

STUDI KOMPARASI FUNGSI KEANGGOTAAN FUZZY SEBAGAI KONTROLER BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER PADA SISTEM PENYIMPAN ENERGI

Eka Prasetyono¹, Wima Ashary², Anang Tjahjono³ dan Novie A Windarko⁴

Program Studi Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

e-mail: ¹eka@pens.ac.id, ²wima.ashary@gmail.com, ³anang.tj@pens.ac.id, ⁴ayub@pens.ac.id

Abstrak — *Bidirectional DC-DC converter* merupakan *converter* yang diperlukan dalam sistem penyimpanan energi. Topologi *converter* yang digunakan pada paper ini adalah *non-isolated bidirectional DC-DC converter* jenis *buck-boost converter*, *converter* ini dapat bekerja dua arah yaitu mode *charging* untuk menyimpan energi ke dalam baterai apabila arus beban kurang dari nilai nominal (set point) kemampuan *main DC bus* dan mode *discharging* untuk menyalurkan energi dari baterai ke beban bila arus beban melebihi nilai set point. Kedua mode tersebut bekerja secara otomatis sesuai dengan besarnya beban yang digunakan. Besarnya arus *charging* dan *discharging* dikontrol oleh kontrol logika fuzzy yang diimplementasikan pada mikrokontroler ARM Cortex-M4F STM32F407VG. Paper ini membandingkan dua jenis fungsi keanggotaan fuzzy (segitiga dan sigmoid) dalam mengontrol *bidirectional DC-DC converter*. Hasil yang diperoleh menunjukkan kontrol logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segi tiga dan sigmoid sebagai kontrol *bidirectional DC-DC converter* memiliki perbedaan respon yang tidak signifikan, keduanya memiliki rata-rata error untuk proses *charging* dan *discharging* dibawah 4% dengan ripple pada *main DC bus* 0.5%. Ditinjau dari waktu komputasi program, kontrol logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga 19.01% lebih cepat komputasinya dibanding dengan sigmoid dan waktu komputasi logika fuzzy pada mikrokontroler dengan *floating point hardware* 60% cepat dibanding dengan *floating point* secara *software*.

Kata Kunci : *Bidirectional DC-DC converter*, *Fuzzy logic controller* dan *Mikorkontroler*.

Abstract— *Bidirectional DC-DC converter* is needed in the energy storage system. The converter topology used in this paper was a *non-isolated bidirectional DC-DC buck-boost converter*. This converter worked in two ways, which the *charging mode* stored energy into battery when load current was less than nominal *main DC current* (set point) and *discharging mode* transferred energy from battery to the load when its current exceeded set point value. Both of these modes worked automatically according to the load current. The *charging* and *discharging* currents were controlled by fuzzy logic controller which was implemented on microcontroller ARM Cortex-M4F STM32F407VG. This paper compares two types of fuzzy membership function (triangular and sigmoid) in controlling *bidirectional DC-DC converter*. The results showed that fuzzy logic controller with triangle membership function and sigmoid as control *bidirectional DC-DC converter* had no significant different response, both had an average error for *charging* and *discharging* process under 4% with ripple current on the *main DC bus* around 0.5%. The computing time of program for fuzzy logic controller with triangular membership functions had 19.01% faster than sigmoid, and fuzzy logic computation time on a microcontroller with *hardware floating point* was 60% faster than *software floating point*.

Keywords : *Bidirectional DC-DC converter*, *Fuzzy logic controller* and *Mikorkontroler*

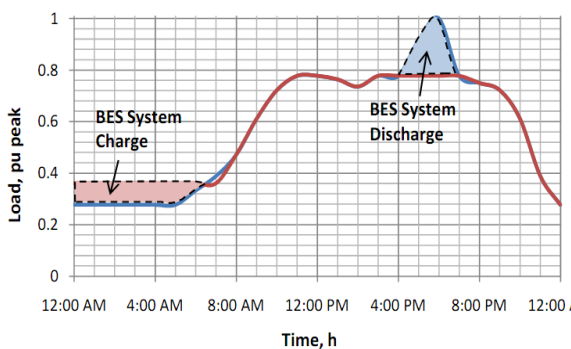
1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik terjadi seiring dengan meningkatnya populasi penduduk dan tuntutan untuk standar hidup yang lebih tinggi [1], dalam upaya mencukupi kebutuhan energi listrik tersebut beberapa negara telah menggunakan sumber energi listrik terbarukan termasuk diantaranya Indonesia [2,3].

Sumber energi listrik dari energi terbarukan masih memiliki beberapa kendala dalam implementasinya, diantaranya energi terbarukan tidak dapat ditemukan di semua tempat, hanya tempat-tempat tertentu saja yang memiliki sumber energi terbarukan yang potensial [1]. Contoh energi energi terbarukan yang tidak dapat ditemukan semua tempat adalah energi arus laut, angin dan panas bumi. Selain itu

kekurangan pada sumber energi terbarukan terletak pada kontinuitas energi yang dihasilkan [1]. *Solar cell* adalah sumber energi yang hanya bisa dimanfaatkan pada siang hari dan kincir angin hanya bisa menghasilkan energi ketika angin bertiup kencang. Salah satu upaya yang banyak dikembangkan oleh para peneliti energi terbarukan terlatak pada usaha menjaga kontinuitas dengan membuat sistem penyimpanan energi, dengan teknologi penyimpan energi ini energi listrik bisa disimpan dan digunakan secepat mungkin sesuai kebutuhan.

