

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Analisis Faktor

Faktor-faktor dominan adalah faktor-faktor yang diduga berpengaruh terhadap peningkatan nilai arus dan tegangan sel surya. Kondisi hubung singkat mengakibatkan arus yang mengalir antara kedua terminal luaran sel surya menjadi sangat besar oleh karena hambatan beban antar terminal sangat kecil sehingga dapat diketahui nilai arus maksimal yang mampu dihasilkan, sedangkan pada kondisi hubung buka terdapat beda potensial paling tinggi antar terminal luaran sel surya karena tidak terjadi efek penurunan tegangan yang umum terjadi setiap sel surya dibebani rangkaian listrik. Kondisi hubung buka mengakibatkan arus sama sekali tidak dapat mengalir sebab antar kedua terminal terputus secara fisik seakan-akan hambatan beban rangkaian menjadi sangat besar.

Nilai luaran arus dan tegangan dapat diperbesar melalui penambahan intensitas cahaya di bagian permukaan sel surya. Guna mencapai peningkatan luaran ini dilakukan eksperimen menggunakan sepasang pemantul berbentuk bidang datar sebagai konsentrator cahaya yang disebut dengan pemantul *v-trough*. Parameter sudut α dan tinggi pemantul mempengaruhi jumlah intensitas cahaya yang terarah ke muka sel surya oleh adanya peningkatan konsentrasi geometris, sedangkan seleksi panjang gelombang cahaya pantul *v-through* mempengaruhi tingkat konversi energi listrik karena setiap jenis sel surya bekerja

secara efisien dalam panjang gelombang tertentu dan tidak semua panjang gelombang berkontribusi terhadap luaran.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor yang berpengaruh pada nilai arus dan tegangan sel surya adalah Sudut α (A) yang terbentuk antara sel surya dengan penampang pemantul cahaya, Tinggi Pemantul (B) dan Warna Permukaan Pemantul (C).

5.1.1 Faktor sudut α

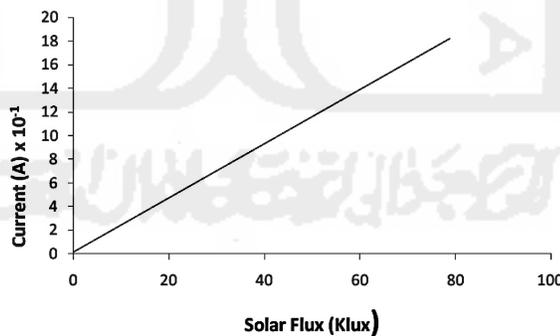
Sudut α mempengaruhi distribusi cahaya pantul di seluruh bagian permukaan sel surya dan nilai konsentrasi geometris yang berdampak pada intensitas cahaya permukaan sel surya.

Berdasarkan ANOVA pada Tabel 4.4 dan 4.5, sudut α mempunyai pengaruh terhadap arus dan tegangan sel surya. Hal ini menunjukkan bahwa faktor sudut α mempunyai peran memaksimalkan luaran baik pada nilai arus maupun tegangan. Kondisi ini sekaligus membuktikan pernyataan bahwa terdapat hubungan linier antara intensitas cahaya terhadap nilai luaran sel surya, bahwa semakin tinggi intensitas maka semakin maksimal luaran arus dan tegangannya (Pepple et al., 2009) sesuai yang ditunjukkan Gambar 5.1 dan 5.2.

