

BAB 2 TINJAUAN TEORETIS

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Pengaruh Iklim Wilayah terhadap Panel Surya

Setiap daerah di muka bumi ini pasti memiliki cuaca dan iklimnya masing-masing (Winarno, Harianto, & Santoso, 2019). Cuaca adalah keadaan udara (tentang temperatur, cahaya matahari, dan sebagainya) di suatu wilayah tertentu dalam jangka waktu terbatas (Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, 2016). Iklim adalah karakter kecuacaan yang berisi peluang statistik keadaan atmosfer yang diteliti selama kurun waktu 30 tahun di wilayah yang cukup luas (Winarno et al., 2019). Berkaitan dengan iklim, matahari merupakan sumber energi utama bagi Bumi yang mengendalikan cuaca dan iklim (Winarno et al., 2019). Energi tersebut dipancarkan melalui radiasi matahari (Winarno et al., 2019). Radiasi matahari yang masuk ke Bumi dan diterima panel surya cenderung memiliki nilai yang konstan pada cuaca cerah dan berkurang pada keadaan mendung maupun hujan (Ali et al., 2019). Perubahan tersebut disebabkan oleh perbedaan kepadatan awan, curah hujan, temperatur lingkungan, dan sudut jatuh sinar matahari (Ali et al., 2019).

Ketebalan awan yang menutupi matahari dapat menyebabkan turunnya pencahayaan ke Bumi (Anggreni, Muliadi, & Adriat, 2018). Semakin padatnya awan, semakin kecil cahaya matahari yang masuk sehingga radiasi matahari yang diterima permukaan bumi berkurang (Ventiano, Djunaedy, & Amaliyah, 2019). Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan arah dan reduksi air dan zat yang terkandung di atmosfer (Mubarak, Impron, & June, 2018). Kandungan air dalam fase gas yang ada di atmosfer juga menentukan curah hujan (Winarno et al., 2019).

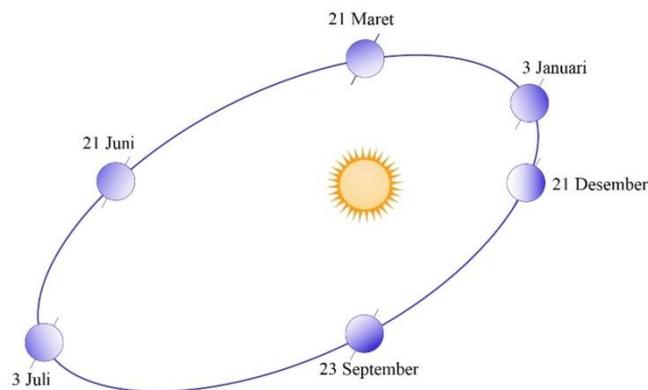
Curah hujan adalah ketinggian air hujan yang terkumpul dalam tempat yang datar, dengan asumsi tidak menguap, tidak meresap dan tidak mengalir (Blegur, Daka, Fuadz, Liliana, & Wicaksono, 2019). Air tersebut sewaktu-waktu dapat turun ke Bumi dan sebaran curah hujan akan menghalangi radiasi matahari

untuk masuk ke permukaan bumi sehingga mempengaruhi temperatur (Subiakto, 2016).

Temperatur merupakan panas dinginnya suatu benda (Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, 2016). Perubahan temperatur sangat berpengaruh bagi panel surya, sebab semakin besar temperatur panel surya menyebabkan daya yang dihasilkan menurun (Tiyas et al., 2020). Lebih lanjut, pengaruh tersebut menyebabkan penurunan tegangan dan memberi nilai arus listrik yang cenderung konstan (Suwarti, Wahyono, & Prasetyo, 2018).

Demikian pula berpengaruhnya kemiringan panel surya terhadap sudut jatuh sinar matahari (Afriyani et al., 2019). Jumlah radiasi surya yang masuk ke panel surya dapat dioptimalkan dengan menentukan sudut kemiringan optimalnya (Ali et al., 2019). Kemiringan panel surya biasanya dimiringkan ke arah ekuator (Ali et al., 2019).

Bumi yang memiliki kemiringan $23,45^\circ$ terhadap porosnya memiliki 4 variasi berdasarkan jauh-dekat kemiringan porosnya, yaitu Titik Balik Musim Kemarau (09:14 GMT 21 Juni 2022) ketika sumbu poros Bumi bagian utara menghadap matahari dengan sudut elevasi matahari berada di titik tertingginya, Titik Balik Musim Dingin (15:59 GMT 21 Desember 2021) ketika sumbu poros Bumi bagian utara menjauhi matahari dengan sudut elevasi matahari berada di titik terendahnya, Equinox Musim Semi (15:33 GMT 20 Maret 2022) dan Equinox Musim Gugur (19:21 GMT 22 September 2021) ketika sumbu poros Bumi tegak lurus dengan matahari (Espenak, 2018).



Gambar 2.1 Variasi Jauh-Dekat Kemiringan Poros Bumi (Erlanggapedia, 2023)

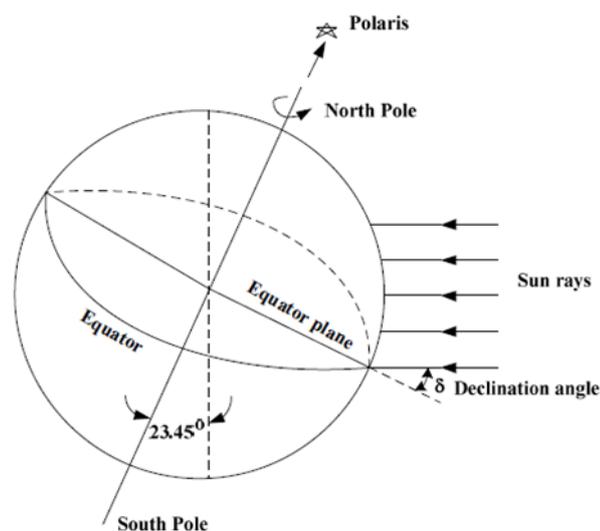
Peredaran Bumi terhadap matahari mempengaruhi kemiringan panel surya. Berdasarkan penelitian Karafil, Ozbay, Kesler, & Parmaksiz (2015), bahwa perhitungan sudut optimum untuk panel surya sebagai berikut.

Sudut Garis Lintang (ϕ), yaitu sudut lokasi yang diukur dari ekuator Bumi. Nilainya berada diantara $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ atau $-90,00000 \leq \phi \leq 90,00000$. Tasikmalaya sendiri memiliki bedara di $-7,319563$.

Sudut Deklinasi (δ), yaitu sudut antara bidang ekuator dengan sinar jatuh matahari. Nilainya berada diantara $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. Rumus sudut deklinasi sebagai berikut.

n merupakan hari dimana 1 Januari adalah 1 dan 31 Desember adalah 365 atau 366.

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[360 \times \frac{(284+n)}{365} \right] \quad (2.1)$$



Gambar 2.2 Sudut Deklinasi (Karafil et al., 2015)

Sudut Waktu (ω), yaitu sudut antara garis bujur lokasi dengan garis bujur lokasi matahari. Rumus sudut waktu sebagai berikut.

$$\omega = 15^\circ(t_s - 12) \quad (2.2)$$

dengan t_s adalah jam skala 24.

Sudut Zenit (θ_z), yaitu sudut garis vertikal atas (zenit) lokasi dengan garis lurus ke matahari. Rumus sudut zenit sebagai berikut.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \phi \quad (2.3)$$

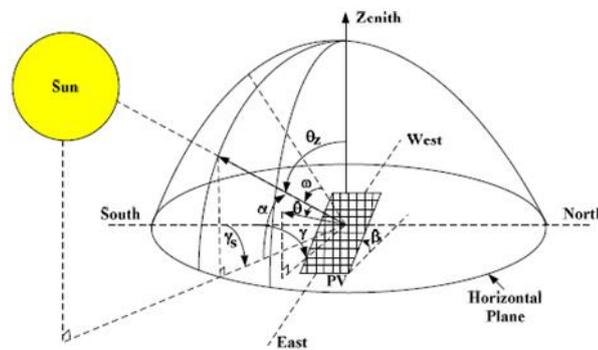
$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \phi) \quad (2.4)$$

Sudut Elevasi Matahari (α), yaitu sudut antara garis lurus ke matahari dengan bidang horizon. Rumus sudut elevasi matahari sebagai berikut.