Teknologi penyimpan energi listrik bisa membantu meningkatkan kehandalan sistem tenaga listrik akibat permintaan akan energi listrik yang berubah-ubah sepanjang hari. Karena itulah digunakan teknologi penyimpan energi sebagai metode untuk menyimpan energi ketika permintaan energi rendah dan akan digunakan untuk membantu suplai energi ketika permintaan energi sedang tinggi. Salah satu media yang mudah digunakan untuk menyimpan energi listrik adalah baterai dan dilengkapi oleh *bidirectional DC-DC converter* [1,4-9].



Gambar 1. *Battery energy storage system* (BES) untuk membantu memenuhi kebutuhan energi sesaat [1].

Sistem penyimpan energi dan *bidirectional converter* ini telah banyak dikembangkan oleh berbagai peneliti baik untuk tegangan rendah maupun untuk tegangan tinggi [5-7]. Selain untuk menjaga kontinuitas energi, dengan *energy storage system* dan *bidirectional converter* dapat pula membantu mencukupi kebutuhan energi sesaat yang melebihi kapasitas pembangkit [1] seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 tersebut, sistem penyimpan energi akan bekerja menyimpan energi kedalam baterai ketika kebutuhan energi listrik

pada beban dalam kondisi rendah. Kemudian pada saat kebutuhan energi listrik pada beban sangat tinggi maka energi yang telah disimpan dalam baterai akan dikeluarkan untuk membantu memenuhi permintaan energi. *Bidirectional DC-DC converter* adalah *converter* daya yang dapat bekerja dua arah yaitu mode *charge* untuk menyimpan energi ke dalam baterai dan mode *discharge* untuk menyalurkan energi dari baterai ke beban [1,4-9]. Topologi *bidirectional DC-DC converter* paling sederhana dan banyak digunakan oleh peneliti adalah jenis *non-isolated DC-DC converter* [1,4,7 dan 9]. Sedangkan untuk kebutuhan keamanan dan tegangan tinggi dapat menggunakan topologi *bidirectional DC-DC* jenis *isolated* [5,8]. Masing-masing topologi *DC-DC converter* ini memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri-sendiri. Sedangkan pada paper ini yang akan dibahas adalah *non-isolated bidirectional DC-DC converter* menggunakan *bidirectional buck-boost DC-DC converter* karena sederhana dan mudah diimplementasikan secara hardware.

Dalam aplikasinya, *bidirectional buck-boost DC-DC converter* memerlukan kontrol agar diperoleh kesetabilan energi yang bagus diantaranya menggunakan *PI controller* dan *fuzzy logic controller* [10-13]. Pada paper ini lebih menekankan pada implementasi *fuzzy logic controller* yang ditanamkan pada Mikrokontroler ARM Cortex M4 32bit STM32F407. Paper ini juga membahas implementasi dua jenis fungsi keanggotaan fuzzy dalam aplikasi sebagai kontrol pada *bidirectional buck-boost DC-DC converter* pada sistem penyimpan energi.

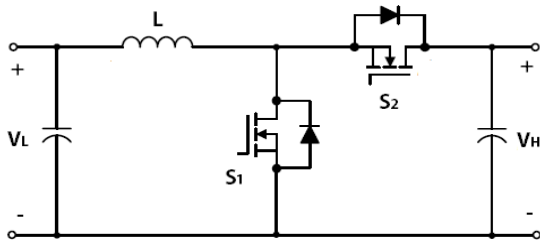
2. TINJAUAN PUSTAKA

DC-DC Converter adalah perlatan yang digunakan untuk mengkonversi sumber daya DC ke sumber daya DC dengan tegangan yang berbeda, baik sebagai penaik tegangan atau penurun tegangan, dengan variasi daya mulai dari daya kecil sampai daya besar. *Non isolated DC-DC converter* memerlukan komponen elektronik yang sangat sederhana, yaitu berupa MOSFET sebagai *switching* komponen, *fast recovery diode*, *inductor* dan *capacitor* [14]. Dari kategori aliran daya DC/DC converter dapat dibedakan menjadi dua tipe yaitu unidirectional dan bidirectional. Unidirectional berarti converter hanya bisa mengalirkan daya

pada satu arah saja. Sedangkan bidirectional dapat mengalirkan daya pada dua arah [14].

2.1 Bidirectional DC - DC Converter

Bidirectional DC-DC converter memiliki dua mode kerja, yaitu mode *buck (charging)* untuk proses menurunkan tegangan DC dan mode *boost (discharging)* untuk menaikkan tegangan DC. Karena *bidirectional buck-boost* ini sederhana dan mudah diimplementasikan secara hardware sehingga dipilih sebagai topologi hardware dalam paper ini. Bentuk rangkaian *bidirectional buck-boost* dapat dilihat konverter seperti pada Gambar 2. Konverter ini menggunakan satu buah induktor, dua buah MOSFET dan dua buah Kapasitor. Sedangkan untuk fast recovery diode memanfaatkan freewheel diode dari MOSFET [4,7,9].



