

PENGAJIAN KINERJA FOTOVOLTAIK TERSAMBUNG LANGSUNG DENGAN POMPA AIR

Hamzah Hilal

Bidang Rekayasa Sistem, PTKKE, BPPT
Jl. MH. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat 10340,

Email: taura889@yahoo.com

Abstrak - Penerapan fotovoltaik yang terhubung langsung dengan sistem elektromekanikal untuk pompa air telah meningkat di daerah terpencil. Pada penelitian ini, unjuk kerja suatu fotovoltaik yang mensuplai secara langsung motor dc magnet permanen (DCMP) yang dikopel dengan pompa sentrifugal telah dianalisa pada intensitas matahari yang berbeda dengan temperatur sel yang terkait. Hasil-hasil yang diperoleh melalui percobaan dibandingkan dengan nilai-nilai yang diperoleh dari perhitungan, mengindikasikan bahwa sistem ini mempunyai kesepadanan yang baik antara karakteristik susunan modul fotovoltaik dan karakteristik sistem elektromekanikal. Melalui perubahan posisi susunan modul fotovoltaik yang dilakukan secara manual 3 kali dalam sehari supaya mengarah ke matahari, output yang diperoleh 20% lebih besar dibandingkan dengan posisi susunan modul fotovoltaik yang tetap. Hasil observasi memperlihatkan bahwa kurva torsi-kecepatan dengan intensitas matahari yang rendah untuk sistem fotovoltaik-elektromekanikal seharusnya lebih landai dibanding dengan pada saat intensitas matahari yang lebih tinggi, dan kurva torsi-kecepatan beban seharusnya selandai mungkin dalam daerah operasi dengan torsi start rendah. Pengkajian kinerja ini berguna untuk menyeleksi sistem fotovoltaik-elektromekanikal yang sesuai untuk penerapan pompa air.

Kata kunci: pompa sentrifugal, motor dc magnet permanen, fotovoltaik, beban elektromekanikal, pompa air.

1. Pendahuluan

Penerapan Fotovoltaik terkopel secara langsung dengan sistem elektromekanikal pompa air telah memperoleh perhatian yang semakin hari semakin penting karena mengharapkan penurunan biaya susunan modul fotovoltaik. Masih banyak penduduk Indonesia yang tinggal di daerah terpencil tanpa akses ke jaringan listrik. Tenaga listrik yang digunakan umumnya berasal dari mesin diesel ukuran kecil dengan konsumsi bahan bakar minyak yang biaya operasionalnya tidak sedikit. Keperluan modul fotovoltaik akan tinggi bila pompa diesel ini dikonversi ke sistem pompa fotovoltaik.

Kopel langsung fotovoltaik dengan sistem elektromekanikal memerlukan suatu pengkajian yang lengkap dari suatu beban mekanik ke susunan modul fotovoltaik, walaupun instalasinya sangat sederhana [1-7]. Keluaran (output) susunan modul fotovoltaik adalah nonlinier dan suplai

daya tergantung pada variasi intensitas matahari dan temperatur sel. Karena itu, karakteristik kinerja fotovoltaik yang mencatu motor DC berbeda ketika disuplai dengan tegangan konstan. Temperatur sel yang mempengaruhi karakteristik susunan modul fotovoltaik tidak disertakan dalam banyak studi [6]-[8]. Pada daerah yang bercuaca panas, pengaruh temperatur sel terhadap kinerja sistem fotovoltaik menjadi berarti. Kesepadanan yang layak antara komponen-komponen merupakan isu utama dalam suatu sistem fotovoltaik yang mencatu daya ke beban elektromekanikal.

Pada makalah ini, kinerja motor DC yang dikopel dengan pompa sentrifugal dianalisa pada intensitas matahari yang berbeda dan temperatur sel terkait. Pada penelitian ini, telah digunakan suatu susunan modul fotovoltaik dengan daya sebesar 720 W (puncak) dan motor DC yang dikopel dengan pompa sentrifugal untuk dievaluasi kinerjanya. Sistem ini digunakan untuk memompa air pada sumur

dengan kedalaman 5 sampai 8 meter pada daerah terpencil. Analisa kinerja sistem jenis ini akan berguna untuk memperoleh kecocokan desain pada suatu daerah dimana sistem tersebut diharapkan untuk dipasang. Jika intensitas matahari rata-rata dari suatu daerah diketahui, maka parameter-parameter sistem dapat dipilih sedemikian rupa sehingga kurva operasi sepadan dengan lokus titik-titik daya maksimum susunan modul fotovoltaik.