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (2.5)$$

Sudut Azimut Matahari (γ_s), yaitu sudut antara arah selatan dengan arah radiasi ke titik lokasi. Sudut akan bernilai negatif jika ke arah timur dan bernilai positif jika ke arah barat. Rumus sudut azimuth matahari sebagai berikut.

$$\gamma_s = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \alpha \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \right] \quad (2.6)$$

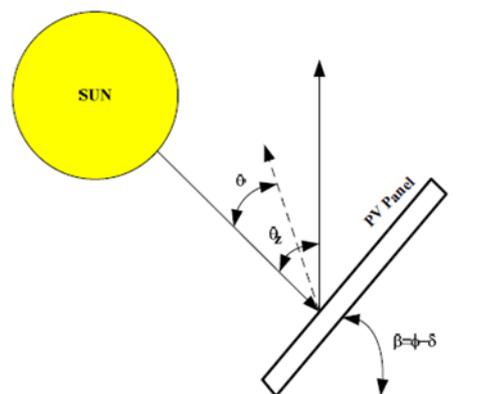


Gambar 2.3 Sudut Dasar Matahari (Karafil et al., 2015)

Sudut Kemiringan Panel Surya (β), yaitu sudut antara bidang horizon lokasi dengan kemiringan panel surya. Rumus sudut kemiringan panel surya sebagai berikut.

$$\tan \beta = \tan \theta_z \cdot |\cos \gamma_s| \quad (2.7)$$

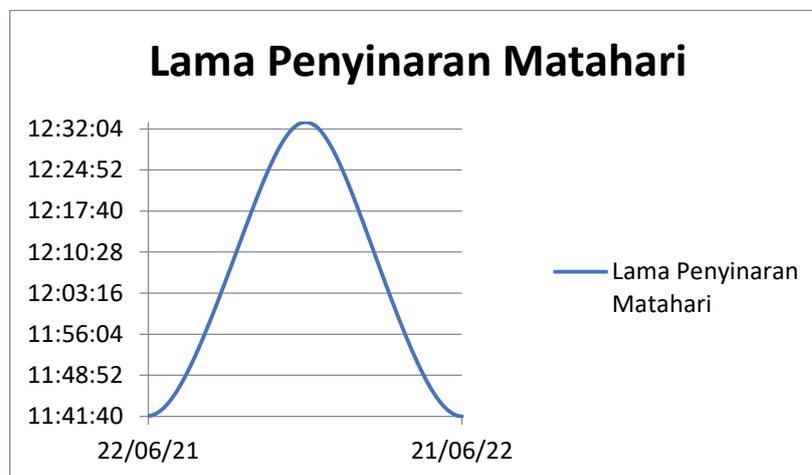
$$\beta = \tan^{-1}(\tan \theta_z \cdot |\cos \gamma_s|) \quad (2.8)$$



Gambar 2.4 Sudut Kemiringan (Karafil et al., 2015)

2.1.2 Karakteristik Klimatologi Kota Tasikmalaya

Wilayah Tasikmalaya secara astronomis berada di antara $108^{\circ}08'38''$ BT sampai $108^{\circ}24'02''$ BT dan antara $7^{\circ}10'$ LS sampai $7^{\circ}26'32''$ LS (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Letak tersebut mengakibatkan Tasikmalaya secara umum beriklim tropis dan penyinaran matahari sepanjang tahun (Suwarti et al., 2018) dengan rata-rata lama waktu penyinaran matahari per harinya yang tidak berbeda jauh yaitu 12:06:36 jam sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Lama Penyinaran Matahari (Time and Date AS, 2022)

Ditinjau dari tipe curah hujan Schmidt dan Ferguson, bahwa Kota Tasikmalaya merupakan wilayah dengan tipe hujan C yang memiliki 4 bulan kering (curah hujan < 100 mm) dan 8 bulan basah (curah hujan > 200 mm) (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Rata-rata curah hujan per bulan sekitar 278,55 mm dengan curah hujan tertinggi mulai dari Januari sampai April dan curah hujan terendah mulai dari September sampai Oktober (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Sejalan dengan hal tersebut, BMKG membuktikan bahwa awal musim kemarau dan musim hujan daerah Tasikmalaya berturut turut pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Musim di Tasikmalaya (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2021), (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2022)

No. ZOM	Daerah	Awal Musim		Perbandingan terhadap rata-rata (Dasarian)		Sifat Hujan		Bulan Puncak Musim	
		Hujan 2021	Kemarau 2022	Hujan	Kemarau	Hujan	Kemarau	Hujan	Kemarau
87	Tasikmalaya bagian selatan	Agt III-Sep II	Juni III-Juli II	-2	+1	N	BN	NOV 21	SEP 22
88	Tasikmalaya bagian barat	Okt I-Okt III	Mei III-Juni II	-1	+1	AN	AN	FEB 22	AGT 22
89	Tasikmalaya bagian utara	Sep III-Okt II	Apr II-Mei I	-2	-1	AN	N	JAN 22	AGT 22
93	Tasikmalaya bagian utara	Sep II-Okt I	Juni II-Juli I	0	+2	AN	AN	FEB 22	AGT 22
94	Tasikmalaya Tengah bagian barat	Sep III-Okt II	Mei III-Juni II	-1	+2	N	N	JAN 22	SEP 22
100	Tasikmalaya bagian tengah	Sep I-Sep III	Jul II-Agt I	-1	>+3	N	BN	NOV 21	AGT 22

Keterangan:

ZOM : Zona Musim merupakan daerah yang mempunyai pola hujan rata-ratanya berbeda jelas antara musim kemarau dan musim hujan.

Dasarian : ukuran waktu selama 10 (sepuluh) hari; Dasarian I (tanggal 1 sampai 10); Dasarian II (tanggal 11 sampai 20); Dasarian III (tanggal 21 sampai akhir bulan)

Atas Normal (AN) : Nilai curah hujan lebih dari 115% terhadap rata-ratanya

Normal (N) : Nilai curah hujan antara 85%-115% terhadap rata-ratanya

Bawah Normal (BN) : Nilai curah hujan kurang dari 85% terhadap rata-ratanya

Rata-rata curah hujan sebagai penentuan curah hujan normal menggunakan data periode 1981-2010

Dari data di atas, terlihat bahwa musim kemarau di wilayah Tasikmalaya berkisar antara 4 sampai 5 bulan sesuai dengan tipe curah hujan Schmidt dan Ferguson (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Lebih lanjut berdasarkan klasifikasi iklim Mohr, Kota Tasikmalaya termasuk dalam klasifikasi iklim II atau iklim basah (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Hal ini juga mempengaruhi temperatur rata-rata $25,7^{\circ}\text{C}$ dengan kisaran terendah $21,1^{\circ}\text{C}$ dan tertinggi $27,9^{\circ}\text{C}$ (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Lebih lanjut, awal musim kemarau di Tasikmalaya berkisar antara tanggal 11 bulan April 2022 sampai tanggal 1 bulan Agustus 2022, sedangkan untuk awal musim hujan di Tasikmalaya berkisar antara tanggal 21 bulan Agustus 2021 sampai tanggal 21 bulan Oktober 2021.

