

Performa Kontroler MPC Berbasis Fungsi Laguerre dan Kontroler PID Untuk Kendali Konverter *Buck-Boost*

Adelhard Beni Rehiara¹, Yanty Rumengan¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Papua

Korespondensi : a.rehiara@unipa.ac.id

ABSTRAK

Konverter buck-boost merupakan peralatan untuk mengubah besaran listrik DC. Alat ini bersifat sangat non linier sehingga diperlukan kontroler yang baik untuk meningkatkan performanya. Dalam penelitian ini telah dibuat sebuah kontroler MPC berbasis fungsi Laguerre untuk mengontrol konverter tersebut. Pengujian untuk mengetahui performa dari MPC tersebut pada konverter *buck-boost* dilakukan dengan membandingkan dengan kontroler PID yang sudah ada. *Setting* pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan input 55V pada beban 25W, 60W dan 100W dengan *setpoint* pada tegangan 100V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa MPC memiliki kecepatan respon yang tinggi dalam orde milidetik walaupun masih ada *overshoot* sebesar 12.4% jika dibandingkan dengan kontroler PID yang tidak memiliki *overshoot* namun memiliki respon yang lebih lambat dan sedikit kesalahan keadaan tunak serta beberapa kejutan sepanjang simulasi.

Kata kunci: Konverter *buck-boost*, PID, MPC, fungsi Laguerre.

ABSTRACT

The buck-boost converter is a device to change the amount of DC electricity. This device is very non-linear, so a better controller is needed to improve its performance. In this research, a Laguerre function based MPC has been made to control the converter. A simulation to determine the performance of the MPC on the buck-boost converter is done by comparing it with the existing PID controller. The simulation setting is done by providing an input voltage of 55V with loads of 25W, 60W and 100W within a setpoint of 100V. The simulation results show that the MPC has a high response speed in the order of milliseconds even though there is still an overshoot of 12.4% when compared to the PID controller which does not have overshoot but has a slower response with a little steady state errors and some spikes along the simulation.

Keywords: Buck-boost converter, PID, MPC, Laguerre function.

1. PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan DC tidak populer dalam perkembangan kelistrikan di dunia. Hal ini disebabkan karena sifatnya yang sulit untuk digunakan menyalurkan daya yang besar dan sulit dalam pengubahan besarnya. Seiring dengan bertambahnya integrasi pembangkit listrik dari energi terbarukan, sistem kelistrikan DC mulai diteliti dan dikembangkan. Dalam hal perubahan besaran listrik DC, diperlukan peralatan konverter DC-DC. Peralatan ini biasanya digunakan dalam pengisian baterai, pengendalian putaran motor DC, transmisi DC, dan sebagainya.

Konverter *buck-boost converter* merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang digunakan untuk mengubah besaran listrik DC. Kelebihan konverter jenis ini yaitu tegangan keluaran yang bervariasi baik sebagai penaik maupun sebagai penurun tegangan yang dapat dilakukan sesuai dengan kemampuan peralatan yang digunakan. Di lain pihak, konverter jenis ini cukup sulit dikendalikan karena sangat tidak linear dan juga efisiensinya yang rendah. Sistem kendali pada sebuah konverter *buck-boost* telah banyak diteliti para peneliti sebelumnya dengan menggunakan pengendali PI [1], [2], PID[3], [4], Fuzzy [5] dan MPC [6].

Model Predictive Control (MPC) merupakan salah satu tipe kontroler yang mampu memprediksikan keluaran dari controller dengan menggunakan masukan sistem pada masa lampau. Pada setiap interval kontrol, algoritma MPC akan mengoptimalkan respon sistem di masa mendatang pada setiap langkah waktu dengan menghitung urutan penyesuaian variabel yang dimanipulasi [7]. MPC dengan fungsi Laguerre merupakan salah satu jenis MPC yang memiliki keunggulan dalam optimalisasi pengendali jika dibandingkan dengan MPC klasik [8]. Dalam tulisan ini sebuah MPC berbasis fungsi Laguerre telah di buat untuk mengontrol konverter *buck-boost* dan sebuah kontroler PID menjadi pembanding untuk menguji performa MPC yang tersebut.

