

Topologi dan Kajian Kinerja Multi Konverter Arus Searah untuk Multi Generator-Hidro Mini

Rizki Nurilyas Ahmad¹, Mochammad Facta², Iwan Setiawan³

Intisari—Energi terbuang dalam aliran air rumah tangga dapat dijumpai dengan mudah pada keran, *shower*, penyiram toilet, dan peralatan lainnya pada sistem pemipaan yang air pada sistem tersebut hanya mengalir untuk membersihkan dan kemudian menjadi substansi yang terbuang. Energi dari air yang mengalir dapat dikumpulkan dan diubah menjadi bentuk energi lain yang lebih bernilai, seperti energi listrik. Dalam bentuk energi listrik, energi tersebut dapat secara langsung digunakan ataupun disimpan. Dalam perkembangan yang lebih lanjut dari generasi turbin mini yang kompak (*mini compact turbine-generator*, MCTG), air yang mengalir pada setiap bagian dari sistem pemipaan rumah diusulkan untuk dikumpulkan dalam bentuk daya listrik. Namun, MCTG konvensional menghasilkan tegangan yang lebih rendah yang tidak sesuai untuk penggunaan secara langsung pada berbagai peralatan listrik. Tegangan yang dibangkitkan juga tidak sesuai dengan *rating* tegangan terminal baterai sebagai media penyimpanan energi listrik. Pada penelitian ini, diusulkan peningkatan kinerja keluaran MCTG untuk memproduksi tegangan yang lebih tinggi dengan menambahkan konverter penaik tegangan arus searah yang dapat beroperasi secara tunggal maupun seri (*cascade*) untuk mengatasi permasalahan tegangan keluaran MCTG serta permasalahan efisiensi konverter penaik tegangan jika bekerja pada nilai *duty cycle* yang tinggi. Desain dan simulasi telah dibuat untuk mendapatkan kriteria yang diharapkan dalam pembangkitan tegangan listrik. Beberapa topologi diuji, yaitu sistem konverter tunggal, sistem konverter seri, sistem konverter seri dengan *selector*, dan sistem paralel. Berdasarkan hasil penelitian, terbukti bahwa sistem paralel lebih baik daripada ketiga topologi lainnya karena dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan tegangan referensi 14 V dan dapat menghasilkan efisiensi di atas 0,9 pada jangkauan putaran *shaft* rotor MCTG yang lebih lebar.

Kata Kunci—Konverter Penaik Tegangan (*Boost*) Terhubung Seri, Efisiensi, *Harvesting Energy from Surrounding Houses*, PikoHidro, Konservasi Energi Terbuang.

I. PENDAHULUAN

Di lingkungan sekitar tempat tinggal banyak sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik, yang populer dengan istilah *harvesting energy surrounding house*. Dengan memanfaatkan energi yang ada di sekitar rumah, dapat dibangun suatu sistem pembangkit listrik yang dapat

digunakan untuk menyuplai kebutuhan rumah tangga. Di antara sumber energi yang dapat digunakan adalah energi air, angin, dan surya. Energi listrik yang dibangkitkan kemudian diolah menggunakan konverter sebelum disalurkan ke beban [1]. Pada pengoperasian konverter, perlu adanya pembatasan *duty cycle* agar kinerja konverter dapat maksimal, terutama pada konverter jenis *boost* yang efisiensinya cenderung makin rendah jika dioperasikan pada nilai *duty cycle* yang tinggi [2], [3].

Sebagian besar pembangkit yang beroperasi di Indonesia menggunakan sumber energi fosil. Dari pembangkitan energi sebesar 70,96 GW, hanya 10,9% pembangkitan berasal dari sumber energi terbarukan, yang berarti 89,1% atau sekitar 63,23 GW pembangkitan energi berasal dari sumber energi fosil [4], [5]. Kegiatan eksploitasi sumber energi fosil secara besar-besaran dan terus-menerus akan berbahaya bagi kelestarian alam. Begitu juga polusi yang diakibatkan oleh unit-unit pembangkit listrik dengan sumber energi fosil tersebut. Pembangunan pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan secara portabel juga dapat dipertimbangkan karena kemudahan dalam penggunaannya [6]. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan sebagai alternatif sumber energi adalah air. Potensi pemanfaatan energi air sebagai sumber energi untuk membangkitkan energi listrik melalui unit-unit pembangkit listrik adalah sekitar 75.000 MW. Dari potensi sebesar itu, pemanfaatannya baru terealisasi 2,5% dari seluruh potensi yang ada. Sebanyak 10% dari total potensi tersebut, yaitu sebesar 7.500 MW, dapat digunakan untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) [7]. Pembangunan PLTA dengan kapasitas dan ukuran yang besar hanya dapat dilakukan di lokasi tertentu saja dan penyalurannya masih sulit mencapai daerah-daerah terpencil. Selain itu, pembangunan PLTA dengan kapasitas dan ukuran yang besar membutuhkan dam atau bendungan yang besar juga. Hal tersebut dapat mengganggu ekosistem sungai tempat PLTA dibangun karena bendungan dari sistem PLTA yang ada dapat memutus jalur antara sungai bagian atas dan bagian bawah, sehingga dapat mengisolasi hewan di ekosistem tersebut [8]. Salah satu solusi masalah tersebut adalah dengan membangun PLTMH atau unit pembangkit dengan skala yang lebih kecil lagi, yaitu pembangkit listrik tenaga pikoHidro (PLTPH) dengan daya kurang dari 5 kW [9]. PLTMH dan/atau PLTPH dapat menjadi solusi pengadaan listrik di daerah tertentu dengan sumber energi air yang terbatas [8]. Pembangunan pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan secara paralel dengan pembangkit sejenis, dan/atau secara *hybrid* (kombinasi dengan sumber energi lainnya) dapat menjadi solusi dari kecilnya daya yang dihasilkan oleh satu pembangkit saja [10], [11].

Di sekitar rumah, atau bahkan di dalam rumah, aliran air dapat ditemukan pada keran, *shower*, dan peralatan lainnya

¹ Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani, Mendungan, Pabelan, Kec. Kartasura, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57169 INDONESIA (telp: 0271-717417; fax: 0271-715448; e-mail: rna924@ums.ac.id)

^{2,3} Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto No.13, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275 INDONESIA (telp: 024-7460024 ext 101/128; fax: 024-7460027; e-mail: ²facta@elektro.undip.ac.id; ³iwan@elektro.ft.undip.ac.id)

[Diterima: 2 April 2022, Revisi: 17 Juli 2022]

pada sistem pemipaan di rumah. Energi pada aliran air yang ada sering kali hanya terbuang begitu saja menuju saluran pembuangan setelah digunakan (misalnya untuk cuci tangan) padahal energi pada aliran air di dalam pipa dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk membangkitkan energi listrik. Beberapa penelitian tentang pemanfaatan energi terbuang pada aliran air di pipa telah dilakukan, di antaranya pada pipa transmisi air di Arab Saudi [12] dan pada pipa pembuangan air limbah [13]. Penelitian ini menganalisis penggunaan beberapa konverter dengan mengatur koneksi antarkonverter pada sistem dengan beberapa generator, sehingga diperoleh efisiensi sistem yang lebih tinggi dan stabil pada jangkauan putaran *shaft* rotor generator yang lebih lebar. Penggunaan beberapa konverter yang dapat beroperasi secara tunggal ataupun seri (*cascade*) sesuai dengan kondisi diharapkan dapat mengatasi permasalahan efisiensi pada konverter penaik tegangan (*boost converter*) jika dioperasikan pada nilai *duty cycle* yang tinggi [2], [3]. *Duty cycle* sendiri merupakan lama waktu sinyal pemicuan (*trigger*) gerbang transistor pada konverter berada pada kondisi *high* dibagi dengan periode sinyal pemicuan tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berperan untuk mengoptimalkan sistem-sistem energi listrik; untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada lokasi-lokasi tertentu yang masih belum terjangkau atau belum memungkinkan untuk menggunakan jaringan *grid*; atau untuk keperluan meningkatkan kemandirian mendapatkan energi di masyarakat.

