

**PENGEMBANGAN ESTIMATOR KALMAN  
SEBAGAI PREDIKSI KEADAAN DAYA PADA SISTEM KONTROL  
MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) PANEL SURYA**

**DEVELOPMENT OF KALMAN ESTIMATORS AS STATE PREDICTION POWER  
IN CONTROL SYSTEM OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING**

Fahmi Tasmara<sup>1</sup>, Reza Fauzi Iskandar, S.Pd.,M.T.<sup>2</sup>, Ahmad Qurthobi, M.T.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

<sup>1</sup>[tasmarafahmi@gmail.com](mailto:tasmarafahmi@gmail.com), <sup>2</sup>[rezafauzii@gmail.com](mailto:rezafauzii@gmail.com), <sup>3</sup>[qurthobi@hotmail.com](mailto:qurthobi@hotmail.com)

**Abstrak**

Kebutuhan energi listrik di Indonesia pada tahun 2015 mencapai 19,5-20 trilyun kWh. Namun kontribusi sumber energi primer yang tergolong minyak dan gas bumi yang tersedia hanya 12,4 trilyun kWh saja. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut maka dikembangkanlah energi alternatif yang dideskripsikan sebagai energi baru dan terbarukan. Berdasarkan potensi energi matahari yang ada di Indonesia, penggunaan panel surya tepat diaplikasikan di Indonesia. Tetapi, daya yang dihasilkan oleh panel surya bersifat fluktuatif dikarenakan faktor cuaca. Untuk mengetahui perkiraan daya yang seharusnya dapat dihasilkan dari panel surya dan daya maksimum panel surya yang dapat ditransmisikan ke beban, maka dilakukan percobaan simulasi menggunakan *Simulink* yang terdapat pada *software* Matlab. Percobaan yang dilakukan yaitu dengan mengaplikasikan estimator Kalman sebagai prediktor daya panel surya dan kontrol PID yang menerapkan metode *Constant Voltage* (CV) yang berperan sebagai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan *buck-boost converter*.

**Kata Kunci :** Sel Photovoltaic, Buck-Boost Converter, Maximum Power Point Tracking, Constant Voltage, PID, Estimator Kalman

**Abstract**

The need for electricity in Indonesia in 2015 reached 19.5-20 trillion kWh. However, the contribution of primary energy sources classified as oil and natural gas is only 12.4 trillion kWh. To meet the needs of electrical energy, alternative energy is developed which is described as new and renewable energy. Based on the potential of solar energy in Indonesia, the use of solar panels is precisely applied in Indonesia. However, the power produced by solar panels is fluctuating due to weather factors. To find out the estimated power that could have been generated from solar panels and the maximum power of solar panels that can be transmitted to the load, a simulation experiment was conducted using *Simulink* contained in the Matlab software. The experiment was carried out by applying the Kalman estimator as a predictor of solar panel power and PID control applying the *Constant Voltage* (CV) method which acts as the *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) using a *buck-boost converter*.

**Keywords:** Photovoltaic Cell, Buck-Boost Converter, Maximum Power Point Tracking, Constant Voltage, PID, Kalman Estimator

**1. Pendahuluan**

Kebutuhan energi listrik pada tahun 2015 mencapai 19,5-20 trilyun kWh [1]. Namun kontribusi sumber energi primer yang tergolong minyak dan gas bumi yang tersedia hanya 12,4 trilyun kWh saja [1]. Selain itu berdasarkan data dari Kementerian ESDM RI, konsumsi energi fosil masyarakat Indonesia cukup tinggi, hampir 95%. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka diperlukan sumber energi alternatif. Indonesia merupakan negara yang terletak di daerah tropis dan dilalui oleh garis khatulistiwa dengan luas daratan sekitar 2 juta km<sup>2</sup> serta diberi kelimpahan sumber daya alam dengan penyinaran matahari lebih dari 6 jam sehari atau kurang lebih 2.400 jam dalam setahun [2].

Energi surya yang tersedia di Indonesia memiliki intensitas antara 0,6-0,7 kW/m<sup>2</sup> [2]. Berdasarkan ketersediaan energi terbarukan yang melimpah tersebut, penggunaan panel surya atau sistem *photovoltaic* (PV) tepat diaplikasikan di Indonesia. Tetapi, daya yang dihasilkan oleh panel surya bersifat fluktuatif dikarenakan faktor cuaca. Untuk mengetahui perkiraan daya yang seharusnya dapat dihasilkan dari panel surya dan daya maksimum panel surya yang dapat ditransmisikan ke beban, maka dilakukan percobaan simulasi menggunakan *Simulink* yang terdapat pada *software* Matlab. Percobaan yang dilakukan yaitu dengan mengaplikasikan estimator Kalman sebagai prediktor daya panel surya dan kontrol PID yang menerapkan metode *Constant Voltage* (CV) yang berperan sebagai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan *buck-boost converter*.