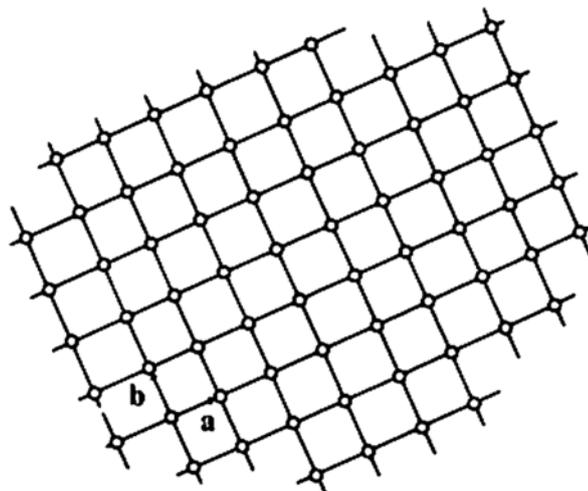
2.1.3 Panel Surya

Panel surya merupakan komponen elektronik yang dapat mengubah sinar matahari menjadi listrik dalam bentuk arus searah dengan proses aliran-aliran muatan pada modulnya (Napitupulu et al., 2017). Proses tersebut dapat terjadi karena bahan utama panel surya merupakan bahan semikonduktor (Goswami, 2015). Semikonduktor sendiri merupakan suatu bahan yang dapat bersifat konduktif apabila energi yang diterimanya melebihi dari *band gap* yang merupakan batas minimum suatu elektron untuk melepaskan diri dari atomnya yaitu sekitar 3 eV (Goswami, 2015). Semikonduktor yang digunakan panel surya merupakan gabungan dari 2 semikonduktor ekstrinsik yang merupakan suatu ikatan kovalen semikonduktor murni/intrinsik dengan *doping* berupa phosphor atau boron sehingga menjadi semikonduktor tipe n (kelebihan elektron) atau tipe p (kelebihan holes) (Goswami, 2015). Penggabungan 2 jenis semikonduktor ini menyebabkan pertukaran elektron dari semikonduktor tipe n ke tipe p dan pertukaran semikonduktor tipe p ke tipe n (Hu & White, 1983). Lebih lanjut, pertukaran tersebut menyebabkan terjadinya zona deplesi yang didalamnya terdapat medan listrik positif di sisi semikonduktor tipe n dan medan listrik negatif di sisi semikonduktor tipe p sehingga elektron dari semikonduktor tipe n dan holes dari semikonduktor tipe p berhenti bertukar (Hu et al., 1983). Ketika foton matahari menyentuh gabungan semikonduktor ini, bahan tersebut akan

melepaskan elektron dan meninggalkan holesnya termasuk di zona deplesi (American Chemical Society, 2013). Hal selanjutnya yang terjadi ialah, medan listrik positif di zona deplesi akan menarik elektron ke semikonduktor tipe n dan medan listrik negatif akan menarik holes ke semikonduktor tipe p (American Chemical Society, 2013). Zona deplesi ini sangat dipengaruhi oleh susunan atom dari bahan semikonduktor (Lormand, 1982). Secara umum terdapat 3 jenis bahan yang biasa digunakan.

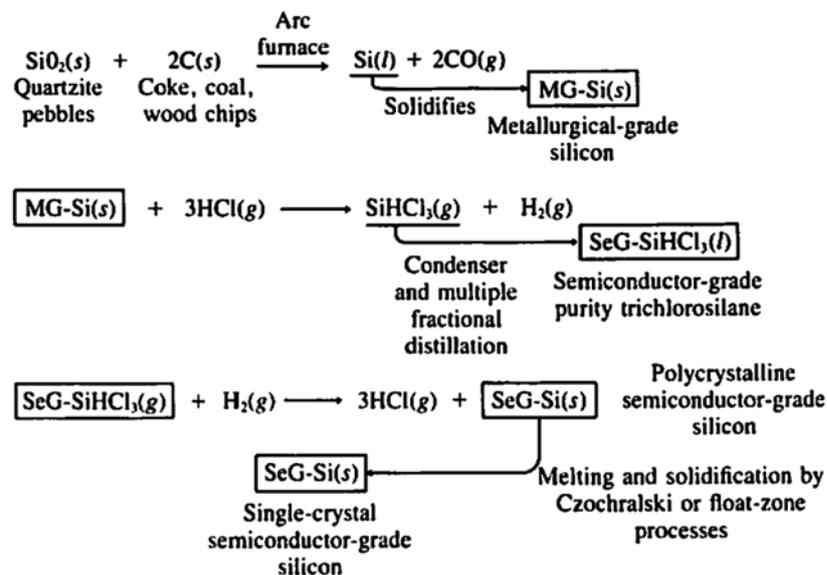
2.1.3.1 *Monocrystalline*

Monocrystalline merupakan bahan semikonduktor yang memiliki tingkat kemurnian tinggi dengan susunan atom silikon sempurna (Hu et al., 1983). Susunan tersebut terdiri dari 4 ikatan kovalen yang mengikat kuat dan susunan ini hampir tidak memiliki kecacatan pada tingkat atomik maupun perbedaan orientasi antar klaster atom (Hu et al., 1983). Hal tersebut menyebabkan tidak ada gangguan-gangguan seperti medan listrik minor yang disebabkan adanya difusi elektron pada batasan antar klaster atom serta penghamburan yang disebabkan kecacatan atomik maupun perbedaan orientasi antar klaster atom (Lormand, 1982). Panel surya jenis *monocrystalline* memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibanding *polycrystalline* dan *thin film* dengan nilai berkisar 14% sampai 17% (Suwarti et al., 2018). Adapun struktur atom bahan *monocrystalline* dapat dilihat sebagaimana Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Susunan Atom Monocrystalline (Hu et al., 1983)

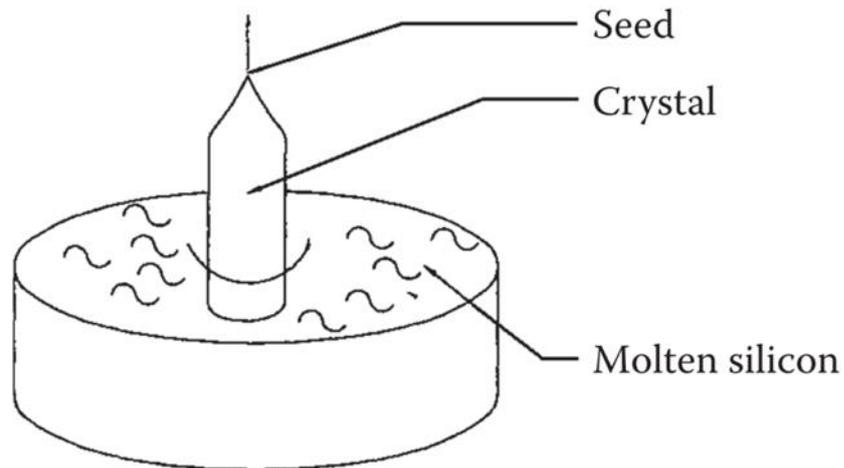
Di sisi lain, *monocrystalline photovoltaic* ini adalah modulnya yang tidak rapat dan menjadi kerugian menyerap panas (Mustofa, Magga, & Arifin, 2016). Lebih lanjut, tidak akan berfungsi baik di tempat yang cahaya mataharinya kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan (Utama, 2019). Terlebih penggunaan *monocrystalline* cukup mahal dibandingkan dengan produk yang lain (Lormand, 1982). Adapun proses pembuatan bahan *monocrystalline* dapat dilihat sebagaimana Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Proses Pembuatan Monocrystalline (Hu et al., 1983)