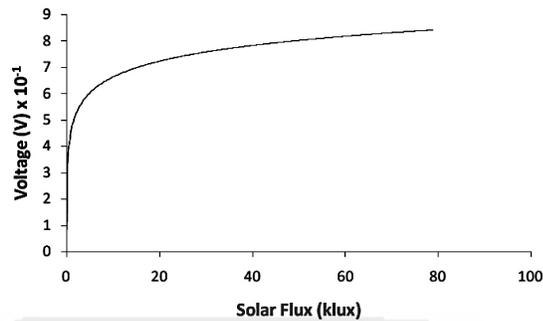
Hasil perhitungan kondisi optimum (Tabel 4.6 dan 4.7) menunjukkan, bahwa kondisi optimal luaran arus dan tegangan sel surya dicapai pada Sudut α 65° . Intensitas cahaya yang diterima untuk nilai sudut ini berada pada nilai tertingginya sehingga mendorong terjadinya penambahan rata-rata nilai arus dan

tegangan. Peningkatan intensitas cahaya ini disebabkan oleh adanya peningkatan konsentrasi geometris sedangkan konsentrasi geometris dipengaruhi oleh nilai sudut pelewatan (ψ) dengan sifat hubungan berbanding lurus (Fraidenraich, 1998). Berdasarkan pernyataan tersebut jelas bahwa pada sudut α tertinggi (ψ terendah) akan diperoleh intensitas cahaya paling tinggi.

Berdasar Tabel 4.7 faktor Sudut α menempati urutan / *ranking* pertama SNR respon tegangan sehingga disimpulkan memiliki pengaruh tinggi terhadap nilai rata-rata tegangan sel surya. Menaikkan level faktor Sudut α dari level satu menuju level tiga mampu meningkatkan rata-rata nilai tegangan sebesar 0,047 V. Peningkatan rata-rata nilai tegangan yang kecil pada penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian (Pepple et al., 2009) seperti yang ditunjukkan Gambar 5.2 dimana peningkatan intensitas cahaya (klux) dari 20 menuju 80 hanya menaikkan tegangan dari 0,7 V menjadi 0,82 V



Gambar 5.1 Intensitas cahaya terhadap arus
(Pepple et al., 2009)



Gambar 5.2 Intensitas cahaya terhadap tegangan
(Pepple et al., 2009)

5.1.2 Faktor tinggi pemantul

Tinggi pemantul mempengaruhi konsentrasi geometris *v-trough*. Semakin tinggi pemantul yang digunakan semakin lebar area pelewatan cahaya mengakibatkan naiknya konsentrasi geometris *v-trough*.

Berdasarkan ANOVA Tabel 4.4 dan 4.5 faktor tinggi pemantul memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai arus dan tegangan sel surya. Hal ini menunjukkan bahwa tinggi pemantul tipe *V-Trough* memiliki peran memaksimalkan luaran baik pada nilai arus maupun tegangan.

Hasil perhitungan kondisi optimum (Tabel 4.6 dan 4.7) menunjukkan, bahwa kondisi optimal luaran arus dan tegangan sel surya dicapai pada tinggi pemantul 15 cm. Lebar pelewatan *v-trough* dan konsentrasi geometris terbesar terbentuk pada ukuran ini sehingga jumlah cahaya jatuhnya juga paling tinggi. Peningkatan jumlah cahaya jatuh mampu mendorong penambahan nilai arus dan tegangan sel.

Terjadinya peningkatan jumlah cahaya jatuh dapat dimaklumi karena sesuai dengan paparan teori yang menunjukkan bahwa konsentrasi geometris *v-trough* (C) berbanding lurus dengan lebar area pelewatan (A) dan berbanding terbalik terhadap lebar bidang sel surya (a) (Fraidenraich, 1998). Lebar bidang sel surya pada penelitian adalah tetap 6 cm sehingga dengan tinggi pemantul 15 cm (level tertinggi) akan menghasilkan area pelewatan paling lebar, mendorong peningkatan jumlah cahaya jatuh paling tinggi.

Berdasarkan Tabel 4.6 dan 4.7 diketahui bahwa meningkatkan level faktor tinggi pemantul dari level satu menjadi level tiga lebih banyak mempengaruhi nilai rata-rata arus sel surya dibandingkan tegangannya. Kenaikan rata-rata arus sel meningkat sebesar 0,88 mA sedang rata-rata tegangan meningkat 0,036 V. Walaupun menempati urutan kedua dalam hal pengaruh terhadap respon tegangan maupun arus, faktor tinggi pemantul tetap memberikan kontribusi terhadap peningkatan kedua respon penelitian.