## 2. Perancangan Simulasi

Pada bab ini dijelaskan hasil perancangan setiap elemen yang saling berkaitan dari keseluruhan simulasi sistem. Sistem yang dirancang menjawab dari setiap tujuan penelitian.

### 2.1 Spesifikasi Panel Surya

Rangkaian simulasi panel surya dirancang untuk digunakan sebagai sumber daya (tegangan-arus) pada rangkaian simulasi *buck-boost converter*. Rangkaian simulasi ini dibuat berdasarkan persamaan matematis panel surya yang diterjemahkan sedemikian rupa dalam bentuk blok-blok matematis. Blok-blok matematis tersebut terdapat pada *sub-menu Simulink library browser* yang kemudian nilai tegangan *open circuit*, arus *short circuit*, nilai konstanta yang ada pada persamaan matematis panel surya dapat disesuaikan dengan spesifikasi yang diinginkan.



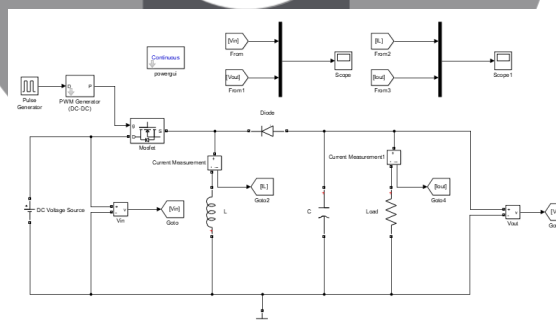
ST SOLAR	
Module Type: Q50W(36) Polycrystalline Solar Panel	
Maximum Power (P <sub>max</sub> )(W)	50
Maximum Power Tolerance	±3%
Open-Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )(V)	21.6
Short-circuit Current (I <sub>sc</sub> )(A)	2.99
Max Power Voltage (V <sub>mp</sub> )(V)	18
Max Power Current (I <sub>mp</sub> )(A)	2.78
Power Specifications at STC, 1000W/m <sup>2</sup> , AM1.5, CELL 25°C	
Weight (kg)	4.5
Dimension (mm)	700*540*30
Max System Voltage (V)	1000
Max Over Current Protecting Rating (A)	15
Cell Technology	Poly-Si
Module Application Class	A
Electrical shock hazard Do not touch bare conductors or other potentially energized parts!	
RoHS ISO CEC IEC CE	

Gambar 2.1 Spesifikasi panel surya ST SOLAR Q50W(36)

Spesifikasi simulasi panel surya yang digunakan disesuaikan dengan panel surya bermerk *ST SOLAR Q50W(36)* berbahan *polycrystalline*. Panel surya ini berkapasitas *50W* memiliki nilai daya toleransi  $\pm 3\%$  dengan tegangan *open-circuit* ( $V_{OC}$ ) sebesar *21.6V*, tegangan *max.power* ( $V_{MP}$ ) sebesar *18V*, arus *short-circuit* *2.99A*, dan arus *max.power* ( $I_{MP}$ ) sebesar *2.78A*. Kondisi maksimum tersebut dapat dicapai saat keadaan *STC* (*Standard Test Conditions*) yaitu saat iradiasi sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$  dan temperatur saat  $25^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2 Perancangan Rangkaian Simulasi Buck-Boost Converter

*Buck-boost converter* dirancang disesuaikan dengan besarnya daya keluaran maksimum ( $P_{MPP}$ ) yang dihasilkan oleh panel surya *ST SOLAR Q50W(36)*. Desain rancangan rangkaian simulasi *buck-boost converter* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Rancangan rangkaian simulasi *buck-boost converter*

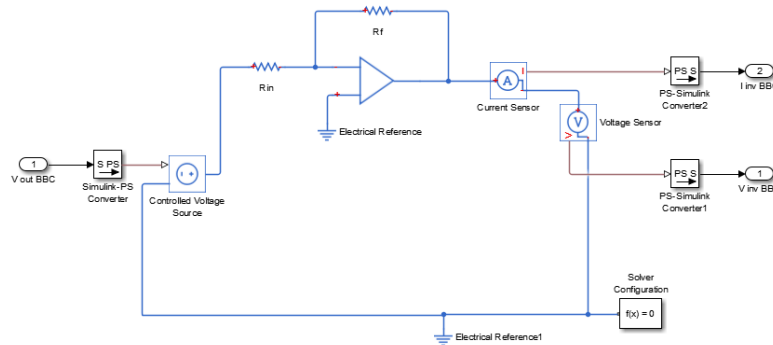
Berdasarkan perhitungan secara matematis, diperoleh nilai induktor, kapasitor, dan beban resistor yaitu secara berturut-turut sebesar  $49.55 \mu\text{H}$ ,  $3860 \mu\text{F}$ , dan  $6.475 \Omega$ . Namun pada kenyataannya, pada saat *buck-boost converter* bekerja terjadi proses disipasi serta nilai induktor, kapasitor, dan resistor yang telah dihitung tidak tersedia di pasaran atau dapat dikatakan hanya pada nilai-nilai tertentu saja. Maka dilakukan pendekatan nilai induktor, kapasitor, dan resistor tersebut.