Menurut Hu & White (1983) proses pembuatan *monocrystalline* bermula dari pasir kerikil kuarsit dicampur dengan sumber karbon seperti batubara, potongan kayu dan direduksi dalam tungku elektik bersuhu tinggi untuk menghasilkan silikon mutu metalurgi yang dikeringkan dan didinginkan secara cepat. Padatan silikon tersebut selanjutnya bereaksi dengan gas HCl dan dikondensasikan melalui dilatasi fraksional sehingga menghasilkan cairan triklorosilan mutu semikonduktor. Gas triklorosilan tersebut selanjutnya bereaksi dengan gas hydrogen dalam ruangan yang berisi substrat silikon murni yang dipanaskan secara elektrik berkisar antara 1000°C hingga 1200°C untuk menghasilkan endapan silikon *polycrystalline* mutu semikonduktor pada substrat. Lebih lanjut, endapan silikon *polycrystalline* mutu semikonduktor ini dilelehkan pada wadah yang berputar pelahan kemudian dari atas diberi sebuah tongkat yang

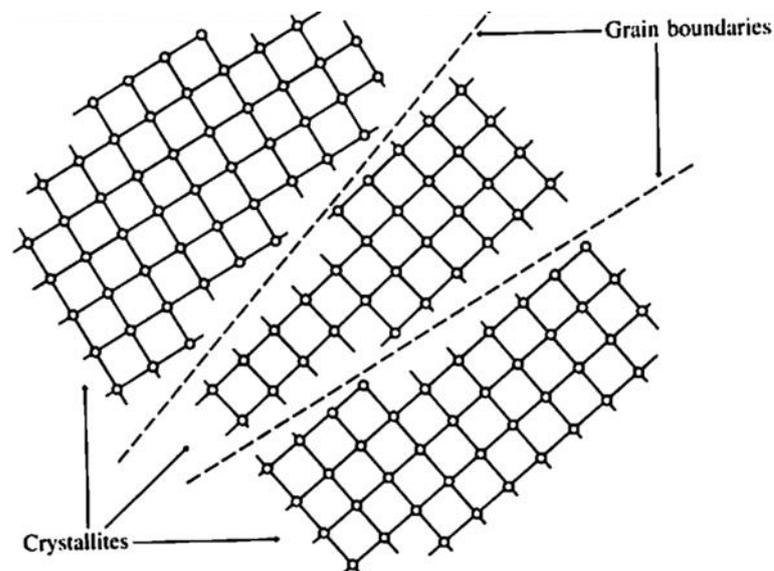
ujungnya terdapat benih silikon. Benih tersebut dicelupkan untuk memancing pembentukan *monocrystalline* dan wadah tersebut turun secara perlahan sebagaimana Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Proses Pembuatan Monocrystalline Metode Czochralski (Goswami, 2015)

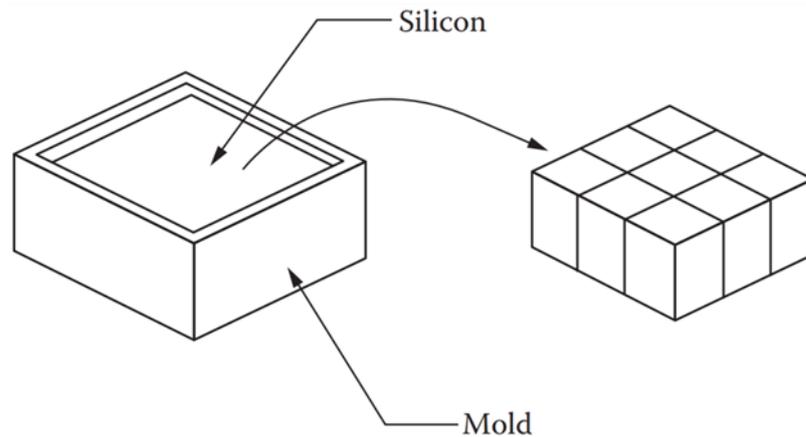
2.1.3.2 Polycrystalline

Polycrystalline merupakan bahan semikonduktor yang memiliki batas-batas dalam kristalnya sehingga dalam kristal tersebut memiliki kluster-kluster atom yang berbeda orientasinya sebagaimana Gambar 2.9. (Lormand, 1982).



Gambar 2.9 Susunan Atom Polycrystalline (Hu et al., 1983)

Adapun proses pembuatannya sampai pada endapan silikon *polycrystalline* mutu semikonduktor untuk alasan ekonomis (Hu et al., 1983). Selanjutnya endapan tersebut kemudian dicairkan dan didinginkan perlahan dalam cetakan dengan satu arah untuk mengarahkan struktur kristal ke arah yang diinginkan sebagaimana Gambar 2.10 berikut. (Goswami, 2015).

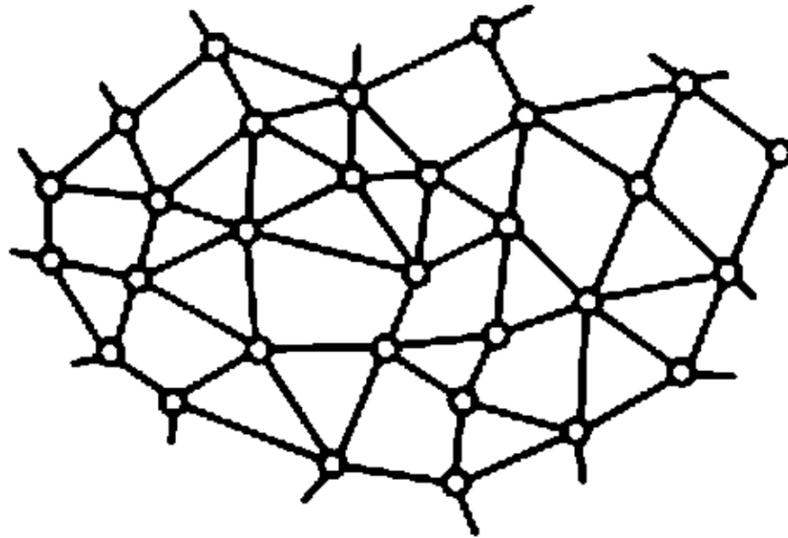


Gambar 2.10 Proses Pembuatan Polycrystalline Metode Molding (Goswami, 2015)

Hal tersebut harus diatur untuk mengurangi gangguan-gangguan seperti medan listrik minor yang disebabkan adanya difusi elektron pada batasan antar kluster atom serta penghamburan yang disebabkan kecacatan atomik maupun perbedaan orientasi antar kluster atom (Lormand, 1982). Pengaturan tersebut menyebabkan efisiensi *Polycrystalline Photovoltaic* berkisar antara 11,5% sampai 14% (Suwarti et al., 2018). Lebih lanjut, *Polycrystalline Photovoltaic* dapat menghasilkan energi di keadaan mendung (Napitupulu et al., 2017). Selain itu, *Polycrystalline Photovoltaic* juga dapat mengkonversi cahaya ultraviolet menjadi energi listrik (Mustofa et al., 2016).

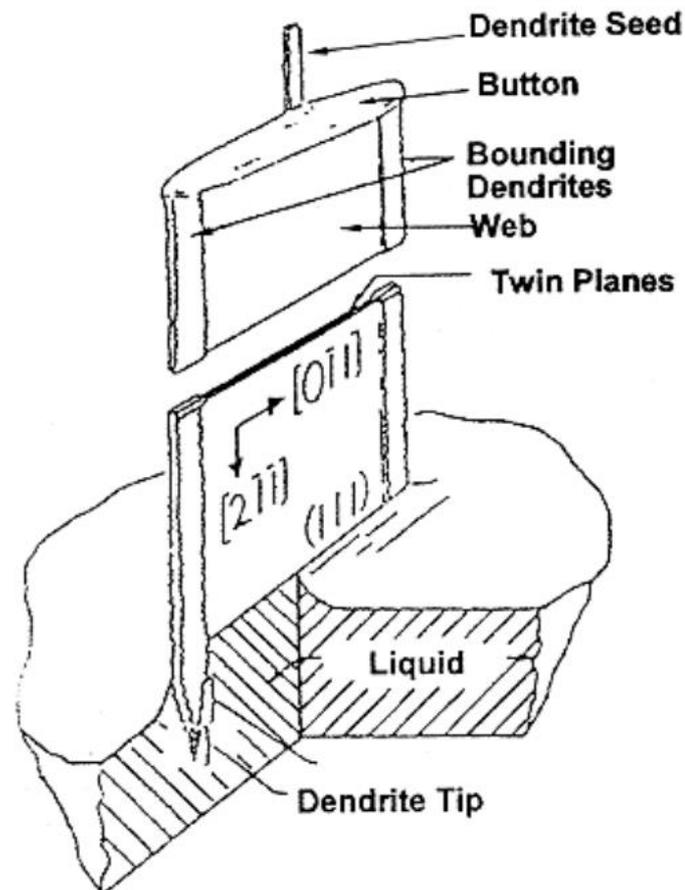
2.1.3.3 Thin Film

Thin Film merupakan bahan semikonduktor yang orientasi antar atomnya sangat acak dan tidak memiliki kluster-kluster orientasi atom yang sama sebagaimana Gambar 2.11 berikut (Lormand, 1982).