II. PEMANFAATAN ENERGI TERBUANG PADA ALIRAN AIR DI SISTEM PEMIPAAN RUMAH TANGGA

Pemanfaatan energi terbuang pada aliran air sebagai sumber pembangkitan energi listrik telah diteliti. Beberapa di antaranya adalah penelitian mengenai aliran air dalam pipa [12]-[16]. Penelitian pada saluran pipa transmisi air menghasilkan potensi pembangkitan sebesar 5,7 MW/tahun. Namun, pada penelitian tersebut, listrik yang dibangkitkan masih belum diolah menggunakan perangkat elektronika daya [12]. Penelitian lain dilakukan dengan memanfaatkan energi terbuang dari aliran air limbah pada pipa saluran distribusi. Dengan menambahkan tangki penampungan *overhead* dengan ketinggian 14 m dan dengan mengatur debit air sebesar 9 l/s, generator dapat menghasilkan daya listrik hingga 212 W. Namun, pada penelitian ini penggunaan perangkat elektronika daya juga belum diterapkan untuk mengolah listrik yang dibangkitkan [13]. Penelitian pada pipa aliran air ukuran 100 mm juga telah dilakukan. Dengan mengatur debit air sebesar 1,5 m/s dan *head loss* kurang dari 5 m, generator dapat menghasilkan daya terbangkit hingga 88,2 W [14]. Penelitian lain dapat menghasilkan daya sebesar 200 W dengan efisiensi turbin dan generator hingga 33%, dengan menggunakan sumber aliran air dalam pipa 100 mm dan mengatur *head loss* kurang dari 5 m [15]. Akan tetapi, debit air pada penelitian ini tidak disebutkan. Kedua penelitian terakhir yang telah disebutkan juga belum menggunakan perangkat elektronika daya untuk mengolah listrik yang dibangkitkan [14], [15]. Penelitian pada aliran air pipa suatu gedung universitas juga telah dilakukan. Dengan menggunakan turbin hasil cetak 3D, diperoleh efisiensi turbin sebesar 40% dengan potensi daya pada aliran air pipa sebesar 91 W. Namun, penelitian ini tidak menggunakan turbin yang

terhubung dengan generator serta peralatan elektronika daya [16].

Pemanfaatan aliran air yang lebih dekat di sekitar rumah tinggal juga dapat dilakukan. Dengan menggunakan konverter dan/atau peralatan elektronika daya lainnya, tegangan keluaran dari pembangkit dapat diolah terlebih dahulu sebelum disalurkan menuju beban [1]. Konverter jenis *buck* dapat digunakan untuk menurunkan tegangan, konverter jenis *boost* dapat digunakan untuk menaikkan tegangan, sedangkan konverter jenis *buck-boost* dapat digunakan untuk menurunkan serta menaikkan tegangan [17]. Pengoperasian konverter jenis *boost* cenderung menghasilkan efisiensi yang makin rendah seiring kenaikan *duty cycle*-nya. Setelah *duty cycle* melewati nilai *critical duty cycle*, efisiensi konverter jenis *boost* akan berfluktuasi, dengan nilai terendahnya lebih rendah daripada efisiensi saat nilai *duty cycle* belum melewati nilai *critical duty cycle* [3]. Pembatasan nilai *duty cycle* pada pengoperasian konverter jenis *boost* diperlukan agar konverter dapat beroperasi secara maksimal [2]. Karakteristik efisiensi dari konverter jenis *boost* ini menjadi pertimbangan dioperasikannya konverter secara tunggal atau secara seri.

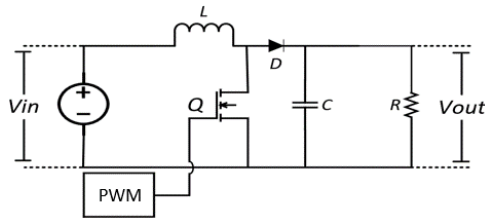
A. Pemanfaatan Sumber Energi di Sekitar Rumah

Air merupakan salah satu sumber energi yang berlimpah di alam. Air mengalami siklus secara terus menerus, sehingga ketersediaannya tetap terjaga. Air juga dapat ditemui pada sistem pemipaan di rumah dan digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Pembangkitan energi listrik dari sumber-sumber energi yang ada di sekitar tempat tinggal dapat diistilahkan sebagai *harvesting energy from surrounding house* [1].

B. Generator

Air dapat berasal dari beberapa sumber, salah satunya dari aliran air pada pipa. Pada sistem pemipaan rumah tangga, umumnya digunakan pipa ukuran ½ in, sehingga diperlukan generator yang dapat dipasang dan sesuai dengan ukuran pipa tersebut. Generator tersebut harus terhubung dengan turbin yang juga kecil sehingga cocok dengan ukuran pipa. Generator serta turbin mini yang kompak (*mini compact turbine-generator*, MCTG) dinilai cocok dengan kondisi tersebut. Generator yang digunakan dapat berupa generator DC magnet permanen. Karena fluks magnet dihasilkan oleh magnet permanen, ukuran generator dapat lebih ringkas karena tidak ada rangkaian eksitasi. Namun, karena fluks magnet pada magnet permanen bersifat tetap dan terbatas, umumnya generator ini cocok digunakan pada pembangkitan daya yang rendah [18].

Pemilihan generator juga tidak lepas dari rencana beban yang akan disuplai, yang berupa aki. Tegangan pengisian baterai aki adalah sekitar 13.8 V hingga 14 V, mengacu pada spesifikasi charger aki [19] dan pengukuran pengisian aki pada sepeda motor. Generator yang tersedia di pasaran memiliki beberapa macam tegangan keluaran, di antaranya 5 V, 12 V, dan 80 V [20]. Agar konversi nilai tegangan tidak terlalu jauh, dipilih generator dengan tegangan 12 V. Pada beberapa penelitian sebelumnya [12]-[16], [21], [22], tegangan keluaran generator tidak diolah dengan peralatan elektronika daya. Tegangan keluaran generator maksimal adalah 12 V, sehingga



Gbr. 1 Topologi dasar boost converter.

diperlukan konverter penaik tegangan agar dapat diperoleh tegangan sebesar 14 V.

