

Pemodelan *Fuzzy Logic Control* untuk Pengendali PWM pada *Buck Converter*

Helmy Mukti Himawan¹, Onny Setyawati², Hadi Suyono³

Abstract— Recently the switching mode used in a buck converter is controlled by pulse width modulation (PWM) which has relatively higher efficiency compared to a linear power supply system. In general, there are two problems that often occur in the buck converter, First, the difficulties in controlling inductor current which has considerably large ripple, and second, a transient output voltage that appears at the start-up. By using fuzzy logic control in PWM switching mode, the inductor current and output voltage of the buck converter can be controlled. Using Mamdani method fuzzy logic with 2 inputs, i.e. Error and Change of Error, the system produces 1 output, which is duty ratio. The results showed that the fuzzy logic control decreased the error of the output voltage of buck converter by 3%, and decreased the ripple in the inductor current by 1.5% up to 3%.

Intisari— Pada masa sekarang ini *buck converter* banyak yang menggunakan mode *switching* dengan pengaturan menggunakan *pulse width modulation* (PWM) yang memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibanding sistem catu daya linier. Secara umum ada dua permasalahan yang sering terjadi pada *buck converter*. Pertama, sulitnya pengendalian arus pada induktor yang memiliki *ripple* yang cukup besar. Kedua adalah *transient* tegangan keluaran yang muncul pada saat *start up*. Dengan menggunakan *fuzzy logic control* sebagai pengendali PWM, maka pengaturan arus pada induktor dan tegangan keluaran *buck converter* dapat dibuat sesuai dengan keinginan. *Fuzzy logic* menggunakan metode mamdani dengan 2 input yaitu *Error*, Perubahan *Error*, dan 1 output berupa *duty ratio*. Dari uji coba yang telah dilakukan, didapatkan hasil *output* tegangan memiliki error yang berkurang pada kurang lebih 3% jika ditambahkan dengan pengendalian *fuzzy logic*, dan pengaturan arus pada induktor lebih baik yaitu berkurangnya *ripple* sebesar 1,5% sampai 3%.

Kata kunci— *Buck Converter*, *Fuzzy Logic Control*, *PWM*, *Arus*, *tegangan*.

I. PENDAHULUAN

Dalam istilah kelistrikan dikenal adanya *converter*, *rectifier*, dan *inverter*. *Converter* merupakan alat pengubah tegangan listrik, baik dari tegangan *direct current* (DC) ke *alternating current* (AC) yang dikenal dengan DC-AC *converter* maupun dari tegangan AC ke DC yang dikenal dengan AC-DC *converter*. Sedangkan *rectifier* berarti penyearah, berfungsi untuk menyearahkan tegangan AC

menjadi tegangan DC. *Inverter* secara istilah adalah kebalikan dari *rectifier*, kerjanya adalah membalikkan dari tegangan DC ke tegangan AC dan sebaliknya. Berbagai macam jenis *converter* telah banyak dimanfaatkan untuk industri, komersial, hingga untuk keperluan sehari-hari, terutama untuk jenis AC-DC *converter*. Secara umum AC-DC *converter* memiliki cara kerja berturut-turut *rectifying*, *filtering*, dan *regulating*. Tahap pertama adalah *rectifying* yang berfungsi sebagai penyearahan tegangan AC menjadi DC. Tahap kedua, *filtering*, memiliki fungsi menghaluskan tegangan DC. Tahap ketiga adalah *regulating* yang memiliki fungsi mengatur tegangan keluaran, dinaikkan atau diturunkan nilai tegangannya. Ada beberapa teknik *regulating* yang dipakai, antara lain dengan DC-DC *converter*, untuk menaikkan tegangan *boost converter* dan untuk menurunkan tegangan *buck converter*.

Keluaran tegangan *output* pada tahap pertama proses AC-DC *converter* masih dalam bentuk tegangan DC yang belum sempurna, yaitu adanya *ripple* pada *output* tegangan DC. Untuk memperbaiki *ripple* yang terjadi dibutuhkan proses *filtering* dengan menambahkan *discharging capacitor* yang cukup besar, tetapi penambahan *discharging capacitor* cukup baik untuk mengatasi masalah tersebut. Maka pada tahap *regulating* diperlukan perbaikan dengan *power factor correction* (PFC). Terdapat dua skema PFC yaitu teknik PFC pasif dan aktif. Penggunaan teknik PFC aktif sebagai teknik AC-DC *converter* dapat diklasifikasikan menjadi tiga metode yaitu *pulse width modulation* (PWM), *resonant*, dan *soft-switching* [1].

Pada paper ini jenis *rectifying* yang dipakai adalah *full wave rectifier*, dan *regulating* yang digunakan adalah DC-DC *converter* untuk menurunkan tegangan, maka dipilihlah *buck converter* sebagai DC-DC *converter*. Pengaturan *buck converter* menggunakan metode PWM sebagai *switching control*. Rangkaian *buck converter* secara sederhana terdiri atas satu saklar aktif (MOSFET), satu saklar pasif (diode), serta kapasitor dan induktor sebagai tapis keluarannya.

