda untuk mengetahui kombinasi yang paling optimal terhadap performa pendinginan untuk meningkatkan unjuk kerja panel *photovoltaic*. Jenis *nozzle* yang digunakan adalah *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* dengan diameter lubang *nozzle* 2 mm dan 3 mm pada setiap jenis *nozzle*. Penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan radiasi matahari secara langsung pada pukul 08:00 – 17:00 WIB dengan lokasi pengujian di *rooftop* Uns Inn (Universitas Sebelas Maret) kota Surakarta. Panel *photovoltaic* dimiringkan sebesar 12° menghadap utara berdasarkan sudut optimal Global Solar Atlas pada lokasi pengujian di kota Surakarta.

Data yang diperoleh dari hasil pengujian berupa data temperatur, *power output*, intensitas matahari, dan debit air. Analisis data pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan temperatur dan kinerja dari panel *photovoltaic* tanpa pendingin, menggunakan pendingin *water spray* dengan variasi jenis dan diameter *nozzle*. Pengambilan data dilakukan setelah sistem pendingin *water spray* selesai mendinginkan panel *photovoltaic*. Pengambilan data temperatur menggunakan sensor *thermocouple* yang diposisikan pada bagian bawah panel berjumlah 9 titik. Hasil pengukuran temperatur merupakan rata-rata dari pengambilan data *thermocouple* 9 titik. Pengambilan data intensitas radiasi matahari menggunakan *solar power meter* yang diposisikan di bagian atas panel *photovoltaic* dengan posisi yang sama pada setiap variasi. Pengukuran *power output* menggunakan *rheostat* dan multimeter sedangkan pengukuran debit air menggunakan flow meter.

4.1.1. Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* tanpa Pendingin *Water Spray*

Data unjuk kerja panel *photovoltaic* tanpa pendingin *water spray* ditunjukkan pada Tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4. 1 Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* tanpa Pendingin

Pukul (WIB)	Intensitas (W/m ²)	Suhu (°C)	Imp _p (A)	V _{mpp} (Volt)	P _{mpp} (Watt)	Efisiensi (%)
08:00	534	43,50	1,52	10,90	16,56	9,22
09:00	750	51,92	1,80	15,50	27,90	9,47
10:00	862	57,06	2,21	14,20	31,38	10,60
11:00	1024	61,96	2,11	17,50	36,92	10,98
12:00	986	59,78	2,23	15,60	34,78	10,49
13:00	936	58,16	2,17	15,20	32,98	10,48
14:00	756	57,50	1,89	14,00	26,46	10,41
15:00	589	45,70	1,78	10,33	18,38	9,28
16:00	255	39,08	0,67	7,40	4,95	5,78
17:00	160	36,30	0,43	4,67	2,00	3,73

4.1.2. Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* dengan Pendingin *Water Spray*

Unjuk kerja panel *photovoltaic* berdasarkan hasil uji eksperimen yang sudah dilakukan menggunakan pendinginan *water spray* dengan jenis *nozzle* yaitu: *flat fan nozzle*, *hollow cone nozzle*, *full cone nozzle* dan besar diameter lubang *nozzle* 2 mm dan 3 mm ditunjukkan pada Tabel 4.2 – Tabel 4.4 di bawah ini.

a. *Flat fan nozzle*

Tabel 4. 2 Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* dengan *Flat Fan Nozzle*

Diameter (mm)	Pukul (WIB)	Intensitas (W/m ²)	Suhu (°C)	Imp _p (A)	V _{mpp} (Volt)	P _{mpp} (Watt)	Efisiensi (%)
2	08:00	510	34,78	1,30	14,50	18,85	10,99
	09:00	730	36,60	1,71	17,90	30,60	12,47
	10:00	860	39,08	2,20	16,90	37,18	12,85
	11:00	1010	41,42	2,45	18,10	44,34	13,05
	12:00	970	42,41	2,34	17,30	40,48	12,41
	13:00	920	41,64	2,37	15,60	36,97	11,95
	14:00	700	40,02	1,59	16,50	26,23	11,14
	15:00	560	39,10	1,45	14,00	20,30	10,78
	16:00	280	36,57	0,91	7,40	6,73	7,15
	17:00	160	34,01	0,59	6,20	3,65	6,80

Diameter (mm)	Pukul (WIB)	Intensitas (W/m ²)	Suhu (°C)	Imp _{pp} (A)	V _{mpp} (Volt)	P _{mpp} (Watt)	Efisiensi (%)
3	08:00	480	35,36	1,21	14,10	17,06	10,57
	09:00	720	37,12	1,69	17,60	29,74	12,28
	10:00	850	39,82	2,10	17,30	36,33	12,71
	11:00	1010	42,07	2,43	17,90	43,49	12,81
	12:00	992	43,27	2,27	17,70	40,17	12,04
	13:00	913	42,18	2,09	16,70	34,90	11,37
	14:00	690	41,17	1,56	16,10	25,11	10,82
	15:00	560	40,11	1,42	13,90	19,73	10,48
	16:00	282	37,36	0,81	8,20	6,64	7,00
	17:00	166	34,79	0,79	4,30	3,39	6,08

b. Hollow cone nozzle

Tabel 4. 3 Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* dengan *Hollow Cone Nozzle*

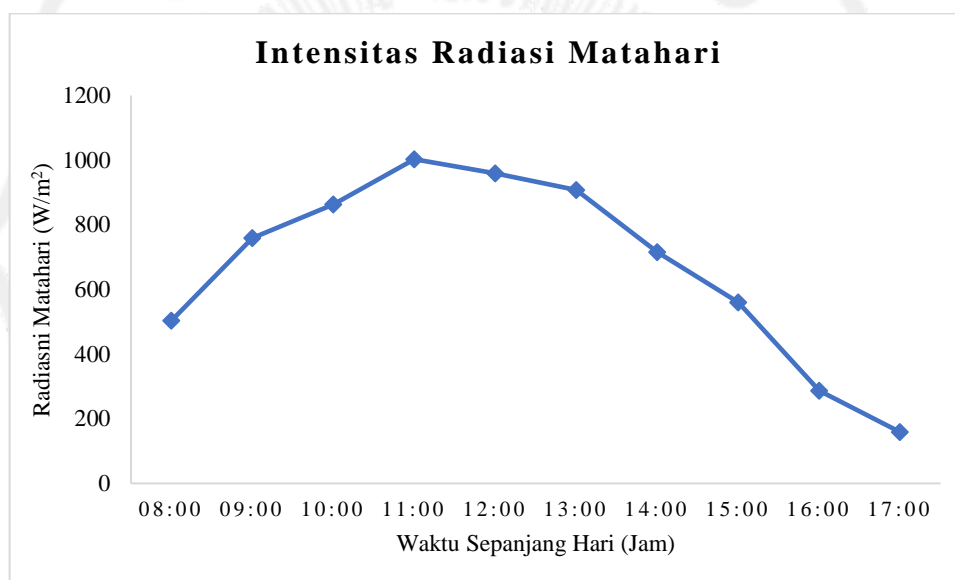
Diameter (mm)	Pukul (WIB)	Intensitas (W/m ²)	Suhu (°C)	Imp _{pp} (A)	V _{mpp} (Volt)	P _{mpp} (Watt)	Efisiensi (%)
2	08:00	500	31,69	1,53	13,20	20,19	12,01
	09:00	750	34,36	1,90	17,60	33,44	13,26
	10:00	860	36,71	2,20	18,10	39,82	13,77
	11:00	990	37,78	2,55	18,40	46,92	13,95
	12:00	950	40,20	2,61	16,80	43,84	13,72
	13:00	895	39,48	2,29	17,40	39,84	13,24
	14:00	730	38,10	2,06	15,00	30,90	12,59
	15:00	560	36,61	1,55	13,90	21,54	11,65
	16:00	300	33,96	1,10	7,90	8,69	8,61
	17:00	155	31,97	0,85	5,10	4,33	8,31
3	08:00	500	32,08	1,49	12,90	19,22	11,43
	09:00	750	34,91	1,87	17,60	32,91	13,05
	10:00	860	37,32	2,22	17,60	39,07	13,51
	11:00	990	38,84	2,51	18,30	45,93	13,66
	12:00	950	41,29	2,46	17,50	43,05	13,47
	13:00	890	39,82	2,40	16,20	38,88	12,99
	14:00	715	38,73	1,97	14,70	28,95	12,04
	15:00	560	37,48	1,60	13,20	21,12	11,21
	16:00	290	34,34	1,06	7,70	8,16	8,37
	17:00	155	32,41	0,65	6,30	4,09	7,85

c. *Full cone nozzle*Tabel 4. 4 Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic* dengan *Full Cone Nozzle*

Diameter (mm)	Pukul (WIB)	Intensitas (W/m ²)	Suhu (°C)	Imp _p (A)	V _{mpp} (Volt)	P _{mpp} (Watt)	Efisiensi (%)
2	08:00	500	30,30	1,30	16,80	21,84	12,99
	09:00	740	31,79	1,95	18,10	35,29	14,18
	10:00	860	34,11	2,39	17,50	41,82	14,46
	11:00	1000	36,27	2,63	18,50	48,65	14,47
	12:00	942	37,69	2,45	18,50	45,32	14,31
	13:00	900	36,99	2,34	17,70	41,41	13,68
	14:00	710	36,33	1,88	16,80	31,58	13,23
	15:00	550	34,46	1,37	16,50	22,60	12,22
	16:00	300	33,09	1,07	8,60	9,20	9,12
	17:00	160	30,72	0,85	5,50	4,67	8,69
3	08:00	500	31,08	1,27	16,60	21,08	12,54
	09:00	750	32,56	1,92	17,90	34,36	13,63
	10:00	870	35,44	2,29	17,90	40,99	14,01
	11:00	1000	37,07	2,60	18,40	47,84	14,23
	12:00	925	38,78	2,42	18,10	43,80	14,08
	13:00	900	37,44	2,28	17,80	40,58	13,41
	14:00	710	37,28	1,85	16,70	30,89	12,94
	15:00	550	34,78	1,35	16,20	21,87	11,82
	16:00	300	33,60	1,05	8,50	8,92	8,84
	17:00	155	31,28	0,82	5,40	4,42	8,49

4.2. Radiasi Matahari Sepanjang Hari

Penelitian pendinginan panel *photovoltaic* dengan sistem pendingin *water spray* dilakukan secara eksperimen menggunakan radiasi matahari secara langsung pada pukul 08:00 – 17:00 WIB dengan lokasi pengujian di *rooftop* Uns Inn (Universitas Sebelas Maret) kota Surakarta. Panel *photovoltaic* dimiringkan sebesar 12° menghadap utara berdasarkan sudut optimal Global Solar Atlas pada lokasi pengujian di kota Surakarta pada bulan Juli 2023. Grafik perolehan radiasi matahari sepanjang hari ditunjukkan pada Gambar 4.1. Intensitas radiasi matahari terbesar yang dapat diperoleh adalah 1000 W/m^2 pada pukul 11:00 WIB dan radiasi matahari terendah yang diperoleh adalah 155 W/m^2 pada pukul 17:00 WIB.