2. METODE PENELITIAN

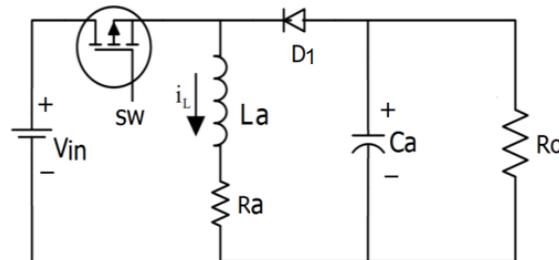
2.1. Konverter Buck-boost

Konverter *buck boost* terdiri dari dua bagian pengubah yaitu a) konverter *buck* yang berfungsi untuk mengubah tegangan keluaran lebih rendah dari tegangan masukan dan b) konverter *boost* yang berfungsi untuk mengubah tegangan keluaran menjadi lebih tinggi dari tegangan masukan. Proses perubahan pada konverter *buck-boost* ini dilakukan dengan mengatur *duty cycle* δ dalam menghidupkan dan mematikan saklar SW. Besaran keluaran tegangan pada konverter *buck* dan *boost* ditentukan menurut persamaan (1) dan (2) berikut ini [9]:

$$V_o = \delta V_{in} \quad (1)$$

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-\delta} \quad (2)$$

Konfigurasi sebuah konverter *buck-boost* ditunjukkan pada Gambar 1 dengan V_{in} , V_o , L_a , R_a , D_1 , C_a , dan R_o merupakan tegangan input, tegangan output, induktor, hambatan induktor, dioda, kapasitor, dan hambatan keluaran.

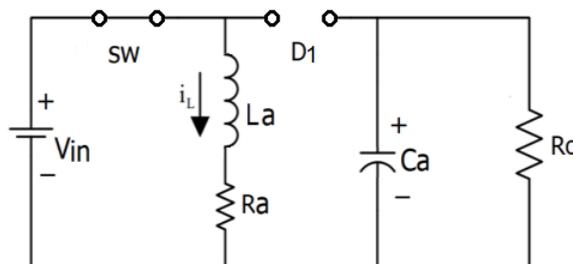


Gambar 1. Konfigurasi konverter buck-boost

Jika pada waktu $0 < t < \delta T$ saklar SW diasumsikan dalam keadaan ON, konfigurasi konverter ini dapat diperlihatkan pada Gambar 2. Pada mode switch ON ini, dioda mengalami *reverse bias* sehingga arus tidak mengalir pada dioda, sehingga induktor L_a menjadi rangkaian tertutup dengan sumber tegangan V_{in} dan arus mengalir melalui induktor. Dalam kondisi ini kapasitor C_a mengalami *discharge* dan mengalirkan muatannya ke beban R_o . Berdasarkan hukum Khirchoff arus (KCL) dan tegangan (KVL), persamaan untuk *mode switch* ON dapat dituliskan sebagai berikut [10], [11]:

$$\dot{i}_L = -\frac{R_a}{L_a} i_L + \frac{1}{L_a} V_{in} \quad (3)$$

$$\dot{v}_o = -\frac{1}{C_a R_o} v_o \quad (4)$$

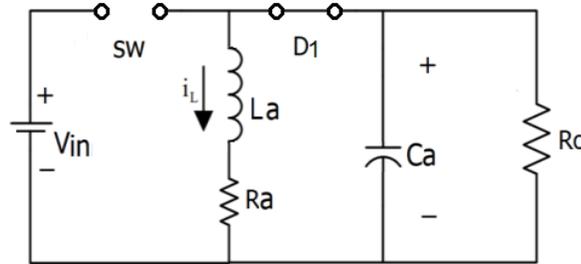


Gambar 2. Mode switch ON

Untuk kondisi waktu lainnya pada $\delta T < t < T$, saklar SW berada pada kondisi OFF yang mana dalam kondisi ini konverter berada pada *mode switch* OFF. Konfigurasi konverter pada ada kondisi *switch* OFF ditunjukkan Gambar 3. Pada kondisi ini tegangan masukan terputus, dan dioda mengalami *forward bias* sebagai akibat dari mengalirnya dari induktor L_a menuju kapasitor C_a dan beban R_o . Kapasitor akan segera mengisi muatannya kembali dan arus dari induktor L_a akan segera berkurang sampai mode ON diaktifkan kembali. Persamaan arus dan tegangan dengan KCL dan KVL untuk mode switch OFF dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{i}_L = -\frac{R_a}{L_a}i_L + \frac{1}{L_a}V_o \quad (5)$$

$$\dot{v}_o = -\frac{1}{C_a}i_L - \frac{1}{C_a R_o}v_o \quad (6)$$



Gambar 3. Mode switch OFF

Duty cycle pada satu periode *switching* menjadi pertimbangan dalam pemodelan konverter ini, yang diasumsikan sebagai rata-rata dari mode switch ON dan OFF.