Secara umum ada dua permasalahan yang terjadi pada *buck converter*. Pertama, sulitnya pengendalian arus pada induktor yang memiliki *ripple* yang cukup besar. Kedua adalah *transient* tegangan keluaran yang muncul pada saat *start up*, yaitu timbulnya *overshoot* dan *settling time* yang lama [2]. Gejala *transient* ini tidak dapat dihilangkan, tetapi dapat diperkecil dampaknya dengan melakukan pengontrolan PWM pada *buck converter*. Pengontrolan tersebut dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik pengontrolan seperti *proportional integral derivative* (PID) *controller*, *linear quadratic regulator* (LQR) *controller*, *model reference adaptive control*, *fuzzy logic control*, dan masih banyak lagi teknik pengontrolan yang dapat dipakai [3]. Pengendalian

¹ Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Jl. Mayjend. Haryono No. 167 Malang, Indonesia (Telp:+62-341-587710; Fax: +62-341-551430; email: helmymukti@gmail.com)

^{2,3} Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Jl. Mayjend. Haryono No. 167 Malang, Indonesia (Telp:+62-341-587710; Fax: +62-341-551430; email: osetyawati@ub.ac.id; hadis@ub.ac.id)

dengan PWM diberikan dalam bentuk gelombang pulsa kotak dengan frekuensi yang tetap dengan lebar pulsa kotak atau *duty cycle* yang bervariasi. *Duty cycle* mengacu pada persentase saat pulsa pada kondisi *high*.

Pada penelitian yang telah dilakukan L. Guo, pengendalian PWM pada *buck converter* menggunakan PID mendapatkan hasil yaitu pada saat melakukan *startup*, arus pada induktor mengalami *overshoot* yang cukup tinggi sampai 130% dan memiliki *setling time* yaitu 2 ms. Pengendalian menggunakan *fuzzy logic control* dengan model Takagi Sugeno mendapatkan hasil yang lebih baik, yaitu arus pada induktor tidak mengalami *overshoot* dan memiliki *settling time* yang lebih baik yaitu 0.32 ms [4]. Pemakaian *fuzzy logic* menggunakan metode Takagi-Sugeno pada pengontrolan tegangan dan arus pada *DC-DC boost converter* menunjukkan hasil yang lebih baik daripada menggunakan metode pengontrolan PID kontrol. Hasil tersebut meliputi *settling time*, *overshoot* arus saat *startup*, dan dengan melakukan perubahan beban yang didapatkan oleh *boost converter* menghasilkan *steady state error* yang lebih baik daripada menggunakan pengontrolan menggunakan PID [5].

Oleh karena itu pada paper ini dipilih metode pengontrolan dengan menggunakan *fuzzy logic control* dengan metode Mamdani sebagai kontrol cerdas pengendali PWM pada *buck converter*. Alasan dipilihnya metode Mamdani daripada metode *fuzzy logic* yang lain seperti Takagi Sugeno adalah lebih mudahnya menentukan *membership function*, baik pada bagian *input* maupun *output*. Selain itu, *output* dalam metode Mamdani berbentuk langsung himpunan *fuzzy*, bukan dalam persamaan linier. Dalam hal ini *fuzzy logic* bekerja secara adaptif sehingga dapat menyesuaikan dengan keadaan *input* yang selalu mengalami perubahan.

II. FUZZY LOGIC CONTROL

Logika *fuzzy* adalah cara mekanisme pengolahan atau manajemen ketidakpastian yang kemudian dikenal dengan logika *fuzzy*. Dalam penyajiannya, variabel-variabel yang akan digunakan harus cukup menggambarkan ke-*fuzzy*-an, tetapi di lain pihak persamaan-persamaan yang dihasilkan dari variabel-variabel itu haruslah cukup sederhana sehingga komputasinya menjadi cukup mudah, kemudian menyajikannya dengan menentukan “derajat keanggotaan” (*membership function*) dari masing-masing variabelnya. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik *input* data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1 [6].

Terdapat dua definisi fungsi keanggotaan untuk himpunan *fuzzy* yaitu numerikal dan fungsional. Numerikal adalah pernyataan tingkat dari fungsi keanggotaan dari himpunan *fuzzy* yang dinyatakan dengan vektor bilangan. Fungsional didefinisikan dengan menentukan fungsi keanggotaan dari himpunan *fuzzy* dalam pernyataan analitik yang menyatakan tingkat keanggotaan untuk setiap elemen yang ditentukan pada himpunan universal. Standar fungsi keanggotaan adalah kesepakatan yang digunakan untuk dasar himpunan *fuzzy* pada

universal U dari bilangan riil. Fungsi keanggotaan yang sering digunakan adalah [7]:

- S Fungsi

$$S(u; a; b; c) = \begin{cases} 0 & \text{for } u < a \\ 2[(u-a)/(c-a)]^2 & \text{for } a \leq u \leq b \\ 1 - 2[(u-a)/(c-a)]^2 & \text{for } b \leq u \leq c \\ 0 & \text{for } u > c \end{cases} \quad (1)$$

- π -Fungsi

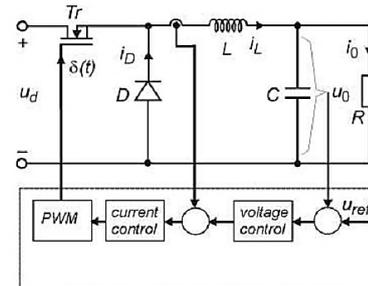
$$\pi(u; b; c) = \begin{cases} S(u, c - b, c - \frac{b}{2}, c) & \text{for } u \leq c \\ 1 - S(u, c, c + \frac{b}{2}, c + b) & \text{for } u \leq c \end{cases} \quad (2)$$

- Triangular dan Trapezoid

$$T(u; a; b; c) = \begin{cases} 0 & \text{for } u < a \\ (u-a)/(b-a) & \text{for } a \leq u \leq b \\ (c-a)/(c-b) & \text{for } b \leq u \leq c \\ 0 & \text{for } u > c \end{cases} \quad (3)$$

III. PERANCANGAN MODEL BUCK CONVERTER

Untuk mendapatkan data pertama dilakukan simulasi model dari *buck converter*. Model tersebut akan digunakan sebagai referensi atau acuan kondisi *buck converter* yang ideal. Maka penelitian ini dapat dikembangkan untuk pembuatan sebuah prototipe. Pada tahap ini ditentukan beberapa parameter yang dimodelkan dengan *software*, antara lain menentukan cara penempatan pengendalian seperti yang terlihat pada desain rangkaian skema di Gbr 1.