Gambar 2. Buck & Boost Bidirectional DC-DC converter [7].

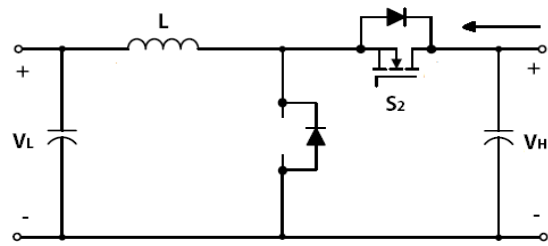
2.1.1 Mode Buck (charging)

Pada mode *buck bidirectional DC-DC converter* akan bekerja seperti *buck converter* biasa [1,5] dimana tegangan keluarannya akan lebih kecil dari tegangan masukan. Gambar rangkaian untuk mode *buck* seperti pada Gambar 3. Mode *buck* dalam paper ini difungsikan untuk proses *charging* baterai. Hubungan antara tegangan keluaran dengan tegangan masukan untuk mode *buck* dapat dirumuskan dalam persamaan 1 [14].

$$V_o = V_{in} \times D \tag{1}$$

Pada mode *buck* input yang digunakan yaitu berasal dari V_H . Dimana V_H (*High Voltage*) didapatkan dari sumber DC main bus kemudian tegangannya diturunkan untuk pengisian baterai pada sisi V_L (*Low Voltage*). *Switch* yang bekerja pada mode *buck* ini yaitu S_2 . Sedangkan S_1 dalam kondisi open dan yang bekerja yaitu

internal *diode fast recovery (free wheel diode)* yang terdapat pada S_1 .



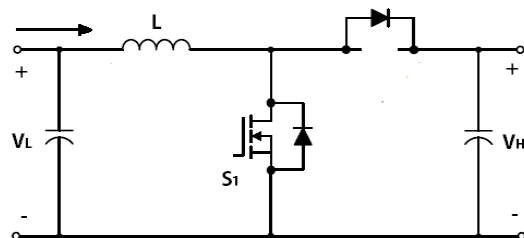
Gambar 3. Bidirectional DC-DC converter Mode buck.

2.1.2 Mode Boost (discharging)

Pada mode *boost* seperti ditunjukkan pada Gambar 4, *bidirectional DC-DC converter* akan bekerja seperti *boost converter* biasa [4,7] dimana tegangan keluarannya akan lebih besar dari tegangan masukan. Mode *boost* dalam makalah ini difungsikan untuk proses *discharging* baterai atau mengeluarkan energi yang tersimpan pada baterai untuk memenuhi kebutuhan beban. Hubungan antara tegangan keluaran dengan tegangan masukan dapat dihitung dengan persamaan 2 [14].

$$V_o = \frac{1}{1-D} \times V_{in} \tag{2}$$

Pada mode *boost*, input yang digunakan berasal dari V_L (*Low Voltage*) atau baterai. Tegangan baterai kemudian dinaikkan untuk membantu suplai beban pada sisi V_H (*High Voltage*). *Switch* yang bekerja pada mode *boost* ini yaitu S_1 . Sedangkan S_2 dalam kondisi *open* dan yang bekerja yaitu internal *diode fast recovery (free wheel diode)* yang terdapat pada S_2 .



Gambar 4. Bidirectional DC-DC converter mode boost.

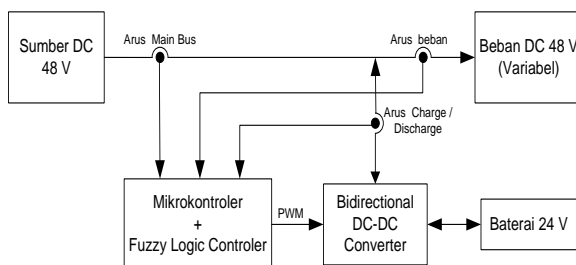
2.2 Fuzzy Logic Controller sebagai Controller pada Bidirectional DC-DC Converter

Teori himpunan fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Sejak itu, dikembangkanlah *fuzzy logic* untuk menggambarkan sifat fuzzy (kabur) dari kenyataan, yang sangat sulit dan kadang-kadang tidak mungkin untuk digambarkan menggunakan metode konvensional [12]. Seiring perkembangan teknologi saat ini teori himpunan fuzzy telah banyak digunakan untuk aplikasi kontrol DC-DC *converter* [10-13].

Fuzzy logic controller untuk aplikasi DC-DC *converter* dapat dilakukan melalui simulasi komputer [11-13] dan dapat juga ditanamkan pada mikrokontroler [10-15], karena *fuzzy logic controller* untuk aplikasi DC-DC *converter* tidak memerlukan proses komputasi yang terlalu berat. Pada paper ini *fuzzy logic controller* akan diimplementasikan pada mikrokontroler 32bit STM32F407 keluarga ARM Cortex M4F untuk melakukan kontrol secara otomatis dengan metode *current control* untuk proses *charging* dan *discharging* baterai sesuai dengan kebutuhan beban.

3. METODOLOGI

Blok diagram *bidirectional* DC-DC *converter* untuk sistem penyimpanan energi dengan kontrol logika fuzzy pada paper ini dapat dilihat seperti pada Gambar 5. Main DC bus diasumsikan berasal dari sumber energi terbarukan dengan tegangan yang konstan dan memiliki daya yang terbatas, yaitu 48 Volt dengan arus nominal 2A.