2. Model Susunan Modul Fotovoltaik dan Motor DCMC

Susunan modul fotovoltaik terdiri atas sejumlah sel solar, yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk mencapai besar tegangan dan arus yang diperlukan. Jika susunan modul fotovoltaik mempunyai sejumlah N_p sel tersusun paralel dan sejumlah N_s sel tersusun seri, maka persamaan arus-tegangan susunan modul fotovoltaik diberikan oleh [9] sebagai berikut:

$$V = -IR_s \frac{N_s}{N_p} + \left(\frac{N_s A K_B T_c}{q} \right) \ln \left(1 + \frac{N_p I_f - I}{N_p I_0} \right) \quad (1)$$

dimana I_f = arus foto, I_0 = arus saturasi balik, q = muatan, R_s = resistansi seri, K_B = konstanta Boltzman, A = faktor ideal, dan T_c = temperatur sel. I_f merupakan suatu fungsi intensitas sinar matahari (I_T) dan temperatur sel (T_c). Arus dan tegangan susunan modul fotovoltaik pada I_T dan temperatur sel T_c diberikan sebagai berikut:

$$I = I_r + I_{sc} \left(\frac{I_T}{I_{T0}} - 1 \right) + \alpha_c (T_c - T_r) \quad (2)$$

$$V = V_r + \alpha_v (T_c - T_r) \quad (3)$$

dimana I_r dan V_r masing-masing adalah arus dan tegangan susunan modul pada intensitas matahari acuan (I_{T0}) dan temperatur sel solar acuan (T_r), I_{sc} adalah arus hubung singkat susunan modul fotovoltaik, dan α_c dan α_v masing-masing adalah koefisien temperatur sel solar untuk arus dan tegangan. Persamaan (1) sampai (3) digunakan untuk menentukan karakteristik arus-tegangan susunan modul fotovoltaik pada intensitas matahari dan

temperatur sel yang berbeda. Hubungan torsi-kecepatan motor DCMC pada kondisi ajek diberikan sebagai berikut[10].

$$\omega = \frac{V_a - \left(\frac{T_e}{K_\phi} \right) R_a}{K_\phi} \quad \text{dan} \quad T_e = K_\phi i_a \quad (4)$$

dimana V_a = tegangan terminal, K_ϕ = koefisien arus dan tegangan motor dc PM, R_a = resistansi armatur, dan i_a = arus armatur. Pada kasus fotovoltaik mencatu secara langsung motor dc, tegangan terminal dan arus armatur sama dengan tegangan dan arus susunan modul fotovoltaik. Relasi torsi-kecepatan pada kondisi ajek sistem dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (1) dan (4) dan ini diberikan oleh:

$$\omega = \frac{1}{K_\phi} \left[N_s \left(\frac{A K_B T_c}{q} \right) \ln \left(\frac{N_p I_f - \left(\frac{T_e}{K_\phi} \right)}{N_p I_0} + 1 \right) - \left(\frac{T_e}{K_\phi} \right) R_s \frac{N_s}{N_p} - \left(\frac{T_e}{K_\phi} \right) R_a \right] \quad (5)$$

Torsi start yang diberikan oleh sebuah motor seharusnya lebih besar dari torsi friksi untuk mengakselerasi kecepatan dari 0 ke nilai yang ditentukan oleh intensitas matahari dan beban sentrifugal. Torsi start (T_s) suatu motor dc ditentukan dengan menjaga kecepatan motor dari 0 dan ini diberikan oleh:

$$\frac{T_s}{K_\phi} + N_p I_0 e^{\left[\frac{q T_s (R_s N_s + R_a N_p)}{N_s N_p A K_B T_c K_\phi} \right]} - N_p I_f = 0 \quad (6)$$

Disini diasumsikan bahwa arus saturasi balik pada susunan modul fotovoltaik adalah kecil dibandingkan dengan arus foto, yaitu:

$$N_p I_f - \frac{T_s}{K_\phi} \geq N_p I_0 \quad (7)$$

Pada sistem fotovoltaik elektromekanikal, beban mekanikal seharusnya diatur sedemikian rupa sehingga daya maksimum dari susunan modul fotovoltaik dapat diekstrak pada semua intensitas matahari. Torsi-kecepatan motor DCMC (4) didiferensiasi terhadap arus:

$$\frac{dV}{dI} = R_a + K_\phi \frac{d\omega}{dI} = R_a + (K_\phi)^2 \frac{1}{\left(\frac{dT_e}{d\omega}\right)}$$