$$\begin{aligned} A_{Kon} &= \delta A_{ON} + (1-\delta)A_{OFF} \\ B_{Kon} &= \delta B_{ON} + (1-\delta)B_{OFF} \end{aligned} \quad (7)$$

Model *state space* untuk konverter ini dapat ditulis sebagai berikut [10], [11]:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{\delta-1}{L_a} \\ \frac{\delta-1}{C_a} & \frac{1}{R_o C_a} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x + [0]u \quad (9)$$

Dimana state vector $x = [i_L, v_o]$, y adalah keluaran sistem dan masukan $u = \delta$ [12].

2.2. MPC dengan Fungsi Laguerre

Fungsi Laguerre adalah sekumpulan fungsi *orthonormal* yang digunakan untuk memperkirakan respons impuls waktu-diskrit $H(k)$ dari sistem dinamis. Dengan sejumlah suku N tertentu, tanggapannya dapat ditulis sebagai berikut [6]:

$$H(k) = c_1 l_1(k) + c_2 l_2(k) + \dots + c_N l_N(k) \quad (10)$$

Dengan $L(k) = [l_1(k) \ l_2(k) \ \dots \ l_N(k)]^T$ adalah fungsi Laguerre diskrit dan merupakan koefisien Laguerre yang akan ditentukan dari data sistem. Variabel k adalah sampling sesaat dari fungsi Laguerre diskrit yang dapat diturunkan dari persamaan diferensial sebagaimana dituliskan sebagai berikut:

$$L(k+1) = A_l L(k) \quad (11)$$

Dimana A_l matriks toeplitz dari faktor skala a dengan $\beta = 1 - a^2$, seperti diformulasikan pada persamaan 12. Persamaan 13 menunjukkan kondisi awal dari fungsi Laguerre pada waktu $k=0$.

$$A_l = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \beta & a & 0 & 0 & \vdots \\ -a\beta & \beta & a & 0 & \vdots \\ a^2\beta & -a\beta & \beta & a & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & a \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 \ -a \ a^2 \ -a^3 \ \dots \ (-a)^{N-1}] \quad (13)$$

Bentuk *state space* matriks dari sistem pada waktu diskrit sebagaimana dikonversikan dari sistem waktu kontinyu diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= C_d x(k) \end{aligned} \quad (14)$$

Jika A_d , B_d , C_d merupakan matriks sistem diskrit, model sistem diskrit tersebut dapat ditransformasikan menjadi model augmentasi dari sistem dengan bentuk sebagai berikut.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \tilde{A}x(k) + \tilde{B}\Delta u(k) \\ y(k) &= \tilde{C}x(k) \end{aligned} \quad (15)$$

Dimana $x(k)=[x(k) \ y(k)]^T$, $u(k)=u(k)-u(k-1)$.

Menggunakan fungsi Laguerre, trajektori pengendali pada waktu sesaat $k+p$ dapat diberikan sebagai berikut:

$$\Delta u(k+p) = \sum_{j=1}^N c_j(k) l_j(p) = L(p)^T \eta \quad (16)$$

Masalah optimalisasi dapat diformulasikan dengan variable state dari saat terkini k sebagai berikut:

$$J = \sum_{p=1}^{N_p} x(k+p|k)^T Q x(k+p|k) + \sum_{p=0}^{N_p} \Delta u(k+p)^T r(k) \Delta u(k+p) \quad (17)$$

Dimana $r(k)$ adalah penalti pada input dan $Q=C^T C$ merupakan matriks pembobot. Karena sifat ortonormal fungsi Laguerre, fungsi tujuan untuk MPC berbasis fungsi Laguerre dapat diberikan sebagai berikut dengan mengganti (16) ke (17).

$$J = \sum_{p=1}^{N_p} x(k+p|k)^T Q x(k+p|k) + \eta^T R_L \eta \quad (18)$$

Dimana R_L merupakan diagonal matriks dengan ukuran $M \times M$ dengan pinalti $r(k)$ pada diagonalnya.