Nilai induktor sebesar  $49.55 \mu\text{H}$  didekati dengan nilai  $1 \text{ mH}$ . Hal tersebut dikarenakan proses yang terjadi pada induktor sebagai transmisi arus dan pembalik polaritas atau dapat dikatakan sebagai komponen yang bekerja secara aktif dan disipasi yang terjadi berkemungkinan besar karena beban kerja yang dilakukan oleh induktor tersebut. Nilai kapasitor sebesar  $3860 \mu\text{F}$  didekati dengan nilai  $3300 \mu\text{F}$   $50 \text{ V}$ . Hal ini dikarenakan nilai yang

mendekati dengan yang ada di pasaran adalah  $3300 \mu F$   $50 V$ . Nilai beban resistor  $6.475 \Omega$  didekati menjadi  $10 \Omega$ . Namun pada percobaan simulasi ini menggunakan beban resistansi sebesar  $100 \Omega$ .

**2.3 Kontrol PID MPPT**

Rangkaian simulasi op-amp *inverting* digunakan untuk membalikkan polaritas tegangan dan arus yang dihasilkan oleh simulasi *buck-boost converter* karena desain simulasi yang dirancang adalah tipe *inverting buck-boost converter*. Selain itu juga, simulasi *inverting* dimanfaatkan tegangan keluarannya sebagai umpan balik pada sistem kontrol PID yang digunakan agar nilai PWM tidak terbalik sebagaimana tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan oleh *inverting buck-boost converter*. Gambar berikut merupakan rancangan simulasi rangkaian penguat *inverting*:



**Gambar 2.3** Rancangan simulasi *op-amp inverting*

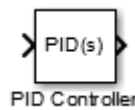
Rangkaian simulasi *inverting* ini hanya digunakan sebagai pembalik polaritas, tidak digunakan sebagai penguatan. Oleh karena itu, nilai resistansi masukan ( $R_{in}$ ) sama dengan nilai resistansi op-amp ( $R_f$ ). Persamaan besar penguatan pada rangkaian penguat *inverting* adalah sebagai berikut:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{R_f}{R_{in}}$$

Tanda negatif ( $-$ ) merupakan tanda pembalikan fasa sebesar  $180^\circ$  dengan nilai tegangan masukannya ( $V_{in}$ ) yang merupakan tegangan keluaran dari *inverting buck-boost converter*. Selanjutnya, rangkaian simulasi penguat *inverting* tersebut dibuat menjadi satu *subsystem block* agar lebih mudah dalam penggunaannya.

**2.4 Kontrol PID MPPT**

Metode *Constant Voltage* dapat diwujudkan dengan cara menggunakan kontrol PID. Kontrol PID merupakan singkatan dari *Proportional Integral Derivative*. Kontrol PID akan membandingkan nilai tegangan yang dihasilkan panel surya sesuai dengan nilai tegangan referensi yang diatur dengan cara mengolah setiap kesalahan antara tegangan yang dihasilkan dengan tegangan referensi mendekati atau sama dengan nol sehingga tegangan yang dihasilkan *buck-boost converter* tetap terkontrol meskipun dengan beban resistor yang berbeda-beda. Simulasi kontrol PID pada sistem ini menggunakan *embedded block function* yang sudah ada dalam perangkat lunak *Matlab*. Di bawah ini merupakan blok PID pada perangkat lunak *Matlab*.



**Gambar 2.4** Blok kontrol PID

Pada blok tersebut *user* hanya perlu memasukkan besar nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Penentuan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dilakukan dengan cara *trial and error*. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  secara berturut-turut sebesar 1.5, 0.5, dan 0.005. Proses pengujian dilakukan dengan nilai sumber tegangan DC sebesar 12 V, beban resistor  $100 \Omega$  dengan tegangan referensi bervariasi yakni sebesar 5 V, 8 V, 10 V, 12 V, dan 15 V.

## 2.5 Program Estimator Kalman

Estimator Kalman dirancang dengan menggunakan blok *Matlab function*. Blok tersebut dapat digunakan dengan cara membuat program sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Berikut merupakan program rancangan estimator Kalman.