Gambar 5. Blok diagram sistem.

Bidirectional DC-DC *converter* ini akan bekerja dengan *current control* berdasarkan beban yang digunakan, apabila daya beban lebih besar dari daya nominal main DC bus, maka

converter akan bekerja untuk menambah kapasitas daya sesuai kebutuhan beban. Ketika daya beban berada dibawah daya nominal main DC bus, maka selisih daya nominal dengan daya beban akan digunakan untuk pengisian baterai.

Apabila daya beban melebihi daya nominal main bus maka kontrol akan bekerja agar arus pada main DC bus tetap terjaga 2A dan sisanya akan disumbang oleh baterai sesuai kebutuhan. Ketika daya beban dibawah daya nominal main DC bus, maka *converter* harus bekerja memaksimalkan pengisian baterai dengan cara membuat set point arus pengisian baterainya berdasarkan beban yang digunakan. Semakin kecil beban yang digunakan maka semakin besar arus yang digunakan untuk pengisian baterai. Besarnya arus *charging-discharging* dapat dirumuskan pada persamaan 4 berikut ini.

$$Set\ point\ charge_discharge = 2A - arus_beban \quad (4)$$

Jika besarnya arus set point *charging-discharging* dari persamaan 4 bernilai negatif artinya arus beban lebih besar dari arus nominal main DC bus sehingga nilai tersebut akan digunakan sebagai set point untuk *discharging* baterai, untuk *discharge* baterai nilai negatif hanya merupakan simbol arah arus dari baterai menuju main DC bus. Apabila besarnya arus set point *charging-discharging* dari persamaan 4 bernilai positif artinya arus beban lebih kecil dari arus nominal main DC bus sehingga nilai tersebut akan digunakan sebagai set point untuk *charging* baterai.

3.1 Perancangan Bidirectional DC-DC Converter

Untuk mendesain konverter yang baik diperlukan perhitungan nilai komponen-komponen yang tepat. Apabila nilai komponen yang digunakan tidak tepat, dapat menyebabkan adanya ripple tegangan dan arus yang terlalu besar. Pada desain *bidirectional* DC-DC *converter* ini diperlukan dua perhitungan, yaitu untuk mode *buck* dan mode *boost*. Untuk mendesain *converter* perlu ditetapkan beberapa parameter DC-DC *converter* pada Table 1.

Tabel 1. Parameter DC-DC Converter

Parameter	Boost Mode	Buck Mode
V _{Smin} (V)	24	46
V _{Smax} (V)	26	48
V _o (V)	48	28
I _{in} (A)	4	2
I _o (A)	2	4
Frekuensi Switching (KHz)	45	45

Untuk menentukan nilai komponen dari bidirectional DC-DC converter dilakukan dengan perhitungan:

1) Boost Mode:

Mencari *Duty Cycle* :

$$D = 1 - \frac{V_s(\min)}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{24}{48}$$

$$D = 0,5$$

Mencari nilai induktor :

a. Mencari nilai Resistor (R) :

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{48}{2} = 24 \Omega$$

b. Mencari nilai I_{L(avg)}

$$I_{L(avg)} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R}$$

$$I_{L(avg)} = \frac{24}{(1-0,5)^2 \cdot 24} = \frac{24}{(0,5)^2 \cdot 24} = \frac{24}{6} = 4 \text{ A}$$

c. Nilai Δ I_L :

$$\Delta I_L = 0,2 \times I_{L(avg)}$$

$$\Delta I_L = 0,2 \times 4 \text{ A} = 0,8 \text{ A}$$

Sehingga nilai L nya adalah :

$$L = \left[\frac{1}{f} \right] \times [V_o + V_f - V_{s(\min)}] \times \left[\frac{V_s(\min)}{V_o + V_f} \right] \times \left[\frac{1}{\Delta I_L} \right]$$

$$L = \left[\frac{1}{45000} \right] \times [48 + 1 - 24] \times \left[\frac{24}{49} \right] \times \left[\frac{1}{0,8} \right]$$

$$L = [22,22 \times 10^{-6}] \times [25] \times [0,612]$$

$$L = 339 \text{ uH}$$

Mencari nilai kapasitor output :

$$\Delta V_o = 0,001 \times V_o$$

$$= 0,001 \times 48 = 0,048 \text{ V}$$

Sehingga nilai kapasitor outputnya adalah :

$$\Delta V_o = \frac{V_o \times D}{R C f}$$

$$0,042 = \frac{48 \times 0,5}{24 \cdot C \cdot 45000}$$

$$C_{high} = 529 \text{ uF}$$

2) Buck Mode :

Mencari *Duty Cycle* :

$$D = \frac{V_o}{V_{s(max)}} = \frac{28}{48} = 0.58$$

Mencari arus induktor rata - rata :

$$i_{L(avg)} = \frac{V_o}{R} = I_o = 2 \text{ A}$$

Mencari nilai Δ i_L :

$$\Delta i_L = 0.2 \times i_{L(avg)}$$

$$\Delta i_L = 0.2 \times 2 = 0.4 \text{ A}$$

Mencari kapasitor output :