(8) dan pada titik operasi, torsi elektromagnetik T_e sama dengan T_L , dimana T_L adalah torsi beban. $dT_L/d\omega$ harus sebesar mungkin untuk memperoleh suatu kurva operasi yang vertikal, yang menghasilkan kesepadanan yang baik, dan karena itu dV/dI seharusnya kecil. Pada saat start, kecepatan motor akan naik secara tajam sampai mencapai kondisi operasi normal. Persamaan dinamis motor diberikan oleh[10]:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + C$$

(9) dimana J = momen inersia, D = konstante torsi redam untuk rugi-rugi putaran, dan C = konstante torsi untuk rugi-rugi putaran. Beban seharusnya mempunyai torsi start yang rendah dan $dT_L/d\omega$ seharusnya rendah pada kecepatan rendah, dan seharusnya menjadi tinggi pada daerah operasi.

3. Pelaksanaan Percobaan

Percobaan dilakukan pada 20 modul fotovoltaik (4 tersusun seri dan 5 tersusun paralel), motor DCMP yang terkopel dengan pompa sentrifugal, suatu pengukur tekanan, penghisap, dan katup, meter aliran, tangki penyimpanan air, dan lain-lain. Evaluasi kinerja sistem telah dilakukan dengan menjaga susunan modul fotovoltaik pada posisi kemiringan 30° dan juga dengan merubah orientasi panel fotovoltaik, 3 kali sehari, supaya mengarah ke matahari. Pada titik operasi sistem, hubungan antara torsi pompa, kecepatan, laju aliran, dan tinggi air dapat diperoleh dengan menimbang keseimbangan energi mekanik pompa. Untuk keseimbangan energi mekanik dapat ditulis:

$$T_L \omega = \rho g Q H$$

(10) dimana H = tinggi air, Q = laju aliran air, ρ = kerapatan air, g = konstante gravitasi. Efisiensi fotovoltaik motor-pompa tergantung pada karakteristik beban dan titik-titik operasi pada intensitas solar dan

temperatur sel yang berbeda. Arus tegangan operasi (I - V) susunan modul fotovoltaik utamanya ditentukan oleh karakteristik torsi-kecepatan ($\omega - T_e$). Efisiensi susunan modul fotovoltaik diberikan oleh:

$$\eta_e = \frac{VI}{A_{pv} I_T}$$

(11) dimana A_{pv} = area susunan modul fotovoltaik dan I_T adalah intensitas matahari sesaat pada susunan modul fotovoltaik. Faktor kesepadanan beban susunan modul fotovoltaik tergantung pada titik operasi motor DC-beban pompa dan titik daya maksimum susunan modul fotovoltaik pada intensitas matahari yang sama, dan ini diberikan oleh:

$$\eta_{pvm} = \frac{VI}{P_{max}}$$

(12) dimana P_{mak} adalah daya maksimum susunan modul fotovoltaik pada intensitas matahari dan temperatur sel terkait. Efisiensi motor diberikan oleh:

$$\eta_{mp} = \frac{\rho g Q H}{VI}$$

(13) Efisiensi sistem secara keseluruhan tergantung pada efisiensi susunan modul dan efisiensi motor-pompa, dan ini diberikan oleh:

$$\eta = \eta_e \eta_{mp}$$

(14) Susunan modul fotovoltaik, motor DCMP, dan parameter beban pompa sentrifugal yang digunakan untuk pengkajian diberikan pada tabel 1.