Gambar 4. 1 Grafik Intensitas Radiasi Matahari terhadap Waktu Sepanjang Hari

4.3. Efek Penambahan Sistem Pendingin *Water Spray* terhadap Temperatur dan Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic*

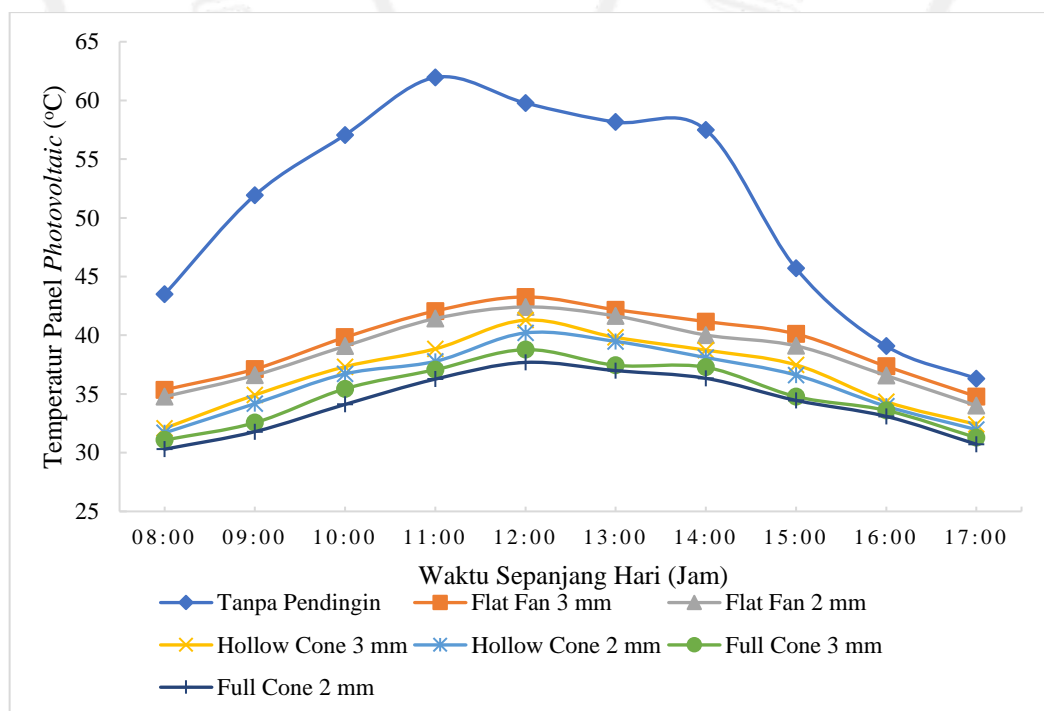
Panel *photovoltaic* memiliki kelemahan yaitu terjadi penurunan efisiensi kerja ketika temperatur panel *photovoltaic* melebihi temperatur kerja optimal. Temperatur kerja optimal panel *photovoltaic* adalah pada suhu 25 °C [37]. Unjuk kerja panel *photovoltaic* dipengaruhi oleh cuaca, temperatur, dan proses produksi dari panel *photovoltaic* tersebut. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat yang dimiliki material semikonduktor yang terdapat dalam sel panel *photovoltaic*. Dalam sel, aktivitas termal meningkat dengan suhu, meningkatkan pergerakan partikel. Akibatnya, resistensi internal sel dapat meningkat sebagai akibat dari peningkatan pergerakan ini. Akibatnya, ini akan mengurangi kemampuan sel untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi arus listrik.

Tegangan celah, yang merupakan perbedaan potensial antara lapisan positif dan negatif sel *photovoltaic*, dapat menurun saat suhu meningkat. Jika tegangan celah ini menurun sebagai akibat dari suhu yang tinggi, kemampuan sel untuk menghasilkan tegangan dan arus listrik juga akan menurun. Hasilnya, ketika suhu panel meningkat, efisiensi konversi energi mereka menurun. Dengan kata lain, ketika suhu tinggi, efisiensi konversi energi surya menjadi energi listrik cenderung menurun, yang berarti bahwa panel *photovoltaic* tidak dapat berfungsi dengan baik untuk menghasilkan energi listrik. Peningkatan temperatur kerja pada panel *photovoltaic* dapat mempengaruhi beberapa karakteristik panel seperti menurunkan tegangan sirkuit terbuka (Voc) sehingga menurunkan hasil *power output* (Pmpp).

Peningkatan temperatur tersebut dapat diatasi dengan menambahkan sistem pendingin *water spray* sebagai kontrol temperatur panel *photovoltaic*. Pendinginan dengan *water spray* merupakan teknik pendinginan dengan cairan bertekanan yang dipaksa melalui lubang kecil (*nozzle*) sehingga menjadi droplet kecil, kemudian semburan droplet tersebut diarahkan kepada permukaan panel *photovoltaic* [59]. Pendinginan dengan *water spray* memberikan alternatif yang menarik sebagai metode pendinginan dengan efisiensi tinggi, kinerja perpindahan panas yang tinggi, dan tidak ada hambatan kontak termal [57], [49]. Dalam penelitian ini meneliti

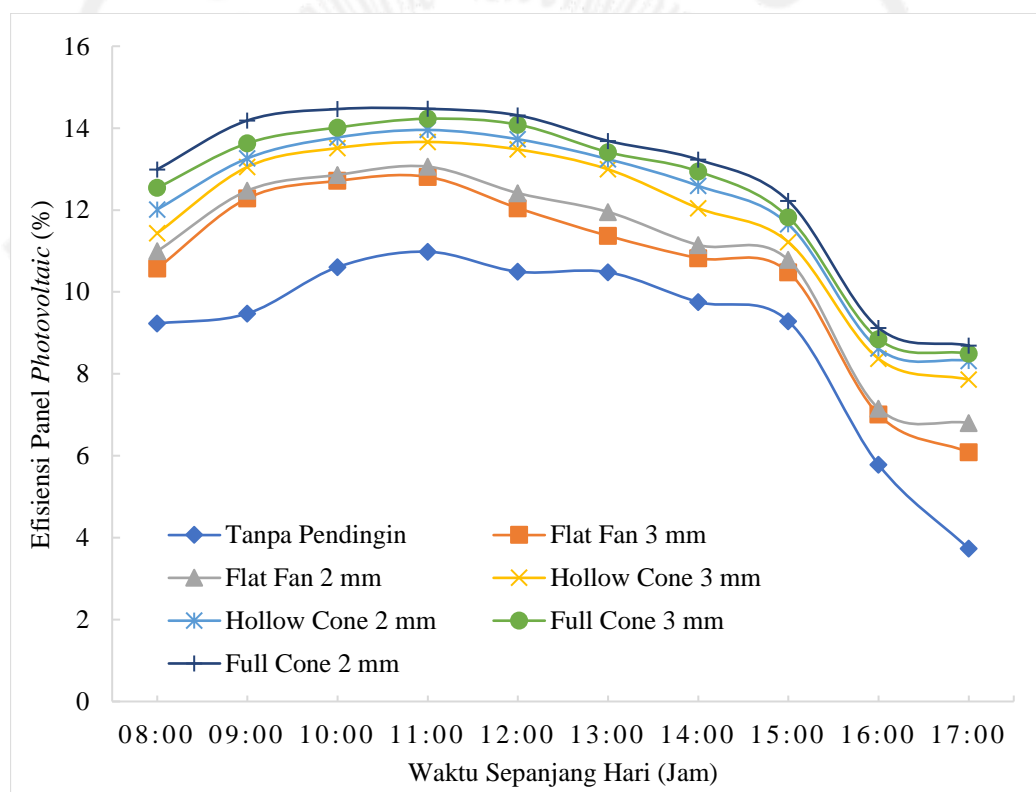
seberapa besar perbedaan penurunan temperatur dari variasi jenis dan diameter *nozzle* dimana jenis *nozzle* yang digunakan adalah *full cone*, *hollow cone*, *flat fan* dengan masing-masing diameter lubang 2 mm dan 3 mm.

Gambar 4.2 berikut ini menunjukkan grafik temperatur panel *photovoltaic* tanpa pendingin dan menggunakan pendingin *water spray* terhadap waktu sepanjang hari pada setiap variasi yang diteliti. Temperatur panel *photovoltaic* dihitung dari hasil rata-rata pengukuran 9 titik dengan *thermocouple* yang dipasang pada bagian belakang panel *photovoltaic*. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa temperatur panel *photovoltaic* tanpa pendingin lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan pendingin *water spray* pada setiap waktu sepanjang hari. Hasil penurunan temperatur berbeda-beda tergantung dari variasi geometri lubang *nozzle* yang digunakan. Penambahan sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* dapat menurunkan suhu dari 61,96 menjadi 36,51 °C dengan variasi *full cone nozzle* diameter lubang *nozzle* 2 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m².



Gambar 4. 2 Grafik Temperatur Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari

Penurunan temperatur yang terjadi pada panel *photovoltaic* mengakibatkan peningkatan hasil *power output* dan efisiensi kerja. Gambar 4.3 menunjukkan grafik efisiensi panel *photovoltaic* tanpa penambahan pendingin *water spray* dengan penambahan pendingin *water spray* terhadap waktu sepanjang hari dengan masing-masing variasi. Efisiensi kerja panel *photovoltaic* dengan sistem pendingin *water spray* lebih tinggi pada setiap waktu dibandingkan panel *photovoltaic* tanpa pendingin, hasil ini sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya oleh [33], [34], [72]. Efisiensi panel *photovoltaic* pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 meningkat dari 10,98 menjadi 14,47 % jika ditambahkan pendingin dengan variasi *full cone nozzle* diameter 2 mm.