Gbr. 1 Skema kontrol *buck converter* [8].

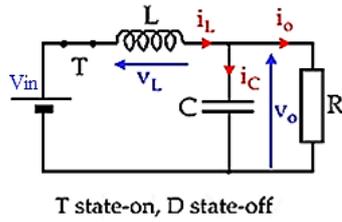
Pada desain ini diperoleh data dari tegangan *output* dari *buck converter* dan data nilai arus yang mengalir pada induktor. Setelah itu akan dilakukan pengendalian tegangan dan arus pada masing-masing bagian. *Output* dari kedua sensor arus dan tegangan tersebut akan diumpan-balikkan ke sistem sehingga akan tercipta kendali yang diinginkan.

A. Pemodelan Buck Converter

Converter jenis *buck* merupakan *converter* penurun tegangan yang mengkonversikan tegangan masukan DC menjadi tegangan DC lainnya yang lebih rendah. Seperti terlihat pada Gbr. 4, rangkaian ini terdiri atas satu saklar aktif (MOSFET), satu saklar pasif (dioda), kapasitor, dan induktor sebagai tapis keluarannya.

Buck converter terdiri atas dua kondisi yaitu saat *duty cycle on* (D_{on}) dan *duty cycle off* (D_{off}), yang pada dasarnya memiliki persamaan diferensial yang berfungsi untuk menetapkan arus pada induktor dan tegangan keluaran.

Rangkaian *buck converter* memiliki dua mode operasi. Kondisi pertama adalah ketika saklar *chopper* dalam keadaan tertutup (T *state-on* dan D *state-off*) dan tegangan *input* V_{in} melewati beban yang terlihat pada Gbr. 2.



Gbr. 2 *Buck converter* saklar *chopper* dalam keadaan tertutup [2].

Kondisi ketika saklar terhubung memiliki fungsi untuk menghitung arus induktor dengan memecahkan persamaan diferensial yang diperoleh dari menerapkan *Kirchhoff Voltage Law* (KVL), sehingga didapatkan

$$V_{in} \cdot D = L \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R_L + V_0 \tag{4}$$

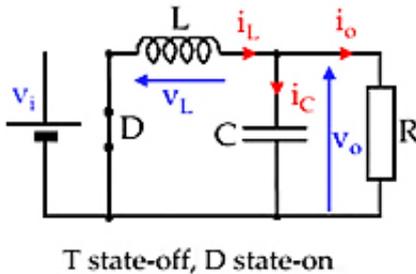
$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \cdot D - i_L \cdot R_L - V_0 \tag{5}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int (V_{in} \cdot D - i_L \cdot R_L - V_0) dt \tag{6}$$

dengan:

- V_{in} = Input tegangan (V)
- D = 1 ketika *duty cycle* ON
- D = 0 ketika *duty cycle* OFF
- i_L = Arus pada Induktor (A)
- R_L = ESR (*Effetive Series Resistance*) pada induktor
- V_0 = keluaran tegangan (V)
- L = Induktor (H)

Kondisi kedua adalah ketika saklar *chopper* dalam keadaan terbuka (T *state-off* dan D *state-on*) dan tegangan *input* V_{in} tidak melewati beban, seperti terlihat pada Gbr. 3.



Gbr. 3 *Buck converter* saklar *chopper* dalam keadaan terbuka [2]

Kondisi ketika saklar terputus memiliki fungsi untuk menghitung jumlah tegangan pada kapasitor dan tegangan drop pada kapasitor *series resistance* (R_c) dengan mengaplikasikan *Kirchhoff Current Law* (KCL) dengan *node* di kapasitor, didapatkan:

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_L - i_0 \tag{7}$$

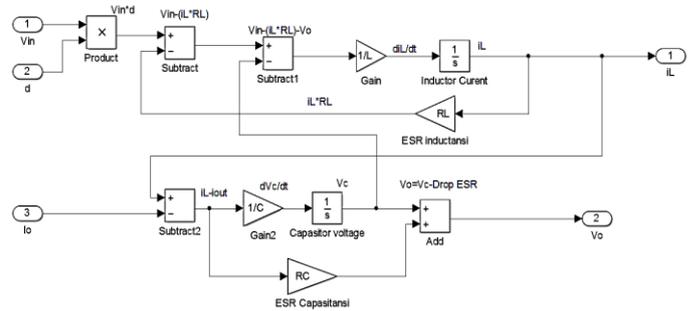
$$V_c = \frac{1}{c} \int (i_L - i_0) dt \tag{8}$$

$$V_o = V_c + R_c (i_L - i_0) \tag{9}$$

dengan:

- i_0 = Arus Beban (A)
- R_c = ESR (*Effetive Series Resistance*) pada kapasitor (Ω)
- V_c = Tegangan yang melewati kapasitor (V)
- C = kapasitansi (F)

Setelah menemukan model dari *buck converter*, maka dapat dibuat model simulasi seperti yang terlihat pada Gbr. 4.



Gbr. 4 *Buck converter* saklar *chopper* dalam keadaan terbuka.