Tabel 1 Parameter motor DCMP, beban dan susunan modul fotovoltaik

A. Data motor DCMP	
V	60 V (tegangan nominal motor)
I	16,5 A (arus nominal motor)
ω	272,3 rad/det (kecepatan nominal motor)
R_a	0,8 ohm
K_ϕ	0,175 V/(rad/det)
B. Data beban	
J	0,024 kg-m ²
C	0,08 N-m
D	0,0010 N-m/(rad/det)

T_L	$0,15+1,65532*10^{-5} \omega^2$
	C. Data susunan modul fotovoltaik, modul 36 Wp.
R_s	0,003 ohm
N_s	4*36 144 sel
N_p	5
$R_s(N_s/N_p)$	0,0864 ohm
$AK_s T_c/q$	1/(23,281) Volt
I_0	0,000025 Amp
I_f	parameter Amp
a_c	0,001258 Amp/ 0C
a_p	-0,0882 Volt/ 0C

Parameter susunan modul fotovoltaik disubsitusikan dalam persamaan (1) $I-V$, dan ini akan menjadi:

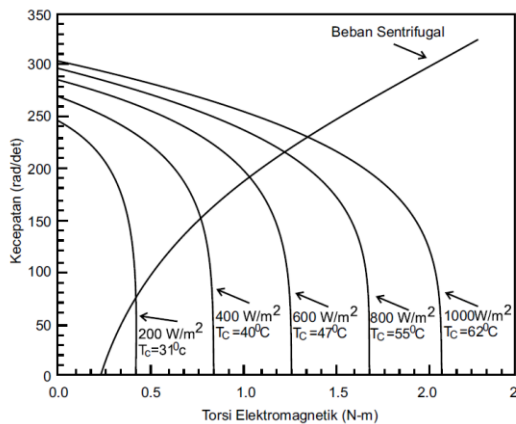
$$V = -0,0864I_s + \frac{1}{0,1616} \ln \left(1 + \frac{N_p I_f - I}{0,00225} \right) \tag{15}$$

Untuk operasi kondisi ajek, torsi elektromagnetik motor DC menjadi:

$$T_e = C + D\omega + T_L = 0,23 + 0,001\omega + 1,6532 * 10^{-5} \omega^2 \tag{16}$$

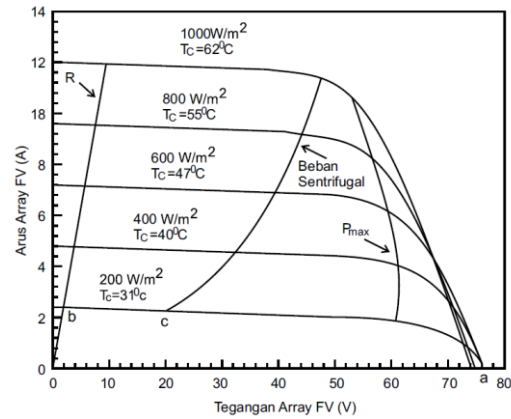
4. Hasil-Hasil Dan Diskusi

Analisa kinerja fotovoltaik tersambung langsung dengan motor DCMP telah dikaji. Karakteristik kecepatan-torsi (elektromagnetik) kondisi ajek motor DCMP diperoleh pada intensitas matahari yang berbeda dengan temperatur sel yang terkait. Hal ini diperlihatkan pada gambar 1, bidang mekanik ($\omega - T_e$).



Gambar 1. Karakteristik kecepatan-torsi fotovoltaik yang mensuplai beban motor DCMP pada intensitas matahari yang berbeda dengan temperatur sel dan beban sentrifugal.

Karakteristik beban sentrifugal juga diperlihatkan pada gambar 1. Dari sini dapat diamati bahwa sistem mulai beroperasi pada nilai intensitas solar yang rendah (yakni 150W/m²) dan terjadi hampir satu hari. Titik-titik operasi beban sentrifugal ditransfer dari bidang mekanik ($\omega - T_e$) ke bidang elektrik ($I - V$) susunan modul fotovoltaik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



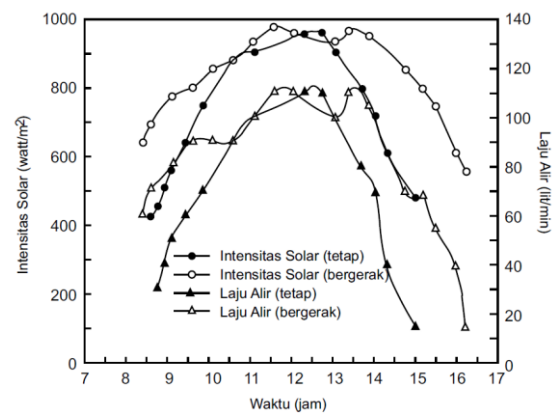
Gambar 2. Arus-tegangan fotovoltaik yang mensuplai beban motor DCMP pada intensitas matahari yang berbeda dengan temperatur sel dan beban sentrifugal.