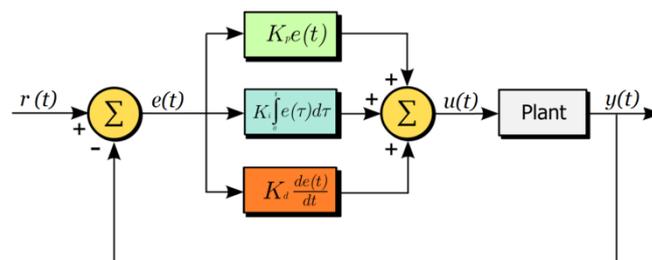
Receding horizon control dapat diterapkan untuk memperkuat ketahanan sistem dengan hanya menerapkan sampel pertama dari *control trajectory* sebagai input. *Receding horizon control* diperoleh dengan persamaan berikut.

$$\Delta u(k) = L(0)^T \eta \quad (19)$$

2.3. Kontroler PID

Pengendali PID (Proporsional Integral Derivative) merupakan salah satu pengendali yang sederhana dan banyak dipakai sebagai pengendali peralatan dalam dunia industri. Diagram blok pengendali ini dapat diberikan pada Gambar 4. Pengontrol PID akan memberikan aksi $u(t)$ kepada *plant* berdasarkan besar kesalahan $e(t)$ yang diperoleh antara setpoint $r(t)$ dengan keluaran $y(t)$. Berdasarkan namanya kontroler PID menggabungkan gain yang diperoleh proportional gain (K_p), integral gain (K_i) dan differential gain (K_d) untuk menghasilkan sinyal $u(t)$ menuju plant. Hasil penggabungan yang tepat akan menghasilkan reaksi sistem yang cepat, menghilangkan overshoot, dan kesalahan keadaan tunak yang mendekati nol.

Untuk menghasilkan penggabungan gain dari ketiga jenis kontroler tersebut, dapat dilakukan dengan melakukan tuning yang tepat. Tuning pada kontroler PID dilakukan pada saat sistem berada pada kondisi keadaan tunak, sehingga perilaku kontroler sudah stabil pada saat dilakukan tuning. Salah satu metode penalaan yang banyak dipakai adalah Ziegler and Nichols.



Gambar 4. Diagram pengendali PID

Jika $e(t)$ sebagai input ke alat kontrol PID sebagai akibat adanya selisih antara keluaran sistem dengan *setpoint* $r(t)$, maka output $u(t)$ dari alat kontrol ini diberikan oleh persamaan berikut [4]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Konverter Buck-Boost

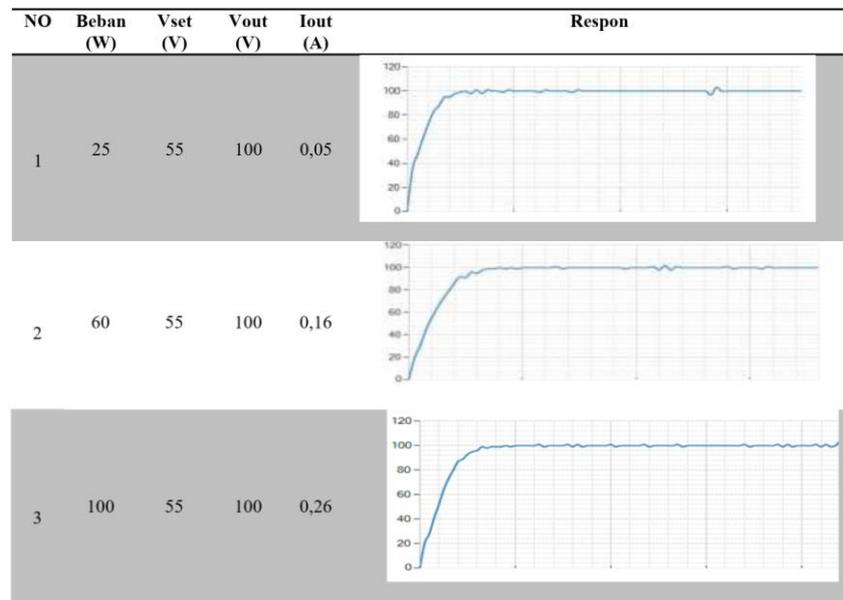
Konverter *buck-boost* yang digunakan dalam tulisan ini menggunakan struktur yang sama dengan seperti digambarkan pada Gambar 1. Konfigurasi konverter yang digunakan diberikan pada Table 1 yang mana konfigurasinya sesuai dengan yang ada pada penelitian sebelumnya [4]. Tegangan keluaran V_o merupakan *setpoint* yang menjadi acuan MPC dengan nilai bervariasi konstan pada tegangan 100V lebih tinggi dari tegangan sumber sebesar 55V.