Gambar 2.11 Susunan Atom Thin Film (Hu et al., 1983)

Hal tersebut sangat dipengaruhi oleh proses pembuatannya yang lebih ekonomis dibanding *monocrystalline* maupun *polycrystalline* (Goswami, 2015). Sebagai contoh proses pembuatannya bisa dengan metode *dendritic web growth* (Goswami, 2015). Metode ini menggunakan sebuah benih kristal silikon yang dicelupkan ke dalam silikon cair dan menyebar ke samping membentuk *button* (Nakayashiki, 2007). Ketika benih ditarik dari lelehan, dua dendrit sekunder merambat dari ujung *button* ke dalam lelehan silikon, membentuk bingkai untuk menopang pita pembekuan (Nakayashiki, 2007). Jaringan dendritik biasanya tidak memiliki batasan antar kluster atom yang memiliki orientasi sama, tetapi memiliki beberapa batas kembar yang sejajar dengan permukaan luar (Nakayashiki, 2007). Hal ini menyebabkan *Thin Film* memiliki nilai efisiensi 9% sampai 14% (Utama, 2019). Adapun pembentukan *thin film* metode *dendritic web growth* dapat dilihat sebagaimana Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Proses Pembuatan Thin Film Metode Dendritic Web Growth (Nakayashiki, 2007)

2.1.4 Prototipe Stabilizer

2.1.4.1 Plat logam

Plat logam berfungsi sebagai media pertukaran kalor secara konduksi dari temperatur panas panel surya ke pipa logam dibawahnya (Halliday, Resnick, & Walker, 2005). Penggunaan logam dalam penelitian ini merupakan logam galvalum yang memiliki nilai konduktivitas termal sebesar $52 W/m \cdot K$ (Matweb, 2023).

2.1.4.2 Pipa logam

Pipa logam berfungsi sebagai penghantar aliran air dan sekaligus media pertukaran kalor secara konduksi antara temperatur dingin yang dibawa air dan temperatur panas yang berasal dari panel surya (Halliday et al., 2005).

Penggunaan logam dalam penelitian ini merupakan logam galvalum yang memiliki nilai konduktivitas termal sebesar $52 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (Matweb, 2023).

2.1.4.3 Air

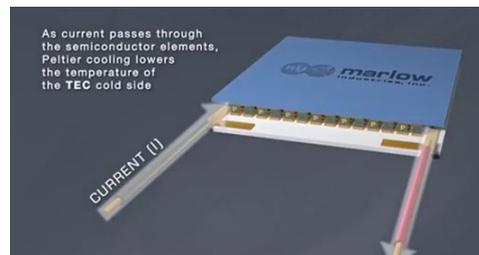
Air berfungsi sebagai media penghantaran kalor secara konveksi yang bersentuhan langsung dengan pipa logam (Halliday et al., 2005). Penggunaan aliran air dalam penelitian ini berguna menghantarkan kalor dari panel surya ke bidang termoelektrik atau dari bidang termoelektrik ke panel surya.

2.1.4.4 Pompa air

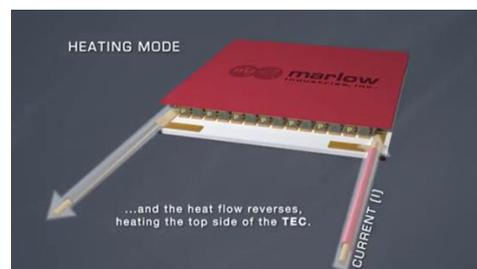
Pompa air berfungsi sebagai penggerak aliran air sehingga air yang mengalir di pipa logam senantiasa terjaga temperaturnya (Loegimin et al., 2020).

2.1.4.5 *Thermoelectric Cooler (TEC)*

Thermoelectric Cooler (TEC) adalah sebuah modul seperti keramik yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi panas di satu sisi dan menjadi dingin di sisi yang lain secara bersamaan (II-VI Incorporated, 2021). Biasanya termoelektrik jenis ini digunakan untuk proses pendinginan, namun bisa digunakan untuk proses pemanasan maupun penjaga kestabilan temperatur (II-VI Incorporated, 2021) seperti pada Gambar 2.13 dan Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.13 Proses Pendinginan Thermoelectric (Marlow Thermoelectric, 2012)



Gambar 2.14 Proses Pemanasan Thermoelectric (Marlow Thermoelectric, 2012)

Dalam penelitian ini, penggunaan termoelektrik sebagai penyetabil panel surya dengan pengaturan *coding* batas atas dan batas bawah temperatur panel surya sebagai zona kerjanya.

2.1.4.6 Isolator

Isolator merupakan suatu bahan yang memiliki tingkat konduktivitas yang rendah (Halliday et al., 2005). Isolator merupakan bahan non-logam, sehingga elektron tidak dapat mengalir dan mengurangi waktu perambatan kalor secara konduksi (Zemansky et al., 1982). Hal ini dapat menahan panas dari lingkungan. Penggunaan isolator pada penelitian ini agar penghantaran panas melalui radiasi matahari tidak mudah terjadi pada konduktor serta menahan penghantaran panas dari tanah ke Panel Surya. Adapun bahan isolatornya ialah *Styrofoam* yang memiliki kerapatan tinggi. Konduktivitas termal *Styrofoam* sebesar $0,03 W/m^{\circ}C$ atau $0,0001W/mK$ (Abidin, 2017).

2.1.4.7 Modul MAX6675

Modul MAX6675 merupakan modul konverter termokopel yang mengubah masukan analog termokopel menjadi rekaman digital 12 bit untuk pembacaan temperatur (Maxim Integrated, 2014). Dalam penelitian ini digunakan 3 modul MAX6675 yang berfungsi sebagai (1) Membaca temperatur lingkungan; (2) Membaca temperatur panel surya serta sebagai sinyal kepada relay untuk mengatur penggunaan pompa air; (3) Membaca temperatur prototipe serta memberi sinyal kepada relay untuk mengatur termoelektrik.

2.1.4.8 Relay

Relay berfungsi sebagai saklar otomatis yang bekerja sesuai dengan perintah pemrograman mikrokontroler (Zahara, 2018). Penggunaan relay dalam penelitian ini sebanyak 3 buah dengan fungsinya masing-masing sebagai; (1) Menghentikan pompa air apabila temperatur panel surya di antara $24,^{\circ}C$ sampai $26^{\circ}C$; (2 & 3) Mengubah aliran listrik ke termoelektrik apabila temperatur kurang dari $24^{\circ}C$ atau lebih dari $26^{\circ}C$

2.1.4.9 Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan suatu komponen yang sangat umum dalam sistem elektronika modern serta berfungsi menjalankan program sebagaimana

layaknya komputer, televisi dan barang elektronik lainnya (Risal, 2017). Penggunaan mikrokontroler juga telah banyak digunakan dalam penelitian. Dalam penelitian kali ini mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega 2560 R3. Fungsi dari Arduino Mega 2560 R3 ini untuk mengintegrasikan antara modul termal MAX6675 sensor termokopel tipe K, Relay yang terdiri dari 3 buah dengan kegunaannya masing-masing serta Arduino Data Logger XD204. Adapun gambar prototipe *stabilizer*, skematik rangkaian prototipe *stabilizer*, cara kerja prototipe *stabilizer* akan dijelaskan pada bagian Prosedur Penelitian.