Dimana ΔV_o = ±0.1% × V_o = 0.001 × V_o

$$\Delta V_o = 0.001 \times 28 = 0,028 \text{ V}$$

Nilai Kapasitor output :

$$C_o = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} = \frac{\Delta i_L \times T}{8 \Delta V_o} = \frac{\Delta i_L}{8 \times f \times \Delta V_o}$$

$$C_o = \frac{0.4}{8 \times 45 \times 10^3 \times 0,028}$$

$$C_o = \frac{0.4}{10080}$$

$$C_{low} = 39,7 \mu F$$

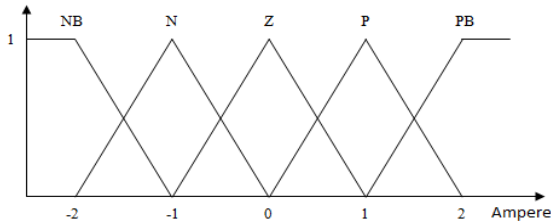
3.2 Perancangan Kontrol Logika Fuzzy

Perancangan kontrol logika fuzzy pada sistem ini berfungsi sebagai sistem kontrol PWM untuk kontrol arus (*current control*) output dari *bidirectional DC-DC converter*. *Current control* ini digunakan pada saat pengisian baterai maupun membantu suplai beban. Kontrol logika fuzzy yang digunakan adalah dengan menggunakan metode Sugeno dengan rule base 5x5. Dimana metode Sugeno hampir sama dengan penalaran Mamdani hanya saja output sistem tidak berupa himpunan fuzzy, tetapi berupa konstanta atau persamaan linear.

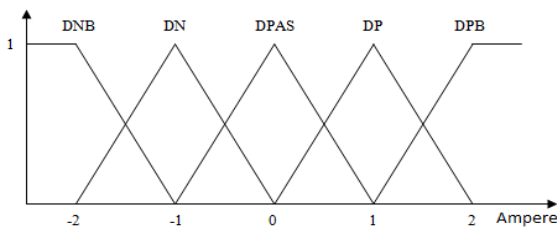
Input dari kontrol fuzzy ini berasal dari konversi pembacaan sensor arus oleh ADC pada *main DC bus* dan arus input *buck converter* yang selanjutnya akan diubah dalam derajat keanggotaan pada fungsi keanggotaan error dan Δerror. Sedangkan output dari kontrol fuzzy ini adalah mengatur besarnya *duty cycle* PWM untuk *switching* pada rangkaian *bidirectional DC-DC converter*.

Mekanisme pengaturan PWM berfungsi untuk mengatur besar arus output dari *bidirectional DC-DC converter*. Berikut

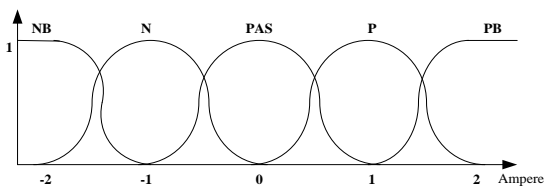
merupakan rancangan fuzzyfikasi dengan fungsi keanggotaan setitiga dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Sedangkan fuzzyfikasi dengan fungsi keanggotaan sigmoid yang dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



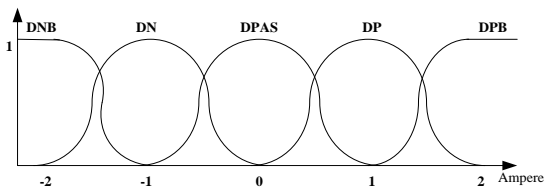
Gambar 6. Fungsi keanggotaan input error (segitiga)



Gambar 7. Fungsi keanggotaan input delta error (segitiga)



Gambar 8. Fungsi keanggotaan input error (sigmoid)



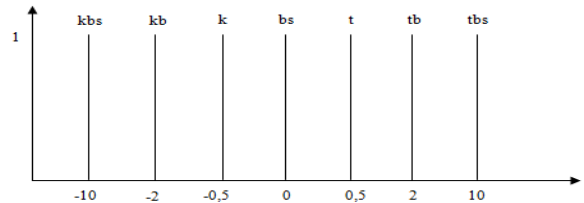
Gambar 9. Fungsi keanggotaan input delta error (sigmoid)

Dari kedua fungsi keanggotaan error dan $\Delta error$ tersebut, maka dapat dibuat sebuah aturan (*rule base*) untuk kontrol logika fuzzy seperti pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Rule base fuzzy 5x5.

Error $\Delta error$	NB	N	Z	P	PB
DNB	kbs	kb	k	t	tb
DN	kb	k	k	t	tb
DPAS	kb	k	bs	t	tb
DP	tb	t	t	k	kb
DPB	tb	t	k	kb	kbs

Untuk defuzzyfikasi (output) dari kontrol logika fuzzy metode sugeno ini yaitu berupa *singleton*. Dimana defuzzyfikasi dengan *singleton* digambarkan seperti pada Gambar 10.