Langkah berikutnya adalah melakukan *modeling buck converter* di atas sehingga didapatkan pemodelan dalam bentuk transformasi Laplace dalam (4), maka didapatkan:

$$V_{in} \cdot D = Li_L S + i_L \cdot R_L + V_0 \tag{10}$$

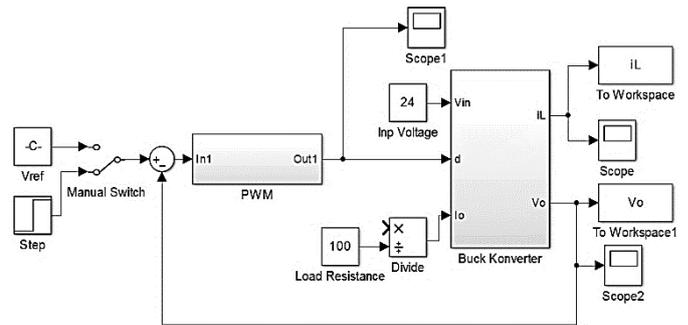
Dengan mengasumsikan $V_c = V_0$ dan mengabaikan tegangan drop pada R_c dengan mengatur ulang (6), maka didapatkan

$$i_L = \frac{V_o}{R} + C \cdot V_o S \tag{11}$$

Dengan melakukan substitusi (10) dan (11) maka akan didapatkan *open loop* transfer fungsi dari *buck converter* seperti dibawah ini:

$$\frac{V_o}{D} = \frac{V_{in}/LC}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_o C} + \frac{R_L}{L} \right) + \left(\frac{1}{LC} + \frac{R_L}{R_o LC} \right)} \tag{12}$$

Maka secara keseluruhan model dari *buck converter* dapat digambarkan seperti pada Gbr. 5.



Gbr. 5 *Modelling Buck converter* secara keseluruhan.

B. Spesifikasi *Buck converter*

Buck converter yang digunakan sebagai regulator ke beban terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu MOSFET sebagai *switch*, induktor, kapasitor, diode, dan beban, seperti yang terlihat pada Gbr 1. Untuk mendesain *buck converter* perlu ditetapkan beberapa variabel sebagai berikut.

- Tegangan *input* dari *rectifier* (V_{in}) : 21,619 V
- Tegangan *output* (V_o) : 3 V
- Arus *output* (I_{out}) : 3 A
- Frekuensi *switching* (f) : 10 kHz

Dari data yang ditetapkan di atas, dapat dihitung nilai-nilai komponen yang digunakan, yaitu [8]:

- *Duty cycle*

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{13}$$

dengan

- D : *duty cycle*
- V_o : tegangan *output* (V)
- V_{in} : tegangan *input* (V)

Perhitungan:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{3}{21,619} = 0,1387$$

- Nilai Induktor

$$\Delta I_L = \left(\frac{I}{V}\right) \cdot (V_{in} - V_o) \cdot t_l \tag{14}$$

dengan:

- L : induktansi induktor (H)
- V_{in} : tegangan *input* (V)
- V_o : tegangan *output* (V)
- ΔI_L : *ripple* arus (A)

Perhitungan:

$$\text{Nilai } t_l: t_l = \frac{1}{f} \cdot \left(\frac{V_o + V_f}{V_{in} + V_f}\right) \tag{15}$$

$$\frac{1}{10k} \cdot \left(\frac{3 + 0,7}{21,619 + 0,7}\right) = 1,6804 \cdot 10^{-5} S = 16,804 \mu S$$

$$\text{Nilai } L: \Delta I_L = \left(\frac{I}{V}\right) \cdot (V_{in} - V_o) \cdot t_l \tag{16}$$

$$0,2 \times 2,5 = \left(\frac{I}{V}\right) \times (21,619 - 3) \times 16,804 \mu S$$

$$0,5 = \left(\frac{I}{V}\right) \times (18,619) \times (16,804 \cdot 10^{-6}) S$$

$$L = 62,57 \text{ mH}$$

Maka didapatkan Nilai I_{max}

$$I_{max} = I_o + \left(\frac{1}{2} \cdot \Delta I_L\right) \tag{17}$$

$$I_{max} = 3 + \left(\frac{1}{2} \cdot 0,2 \times 3\right) = 3,3 \text{ A}$$

- Nilai Kapasitor

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_o} \tag{18}$$

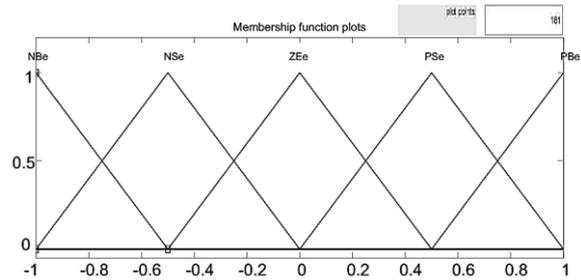
dengan:

- C : kapasitansi kapasitor (f)
- ΔI_L : *ripple* arus (A)
- ΔV_o : *ripple* tegangan (V)
- f : frekuensi *switching* (Hz)

$$C = \frac{0,2 \times 3}{8 \times 10000 \times 0,01 \times 21,619} = 34,691 \text{ mF}$$

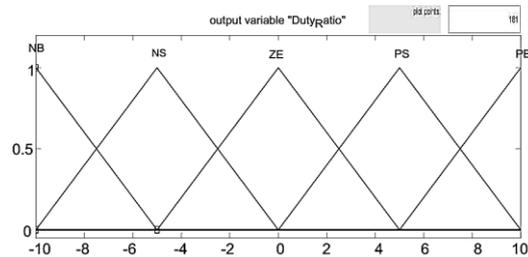
C. Penentuan Mamdani Fuzzy Logic

Pada bagian ini dibahas tentang sistem *fuzzy logic* yang akan digunakan. Pada sistem ini akan diterapkan sistem *Multiple-Input-Single-Output* (MISO) dengan variabel *input* adalah *error* (e) dan perubahan *error* (pe) yang diambil nilainya dari tegangan *output* yang dihasilkan oleh *buck converter*, sedangkan untuk variabel keluaran adalah *duty ratio* (u) yang merupakan *input* sebagai pengendali PWM yang masuk pada MOSFET. Fungsi keanggotaan untuk *input error* (e) dan perubahan *error* (pe), seperti dapat dilihat pada Gbr. 6, memiliki lima ketentuan *fuzzy subsets* yaitu PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*), ZE (*Zero*), NSe (*Negative Small*), dan NB (*Negative Big*).