C. Konverter

Terdapat beberapa jenis konverter arus searah [17]. Namun, karena fungsi yang dikehendaki adalah menaikkan tegangan keluaran generator dengan rating tegangan 12 V menjadi tegangan 14 V, konverter yang dipilih adalah konverter jenis penaik tegangan atau boost converter. Topologi dasar boost converter ditunjukkan pada Gbr. 1. Komponen topologi dasar boost converter adalah induktor (L), dioda (D), dan sakelar yang dapat berupa transistor (Q) serta kapasitor (C) sebagai filter. Konverter dapat terhubung dengan tegangan sumber DC (Vin) dan dengan beban (R).

Persamaan untuk menghitung tegangan keluaran topologi dasar boost converter adalah sebagai berikut [17].

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \tag{1}$$

dengan

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$T = t_{on} + t_{off}$$

$$t_{off} = (1 - D) T.$$

Vin adalah tegangan sumber (tegangan masukan), Vout adalah tegangan pada beban (tegangan keluaran), ton adalah durasi waktu saat sinyal PWM dalam kondisi high, toff adalah durasi waktu saat sinyal PWM dalam kondisi low, D adalah duty-cycle, dan T adalah periode sinyal PWM.

Untuk menghitung nilai minimal induktor, dapat digunakan persamaan berikut [23].

$$L_{min} = \frac{D_{min}(1-D_{min})^2 R}{2f} \tag{2}$$

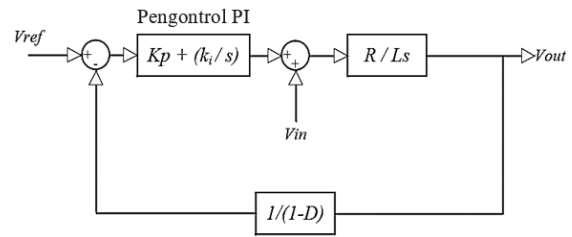
dengan Lmin adalah nilai induktor minimal, Dmin adalah nilai duty cycle minimal, R adalah beban resistif, dan f adalah nilai frekuensi kerja konverter. Sementara itu, untuk menghitung nilai minimal kapasitor, digunakan (3) [23].

$$C_{min} = \frac{D_{max}}{R(\Delta V_{out}/V_{out})f} \tag{3}$$

dengan Cmin adalah nilai kapasitor minimal, Dmax adalah nilai duty cycle maksimal, R adalah beban resistif, ΔVout adalah riak atau ripple tegangan, dan f adalah nilai frekuensi kerja konverter.

D. Kontrol dan Kestabilan Konverter

Tegangan keluaran konverter dipengaruhi oleh tegangan masukan serta duty cycle sinyal PWM yang mengontrol kerja



Gbr. 2 Sistem loop tertutup boost converter dengan pengontrol PI.

sakelar konverter tersebut. Untuk menjaga agar konverter bekerja dengan optimal dan untuk mendapatkan tegangan keluaran yang lebih akurat, diperlukan suatu metode kontrol pada pembangkit sinyal PWM. Beberapa metode kontrol yang umum digunakan adalah kontrol proporsional (P), kontrol proporsional-integral (PI), kontrol proporsional-integral-derivatif (PID), dan kontrol proporsional-derivatif (PD) [24]. Kontrol proporsional-integral dipilih karena umum digunakan untuk pengontrolan proses yang memiliki dinamika relatif cepat, seperti aliran, tekanan, dan level [25].

Sistem loop tertutup pada boost converter dengan kontrol PI diperlihatkan pada Gbr. 2 [26]. Tampak pada Gbr. 2 bahwa terdapat tegangan referensi (Vref); kontrol PI yang memiliki komponen konstanta proporsional (kp) dan konstanta integral (ki); komponen beban resistif (R) dan induktor (L); komponen pengali boost converter (1/(1-D)), dengan D adalah duty cycle; sinyal error (e); serta tegangan keluaran (Vout).

Berdasarkan Gbr. 2 tersebut, didapatkan fungsi alih boost converter sebagai berikut [26].

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{R}{Ls}}{\left[1 + \left(\frac{R}{Ls} \right) \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left(\frac{1}{1-D} \right) \right]} \tag{4}$$

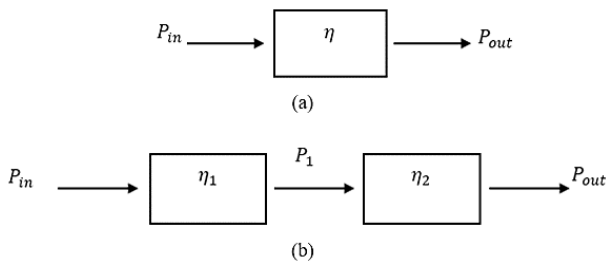
Dari fungsi alih tersebut, nilai parameter kontrol PI dapat dihitung dan ditentukan dengan memperhatikan kestabilan sistem. Salah satu konsep kestabilan yang dapat dipahami adalah konsep kestabilan Routh-Hurwitz [24]. Untuk melakukan perhitungan dengan konsep kestabilan Routh-Hurwitz, fungsi alih sistem perlu disusun ke bentuk polinomial dalam Laplace.

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \tag{5}$$

dengan a0 adalah konstanta pada bilangan Laplace pangkat tertinggi sn dan an adalah konstanta pada bilangan Laplace pangkat terendah s0.

Jika terdapat konstanta (a) yang bernilai nol atau negatif, maka polinomial tersebut memiliki akar imajiner atau bagian riil positif dan sistem dikatakan tidak stabil. Jika semua koefisien bernilai positif, maka koefisien-koefisien tersebut dapat disusun ke dalam bentuk baris dan kolom sesuai dengan pola berikut.

s^n	a_0	a_2	a_4	a_6
s^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3
...
s^2	c_1	c_2				
s^1	d_1					
s^0	e_1					



Gbr. 3 Efisiensi (a) peralatan tunggal dan (b) peralatan terhubung secara seri.

dengan

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} ; b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} ; b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \\
 c_1 &= \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} ; c_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} ; c_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \\
 d_1 &= \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} ; d_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} ; d_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \\
 &\dots ; \dots ; \dots
 \end{aligned} \tag{6}$$

Berdasarkan konsep kestabilan Routh-Hurwitz, sistem dikatakan stabil jika seluruh konstanta di kolom pertama ($a_0, a_1, b_1, c_1, d_1, \dots$) bernilai positif.

E. Efisiensi

Secara umum, gambaran efisiensi pada peralatan tunggal dan peralatan yang terhubung seri ditunjukkan pada Gbr. 3. Efisiensi peralatan tunggal dapat ditulis sebagai (7).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{7}$$

dengan P_{in} adalah daya masukan dan P_{out} adalah daya keluaran sistem. Sementara itu, efisiensi peralatan yang terhubung seri dapat ditulis sebagai (8).

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_1 \eta_2}{P_1 / \eta_1} = \eta_1 \eta_2 \tag{8}$$

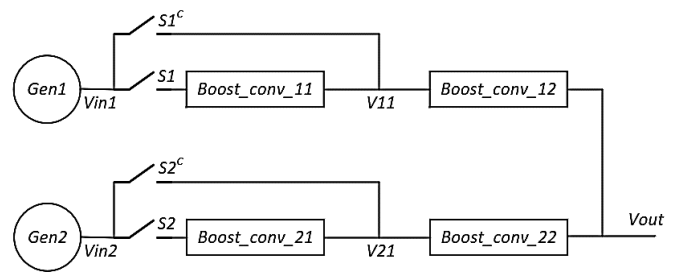
dengan P_{in} adalah daya masukan dan P_{out} adalah daya keluaran sistem. Pada kondisi riil, efisiensi suatu peralatan selalu kurang dari satu, sehingga secara teoretis pada peralatan yang dihubungkan secara seri, efisiensi totalnya akan lebih rendah daripada efisiensi satu peralatan tunggal saja.

III. METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Powersim (PSIM). Meskipun demikian, pengukuran pada percobaan awal terhadap generator dilakukan untuk membantu mengatur parameter generator. Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian awal yang meliputi pengukuran parameter generator serta simulasi awal sistem konverter tunggal dan sistem konverter seri [27]. Penelitian ini membahas lebih lanjut kinerja, terutama tegangan dan efisiensi daya, pada sistem konverter tunggal, sistem konverter seri, sistem konverter seri dengan *selector*, dan sistem paralel, beserta dengan rangkaian pemucuan, rangkaian kontrol, dan rangkaian *selector*.

A. Investigasi Awal Komponen Sistem

Generator yang digunakan sebagai acuan merupakan generator magnet permanen dengan tegangan keluaran DC



Gbr. 4 Diagram blok gagasan sistem.

TABEL I
PARAMETER BOOST CONVERTER

Parameter	Nilai
Beban (R)	60 Ω
Frekuensi <i>switching</i>	5 kHz
% <i>Vripple</i>	< 1%
Induktor (L)	5 mH
Kapasitor (C)	500 μ F
Transistor (Q)	MOSFET

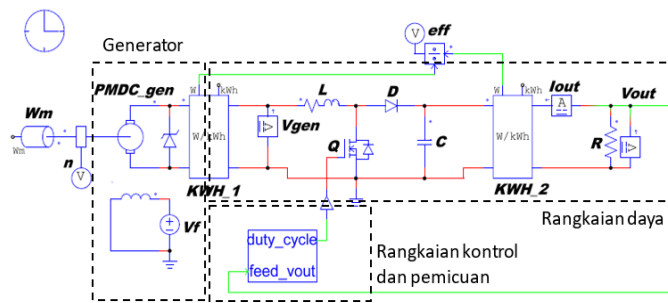
maksimal sebesar 12 V, *rating* daya 10 W, dan hambatan jangkar 10,5 Ω [20]. Investigasi awal generator dilakukan dengan melakukan pengukuran tegangan keluaran generator pada kondisi tanpa beban dan dengan beban sebesar 60 Ω . Data hasil pengukuran awal pada generator tersebut dijadikan sebagai acuan untuk membantu dalam penentuan parameter generator pada simulasi.

Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh tegangan generator maksimal 10,232 V dan minimal 3,2 V. Konverter dirancang bekerja pada kondisi *continuous conduction mode* (CCM), dengan *ripple* tegangan kurang dari 1%. Maka, didapatkan parameter *boost converter* sebagaimana yang disajikan pada Tabel I. Jika frekuensi *switching* terlalu rendah, *ripple* tegangan keluaran konverter akan makin besar. Namun, perlu dipahami juga bahwa frekuensi *switching* yang terlalu besar akan meningkatkan arus pada sakelar MOSFET (Q) yang digunakan dan dapat menyebabkan suhu MOSFET menjadi tinggi [28].

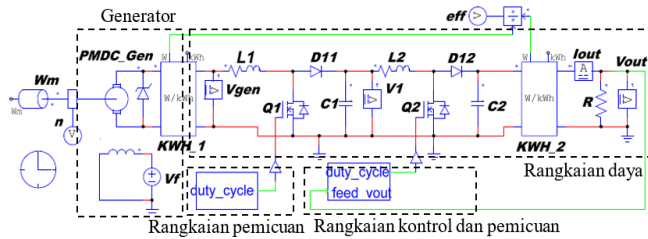
B. Topologi Sistem Konverter dan Pembangkit

Diagram blok gagasan sistem ditunjukkan pada Gbr. 4. Sakelar (S) berfungsi untuk memilih konfigurasi sistem, yaitu konverter pada masing-masing sistem dioperasikan secara tunggal atau secara seri. Saat konverter dioperasikan secara tunggal, sakelar S akan terbuka dan sakelar S^c akan tertutup. Pada kondisi tersebut, konverter yang bekerja hanya *Boost_conv* yang kedua (*Boost_conv_12* dan *Boost_conv_22*). Saat konverter dioperasikan secara seri, sakelar S akan tertutup dan sakelar S^c akan terbuka. Pada kondisi tersebut, konverter *Boost_conv* yang pertama dan *Boost_conv* yang kedua bekerja secara seri. Koneksi dua sistem secara paralel dimaksudkan untuk meningkatkan daya total yang dapat dibangkitkan oleh keseluruhan sistem tersebut.

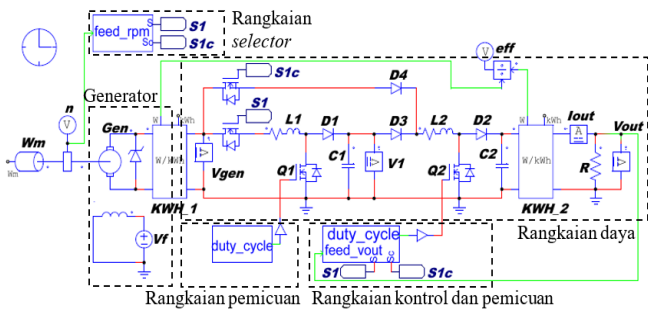
Untuk melakukan analisis terhadap gagasan sistem tersebut, ada empat desain topologi rangkaian yang dibuat dalam penelitian ini, yaitu desain rangkaian sistem satu generator dengan satu *boost converter*, yang kemudian disebut sebagai sistem konverter tunggal; sistem satu generator dengan dua



Gbr. 5 Rangkaian simulasi sistem konverter tunggal.



Gbr. 6 Rangkaian simulasi sistem konverter seri.

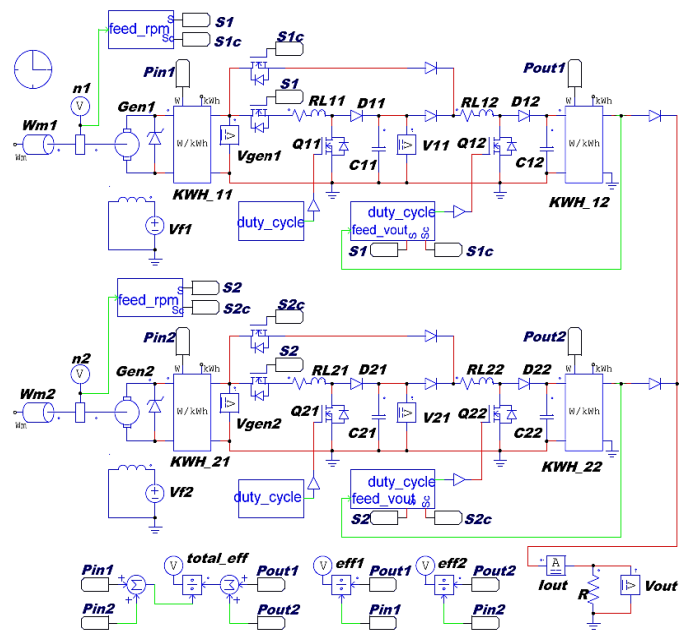


Gbr. 7 Rangkaian simulasi sistem konverter seri dengan selector.