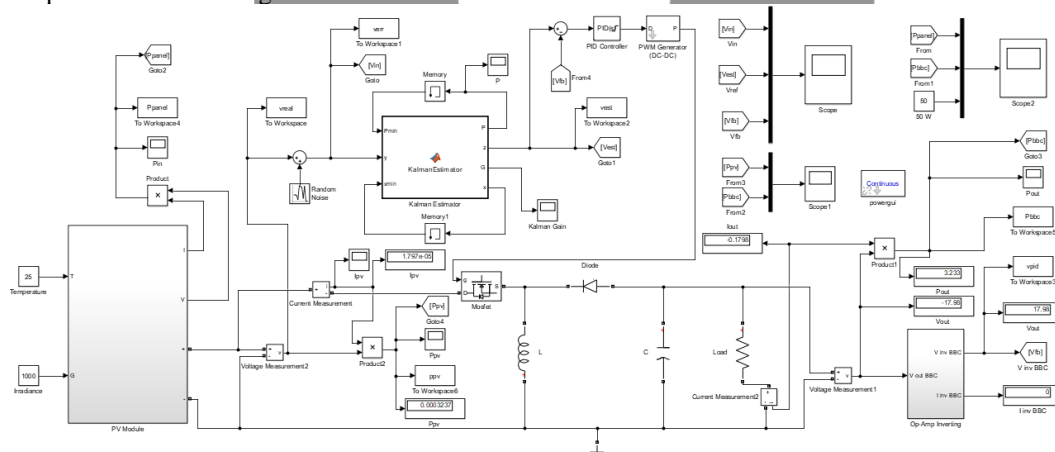
```
function [P, z, x, G] = fcn(Pmin, y, xmin)
%#codegen
if Pmin==0
    Pmin=10; xmin=20;
end
Q = 0.01; %%covariance estimate error
R = 0.1; %% covariance measurement error
P = Pmin+Q; %%P=estimate uncertainty
G = P / (P+R);
x = xmin+G*(y-xmin);
P = (1.00-G)*P;
z = x;
```

Pada program di atas terdapat beberapa variabel yang terbagi menjadi dua, yaitu variabel masukan dan variabel keluaran dari blok estimator Kalman. Variabel yang termasuk sebagai variabel masukan yaitu  $y$ ,  $P_{min}$ , dan  $x_{min}$ . Fungsi variabel  $y$  sebagai masukan dari hasil pengukuran.  $P_{min}$  merupakan ketidakpastian estimasi yang dihitung selama proses estimasi sebelumnya. Variabel  $x_{min}$  merupakan hasil keadaan estimasi sebelumnya.

Variabel yang termasuk sebagai variabel keluaran yaitu  $z$ ,  $x$ ,  $P$ , dan  $G$ . Variabel  $z$  menunjukkan hasil estimasi keadaan saat ini (*current state*). Variabel  $x$  merupakan hasil estimasi keadaan saat ini yang akan berfungsi sebagai masukan pada variabel  $x_{min}$ . Variabel  $P$  merupakan hasil ketidakpastian estimasi saat ini yang telah dihitung sebelumnya yang akan berfungsi sebagai masukan pada variabel  $P_{min}$ . Variabel  $G$  merupakan *Kalman Gain* yang sangat vital berfungsi sebagai faktor pengali dan pengoreksi dari hasil estimasi sebelumnya serta menentukan hasil estimasi yang akan datang (prediksi).

## 2.6 Sistem Terintegrasi

Pada sub-bab ini dijelaskan seperti apa perancangan sistem yang terintegrasi secara keseluruhan, proses pengambilan data, hasil dari pengujian simulasi, dan analisis dari data pengujian yang diperoleh. Perancangan sistem simulasi secara keseluruhan diintegrasikan meliputi rancangan simulasi yang telah dibuat pada tiap-tiap sub-bab sebelumnya yaitu rangkaian simulasi panel surya, rangkaian simulasi *buck-boost converter*, rangkaian simulasi *op-amp inverting*, desain simulasi kontrol PID, dan rancangan blok estimator Kalman. Gambar di bawah ini merupakan sistem terintegrasi secara keseluruhan:



**Gambar 2.5** Rancangan simulasi sistem terintegrasi

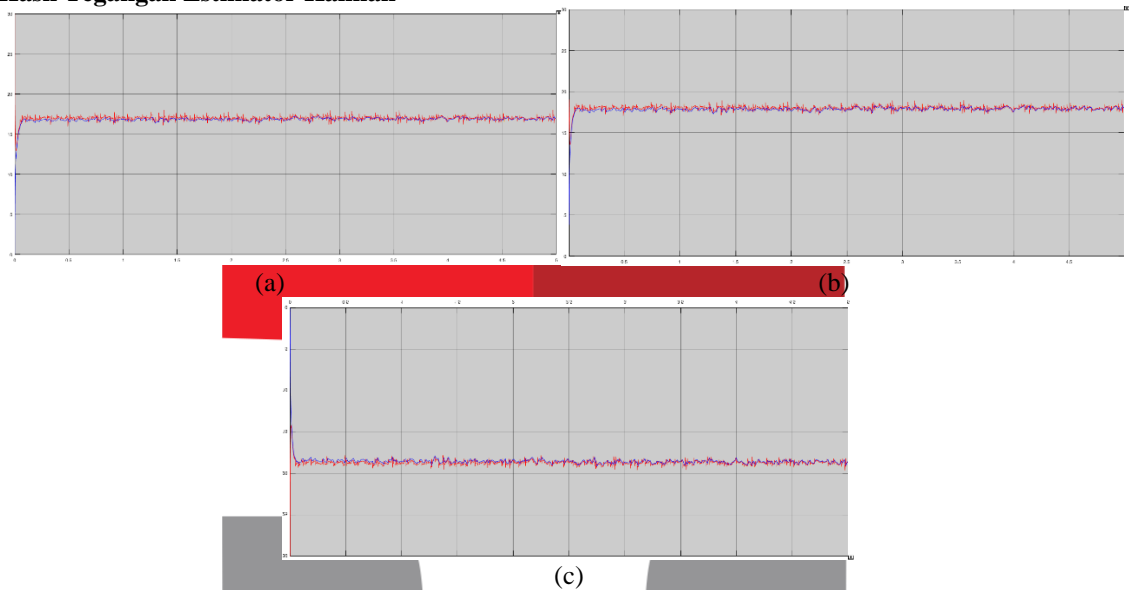
Pada gambar 2.5 terdapat beberapa blok inti yang masing-masing memiliki fungsi berbeda. Pertama yaitu blok *PV Module* yang berfungsi sebagai sumber daya masukan ke *buck-boost converter*. Kedua yaitu blok *Kalman Estimator* yang berfungsi untuk mengestimasi dan memperbaiki daya yang seharusnya dihasilkan oleh panel surya serta sebagai tegangan referensi pada MPPT menggunakan kontrol PID. Ketiga yaitu *buck-boost converter* yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai dengan nilai *duty cycle* yang diberikan pada mosfet. Keempat yaitu blok *PID Controller* yang berfungsi sebagai MPPT untuk menghasilkan tegangan maksimum. Dengan dihasilkannya tegangan maksimum dari panel surya maka akan berdampak pada daya yang akan dihasilkan

dan diharapkan agar daya yang dihasilkan mencapai nilai daya maksimum yang dapat dihasilkan. Kelima atau yang terakhir yaitu blok *Op-Amp Inverting* yang berfungsi untuk membalikkan fasa tegangan yang dihasilkan oleh *buck-boost converter*. Tegangan yang dihasilkan oleh *buck-boost converter* harus dirubah fasanya dikarenakan tegangan tersebut digunakan sebagai umpan balik pada blok kontrol PID agar mendapatkan nilai tegangan maksimum yang diinginkan dan diharapkan tercapai daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya.

### 3. Pembahasan

Pada bab ini dijelaskan hasil pengujian dan analisis setiap elemen yang saling berkaitan dari keseluruhan simulasi sistem. Sistem yang dirancang menjawab dari setiap tujuan penelitian.

#### 3.1 Hasil Tegangan Estimator Kalman



**Gambar 3.1** (a) Grafik hasil tegangan panel surya, estimator Kalman, dan kontrol PID saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ , (b) Grafik hasil tegangan panel surya, estimator Kalman, dan kontrol PID saat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , (c) Grafik hasil tegangan panel surya, estimator Kalman, dan kontrol PID saat iradiasi  $1100 \text{ W/m}^2$

Pada gambar 3.1 terlihat respon dari dapat dilihat garis yang berwarna merah merupakan tegangan estimator Kalman, pada grafik tersebut terdapat garis berwarna kuning yang berhimpitan dengan hasil tegangan estimator Kalman yang menunjukkan tegangan yang dihasilkan oleh panel surya, dan yang garis yang berwarna biru merupakan tegangan yang dihasilkan oleh kontrol PID. Berdasarkan grafik di atas diperoleh data sebagai berikut:

**Tabel 3.1** Data akurasi dan presisi antara tegangan panel surya dengan estimator Kalman saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ , dan  $1100 \text{ W/m}^2$ ,