Gbr. 6 Fungsi keanggotaan *input error* dan perubahan *error*.

Fungsi keanggotaan untuk *output duty ratio* (u), dapat dilihat pada Gbr. 7, juga memiliki lima ketentuan *fuzzy subsets* yaitu PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*), ZE (*Zero*), NS (*Negative Small*), dan NB (*Negative Big*).



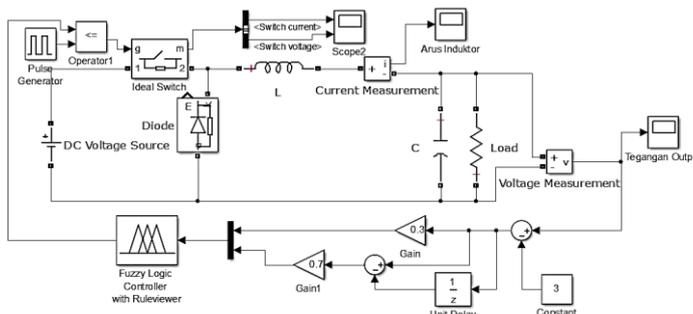
Gbr. 7 Fungsi keanggotaan *output duty ratio* (u).

Dari fungsi keanggotaan yang telah dibuat, dapat dibentuk *rule fuzzy logic* yang akan dapat ditentukan seperti yang terlihat pada Tabel I.

TABEL I
FUZZY LOGIC RULES

Tipe	NBe	NSe	ZEe	PSe	PBe
NBp	NB	NB	NB	NS	ZE
NSp	NB	NB	NS	ZE	PS
ZEp	NB	NS	ZE	PS	PB
PSp	NS	ZE	PS	PB	PB
PBp	ZE	PS	PB	PB	PB

Jika *fuzzy logic* diterapkan pada *buck converter*, maka secara skematik dapat dilihat pada Gbr. 8.



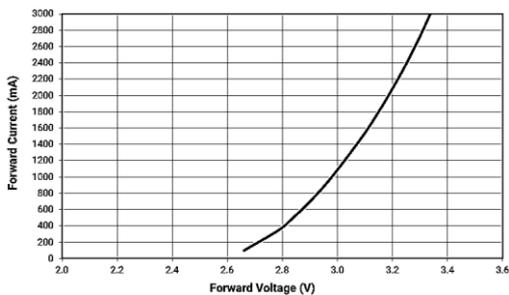
Gbr. 8 Skema penerapan fuzzy logic pada buck converter.

D. Output LED

Pada paper ini akan dimodelkan Power LED type Cree® XLamp® XM-L LEDs yang nantinya akan disusun secara paralel. Pemilihan penyusunan secara serial sesuai dengan KVL agar nilai tegangan pada tiap-tiap LED sama. Spesifikasi LED yang dipakai adalah sebagai berikut.

- Maximum arus LED : 3100 mA
- Low thermal resistance : 2.5 °C/W
- Maximum temperature yang dapat ditahan : 150 °C
- Sudut Pancaran Cahaya : 125°
- Tegangan Kerja LED : 2,8 Volt sampai 3,3 Volt

LED tersebut memiliki karakteristik elektrik seperti yang terlihat pada Gbr. 9.



Gbr. 9 Karakteristik elektrik LED pada suhu kerja 25 °C [10].

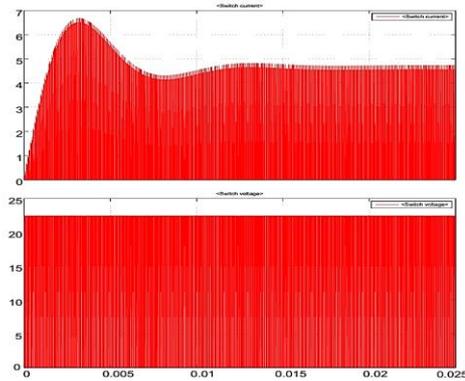
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemodelan Buck Converter

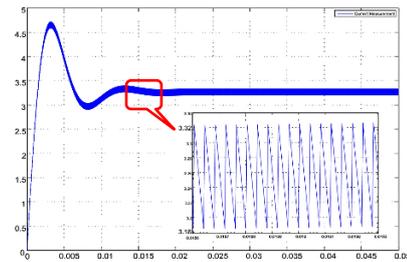
Pada pemodelan Buck tahap pertama ini digunakan pengaturan PWM sesuai dengan data yang telah dihitung pada Bagian III-B, nilai PWM sebesar 13,87%, nilai L= 62,57 mH, dan nilai C = 34,691 mF. Untuk besarnya nilai arus dan tegangan pada MOSFET dapat dilihat pada Gbr. 10.

