

# Pengoperasian Penyimpan Energi Udara Tekan Skala Kecil Mode *Discharged* pada Efisiensi Maksimum

Andi Setiawan<sup>1,2</sup>, Ardyono Priyadi<sup>3</sup>, Mauridhi Hery P.<sup>4,5</sup>

**Abstract**—This paper presents the results of research on the development of small-scale compressed air storage operating at its maximum efficiency. In contrast to what was done in previous studies using a buck converter on the output side of the generator, here a boost converter is used. The use of a boost converter allows the turbines to operate at a reasonably low speed and can still produce the desired voltage for the load, which is 12 volts. This strategy is chosen based on the characteristics of the turbine which indicates that the turbine will operate with better efficiency if operated at lower speeds. In this study, the search for maximum efficiency points is done by perturb and observe (P&O) method. The simulation results show that this strategy is effective for obtaining operating points with maximum efficiency if the load power is small relative to the nominal power of the turbine-generator, which is below 50%.

**Intisari**—Dalam makalah ini disajikan hasil penelitian untuk sistem penyimpanan energi udara tekan skala kecil yang diupayakan untuk beroperasi pada efisiensi maksimumnya. Berbeda dengan yang dilakukan pada penelitian sebelumnya yang menggunakan *buck converter* pada sisi keluaran generatornya, pada makalah ini digunakan sebuah *boost converter*. Penggunaan *boost converter* ini dimaksudkan agar turbin-generator dapat dioperasikan dengan kecepatan yang cukup rendah tapi tetap dapat menghasilkan tegangan keluaran sesuai dengan tegangan nominal beban, yaitu 12 volt. Strategi ini dipilih karena karakteristik turbin memperlihatkan efisiensi yang lebih tinggi jika turbin dioperasikan dengan kecepatan yang lebih rendah. Dalam makalah ini, pencarian titik efisiensi maksimum dilakukan dengan *perturb and observe* (P&O). Hasil percobaan menunjukkan bahwa penempatan *boost*

*converter* ini efektif untuk mendapatkan titik pengoperasian dengan efisiensi maksimum jika daya beban relatif cukup kecil terhadap daya nominal turbin-generator, yaitu di bawah 50%.

**Kata Kunci**—Penyimpan Energi Udara Tekan, *Small-Scale CAES*, MEPT, P&O.

## I. PENDAHULUAN

Penerapan sistem penyimpanan energi udara tekan atau *Compressed Air Energi Storage* (CAES) untuk keperluan pengoperasian kelistrikan skala besar sudah cukup berhasil dan menjadi pilihan yang cukup menarik jika hasil studi kelayakannya memungkinkan [1], [2]. Hal ini ditunjukkan dengan sudah adanya beberapa fasilitas CAES skala besar di berbagai negara seperti Maroko dengan daya terpasang 400 MW, di Korea dan Israel masing-masing dengan kapasitas 300 MW, di Jerman dengan kapasitas 290 MW, dan yang terkecil adalah di Amerika dengan kapasitas 110 MW [3]–[6].

Sebagai topik penelitian, selain pembahasan tentang teknik CAES konvensional yang memanfaatkan gua bawah tanah sebagai media penyimpanan udara tekannya, teknik lain juga sudah mulai diteliti, di antaranya adalah dengan memanfaatkan kantong energi bawah air sebagai tabung udara tekan [7]. Analisis termodinamika untuk meneliti kemungkinan peningkatan unjuk kerja sistem ini dibahas dalam [8]–[10]. Penelitian yang lebih fokus pada keekonomian sistem ini juga banyak dilakukan [11], [12].

Sejalan dengan keberhasilan pemanfaatan teknologi ini dalam skala besar, penelitian *small-scale CAES* atau yang sering disingkat dengan SS-CAES juga mulai banyak dilakukan. Beberapa makalah membahas tentang cara melakukan pengaturan pada sisi pelepasan (*discharged*) dari sistem ini [13]–[17]. Penelitian lain sudah melakukan peninjauan dari dua sisinya (*charged and discharged*) dan dengan rencana pemanfaatannya untuk mencatu daya beban tertentu [18]–[20]. Dalam beberapa makalah lain dibahas tentang kombinasi sistem SS-CAES ini dengan sistem penyimpanan energi yang lain [13], [18], [21].

Berkaitan dengan isu rendahnya efisiensi turbin kecil dari jenis *air motor* tipe *vane*, beberapa makalah yang berkaitan dengan sistem udara tekan skala kecil ini menawarkan penggunaan *air motor* tipe *piston* yang diklaim memiliki nilai efisiensi teoritis sampai 70% [18], [19], [22], [23]. Salah satu contoh *air motor* tipe yang memang sudah diproduksi untuk keperluan komersial adalah seperti dalam [24].

Dalam makalah ini dibahas sebuah strategi pengoperasian sistem SS-CAES pada titik efisiensi maksimumnya yang biasa diistilahkan dengan *maximum efficiency point tracking* (MEPT) ketika melakukan pelepasan energi ke beban (*discharged*). Berbeda dengan apa yang dilakukan pada penelitian

<sup>1</sup> Mahasiswa, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jln. Teknik Mesin, Gedung B, C, dan AJ, Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, 60111 Indonesia (telp: 031- 5994251; fax: 031-5931237; e-mail: andi.setiawan14@mhs. ee.its.ac.id)

<sup>2</sup> Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jln. Kalimantan no. 37, Kampus Tegalboto, Jember, Jawa Timur, 68121 Indonesia (telp/fax: 0331-484977; e-mail: setiawan.teknik@unej.ac.id)

<sup>3</sup> Dosen, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jln. Teknik Mesin, Gedung B, C, dan AJ, Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, 60111 Indonesia (telp: 031- 5994251; fax: 031-5931237; e-mail: priyadi@ee.its.ac.id)

<sup>4</sup> Dosen, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jln. Teknik Mesin, Gedung B, C, dan AJ, Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, 60111 Indonesia (telp: 031- 5994251; fax: 031-5931237; e-mail: hery@ee.its.ac.id)