Iradiasi ( $\text{W/m}^2$ )	Akurasi Tegangan Panel Surya (%)	Akurasi Tegangan Estimator Kalman (%)	Presisi Tegangan Panel Surya (%)	Presisi Tegangan Estimator Kalman (%)
900	77.44	78.71	77.48	78.56
1000	79.85	80.96	79.89	80.82
1100	81.39	82.37	81.43	82.23

Tingkat akurasi dan presisi terbaik ditunjukkan oleh tegangan yang dihasilkan oleh estimator Kalman dibandingkan dengan tegangan panel surya tanpa estimator Kalman secara berturut yaitu dengan nilai akurasi 78.71% dan presisi 78.56% saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ , akurasi 80.96% dan presisi 80.82% saat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , akurasi 82.37% dan presisi 82.23% saat iradiasi  $1100 \text{ W/m}^2$ .

**Tabel 3.2** Kolerasi *pearson* antara tegangan panel surya dengan tegangan estimator Kalman saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ , dan  $1100 \text{ W/m}^2$ ,

Iradiasi	Sig. (2-tailed)	Pearson Colleration
900	0.000	0.964
1000	0.000	0.959
1100	0.000	0.956

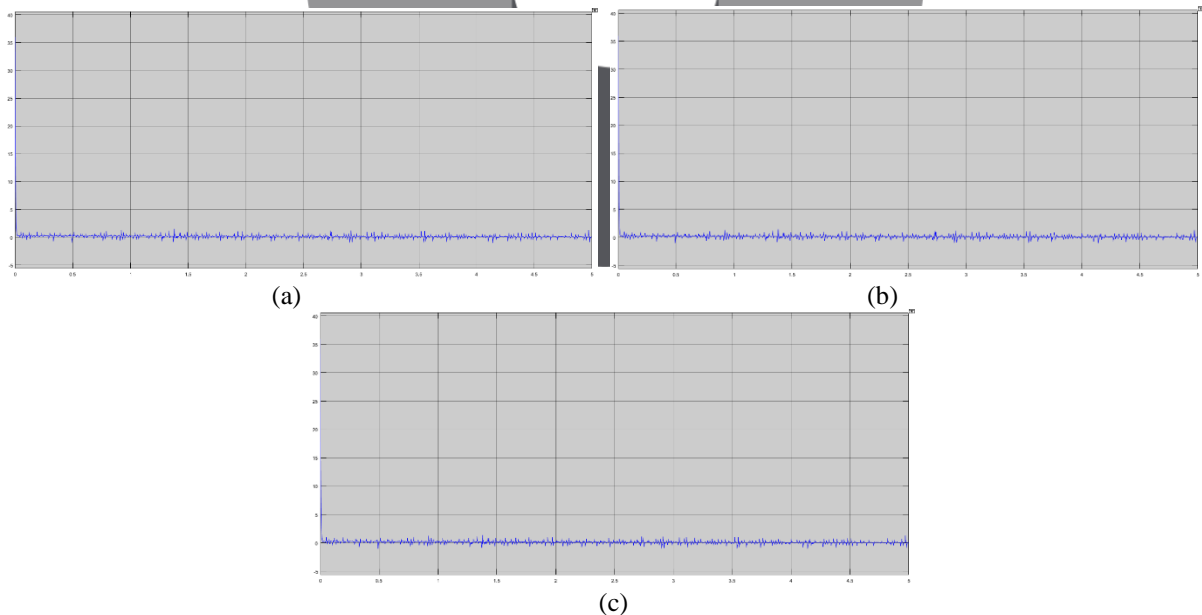
Dari tabel 3.2 dapat dilihat bahwa nilai signifikansi berada di nilai 0.000 yang berarti nilai sangat kecil mendekati nol dan nilai kolerasi *pearson* pada percobaan iradiasi bervariasi menunjukkan hasil berada di antara 0.95 sampai dengan 0.97. Berdasarkan panduan ilmu statistika, jika nilai signifikansi < 0.05 maka hubungan antara kumpulan data dari dua variabel berkolerasi. Kemudian untuk mengetahui tingkat kolerasi dilihat pda nilai kolerasi *pearson*. Apabila nilai kolerasi *pearson* berada di antara rentang nilai 0.81 sampai dengan 1.00, maka disebut tingkat kolerasi yaitu kolerasi sempurna.