Gbr. 11 menunjukkan bahwa ketika kondisi on maka nilai arus dan tegangan di MOSFET menunjukkan nilai steady state pada 4,9 A dan 22,4 V. Sedangkan pada kondisi off maka nilai arus dan tegangan di MOSFET menunjukkan nilai pada 0 A dan 0 V. Simulasi untuk pengambilan data berikutnya adalah melihat nilai arus pada induktor seperti tampak pada Gbr. 11.

Dengan memperbesar bagian yang sudah mengalami kondisi steady state pada nilai sekitar 3,3 A, grafik nilai arus pada induktor dapat dilihat seperti pada insert Gbr. 11. Pada saat kondisi steady state, gelombang akan mengalami osilasi antara nilai 3,18 A sampai 3,32 A.



Gbr. 10 Nilai arus dan tegangan di MOSFET (gambar bagian atas adalah nilai arus dan bawah nilai tegangan).

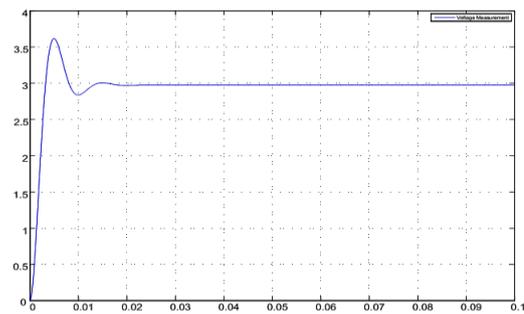


Gbr. 11 Grafik nilai arus induktor (insert perbesaran gelombang arus).

Nilai arus pada induktor mengalami osilasi dikarenakan adanya signal on-off dari duty cycle sebesar 10 kHz yang mengontrol saklar aktif MOSFET. Dari grafik di atas, dapat diambil sebuah data dari arus induktor sebagai berikut.

- Rise time : 2 ms
- Peak time : 3 ms
- Settling time : 22 ms
- Max overshoot : 4,61 A
- Min overshoot : 2,95 A

Sedangkan nilai tegangan output ditunjukkan pada Gbr. 12, tampak nilai output sebesar 2,92 V ketika PWM sesuai parameter yang telah ditetapkan.



Gbr. 12 Grafik nilai tegangan output (sumbu x: waktu (s), sumbu y: nilai tegangan(V))

Dari kedua grafik di atas, dapat diambil sebuah data dari nilai tegangan output sebagai berikut.

- Rise time : 3 ms
- Peak time : 5 ms
- Settling time : 25 ms
- Max overshoot : 3,53 V
- Min overshoot : 2,82 V

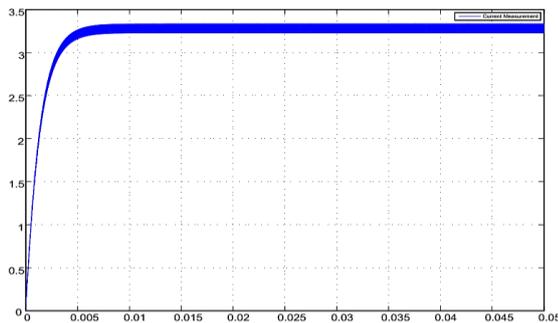
Dari data uji coba yang telah dilakukan maka dapat dilihat perbandingan nilai data yang dihitung secara manual dengan data yang diambil melalui simulasi, seperti tampak pada Tabel II.

TABEL II
PERBANDINGAN NILAI PERHITUNGAN DAN SIMULASI *BUCK CONVERTER*

Parameter	Perhitungan	Simulasi	Selisih
Nilai arus pada induktor	3,3 A	3,18 A - 3,32A	± 0,1
Nilai tegangan output	3 V	2,92 V	0,08

B. Hasil Pemodelan Buck Converter dengan Fuzzy Logic

Simulasi yang dilakukan untuk uji coba berikutnya adalah melihat nilai arus pada induktor yang telah melalui perbaikan dengan *fuzzy logic*, seperti tampak pada Gbr. 13.



Gbr 13 Grafik nilai arus pada induktor dengan perbaikan *fuzzy logic* (sumbu x: waktu (s), sumbu y: nilai arus(A)).

Tampak ada perubahan pada grafik yang diambil datanya setelah diatur dikontrol menggunakan *fuzzy logic*. Dengan memperbesar bagian yang sudah mengalami kondisi *steady state* pada nilai sekitar 3,3 A, grafik nilai arus pada induktor dapat dilihat, seperti pada Gbr 13, pada saat kondisi *steady state* gelombang akan mengalami osilasi antara nilai 3,25 A sampai 3,32 A. Dari kedua grafik tersebut dapat diambil sebuah data dari arus induktor sebagai berikut.

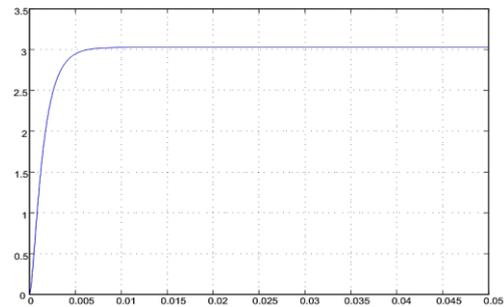
- Rise time : 3 ms
- Peak time : -
- Settling time : 9,1 ms
- Max overshoot : -
- Min overshoot : -

Pada Gbr. 14 tampak hilangnya nilai *overshoot* pada arus yang mengalir pada induktor dan mengecilnya nilai *settling time* yang dibutuhkan untuk menuju keadaan *steady state*. Tabel III menunjukkan perbandingan nilai arus simulasi dengan dan tanpa *fuzzy logic*.