5.1.3 Faktor warna permukaan pemantul

Setiap jenis sel surya didesain beroperasi pada panjang gelombang yang berbeda tergantung material pembuatnya. Penelitian ini menggunakan objek sel surya jenis *polycrystalline* sehingga lebih sensitif terhadap panjang gelombang yang lebih panjang yaitu cahaya warna merah pada $\lambda=0,922\mu\text{m}$.

Berdasarkan ANOVA Tabel 4.4 dan 4.5 faktor warna permukaan pemantul memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai arus dan tegangan sel surya. Hal ini

menunjukkan bahwa warna permukaan pemantul memiliki peran memaksimalkan luaran baik pada nilai arus maupun tegangan.

Hasil perhitungan kondisi optimum (Tabel 4.6 dan 4.7) menunjukkan, bahwa kondisi optimal luaran arus dan tegangan sel surya dicapai pada warna permukaan pemantul merah. Hal ini menunjukkan bahwa, warna merah memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai luaran sel surya jenis *polycrystalline*. Cahaya warna ini paling baik dikonversi menjadi energi listrik karena sesuai dengan sensitifitas panjang gelombang sel surya *polycrystalline* yaitu pada $\lambda=0,922\mu\text{m}$ (Shaltout, 2000). Pengaruh variasi arus sel surya oleh adanya variasi paparan cahaya terutama disekitar $\lambda=0,922\mu\text{m}$ untuk jenis sel *polycrystalline* dapat dipahami karena secara teori arus hubung singkat sel surya merupakan *photocurrent* yang dihasilkan pada masukan panjang gelombang tertentu (Yates, 2003).

Berdasar Tabel 4.6 faktor warna pemantul menempati urutan / *ranking* pertama SNR respon arus, sehingga disimpulkan memiliki pengaruh tinggi terhadap nilai rata-rata arus sel surya. Menaikkan level faktor warna pemantul dari level satu menuju level tiga mampu meningkatkan rata-rata nilai arus sel sebesar 1,59 mA. Peningkatan rata-rata nilai arus yang cukup linier pada saat level faktor ditingkatkan secara bertahap dari level satu menuju level tiga dapat terjadi karena perubahan warna permukaan pemantul dari hijau menuju merah yang mengakibatkan panjang gelombang (λ) cahaya pantul juga menjadi semakin

panjang. Semakin panjang λ cahaya semakin besar arus yang dihasilkan sel surya (Sudhakar, 2013).

5.2 Pemilihan Level Faktor pada Kondisi Optimal

Pemilihan level faktor dimaksudkan untuk memilih kombinasi level dan faktor yang signifikan yaitu kombinasi level dari faktor yang memberikan rata-rata nilai arus dan tegangan tertinggi. Hasil kombinasi level faktor optimal kedua respon adalah $A_3B_3C_3$, artinya untuk memaksimalkan nilai arus (mA) dan tegangan (V) dengan cara meningkatkan intensitas cahaya dan seleksi panjang gelombang cahaya pantul pada pemantul *v-trough*, diperlukan setting parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Kombinasi level faktor optimal

Faktor	Level	Satuan
A. Sudut α	65	°
B. Tinggi pemantul	15	cm
C. Warna pemantul	Merah	-

Berdasarkan jumlah respon dalam eksperimen, terlihat bahwa penelitian ini tergolong dalam Taguchi multirespon. Untuk mendapatkan kombinasi optimal perlu dilihat apakah masing-masing variabel respon memiliki kombinasi faktor yang sama. Apabila kombinasi faktor kedua respon berbeda perlu penanganan lebih lanjut menggunakan metode MRSN, akan tetapi hasil uji SNR menunjukkan bahwa level faktor optimal respon arus dan tegangan sel surya sama pada $A_3B_3C_3$ sehingga tidak diperlukan analisis multirespon.