<sup>5</sup> Dosen, Departemen Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jln. Teknik Mesin, Gedung B, C, dan AJ, Kampus ITS, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, 60111 Indonesia (telp: 031- 5994251; fax: 031-5931237; e-mail: hery@ee.its.ac.id)

sebelumnya, yang menempatkan *buck converter* pada *output* generatornya, dalam penelitian ini digunakan *boost converter* agar sistem dapat menemukan titik operasi dengan efisiensi maksimum sambil tetap dapat menjamin agar beban mendapatkan daya sesuai dengan daya nominalnya yang diindikasikan dengan tegangan nominal sebesar 12 volt. Pilihan untuk menggunakan *boost converter* didasarkan pada kurva karakteristik efisiensi terhadap tekanan udara dan kecepatan poros turbin-generator yang menunjukkan bahwa untuk keluaran daya tertentu turbin akan beroperasi dengan efisiensi yang lebih baik jika dioperasikan pada kecepatan yang lebih rendah.

Pada penelitian-penelitian yang menggunakan sebuah *vane type air motor* sebagai turbin, efisiensi terbaik pada setiap nilai tekanan justru berada pada nilai kecepatan yang lebih rendah dari kecepatan yang menghasilkan daya maksimum yang secara teoretis adalah setengah dari kecepatan tanpa beban pada setiap nilai tekanan (*free rotate speed*) [14], [15].

Alasan lain pemilihan strategi ini adalah karena dengan menggunakan *boost converter* sistem akan dapat menghasilkan tegangan yang cukup tinggi dibandingkan dengan menggunakan *buck converter* yang mengharuskan turbin berputar dengan kecepatan yang tinggi jika beban mensyaratkan tegangan nominal yang cukup tinggi. Kecepatan turbin yang tinggi akan mengakibatkan turbin tidak dapat beroperasi pada daerah kecepatan optimum untuk mendapatkan efisiensi yang terbaik.

Dalam makalah ini, untuk melakukan pencarian titik operasi dengan efisiensi maksimum pada setiap nilai daya bebannya, digunakan metode *Perturb and Observe* (P&O) dengan mengubah-ubah nilai *duty cycle* dari sinyal pemicuan MOSFET pada *boost converter*. Walaupun metode ini mengakibatkan osilasi nilai kecepatan di sekitar titik operasi optimumnya, tetapi osilasi ini berdampak kecil terhadap tegangan beban karena adanya *boost converter*.

II. KONFIGURASI DAN PEMODELAN KOMPONEN SISTEM

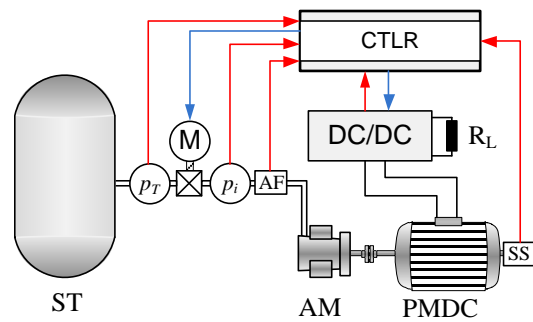
A. Konfigurasi Komponen Sistem SS-CAES

Konfigurasi sistem *SS-CAES* pada saat pelepasan (*discharged*) adalah seperti ditunjukkan dalam Gbr. 1. ST adalah tangki udara (*storage tank*) yang berfungsi menampung udara bertekanan yang pada saat pelepasan akan disalurkan melalui sebuah katup linier yang digerakkan dengan sebuah motor *servo* (M).

Tekanan  $p_T$  adalah tekanan yang terukur di dalam tangki udara ST dan  $p_i$  adalah tekanan udara pada saluran udara masuk ke turbin atau *air motor*. Dalam sistem riil, tekanan udara ini diindera dengan menggunakan sensor tekanan yang keluarannya dapat dibaca dengan peranti pengendali (*controller*). Selain diukur tekanannya, udara yang masuk ke turbin juga diukur kecepatannya dengan sensor aliran udara atau *air flow sensor* (AF).

Poros turbin *air motor* dikopel secara langsung (tanpa perbandingan roda gigi) dengan sebuah generator *Permanent Magnet DC* (PMDC) sehingga kecepatan generator sama dengan kecepatan turbin. Kecepatan turbin-generator ini diindera dengan sebuah *speed sensor* (SS). Daya listrik

keluaran generator dihubungkan dengan sebuah *boost converter* (DC/DC) yang mencatu beban resistif ( $R_L$ ) yang bervariasi tetapi memiliki tegangan nominal sama, yaitu 12 volt.



Gbr. 1 Rangkaian komponen sistem SS-CAES.

Pada sistem ini digunakan sebuah pengendali (CTRL) yang berfungsi mengatur pembukaan katup M dan *duty cycle* sinyal pemicuan *boost converter*. Pengaturan katup dimaksudkan agar turbin menghasilkan daya mekanik sedemikian hingga beban mendapatkan daya elektrik yang cukup. Kecukupan daya elektrik dan mekanik ini diindikasikan dengan nilai tegangan terminal beban sebesar 12 volt. Dengan kata lain, fungsi utama dari pengaturan katup adalah untuk menjamin nilai tegangan pada terminal beban sebesar 12 volt. Penalaan *duty cycle* dimaksudkan untuk mengatur kecepatan turbin-generator agar sistem beroperasi pada efisiensi maksimumnya.

B. Pemodelan Tangki Udara ST

Dengan asumsi bahwa udara yang digunakan mengandung sekitar 80% Nitrogen ( $N_2$ ), maka hubungan antara temperatur ( $T$ ), volume ( $V$ ), dan tekanan udara dalam tangki ( $p_T$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut [8], [25], [26].

$$p_T V = mRT \tag{1}$$

dengan  $R$  adalah konstanta spesifik gas dalam satuan  $J/(kg.K)$  dan  $m$  adalah massa dari gas dalam satuan  $kg$ . Tekanan, volume, dan temperatur dalam (1) dinyatakan dalam satuan Pascal,  $m^3$ , dan Kelvin.