TABEL III
PERBANDINGAN NILAI ARUS SIMULASI *BUCK CONVERTER* DENGAN MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC* DAN TANPA *FUZZY LOGIC*

Parameter	Dengan <i>Fuzzy logic</i>	Tanpa <i>Fuzzy logic</i>
Nilai arus pada induktor	3,25 A - 3,32 A	3,18 A - 3,33 A
<i>Overshoot</i>	menghilang	15,7 A
<i>Settling time</i>	9,1 ms	25 ms
<i>Steady state error</i>	0,6% - 1,51%	1,51% - 3,3%

Nilai tegangan *output* akan tampak seperti pada Gbr. 14, yaitu memiliki nilai sebesar 3,008 V ketika PWM mengalami koreksi nilai dengan adanya *fuzzy logic*.



Gbr. 14 Grafik nilai tegangan *output* dengan perbaikan *fuzzy logic* (sumbu x: waktu, sumbu y: nilai tegangan).

Dari gambar grafik tersebut dapat diambil sebuah data dari nilai tegangan *output* sebagai berikut.

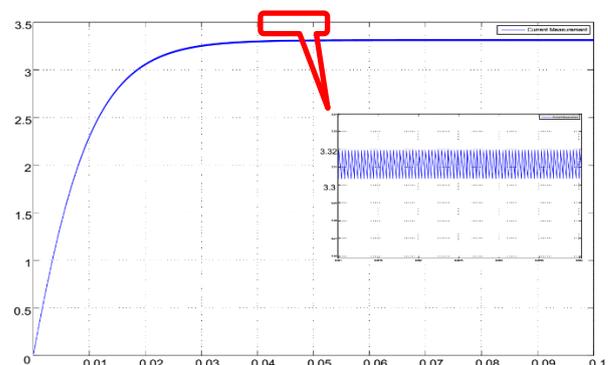
- Rise time : 3 ms
- Peak time : -
- Settling time : 5,5 ms
- Max overshoot : -
- Min overshoot : -

Dari data uji coba *output* tegangan yang telah dilakukan maka dapat dilihat perbandingan nilai data yang diambil tanpa menggunakan *fuzzy logic* dengan data yang diambil melalui perbaikan *fuzzy logic*, ditunjukkan pada Tabel IV.

TABEL IV
PERBANDINGAN NILAI TEGANGAN SIMULASI *BUCK CONVERTER* DENGAN MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC* DAN TANPA *FUZZY LOGIC*

Parameter	Dengan <i>Fuzzy logic</i>	Tanpa <i>Fuzzy logic</i>
Nilai <i>output</i> tegangan	3,008 V	2,9 V
<i>Overshoot</i>	-	3,53 V
<i>Settling time</i>	5,1 ms	25 ms
<i>Steady state error</i>	0,26 %	3,34 %

Dari uji coba di atas dapat disimpulkan bahwa pengaturan *Buck converter* menggunakan *fuzzy logic* mendapatkan hasil yang lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan kontrol apapun pada pengaturan PWM.



Gbr. 15 Nilai arus pada induktor dikontrol PID, insert perbesaran arus (sumbu x: waktu, sumbu y: nilai arus)

C. Perbandingan Hasil Simulasi Fuzzy Logic dan PID

Pada uji coba selanjutnya dilakukan simulasi pengendalian arus pada induktor dan *output* tegangan dengan menggunakan kontrol *Proportional Differential Derivative* (PID). Terlihat ada perubahan nilai pada grafik nilai arus yang mengalir pada induktor yang diambil datanya setelah dikontrol menggunakan PID, seperti terlihat pada Gbr. 15. Dengan memperbesar bagian yang sudah mengalami kondisi *steady state* pada nilai sekitar 3,3 A, maka grafik nilai arus pada induktor dapat dilihat seperti pada *insert* Gbr. 15. Pada saat kondisi *steady state*, gelombang akan mengalami osilasi antara nilai 3,3A sampai 3,32 A.

Dari kedua grafik tersebut dapat diambil sebuah data dari arus induktor sebagai berikut.

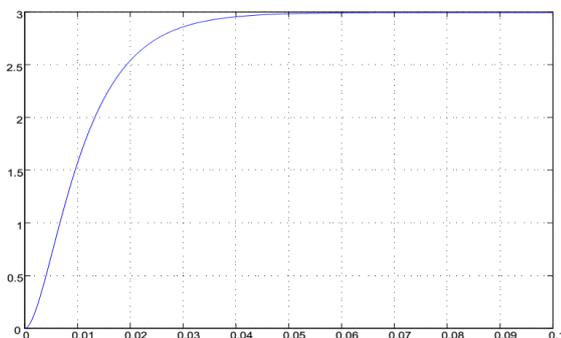
- *Rise time* : 32 ms
- *Peak time* : - s
- *Settling time* : 62 ms
- *Max overshoot* : - V
- *Min overshoot* : - V

Dari data uji coba yang telah dilakukan dapat dilihat perbandingan nilai data yang diambil tanpa menggunakan PID, *fuzzy logic*, dan tanpa pengendali seperti yang terlihat pada Tabel V.

TABEL V
PERBANDINGAN SIMULASI NILAI ARUS INDUKTOR PADA *BUCK CONVERTER*

Parameter	Tanpa pengendalian	Dengan Fuzzy logic	Dengan PID
nilai arus induktor	3,2 A - 3,36 A	3,18 A - 3,32 A	3,3 A - 3,32 A
<i>Overshoot</i>	15,7 A	menghilang	Menghilang
<i>Settling time</i>	25 ms	5,1 ms	62 ms
<i>Steady state error</i>	1,51% - 3,3%	0,6% - 1,51%	0% - 0,6%

Dari Tabel V tampak bahwa nilai arus yang paling baik adalah yang menggunakan kontrol *fuzzy logic*. Jika digunakan kontrol PID maka respons akan menjadi lebih lambat tetapi saat kondisi *steady state* diperoleh nilai yang *ripple* yang paling kecil. Sedangkan nilai tegangan *output*, seperti tampak pada Gbr. 16, memiliki nilai sebesar 2,99 V ketika PWM mengalami koreksi nilai dengan adanya PID.