Gambar 4. 3 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari

4.4. Efek Penggunaan Jenis *Nozzle* yang Berbeda pada Sistem Pendingin *Water Spray* terhadap Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic*

Penggunaan jenis *nozzle* yang berbeda pada sistem pendingin *water spray* dapat memberikan performa pendinginan yang berbeda [25], [26]. *Nozzle* adalah sebuah

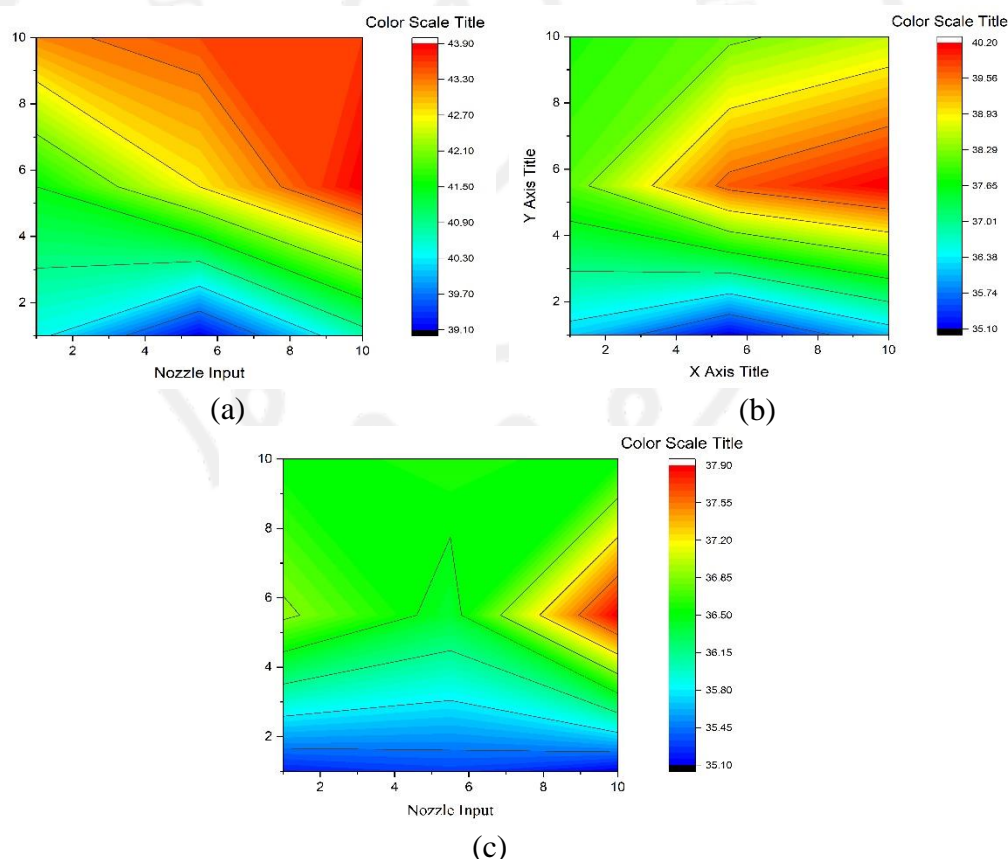
komponen yang peranannya sangat besar dalam kehidupan sehari-hari. Fungsinya yang utama adalah untuk mengatur arah dan karakteristik dari aliran fluida. Biasanya *nozzle* digunakan untuk meningkatkan kecepatan aliran fluida sesuai dengan tekanan yang diberikan. Komponen *nozzle* dalam metode pendinginan *water spray* merupakan bagian yang penting dalam menghasilkan bentuk semburan droplet air dan efeknya terhadap performa pendinginan dengan *water spray* [61].

Sistem pendingin yang dapat menghasilkan distribusi temperatur yang seragam dalam panel *photovoltaic* merupakan faktor penting [35]. Untuk memperoleh pendinginan yang seragam dengan menggunakan sistem *water spray* dalam panel *photovoltaic* dibutuhkan pemilihan *nozzle* yang tepat. Hasil penelitian ini, penggunaan *full cone nozzle* dapat memberikan pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 – Tabel 4.4. *Full cone nozzle* memiliki bentuk profil semburan lingkaran secara penuh, sedangkan *hollow cone nozzle* memiliki bentuk profil semburan lingkaran yang memusat pada sisi luar saja atau berongga pada bagian dalam sehingga semburan tidak memenuhi seluruh area. Disisi lain, *flat nozzle* memiliki bentuk profil semburan yang cenderung datar atau oval dan area yang terkena semburan hanya bagian ujung panel *photovoltaic* yang kemudian air mengalir ke bawah panel [49].

Full cone nozzle dapat memberikan distribusi semburan air yang lebih merata pada sebagian besar permukaan panel *photovoltaic* sehingga dapat menurunkan temperatur panel yang lebih baik jika dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. Distribusi semburan air dari *nozzle* yang dapat mengenai lebih banyak permukaan panel *photovoltaic* dapat memberikan distribusi pendinginan yang lebih seragam pada seluruh area sehingga menurunkan temperatur lebih tinggi. Pendinginan *water spray* dengan *hollow cone nozzle* memberikan hasil pendinginan yang kurang baik, dikarenakan pada bagian tengah terdapat rongga yang tidak terkena semburan air sehingga menghasilkan area *hotspot* dan temperatur pada bagian tengah panel *photovoltaic* cenderung lebih tinggi. Sedangkan pendinginan *water spray* dengan *flat fan nozzle* menghasilkan performa

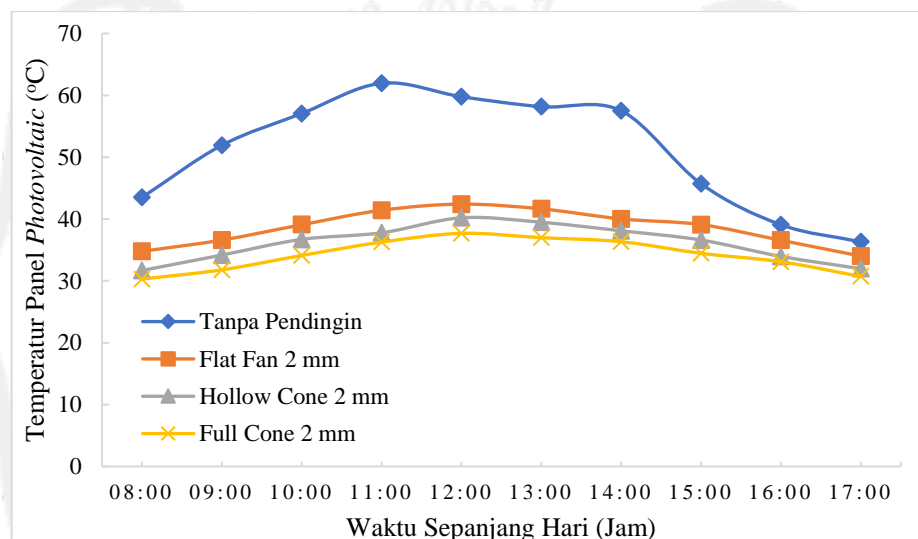
pendinginan yang paling rendah, dikarenakan bentuk semburan yang mendatar sehingga semburan air hanya berfokus pada bagian ujung panel *photovoltaic*. Semburan air yang hanya berfokus pada bagian ujung panel *photovoltaic* mengakibatkan efek pendinginan yang tidak seragam pada seluruh panel sehingga temperatur panel masih tinggi jika dibandingkan dengan *full cone nozzle* dan *hollow cone nozzle*.

Berdasarkan hasil penelitian, *full cone nozzle* dapat menurunkan temperatur panel *photovoltaic* yang lebih baik jika dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. *Full cone nozzle* dapat memberikan semburan yang lebih merata pada permukaan panel *photovoltaic* sehingga menciptakan pendinginan yang lebih seragam yang ditunjukkan oleh gambar kontur distribusi temperatur panel *photovoltaic* pada Gambar 4.4 dibawah ini. Performa pendinginan yang lebih baik dapat menghasilkan hasil *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* yang tinggi.

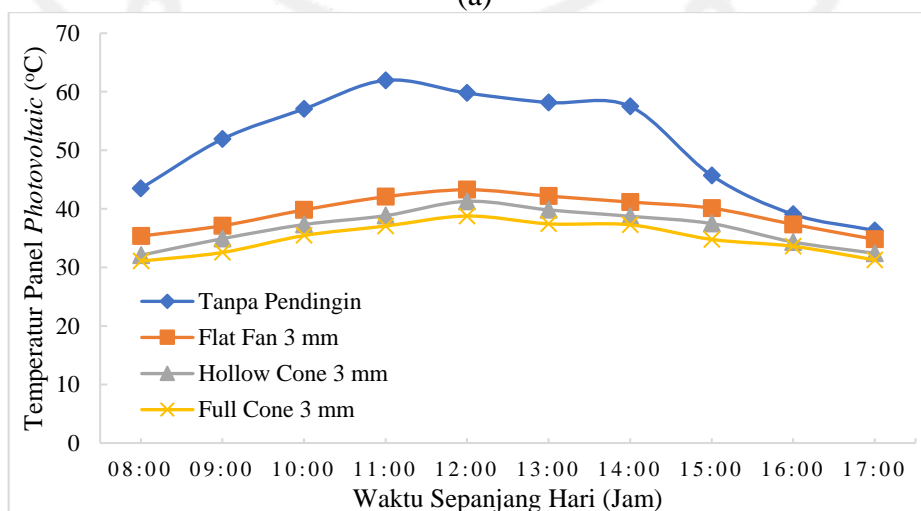


Gambar 4. 4 Kontur Distribusi Temperatur pada Panel *Photovoltaic* dengan (a) *Flat Fan Nozzle*, (b) *Hollow Cone Nozzle*, (c) *Full Cone Nozzle*

Gambar 4.5 menunjukkan grafik temperatur rata-rata panel *photovoltaic* terhadap waktu sepanjang hari pada setiap jenis *nozzle*. Pada pukul 11:00 dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 dapat mendinginkan panel *photovoltaic* dari $61,96$ menjadi $36,27 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan menggunakan *full cone nozzle* diameter lubang 2 mm . Pada jam yang sama hasil penggunaan *water spray* dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* dengan diameter 2 mm adalah $37,78$ dan $41,42 \text{ }^\circ\text{C}$. Hasil pengujian temperatur panel *photovoltaic* dengan jenis *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* dengan diameter 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 1000 W/m^2 adalah $37,07$; $38,84$; dan $42,07 \text{ }^\circ\text{C}$.



