

PENGEMBANGAN PIRANTI HIBRID TERMOELEKTRIK – SEL SURYA SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK RUMAH TANGGA

Ubaidillah, Suyitno, dan Wibawa Endra Juwana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret (UNS)

Email : ubaid.ubaidillah@gmail.com

ABSTRACT

The potential of waste heat from the sun is still not optimally utilized. Tool-based energy harvester optimized solar cells that are stored on the photons of light energy from the sun. This research aims to design and develop prototypes of alternative power scale household exploit the potential of photons (solar cells) and heat (thermoelectric cells) of solar radiation. The design process through standard mechanical design principles followed by the fabrication and assembly of prototypes. The solar panels are fitted with a solar tracker with sun position tracking strategy where data is entered into the position of the sun as a reference microcontroller motion solar cells. Tues thermoelectric apart from solar panels installed as the cold side equipped with air-water cooling. Testing the performance of solar cells and thermoelectric done separately for ease of measurement defined variables such as current, voltage and temperature. The equipment used for the measurement of variables - variables include multimeter, thermo-reader and pyranometer. The experimental results of solar panels on July 10, 2012 shows average power output - average of 25.75 W 10% higher than the panel passive (static). Testing TEC1-12 710 individual cells has been done to study the early determination of the number of cells that will be used on the TE module. By using 32 cells in series strung TE module has been tested in the field but has not shown the expected results.

Key words: *solar cells, thermoelectric cells, solar tracker*

PENDAHULUAN

Kenaikan tingkat konsumsi dan harga minyak dari tahun ke tahun memaksa manusia untuk mengembangkan energi alternatif yang ramah lingkungan (Chuang dan Chau, 2009; Carmo dkk., 2011). Saat ini pengembangan energi alternatif telah banyak dikembangkan di berbagai Negara dengan memanfaatkan sumber daya alam terbarukan seperti energi surya, angin dan panas. Macam – macam sumber energi tersebut umumnya dipakai untuk pembangkitan energi listrik khususnya sector rumah tangga. Potensi pembangkitan energi bersumber tenaga surya dinilai paling potensial untuk daerah khatulistiwa karena intensitas radiasi sinar

matahari yang diterima oleh bumi mencapai 1000W/m^2 . Luasan Propinsi Jawa Tengah yang mencapai $32.544,12\text{ km}^2$ menjadi sangat potensial dengan nilai taksiran energi dari matahari sebesar 815 ribu MW. Pentingnya pemasyarakatan sumber energi surya menjadi cukup penting mengingat hingga saat ini nilai elektrifikasi hanya sebesar 76,63%.

Pemanfaatan radiasi sinar matahari untuk pembangkit listrik hanya dengan mengambil kemanfaatan sinar (foton) saja menjadi tidak lebih menguntungkan ketika energi panas dibiarkan. Untuk mengatasi masalah ini, jika modul – modul termoelektrik (TE) dikombinasikan dengan sel surya, kenaikan nilai energi tiap area

luasan mampu meningkatkan nilai daya puncak (*Watt Peak*) yang dihasilkan. Modul TE sementara ini dinilai cukup menjanjikan sebagai penghasil listrik suplemen/pendamping sehingga mampu mengoptimalkan energi panas yang terbuang dari suatu perlengkapan (Chavez-Urbiola dkk., 2012). Sehingga daya yang diperlukan oleh perlengkapan terkait dapat dikatakan lebih hemat sekitar persen dengan adanya pengembalian daya listrik walau nilainya kecil (Lertsatitthanakorn dkk., 2010).

Penggunaan modul TE sebagai suplemen / hibrid telah banyak dilakukan seperti penggabungan modul TE pada *solar water heater* yang dilakukan oleh Lertsatitthanakorn dkk., (2010). Pada kajian tersebut sebuah generator TE digabungkan dengan *solar water heater* yang mana modul TE diletakkan di bawah pipa kaca pemanas air sedangkan sisi dingin modul TE terhubung dengan pipa masukan air. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa arus listrik yang dihasilkan oleh modul tetap tergantung pada perbedaan temperatur. Pada perbedaan temperatur sisi panas dan dingin 27°C, daya yang dihasilkan sebesar 3,6 Watt dengan efisiensi 0,87 persen.

Singh dkk., (2011) mengkombinasikan sistem *termosyphon* dan modul termoelektrik untuk menghasilkan listrik dari sumber panas yang memiliki selisih temperatur 40-60°C pada zona konveksi bawah dan atas. Desain peralatan *thermosyphon* berbasis gravitasi yang mana terjadi perpindahan panas dari sisi bawah ke atas pada proses pemanasan air. Panas ini yang kemudian dimanfaatkan untuk modul termoelektrik. Sistem yang dibangun dalam skala laboratorium ini menunjukkan prospek yang signifikan untuk sistem pembangkitan daya bersumber panas derajad rendah di daerah-daerah terisolir. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Miljkovic dan Wang (2011)

yang menggunakan *solar concentrator* untuk memanaskan *thermosyphon* vertical. Dengan melakukan optimisasi awal metode komputasi perpindahan panas, dapat diperoleh efisiensi yang lebih tinggi. Pada umumnya, posisi statik pemasangan sel surya telah mampu mencapai efisiensi hingga 40% (Poulek dan Libra, 1998). Namun demikian daya yang dihasilkan oleh sel surya yang terpasang statik tidak lebih optimal dibandingkan dengan kondisi dinamik. Definisi kondisi dinamik di sini adalah adanya penambahan actuator dan sensor pada struktur sel surya sehingga memungkinkan adanya *tracking* terhadap intensitas sinar matahari yang optimal. Penelitian terdahulu mengenai *solar tracker* dilakukan oleh Poulek dan Libra (1998; 2000(a); 2000(b)). Dimulai pada tahun 1998 peneliti tersebut memperkenalkan metode dua muka (*bifacial*) yang diletakkan parallel terhadap poros tengah. Sebuah motor DC menggerakkan poros tersebut terhadap titik *pivot*. Jangkauan pergerakan sudut yang dikembangkan pada kajian tersebut sebesar 120°. Hasil rancangan Poulek dan Libra (2000(a); 2000(b)) ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Mekanisme aktif *solar tracker* (Poulek dan Libra, 1998; 2000(a); 2000(b))

Penelitian lain dilakukan oleh Davis dkk., (2008) yang menggunakan kamera untuk mengoptimalkan arah datang sinar

matahari. Penelitian ini memfokuskan bagaimana mengukur eror penunjukan arah datang sinar menggunakan sistem penglihatan mesin (*machine vision sistem*). Disimpulkan bahwa dengan menggunakan metode kamera sebagai sensor untuk karakterisasi *solar tracker* sangat bermanfaat untuk penelitian *tracker controller* mulai dari pengembangan awal hingga produk siap pakai konsumen (Davis dkk., 2008). Rizk dan Chaiko (2008) dengan prinsip pendekatan yang sama dengan Davis dkk., (2008), kedua peneliti ini menggunakan sensor cahaya yang harganya relative lebih murah dan mudah dijumpai di pasaran, terkenal dengan *photo-resistor*. *Solar tracker* yang dirancang memiliki satu sumbu gerak atau lebih dikenal dengan 1 derajad kebebasan. Hasil penelitian Chaiko dan Rizk (2008) ditunjukkan pada Gambar 2. Secara umum, hasil penelitian lampau menunjukkan bahwa pemanfaatan *solar tracker* dengan metode kendali apapun memberikan hasil yang lebih optimal (Rubio dkk., 2007). Namun demikian, masih terbuka kesempatan untuk mengeksplorasi strategi *solar tracking* lainnya untuk lebih meminimalkan daya yang dikonsumsi dan tentunya meminimalkan penggunaan sensor sehingga memperkecil biaya pengembangan.



Gambar 2. Prototip *solar tracker* sumbu tunggal (Chaiko dan Rizk, 2008)

Penelitian ini memegang posisi yang strategis di antara penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penggabungan antara sel surya dan modul termoelektrik sebagai pembangkit listrik dengan penambahan *solar tracker* 2 derajad kebebasan pada sistem tersebut membuat hasil penelitian ini memiliki nilai kebaruan. Kebaruan dalam desain mekanikal, pembangkit termoelektrik berbasis panas matahari dan strategi kendali yang sederhana namun aplikatif. Maksud dari 2 derajad kebebasan ini adalah perangkat *solar tracker* yang dikembangkan memiliki 2 sumbu gerak untuk *tracking* pada sumbu *azimuth* dan sumbu *altitude* yang akan dijelaskan lebih detail pada bagian strategi control. Pengambilan data sel surya dilakukan terpisah dengan modul termoelektrik mengingat variabel yang diukur adalah arus dan tegangan bersih yang dihasilkan oleh peralatan tersebut.