Massa udara yang mengalir ke luar dari tangki dapat diturunkan dari (1) sebagai berikut.

$$\dot{m} = \frac{V_T}{RT} \frac{dp_T}{dt} \tag{2}$$

Aliran massa  $\dot{m}$  merupakan variabel masukan pada model tangki udara bersama dengan volume tangki udara ( $V_T$ ) dan  $R$  serta  $T$ . Nilai  $\dot{m}$  didapatkan dari nilai aliran volume  $\dot{V}_a$  sebagai keluaran dari model turbin *air motor* dikalikan dengan sebuah konstanta  $\rho$  yang merupakan nilai kerapatan udara.

Integrasi dari aliran massa ini memungkinkan perhitungan total massa udara yang keluar dari tangki udara dan juga perhitungan penurunan tekanan udara dalam tangki seperti tertulis dalam (3) dan (4).

$$m_s(t) = m(0) - \int \dot{m} dt \tag{3}$$

$$p_T(t) = \frac{RT}{V_T} m_s(t) \tag{4}$$

Dalam (4),  $p_r(t)$  adalah tekanan udara dalam tangki pada detik ke- $t$  dan  $m_s(t)$  adalah massa udara dalam tangki pada detik ke- $t$ . Informasi tentang nilai tekanan udara pada tangki ini diperlukan untuk menjamin bahwa tersedia cukup tekanan udara untuk diatur menjadi tekanan udara yang diperlukan sebagai masukan untuk *air motor*.

C. Pemodelan Turbin Air Motor

Pemodelan untuk turbin *air motor* didasarkan pada informasi yang disediakan oleh pabrikan *air motor* tipe LZB 14 AR034 (100W) [27]. Tipe *air motor* ini juga digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya [13], [15], [16]. Daya mekanis keluaran dari *air motor* ( $P_m$ ) dalam satuan watt sebagai fungsi dari kecepatan ( $N_r$ ) dalam satuan rpm dan tekanan udara pada saluran masuk *air motor* ( $p_i$ ) dalam satuan bar dinyatakan sebagai berikut.

$$P_m = \frac{\pi}{30} T_o(p_i) \left[ N_r - \frac{N_r^2}{N_o(p_i)} \right] \tag{5}$$

Karakteristik lain yang diperlukan dalam pemodelan turbin ini adalah aliran volume ( $\dot{V}_a$ ) yang juga dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan dan tekanan sebagai berikut.

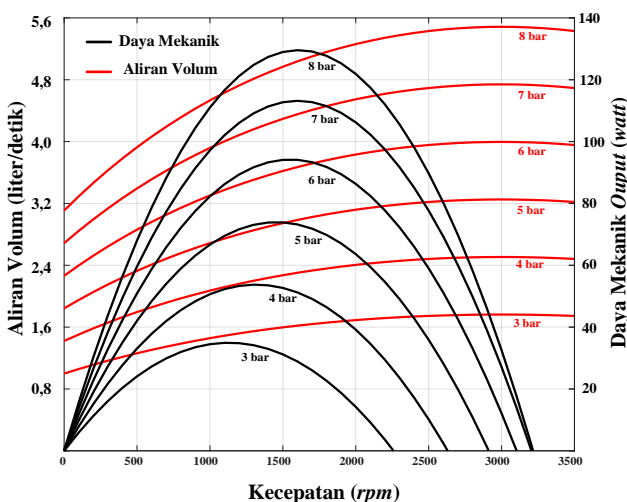
$$\dot{V}_a = \dot{V}_{max}(p_i) \left[ c_{a1} - c_{a2} e^{\left[ \frac{N_r - c_1}{c_2} \right]^2} \right] \tag{6}$$

dengan  $\dot{V}_{max}(p_i)$  adalah nilai maksimum aliran volume pada saat tekanan  $p_i$ . Dalam persamaan tersebut,  $c_1$ ,  $c_2$ , dan  $c_3$  adalah konstanta yang didapatkan dari proses *curve fitting* dari kurva karakteristik aliran volume yang disediakan oleh pabrikan *air motor* LZB 14 AR034-11.

Untuk dapat menghitung efisiensi, diperlukan informasi daya masukan turbin. Dalam kondisi *isentropic*, daya masukan *air motor* ( $P_{am}$ ) dapat dihitung dengan (7) [18].

$$P_{am} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_a \dot{V}_a \left[ \left( \frac{p_i}{p_a} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \tag{7}$$

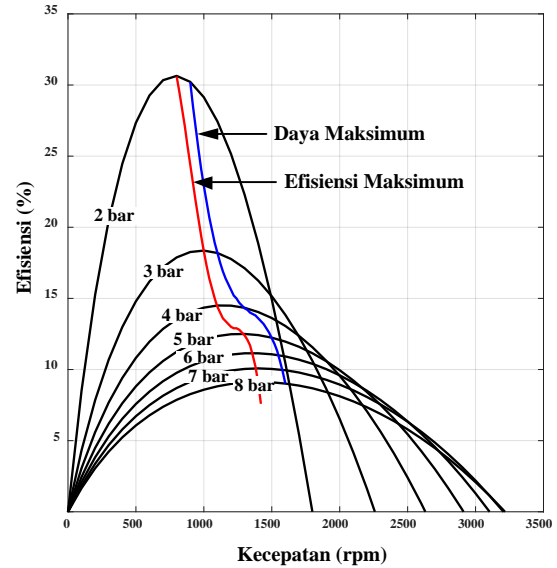
dengan  $p_a$  adalah tekanan udara luar dan  $\gamma$  adalah konstanta *isentropic*.



Gbr. 2 Kurva karakteristik *air motor* hasil pemodelan.