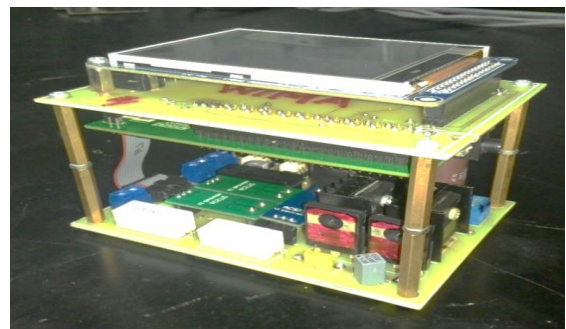
Gambar 10. Fungsi keanggotaan output (singleton)

Proses *defuzzyfikasi* yang digunakan pada metode sugeno yaitu menggunakan *Wiegthed Average*.

$$Defuzzy = \frac{\sum_{n=i}^n W_i Z_i}{\sum_{n=i}^n W_i} \quad (3)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototype hardware bidirectional DC-DC converter dengan kontrol logika fuzzy dapat dilihat pada Gambar 11, pada bagian bawah merupakan bagian *power DC-DC converter*, sedangkan bagian atas merupakan *interface* berupa LCD TFT untuk menampilkan besarnya tegangan dan arus.



Gambar 11. Prototype hardware bidirectional DC-DC converter.

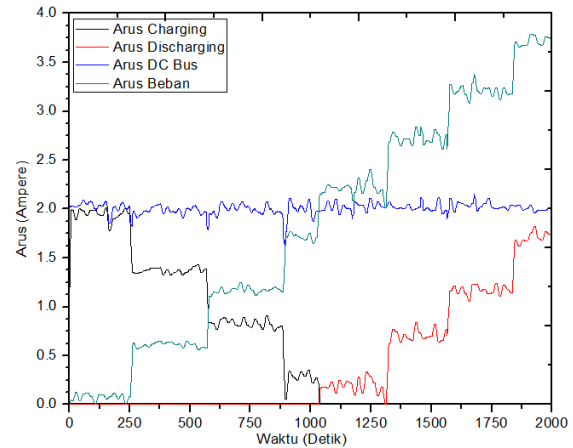
4.1 Kontrol Logika Fuzzy dengan Fungsi Keanggotaan Segi Tiga.

Pada pengujian *bidirectional* DC-DC converter dilakukan dengan mengubah-ubah arus besarnya beban DC, yaitu dengan cara mengubah besarnya nilai resistansi beban. Apabila arus beban kurang dari arus nominal main DC bus (2A) maka *converter* akan bekerja sebagai *buck converter* dan berfungsi untuk proses *charging* baterai. Apabila arus beban melebihi nominal main DC bus maka *bidirectional* DC-DC *converter* akan bekerja sebagai *boost converter*, mode ini berfungsi untuk membantu memenuhi kebutuhan arus beban dengan cara melakukan *discharge* dari baterai. Data hasil pengujian dari *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian DC-DC Converter dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segi tiga.

Beban	Arus Nominal main DC Bus (A)	Arus Charging (A)	Arus Discharging (A)	Arus Beban (A)
-	2.00	2.00	0.00	0.00
84 Ω		1.42	0.00	0.57
45 Ω		0.90	0.00	1.07
29 Ω		0.33	0.00	1.64
23 Ω		0.00	0.10	2.10
18 Ω		0.00	0.56	2.60
15 Ω		0.00	1.16	3.14
12 Ω		0.00	1.89	3.87

Dari table 3 dapat dilihat bahwa besarnya arus nominal pada main DC bus dijaga konstan sebesar 2A, sedangkan besarnya arus beban berubah-ubah sesuai dengan besar kecilnya resistansi beban. Nilai arus *charging* dan *discharging* juga berubah ubah sesuai dengan besar kecilnya nilai arus beban dan arus pada main DC bus tetap terjaga 2 Ampere. Untuk *response charging* maupun *discharging* dari *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segitiga dapat dilihat pada Gambar 12 berikut ini.



Gambar 12. Response charging dan discharging dari *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segi tiga.

4.2 Kontrol Logika Fuzzy dengan Fungsi Keanggotaan Sigmoid.

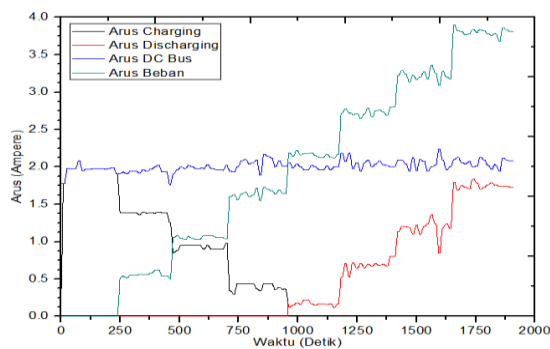
Untuk proses pengujian *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan sigmoid dilakukan dengan cara yang sama seperti pada pengujian pada *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segitiga. Data hasil pengujian dari *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan sigmoid dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Pengujian DC-DC Converter dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan sigmoid.