Hasil level faktor optimal masing-masing respon penelitian menyarankan untuk menggunakan level tertinggi untuk setiap faktor yang dieksperimenkan. Level faktor dimaksud tidak tampak dalam *orthogonal array* penelitian sehingga sama sekali belum pernah dieksperimenkan. Untuk mengetahui nilai respon arus dan tegangan secara riil maka selanjutnya perlu dilakukan langkah eksperimen konfirmasi. Berdasarkan hasil eksperimen konfirmasi tersebut maka selanjutnya dapat diketahui apakah kombinasi level faktor optimal (menggunakan pemantul *v-trough*) mampu meningkatkan nilai arus dan tegangan sel surya melebihi kondisi tanpa menggunakan pemantul.

5.3 Perbandingan Kondisi Optimal dengan Kondisi Normal

Penggunaan pemantul akan meningkatkan intensitas cahaya yang jatuh pada sel surya melebihi kondisi normal satu matahari yang merupakan STC (*Standart Test Condition*). *Standart Test Condition* adalah kondisi pengujian sel surya pada penyinaran sebesar $1000\text{W}/\text{m}^2$ (satu matahari) sesuai standar pembuatnya (Luque dan Hegedus, 2003). Dalam penelitian ini digunakan sumber cahaya berupa lampu halogen daya 500W sebagai pengganti cahaya matahari sehingga untuk pengujian dengan pemantul *v-trough* akan meningkatkan perolehan intensitas cahaya sel surya melebihi penyinaran lampu 500W.

Nilai tegangan dan arus sel surya tertinggi dalam eksperimen pemantul *v-trough* dicapai pada kombinasi $A_3B_3C_3$ yaitu sudut α 65° , tinggi pemantul 15 cm, warna pemantul merah. Kondisi dimana luaran tegangan dan arus sel surya mencapai nilai tertinggi pada eksperimen menggunakan pemantul *v-trough*

merupakan kondisi optimal eksperimen, sedang kondisi normal merupakan kondisi luaran sel surya diukur saat eksperimen tanpa menggunakan pemantul. Keduanya dibandingkan dengan cara melakukan uji beda untuk mengetahui apakah penggunaan pemantul pada level faktor optimal mampu meningkatkan luaran melebihi kondisi normal.

Karakteristik kualitas masing-masing respon penelitian menggunakan jenis yang sama yaitu LTB dengan demikian untuk membandingkan antara kondisi optimal (menggunakan pemantul *v-trough*) dengan normal (tanpa pemantul *v-trough*) perlu dilakukan uji beda satu sisi. Langkah uji beda satu sisi dilaksanakan untuk mengetahui apakah μ_2 (rata-rata nilai respon menggunakan pemantul) lebih besar dari μ_1 (rata-rata nilai respon tanpa pemantul) atau dengan kata lain $\mu_2 - \mu_1 > 0$

5.3.1 Uji beda

Berdasarkan hasil perhitungan uji beda antara kondisi optimal dengan kondisi normal pada Tabel 4.10 dapat dilihat adanya perbedaan. Hasil perhitungan uji beda untuk arus sel surya menunjukkan bahwa, nilai P yang diperoleh adalah 0,000, jauh lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05 yang digunakan, artinya secara statistik terdapat kenaikan nilai rata-rata arus sel surya pada kondisi optimal dibanding dengan kondisi normal. Hasil uji beda Tabel 4.12 untuk respon tegangan diperoleh nilai P sebesar 0,03, lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05, artinya secara statistik terdapat kenaikan nilai rata-rata tegangan sel surya pada kondisi optimal dibanding dengan kondisi normal. Perbandingan nilai rata-rata

hasil uji kedua respon antara kondisi optimal dengan kondisi normal yang ditunjukkan Tabel 4.9 dan 4.11 menghasilkan peningkatan rata-rata tegangan dan arus sel sebesar 1,48% dan 20.88%.