Kurva karakteristik turbin yang dihasilkan dengan menggunakan model *air motor* ini adalah seperti yang terlihat dalam Gbr. 2. Kurva karakteristik daya dan aliran volume sebagai fungsi tekanan dan kecepatan ini sama seperti yang diinformasikan dalam spesifikasi *air motor* dari pabrikan.

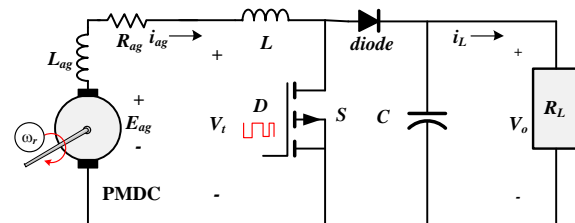
Dengan memilih nilai konstanta *isentropic* 1,4 diperoleh kurva karakteristik efisiensi sebagai fungsi dari kecepatan dan tekanan seperti terlihat dalam Gbr. 3.



Gbr. 3 Kurva efisiensi *air motor* hasil pemodelan.

D. Pemodelan Generator PMDC

Model rangkaian generator PMDC yang dikombinasikan dengan sebuah *boost converter* ditunjukkan dalam Gbr. 4.



Gbr. 4 Model rangkaian generator PMDC dan *boost converter*.

Persamaan dinamik dari generator PMDC yang digerakkan dengan sebuah penggerak mula dengan torsi sebesar  $T_m$  dan kecepatan sudut  $\omega_r$  dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut [28].

$$T_m = T_{eg} + B_t \omega_r + J_t \frac{d\omega_r}{dt} \tag{9}$$

$$E_{ag} = K_m \omega_r \tag{10}$$

$$T_{eg} = K_e i_{ag} \tag{11}$$

dengan  $K_e$  dan  $K_m$  adalah konstanta torsi dan konstanta kecepatan dari generator,  $B_t$  adalah total koefisien gesek dari kombinasi turbin-generator, dan  $J_t$  adalah momen inersia total dari turbin-generator.  $E_{ag}$  dan  $i_{ag}$  adalah gaya gerak listrik yang dibangkitkan dan arus pada jangkar generator.

Selanjutnya, persamaan tegangan pada terminal generator  $V_t$  dengan nilai resistansi dan induktansi jangkar  $R_{ag}$  dan  $L_{ag}$  dapat dituliskan sebagai

$$V_t = E_{eg} - R_{ag}i_{ag} - L_{ag} \frac{di_{ag}}{dt} \tag{12}$$

Akhirnya, persamaan tegangan keluaran dari *boost converter* DC/DC ( $V_o$ ) atau tegangan terminal beban yang merupakan fungsi dari *ducty cycle* ( $D$ ) dari sinyal pemicuan pada MOSFET dari *boost converter* tersebut dapat dinyatakan dengan (13).

$$V_o = \eta_C \frac{V_t}{1-D} \tag{13}$$

Untuk pemodelan ini digunakan informasi dari *datasheet* motor PMDC MOOG C-34-L60-10 [29]. Data komponen yang diperlukan untuk *boost converter* DC/DC didapatkan dengan perhitungan untuk mendapatkan *boost converter* dengan tegangan keluaran nominal 12 volt dengan *range* tegangan masukan 3.5–11 volt dengan daya nominal 100 watt. Tabel I menunjukkan nilai-nilai parameter yang digunakan pada pemodelan sistem ini.

TABEL I  
DATA GENERATOR DAN KOMPONEN

Simbol	Deskripsi	Nilai
$R_{ag}$	Resistansi Jangkar	0,43 $\Omega$
$L_{ag}$	Induktansi Jangkar	0,9 mH
$K_e, K_m$	Konstanta Torsi dan Konstanta Kecepatan	0,08 N.m/A
$J_t$	Momen Inersia total	$2,11845 \times 10^{-4}$ kg/m <sup>2</sup>
$B_t$	Koefisien Gesekan total	$2,0944 \times 10^{-6}$ N.m.s
$C$	Kapasitansi <i>boost converter</i>	0,0051 F
$L$	Induktansi <i>boost converter</i>	$2,1333 \times 10^{-4}$ H

E. Pemodelan Katup Linier

Katup yang digerakkan dengan motor *servo* yang digunakan dalam makalah ini dimodelkan berdasarkan pemodelan motor DC yang digunakan untuk menggerakkan tuas pemutar katup. Pemodelan untuk katup ini dinyatakan dengan persamaan fungsi alih kecepatan terhadap tegangan sebagai berikut.

$$\frac{\omega_s(s)}{E_a(s)} = \frac{K_{is}}{s^2 J_{eq} L_{as} + s J_{eq} R_{as} + K_{is} K_{bs}} \tag{14}$$

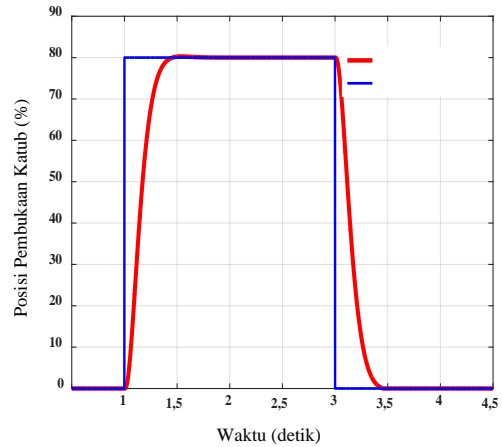
$$J_{eq} = J_1 + K_g^2 J_m \tag{15}$$

Dalam (15),  $K_g$  adalah perbandingan roda gigi motor *servo*, sedangkan  $J_1$  dan  $J_m$  adalah inersia dari katup dan inersia motor *servo*. Selanjutnya, perbandingan tekanan pada masukan dan keluaran dari katup adalah rasio dari pembukaan katup aktual terhadap pembukaan katup total. Dalam penelitian ini, nilai-nilai parameter katup dipilih sedemikian hingga dihasilkan respons pembukaan katup yang sesuai untuk dirangkaikan dengan model sistem secara keseluruhan. Respons katup yang dihasilkan dengan pemodelan ini adalah sebagaimana ditunjukkan dalam Gbr. 5.

III. METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dengan merancang rangkaian sistem SS-CAES pada mode *discharged*, yaitu menyusun komponen-

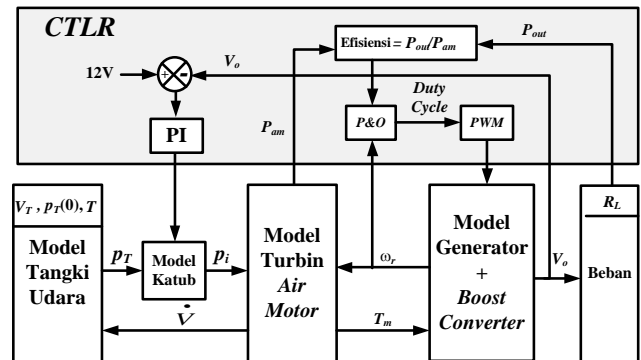
komponen yang akan terlibat dalam sistem ini. Komponen-komponen tersebut kemudian dimodelkan dengan menggunakan Simulink MATLAB agar nantinya dapat disimulasikan.



Gbr. 5 Respons pembukaan katup terhadap sinyal perintah.

Sebagai validasi, hasil simulasi model komponen ini dibandingkan dengan unjuk kerja komponen-komponen riilnya berdasarkan informasi yang tersedia pada *datasheet* komponen dan juga dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan komponen yang sama.

Sistem SS-CAES berbasis model ini kemudian disimulasikan dengan pengkondisian beban resistif untuk dapat melihat efektivitas strategi MEPT dengan menempatkan *boost converter* pada keluaran generator ini. Diagram blok yang menyatakan hubungan antar model ini dapat digambarkan seperti dalam Gbr. 6.



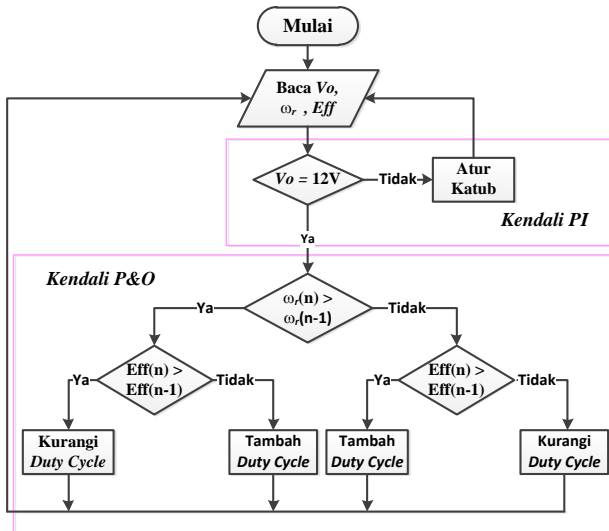
Gbr. 6 Diagram blok model sistem SS-CAES.

Dalam diagram tersebut, sebuah *Proportional Integral controller* (*PI controller*) digunakan untuk mengatur pembukaan katup agar sistem menghasilkan daya yang cukup untuk beban saat itu, yang dinyatakan dengan tegangan 12 volt. Dengan kata lain, tegangan nominal beban adalah juga 12 volt.

Pengendali P&O dalam diagram blok Gbr. 6 adalah pengendali yang bekerja dengan sistem *perturb and observe* untuk menala nilai *duty cycle* dari blok *Pulse Width Modulation* (*PWM*) untuk pemicuan *gate* MOSFET dari *boost converter*. Pengendali P&O ini bekerja berdasarkan dua informasi, yaitu perhitungan efisiensi dan kecepatan.

Target utama *tracking P&O* adalah untuk mendapatkan nilai efisiensi maksimum yang tertinggi. P&O hanya bekerja untuk mengatur *duty cycle* dari *boost converter* dan mengawasi perubahan efisiensi. Informasi kecepatan ( $\omega_r$ ) digunakan untuk menentukan perubahan *duty cycle* yang akan dilakukan, akan ditambah atau dikurangi.

Algoritme P&O ini digambarkan dalam diagram alir dalam Gbr. 7. Dalam diagram alir tersebut terlihat bahwa aksi P&O dibagi menjadi dua berdasarkan perubahan kecepatan yang terdeteksi dengan sensor kecepatan. Jika kecepatan yang terdeteksi pada pengambilan data ke- $n$  lebih tinggi dari kecepatan sebelumnya, maka aksi P&O akan dilakukan seperti alur diagram alir sebelah kiri, demikian pula sebaliknya.



Gbr. 7 Diagram alir algoritme P&O untuk sistem dalam penelitian ini.

Katup pengatur tekanan udara tidak bekerja dengan pengendali P&O tapi bekerja dengan mendeteksi perubahan kecepatan yang mengakibatkan perubahan tegangan pada terminal beban. Setiap perubahan tegangan ini dianggap sebagai kondisi transien. Saat terjadi kondisi transien yang diakibatkan oleh adanya penambahan atau pelepasan beban, *PI controller* akan bekerja untuk segera mengatur katup agar tegangan keluaran segera kembali ke 12 volt.

Setelah *PI controller* selesai bekerja mengembalikan tegangan keluaran ke 12 volt, dilanjutkan dengan aksi pencarian (*tracking*), yaitu pengendali P&O bekerja melakukan pengubahan *duty cycle* dari *boost converter* agar didapatkan efisiensi yang lebih baik.

Simulasi untuk menguji strategi MEPT ini dilakukan dengan membuat pembebanan pada sistem berubah pada saat tertentu seperti terlihat dalam Tabel II. Dengan perubahan beban ini sistem akan merespons dengan segera menyediakan daya sesuai yang dibutuhkan beban dan melakukan pencarian titik operasi efisiensi terbaiknya dengan melakukan penalaan *duty cycle* dari *boost converter*. Hasil pengujian dan pembahasannya disajikan pada bagian IV.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan pembebanan yang dijadwal seperti dalam Tabel II, hasil simulasi sistem MEPT ini adalah seperti terlihat dalam

Gbr. 8. Dalam gambar tersebut juga ditunjukkan hasil simulasi sistem yang tidak menggunakan *boost converter* sebagai perbandingan.