Dapat dilihat bahwa sementara arus hubung singkat bervariasi secara drastis terhadap tingkat intensitas matahari, tegangan hubung terbuka tidak bervariasi. Hal ini disebabkan arus foto (I_f), dan karena itu, arus hubung singkat merupakan fungsi linier intensitas matahari dan tegangan hubung terbuka merupakan fungsi logaritmik intensitas matahari. Tegangan hubung terbuka susunan modul fotovoltaik menurun dengan naiknya temperatur sel. Arus saturasi balik modul fotovoltaik, yang naik secara tajam dengan naiknya temperatur sel, menyebabkan tegangan hubung terbuka menurun, sedangkan arus hubung singkat menaik secara perlahan dengan naiknya temperatur sel. Hasil seluruh variasi ini adalah terjadinya penurunan efisiensi susunan modul fotovoltaik dengan naiknya temperatur sel. Arus dan tegangan pada titik-titik daya maksimum diperlihatkan pada gambar 2 dan kurva sepanjang itu hampir vertikal. Tegangan pada titik daya maksimum hampir konstan pada semua intensitas

matahari. Locus titik-titik daya maksimum suatu susunan modul fotovoltaik sangat penting diperhatikan dalam mendesain komponen-komponen suatu sistem fotovoltaik-pompa untuk memaksimalkan pemanfaatan daya dari susunan modul fotovoltaik. Resistansi armatur jaringan (R), yang ditunjukkan pada gambar 2, memberikan arus armatur start maksimum pada intensitas matahari yang berbeda. Arus hubung singkat susunan modul fotovoltaik, yang tergantung pada intensitas matahari, membatasi arus armatur starting dari fotovoltaik yang dihubungkan langsung dengan motor DC.

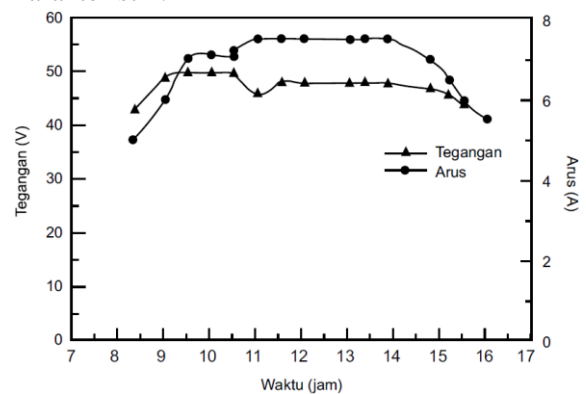
Jika sistem diekspos ke intensitas solar 200 W/m^2 , titik operasi mulai pada a (pada tegangan hubung terbuka) seperti ditunjukkan pada gambar 2 dan bergerak sepanjang kurva $I-V$ sampai ke titik b, dimana arus mencapai nilai maksimumnya. Pada titik start, kecepatan motor nol, dan karena itu, tegangan hubung terbuka secara langsung diterapkan ke terminal motor. Dengan demikian, arus start maksimum motor tergantung pada resistansi armatur dan arus hubung terbuka susunan modul fotovoltaik, karena tegangan putaran motor DC adalah nol pada start. Pada saat motor mulai berputar, arus menurun dari titik b dan bergerak kembali sepanjang kurva $I-V$ ke titik c, dimana operasi keadaan ajek diperoleh, dan diasumsikan bahwa intensitas solar tidak berubah pada waktu itu.

Unjuk kerja sistem sudah dianalisa untuk posisi panel yang tetap (sudut kemiringan 30°) dan juga dengan merubah orientasi panel 3 kali dalam sehari, untuk menjaga panel mengarah ke matahari (merubah posisi secara manual). Sistem mulai berputar pada intensitas matahari 150 W/m^2 dengan arus start 1,8 Amp. Intensitas matahari pada suatu susunan modul fotovoltaik dan laju aliran air yang terpompa untuk ketinggian 5 meter diperlihatkan pada gambar 3 untuk kedua posisi tetap dan posisi susunan modul fotovoltaik yang berubah secara manual.