(a)

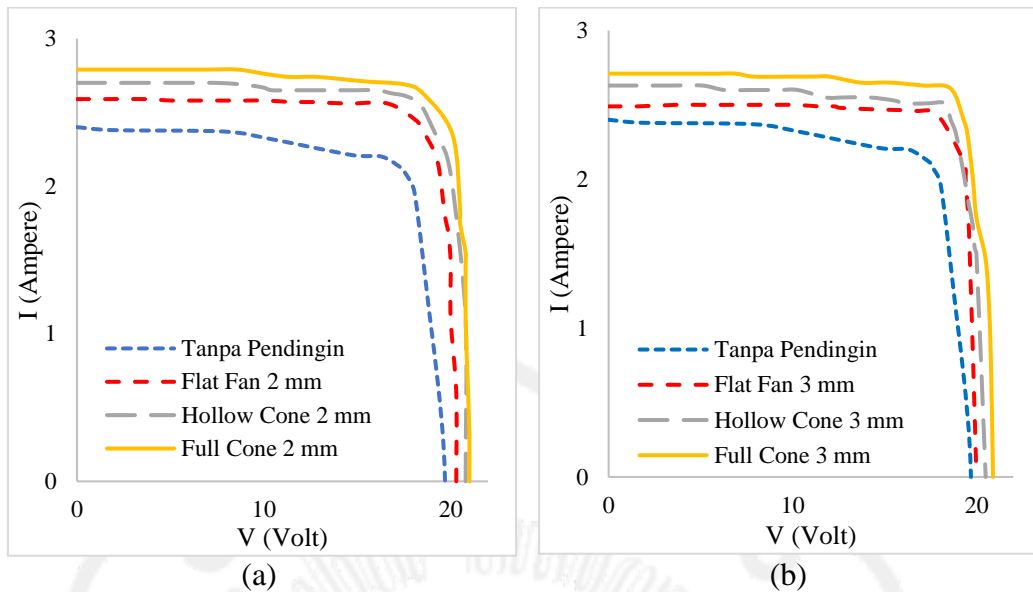


(b)

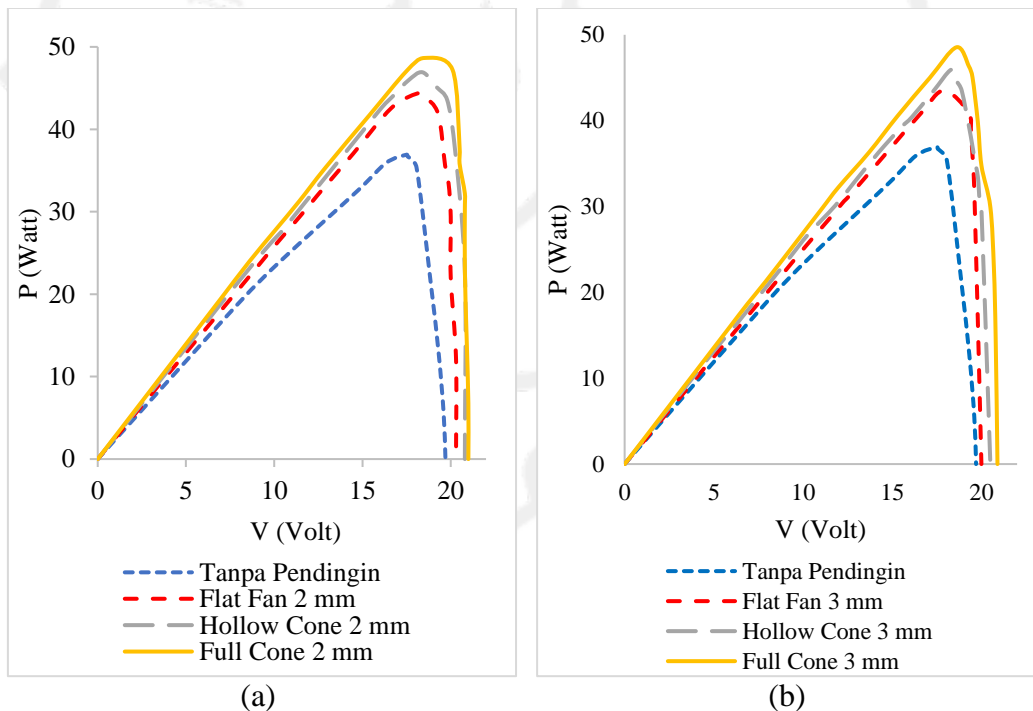
Gambar 4. 5 Grafik Temperatur Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari, (a) Diameter *Nozzle* 2 mm , (b) Diameter *Nozzle* 3 mm

Gambar 4.6 merupakan grafik hubungan I-V dan Gambar 4.7 merupakan grafik hubungan P-V pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 pada setiap jenis *nozzle*. Pendinginan yang lebih baik berdampak positif terhadap hasil *power output* yang dihasilkan, dimana P_{mpp} yang dihasilkan dengan menggunakan *full cone nozzle* lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. Hasil *power output* (P_{mpp}) pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 yang dihasilkan dengan variasi *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, dan *flat fan nozzle* diameter yang sama yaitu 2 mm adalah 48,65; 46,92; dan 44,34 Watt. Sedangkan hasil *power output* (P_{mpp}) pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 yang dihasilkan dengan variasi *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle*, dan *flat fan nozzle* diameter yang sama yaitu 3 mm adalah 47,85; 45,93; dan 43,49 Watt. *Power output* (P_{mpp}) yang dihasilkan dengan variasi *full cone nozzle* lebih tinggi daripada variasi *hollow cone* dan *flat fan nozzle* dikarenakan temperatur kerja panel *photovoltaic* yang lebih rendah.

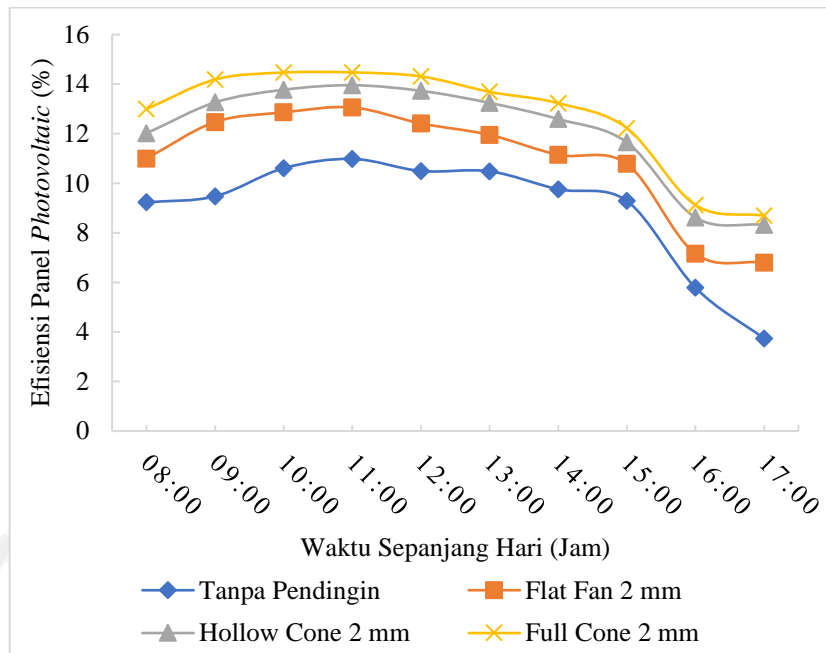
Efisiensi panel *photovoltaic* pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 menggunakan *full cone nozzle* diameter lubang 2 mm adalah 14,47 %. Hasil efisiensi panel *photovoltaic* dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 dengan diameter lubang 2 mm memberikan hasil yang lebih rendah yaitu 13,95 dan 13,05 %. Hasil efisiensi panel *photovoltaic* dengan penggunaan *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* dengan diameter 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 1000 W/m^2 adalah 14,23; 13,66; dan 12,81 %. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan jenis *nozzle* yaitu *full cone nozzle* pada sistem pendingin *water spray* dapat memberikan hasil efisiensi panel *photovoltaic* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*.



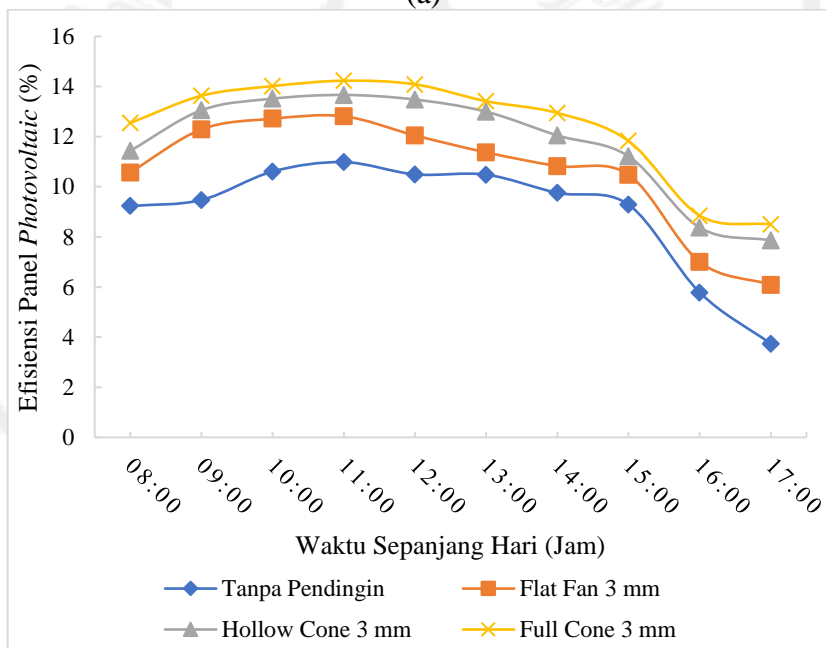
Gambar 4. 6 (a) Grafik I-V Panel *Photovoltaic* Diameter Lubang *Nozzle* 2 mm, (b) Grafik I-V Panel *Photovoltaic* dengan Diameter Lubang *Nozzle* 3 mm