Sistematika penulisan makalah ini diawali dengan kajian terdahulu dan potensi pemanfaatan sel surya serta modul termoelektrik berbasis energi radiasi matahari. Penjelasan mengenai desain pembangkit listrik meliputi desain mekanikal, elektrikal, instrumentasi dan strategi kendali. Dilanjutkan dengan persiapan eksperimen berikut diagram skematis dan penjelasan metode pengambilan data. Bagian ke empat dari tulisan ini terkait dengan pembahasan hasil eksperimen berikut analisa data kemudian pada bagian terakhir ditutup dengan kesimpulan.

DESAIN PEMBANGKIT LISTRIK

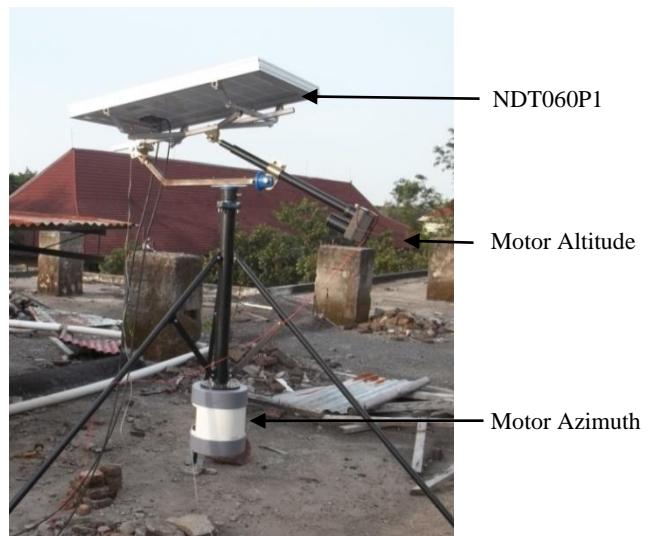
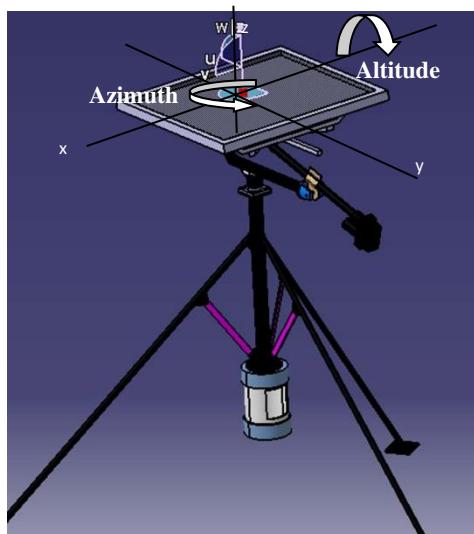
a. Sistem Mekanikal Pembangkit Tenaga Surya dan Modul Termoelektrik

Rancang bangun sistem mekanikal dilakukan sesuai dengan standard desain mekanikal yakni dimulai dengan proses

penentuan spesifikasi teknis alat. Hal ini diperlukan sebagai pertimbangan utama menentukan ketersediaan komponen-komponen di pasaran. Disamping itu sintesa gerak semua mekanisme yang mungkin diterapkan, ditentukan pada step awal ini. Sketsa yang telah dipilih kemudian dijadikan acuan untuk pedoman menggambar desain 3D. Proses menggambar solid dilakukan dengan bantuan software CAD (*Computer Aided Design*) dimulai dengan menggambar part, assembly design kemudian proses evaluasi gambar. Tahapan ini dilakukan dalam *loop* tertutup hingga diperoleh keputusan gambar 3D yang dapat memenuhi criteria fungsional. Gambar 3a di bawah ini telah melalui beberapa iterasi sehingga diperoleh dimensi optimal.

Gambar 3D yang telah memenuhi aspek *Design for Manufacturing and Assembly*

(DFMA) selanjutnya diterjemahkan dalam gambar pabrik (*workshop drawing*) berupa gambar 2D. Evaluasi gambar harus dilakukan dengan teliti untuk menghindari kesalahan fabrikasi yang menghambat proses *assembly*. Gambar 3b merupakan hasil fabrikasi yang telah dirakit dan siap untuk uji unjuk kerja. Alat tersebut mengakomodasi posisi matahari yang diwujudkan dalam koordinat *azimuth* dan *altitude*. Sumbu putar *azimuth* adalah sumbu *z* dan sumbu putar *altitude* adalah sumbu *x*. Masing – masing digerakkan motor DC yang dilengkapi dengan *gear box* yang merubah gerak rotasi menjadi linier atau translasi. Kedua motor tersebut bertugas menghadapkan panel sel surya ke arah yang dikehendaki oleh kontroler. Sel surya yang dipakai dalam prototip ini berjenis NDT060P1 dengan detail data teknis disebutkan pada Tabel 1.



Gambar 3(a) Desain 3D menggunakan software CAD (b) Prototip Sel Surya
Tabel 1. Data teknis NDT060P1

Umum	Karakteristik Elektrikal
Luaran Nominal(Wp)	Tegangan <i>Open Circuit Voc</i> (V) 22,0
Efisiensi Modul (%)	Arus <i>Short circuit Isc</i> (A) 3,90
	Tegangan Daya Maksimum Vpm (V) 17,4
	Arus Daya Maksimum Ipm (A) 3,45

Data Mekanikal		Karakteristik dan Koefisien Termal	
Ukuran Sel (mm) ²	(156,5 x 78,3)	α_{Pm} (%/°C)	-0,485
Jumlah sel dan koneksi	36 in series	α_{Isc} (%/°C)	0,053
Dimensi modul (LxHxW) (mm)	787x671x46	α_{Voc} (%/°C)	-104
Massa (kg)	7,5	Temperatur Kerja (°C)	-40 s.d. +90
Beban mekanis maksimum (N/m ²)	2400	Suhu Penyimpanan (°C)	-40 s.d. +90
		Kelembapan Udara(%)	hingga 90

Selain modul sel surya, modul TE dijadikan produsen listrik pendamping yang memanfaatkan panas matahari. Untuk membangkitkan tegangan yang cukup guna mengisi akumulator, maka prinsip pembuatan modul TE mirip dengan konstruksi sel surya. Modul TE dalam penelitian ini terdiri dari sejumlah gabungan sel TE yang dihubungkan secara seri. Penelitian ini mengambil sel TE berjenis TEC1-12710 seperti ditunjukkan pada Gambar 4a dengan jumlah total sel yang digunakan 32 sel terhubung secara seri. Jumlah ini merujuk pada kalkulasi yang didasarkan pada karakterisasi individu menggunakan alat uji yang dibangun di Lab. Biofuel sebagaimana ditampilkan pada gambar 4b. Alat tes uji tersebut dilengkapi dengan sumber panas, alat ukur temperatur, pengatur tegangan dan beban resistif berupa motor DC 5Volt. Sel TEC1-12710 mengandung 127 koneksi termokopel yang terhubung secara seri. Setiap pasang terdiri atas dua kaki *rectangular prismatic* masing – masing tipe p dan tipe n. Material semikonduktor tersebut berbasis *bismuth-telluride*. Ujung sisi panas dan dingin dari kaki kaki termokopel terhubung secara elektrikal dengan sebuah kabel. Antara sumber panas

dan termokopel serta sisi berlawanan dipisahkan oleh lapisan tipis berbahan alumunium oksida yang berfungsi sebagai konduktor panas sekaligus isolator elektrik. Panas yang diterima pada satu sisi akan dipompa dan dibuang melalui sisi lainnya dan arus yang dihasilkan akan proporsional dengan perbedaan temperatur yang terjadi antara sisi panas dan dingin. Ilustrasi struktur dalam sel TE ditunjukkan pada Gambar 5a.