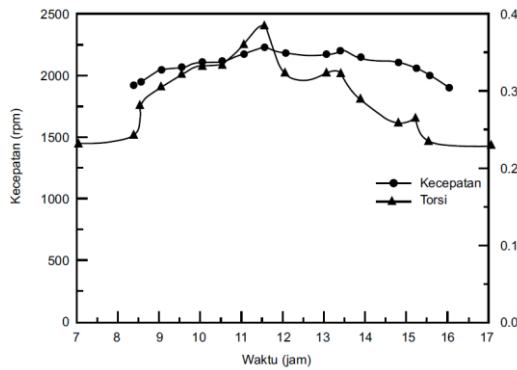


Gambar 3. Intensitas matahari dan laju aliran untuk kasus posisi susunan modul tetap dan berubah.

Hasil observasi menyatakan bahwa air yang terpompa adalah 20% lebih dengan menggunakan cara merubah posisi dibanding dengan susunan modul yang tetap posisi sudutnya. Sistem beroperasi sepanjang hari dengan laju aliran antara 20 sampai 140 liter/menit, tergantung pada intensitas matahari. Tegangan-arus operasi susunan modul fotovoltaik dan torsi-kecepatan poros motor DC-pompa pada siang hari diperlihatkan masing-masing pada gambar 4 dan 5, untuk operasi posisi berubah. Fluktuasi intensitas matahari membuat titik-titik operasi sistem dalam keadaan bergerak terus sepanjang kurva karakteristik.

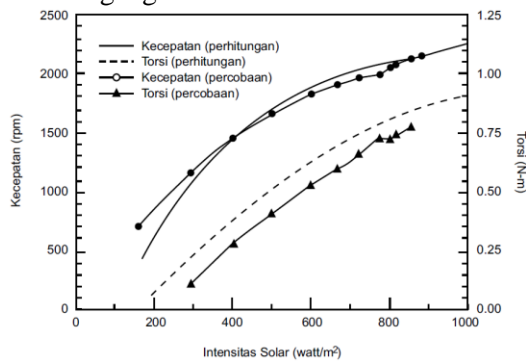


Gambar 4 Tegangan dan arus operasi berdasarkan pada waktu untuk ketinggian air 5 meter.

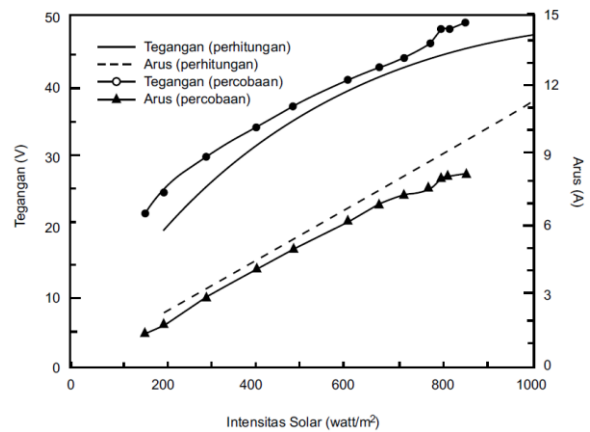


Gambar 5 Kecepatan dan torsi poros berdasarkan pada waktu untuk ketinggian air 5 meter.

Torsi-kecepatan dan arus-tegangan sistem yang diperoleh dari percobaan dan perhitungan masing-masing ditunjukkan pada gambar 6 dan 7. Pada intensitas matahari yang tinggi, kecepatan yang terhitung sepadan dengan nilai-nilai percobaan dan hanya berbeda kurang dari 1,5%. Tetapi dalam kasus torsi, terjadi deviasi sekitar 7% dan ini mungkin disebabkan oleh rugi-rugi gesek dalam jaringan pipa. Arus yang diperoleh pada percobaan mempunyai deviasi sekitar 3% dari nilai yang terhitung, dan perbedaan untuk tegangan adalah sekitar 2%.

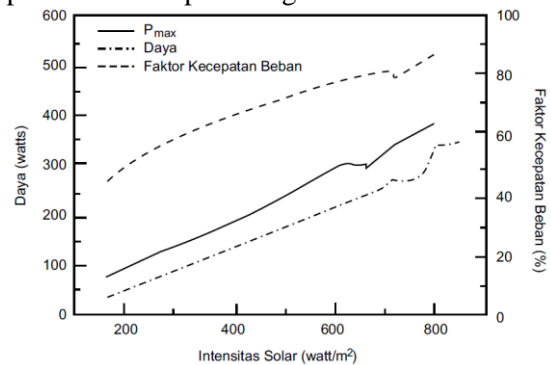


Gambar 6 Kecepatan dan torsi poros (terhitung dan percobaan) dengan intensitas matahari.