Gambar 4. 7 (a) Grafik P-V Panel *Photovoltaic* Diameter Lubang *Nozzle* 2 mm, (b) Grafik P-V Panel *Photovoltaic* dengan Diameter Lubang *Nozzle* 3 mm



(a)



(b)

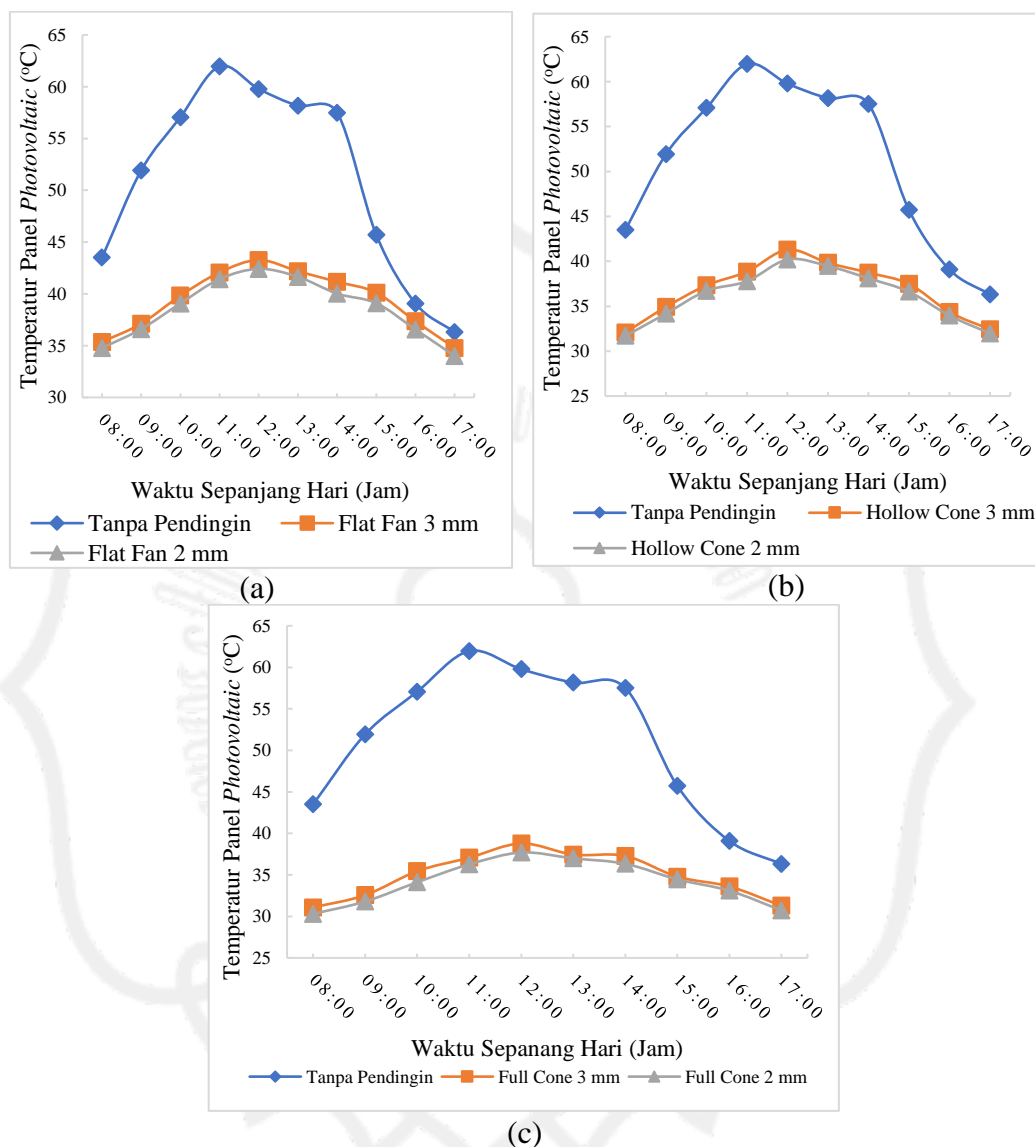
Gambar 4. 8 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari dengan, (a) Diameter *Nozzle* 2 mm, (b) Diameter *Nozzle* 3 mm

4.5. Efek Penggunaan Diameter *Nozzle* yang Berbeda pada Sistem Pendingin *Water Spray* terhadap Unjuk Kerja Panel *Photovoltaic*

Perbedaan besar diameter lubang *nozzle* pada sistem pendingin *water spray* yang digunakan menghasilkan performa pendinginan yang berbeda dan jika diaplikasikan pada panel *photovoltaic* dapat menghasilkan *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* yang berbeda juga [35]. Besar diameter lubang *nozzle* mempengaruhi besar ukuran droplet air yang dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 – Tabel 4.4 diameter lubang *nozzle* 2 mm dapat mendinginkan panel *photovoltaic* lebih baik daripada diameter lubang *nozzle* 3 mm pada setiap variasi jenis *nozzle*. Penggunaan diameter *nozzle* 2 mm dapat menghasilkan hasil pendinginan yang lebih baik dikarenakan dapat memberikan semburan air yang lebih kuat dan merata pada permukaan panel *photovoltaic* dengan debit air yang sama yaitu 1,5 Lpm. Sedangkan *nozzle* dengan diameter lubang 3 mm menghasilkan semburan yang kurang optimal dan lebih lemah daripada diameter lubang *nozzle* 2 mm pada setiap jenis *nozzle* yang digunakan, sehingga semburan air kurang maksimal menyebar mengenai permukaan panel *photovoltaic* dengan debit air yang sama yaitu 1,5 Lpm. Hal tersebut yang menjadikan hasil pendinginan dengan diameter lubang *nozzle* 2 mm lebih optimal daripada diameter lubang *nozzle* 3 mm pada setiap variasi jenis *nozzle* yang digunakan yaitu *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. Untuk memaksimalkan semburan air dengan diameter lubang *nozzle* 3 mm dibutuhkan debit air yang lebih tinggi dari 1,5 Lpm.

Gambar 4.9 menunjukkan grafik temperatur panel *photovoltaic* pada setiap waktu sepanjang hari dengan variasi diameter *nozzle*. Hasil penelitian sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur panel *photovoltaic* dengan *flat fan nozzle* diameter 2 dan 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 adalah 41,42 dan 42,07 °C. Hasil penelitian sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur panel *photovoltaic* dengan *hollow cone nozzle* diameter 2 dan 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 adalah 37,78 dan 38,84 °C. Hasil penelitian sistem pendingin *water spray* terhadap temperatur

panel *photovoltaic* dengan *full cone nozzle* diameter 2 dan 3 mm pada pukul 11.00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 adalah $36,27$ dan $37,07 \text{ }^\circ\text{C}$.



Gambar 4. 9 Grafik Temperatur Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu Sepanjang Hari dengan Jenis Nozzle (a) *Flat Fan Nozzle*, (b) *Hollow Cone Nozzle*, dan (c) *Full Cone Nozzle*

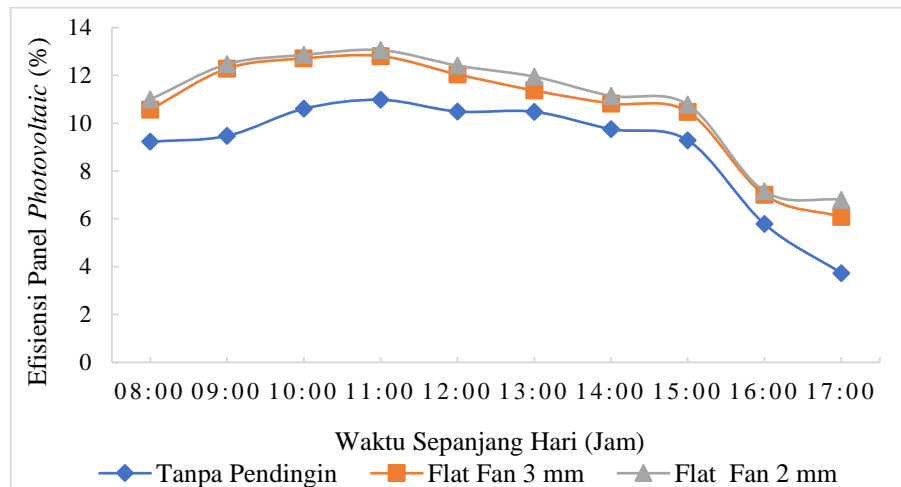
Temperatur panel *photovoltaic* yang lebih rendah berdampak positif terhadap peningkatan *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* sehingga. Perolehan hasil efisiensi yang lebih tinggi dikarenakan pendinginan yang lebih baik dapat memaksimalkan hasil *power output* yang dihasilkan panel *photovoltaic*. Berdasarkan hasil penelitian, perolehan *power output* dan efisiensi panel

photovoltaic dengan sistem pendingin *water spray* menggunakan diameter lubang *nozzle* 2 mm lebih tinggi dibandingkan dengan diameter lubang *nozzle* 3 mm. Hasil efisiensi panel *photovoltaic* pada waktu sepanjang hari dengan variasi diameter lubang *nozzle* ditunjukkan pada Gambar 4.10.