**Tabel 3.3** Perbandingan efisiensi daya tanpa estimator Kalman dengan daya estimator Kalman

Iradiasi (W/m <sup>2</sup> )	Daya Tanpa Estimator Kalman (W)	Daya Dengan Estimator Kalman (W)	Error (%)
900	1.08	1.19	9.32
1000	1.26	1.44	12.49
1100	1.38	1.76	21.36

Berdasarkan tabel 3.3 terlihat daya dengan estimator Kalman menunjukkan respon yang lebih baik dibandingkan daya tanpa estimator Kalman. Penggunaan estimator Kalman pada simulasi prediksi daya yang dihasilkan panel surya dapat memperbaiki daya yang semestinya dihasilkan oleh panel surya pada saat iradiasi sebesar 900 W/m<sup>2</sup>, besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.08 watt menjadi 1.19 watt setelah menggunakan estimator Kalman, pada saat iradiasi sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>, besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.26 watt menjadi 1.44 watt setelah menggunakan estimator Kalman, dan pada saat iradiasi sebesar 1100 W/m<sup>2</sup>, besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.38 watt menjadi 1.76 watt setelah menggunakan estimator Kalman.

**3.2 Respon Kontrol PID MPPT**



**Gambar 3.2** (a) Grafik error kontrol PID saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ , (b) Grafik error kontrol PID saat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , (c) Grafik error kontrol PID saat iradiasi  $1100 \text{ W/m}^2$

Grafik di atas menunjukkan respon sinyal *error* yang dihasilkan oleh kontrol PID saat memproses fungsi MPPT. Dapat dilihat bahwa kontrol PID mengolah data *error* agar tetap bergerak menuju nol dikarenakan ketika *error* yang dihasilkan sama dengan nol maka tercapai nilai tegangan yang diinginkan yaitu sebesar  $18\text{V}$  sesuai dengan nilai  $V_{MPP}$  pada panel yang digunakan. Dari grafik di atas dapat dihitung seberapa besar *error* rata-rata yang dihasilkan oleh kontrol PID. Besar *error* rata-rata yang dihasilkan oleh kontrol PID dengan nilai iradiasi bervariasi yaitu sebesar:

$$\text{Error rata - rata} = \frac{\text{Jumlah error total}}{\text{Jumlah data error}}$$

$$\text{Error rata - rata} = 0.34$$

Dengan nilai *error* rata-rata kontrol PID sebesar 0.34 sudah dapat dikatakan baik dikarenakan mendekati nilai *error* yang seharusnya yaitu nol.

### 3.3 Efisiensi Daya MPPT

**Tabel 3.4** Perbandingan Efisiensi Daya Teoritis dengan Daya Simulasi MPPT

Daya Teoritis (W)	Daya Simulasi MPPT (W)	Error (%)	Efisiensi (%)
2.89	2.82	2.36	97.64
3.24	3.18	1.96	98.04
3.53	3.43	3.06	96.94

Pada tabel 3.4 dapat dilihat besar efisiensi daya yang dihasilkan oleh simulasi sistem MPPT menggunakan kontrol PID ditinjau dari daya yang seharusnya ditransmisikan jika dibandingkan antara perhitungan secara teoritis dengan hasil secara simulasi menunjukkan hasil yang sangat baik saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$  yaitu sebesar 97,64% dengan nilai *error* relatif sangat kecil sebesar 2.36%. saat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$  menghasilkan nilai efisiensi sebesar 98,04% dan *error* relatif sangat kecil yakni dengan nilai 1.96%. Pada saat iradiasi  $1100 \text{ W/m}^2$  efisiensi daya yang dihasilkan masih berada pada rentang nilai yang sama dengan nilai efisiensi daya saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$  dan  $1000 \text{ W/m}^2$  yakni sebesar 96.94% dengan nilai *error* terbilang sangat kecil yaitu sebesar 3.06%.

## 4. Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan menggunakan Simulink pada *software* Matlab, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tingkat akurasi dan presisi terbaik ditunjukkan oleh tegangan yang dihasilkan oleh estimator Kalman dibandingkan dengan tegangan panel surya tanpa estimator Kalman secara berturut yaitu dengan nilai akurasi 78.71% dan presisi 78.56% saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ , akurasi 80.96% dan presisi 80.82% saat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , akurasi 82.37% dan presisi 82.23% saat iradiasi  $1100 \text{ W/m}^2$ .
2. Pada setiap percobaan simulasi saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ , dan  $1100 \text{ W/m}^2$ , hubungan antara tegangan yang dihasilkan oleh panel surya dan tegangan estimator Kalman sebagai sumber tegangan masukan menunjukkan respon yang sangat baik yaitu dengan predikat signifikansi berkolerasi dengan tingkat kolerasi sempurna.
3. Respon kontrol PID dalam upaya menghasilkan efisiensi daya maksimum (MPPT) yang ditunjukkan dari setiap percobaan saat iradiasi  $900 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ , dan  $1100 \text{ W/m}^2$  menunjukkan hasil konvergensi *error* rata-rata yang dapat dikatakan baik dengan nilai mendekati nilai nol, yakni sebesar 0.34.
4. Penggunaan estimator Kalman pada simulasi prediksi daya yang dihasilkan panel surya dapat memperbaiki daya yang semestinya dihasilkan oleh panel surya pada saat iradiasi sebesar  $900 \text{ W/m}^2$ , besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.08 watt menjadi 1.19 watt setelah menggunakan estimator Kalman, pada saat iradiasi sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$ , besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.26 watt menjadi 1.44 watt setelah menggunakan estimator Kalman, dan pada