2.1.5 Kalor

Kalor merupakan perpindahan energi internal (Zemansky et al., 1982). Energi internal tersebut terdiri dari energi kinetik dan energi potensial (Halliday et al., 2005). Dalam prosesnya, kalor tidak dapat diketahui secara keseluruhan (Zemansky et al., 1982). Adapun kuantitas kalor yang dapat diketahui selama proses berlangsung melalui laju aliran \dot{Q} yang termasuk ke dalam fungsi waktu dengan rumus sebagai berikut (Zemansky et al., 1982).

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{Q} d\tau \quad (2.9)$$

2.1.6 Penghantaran Kalor

Penghantaran kalor merupakan proses transport energi antara elemen volume zat yang dicirikan dengan perbedaan temperatur antara elemen-elemen volume zat tersebut (Zemansky et al., 1982). Penghantaran kalor terdiri dari tiga jenis.

2.1.6.1 Konduksi

Konduksi merupakan proses transfer energi melalui amplitud getaran atom suatu zat (Halliday et al., 2005). Getaran tersebut menyebabkan tabrakan dengan atom-atom didekatnya dan menghasilkan getaran (Halliday et al., 2005). Persamaan konduksi sebagai berikut (Zemansky et al., 1982).

$$\dot{Q} = -kA \times \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad (2.10)$$

Untuk konduksi yang melalui lempeng komposit, persamaan berubah menjadi sebagai berikut (Halliday et al., 2005).

$$\dot{Q} = -\frac{A\Delta\theta}{\Sigma\left(\frac{L}{k}\right)} \quad (2.11)$$

Dalam penelitian ini, penghantaran kalor secara konduksi akan diterapkan antara panel surya dan plat dan pipa logam.

2.1.6.2 Konveksi

Konveksi merupakan proses transfer energi yang terjadi antara zat bertemperatur tinggi dengan fluida disekitarnya (Halliday et al., 2005). Arus fluida akan menghantarkan kalor yang diserapnya kepada fluida dengan temperatur yang lebih dingin (Zemansky et al., 1982). Persamaan konveksi sebagai berikut (Zemansky et al., 1982).

$$\dot{Q} = hA\Delta\theta \quad (2.12)$$

Dalam penelitian ini, penghantaran kalor secara konveksi diterapkan untuk penggunaan aliran air. Penerapan ini didasarkan dari aliran air yang diharapkan dapat menyetabilkan temperatur panel surya melalui perantara plat dan pipa logam dari termoelektrik.

2.1.6.3 Radiasi

Radiasi merupakan proses transfer energi gelombang elektromagnetik. Persamaan radiasi sebagai berikut (Zemansky et al., 1982).

$$\dot{Q} = A\alpha\sigma(\theta_{abs}^4 - \theta_{rad}^4) \quad (2.13)$$

Dalam penelitian ini, penghantaran kalor secara radiasi digunakan untuk mengukur secara teoritis radiasi yang diterima panel surya dan dipancarkan panel surya.

2.1.7 Radiasi Matahari

Menurut Buni, Al-Walie, & Al-Asadi (2018), energi matahari adalah bagian dari energi matahari yang jatuh pada permukaan bumi. Energi ini menghasilkan panas dan listrik oleh banyak aplikasi, seperti pemanas air, pemanas udara, dan sel fotovoltaik. Menurut Honsberg & Bowden (2019), adapun perhitungan radiasi matahari sebagai berikut

$$I_D = 1,353 \cdot 0,7^{AM^{0,678}} \quad (2.14)$$

Dimana massa udara adalah

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0,50572(96,07995 - \theta)^{-1,6364}} \quad (2.15)$$

Keterangan:

I_D : Radiasi Matahari kW/m^2

AM : Massa Udara

θ : Sudut Zenith

2.1.7.1 Pengaruh Radiasi Matahari terhadap Arus Listrik Panel Surya

Radiasi matahari yang membawa foton, tentu saja berpengaruh terhadap arus listrik panel surya. Menurut Li, Yang, & Dezfuli (2021), hanya foton dengan energi besar yang dapat melewati pita *bandgap* dan memungkinkan untuk melakukan transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan menghasilkan pasangan elektron-*hole*. Oleh karena itu, penyerapan cahaya mengarah pada pembentukan pembawa yang tidak seimbang, peningkatan konsentrasi pembawa total, dan konduktivitas. Lebih lanjut, menurut Buni et al. (2018), peningkatan arus listrik panel surya disebabkan peningkatan radiasi matahari yang masuk ke panel surya. Secara singkat, adanya peningkatan radiasi panel surya membuat lebih banyak elektron yang melompat dari pita valensi ke pita konduksi.

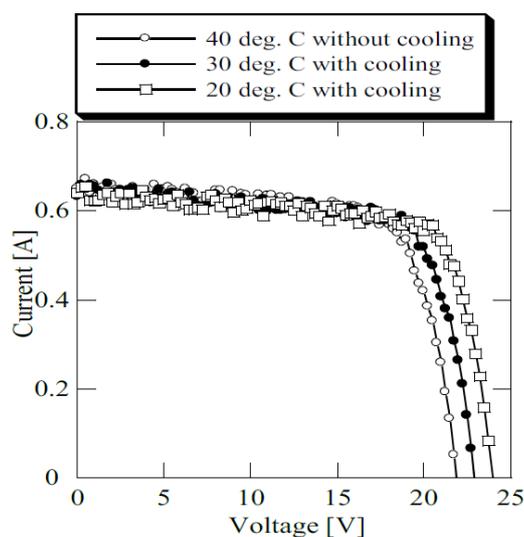
2.1.7.2 Pengaruh Radiasi Matahari terhadap Tegangan Listrik Panel Surya

Menurut Li et al. (2021), radiasi matahari yang diserap oleh sel silikon kristal membuat elektron dengan energi yang lebih rendah melompat ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika transisi berlangsung di pita konduksi atau pita valensi, tidak ada elektron atau lubang pembawa yang melewati *bandgap*, energi hanya ditukar dengan kisi, dan akhirnya energi cahaya diubah menjadi energi panas. Penambahan panas ini berdampak pada tegangan listrik panel surya (Buni et al., 2018). Hal ini dikarenakan elektron yang mendapatkan energi terlalu banyak akan memantul terlalu banyak, bertabrakan dengan atom-atom di sekitarnya dan menurunkan energi yang dihasilkan sehingga mengurangi tegangan listrik dan jumlah listrik yang dihasilkan (World Economic Forum, 2022)

2.2 Hasil yang Relevan

Penelitian di daerah Jakarta oleh Isyanto, Budiyanto, Fadliandi, & Chamdareno, (2017)

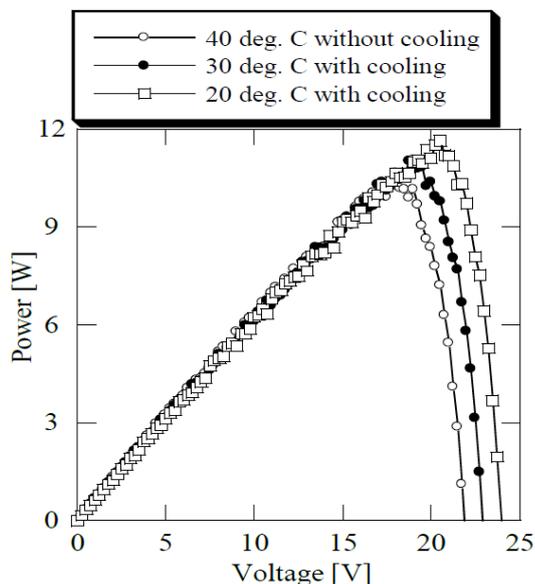
Berdasarkan penelitian di daerah Jakarta oleh Isyanto, Budiyanto, Fadliandi, & Chamdareno, (2017), menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan panel surya ketika menggunakan pendingin dan tidak menggunakan pendingin memiliki hasil yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Perbandingan Grafik Pengaruh Temperatur antara Tegangan dengan Arus Listrik pada Panel Surya (Isyanto et al., 2017)