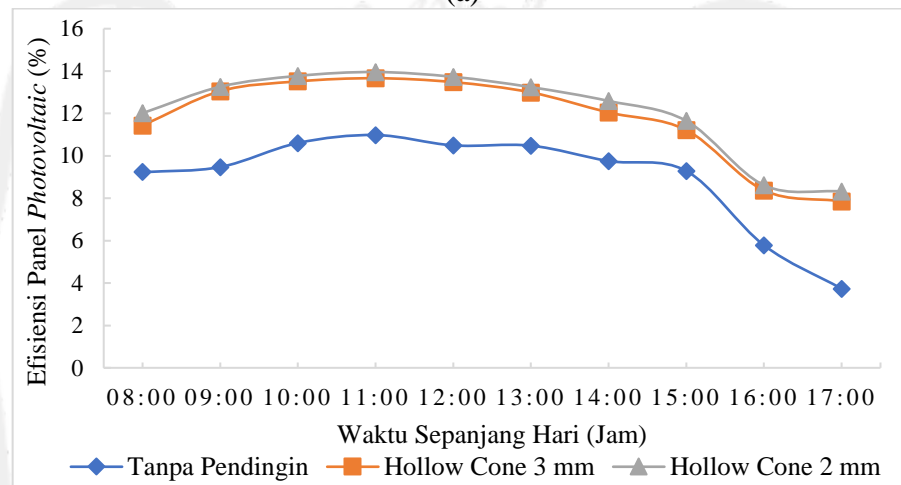
Power output dan efisiensi tertinggi diperoleh dengan besar diameter *nozzle* 2 mm pada *full cone nozzle* yaitu sebesar 48,65 Watt dan 14,47 % pada intensitas 1000 W/m² pengujian pukul 11:00 WIB. Sementara, dengan waktu yang sama dan jenis *nozzle* yang sama yaitu *full cone nozzle* dengan besar diameter 3 mm hanya menghasilkan *power output* dan efisiensi sebesar 47,84 Watt dan 14,23 %. Perolehan hasil efisiensi panel *photovoltaic* dengan menggunakan diameter lubang *nozzle* sebesar 2 mm memperoleh hasil yang lebih tinggi daripada diameter *nozzle* 3 mm pada setiap variasi jenis *nozzle*. Perolehan hasil efisiensi yang lebih tinggi dikarenakan efek pendinginan yang lebih baik yang dimana didapatkan dengan diameter lubang *nozzle* 2 mm dapat memaksimalkan hasil *power output* yang dihasilkan panel *photovoltaic* dibandingkan dengan diameter lubang *nozzle* 3 mm.

Hasil *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* menggunakan *hollow cone nozzle* juga memberikan hasil yang sama dimana *nozzle* dengan diameter lubang 2 mm menghasilkan *power output* dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan 3 mm. *Power output* dengan jenis *nozzle* yaitu *hollow cone* pada diameter lubang 2 mm dan 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas 1000 W/m² adalah 46,92 dan 45,93 Watt. Hasil efisiensi panel *photovoltaic* menggunakan *hollow cone nozzle* dengan diameter lubang 2 dan 3 mm adalah 13,95 dan 13,66 %.

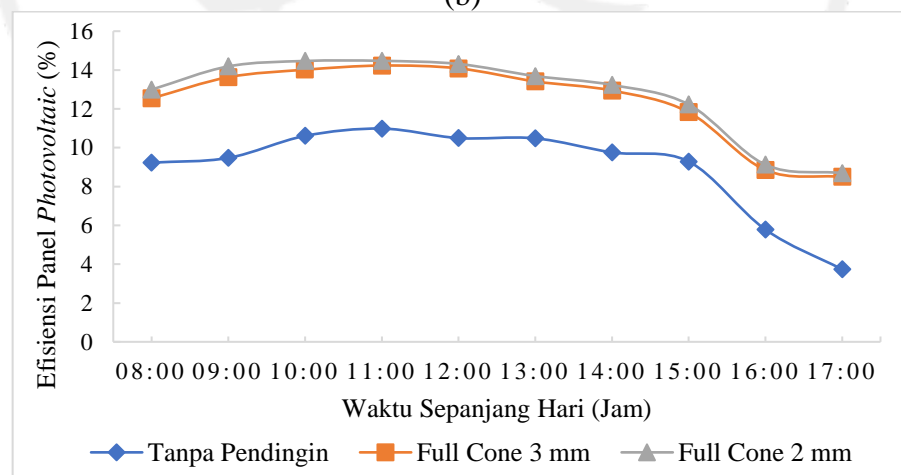
Hasil *power output* dan efisiensi panel *photovoltaic* menggunakan *flat fan nozzle* juga memberikan hasil yang sama dimana *nozzle* dengan diameter lubang 2 mm menghasilkan *power output* dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan 3 mm. *Power output* dengan jenis *nozzle* yaitu *flat fan* pada diameter lubang 2 mm dan 3 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas 1000 W/m² adalah 44,34 dan 43,49 Watt. Hasil efisiensi panel *photovoltaic* dengan *flat fan nozzle* dan besar diameter 2 mm dan 3 mm berturut turut adalah 13,05 dan 12,81 %.



(a)



(b)



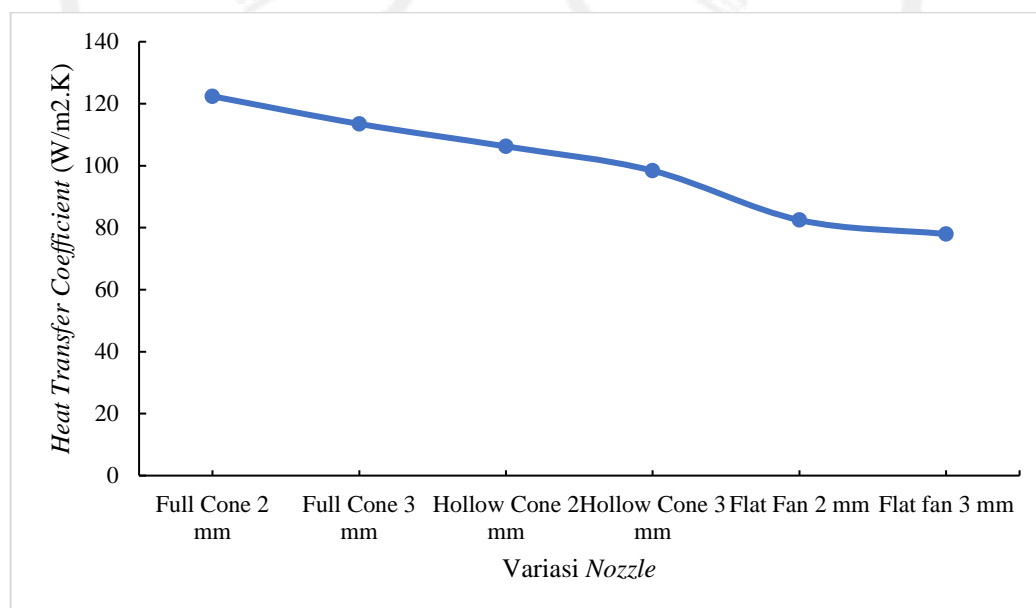
(c)

Gambar 4. 10 Grafik Efisiensi Panel *Photovoltaic* terhadap Waktu pada Setiap Variasi Diameter *Nozzle* dengan (a) *Flat Fan Nozzle*, (b) *Hollow Cone Nozzle*, dan (c) *Full Cone Nozzle*

4.6. Perpindahan Panas Konveksi pada Sistem Pendingin *Water Spray*

Perpindahan panas konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur yang menyebabkan gerakan acak antarmolekul dan *bulk motion* dari fluida. Perpindahan panas konveksi dapat terjadi dalam dua cara, salah satunya yaitu konveksi bebas yang terjadi karena perbedaan densitas yang dihasilkan dari gradien suhu, kemudian menciptakan daya apung internal. Proses ini pada dasarnya dipengaruhi oleh sifat fluida dan kondisi proses, terutama di daerah dekat dinding. Perpindahan panas konveksi yang kedua adalah konveksi paksa.

Konveksi paksa terjadi karena adanya pergerakan fluida secara paksa yang bukan terjadi secara alamiah. Pergerakan fluida biasanya digerakkan oleh alat bantu pompa ataupun kipas. Fluida yang bergerak memiliki kecepatan tertentu yang bisa diukur oleh suatu sistem sesuai keadaan yang dikehendaki. Pendinginan *water spray* pada panel *photovoltaic* terjadi perpindahan panas secara konveksi paksa. Gambar 4.11 merupakan *heat transfer coefficient* (h) pada setiap variasi *nozzle* yang digunakan dalam penelitian ini pada pukul 11:00 dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 .



Gambar 4. 11 Grafik Nilai *Heat Transfer Coefficient* pada Setiap Variasi *Nozzle*

Heat transfer coefficient yang dihasilkan pada jenis *nozzle full cone* dengan diameter lubang 2 mm memiliki nilai tertinggi yaitu sebesar 122,38 W/m².K dan yang terendah sebesar 77,93 W/m².K yang dihasilkan pada variasi *flat fan nozzle* dengan diameter lubang 3 mm. *Full cone nozzle* dapat menghasilkan nilai *heat transfer coefficient* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* pada diameter lubang yang sama. Nilai *heat transfer coefficient* yang dihasilkan oleh masing-masing jenis *nozzle* yaitu *full cone*, *hollow cone*, dan *flat fan* pada diameter *nozzle* yang sama yaitu 2 mm adalah 122,38; 106,22; 82,46 W/m².K. Sedangkan, nilai *heat transfer coefficient* yang dihasilkan dengan diameter lubang *nozzle* 3 mm lebih rendah dibandingkan dengan diameter lubang *nozzle* 2 mm. Nilai *heat transfer coefficient* yang dihasilkan oleh masing-masing jenis *nozzle* yaitu *full cone*, *hollow cone*, dan *flat fan* pada diameter *nozzle* yang sama yaitu 3 mm adalah 113,48; 98,37; 77,93 W/m².K.