Beban	Arus Nominal main DC bus (A)	Arus Charging (A)	Arus Discharging (A)	Arus Beban (A)
-	2.00	1.99	0.00	0.00
84 Ω		1.48	0.00	0.51
45 Ω		0.93	0.00	1.06
29 Ω		0.39	0.00	1.60
23 Ω		0.00	0.11	2.11
18 Ω		0.00	0.60	2.64
15 Ω		0.00	1.10	3.17
12 Ω		0.00	1.65	3.70

Dari Table 4 dapat dilihat bahwa *charging* maupun *discharging* dari *bidirectional* DC-DC *converter* dengan kontrol logika fuzzy untuk

fungsi keanggotaan sigmoid memiliki tingkat keberhasilan yang sama seperti kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segitiga. Dimana besarnya arus nominal pada main DC bus dijaga konstan sebesar 2A, sedangkan besarnya arus beban berubah-ubah sesuai dengan besar kecilnya resistansi beban dan nilai arus *charging* ataupun *discharging* juga berubah ubah sesuai dengan besar kecilnya nilai arus beban. Respon *charging* maupun *discharging* untuk *bidirectional* DC-DC converter dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan sigmoid memiliki reponse yang berbeda seperti dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Response *charging* dan *discharging* dari *bidirectional* DC-DC converter dengan kontrol logika fuzzy untuk fungsi keanggotaan segi tiga.

4.3 Komparasi Kontrol Logika Fuzzy Dengan Fungsi Keanggotaan Segitiga Dan Sigmoid.

Komparasi hasil kontrol logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga dan sigmoid untuk *bidirectional* DC-DC converter dalam paper ini dibagi menjadi dua bagian yaitu pertama kemampuan untuk proses *charging* dan *discharging* serta fluktuasi arus pada main DC bus, kedua kebutuhan waktu komputasi untuk fungsi keanggotaan segi tiga dan sigmoid pada mikrokontroler.

Sebagaimana dijelaskan penggunaan kontrol logika fuzzy pada *bidirectional* DC-DC converter ini menggunakan pengontrolan arus (*current control*). Pengujian *bidirectional* DC-DC converter dilakukan dengan mengubah-ubah arus besarnya beban DC, dimana besarnya arus *charging-discharging* telah dirumuskan pada persamaan 4. Prosentase *error charging* dan *discharging* baterai dengan kontrol logika fuzzy

untuk fungsi keanggotaan segitiga dan sigmoid seperti dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Komparasi error untuk proses *charging* dan *discharging* pada baterai dengan *bidirectional* DC-DC converter.

Beban	Fungsi Keanggotaan			
	Segi Tiga		Sigmoid	
	Error Charging (%)	Error Discharging (%)	Error Charging (%)	Error Discharging (%)
-	0.00	-	0.50	-
84 Ω	0.70	-	0.67	-
45 Ω	3.23	-	1.06	-
29 Ω	8.33	-	2.49	-
23 Ω	-	0.00	-	0.00
18 Ω	-	6.67	-	6.25
15 Ω	-	1.75	-	5.98
12 Ω	-	1.07	-	2.94
Rata-rata	3.06	2.37	1.18	3.79

Dari tabel 5 terlihat jelas bahwa rata-rata *error* dengan pengukuran melalui ampere meter untuk *charging* maupun *discharging* dengan kontrol logika fuzzy baik fungsi keanggotaan sigmoid maupun fungsi keanggotaan segitiga memiliki tingkat keberhasilan yang hampir sama yaitu dengan *error* rata-rata dibawah 4%. Demikian pula bila diamati dari fluktuasi arus pada main DC bus arus rata-rata terjaga konstan sebesar 2A dengan *error* hanya 0.5%, tetapi terkadang terjadi lonjakan arus sesaat kaibat proses *charging-discharging* dan perubahan beban yang menyebabkan arus pada main DC bus naik ataupun turun. Fluktuasi arus pada main DC bus akibat proses *charging* dan *discharging* serta perubahan beban dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Komparasi fluktuasi arus pada main DC bus akibat proses *charging* dan *discharging* serta perubahan beban.

Fungsi Kenggotaan	Segi tiga		Sigmoid	
	Arus (A)	Error (%)	Arus (A)	Error (%)
Rata-rata	2.01	0.50	2.01	0.50
Maksimal	2.24	12.00	2.15	7.60
Minimal	1.76	12.00	1.60	19.90

Pada paper ini kontrol logika fuzzy untuk dengan fungsi keanggotaan segitiga dan sigmoid untuk *bidirectional DC-DC converter* diimplementasikan pada mikrokontroler STM32F407VG dengan clock CPU 168MHz, mikrokontroler jenis ini memiliki keunggulan dalam perhitungan operasi pecahan atau *floating point unit* (FPU) secara *hardware* oleh karena itu penulis memilih mikrokontroler jenis ini sebagai CPU untuk kontrolnya.

Dalam perhitungan kontrol logika fuzzy, fungsi keanggotaan fuzzy memiliki nilai derajat keanggotaan antara nol sampai satu atau berupa bilangan pecahan (*real*) sehingga memerlukan komputasi yang lebih berat dibandingkan dengan komputasi berupa bilangan bulat (*integer*). Pemilihan mikrokontroler dengan kemampuan FPU hardware ini sangat membantu proses komputasi kontrol logika fuzzy. Sebagaimana dapat dilihat pada tabel 7 waktu komputasi yang diperlukan untuk perhitungan kontrol logika fuzzy antara fungsi keanggotaan segitiga dan sigmoid memerlukan waktu komputasi yang hampir sama. Waktu komputasi yang diperlukan untuk fungsi keanggotaan segitiga lebih ringan dibandingkan dengan fungsi keanggotaan sigmoid. Untuk waktu komputasi dengan FPU *hardware*, baik itu pada fungsi keanggotaan segitiga maupun sigmoid bisa lebih dari 60% lebih cepat dari pada FPU menggunakan *software*.