5.3.2 Perhitungan biaya

Biaya pada kondisi usulan jelas lebih mahal Rp2.680,00 dibanding kondisi normal, namun demikian kondisi usulan menghasilkan biaya listrik / mW lebih rendah sebesar Rp384,76 dibandingkan kondisi normal Rp460,11. Penghematan biaya listrik / mW sel surya pada pemasangan awal sebesar Rp75,35 dapat diperoleh karena untuk luasan sel surya sama dihasilkan tegangan dan arus sel surya yang lebih tinggi sementara biaya awal pemasangan dapat ditekan rendah oleh penggunaan bahan pemantul dan struktur rangka penyangga yang murah. Setelah pemakaian daya sel surya sebesar 35,57 mW maka, penambahan biaya Rp2.680,00 akibat penggunaan *v-trough* dapat dikembalikan karena diperoleh keuntungan oleh adanya penghematan biaya sebesar Rp2.860,2. Berdasarkan data-data tersebut, kondisi optimal jelas memberikan solusi lebih baik daripada kondisi normal karena didapatkan peningkatan luaran arus dan tegangan sel surya sementara biaya / mW pada pemasangan awal dapat diturunkan.

5.4 Perbandingan Kondisi Lapangan dengan Kondisi Laboratorium

Hasil pengujian kondisi lapangan menggunakan sumber cahaya matahari akan dibandingkan dengan kondisi uji laboratorium yang menggunakan sumber lampu halogen dengan tujuan mengetahui apakah kondisi lapangan menghasilkan rata-rata nilai tegangan dan arus sel surya berbeda dengan kondisi laboratorium.

5.4.1 Uji beda

Berdasarkan hasil perhitungan uji beda antara kondisi uji lapangan dengan kondisi laboratorium Tabel 4.16 dapat dilihat adanya perbedaan. Hasil perhitungan uji beda untuk arus sel surya menunjukkan bahwa, nilai P yang diperoleh adalah 0,000, jauh lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05 yang digunakan, artinya secara statistik terdapat cukup bukti bahwa nilai rata-rata arus kondisi uji lapangan pada kombinasi level faktor optimal berbeda dengan uji laboratorium.

Hasil uji beda Tabel 4.18 untuk respon tegangan diperoleh nilai P sebesar 0,004, lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05, artinya secara statistik terdapat cukup bukti bahwa rata-rata tegangan kondisi uji lapangan pada kombinasi level faktor optimal berbeda dengan uji laboratorium. Perbandingan nilai rata-rata hasil uji kedua respon antara kondisi uji lapangan dengan kondisi uji laboratorium yang ditunjukkan Tabel 4.15 dan 4.17 menghasilkan peningkatan rata-rata arus sel sebesar 148,5% dan penurunan tegangan sel 1,09%.

Peningkatan arus sel surya kondisi uji lapangan terjadi karena intensitas cahaya matahari jauh lebih besar dibandingkan dengan intensitas cahaya lampu halogen. Pada kondisi uji laboratorium intensitas cahaya halogen menghasilkan ± 5500 lux sedangkan uji lapangan matahari menghasilkan intensitas cahaya lebih dari 54612 lux. Peningkatan arus yang terjadi juga sesuai dengan asumsi intensitas cahaya lampu halogen 5% intensitas cahaya matahari. Kondisi ini membuktikan pernyataan bahwa terdapat hubungan linier antara intensitas cahaya terhadap nilai