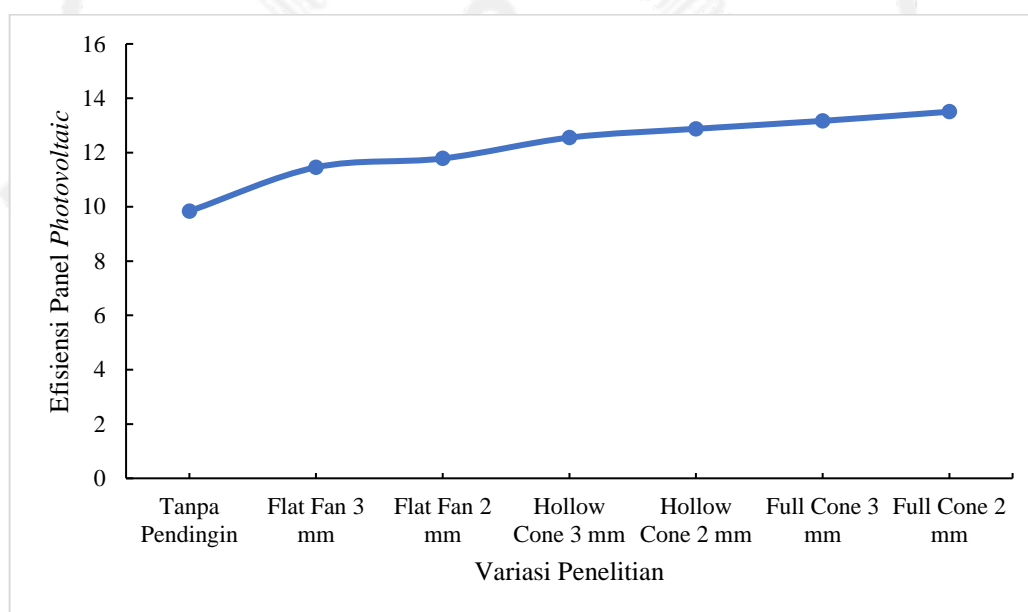
4.7. Perolehan Efisiensi Panel *Photovoltaic* dalam Satu Hari Tanpa Pendingin dan menggunakan Pendingin *Water Spray*

Tabel 4.5 berikut ini merupakan hasil perolehan efisiensi panel *photovoltaic* dalam satu hari dengan pengujian pada pukul 08:00-17:00 WIB. Perhitungan hasil efisiensi panel *photovoltaic* dilakukan dengan menghitung nilai Pmpp rata-rata yang diperoleh pada pengujian pukul 08:00-17:00 WIB dibagi dengan I light dikali dengan 100 %.

Tabel 4. 5 Tabel Hasil Perolehan Efisiensi Panel *Photovoltaic* dalam Satu Hari dengan Durasi Pengujian Pukul 08:00-17:00 WIB

Variasi	Efisiensi (%)
Tanpa Pendingin	9,84
<i>Flat Fan</i> 3 mm	11,45
<i>Flat Fan</i> 2 mm	11,78
<i>Hollow Cone</i> 3 mm	12,54
<i>Hollow Cone</i> 2 mm	12,87
<i>Full Cone</i> 3 mm	13,16
<i>Full Cone</i> 2 mm	13,50

Gambar 4.12 merupakan gambar grafik perolehan efisiensi panel photovoltaic dalam satu hari pada setiap variasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat peningkatan efisiensi panel *photovoltaic* dalam satu hari dengan menambahkan sistem pendingin *water spray*. Perolehan efisiensi panel *photovoltaic* dalam satu hari tanpa pendingin hanya sebesar 9,84 % sedangkan efisiensi panel *photovoltaic* dengan pendingin *water spray* sebesar 13,50 %. Variasi jenis *full cone nozzle* dengan diameter *nozzle* 2 mm menghasilkan efisiensi paling tinggi dengan nilai efisiensi 13,50 % dan efisiensi paling rendah sebesar 11,45 % dengan variasi jenis *flat fan nozzle* dengan diameter *nozzle* 3 mm. Hasil tersebut dikarenakan variasi *full cone nozzle* 2 mm dapat memberikan pendinginan panel *photovoltaic* yang paling baik jika dibandingkan variasi lainnya.



Gambar 4. 12 Grafik Perolehan Efisiensi Panel *Photovoltaic* dalam Satu Hari

Hasil penelitian yang didapatkan berdasarkan Tabel 4.5 dan Gambar 4.12 menunjukkan bahwa penggunaan jenis dan diameter *nozzle* yang digunakan pada pendinginan *water spray* memberikan hasil efisiensi panel *photovoltaic* yang berbeda. *Full cone nozzle* yang dapat memberikan distribusi semprotan air yang mengenai lebih banyak permukaan panel *photovoltaic* menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. Besar diameter

nozzle yang digunakan pada penelitian ini adalah 2 dan 3 mm pada setiap jenis *nozzle*. Hasil yang didapatkan adalah dengan penggunaan diameter sebesar 2 mm menghasilkan efisiensi panel *photovoltaic* yang lebih baik jika dibandingkan penggunaan besar diameter 3 mm pada setiap jenis *nozzle* yang digunakan. Oleh karena hal tersebut hasil efisiensi panel *photovoltaic* dengan variasi *full cone nozzle* diameter 2 mm menghasilkan efisiensi yang paling tinggi.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penggunaan sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* telah berhasil diselidiki dengan penelitian secara eksperimen. Penelitian eksperimen penggunaan sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* dilakukan dengan memvariasikan geometri lubang *nozzle* yaitu jenis dan diameter *nozzle* yang digunakan. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- a. Penggunaan sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* dapat menurunkan temperatur, meningkatkan hasil *power output*, dan meningkatkan efisiensi panel *photovoltaic*. Temperatur panel *photovoltaic* pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 tanpa sistem pendingin dan dengan sistem pendingin adalah 61,96 dan 36,51 °C pada variasi *full cone nozzle* 2 mm. *Power output* panel *photovoltaic* meningkat dari 36,92 menjadi 48,65 Watt. Efisiensi panel *photovoltaic* juga meningkat dari 10,98 menjadi 14,47 %.
- b. Penggunaan jenis *nozzle* yang berbeda menghasilkan performa pendinginan yang berbeda. *Full cone nozzle* dapat memberikan distribusi semburan air yang lebih merata sehingga dapat mengenai sebagian besar permukaan panel *photovoltaic* dan dapat menurunkan temperatur panel yang lebih baik jika dibandingkan dengan *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle*. Temperatur panel *photovoltaic* menggunakan *full cone nozzle*, *hollow cone nozzle* dan *flat fan nozzle* dengan diameter *nozzle* 2 mm pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m^2 adalah 36,27; 37,78; dan 41,42 °C. *Power output* panel *photovoltaic* yang dihasilkan adalah 48,65; 46,92; dan 44,34 Watt. Sedangkan, efisiensi panel *photovoltaic* yang dihasilkan adalah 14,47; 13,95; dan 13,05 %.
- c. Penggunaan diameter *nozzle* yang berbeda menghasilkan performa pendinginan yang berbeda. *Nozzle* dengan diameter lubang 2 mm dapat

menghasilkan hasil pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan diameter lubang *nozzle* 3 mm dikarenakan dapat memberikan semburan air yang lebih kuat dan merata pada permukaan panel *photovoltaic* dengan debit air yang sama yaitu 1,5 Lpm. Temperatur panel *photovoltaic* menggunakan *full cone nozzle* pada pukul 11:00 WIB dengan intensitas radiasi matahari 1000 W/m² diameter 2 dan 3 mm adalah 36,27 dan 37,07 °C. *Power output* panel *photovoltaic* yang dihasilkan adalah 48,65 dan 47,84 Watt. Sedangkan, efisiensi panel *photovoltaic* yang dihasilkan adalah 14,47 dan 14,23 %.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian secara eksperimen terkait sistem pendingin *water spray* pada panel *photovoltaic* yang sudah dilakukan, saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai besarnya debit air yang digunakan pada sistem pendingin *water spray* untuk optimalisasi dalam penggunaan air.
- b. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai waktu sistem pendinginan *water spray* aktif agar sistem ini dapat beroperasi secara optimal dan lebih efisien.
- c. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai durasi waktu lamanya sistem pendingin *water spray* ini sekali aktif.
- d. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan jumlah, jenis, posisi dan diameter *nozzle* pada sistem pendingin *water spray*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Zhong *et al.*, “Global pattern of the international fossil fuel trade: The evolution of communities,” *Energy*, vol. 123, pp. 260–270, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.033.
- [2] P. Nain and A. Kumar, “A state-of-art review on end-of-life solar photovoltaics,” *J. Clean. Prod.*, vol. 343, no. October 2021, p. 130978, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130978.
- [3] S. Fakouriyani, Y. Saboohi, and A. Fathi, “Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels’ efficiency and its preheating water production,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1362–1368, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.054.
- [4] E. Abokyi, P. Appiah-Konadu, F. Abokyi, and E. F. Oteng-Abayie, “Industrial growth and emissions of CO₂ in Ghana: The role of financial development and fossil fuel consumption,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1339–1353, 2019, doi: 10.1016/j.egyr.2019.09.002.
- [5] P. Ruiz *et al.*, “ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, no. July 2019, p. 100379, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.100379.
- [6] W. Liu, H. Ma, and A. Walsh, “Advance in photonic crystal solar cells,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 116, no. April, p. 109436, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109436.
- [7] S. Siah Chehreh Ghadikolaei, “Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10939–10972, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.164.
- [8] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, and M. Arıcı, “A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2888–2907, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.172.
- [9] O. A. Al-Shahri *et al.*, “Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 284, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125465.
- [10] M. Ibrahim and T. Saeed, “Designing a new heat sink containing nanofluid flow to cool a photovoltaic solar cell equipped with reflector,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 124, pp. 9–16, 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2021.05.015.
- [11] Z. Arifin, D. D. D. P. Tjahjana, S. Hadi, R. A. Rachmanto, G. Setyohandoko, and B. Sutanto, “Numerical and experimental investigation of air cooling for photovoltaic panels using aluminum heat sinks,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/1574274.
- [12] A. H. Alami *et al.*, “Novel and practical photovoltaic applications,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 29, no. July 2021, p. 101208, 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101208.
- [13] X. Wu, G. Y. Chen, G. Owens, D. Chu, and H. Xu, “Photothermal materials: A key platform enabling highly efficient water evaporation driven by solar energy,” *Mater. Today Energy*, vol. 12, pp. 277–296, 2019, doi:

- 10.1016/j.mtener.2019.02.001.
- [14] A. Kumar, S. A. Alexander, and M. Rajendran, *Power Electronic Converters for Solar Photovoltaic Systems*. United Kingdom: Academic Press, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04270-7>.
- [15] D. D. B. Mesquita, J. Lucas De Silva, H. S. Moreira, M. Kitayama, and M. G. Villalva, "A review and analysis of technologies applied in PV modules," *2019 IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT Lat. Am. 2019*, 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895369.
- [16] S. Panda *et al.*, "A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel," *Mater. Today Proc.*, vol. 62, pp. 6799–6803, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.925.
- [17] E. B. Agyekum, S. PraveenKumar, N. T. Alwan, V. I. Velkin, and S. E. Shcheklein, "Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation," *Heliyon*, vol. 7, no. 9, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07920.
- [18] M. Irwanto, Y. M. Irwan, I. Safwati, W. Z. Leow, and N. Gomesh, "Analysis simulation of the photovoltaic output performance," *Proc. 2014 IEEE 8th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2014*, no. March, pp. 477–481, 2014, doi: 10.1109/PEOCO.2014.6814476.
- [19] T. T. Chow, "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 365–379, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.
- [20] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, and P. Gandhidasan, "Uniform cooling of photovoltaic panels: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 1520–1544, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.064.
- [21] T. Zhang, M. Wang, and H. Yang, "A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/en11113157.
- [22] J. G. Hernandez-Perez, J. G. Carrillo, A. Bassam, M. Flota-Banuelos, and L. D. Patino-Lopez, "Thermal performance of a discontinuous finned heatsink profile for PV passive cooling," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 184, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116238.
- [23] D. Sato and N. Yamada, "Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, no. July 2018, pp. 151–166, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.051.
- [24] L. H. Yang, J. De Liang, C. Y. Hsu, T. H. Yang, and S. L. Chen, "Enhanced efficiency of photovoltaic panels by integrating a spray cooling system with shallow geothermal energy heat exchanger," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 970–981, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.11.089.
- [25] T. Sun, X. Huang, Y. Chen, and H. Zhang, "Experimental investigation of water spraying in an indirect evaporative cooler from nozzle type and spray strategy perspectives," *Energy Build.*, vol. 214, p. 109871, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109871.
- [26] K. G. Somasundar, S. Soorej, S. Karthikeyan, N. Jayan, and M. L. D. Bhatlu, "Review on cooling tower nozzle types," *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no.

- Part 2, pp. 3016–3018, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.723.
- [27] H. Chen, X. hui Ruan, Y. hang Peng, Y. ling Wang, and C. kun Yu, “Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, no. PB, p. 102181, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102181.
- [28] H. Chen, X. Ruan, Y. Peng, Y. Wang, and C. Yu, “Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, no. PB, p. 102181, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102181.
- [29] H. M. S. Bahaidarah, “Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics,” *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 605–617, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.015.
- [30] S. Nižetić, D. Čoko, A. Yadav, and F. Grubišić-Čabo, “Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 108, pp. 287–296, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.079.
- [31] P. Wijaya Sunu *et al.*, “Preliminary Study of Solar PV Characteristics Cooled by Water Spray,” pp. 429–433, 2023, doi: 10.5220/0010947000003260.
- [32] O. T. Laseinde and M. D. Ramere, “Efficiency Improvement in polycrystalline solar panel using thermal control water spraying cooling,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 239–248, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.161.
- [33] B. M. Zilli *et al.*, “Performance and effect of water-cooling on a microgeneration system of photovoltaic solar energy in Paraná Brazil,” *J. Clean. Prod.*, vol. 192, pp. 477–485, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.241.
- [34] A. Hadipour, M. Rajabi Zargarabadi, and S. Rashidi, “An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis,” *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 867–875, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.021.
- [35] M. Javidan and A. J. Moghadam, “Experimental investigation on thermal management of a photovoltaic module using water-jet impingement cooling,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 228, no. July 2020, p. 113686, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113686.
- [36] M. Raju, R. N. Sarma, A. Suryan, P. P. Nair, and S. Nižetić, “Investigation of optimal water utilization for water spray cooled photovoltaic panel: A three-dimensional computational study,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.101975.
- [37] Y. Zhao, S. Gong, C. Zhang, M. Ge, and L. Xie, “Performance analysis of a solar photovoltaic power generation system with spray cooling,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 29, no. February 2021, p. 101723, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2021.101723.
- [38] D. Altegoer, J. Hussong, and R. Lindken, “Efficiency increase of photovoltaic systems by means of evaporative cooling in a back-mounted chimney-like channel,” *Renew. Energy*, vol. 191, pp. 557–570, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.156.

- [39] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013, doi: 10.1016/j.asej.2013.03.005.
- [40] P. Bevilacqua, A. Morabito, R. Bruno, V. Ferraro, and N. Arcuri, "Seasonal performances of photovoltaic cooling systems in different weather conditions," *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 122459, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122459.
- [41] H. K. Salim, R. A. Stewart, O. Sahin, and M. Dudley, "Drivers, barriers and enablers to end-of-life management of solar photovoltaic and battery energy storage systems: A systematic literature review," *J. Clean. Prod.*, vol. 211, pp. 537–554, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.229.
- [42] S. Sargunanathan, A. Elango, and S. T. Mohideen, "Performance enhancement of solar photovoltaic cells using effective cooling methods: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 382–393, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.024.
- [43] S. Nižetić, E. Giama, and A. M. Papadopoulos, "Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I_ Passive cooling techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 155, pp. 301–323, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.071.
- [44] Z. Dong *et al.*, "Droplet cleaning method and water consumption analysis for superhydrophobic solar photovoltaic glass," *Sol. Energy*, vol. 235, no. November 2021, pp. 94–104, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.030.
- [45] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and K. Sopian, "Effect of dust and cleaning methods on mono and polycrystalline solar photovoltaic performance: An indoor experimental study," *Sol. Energy*, vol. 236, no. January, pp. 626–643, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.03.009.
- [46] F. Ekinçi, A. Yavuzdeğer, H. Nazlıgül, B. Esenboğa, B. Doğru Mert, and T. Demirdelen, "Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method," *Sol. Energy*, vol. 237, no. April, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.03.066.
- [47] H. Chen, Y. Wang, H. Yang, A. Badiei, and G. Li, "Experimental investigation and exergy analysis of a high concentrating photovoltaic system integrated with spray cooling," *Energy Convers. Manag.*, vol. 268, no. April, p. 115957, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115957.
- [48] P. Bevilacqua, R. Bruno, A. Rollo, and V. Ferraro, "A novel thermal model for PV panels with back surface spray cooling," *Energy*, vol. 255, p. 124401, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124401.
- [49] G. Liang and I. Mudawar, "Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 115, pp. 1174–1205, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.029.
- [50] M. Javidan and A. J. Moghadam, "Effective cooling of a photovoltaic module using jet-impingement array and nanofluid coolant," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 137, no. August, p. 106310, 2022, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106310.

- [51] J. A. Duffie (Deceased), W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. 2020. doi: 10.1002/9781119540328.
- [52] M. S. Abd-Elhady, Z. Serag, and H. A. Kandil, "An innovative solution to the overheating problem of PV panels," *Energy Convers. Manag.*, vol. 157, no. December 2017, pp. 452–459, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.017.
- [53] M. Gharzi, A. Arabhosseini, Z. Gholami, and M. H. Rahmati, "Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance," *Sol. Energy*, vol. 211, no. July, pp. 117–146, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.048.
- [54] M. M. Rahman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Effects of various parameters on PV-module power and efficiency," *Energy Convers. Manag.*, vol. 103, pp. 348–358, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.06.067.
- [55] G. Setyohandoko, B. Sutanto, R. A. Rachmanto, D. D. Dwi Prija Tjahjana, and Z. Arifin, "A numerical approach to study the performance of photovoltaic panels by using aluminium heat sink," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 70, no. 2, pp. 97–105, 2020, doi: 10.37934/ARFMTS.70.2.97105.
- [56] K. Mostakim and M. Hasanuzzaman, "Global prospects, challenges and progress of photovoltaic thermal system," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, no. PA, p. 102426, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102426.
- [57] L. J. Jiang, S. L. Jiang, W. L. Cheng, Y. Le Nian, and R. Zhao, "Experimental study on heat transfer performance of a novel compact spray cooling module," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 154, no. February, pp. 150–156, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.078.
- [58] F. Schiro, A. Benato, A. Stoppato, and N. Destro, "Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach," *Energy*, vol. 137, pp. 798–810, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.164.
- [59] S. Khandekar *et al.*, "Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 184, no. February 2020, p. 115640, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115640.
- [60] J. Siecker, K. Kusakana, and B. P. Numbi, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May, pp. 192–203, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.053.
- [61] G. Ulpiani, "Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts," *Appl. Energy*, vol. 254, no. August, p. 113647, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113647.
- [62] M. Visaria and I. Mudawar, "Application of two-phase spray cooling for thermal management of electronic devices," *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 784–793, 2009, doi: 10.1109/TCAPT.2008.2010405.
- [63] S. Li and D. H. Willits, "Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses," *Biosyst. Eng.*, vol. 101, no. 1,

- pp. 69–77, 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.06.004.
- [64] D. Nuyttens, K. Baetens, M. De Schampheleire, and B. Sonck, “Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics,” *Biosyst. Eng.*, vol. 97, no. 3, pp. 333–345, 2007, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001.
- [65] Q. Yu, Q. Wang, X. Tan, and X. F. Li, “Water spray heat transfer gas compression for compressed air energy system,” *Renew. Energy*, vol. 179, pp. 1106–1121, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.07.128.
- [66] Y. A. Çengel and R. H. Turner, *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2004.
- [67] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [68] F. Yesildal, A. N. Ozakin, and K. Yakut, “Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 25, p. 100983, 2022, doi: 10.1016/j.jestch.2021.04.002.
- [69] B. Parida, S. Iniyana, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3. Pergamon, pp. 1625–1636, Apr. 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [70] I. Guardian, B. Sutanto, R. A. Rachmanto, S. Hadi, and Z. Arifin, “Improving the Performance of Photovoltaic Panels by Using Aluminum Heat Sink,” *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 437–448, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-4481-1_42.
- [71] E. Pinheiro, F. Bandejas, M. Gomes, P. Coelho, and J. Fernandes, “Performance analysis of wind generators and PV systems in industrial small-scale applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 110, no. December 2018, pp. 392–401, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.074.
- [72] M. Raju, R. N. Sarma, A. Suryan, P. P. Nair, and S. Nižetić, “Investigation of optimal water utilization for water spray cooled photovoltaic panel: A three-dimensional computational study,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 51, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.101975.

LAMPIRAN