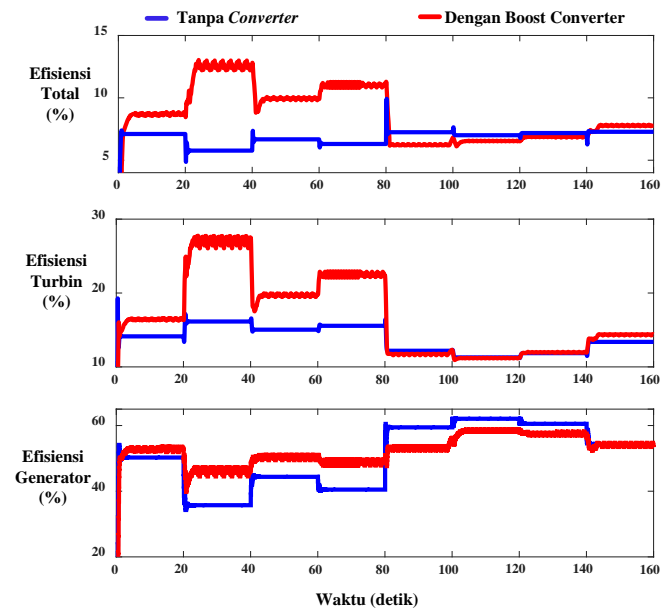
TABEL II  
WAKTU DAN PERUBAHAN PEMBEBANAN

Waktu (detik)	Daya Beban (watt)	Waktu (detik)	Daya Beban (watt)
0-20	24	80-100	42
20-40	12	100-120	54
40-60	18	120-140	46
60-80	15	140-160	30

Dalam Gbr. 8 terlihat bahwa untuk daya yang relatif kecil, strategi ini dapat meningkatkan efisiensi dengan signifikan dibandingkan dengan pengoperasian sistem tanpa *boost converter*, yang akan berhenti pada titik katup selesai bekerja untuk menghasilkan tegangan 12 volt pada beban. Dengan kata lain, efisiensi sistem yang diusulkan ini lebih baik dari sistem yang tidak menggunakan *boost converter* pada keluaran generatornya.

Dari Gbr. 8 yang memperlihatkan efisiensi turbin dan efisiensi generator terlihat bahwa pada daerah waktu 80-140 detik, efisiensi total sistem tanpa *boost converter* menunjukkan hasil yang lebih baik. Hal ini diakibatkan oleh rugi daya *boost converter* itu sendiri. Hal ini ditunjukkan pula dengan berimpitnya grafik efisiensi dari turbin *air motor*.

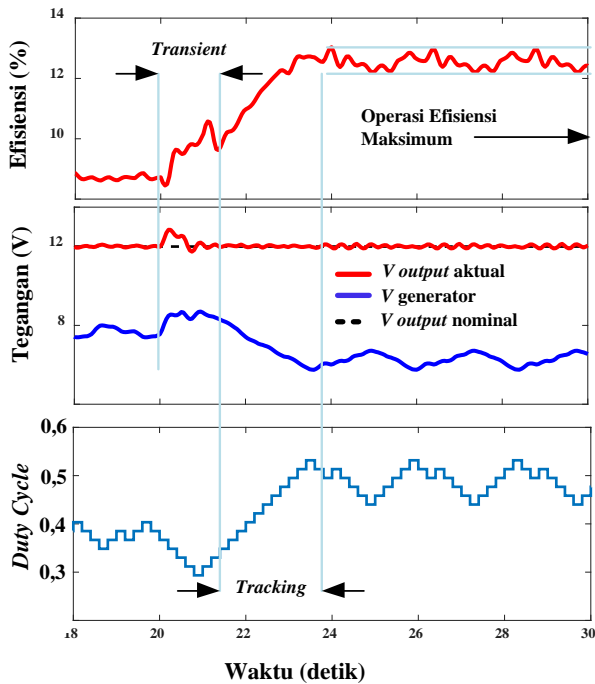
Terlebih lagi, dengan menetapkan tegangan nominal beban sebesar 12 volt berarti MOOG C-34-L60-10 hanya akan mampu menghasilkan daya setengah dari daya nominalnya, karena beroperasi pada setengah kecepatan *rating* yang akan menghasilkan daya nominalnya, yaitu 100 watt. Dengan beroperasi di kecepatan yang cukup rendah ini generator menjadi tidak beroperasi pada efisiensi yang optimum.



Gbr. 8 Perbandingan efisiensi sistem dengan dan tanpa *boost converter*.

Gbr. 9 disajikan untuk lebih memperjelas cara strategi kombinasi antara *PI controller* yang mengatur pembukaan katup dan P&O untuk mencari nilai *duty cycle* yang

menyebabkan operasi efisiensi maksimum. Dari Gbr. 9 terlihat bahwa aktivitas penalaan *duty cycle* dilakukan terus-menerus setiap 0,2 detik. Hal ini adalah jangka waktu yang dipilih untuk *P&O tracking*.