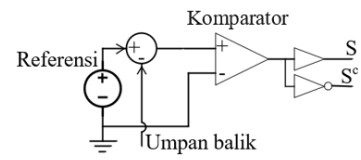
boost converter, yang kemudian disebut sebagai sistem konverter seri; sistem satu generator dengan dua *boost converter* dan dengan *selector*, yang kemudian disebut sebagai sistem konverter seri dengan *selector*; dan dua sistem satu generator dengan dua *boost converter* dan dengan *selector* yang dihubungkan membentuk sistem paralel, yang kemudian disebut sebagai sistem paralel. Sistem paralel tersebut merupakan representasi dari gagasan sistem. Rangkaian simulasi sistem konverter tunggal, sistem konverter seri, sistem konverter seri dengan *selector*, dan sistem paralel berturut-turut diperlihatkan pada Gbr. 5 sampai Gbr. 8. Rangkaian simulasi dalam blok rangkaian *selector*, rangkaian pemecuan, serta rangkaian kontrol dan pemecuan ditunjukkan pada Gbr. 9. Pembangkit sinyal PWM yang digunakan pada blok rangkaian kontrol dan pemecuan ini berbasis pengontrol PI dengan umpan balik dari tegangan keluaran konverter. Rangkaian *selector* berfungsi mengatur terbuka dan tertutupnya sakelar S.

IV. HASIL PENELITIAN

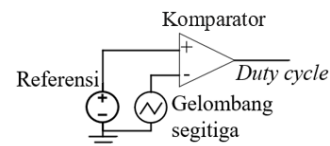
Simulasi dilakukan berdasarkan teori dan penelitian terdahulu yang telah dipelajari pada saat melaksanakan kajian pustaka serta berdasarkan simulasi awal yang telah dilaksanakan. Simulasi yang dibuat terdiri atas sistem konverter tunggal, sistem konverter seri, sistem konverter seri dengan *selector*, dan sistem paralel.



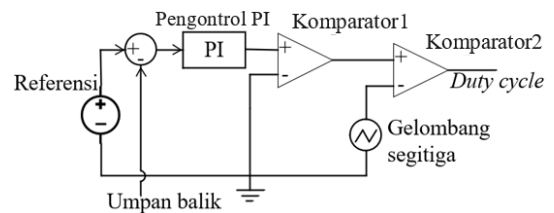
Gbr. 8 Rangkaian simulasi sistem paralel.



(a)



(b)



(c)

Gbr. 9 Rangkaian elektronik yang digunakan, (a) rangkaian *selector*, (b) rangkaian pemecuan, (c) rangkaian pemecuan dan kontrol.

A. Pembangkitan Sinyal PWM berbasis Pengontrol PI

Untuk mendapatkan tegangan keluaran konverter sebesar 14 V, diperlukan kontrol pada pembangkitan sinyal PWM. Pada penelitian ini, pembangkit sinyal PWM yang digunakan berbasis pengontrol PI. Berdasarkan fungsi alih sistem yang ditentukan berdasarkan (4) dan dengan mempertimbangkan kestabilan sistem berdasarkan analisis dengan konsep kestabilan Routh-Hurtwitz pada (5) dan (6), ditetapkan nilai $kp = 5$ dan nilai $ki = 0,5$ atau $ti = (kp/ki) = 10$.

Hasil simulasi penggunaan pengontrol PI terhadap tegangan keluaran pada konverter seri disajikan pada Tabel II. Selisih

TABEL II
TEGANGAN KELUARAN *BOOST CONVERTER* SERI TANPA DAN DENGAN
PENGONTROL PI

Kec. rotor <i>n</i> (rpm)	Tanpa Pengontrol PI		Dengan Pengontrol PI	
	V_{out} (V)	Selisih (V)	V_{out} (V)	Selisih (V)
1.225	14,00349	0,00349	14,00348	0,00348
1.250	14,10018	0,10018	13,99898	0,00102
1.275	14,19838	0,19838	14,00256	0,00256
1.300	14,29343	0,29343	14,00548	0,00548

tegangan merupakan selisih antara tegangan keluaran konverter dengan tegangan referensi sebesar 14 V. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, tampak bahwa pengontrol PI dapat mengontrol konverter untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan lebih mendekati tegangan referensi.

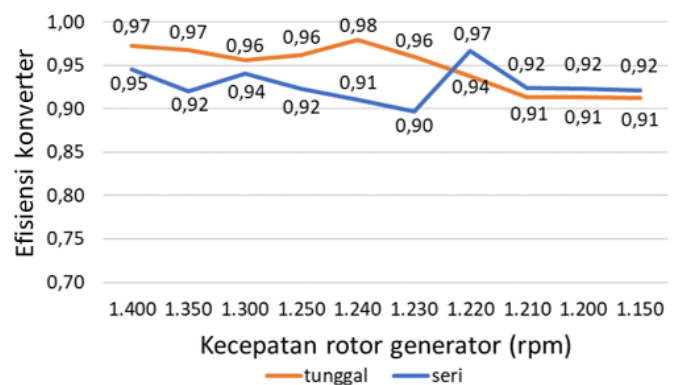
B. Sistem Konverter Tunggal

Simulasi sistem konverter tunggal dilakukan menggunakan rangkaian simulasi yang ditunjukkan pada Gbr. 5. Pada simulasi tersebut, nilai *duty cycle* terlebih dahulu diatur secara manual untuk menentukan batasan *duty cycle* pada pembangkit sinyal PWM dan didapatkan batasan *duty cycle* maksimal sebesar 0,499. Maka, nilai *duty cycle* pada sistem konverter tunggal ini dibatasi secara teoretis sebesar 0,499. Beban sistem berupa resistor 60 Ω . Berdasarkan hasil simulasi, diketahui bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan sekitar 14 V, arus sekitar 0,233 A, dan daya sekitar 3,26 W. *Duty cycle* pada 1.400 rpm adalah sebesar 0,313, sedangkan pada 1.150 rpm sebesar 0,45. Nilai tegangan, arus, serta daya pada sistem konverter tunggal mulai menurun secara cukup signifikan pada putaran *shaft* rotor 1.210 rpm dan yang lebih rendah dari itu. Hal ini diakibatkan oleh batasan *duty cycle* yang sudah tercapai dan dapat disebabkan juga oleh kurangnya daya yang dapat dihasilkan oleh generator. Efisiensi sistem bersifat fluktuatif, dengan efisiensi rata-rata sebesar 0,96, yang didapatkan pada nilai masukan 1.220 rpm hingga 1.400 rpm, sedangkan untuk nilai masukan kurang dari 1.220 rpm hingga 1.150 rpm didapatkan efisiensi rata-rata sekitar 0,91. Dari nilai efisiensi tersebut, dapat diketahui bahwa sistem konverter tunggal cenderung menghasilkan efisiensi daya yang lebih tinggi pada nilai *duty cycle* yang lebih rendah (pada saat putaran *shaft* rotor lebih tinggi).