Tabel 1. Parameter Konverter

Parameter	Nilai dan Satuan
V_{in}	55 V
V_o	100 V
R_a	2.22 mH
C_a	100 μ F
R_o	2000, 625, 400 Ω
P_o	25, 60, 100 W
F_s	10 kHz

3.2. Pengujian Kontroler PID

Untuk pengujian kontroler PID, hasil pengujian dari Sheren dan Aswardi [4] akan digunakan. Dalam penelitian tersebut terlihat adanya kesulitan untuk mendapatkan nilai terbaik dari konfigurasi PID dengan penalaan berdasarkan metode Ziegler and Nichols (ZN2). Sehingga dengan metode *trial and error*, didapatkan konfigurasi dengan respon terbaik pada nilai $K_p = 0.34$, $K_i = 0.355$ dan $K_d = 0.0195$. *Time delay*, *rise time*, dan *settling time* dari pengujian ini terturut-turut 0.37s, 1.851s, dan 1.851s. Hasil pengujian ditulis ulang sebagaimana tampak pada Gambar 5.



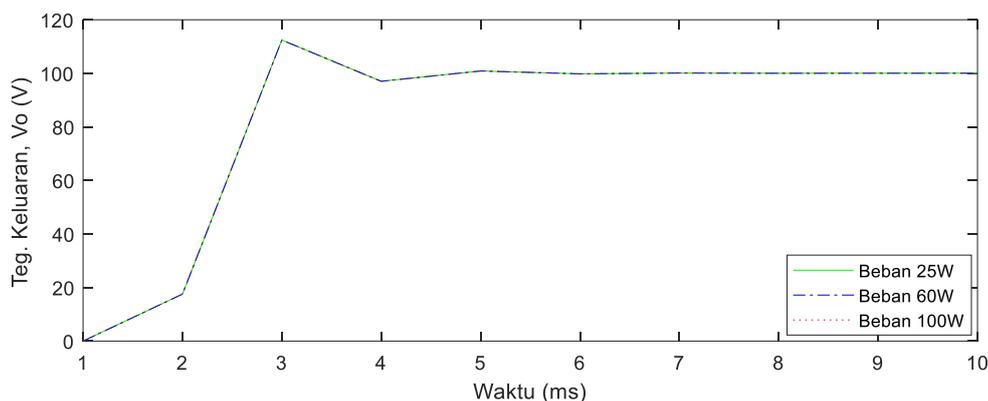
Gambar 5. Respon pengendali PID

Hasil pengujian menggunakan lampu pijar 25, 60 dan 100 watt seperti tampak pada Gambar 5, terlihat bahwa ada sedikit kesalahan keadaan tunak dimana respon sistem berada sedikit dibawah garis *setpoint* 100V. Dalam pengujian ini juga hanya di uji konverter *boost* untuk menaikkan tegangan menjadi 100V pada tegangan input 55V dan tidak di uji performa konverter *buck* untuk menurunkan tegangan.

3.3. Pengujian MPC

MPC berbasis fungsi Laguerre yang digunakan dalam tulisan ini merupakan MPC diskrit. Beberapa parameter yang digunakan untuk penalaan MPC antara lain: panjang network $N=4$, faktor skala $a=0.5$, horison prediksi $N_p=20$, horison kontrol $N_c=4$, dan waktu sampling $T_p=0.001$ s.

Pengujian dilakukan dengan mengeset tegangan masukan V_o sebesar 100V. Perubahan beban ditandai dengan perubahan hambatan beban R_o sebesar 2000, 625 dan 400 ohm. Hasil pengujian MPC ditampilkan pada Gambar 6, dengan nilai tegangan dan arus keluaran disajikan pada Tabel 2.



Gambar 6. Respon pengendali MPC

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa beban yang di pasang walaupun besarnya di rubah tegangan keluaran tetap sama, ini terlihat pada grafik tegangan keluaran yang saling tumpang tindih. Pengukuran *time delay*, *rise time*, *peak time* dan *setling time* adalah berturut-turut 0ms, 2.6ms, 3ms dan 4.2ms. Terlihat juga bahwa ada *overshoot* 12.4% sehingga *settling time* (2%) baru tercapai pada 4.2ms.