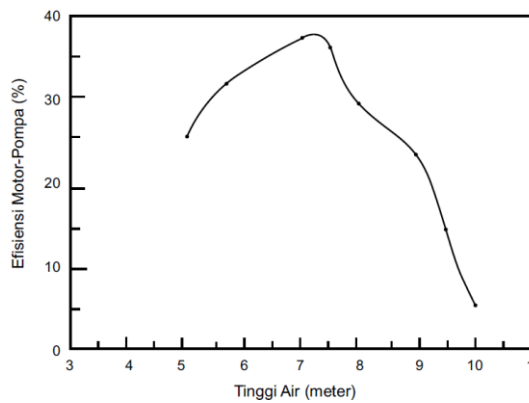


Gambar 7 Arus dan tegangan (terhitung dan percobaan) dengan intensitas matahari.

Daya input motor-pompa, daya maksimum dari susunan modul fotovoltaik, dan faktor kesepadanan beban yang terkait ditunjukkan pada gambar 8 terhadap intensitas matahari. Perbedaan antara hasil-hasil percobaan yang diperoleh dan yang dihitung mungkin disebabkan oleh pengaruh temperatur, ketidaksepadanan antara modul-modul fotovoltaik, kesalahan pengukuran, rugi-rugi gesekan dalam pipa air, dan lain-lain. Penyederhanaan resistansi sel solar dengan nilai kecil dan resistansi shunt dengan nilai tinggi mungkin juga telah memberi sumbangan atas adanya perbedaan antara hasil-hasil percobaan dan perhitungan.

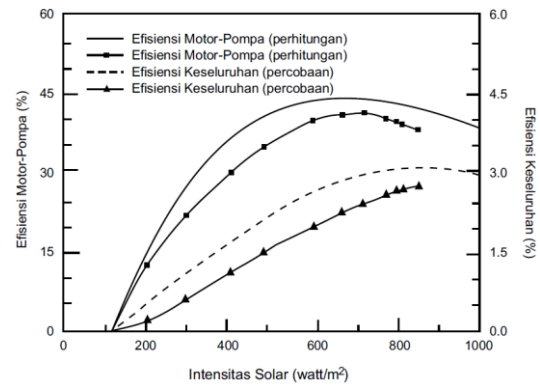


Gambar 8 Faktor kesepadanan beban, daya susunan modul fotovoltaik maksimum dan operasi dengan intensitas matahari.



Gambar 9 Efisiensi fotovoltaik motor-pompa terhadap ketinggian air

Pengaruh tinggi air terhadap efisiensi motor-pompa telah dikaji untuk menentukan tinggi optimum untuk sistem ini. Efisiensi motor-pompa telah diperoleh terkait dengan tinggi air seperti ditunjukkan pada gambar 9. Disini didapat bahwa sistem ini memberikan efisiensi maksimum pada ketinggian air 7 meter. Nilai-nilai yang diperoleh baik secara percobaan maupun perhitungan motor-pompa dan keseluruhan efisiensi sistem fotovoltaik-pompa terkait dengan intensitas matahari ditunjukkan pada gambar 10. Unit motor DC-pompa ini telah didesain untuk kecepatan nominal 2600 putaran/menit, tetapi kecepatan operasi sistem berubah sesuai intensitas matahari. Karena itu, rendahnya efisiensi motor-pompa yang membuat buruknya efisiensi sistem keseluruhan tidak terhindarkan. Efisiensi susunan modul fotovoltaik juga tergantung pada temperatur sel. Selama periode sore hari, intensitas matahari menurun tetapi temperatur sel tetap tinggi dibandingkan pada pagi hari untuk intensitas matahari yang sama. Karena itu, efisiensi susunan modul fotovoltaik menurun pada sore hari dibanding dengan pada pagi hari.



Gambar 10 Efisiensi keseluruhan fotovoltaik motor-pompa (terhitung dan percobaan) dengan intensitas matahari.

Lagi pula, sistem mulai memompa pada pagi hari dan berhenti pada sore hari tanpa adanya intervensi eksternal dan beroperasi dengan suatu adaptasi yang baik sesuai dengan ketersediaan intensitas solar. Kesepadanan yang sesuai antara sistem motor-pompa dan susunan modul fotovoltaik adalah penting untuk diperhatikan dalam mendesain sistem, Seleksi pompa juga penting untuk menyepadankan kondisi-kondisi variasi kecepatan motor, tinggi air, dan aliran maksimum. Penerapan praktis sistem sederhana ini dengan karakter pengaturan sendiri dapat diinstalasi pada lokasi terpencil.