C. Sistem Konverter Seri

Simulasi sistem konverter seri dilakukan menggunakan rangkaian simulasi seperti pada Gbr. 6. Pada simulasi ini, nilai *duty cycle* juga terlebih dahulu diatur secara manual untuk menentukan batasan *duty cycle* pembangkit sinyal PWM dan didapatkan batasan *duty cycle* maksimal 0,360. Maka, nilai *duty cycle* pembangkit sinyal PWM pada sistem konverter seri ini dibatasi secara teoretis sebesar 0,360 untuk masing-masing konverternya. Beban sistem berupa resistor 60 Ω .

Berdasarkan hasil simulasi, diketahui bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan sekitar 14 V, arus sekitar 0,233 A, dan daya sekitar 3,26 W. *Duty cycle* pada 1.400 rpm adalah sebesar 0,35 pada konverter pertama dan 0,213 pada konverter kedua, sedangkan pada 1.150 rpm, *duty cycle* pada kedua konverter yang terhubung secara seri tersebut adalah sebesar 0,35. Nilai



Gbr. 10 Grafik efisiensi hasil simulasi sistem konverter tunggal dan seri.

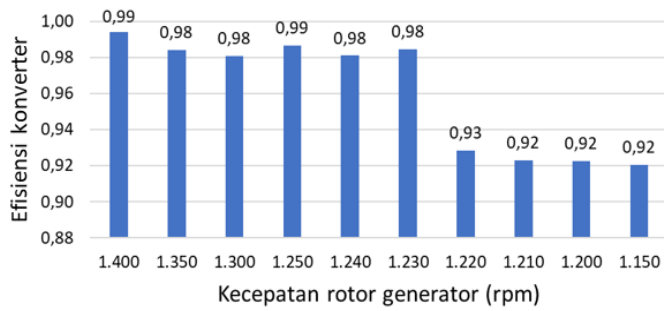
tegangan pada sistem dengan konfigurasi seri mulai menurun secara signifikan pada putaran *shaft* rotor 1.210 rpm dan yang lebih rendah dari itu. Hal ini diakibatkan oleh batasan *duty cycle* yang sudah tercapai dan dapat disebabkan juga oleh kurangnya daya yang dapat dihasilkan oleh generator. Efisiensi sistem konverter seri bersifat fluktuatif, dengan efisiensi rata-rata pada nilai masukan 1.220 rpm hingga 1.400 rpm adalah sekitar 0,93, lebih rendah daripada sistem konfigurasi konverter tunggal. Namun, pada nilai masukan kurang dari 1.220 rpm hingga 1.150 rpm didapatkan efisiensi rata-rata sekitar 0,92.

Berdasarkan data efisiensi yang diperoleh dari simulasi, dapat diketahui juga bahwa nilai efisiensi sistem konverter tunggal dan sistem konverter seri berpotongan di satu titik, yaitu antara putaran *shaft* rotor 1.230 rpm dan 1.220 rpm, sebagaimana ditunjukkan pada Gbr. 10. Maka, nilai tersebut dijadikan sebagai acuan pada saat perubahan konfigurasi sistem.

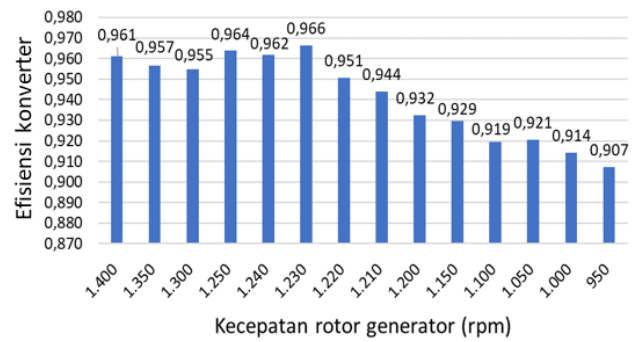
D. Sistem Konverter Seri dengan Selector

Rangkaian simulasi dengan *selector* telah ditunjukkan pada Gbr. 9(a). Berdasarkan nilai efisiensi hasil simulasi sistem konverter tunggal dan sistem konverter seri pada Gbr. 10, ditetapkan bahwa pada putaran *shaft* rotor kurang dari atau sama dengan 1.220 rpm, sistem akan beroperasi dalam konfigurasi konverter seri. Sementara itu, pada putaran *shaft* rotor lebih dari 1.220 rpm, sistem beroperasi dalam konfigurasi konverter tunggal.

Simulasi sistem konverter seri dilakukan dengan rangkaian simulasi seperti pada Gbr. 7. Dengan ditambahkannya *selector* dan beberapa sakelar tambahan, dua buah konverter yang digunakan pada sistem konverter seri dapat diatur, yaitu akan difungsikan secara tunggal atau secara seri, berdasarkan kriteria yang telah ditentukan sebelumnya. Dari hasil simulasi, diketahui bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan sekitar 14 V, arus sekitar 0,233 A, dan daya sekitar 3,26 W. Nilai-nilai tersebut sempat mengalami penurunan pada putaran *shaft* rotor 1.230 rpm, tetapi kemudian naik kembali dan mulai turun lagi secara cukup signifikan pada putaran *shaft* rotor 1.200 rpm. Efisiensi sistem cukup stabil di atas 0,98 pada putaran *shaft* rotor lebih dari 1.220 rpm dan cukup stabil di atas 0,92 pada putaran *shaft* rotor kurang dari atau sama dengan 1.220 rpm. Penurunan efisiensi tersebut cukup signifikan. Namun, jika dibandingkan dengan sistem konverter tunggal saja atau sistem konverter seri saja, efisiensi sistem konverter seri dengan



Gbr. 11 Grafik efisiensi hasil simulasi sistem konverter seri dengan selector.



Gbr. 12 Grafik efisiensi hasil simulasi sistem paralel putaran rotor sama.

TABEL III
TEGANGAN KELUARAN DAN EFISIENSI SISTEM PARALEL DENGAN NILAI MASUKAN RPM YANG BERBEDA

Kec. rotor n1 (rpm)	Kec. rotor n2 (rpm)	Tegangan keluaran V_{out} (V)	Efisiensi η
1.400	1.120	13,727	0,932
1.380	1.140	13,744	0,931
1.360	1.160	13,727	0,930
1.340	1.180	13,735	0,932
1.320	1.200	13,742	0,931
1.300	1.220	13,735	0,928
1.280	1.240	13,742	0,961
1.260	1.260	13,733	0,962
1.240	1.280	13,723	0,961
1.220	1.300	13,757	0,927
1.200	1.320	13,734	0,928
1.180	1.340	13,727	0,931
1.160	1.360	13,735	0,930

selector ini masih lebih baik pada semua kondisi putaran rotor, baik pada rpm tinggi maupun pada rpm yang lebih rendah. Grafik efisiensi sistem konverter seri dengan selector ditunjukkan pada Gbr. 11.

E. Sistem Paralel

Sistem paralel terdiri atas dua buah sistem konverter seri dengan selector yang dihubungkan serta bekerja secara paralel. Rangkaian simulasi sistem paralel diperlihatkan pada Gbr. 8. Simulasi dilakukan dalam dua kondisi. Kondisi pertama adalah ketika putaran shaft rotor generator pada masing-masing sistem berbeda, sedangkan kondisi kedua yaitu ketika putaran shaft rotor generator pada masing-masing sistem sama. Didapatkan arus ripple sekitar 0,86% dan tegangan ripple sekitar 0,85%.