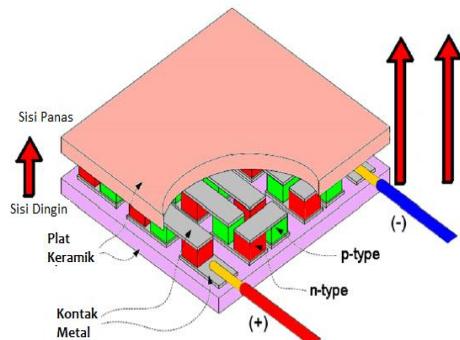
Modul TE 32 sel sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5(b) dilengkapi dengan plat alumunium sebagai konduktor pada sisi panas. Sejumlah 32 sel TE diletakkan di antara alumunium pendingin dan di-pres dengan 4 buah baut yang mengaplikasikan torsi pengencangan maksimum 0,128 kgm. Konstrain kehalusan permukaan antara konduktor sisi panas dan sel TE menyumbangkan hambatan panas karena secara mikroskopik tidak bersentuhan secara langsung. Akibatnya panas tidak berpengaruh total 100% ke sel TE. Problem ini dapat diminimalisasi dengan cara mengisi celah micron pada kontak sel TE dan konduktor panas/dingin menggunakan pasta termal yang biasa dipakai di *processor cooler*.



(a)

(b)

Gambar 4(a) Sel TEC1-12710 (b) Alat uji sel TE tunggal



Gambar 5(a) Struktur dalam sel TE (b) Modul TE 32 sel

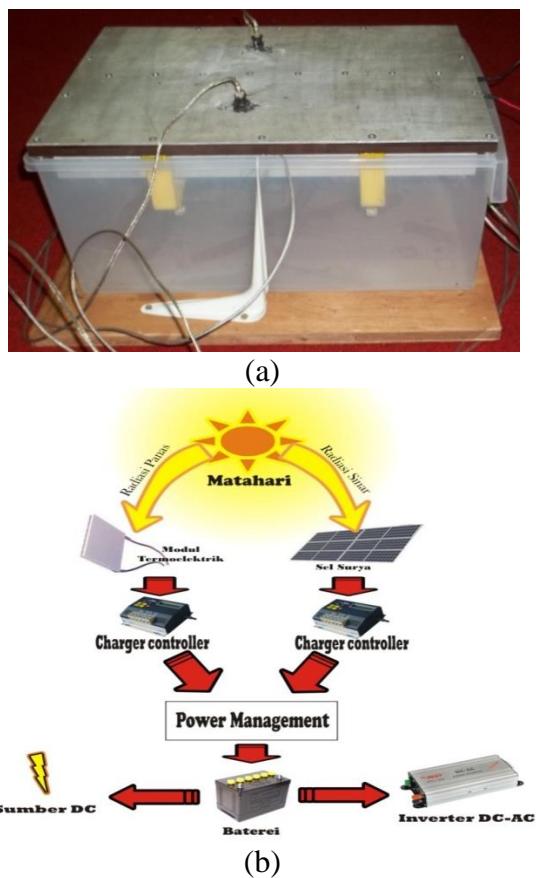
Bagian pendingin modul TE didesain seoptimal mungkin agar mencapai perbedaan temperatur sisi dingin dan sisi panas sebesar mungkin. Proses perpindahan panas yang diterapkan pada sisi dingin adalah konveksi paksa yang mana fluida pendingin memiliki kecepatan. Rancangan pendingin modul TE pada penelitian ini menggunakan air. Gambar 6a menunjukkan posisi Modul TE terletakkan di atas tampungan air dengan sisi alumunium pendingin tercelup dalam air. Keadaan tersebut memungkinkan terjadinya pelepasan panas lebih cepat dibandingkan dengan pendingin berbasis fluida udara (angin).

Perangkat sel surya dan modul TE digabungkan dalam satu piranti hibrid namun beroperasi terpisah. Dalam hal ini dapat dipahami bahwa ketika sinar matahari telah cukup menjadikan sel surya melakukan pengisian ke baterei, maka secara otomatis akan bekerja walaupun

panas yang diberikan belum cukup untuk membangkitkan energi listrik dari modul TE atau panas matahari belum cukup membuat perbedaan nilai temperatur sisi panas dan dingin sehingga sel TE belum bekerja. Adapun ketika keduanya telah dapat menghasilkan energi yang cukup untuk membangkitkan energi listrik, maka hasil dari masing – masing pembangkit dimasukkan ke kontroler pengisian. *Output* dari tiap – tiap kontroler pengisian dimasukkan ke dalam manajemen sistem daya agar dapat diisikan dalam satu sumber penyimpan energi. Selanjutnya energi yang dihasilkan dapat digunakan untuk pembebanan AC dan atau DC.

Penggunaan inverter AC memungkinkan untuk aplikasi peralatan seperti televisi, pompa air dan lainnya dengan syarat tidak melebihi kemampuan inverter. Inverter yang dipilih memiliki kemampuan teoritik 600VA, namun pada kenyataan efisiensi inverter hanya 40-50%. Sehingga daya

efektif yang mampu dibebankan pada inverter tersebut sebesar 240 – 300 VA. Pembebanan DC dapat langsung diambil dari baterei (aki) tergantung pada tegangan yang dikehendaki. Di sinilah peran DC-DC *converter* menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai yang diharapkan. Secara skematis, diagram hibrid ditunjukkan pada Gambar 6b berikut ini.



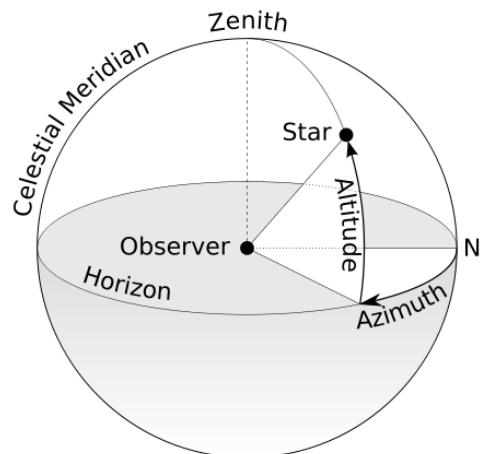
Gambar 6 (a) Modul TE dilengkapi pendingin air (b) Diagram skematik hibrid sel surya – termoelektrik

b. Desain Strategi Kontrol Posisi

Sebagaimana dikemukakan pada bagian pendahuluan, strategi kontrol motor untuk *sun tracking* lebih banyak menerapkan 1 derajad kebebasan yang mana posisi *altitude* (ketinggian matahari). Posisi *azimuth* diatur dengan cara manual. Pada konsep ini, digunakan sensor cahaya sebagai referensi posisi tegak lurus

permukaan sel surya. Sensor cahaya yang biasa dipakai adalah LVDR dan sensor kamera. Orang lebih banyak menggunakan LVDR karena mudah dijumpai di pasaran. Keterbatasan sistem tersebut adalah ketelitian dari sensor dalam menangkap sekaligus menginformasikan data pada gerbang IO atau kontroler yang rendah keandalan. Selanjutnya dengan algoritma kontrol yang didesain, kontroler memberikan sinyal perintah ke *driver* motor dan diikuti pergerakan motor kearah yang dituju.

Penelitian ini menggunakan strategi lain yakni meniadakan penggunaan sensor dan menambah derajad kebebasan mekanisme penggerak. Gambar 7 memudahkan pembaca mengilustrasikan posisi *altitude* dan *azimuth* yang mana secara matematis lebih dikenal dengan koordinat *spherical* (bola). Arah *azimuth* dimulai dari garis 0° pada utara magnetic berjalan searah jarum jam pada bidang horizon dan berjalan berlawanan arah jarum jam pada bidang vertikal untuk sudut *altitude*. Pertimbangan utama pemilihan strategi ini adalah posisi matahari dapat diperhitungkan secara matematis bahkan data estimasi posisi per hari, per-jam tertentu dapat diakses dengan mudah dan bebas bea dari situs www.sunposition.info.