5. Kesimpulan

Pengkajian kinerja fotovoltaik yang secara langsung mensuplai motor DCMP yang terkopel dengan pompa sentrifugal telah dianalisa pada intensitas matahari yang berbeda dan dengan temperatur sel yang terkait. Hasil observasi memperlihatkan bahwa sistem beroperasi sepanjang hari karena torsi startnya lebih tinggi bahkan pada intensitas matahari yang rendah. Kurva torsi-kecepatan elektromagnetik sistem fotovoltaik motor-pompa pada intensitas matahari rendah seharusnya menjadi lebih landai dibanding pada saat intensitas matahari yang lebih tinggi. Beban seharusnya mempunyai suatu kurva torsi-kecepatan yang menaik secepat mungkin dalam daerah operasi, yang menyediakan suatu kesepadanan yang baik antara karakteristik-karakteristik susunan modul fotovoltaik dan sistem

elektromekanikal. Juga, beban seharusnya mempunyai torsi start yang rendah. Perubahan posisi susunan modul secara manual 3 kali sehari untuk menjaga supaya susunan modul fotovoltaik mengarah ke matahari memberikan output yang lebih tinggi sebesar 20% dibandingkan dengan susunan modul yang terpasang pada posisi tetap.

Analisa kinerja fotovoltaik yang secara langsung mensuplai motor DC-pompa sangat berguna untuk menyeleksi motor dan beban yang sesuai untuk penerapan pompa air di daerah terpencil. Jika intensitas matahari rata-rata suatu daerah yang akan menjadi lokasi instalasi diketahui, maka parameter komponen-komponen sistem dapat dipilih dengan menggunakan analisa kinerja sedemikian rupa sehingga titik-titik operasi beban mendekati titik daya maksimum sesuai dengan tingkat intensitas matahari. Karena itu, dengan efisiensi sistem yang lebih tinggi, maka aliran air yang lebih tinggi juga dapat diperoleh.

Daftar Pustaka

- [1] Chandratilleke, T.T, Ho, J.C. (1996), "A Study of a Photovoltaic Array for Water Pumping", Sol. Wind Technol., vol. 3, no. 1 pp.59-71.
- [2] Singer, S., Applebaum, J. (1997), "Starting Characteristics of Direct Current Motors Powered by Solar Cell", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, pp. 47-53.
- [3] Loxsom, F., Durongkavero, P. (June 1998), "Estimating the Performance of a Photovoltaic Pumping System", Sol. Energy, vol. 52, no. 2 pp.215-219, 1999.
- [4] Maish, A. (2009), "Defining Requirements for improved Photovoltaic System Reliability", Progress in Photovoltaic, vol 7, no. 3, pp. 165-173.
- [5] Narvante, L., et al (2010)., " PV Pumping Analytical Design and Characteristics of Boreholes", Sol. Energy, vol. 68, no. 1, pp. 49-56.
- [6] Akbaba, M., et al. (2011), "Matching of Separately Excited DC motors to Photovoltaic Generators for Maximum Power Output", Sol. Energy, vol. 63, no. 1, pp. 375-385.
- [7] Arab, A.H., et al. (2011), "Performance of PV Water Pumping System, " Renewable Energy", vol. 18, no. 2, pp. 191-204.
- [8] Swamy, C.L.P, et al. (2012), "Experimental Investigation on a Permanent Magnet Brushless DC Motor Fed by a PV Array for a Water Pumping System", J. Sol. Energy Eng.-Trans. ASME, vol. 122, no. 3, pp. 129-132.
- [9] Messenger, R.A., dan Ventre, J. (2009), "Photovoltaic Systems Engineering", Boca Raton, FL: CRC.
- [10] Kothori, D.P., Nagrath, I.J. (2001), "Electrical Machines", New York: Tata McGraw-Hill.
- [11] Kolhe, M., et al. (2011), "Determination of daily Volume of Pumped Water as a Function on Mechanical Energy from Photovoltaic Water Pumping System", J. Power Energy, IMechE-Part A, vol. 227, no. A5, pp.309-313.