Dari hasil simulasi dengan kondisi pertama, diketahui bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan yang terjaga pada nilai sekitar 14 V, arus sekitar 0,234 A, dan daya sekitar 3,29 W. Efisiensi total sistem cukup stabil pada kisaran 0,93. Efisiensi sistem paralel dengan kondisi pertama ini ditunjukkan pada Tabel III. Dapat dilihat bahwa efisiensi sistem cenderung stabil pada nilai 0,93. Namun, pada nilai masukan rpm yang hampir sama antara kedua generator, yaitu pada 1.240 rpm, 1.260 rpm, dan 1.280 rpm, terjadi peningkatan efisiensi hingga mencapai 0,96. Hal ini terjadi karena adanya pembagian beban yang lebih seimbang, sehingga kedua sistem yang terhubung secara paralel dapat bekerja lebih optimal. Dari tabel dapat dilihat juga bahwa nilai efisiensi terbesar, 0,962, didapatkan pada saat nilai

TABEL IV
RANGKUMAN EFISIENSI (η) DAN TEGANGAN KELUARAN (V) SISTEM

Kec. rotor n (rpm)	Tunggal		Seri		Seri dengan Selector		Paralel	
	η	V	η	V	η	V	η	V
1.400	0,97	14,0	0,95	14,0	0,99	14,0	0,96	14,0
1.350	0,97	14,0	0,92	14,0	0,98	14,0	0,96	14,0
1.300	0,96	14,0	0,94	14,0	0,98	14,0	0,96	14,0
1.250	0,96	14,0	0,92	14,0	0,99	14,0	0,96	14,0
1.240	0,98	14,0	0,91	14,0	0,98	13,9	0,96	14,0
1.230	0,96	14,0	0,90	14,0	0,98	13,8	0,97	14,0
1.220	0,94	14,0	0,97	14,0	0,93	14,0	0,95	14,3
1.210	0,91	14,0	0,92	14,0	0,92	14,0	0,94	14,2
1.200	0,91	13,9	0,92	13,9	0,92	13,8	0,93	14,3
1.150	0,91	13,3	0,92	13,3	0,92	13,3	0,93	14,2
1.100	-	-	-	-	-	-	0,92	14,1
1.050	-	-	-	-	-	-	0,92	14,1
1.000	-	-	-	-	-	-	0,91	14,0
950	-	-	-	-	-	-	0,91	14,0

masukan kedua generator sama-sama sebesar 1.260 rpm. Masukan sistem dalam hal ini adalah besarnya nilai kecepatan putar shaft rotor.

Kemudian, sistem paralel tersebut disimulasikan kembali dengan kondisi kedua, yaitu nilai masukan atau nilai putaran shaft rotor generator diatur sama untuk kedua generator. Dari hasil simulasi, tegangan sistem cukup terjaga sekitar 14 V, bahkan hingga putaran shaft rotor yang rendah, yaitu 950 rpm, yang tidak dapat dicapai pada simulasi sistem-sistem sebelumnya. Hal ini terjadi karena daya dan tegangan yang dibangkitkan dari kedua generator cukup besar untuk menyuplai satu beban 60 Ω . Akibatnya, dimungkinkan terjadinya penguatan hingga nilai yang lebih besar pada putaran shaft rotor yang rendah, sehingga tegangan referensi dapat tetap tercapai. Pada simulasi ini diperoleh arus sekitar 0,233 A dan daya sekitar 3,29 W.

Pada putaran shaft 1.230 rpm hingga 1.000 rpm atau pada awal-awal konfigurasi masing-masing sistem berganti dari tunggal menjadi seri terjadi sedikit peningkatan tegangan. Hal tersebut dapat terjadi karena daya yang dihasilkan oleh sistem cukup besar untuk menyuplai beban sehingga jatuh tegangan pada masing-masing generator tidak terlalu besar saat menopang beban tersebut. Akibatnya, hanya dengan penguatan awal saja tegangan sistem sudah sedikit melebihi 14 V. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam mengoperasikan sistem secara

paralel, perlu adanya penyesuaian kembali batas nilai *duty cycle* penguatan awal, sehingga tidak terjadi penguatan yang berlebih. Dapat juga dilakukan *tuning* ulang pada rangkaian *selector* untuk menunda pergantian konfigurasi hingga mencapai nilai masukan yang lebih kecil lagi.

Efisiensi sistem menjadi lebih baik dibandingkan dengan sebelum dioperasikannya sistem secara paralel. Efisiensi dapat terjaga pada nilai lebih dari 0,9 hingga nilai masukan yang rendah, yaitu 950 rpm, yang tidak dapat dicapai oleh sistem sebelum dioperasikan secara paralel. Grafik efisiensi sistem paralel dengan kondisi kedua ini ditunjukkan pada Gbr. 12. Rangkuman efisiensi dan tegangan keluaran sistem konverter tunggal, sistem konverter seri, sistem konverter seri dengan *selector*, dan sistem paralel dengan pengoperasian kondisi kedua diperlihatkan pada Tabel IV.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Pada sistem konverter tunggal didapatkan hasil bahwa tegangan dapat diatur dan dijaga sesuai dengan tegangan referensi yang diinginkan. Namun, batasan pada besarnya nilai *duty cycle* dan daya yang mampu dibangkitkan oleh generator menyebabkan adanya batasan kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan keluaran yang diinginkan hanya pada nilai masukan 1.220 rpm hingga 1.400 rpm. Efisiensi rata-rata sebesar 0,96 didapatkan pada nilai masukan 1.220 rpm hingga 1.400 rpm, sedangkan untuk nilai masukan kurang dari 1.220 rpm hingga 1.150 rpm didapatkan efisiensi rata-rata sekitar 0,91. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu, bahwa makin berat kinerja *boost converter* (nilai *duty cycle* makin besar atau kenaikan tegangan makin besar), efisiensi konverter akan cenderung menurun.

Pada sistem konverter seri didapatkan karakteristik sistem dalam menjaga besarnya tegangan keluaran yang mirip dengan sistem konfigurasi konverter tunggal, yaitu terbatas pada saat nilai masukan sebesar 1.220 rpm hingga 1.400 rpm. Nilai efisiensi rata-rata konfigurasi konverter seri pada nilai masukan 1.220 rpm hingga 1.400 rpm adalah sekitar 0,93, lebih rendah daripada sistem konfigurasi konverter tunggal. Namun, pada nilai masukan kurang dari 1.220 rpm hingga 1.150 rpm, diperoleh efisiensi rata-rata sekitar 0,92, lebih tinggi daripada sistem konfigurasi konverter tunggal.