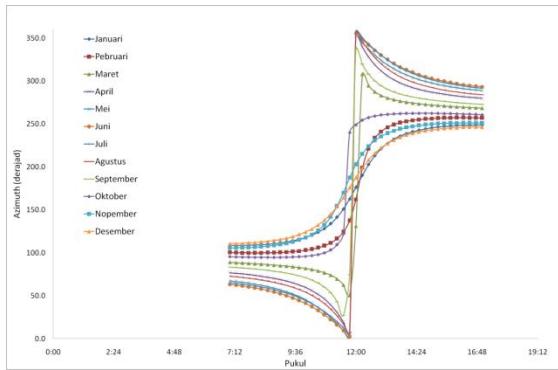


Gambar 7 Ilustrasi arah *azimuth* dan *altitude*

Data posisi matahari selama 1 tahun diobservasi dari situs tersebut dengan interval harian. Dari pengambilan nilai per-hari diperoleh bahwa terdapat 40 sudut *altitude* dan 40 sudut *azimuth* mulai pukul 07:00 hingga 17:00 (10 jam) dengan interval tiap 15 menit. Setelah dilakukan pengamatan nilai sudut setiap bulan, pada jam dan menit yang sama, jangkauan perubahan sudut berkisar antara 1 sampai 5 derajad. Untuk menyederhanakan jumlah nilai sudut tersebut maka diambil nilai rata – rata per bulan kemudian dilakukan *plotting* grafik *azimuth* dan *altitude* sebagaimana ditunjukkan berturut – turut pada Gambar 8a dan 8b. Informasi yang dapat diambil dari Gambar 8a dan 8b adalah posisi *azimuth* bulan januari pada nilai jangkauan sudut kecil kemudian berturut-turut meningkat hingga terjadi puncak nilai terbesar pada bulan juni. Nilai ini kemudian turun kembali hingga bulan desember dengan nilai berimpit dengan bulan januari. Pola perubahan sudut *altitude* tidak sebagaimana *azimuth*. Bulan januari berada di pertengahan antara nilai tertinggi dan terendah. Posisi matahari berangsurnaik hingga bulan maret kemudian turun hingga posisi terendah pada bulan juni. Ketinggian kembali meningkat hingga puncak pada bulan oktober dan diakhiri bulan desember pada nilai yang berimpit dengan bulan januari. Blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 9 merupakan penjelasan sistematis terkait strategi kendali *sun position tracking*. Data sudut *azimuth* dan *altitude* yang telah diolah kemudian dimasukkan ke dalam mikrokontroller berfungsi sebagai *set poin* atau nilai referensi yang akan dicapai. *Real time clock* (RTC) yang dilengkapi dengan baterei internal dimanfaatkan sebagai indicator tanggal dan jam oleh mikrokontroler sehingga dapat memanggil data referensi dengan tepat. Nilai sudut *azimuth* dan *altitude* yang dipilih oleh mikrokontroler berdasar pada

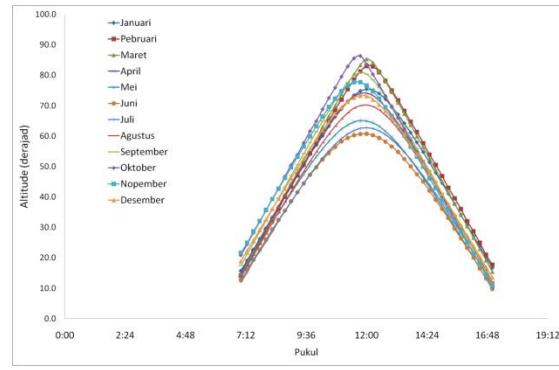
RTC selanjutnya diterjemahkan ke waktu putar motor. Dengan menggunakan hubungan matematis antara posisi sudut dan kecepatan sudut akan diperoleh waktu putar motor untuk mencapai nilai referensi tersebut. Putaran motor (kecepatan sudut) diterjemahkan oleh mikrokontroler dalam bentuk sinyal tegangan yang diinputkan ke dalam motor melalui *driver* motor. Waktu putar motor dikawal oleh mikrokontroler memanfaatkan aplikasi counter di dalamnya. Sesaat setelah motor memposisikan panel surya, sistem penggerak (motor dan *driver*) dikondisikan dalam keadaan hibernasi hingga RTC memberikan sinyal aktif kembali sesuai dengan data *set poin*. Strategi ini memberikan keuntungan berupa konsumsi energi aktuasi lebih rendah dibandingkan dengan sistem kontrol berbasis sensor cahaya.

Iterasi proses terus berlangsung hingga RTC menunjukkan pukul 17:00 kemudian mikrokontroler memberikan perintah kepada motor untuk kembali pada posisi awal sudut *azimuth* dan *altitude* 0° . Demikian pula pada pagi hari, ketika RTC telah memberikan informasi pukul 07:00, mikrokontroler memanggil data yang bersesuaian dengan tanggal dan jam kemudian memposisikan panel sebagaimana *set poin*. Keadaan *fail* (gagal) didefinisikan ketika baterei internal melemah sehingga RTC padam. Algoritma pemrograman dirancang sedemikian rupa sehingga ketika RTC dihidupkan kembali dengan waktu yang telah disesuaikan dengan waktu setempat, maka mikrokontroler memberikan perintah kepada motor untuk memposisikan panel sesuai *set poin*. Kelemahan yang paling nampak dari strategi *sun position tracking* berbasis *data training* ini adalah alat ini harus diprogram sesuai letak geografis daerah yang bersangkutan.



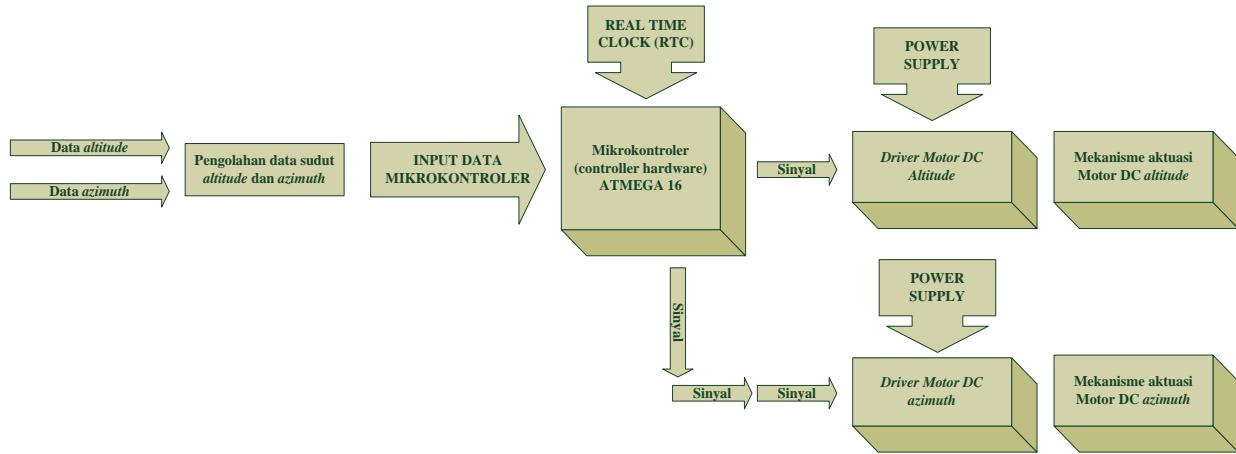
(a)

Gambar 8 (a) Sudut Azimuth



(b)