Gbr. 16 Grafik nilai tegangan *output* dengan perbaikan kontrol PID (sumbu x: waktu, sumbu y: nilai tegangan).

Dari Gbr. 16 dapat diambil sebuah data dari nilai tegangan *output* sebagai berikut.

- *Rise time* : 0,03 s
- *Peak time* : - s
- *Settling time* : 60 ms
- *Max overshoot* : - V
- *Min overshoot* : - V

Dari data uji coba yang telah dilakukan dapat dilihat perbandingan nilai data yang diambil dengan menggunakan PID, *fuzzy logic* dan tanpa pengendali seperti ditunjukkan pada Tabel VI.

TABEL VI
PERBANDINGAN SIMULASI NILAI TEGANGAN *OUTPUT* PADA *BUCK CONVERTER*

Parameter	Tanpa Fuzzy logic	Dengan Fuzzy logic	Dengan PID
<i>Output</i> tegangan	2,9 V	3,008 V	2,99 V
<i>Overshoot</i>	3,53 V	-	-
<i>Settling time</i>	25 ms	5,5 ms	60 ms
<i>Steady state error</i>	3,34%	0,26%	0,33%

Dari tabel tampak bahwa nilai tegangan yang paling baik adalah yang menggunakan kontrol PID yaitu 2,99 V, sedangkan nilai untuk *settling time* dan *steady state error* yang paling baik adalah yang menggunakan kontrol *fuzzy logic*. Jika menggunakan kontrol PID maka respon akan menjadi lebih lambat tetapi nilai *output* tegangan memiliki nilai yang paling baik.

V. KESIMPULAN

Dari uji coba simulasi pada *buck converter* yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan. Pertama uji coba yang dilakukan dari hasil simulasi memperoleh hasil bahwa sistem dapat bekerja sebagai *LED driver*. Hal ini ditunjukkan dengan sistem bekerja pada tegangan *output* 3V dan nilai arus pada kisaran 3,3A.

Pada simulasi dengan pengendalian nilai arus pada induktor, hasil yang paling baik diperoleh dari sistem yang menggunakan pengendalian dengan *fuzzy logic* yaitu, memiliki *settling time* tercepat dengan waktu 5,1 ms dan nilai keluaran pada kisaran 3,18 A hingga 3,32 A, walaupun nilai *ripple* pada arus paling kecil ditunjukkan oleh pengendalian menggunakan PID dengan *error* 0,% - 0,6%.

Pada simulasi dengan pengendalian tegangan *output* pada *buck converter*, hasil yang paling baik juga dari penggunaan pengendalian *fuzzy logic*, yaitu memiliki *settling time* untuk mencapai keadaan *steady state* tercepat dengan waktu 5,5 ms dan nilai tegangan pada kisaran 3.008 V, dengan nilai *steady state error* hanya sebesar 0,26%.

REFERENSI

[1] Jha, A. K., Fernandes, B.G., Kishore, A., "A Single Phase Single Stage AC / DC Converter with High Input Power Factor and Tight Output Voltage Regulation," Progress in Electromagnetics Research Symposium Cambridge – USA, 2006.
 [2] Ejury, J., "Buck Converter Design", Infineon Technologies North America, 2013.

- [3] Marcelo, D. P. Nascimento, C. B. Angelo, M. T. Mauricio, S., "Performance comparison between nonlinear and linear controllers with weighted adaptive control applied to a Buck *converter* using poles placement design. *Industrial Electronics (ISIE)*," IEEE International Symposium. Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/ISIE, 2013.
- [4] Guo, L. Hung, J. Y. and Nelms, R. M., "Evaluation of DSP-based PID and Based fuzzy controllers for DC-DC *converters*," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 6, pp. 22370–2248, 2009.
- [5] El Beid, S. Doubabi, S., "DSP-Based Implementation Of Fuzzy Output Tracking Kontrol For A Boost *Converter*," IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 61, NO. 1, 2014.
- [6] Kusumadewi, S. Purnomo, H., "Aplikasi Logika Fuzzy untuk pendukung keputusan," Jakarta: Graha Ilmu, 2004.
- [7] Klir, G. J. dan Folger T. A., "Fuzzy Sets: Uncertainty and Information," Prentice Hall International Inc, 2000.
- [8] Rasyid, M., "*Power Electronic* 3rd edition," Oxford: Elsevier Inc, 2011.
- [9] Gowda, M., "Modelling of Buck DC-DC *Converter* Using Simulink," International Journal of Innovative Research in Science, Mandya, Karnataka, India, 2014.
- [10] Product family data sheet Cree® XLamp® XM-L LEDs, Cree. Inc, 2015.
- [11] Ding, B., Luo, X., Wei, S., "A survey on stability research of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy kontrol systems," 8th IEEE International Conference on Kontrol and Automation, 2010.
- [12] Gunterus, F., "Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Controller pada PID," Jakarta : PT. Elex Media Komputindo, 1994.
- [13] El Beid, S. Doubabi, S., "Self-scheduled fuzzy kontrol of PWM DC-DC *converters*," in Proc. IEEE 18th Mediterranean Conf Kontrol Autom, 2010.