Pada sistem yang bekerja secara paralel (multigenerator, multikonverter) didapatkan hasil bahwa tegangan yang dibangkitkan dapat dijaga hingga pada batasan nilai masukan yang lebih luas, dari hasil simulasi nilai tegangan keluaran tetap terjaga sebesar 14 V hingga pada nilai masukan yang lebih rendah, yaitu 950 rpm. Begitu pula dengan nilai efisiensi yang tetap terjaga pada nilai lebih dari 0,9 (> 90%). Pengoperasian sistem secara paralel memerlukan *tuning* lebih lanjut agar tidak terjadi kenaikan tegangan secara berlebih pada sistem akibat daya yang dibangkitkan terlalu besar untuk menopang beban yang sebelumnya hanya ditopang oleh satu sistem saja.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan pada penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Rizki Nurilyas Ahmad, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; metodologi, Rizki Nurilyas Ahmad; perangkat lunak, Rizki Nurilyas Ahmad; validasi, Rizki Nurilyas Ahmad, Mochammad Facta, dan Iwan Setiawan; analisis formal, Rizki Nurilyas Ahmad; investigasi, Rizki Nurilyas Ahmad; sumber daya, Rizki Nurilyas Ahmad; kurasi data, Rizki Nurilyas Ahmad; penulisan—penyusunan draf asli, Rizki Nurilyas Ahmad; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Rizki Nurilyas Ahmad.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada seluruh pihak yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk terlibat dalam penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

REFERENSI

- [1] T. Taufik, "The DC House Project: An Alternate Solution for Rural Electrification," *IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. (GHTC 2014)*, 2014, hal. 174-179.
- [2] V. Michal, "Dynamic Duty-Cycle Limitation of the Boost DC/DC Converter Allowing Maximal Output Power Operations," *2016 Int. Conf. Appl. Electron. (AE)*, 2016, hal. 177-182.
- [3] R. Abhishek, P. Zoting, dan P. Ragit, "Design and Analysis of a DC-DC Buck Converter and Boost Converter to Achieve High Efficiency by Altering Duty Cycle and Input Voltage," *Int. J. Sci., Res. Publ. (IJSRP)*, Vol. 10, No. 6, hal. 731-738, Jun. 2020.
- [4] H. Asy'ari, A. Budiman, dan W. Setiawan, "Desain Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Turbin Horizontal dan Generator Magnet Permanen Tipe Axial Kecepatan Rendah," *Pros. Sem. Nas. Apl. Sains, Teknol. (SNAST) Periode III*, 2012, hal. B-42-47.
- [5] (2020) "Menteri Arifin: Transisi Energi Mutlak Diperlukan," [Online], <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/10/22/2667/menteri.arifin.transisi.energi.mutlak.diperlukan?lang=en>, tanggal akses: 14-Juli-2022.
- [6] A. Ulinuha dan M.B. Ubaidillah, "Vertical Wind Turbine Coupled with Modified Synchronous Generator for Portable Power Generation," *Urecol J. Part E: Eng.*, Vol. 1, No. 2, hal. 103-110, Agu.-Des. 2021.
- [7] (2007) "Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro : Menerangi Desa, Memberdayakan Warga," [Online], <http://lipi.go.id/berita/pembangkit-listrik-tenaga-mikrohidro--menerangi-desa-memberdayakan-warga/1722>, tanggal akses: 6-Des-2020.
- [8] S. Simmons dan W. Lubitz, "Archimedes Screw Generators for Sustainable Energy Development," *2017 IEEE Canada Int. Humanit. Technol. Conf. (IHTC)*, 2017, hal. 144-148.
- [9] A.Y. Hatata, M.M. El-Saadawi, dan S. Saad, "A Feasibility Study of Small Hydro Power for Selected Locations in Egypt," *Energy Strategy Rev.*, Vol. 24, hal. 300-313, Apr. 2019.
- [10] A. Ulinuha dan W.A. Widodo, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Skala Mikro untuk Keperluan Penerangan Jalan," *Proc. the URECOL*, 2018, hal. 128-135.
- [11] A. Ulinuha, "A Hybrid Photovoltaic-Wind Electricity Generation for Street Lighting," *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.*, Vol. 8, No. 5, hal. 1886-1891, Mei 2020.
- [12] Y. Itani, M.R. Soliman, dan M. Kahil, "Recovering Energy by Hydro-Turbines Application in Water Transmission Pipelines: A Case Study West of Saudi Arabia," *Energy*, Vol. 211, hal. 1-12, Nov. 2020.
- [13] J. Titus dan B. Ayalur, "Design and Fabrication of In-Line Turbine for Pico Hydro Energy Recovery in Treated Sewage Water Distribution Line," *Energy Procedia*, Vol. 156, hal. 133-138, Jan. 2019.
- [14] J. Chen, dkk., "A Novel Vertical Axis Water Turbine for Power Generation from Water Pipelines," *Energy*, Vol. 54, hal. 184-193, Jun. 2013.
- [15] N. Hasanzadeh, S.A. Payambarpour, A.F. Najafi, dan F. Magagnato, "Investigation of In-Pipe Drag-Based Turbine for Distributed

- Hydropower Harvesting: Modeling and Optimization,” *J. Clean. Prod.*, Vol. 298, hal. 1-19, Mei 2021.
- [16] T. Kumano, K. Matsunawa, dan R. Nishiyama, “Experimental Test and Feasibility Study of a Micro In-Pipe Hydro Power Generator at a University Building,” *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 28, hal. 380-385, 2018.
- [17] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. Bandung, Indonesia: Penerbit Informatika, 2017.
- [18] S.J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed., New York, AS: McGraw-Hill comp., 2005.
- [19] (2021) “Alat Cas Aki/Acu/Charger Baterai Aki Mobil Motor 12V 2A LCD Display” [Online], <https://tokopedia.link/rxri1Z7SEib>, tanggal akses: 12-Agu-2021.
- [20] (2021) “Turbin Air Mikro Hidro Model Generator Air 10W” [Online] <https://www.tokopedia.com/dearjunastore/turbin-air-mikro-hidro-model-generator-air-10w?refined=true&whid=0>, tanggal akses: 16-Jan-2021.
- [21] Erinofiardi, M. Syaiful, dan A. Prayitno, “Electric Power Generation from Low Head Simple Turbine for Remote Area Power Supply,” *J. Teknol.*, Vol. 74, No. 5, hal. 21-25, Mei 2015.
- [22] E. Fiardi, “Preliminary Design of Archimedean Screw Turbine Prototype for Remote Area Power Supply,” *J. Ocean, Mech., Aerosp., -Sci., Eng.-*, Vol.5, hal. 30-33, Mar. 2014.
- [23] D.W. Hart, *Power Electronics*. New York, AS: McGraw-Hill, 2010.
- [24] K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*. Diedit oleh P.W. Indarto. Diterjemahkan oleh E. Laksono. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1995.
- [25] I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta, Indonesia: Elex Media Komputindo, 2008.
- [26] M.R. Dave dan K.C. Dave, “Analysis of Boost Converter Using PI Control Algorithms,” *Int. J. Eng. Trends, Technol.*, Vol. 3, No. 2, hal. 71-73, 2012.
- [27] R.N. Ahmad, M. Facta, dan I. Setiawan, “Electrical Generation from Waste Energy in Running Water of Household Plumbing,” dipresentasikan pada 6th Int. Conf. Energy, Environ., Epidemiol., Inf. Syst., Semarang, Indonesia, 4-5 Agu. 2021.
- [28] T. Okuda dan T. Hikiyara, “High-Speed Gate Driver Using GaN HEMTs for 20-MHz Hard Switching of SiC MOSFETs,” 2017, *arXiv: 1711.02832*.