Gambar 8 (b) Sudut Altitude , selama 1 tahun

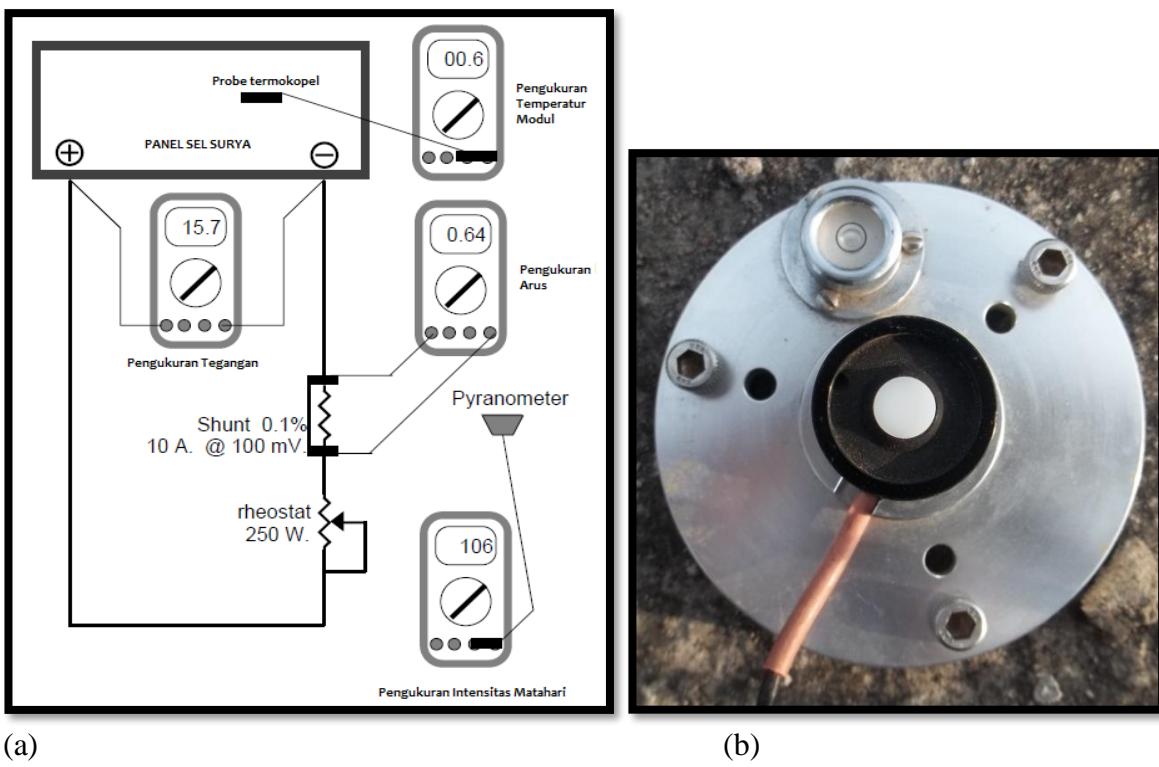
Gambar 9 Blok diagram strategi kendali *sun position tracking*

METODE EKSPERIMENT

a. Instrumentasi Pengujian Sel Surya

Pengujian sel surya dilakukan secara langsung di bawah sinar matahari dengan pengambilan data terpisah dari modul TE. Skema sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 10a merupakan konfigurasi standar merujuk pada standar ASTM E948 – 09. Pengukuran tegangan luaran bersih V_{s-out} [mV] dan arus luaran I_{s-out} [mA] menggunakan multimeter yang dipasang berturut – turut paralel dan seri. Beban *rheostat* yang digunakan memiliki jangkauan perubahan resistansi dari 0 – 100ohm, 250W. Pyranometer buatan LI-

COR seri LI-200 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10b digunakan untuk mengukur intensitas matahari pada saat pengujian. Data diambil dalam sehari mulai pukul 07:00 hingga 17:00WIB. Guna mendapatkan hasil yang valid dan perbandingan yang seimbang, maka dioperasikan 2 panel surya dengan kondisi statis dan dinamis (dengan kontrol). Panel dengan kondisi statis diposisikan pada sudut puncak *azimuth* 352,7° dan *altitude* 64,9°. Sedangkan panel dinamis dioperasikan dengan kendali *sun position tracking* mulai awal hingga akhir dengan interval perubahan sudut setiap 15 menit.



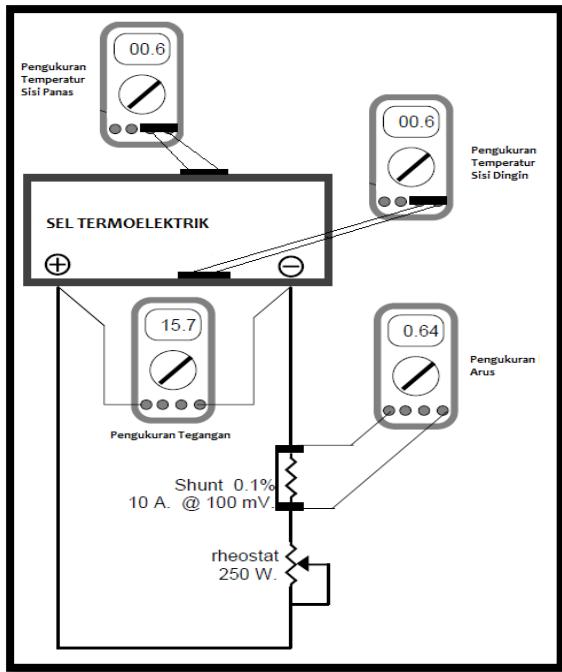
Gambar 10 (a) Skema pengukuran panel surya (b) LI-200 LI-COR Pyranometer

Prosedur pengambilan data dilakukan sebagai berikut: Kedua panel surya dijalankan serentak dengan skema instrumentasi alat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10a dan terpisah satu sama lain. Pengambilan data dilakukan mulai pukul 07:00 dengan variabel yang direkam antara lain intensitas cahaya (W/m^2), tegangan luaran dari panel surya (V) dan arus luaran (Amp). Dalam satu termin pengambilan data, diberikan variasi pembebahan *rheostat* mulai dari 10 hingga 100 ohm dengan interval 10 ohm. Setiap 15 menit dilakukan pengambilan data secara serempak sehingga ada 40 kali pengambilan data.

b. Instrumenasi Pengujian Sel Termoelektrik

Pengujian sel TE seri TEC1-12710 secara individu dilakukan menggunakan alat test sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4b.

Pemanas yang digunakan adalah plat panas setrika yang dapat diatur temperatur pemanasannya. Pada sisi dingin, satu perangkat pendingin *processor* yang terdiri atas cairan pendingin, radiator pendingin dan pompa cairan. Dua buah plat tembaga dipasang pada sisi panas dan dingin untuk meningkatkan kontak termal dengan pemanas dan pendingin. Susunan seperti ini memudahkan pengendalian panas yang diaplikasikan dan lebih teliti dalam pengambilan data temperatur. Skema pengukuran individu sel TE yang ditunjukkan pada Gambar 10 menggunakan 2 AVO meter dan 2 *thermo reader*. Tegangan luaran bersih (*net voltage*) dari kedua kutub sel TE diukur secara paralel dan pengukur arus dipasang seri dengan resistor shunt 0.1% 10Amp atau lebih dikenal dengan sensor arus.



Gambar 11 Skema pengukuran sel TE

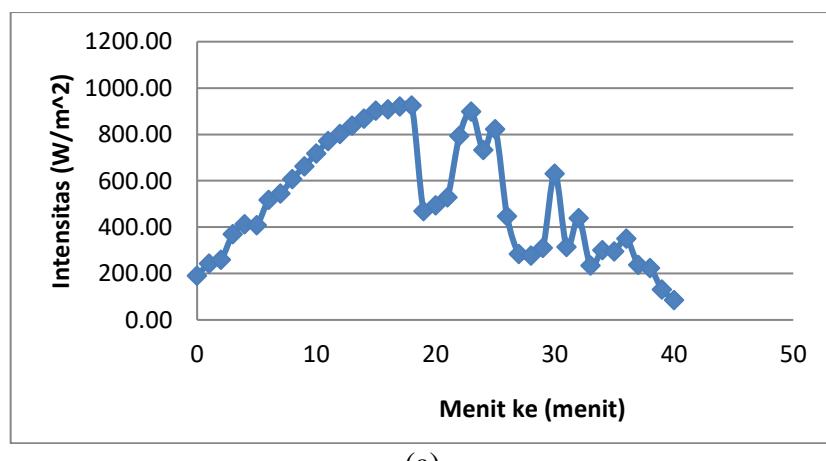
Prosedur karakterisasi dilakukan sebagai berikut: temperatur plat panas dan bagian pendingin diatur agar laju perpindahan panas konstan yang mana diindikasikan dengan suhu sisi panas dan dingin bernilai konstan. Keadaan ini diterapkan pada beberapa jenis beban resistif terhubung pada luaran sel TE. Dimulai dengan pengaturan gradient (beda) temperatur, beban resistif kemudian dihubungkan dengan sel TE dan dilakukan penyesuaian agar gradient temperatur agar sama seperti