luaran sel surya, bahwa semakin tinggi intensitas maka semakin maksimal luaran arus dan tegangannya (Pepple et al., 2009) sesuai yang ditunjukkan Gambar 5.1 dan 5.2. Peningkatan intensitas cahaya dan suhu lingkungan pada uji lapangan menyebabkan kenaikan suhu sel surya sehingga meningkatkan batasan panjang gelombang cahaya yang mampu dikonversi sel surya yang akhirnya akan meningkatkan arus sel (Yates, 2003). Penelitian Shaltout, 2000 menunjukkan bahwa peningkatan suhu sel akan menggeser *spectral response* sel surya mendekati area infra merah sehingga arus sel surya meningkat karena mendekati *spectral response* sel polycrystalline. Kondisi uji lapangan menunjukkan kelembapan udara yang lebih rendah yaitu pada 27 RH sehingga menyebabkan tidak banyak cahaya matahari yang terserap oleh kandungan air dalam udara sehingga intensitas cahaya menjadi tinggi. Hal ini sesuai dengan pernyataan Pepple et al., 2009 yaitu tingkat kelembapan rendah berarti kandungan air dalam udara rendah sehingga intensitas cahaya tinggi dan akhirnya menaikkan produksi arus sel surya.

Peningkatan suhu sel saat uji lapangan memiliki efek samping berupa penurunan nilai tegangan sel, sesuai yang ditunjukkan pada Tabel 4.17 dimana rata-rata nilai tegangan sel surya turun dari 8,25 V menjadi 8,16 V. Sesuai teori peningkatan suhu sel menyebabkan tegangan *bandgap* berkurang sehingga terdapat lebih banyak elektron dalam pita konduksi yang akhirnya meningkatkan *dark current*. Peningkatan *dark current* akan menurunkan tegangan sel (Yates, 2003). Penurunan tegangan akan menurunkan daya sel karena daya sel merupakan perkalian antara tegangan dan arus sel surya. Efek penurunan daya pada saat

terjadi peningkatan suhu sel juga terjadi pada penelitian Radziemska, 2003 yang menunjukkan penurunan daya sel surya jenis silikon sebesar $0,65\%K^{-1}$. Penelitian Pepple at al., 2009 menyatakan bahwa penurunan kelembapan relatif mengindikasikan terjadinya peningkatan tegangan sel, namun demikian karena suhu lingkungan dan intensitas cahaya uji lapangan lebih tinggi daripada uji laboratorium maka mendorong terjadinya peningkatan suhu sel surya sehingga pada akhirnya tegangan sel turun menjadi 8,16 V. Hal ini sesuai pernyataan bahwa peningkatan intensitas cahaya (diikuti suhu lingkungan) akan meningkatkan suhu sel surya yang akhirnya dapat menurunkan tegangan sel (Luque dan Hegedus, 2003).

5.4.2 Perhitungan biaya

Uji lapangan menghasilkan biaya listrik / mW kondisi usulan lebih rendah sebesar Rp156,56 dibandingkan kondisi normal Rp186,79 dengan penghematan biaya listrik / mW sel surya pada pemasangan awal sebesar Rp30,23. Setelah pemakaian daya sel surya sebesar 88,65 mW maka, penambahan biaya Rp2.680,00 akibat penggunaan *v-trough* dapat dikembalikan karena diperoleh keuntungan oleh adanya penghematan biaya sebesar Rp2.680,00. Penghematan biaya listrik / mW yang lebih rendah pada kondisi lapangan dibanding kondisi uji laboratorium dapat terjadi karena nilai rata-rata tegangan sel surya uji lapangan justru lebih rendah dari uji laboratorium. Penurunan tegangan ini terjadi karena suhu lingkungan dan intensitas cahaya pada uji lapangan lebih tinggi dari pada saat uji laboratorium. Hal ini sesuai pernyataan bahwa peningkatan intensitas cahaya (diikuti suhu lingkungan) akan meningkatkan suhu sel surya yang

akhirnya dapat menurunkan tegangan sel (Luque dan Hegedus, 2003). Berdasarkan data penelitian yang diperoleh terlihat bahwa daya sel surya kondisi optimal pada uji lapangan lebih tinggi dari daya sel surya kondisi optimal uji laboratorium sehingga memperkuat kebenaran asumsi intensitas cahaya yang dibuat.