Grafik ini terbentuk dari perbandingan arus listrik dan tegangan. Arus listrik yang masuk diubah oleh resistor variabel mendekati nilai nol sehingga menghasilkan nilai tegangan yang dapat dibedakan dari grafik tersebut. Pada temperatur 40°C, tegangan ketika arus mendekati nol (V_{OC}) bernilai 22 V, sedangkan ketika temperatur 20°C, maka V_{OC} naik ke 24 V. Sehingga semakin rendah temperatur panel surya, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan.

Lebih lanjut, penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan panel surya dengan pendingin dan tanpa pendingin mengalami perbedaan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perbandingan Grafik Pengaruh Temperatur antara Tegangan dengan Daya Listrik pada Panel Surya (Isyanto et al., 2017)

Grafik ini terbentuk dari perbandingan antara daya dan tegangan listrik panel surya. Pada temperatur 40°C, daya maksimum yang dihasilkan pada tegangan *max power* (V_{MP}) 17,5 V adalah 10 W. Sedangkan pada temperatur 20°C, daya maksimum yang dihasilkan pada tegangan *max power* (V_{MP}) 20 V adalah 12 W. Sehingga semakin rendah temperatur panel surya, maka semakin tinggi daya listrik yang dihasilkan panel surya.

Penelitian di Surabaya oleh Loegimin, Sumantri, Nugroho, Hasnira, & Windarko (2020)

Berdasarkan penelitian di Surabaya oleh Loegimin, Sumantri, Nugroho, Hasnira, & Windarko (2020), menunjukkan bahwa penggunaan heasink dan air dalam sistem pendinginan panel surya dapat mempengaruhi daya dan tegangan keluaran panel surya sebagaimana Tabel 2.2, Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.

Tabel 2.2 Panel Surya Tanpa Pendingin (Loegimin et al., 2020)

Hari	Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Temperatur Panel (°C)
1	9:37:10 AM	11,09	1,10	11,59	70,1
2	9:43:50 AM	5,35	0,48	4,03	69,7
3	11:45:31 AM	4,46	0,19	0,86	82,0
4	10:04:14 AM	2,68	0,18	0,50	73,5
5	9:11:48 AM	1,42	1,01	1,44	69,0

Tabel 2.3 Panel Surya dengan Heatsink (Loegimin et al., 2020)

Hari	Waktu	Tegangan (<i>V</i>)	Arus (<i>A</i>)	Daya (<i>W</i>)	Temperatur (°C)	
					Panel	<i>Heatsink</i>
1	9:24:35 AM	7,37	0,21	1,63	33,79	30,06
2	9:43:50 AM	5,35	0,75	4,03	32,44	30,81
3	10:00:39 AM	5,17	0,23	1,35	32,83	28,49
4	10:15:14 AM	3,56	0,28	1,06	32,49	27,69
5	9:11:48 AM	1,42	1,01	1,44	34,17	32,14

Tabel 2.4 Panel Surya dengan Pendingin Heatsink dan Air (Loegimin et al., 2020)

Hari	Waktu	Tegangan (<i>V</i>)	Daya (<i>W</i>)	Temperatur (°C)	
				Panel	<i>Heatsink</i>
1	12:14:57 PM	17,76	1,31	28,44	29,07
2	12:15:04 PM	11,98	1,38	28,45	29,36
3	12:15:00 PM	17,35	1,23	28,15	29,18
4	12:15:04 PM	18,31	1,24	27,37	28,61
5	12:14:09 PM	14,14	1,04	27,15	28,70

Terlihat bahwa rata-rata temperatur panel surya tanpa heatsink dan air bernilai sekitar 72,86°C. Sedangkan rata-rata temperatur panel surya dengan heatsink maupun heatsink dan air menghasilkan nilai berturut-turut 33,14°C dan 27,91°C. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan heatsink dan air dapat menurunkan temperatur panel surya.

Penelitian di Kroasia oleh Moshfegh, Eslami, & Hosseini (2018)

Berdasarkan penelitian di Kroasia oleh Moshfegh, Eslami, & Hosseini (2018), menunjukkan bahwa temperatur udara, luas sirip *heatsink* dan kecepatan udara berpengaruh terhadap panel surya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5, Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

Tabel 2.5 Perbandingan Temperatur Udara dengan Daya Listrik Panel Surya (Moshfegh et al., 2018)

Radiasi Matahari (<i>W/m²</i>)	Temperatur Udara (<i>K</i>)	Hasil Daya Listrik Panel Surya		Presentase Peningkatan
		Dengan Pendingin (<i>W</i>)	Tanpa Pendingin (<i>W</i>)	
4100	300	2,75	2,66	3,26
4100	310	2,55	2,46	3,24

Tabel 2.6 Perbandingan Luas Sirip Heatsink dengan Daya Listrik Panel Surya (Moshfegh et al., 2018)

Radiasi Matahari (W/m^2)	Luas Sirip <i>Heatsink</i> (m^2)	Hasil Daya Listrik Panel Surya		Presentase Peningkatan
		Dengan Pendingin (W)	Tanpa Pendingin (W)	
3000	0,07	2,55	2,49	2,63
3000	0,2	2,58	2,50	3,05
500	0,07	0,74	0,64	15,35
500	0,2	0,82	0,64	27,87

Tabel 2.7 Perbandingan Kecepatan Udara dengan Daya Listrik Panel Surya (Moshfegh et al., 2018)

Radiasi Matahari (W/m^2)	Kecepatan Udara (m/s)	Hasil Daya Listrik Panel Surya		Presentase Peningkatan
		Dengan Pendingin (W)	Tanpa Pendingin (W)	
3000	1	2,55	2,48	2,57
3000	5	3,16	3,13	0,77
500	1	0,73	0,64	13,66
500	5	0,69	0,66	3,24

Terlihat bahwa temperatur udara yang lebih rendah menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi, adapun luas sirip heatsink yang lebih besar juga menghasilkan daya listrik panel surya yang lebih tinggi dan kecepatan udara yang lebih tinggi akan menghasilkan daya listrik panel surya yang lebih tinggi pula.

Penelitian di Malang oleh Asrori & Yudiyanto (2019)

Berdasarkan penelitian di Malang oleh Asrori dan Eko Yudiyanto (2019), menunjukkan bahwa kenaikan temperatur permukaan panel surya berdampak pada penurunan daya *output*. Dari analisis diperoleh untuk rata-rata radiasi matahari diatas $1000 W/m^2$ dengan rata-rata temperatur lingkungan $33^\circ C$, ketika rata-rata temperatur panel polikristal $47,5^\circ C$ kehilangan dayanya mencapai 10,12 %. Daya *output* akibat kenaikan temperatur permukaan panel dipengaruhi oleh harga koefisien temperatur (γ). Pada pengujian instalasi panel surya kapasitas 100 Wp diperoleh efisiensi rata-rata konversi panel (efisiensi sistem) tipe polikristal adalah 9,18%. Penurunan efisiensi dan performansi suatu instalasi panel surya dipengaruhi oleh tingkat kualitas produk pabrikan (spesifikasi teknis panel), temperatur permukaan panel, temperatur lingkungan (*ambient temperature*),

kecepatan angin (*wind velocity*), partikel debu pada panel dan tipe instalasi panel surya (*shading*, arah panel, tipe *charger controller*, kabel dan lain sebagainya). Sehingga beberapa parameter inilah yang menyebabkan adanya perbedaan daya teoritis dengan daya aktual di lapangan.