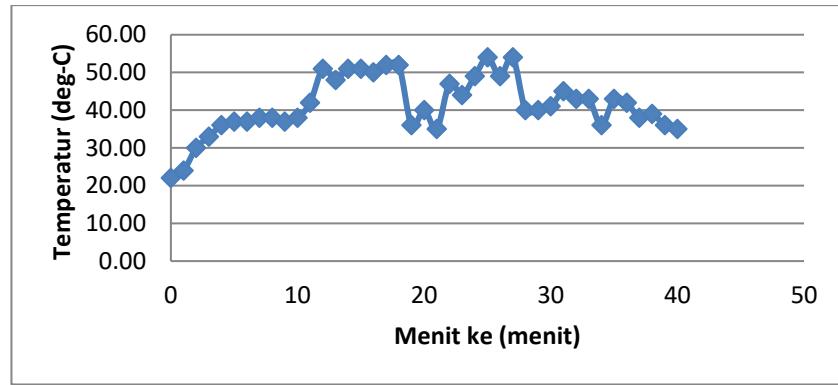
kondisi sebelum pembebanan. Empat temperatur tes ($T_h - T_c = 7, 27, 42, 61^\circ\text{C}$) dipakai untuk karakterisasi sel tersebut dengan suhu pemanas T_h berturut-turut $40, 60, 80$ dan 100°C . Setelah perbedaan temperatur yang dikehendaki tercapai, dilakukan pengukuran tegangan luaran V_{out} [mV] sel TE dan arus luaran I_{out} [mA]. Pengukuran nilai berpasangan tegangan luaran dan arus luaran, $\{V_{out}, I_{out}\}$,

HASIL DAN DISKUSI

a. Unjuk Kerja Sel Surya

Intensitas radiasi sinar matahari yang diambil pada tanggal 10 Juli 2012 dengan menggunakan *pyranometer* seri LI-200, ditunjukkan pada Gambar 12a. Absis grafik tersebut merupakan pengambilan data ke x dengan interval antara pengambilan data selama 15 menit. Dari pengambilan data ke-0 hingga 19 atau pukul 07:00 – 12:00 terjadi kenaikan yang relatif konsisten. Selanjutnya data bergerak secara fluktuatif hingga pukul 17:00 dikarenakan matahari tertutup awan sehingga intensitas sinar berkurang. Gambar 12b memvisualisasikan tren temperatur panel selama pengambilan data. Temperatur maksimum yang dicapai oleh panel sebesar 54°C pada tengah hari.



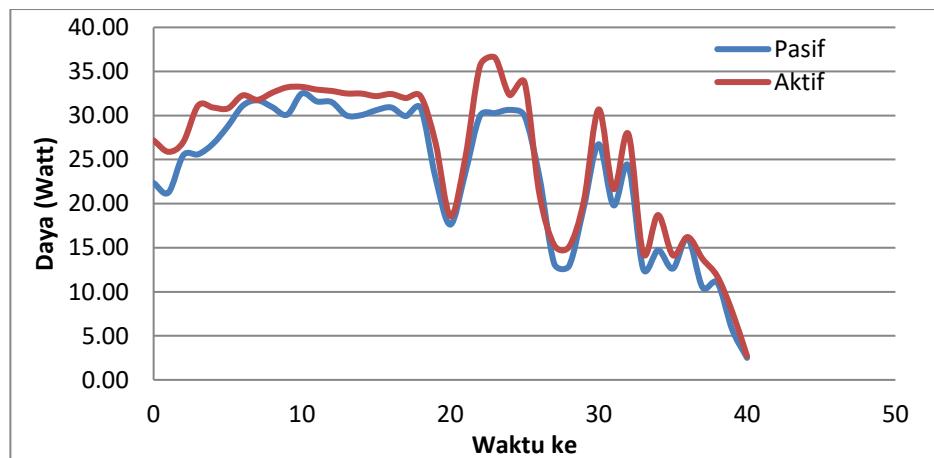


(b)

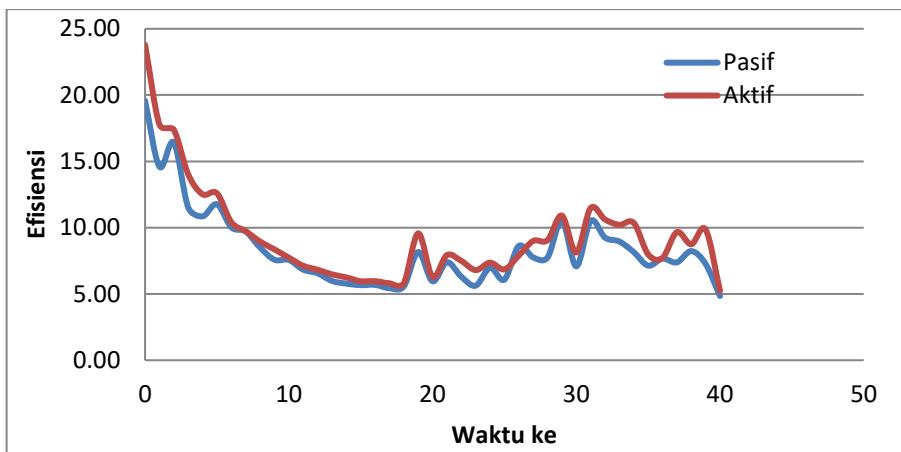
Gambar 12 (a)Intensitas matahari dan (b) Temperatur panel saat pengambilan data (tanggal 10 Juli 2012)

Gambar 13 merupakan profil daya antara panel surya pasif dan aktif. Istilah pasif dan aktif dipakai untuk membedakan antara panel surya yang diposisikan tetap pada arah *azimuth* serta *altitude* tertentu dan panel surya yang dilengkapi dengan actuator penggerak. Grafik tersebut merupakan hasil pengolahan *short current* dan *open voltage* dengan relasi matematika $P_{out} = V_{oc}.I_{sc}$. Hasil perhitungan daya pada pelaksanaan eksperimen sesuai tanggal tersebut diperoleh daya maksimum sebesar 37 W pada pembebanan rheostat 10 ohm. Daya rata – rata yang dicapai selama sepuluh jam sebesar 25,75 W. Artinya dalam 10 jam (pada hari pengambilan data), energi listrik rata – rata yang dihasilkan oleh

panel surya dengan *sun position tracking* sebesar 257Wh. Adapun daya luaran dan energi rata – rata panel surya berturut – turut 23,47 W dan 234,7 Wh. Dengan kata lain penambahan perangkat *sun position tracking* memberikan surplus energi sekitar 10% dibandingkan dengan hasil pengukuran pada panel surya pasif. Profil kurva efisiensi panel surya ditunjukkan dengan jelas pada Gambar 14. Efisiensi panel dengan menerapkan kontrol pada instalasi lebih tinggi dibandingkan dengan pasif. Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara daya luaran sel surya dengan intensitas sinar matahari pada luasan panel $0,598 \text{ m}^2$. Efisiensi tertinggi didapatkan sebesar 23,8% serta efisiensi terendah pada hari tersebut sebesar 4,84%.