3.4. Analisa Performa

Berdasarkan pengujian kedua kontroler, dapat disimpulkan bahwa kedua kontroler dapat bekerja dengan baik untuk mengendalikan konverter *buck-boost*. MPC tidak memiliki *time delay*, disamping itu *rise time*, *peak time* dan *settling time* adalah jauh lebih cepat dibandingkan PID. Pada keadaan tunak, MPC tidak memiliki *error*, sedangkan PID memiliki sedikit *error* dan beberapa kejutan sepanjang simulasi.

Walaupun MPC memiliki keunggulan dalam hal tanpa *delay*, kesalahan keadaan tunak tidak ada, respon waktu yang cepat dan juga stabil sepanjang proses, tetapi MPC memiliki *overshoot* sekitar 12.4%. Jika dibandingkan dengan MPC, Kontroler PID memiliki respon yang lebih lama dan terdapat *overshoot* yang timbul.

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dikembangkan sebuah pengendali MPC berbasis fungsi Laguerre untuk mengontrol konverter *buck-boost*. Pengaturan pada parameter MPC untuk pengujian antara lain panjang network $N=4$, faktor skala $a=0.7$, horison prediksi $N_p=20$ dan horison kontrol $N_c=2$, sedangkan parameter pada kontroler PID antara lain *proporsional gain* $K_p=0.34$, *integral gain* $K_i=0.335$ dan *differential gain* $K_d=0.0195$. Simulasi dilakukan dengan variasi beban sebesar 25W, 60W dan 100W pada tegangan input 55V dan *setpoint* 100V. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MPC tidak memiliki *time delay* dan respon waktu yang sangat cepat yang ditunjukkan dengan *rise time* dan *settling time* yang cepat namun sebagai akibatnya terjadi *overshoot* sebesar 12.4% pada responnya. Di lain pihak, kontroler PID memiliki respon waktu yang lebih lama namun tidak terjadi *overshoot* dan terdapat kesalahan keadaan tunak pada tanggapan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. I. Safii, A. N. P. F, M. C. Pujiyanto, B. Y. Dewantara, and D. P. K. Iradiratu, "Analisa Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Buck Boost Konverter," in *Seminar Nasional Kelautan XIV*, 2019, pp. 29–35.
- [2] A. Dogra and K. Pal, "Design of Buck-Boost Converter for Constant Voltage Applications and Its Transient Response Due To Parametric Variation of PI Controller," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 13579–13588, 2014.

- [3] F. S. Dinniyah, W. Wahab, and M. Alif, "Simulation of Buck-Boost Converter for Solar Panels using PID Controller," *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 102–113, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.011.
- [4] S. D. D. Putri and Aswardi, "Rancang Bangun Buck-Boost Converter menggunakan Kendali," *J. Tek. Elektro dan Vokasional*, vol. 06, no. 02, pp. 258–272, 2020.
- [5] Imam Setyawan & Bambang Suprianto, "Rancang Bangun Prototype Solar Cell Buck Boost Converter Menggunakan Kontrol Fuzzy Di Implementasikan Pada Aerator Tambak Udang," *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 627–635, 2019.
- [6] S. Bououden, S. F. O. Hazil, and M. Chadli, "Modelling and model predictive control of a DC-DC Boost converter," in *15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2014, pp. 643–648.
- [7] A. B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino, and Y. Zoka, "An Adaptive Internal Model for Load Frequency Control Using Extreme Learning Machine," *Telkonnika*, vol. 16, no. 6, pp. 1–6, 2018.
- [8] A. B. Rehiara, H. Chongkai, Y. Sasaki, N. Yorino, and Y. Zoka, "An adaptive IMC-MPC controller for improving LFC performance," in *2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378403.
- [9] Sutedjo, Z. Efendi, and D. M. Mursyida, "Rancang Bangun Modul DC – DC Converter Dengan Pengendali PI," *Politek. Elektron. Negeri Surabaya - ITS*, pp. 1–5, 2016.
- [10] L. Wang, S. Chai, D. Yoo, L. Gan, and K. Ng, *PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Converters Using MATLAB/Simulink*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore pte. Ltd, 2015.
- [11] R. H. G. Tan and L. Y. H. Hoo, "DC-DC converter modeling and simulation using state space approach," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2015, pp. 42–47.
- [12] P. Singh and S. Purwar, "Sliding mode controller for PWM based Buck-boost DC/DC converter as state space averaging method in continuous conduction mode," in *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, 2015, pp. 1–5.