Penelitian di Semarang oleh Suwarti, Wahyono, & Prasetyo (2018)

Berdasarkan penelitian di Semarang oleh Suwarti, Wahyono, & Prasetyo (2018), menunjukkan bahwa pada pengujian pengaruh intensitas matahari, suhu permukaan, dan sudut pengarah terhadap daya panel surya dapat diketahui bahwa:

1. Semakin besar intensitas matahari maka arus yang dihasilkan akan semakin besar dan tegangannya cenderung tetap, selain itu semakin besar intensitas matahari maka daya yang dihasilkan juga semakin besar.
2. Semakin besar suhu permukaannya maka tegangan yang dihasilkan akan semakin kecil dan arusnya cenderung tetap, selain itu semakin besar temperatur permukaan maka dayanya semakin besar.
3. Semakin mendekati tegak lurus terhadap datangnya cahaya matahari maka tegangan dan arusnya akan semakin besar, selain itu semakin mendekati tegak lurus sudut pengarah mendekati cahaya matahari maka semakin besar dayanya.

Penelitian di Kab. Tasikmalaya oleh Afriyani, Prasetya, & Filzi (2019)

Berdasarkan penelitian di Kab. Tasikmalaya oleh Afriyani, Prasetya, & Filzi (2019), menunjukkan bahwa:

1. Pemilihan sudut optimum pada panel surya disuatu daerah dipengaruhi oleh posisi *latitude* dari daerah tersebut dan *solar peak hour*.
2. Dari hasil perhitungan sudut berdasarkan posisi PT Lentera Bumi Nusantara dan *solar peak hour* didapat pada sudut 33,98°, 31,58° dan 30,86° menghadap ke utara karena pada perhitungan sudut deklinasi bernilai positif
3. *Software PVSyst* digunakan untuk mendapatkan referensi alternatif dari posisi panel yang akan dipasang. Didapatkan sudut optimum pada panel surya sebesar 31° dan 32° menghadap arah utara.

Penelitian di Jakarta Selatan oleh Dahliyah, Samsurizal & Pasra (2021)

Berdasarkan hasil penelitian di Jakarta Selatan oleh Dahliyah, Samsurizal & Pasra (2021), menunjukkan bahwa Pengaruh kecepatan angin pada efisiensi panel surya yang telah dihitung berdasarkan perhitungan dengan metode regresi linear menunjukkan tingkat korelasi $R = 0,0281$ yang berarti bahwa hanya sekitar 2,81% kecepatan angin yang berpengaruh pada efisiensi panel surya.

Penelitian di Pasuruan oleh Subiakto (2016)

Berdasarkan penelitian di Pasuruan oleh Subiakto (2016), menunjukkan bahwa:

1. Pada saat hujan uap air yang tersebar dan awan menutup langit yang dapat menghalangi cahaya matahari masuk pada sensor radiasi matahari.
2. Curah hujan dan radiasi matahari tertinggi saat panas pada bulan Maret
3. Radiasi terendah saat hujan juga pada bulan Maret
4. Menunjukkan cahaya matahari masuk secara optimal, dengan sudut dan kedekatan matahari ke bumi pada jarak terdekat dalam berevolusi

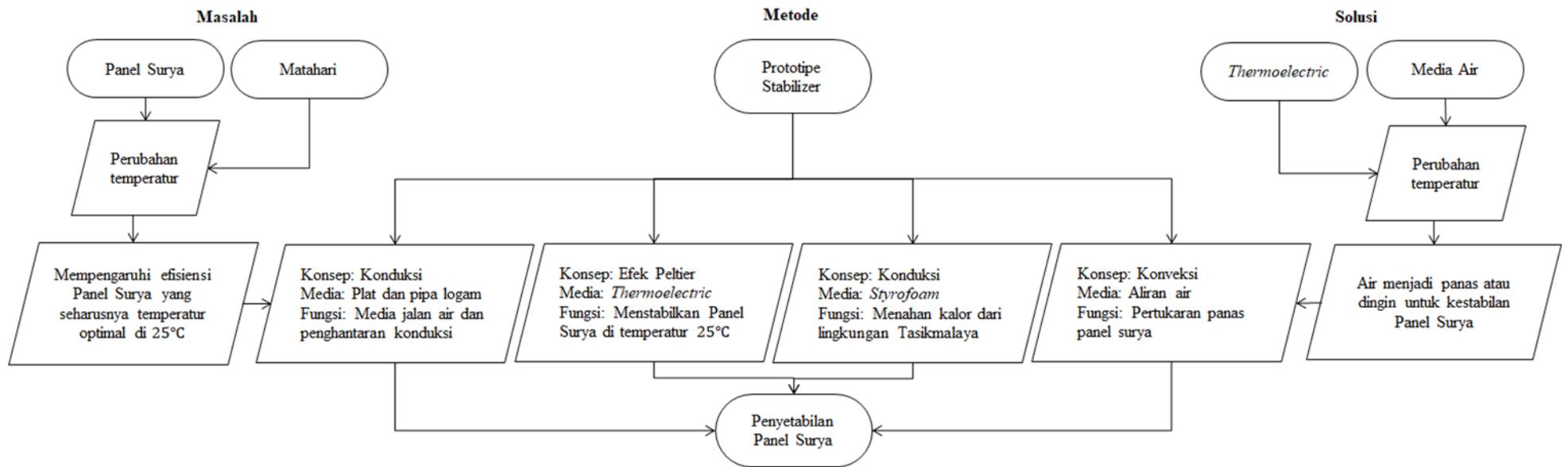
Persamaan dan Perbedaan Penelitian yang Relevan dengan Penelitian yang Berlangsung

Adapun penelitian-penelitian di atas memiliki persamaan dan perbedaan dengan penelitian yang sedang berlangsung. Persamaan penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya ialah berkaitan tentang pengaruh temperatur panel surya terhadap properti kelistrikan panel surya serta pengaruh klimatologi, sedangkan perbedaan penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya ialah melakukan kalkulasi terhadap konsumsi daya listrik *stabilizer* untuk mengetahui apakah penggunaan *stabilizer* ini efisien atau tidak.

2.3 Kerangka Konseptual

Peningkatan temperatur yang diterima oleh panel surya dapat menyebabkan penurunan efisiensi panel surya. Hal tersebut dikarenakan panel surya terpapar sinar matahari sehingga temperatur panel surya lebih tinggi dibanding lingkungannya. Lingkungan penerapan panel surya sebenarnya juga berpengaruh terhadap panel surya. Wilayah Tasikmalaya yang memiliki iklim basah dengan 8 bulan basah dan 4 bulan kering memungkinkan iklim tersebut

mendukung penstabilan temperatur panel surya. Hal tersebut dikarenakan temperatur Tasikmalaya berkisar diantara 21°C sampai 29°C dengan rata rata 25,7°C yang hampir sama dengan *STC (Standard Test Condition)* yaitu 25°C. Pengaruh lingkungan terhadap panel surya tersebut dapat didukung dengan menerapkan prototipe *stabilizer* di panel surya. Prototipe *stabilizer* terdiri atas termoelektrik berfungsi sebagai penyetabil temperatur panel surya hingga temperatur panel surya sekitar 25°C serta plat logam, pipa logam dan aliran air yang berfungsi sebagai media perantara antara temperatur termoelektrik dengan temperatur panel surya. Lebih lanjut, penggunaan daya listrik yang dipakai termoelektrik dan daya listrik yang dihasilkan panel surya akan dihitung dan menentukan keefektivitasan penyetabil temperatur panel surya. Adapun *flowchart* yang dapat ditampilkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Kerangka Berpikir