Gambar 13 Grafik daya luaran panel surya



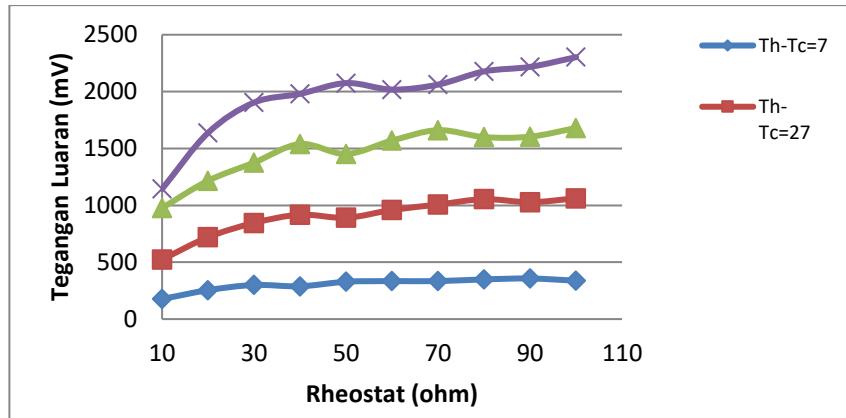
Gambar 14 Grafik efisiensi panel surya

b. Unjuk Kerja Sel dan Modul Termoelektrik

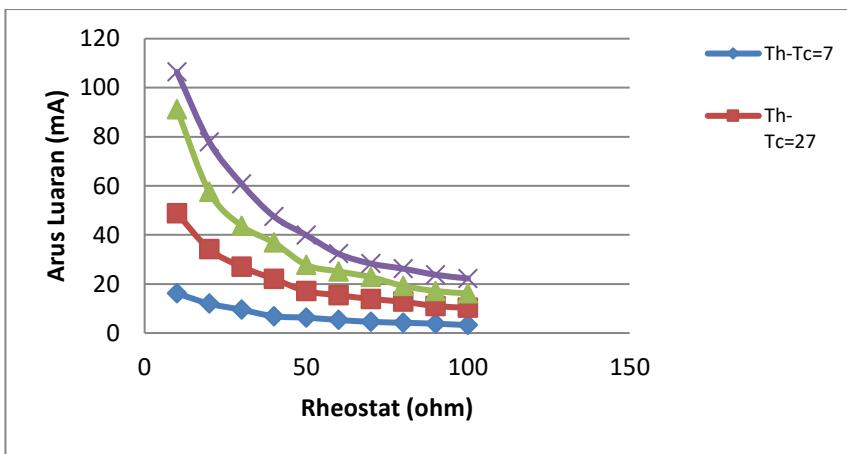
Karakterisasi sel tunggal TEC1-12710 berbasis Bi-Te dengan menggunakan alat uji sel TE individu disajikan pada Gambar 15, 16, 17 dan 18. Sebagaimana yang diharapkan, tegangan luaran meningkat seiring dengan peningkatan temperatur sisi panas T_h (demikian juga dengan perbedaan temperatur T_h-T_c). Kenaikan tegangan luaran ini juga terjadi pada setiap perubahan kenaikan tahanan beban (*rheostat*). Pada nilai tahanan sama, tegangan luaran meningkat akibat dari naiknya nilai perbedaan temperatur. Nilai capaian tertinggi tegangan luaran sel TE tunggal pada $T_h-T_c = 61^\circ\text{C}$ sebesar 2.3 Volt. Simpulan ini valid untuk Gambar 15. Tren grafik arus luaran berbeda dengan tren tegangan luaran. Gambar 16 memberikan informasi bahwa pada kenaikan T_h-T_c ; nilai arus luaran bertambah namun berkurang secara logaritmik pada pertambahan nilai tahanan beban. Tren ini sesuai dengan hubungan antara arus dan hambatan yang selalu berbanding terbalik. Arus luaran tertinggi dicapai pada $T_h-T_c=60^\circ\text{C}$ pada pembebangan rheostat 10 ohm sebesar 106 mA. Pada nilai hambatan sama, besarnya

arus luaran juga menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya perbedaan temperatur sisi panas dan dingin. Hubungan antara daya luaran pada variasi nilai hambatan geser ditunjukkan pada Gambar 17. Penurunan daya luaran tidak logaritmik sebagaimana tren arus luaran. Besarnya daya merupakan hasil perkalian antara tegangan luaran dan arus hubungan singkat dalam hal ini arus yang diukur paralel pada hambatan *shunt* dan seri terhadap rheostat. Daya tertinggi sel tunggal TE sebesar 113 mW diperoleh pada $T_h-T_c=60^\circ\text{C}$ dan hambatan beban 20 ohm. Pada nilai hambatan beban yang sama, nilai daya luaran meningkat dengan bertambahnya nilai T_h-T_c .

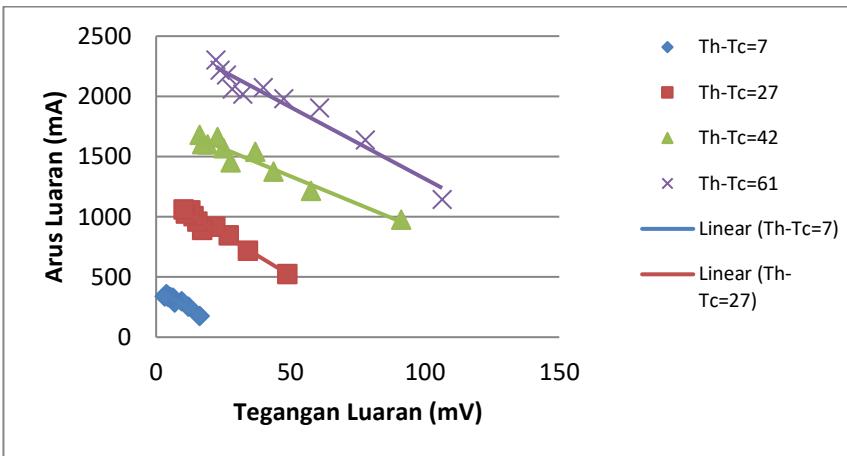
Selanjutnya, hubungan antara arus luaran dan tegangan luaran ditunjukkan pada Gambar 18. Simpulan dari gambar tersebut yakni adanya linieritas antara arus dan tegangan luaran. Semakin besar nilai tegangan luaran, maka arus luaran semakin kecil. Dapat dilihat pula bahwa gradien tiap – tiap kurva bernilai negatif dan bisa dikatakan hampir sama nilainya. Dari karakteristik hubungan arus dan tegangan luaran ini dapat diketahui pula nilai tahanan dalam dari TEC1-12710 pada kondisi terkait.



Gambar 15 Karakteristik tegangan luaran versus beban sel TE tunggal



Gambar 16 Karakteristik arus luaran versus beban sel TE tunggal



Gambar 17 Karakteristik arus luaran versus tegangan luaran sel TE tunggal

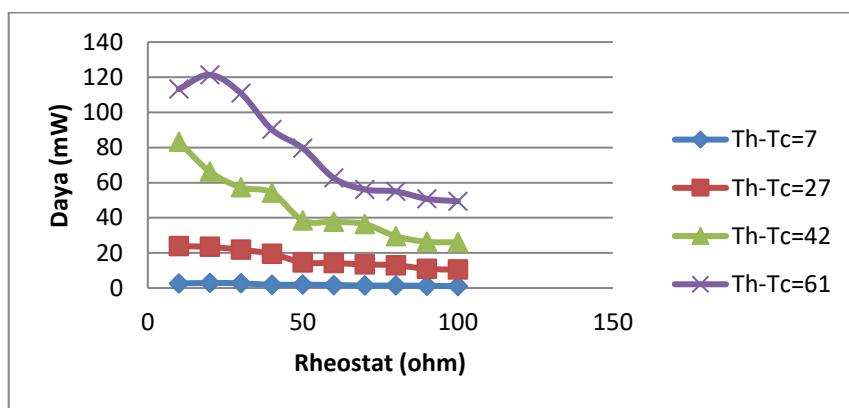
Proses karakterisasi sangat bermanfaat untuk dasar perancangan modul TE. Asumsi yang diambil pada penelitian ini adalah kemampuan sel individu berada

pada kisaran tegangan luaran 0.5 volt saat $Th-Tc=27^{\circ}C$. Dasar penentuan asumsi ini bahwa temperatur maksimum panel sel surya diperoleh $52^{\circ}C$ (sesuai data di atas),

sehingga dapat digeneralisasi bahwa kemungkinan besar sisi panas modul TE juga akan berada pada suhu maksimum tersebut. Untuk mencapai perbedaan temperatur tersebut, tidak diperlukan daya eksternal yang besar pada sisi pendingin modul. Dengan demikian, diputuskan bahwa pada modul TE akan digunakan 32 sel tunggal yang dihubungkan secara seri. Perkiraan tegangan luaran yang mampu diberikan oleh modul TE pada perbedaan temperatur tersebut sebesar 16 volt. Nilai ini lebih tinggi dari *threshold* baterei yaitu 12 volt.

Hasil eksperimen lapangan menggunakan sumber panas matahari pada tanggal 30 Juni 2012 masih menunjukkan tegangan

luaran jauh dari harapan yakni sebesar 0.8 volt. Setelah dilakukan evaluasi teknis, ada beberapa hal yang dapat menjadi poin permasalahan penting antara lain temperatur sisi panas modul belum mencapai 52°C yaitu $\text{Th}=51.5^{\circ}\text{C}$ dan $\text{Tc}=43^{\circ}\text{C}$ (perbedaan temperatur yang terjadi hanya 8.5°C); bagian pendingin kurang terisolasi dengan baik dari lingkungan luar sehingga masih terpengaruh radiasi panas yang mengakibatkan suhu air pendingin bertambah besar; kontak antara plat penghantar panas terhadap sel TE tidak sempurna sehingga panas tidak berpengaruh besar terhadap sel TE.



Gambar 18 Karakteristik daya versus beban sel TE tunggal

c. Tinjauan Aspek Ekonomis

Berdasarkan referensi Undang – Undang, tarif dasar listrik (TDL) PLN mengalami kenaikan beberapa tahun terakhir. Sebagai contoh kasus untuk golongan tarif R-1/TR 1300 VA, harga dasar pada tahun 2004 sebesar Rp.385,00/kwh menjadi Rp.790,00/kwh pada tahun 2011 serta sangat mungkin kenaikan ini berlangsung hingga beberapa tahun ke depan. Tentu pemerintah mengambil keputusan ini dengan berbagai pertimbangan yang rasional. Solusi konstruktif yang paling mungkin adalah melakukan penghematan konsumsi listrik serta mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil.