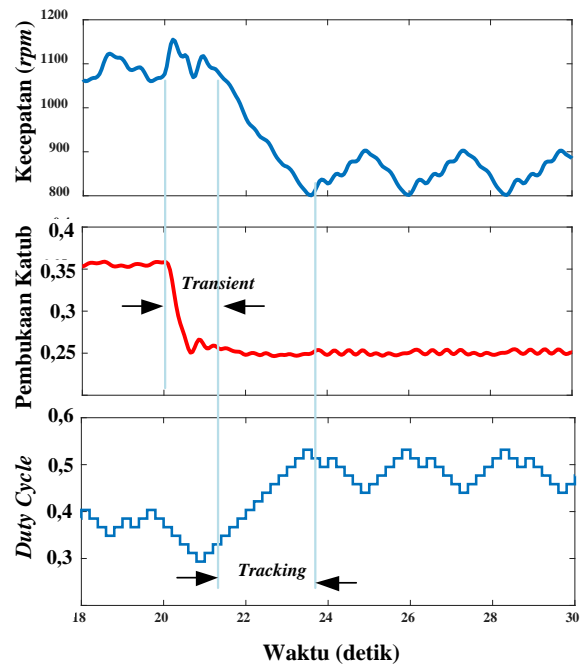
Gbr. 9 Tegangan, efisiensi, dan *duty cycle* pada setiap kondisi.

Gbr. 10 menjelaskan hal lain tentang teknik *tracking* ini. Terlihat bahwa pada saat transien dengan pembukaan katup berubah banyak tetapi kecepatan segera kembali pada kecepatan sebelum transien atau sebelum perubahan beban terjadi. Sebaliknya, pada saat *tracking*, pembukaan katup relatif kecil walaupun perubahan kecepatan relatif besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat *tracking* katup tidak berperan banyak dan aktivitas *tracking* lebih banyak dipengaruhi oleh penalaan *duty cycle* pada *boost converter*.

Kekurangan teknik *P&O tracking* dalam penelitian ini adalah bahwa *delta duty cycle* yang digunakan adalah tetap, sehingga untuk beban rendah terlihat adanya osilasi yang lebih besar di daerah operasi efisiensi maksimumnya.

Dari pembahasan hasil simulasi untuk sistem SS-CAES dengan menempatkan *boost converter* pada keluaran generator ini, terlihat bahwa sistem dapat melakukan *tracking* efisiensi maksimum pada setiap kondisi beban, yaitu dengan tetap mempertahankan tegangan terminal beban sebesar 12 volt.

Sebagai perbandingan, akan sedikit dibahas tentang hasil penelitian untuk sistem yang hampir sama yang sudah dipublikasikan sebelumnya [15]. Walaupun tidak dinyatakan secara eksplisit nilai tegangan keluaran yang digunakan untuk mencatu beban-beban yang digunakan pada percobaan dalam penelitian ini, dari spesifikasi generator yang digunakan, yaitu LEMAC/65167-008 (24V, 3000 rpm, 250 W) dan dengan beberapa informasi berupa grafik hasil percobaan yang menyajikan data kecepatan dan efisiensi, terlihat bahwa efisiensi maksimumnya tercapai pada kecepatan di bawah 1.500 rpm.



Gbr. 10 Kecepatan, pembukaan katup, dan *duty cycle* pada setiap kondisi.

Kecepatan ini tidak memungkinkan LEMAC/65167-008 untuk menghasilkan tegangan 12 volt karena kecepatan ini kurang dari setengah dari kecepatan nominalnya. Ditambah lagi dengan informasi bahwa pada sistem ini digunakan *buck converter* yang berarti bahwa tegangan keluaran generator masih diturunkan lagi nilainya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada sistem ini digunakan tegangan nominal beban yang kurang dari 12 volt.

Dengan menggunakan *boost converter* seperti yang diusulkan dalam makalah ini, sistem akan dapat beroperasi pada kecepatan di bawah 1.000 rpm dan tetap dapat mencatu beban dengan tegangan nominal 12 volt dengan efisiensi maksimum seperti capaian pada hasil penelitian sebelumnya yaitu 12,7%.

Walaupun hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk daya beban yang cukup besar, sistem yang diusulkan ini tidak dapat menghasilkan efisiensi yang lebih baik, tetapi untuk daya yang kecil dengan rangkaian turbin-generator dioperasikan pada kecepatan yang rendah, metode ini cukup efektif. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengatasi permasalahan ini.

V. KESIMPULAN

Dari pembahasan hasil simulasi di bagian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa teknik atau strategi MEPT dengan menempatkan *boost converter* pada keluaran generator ini cukup efektif untuk daya beban yang relatif kecil terhadap beban nominal dari rangkaian turbin-generator. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan tegangan output 12 volt dengan capaian efisiensi maksimum 12,7%.

Pada daya yang relatif besar, *tracking* efisiensi menghasilkan nilai di bawah efisiensi sistem tanpa *converter*. Hal ini menyatakan bahwa efisiensi maksimum yang dapat dicapai

pada rangkaian tubin-generator adalah sebesar nilai ini. Efisiensi sistem dengan *boost converter* menjadi lebih kecil dari nilai ini karena adanya pengali tambahan, yaitu nilai efisiensi dari *boost converter* itu sendiri.

Metode *P&O* yang digunakan dalam penelitian ini masih memungkinkan untuk diperbaiki unjuk kerjanya. Hal ini belum dilakukan karena titik berat dari penelitian dan pembahasan di sini adalah strategi MEPT dengan menggunakan *boost converter* yang sekaligus merupakan hal yang berbeda dengan penelitian-penelitian serupa yang dilakukan sebelumnya.