saat iradiasi sebesar  $1100 \text{ W/m}^2$ , besar daya yang dihasilkan tanpa estimator Kalman adalah 1.38 watt menjadi 1.76 watt setelah menggunakan estimator Kalman.

5. Efisiensi Daya maksimum (MPPT) terbaik yang dapat dihasilkan dengan menggunakan kontrol PID pada percobaan beban resistor  $100\Omega$  yaitu pada saat kondisi iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$ , yakni sebesar 98,04%.

Adapun beberapa saran untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Untuk mendapatkan hasil estimasi yang lebih baik sebaiknya melakukan perbandingan dari setiap kontrol estimasi yang telah ada dan dikembangkan sebelumnya.
2. Untuk mengetahui seperti apa kontrol MPPT yang lebih baik, sebaiknya melakukan perbandingan kontrol MPPT yang telah ada sebelumnya.
3. Sebaiknya simulasi dilakukan dengan beban efektif dan beban bervariasi agar dapat lebih terlihat dinamika dari hasil kontrol MPPT yang dirancang dan dapat memaksimalkan potensi dari *buck-boost converter* yang digunakan.
4. Sebaiknya dilakukan percobaan secara riil agar dapat mengetahui seperti apa perbandingan hasil dari simulasi dengan percobaan secara riil.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Hasnawiya, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Pulau Saugi", *JRTK*. Vol. 10. No. 2, Juli-Des. 2012.
- [2] M. Saiful, "Energi Matahari, Sumber Energi Alternatif yang Efisien, Handal, dan Ramah Lingkungan di Indonesia", *Universitas Diponegoro*, pp. 31-35.
- [3] P. S. Aini, S. A. Aulia, "Perancangan Sistem Prediktor Daya pada Panel Photovoltaic di Buoy Weather Station", *Jurnal Teknik POMITS*. Vol. 2. No. 2, 2013.
- [4] J. Surya Kumari, Ch. Sai Babu, "Comparison of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic System", *IJAET*, Nov. 2011.
- [5] J. Surya Kumari, Ch. Sai Babu, A. Kamalakar Babu, "Design and Analysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System", *IJMER*. Vol. 2, pp. 2174-2180, July-Aug. 2012.
- [6] H. S. Alfonsus, R. Tri, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Menggunakan Metode Artificial Neural Network Untuk Panel Surya", *Jurnal Teknik Elektro*. Vol. 7. No. 2, pp. 85-92, 2018.
- [7] U. Sri, "Implementasi Algoritma Perturb and Observe Untuk Mengoptimasi Daya Keluaran Solar Cell Menggunakan MPPT", *Jurnal Infotel*. Vol. 9. No. 1, Feb. 2017.
- [8] D. Fachri, "Analisis Pengaruh Fuzzy Logic Controller pada Penelusuran Titik Daya Maksimum untuk Sistem Konversi Energi Berbasis Photovoltaic", *Universitas Telkom*, 2018.
- [9] W. Greg, B. Gary, "An Introduction to the Kalman Filter", *University of North Carolina*, pp. 1-16, July 2006.
- [10] Hamzah. Y, Setiadi. R. N, Umar. L, "Pengembangan Alat Uji Otomatis Karakteristik Dioda dan PTC Berbasis Mikrokontroler ATMega8A", *Fisika FMIPA Universitas Riau*, 2015.
- [11] S.B. Sevty, F.I. Reza, R.K. Muhammad, "Design and Simulation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) System on Solar Module System Using Constant Voltage (CV) Method", *AIP Conference Proceedings*, 2016.
- [12] Krismadinata, N. A. Rahim, H. W. Ping and J. Selvaraj, "Photovoltaic module modeling using simulink/matlab," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 17, pp. 537-546, 2013.
- [13] D. W. Hart, *Power Electronics*, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [14] S.P. Wahyu, S. Imam, "Perbaikan Respon Output Menggunakan Implementasi Kalman Filter pada Simulasi Pembacaan Sensor Beban Load Cell", *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III*, pp. 141-150, 2015.
- [15] Qomarudin. M. N, "Membuat Kalman Filter Diskrit dengan Simulink", *ResearchGate*, 2017.