Walaupun sudah bukan merupakan hal yang baru lagi, pengembangan sel surya masih sangat jarang di Indonesia. Penelitian ini merupakan satu bentuk usaha untuk memasyarakatkan pembangkit listrik tenaga surya. Adanya penambahan modul TE sebagai pendamping sel surya memberikan nuansa kebaruan karena memang belum dikembangkan sistem hibrid jenis ini di Indonesia.

Rasionalisasi biaya pembuatan 1 unit prototip sel surya – termoelektrik dirinci pada Tabel 2. Harga satuan komponen tertuang pada tabel tersebut adalah harga 2 bulan terakhir terhitung dilaporkannya penelitian ini. Total anggaran pembuatan

prototip sebesar Rp. 17.492.000,00. Perlu dicermati bahwa perhitungan biaya ini masih belum dihitung berdasar pada *mass product* yang bisa dipastikan bahwa harga jauh lebih murah. Merujuk pada data teknis sel surya, umur pakai panel yang dibuat oleh PT. SHARP ini sebesar 15 tahun. Guna menyederhanakan variabel perhitungan, maka harga yang dipakai adalah harga pokok pembuatan prototip. Dengan asumsi: 1 tahun kalender masehi setara dengan 360 hari; hari efektif penyinaran matahari untuk kawasan 2 musim rata - rata 180 hari; rata - rata produksi listrik sehari selama 10 jam, maka selama 15 tahun diperkirakan pemakaian efektif panel untuk menghasilkan listrik sebesar 27000 jam (2700 hari). Dengan demikian jatuh harga per -hari efektif sebesar Rp. 6500,00

Secara teoritis, jika kemampuan nominal sel surya adalah 60Wp, dengan asumsi Hasil perhitungan energi yang diperoleh selama satu hari pengambilan data, dengan mengaplikasikan kontrol *sun position tracking*, diperoleh energi listrik sebesar 257.5 Wh. Dengan demikian dapat dilakukan perhitungan biaya per kWh dengan jalan membagi harga jatuh per hari efektif dengan energi listrik. Harga listrik per-kWh dengan patokan daya luaran sebagaimana hasil eksperimen adalah Rp 25300,00/kWh. Tentu harga ini menjadi sangat mahal ketika hanya digunakan satu panel. Oleh karena itu, disarankan pemakaian panel surya kapasitas 60Wp sebanyak 4 panel atau lebih pada satu instalasi seri. Perlu dicermati juga bahwa daya luaran yang dihasilkan pada eksperimen relatif kecil.

Tabel 2. Biaya pembuatan prototip

No	Item	Price
1	Panel Surya	Rp1.700.000,00
2	Motor aktuator	Rp300.000,00
3	Kontroler	Rp2.500.000,00
4	Baterai Penyimpanan	Rp540.000,00
5	Power Management	Rp1.500.000,00
6	Charger Controller	Rp600.000,00
7	Struktur	Rp1.500.000,00
8	Modul TE set 32 sel	Rp4.500.000,00
9	Inverter	Rp1.120.000,00
10	DC - DC converter	Rp150.000,00
11	Labor cost dan fabrikasi	Rp3.082.000,00
Total		Rp17.492.000,00

KESIMPULAN

Desain dan pengembangan pembangkit listrik hibrid sel surya – sel termoelektrik telah dilakukan dengan mengikuti kaidah desain mekanikal. Uji coba perangkat mulai karakterisasi sel hingga pengujian lapangan telah dilakukan dengan mengikuti standar pengukuran dan alat

ukur terkalibrasi. Panel surya yang digunakan pada perangkat ini berjenis NDT060P1 dilengkapi dengan mekanisme *sun position tracker* 2 DOF berbasis data training untuk meminimalkan pemakaian sensor. Modul TE telah dibangun dengan menggunakan 32 sel TEC1-12710 yang dirangkai secara seri.

Hasil pengujian sel surya menunjukkan kesesuaian tren dengan referensi lain yang telah dipraktekkan sebelumnya hanya saja perangkat ini baru memberikan daya luaran rata – rata 25.75W dengan efisiensi sekitar 23.8% lebih tinggi 10% dibandingkan panel surya pasif. Karakteristik individual sel TEC1-12710 yang telah diuji di alat uji sel TE tunggal menunjukkan hasil yang proporsional dengan karakteristik umum. Tegangan luaran tertinggi dicapai pada $T_h-T_c=61^\circ\text{C}$ sebesar 2,3 volt dengan nilai daya tertinggi 120 mW. Pengujian modul TE yang telah difabrikasi dengan sumber panas matahari masih belum menunjukkan hasil yang baik. Nilai capaian tegangan luaran tertinggi hanya 0.8 V sehingga masih jauh dari nilai *threshold* pengisian baterei. Penyebab utama adalah panas yang diterima oleh modul TE maksimum 52°C pada saat pengujian. Faktor lainnya antara lain medium pendingin ikut terkena radiasi panas matahari secara langsung sehingga temperatur air ikut meningkat hingga 43°C .

Daftar Pustaka

- Carmo, J.P., Antunes, J., Silva, M.F., Ribeiro, J.F., Goncalves, L.M. dan Correia J.H., 2011, Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior, *Measurement* 44: pp. 2194–2199
- Chavez-Urbiola, E.A. , Vorobiev, Yu.V. dan Bulat, L.P. , 2012, Solar hibrid sistem with thermoelectric generators, *Solar Energy* 86 : pp. 369–378
- Chuang-Yu, Chau, K.T., 2009, Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking, *Energy Conversion and Management* 50 : pp 1506–1512
- Ciyylan, B. and Yilmaz, S., 2007. Design of a Thermoelectric Module Test Sistem Using a Novel Test Method. *International Journal of Thermal Sciences* 46: 717–725.
- Davis, M.; Lawler, J.; Coyle, J.; Reich, A. dan Williams, T., 2008, Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance. *Photovoltaic Specialists Conference*, 33rd IEEE, Page(s): 1 – 6
- Lertsatitthanakorn, C., Therdyothin, A.2 dan Soponronnarit, S., 2010, Performance analyses and economic evaluation of a hibrid thermoelectric solar water heater,
- Analisa lainnya adalah kemungkinan besar panas yang diterima tidak dapat menyeberangi kontak permukaan dengan sempurna dan mengakibatkan rendahnya nilai perbedaan temperature sisi dingin dan panas.
- Rekomendasi yang diajukan untuk langkah selanjutnya adalah melakukan *redesign* modul TE untuk mengakomodir hasil analisa pada paragraf sebelumnya. Selain itu perlu ditambahkan *solar concentrator* agar panas yang diterima di sisi panas modul TE mengalami peningkatan yang signifikan.
- Ucapan Terima Kasih**
Tim riset di bawah payung Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) UNS mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial dari Balai Penelitian dan Pengembangan Propinsi Jawa Tengah melalui skema Hibah Unggulan Daerah 2011 dan Hibah Unggulan Perguruan Tinggi.

- Proc. IMechE Vol. 224 Part A: J. Power and Energy*
- Miljkovic, N. dan Wang, N.E., 2011. Modeling and optimization of hibrid solar thermoelectric sistems with thermosyphons, *Solar Energy* 85 :pp. 2843–2855
- Poulek, V., dan Libra, M., 1998. New solar tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 51: pp. 113-120
- Poulek, V., dan Libra, M., 2000(a). A very simple solar tracker for space and terrestrial applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 60: pp. 99-103
- Poulek, V., dan Libra, M., 2000(b). A very simple solar tracker for space and terrestrial applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 61: pp. 199-202
- Rizk, J. dan Chaiko, Y., 2008. Solar Tracking Sistem: More Efficient Use of Solar Panels *Engineering and Technology* 41
- Rubio, F.R., Ortega, M.G., Gordillo, F., dan Lo'pez-Martínez, M.,2007. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Conversion and Management* 48 :pp. 2174–2184
- Singh, R., Tundee, S., dan Akbarzadeh, A., Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules. *Solar Energy* 85 :pp. 371–378