#### REFERENSI

- [1] B. Cleary, A. Duffy, A. O'Connor, M. Conlon, dan V. Fthenakis, "Assessing the Economic Benefits of Compressed Air Energy Storage for Mitigating Wind Curtailment," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 6, No. 3, hal. 1021–1028, Jul 2015.
- [2] H.M. Hafiz, N. Yorino, Y. Sasaki, dan Y. Zoka, "Feasible Operation Region for Dynamic Economic Dispatch and Reserve Monitoring: Feasible Operation Region for DED," *Eur. Trans. Electr. Power*, Vol. 22, No. 7, hal. 924–936, Okt 2012.
- [3] Z.M. Badarudin, A. Ahmad, A. Ab Rahman, dan M.H. Hairi, "Overview of Mini Scale Compressed Air Energy Storage System," dipresentasikan pada *4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2010, hal. 458–462.
- [4] A. Arabkoohsar, L. Machado, M. Farzaneh-Gord, dan R.N.N. Koury, "Thermo-Economic Analysis and Sizing of a PV Plant Equipped with a Compressed Air Energy Storage System," *Renew. Energy*, Vol. 83, hal. 491–509, Nov 2015.
- [5] T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, dan J. Perron, "Optimal Management of Compressed Air Energy Storage in a Hybrid Wind-Pneumatic-Diesel System for Remote Area's Power Generation," *Energy*, Vol. 84, hal. 267–278, Mei 2015.
- [6] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, dan C. Krupke, "Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology," *Energy Procedia*, Vol. 62, hal. 603–611, 2014.
- [7] A.J. Pimm, S.D. Garvey, dan M. de Jong, "Design and Testing of Energy Bags for Underwater Compressed Air Energy Storage," *Energy*, Vol. 66, hal. 496–508, Mar 2014.
- [8] G. Grazzini dan A. Milazzo, "Thermodynamic Analysis of CAES/TES Systems for Renewable Energy Plants," *Renew. Energy*, Vol. 33, No. 9, hal. 1998–2006, Sep 2008.
- [9] G. Grazzini dan A. Milazzo, "A Thermodynamic Analysis of Multistage Adiabatic CAES," *Proc. IEEE*, Vol. 100, No. 2, hal. 461–472, Feb 2012.
- [10] P. Zhao, Y. Dai, dan J. Wang, "Design and Thermodynamic Analysis of a Hybrid Energy Storage System Based on A-CAES (Adiabatic Compressed Air Energy Storage) and FESS (Flywheel Energy Storage System) for Wind Power Application," *Energy*, Vol. 70, hal. 674–684, Jun 2014.
- [11] N.S. Pearre dan L.G. Swan, "Technoeconomic Feasibility of Grid Storage: Mapping Electrical Services and Energy Storage Technologies," *Appl. Energy*, Vol. 137, hal. 501–510, Jan 2015.
- [12] E. Fertig dan J. Apt, "Economics of Compressed Air Energy Storage to Integrate Wind Power: A Case Study in ERCOT," *Energy Policy*, Vol. 39, No. 5, hal. 2330–2342, Mei 2011.
- [13] S. Lemofouet dan A. Rufer, "A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors with Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 53, No. 4, hal. 1105–1115, Jun 2006.
- [14] A. Rufer dan S. Lemofouet, "Efficiency Considerations and Measurements of a Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors," *Power Electron. Motion Control Conf. 2006 EPE-PEMC 2006 12th Int.*, 2006, hal. 2077–2081.
- [15] V. Kokaew, M. Moshrefi-Torbati, dan S.M. Sharkh, "Maximum Efficiency or Power Tracking of Stand-alone Small Scale Compressed Air Energy Storage System," *Energy Procedia*, Vol. 42, hal. 387–396, 2013.
- [16] V. Kokaew, S.M. Sharkh, dan M. Moshrefi-Torbati, "Maximum Power Point Tracking of a Small-Scale Compressed Air Energy Storage System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 2, hal. 985–994, Feb 2016.
- [17] G. Kleiser dan V. Rauth, "Dynamic Modelling of Compressed Air Energy Storage for Small-Scale Industry Applications," *Int. J. Energy Eng.*, Vol. 3, No. 3, hal. 127–137, 2013.
- [18] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, dan A. Merabet, "Modeling and Simulation of a Novel Small-Scale Compressed Air Hybrid System for Stand-Alone Off-Grid Applications," *2013 IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC)*, 2013, hal. 1–7.
- [19] E. Jannelli, M. Minutillo, A. Lubrano Lavadera, dan G. Falcucci, "A Small-Scale CAES (Compressed Air Energy Storage) System for Stand-Alone Renewable Energy Power Plant for a Radio Base Station: A Sizing-Design Methodology," *Energy*, Vol. 78, hal. 313–322, Des 2014.
- [20] L. Saili dan D. Yiping, "Design and Simulation Analysis of a Small-Scale Compressed Air Energy Storage System Directly Driven by Vertical Axis Wind Turbine for Isolated Areas," *J. Energy Eng.*, Vol. 141, No. 4, hal. 04014032, Des 2015.
- [21] M. Martinez, M.G. Molina, P.F. Frack, dan P.E. Mercado, "Dynamic Modeling, Simulation and Control of Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors," *Lat. Am. Trans. IEEE Rev. IEEE Am. Lat.*, Vol. 11, No. 1, hal. 466–472, Feb 2013.
- [22] C.-M. Liu, J.-J. You, C.-K. Sung, dan C.-Y. Huang, "Modified Intake and Exhaust System for Piston-Type Compressed Air Engines," *Energy*, Vol. 90, Part 1, hal. 516–524, Okt 2015.
- [23] Y.-W. Wang, J.-J. You, C.-K. Sung, dan C.-Y. Huang, "The Applications of Piston Type Compressed Air Engines on Motor Vehicles," *Procedia Eng.*, Vol. 79, hal. 61–65, 2014.
- [24] (2014), "Radial Piston Air Motors Datasheet," [Online], [http://www.parker.com/parkerimages/euro\\_pneumatic/cat/english/UKT echP1V-P.pdf](http://www.parker.com/parkerimages/euro_pneumatic/cat/english/UKT echP1V-P.pdf), tanggal akses: 10-Sep-2015.
- [25] Y. Cengel, M. Boles, dan M. Kanoglu, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed., vol. Vol. 5. New York, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [26] B. Karlekar, *Thermodynamics for Engineers*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1983.
- [27] "LZB14 AR034-11: Vane air motor Datasheet." Atlas Copco Corp., 2013.
- [28] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, dan S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd ed., Vol. 75. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [29] C. Moog (2014) "Permanent Magnet DC Motors," [Online], <http://www.moog.com/products/motors-servomotors/brush-motors/permanent-magnet-dc-servomotors/c34-series/>, tanggal akses: 30-Agt-2015.