Tabel 7. Komparasi waktu komputasi yang diperlukan untuk perhitungan control logika fuzzy dengan mikrokontroler STM32F407.

Tipe FPU	Waktu (mikro detik)		Selisih waktu koputasi segitiga dan sigmoid (%)
	Segitiga	Sigmoid	
Hardware FPU	8.82	10.89	19.01
Software FPU	28.0	28.75	2.61
Selisih waktu koputasi Hardware FPU dan Software FPU (%)	68.50	62.12	

5. KESIMPULAN

Dari beberapa percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa kontrol logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga

dan sigmoid sebagai kontroler *bidirectional DC-DC converter* pada sistem penyimpan energi tidak memiliki perbedaan yang sangat signifikan, keduanya memiliki rata-rata *error* untuk proses *charging* dan *discharging* kurang dari 4% dan ripple arus pada main DC bus 0.5%.

Bila ditinjau dari waktu komputasi yang diperlukan, fuzzy dengan fungsi keanggotaan sigmoid komputasinya 19 % lebih berat dibanding fungsi keanggotaan segitiga pada saat menggunakan mikrokontroler dengan *hardware* FPU dan penggunaan *hardware* FPU pada mikrokontroler dapat memperingan komputasi fuzzy lebih dari 60%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Trowler, Derik. Whitaker, Bret. *Bi-Directional Inverter and Energy Storage System*. Texas Instruments Analog Design Contest. May 2008.
- [2] Kusdiana, Dadan., *Kondisi riil kebutuhan energi di indonesia dan sumber-sumber energi alternatif terbarukan*, Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Bogor, 3 Desember 2008.
- [3] Saleh, Darwin Zahedy., *Master plan pembangunan ketenagalistrikan 2010 sampai dengan 2014*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Jakarta, Desember 2009.
- [4] Alireza Bakhshai. *Bidirectional DC - DC Converters for Energy Storage Systems*, Energy Storage in the Emerging Era of SmartGrids, Prof. Rosario Carbone (Ed.), ISBN: 978-953-307-269-2, InTech, September 2011.
- [5] S. Inoue and H. Akagi. "A *bidirectional isolated dc/dc converter as a core circuit of the next generation medium voltagepower conversion system*", IEEE Trans. Power Electron. 22(2), 535-542 (2007).
- [6] S. Jalbrzykowski., Citko. "A *bidirectional DC-DC converter for renewable energy systems*". Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences. Vol. 57, No. 4, 2009
- [7] Kuei-Hsiang Chao, Ming-Chang Tseng, Chun-Hao Huang, Yang-Guang Liu, dan Liang-Chiao Huang, "Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC

- Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems*", International Journal of Computer, Consumer and Control (IJ3C), Vol. 2, No.3, 2013.
- [8] M. E. Haque, K. N. Hasan, K. M. Muttaqi dan M. Negnevitsky. "Control of Energy Storage Interface with a Bidirectional Converter for Photovoltaic System". Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08), Australia, 2008
- [9] Ambrosio B. Cultura II, Ziyad M. Salameh. "Design and Analysis of a 24 Vdc to 48 Vdc Bidirectional DC-DC Converter Specifically for a Distributed Energy Application". Energy and Power Engineering, ISSN Online 1947-3818. 4, 315-323, 2012.
- [10] Abel García B., Francisco R. Trejo-M., Felipe Coyotl-M., Rubén Tapia-O., Hugo Romero-T. "Design and Implementation of a FLC for DC-DC Converter in a Microcontroller for PV System". International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-3, July 2013.
- [11] Ganji Sai Kumar, G. Ramudu, D. Vijay Arun, "Analysis and Implementation of bidirectional DC to DC Converter by using Fuzzy logic Controller", The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volume 3, Issue 6, Pages 22-39, 2014.
- [12] A.Srilatha, Fatimaazraand R.Venkatezwarlu, "fuzzy logic controlled bidirectional dc-dc converter applied to dc drive", International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER), Vol. 4, Issue 6, 25-36. Dec 2014.
- [13] A.Uma Siva Jyothi, D S Phani Gopal and G.Ramu, "Bi-Directional Dc-Dc converter Drive with PI and Fuzzy Logic Controller", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 11, November 2013.
- [14] D. W. Hart, "Introduction to power electronics," Prentice, Prentice-Hall of USA, New York, 2003.
- [15] Novie Ayub W, Suryono, and Agus IG, "Control of Boost Converter based on

ATmega8535L Microcontroller for regulator in energy storage system in Hybrid Power Generation," Proc.Industrial Electronics Seminar 2006.

Biodata Penulis

Eka Prasetyono adalah dosen muda di Program Studi Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan bidang keahlian mikrokontroler dan otomasi industri.

Wima Ashary adalah mahasiswa semester 8 di Program Studi Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

Anang Tjahjono adalah dosen senior di Program Studi Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan bidang keahlian mikrokontroler dan otomasi industry.

Novie A Windarko adalah dosen senior di Program Studi Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan bidang keahlian elektronika daya dan renewable energy.