



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Teknologi refrigerasi ramah lingkungan menggunakan energi matahari menuju *green campus* Politeknik Negeri Bali

I Made Rasta^{1*}, Adi Winarta¹, Putu Wijaya Sunu¹, I Wayan Adi Subagia² dan
I Gusti Ketut Puja³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta 55282

*Email: maderasta@pnb.ac.id

Abstrak

Meningkatnya permintaan energi global, menipisnya sumber daya energi fosil, dan perubahan iklim adalah kenyataan yang tidak dapat disangkal. Sistem refrigerasi jenis chest freezer adalah salah satu peralatan elektronik yang banyak digunakan di rumah serta industri. Penggunaan sistem refrigerasi terus meningkat, yang menegaskan bahwa sejumlah besar konsumsi energi diperlukan untuk pengoperasiannya. Sistem refrigerasi konvensional yang digerakkan oleh jaringan listrik (*power grid*) adalah produk utama di pasar global. Selain itu, penggunaan refrigerasi elektrik meningkatkan tekanan listrik pada waktu beban puncak. Untuk mengurangi kontradiksi antara permintaan dan pasokan listrik, lebih banyak pembangkit listrik termal telah dibangun, dan lebih banyak bahan bakar fosil telah dibakar dalam beberapa dekade terakhir. Oleh karena itu, perubahan baru harus dilakukan untuk mengurangi dan mengoptimalkan penggunaan energi fosil. Pengembangan teknologi dengan sumber energi terbarukan menjadi tindakan istimewa untuk pengurangan konsumsi energi dan pencarian efisiensi energi yang lebih baik. Makalah ini menyajikan pemanfaatan energi matahari (*solar energy*) sebagai salah satu pendekatan untuk mengurangi atau menggantikan sebagian konsumsi energi sistem refrigerasi konvensional di bawah tekanan perlindungan lingkungan. Hasil studi menunjukkan dengan sistem Photovoltaik (PV), energi panas matahari dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi sistem refrigerasi jenis chest freezer baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri

Kata kunci: Refrigerasi hijau, energi terbarukan, energi matahari, Sel Photovoltaik (PV) dan kampus hijau

Abstract: Increasing global energy demand, depleting fossil energy resources, and climate change are undeniable facts. The chest freezer type refrigeration system is one of the most widely used electronic equipment in homes and industries. The use of refrigeration systems continues to increase, which confirms that a large amount of energy consumption is required for their operation. Conventional refrigeration systems that are powered by a grid (*power grid*) are a major product in the global market. In addition, the use of electric refrigeration increases the electric pressure during peak loads. To reduce the contradiction between electricity demand and supply, more thermal power plants have been built, and more fossil fuels have been burned in recent decades. Therefore, new changes must be made to reduce and optimize the use of fossil energy. The development of technology with renewable energy sources is a special action for reducing energy consumption and the search for better energy efficiency. This paper presents the utilization of solar energy (*solar energy*) as an approach to reduce or partially replace the energy consumption of conventional refrigeration systems under environmental protection stress. The study results show that with the Photovoltaic (PV) system, solar thermal energy can be utilized to meet the energy needs of the chest freezer type refrigeration system for both household and industrial purposes.

Keywords: Green refrigeration, renewable energy, solar energy, Cells Photovoltaic (PV) and green campus

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Meningkatnya jumlah penduduk, kemajuan teknologi dan pertumbuhan ekonomi, dalam beberapa dekade terakhir telah menyebabkan permintaan energi meningkat, sehingga penyediaan energi yang andal menjadi sebagai salah satu tantangan besar di abad ke-21 [1]. Menipisnya sumber daya tak terbarukan, pemasalahan pemanasan global meningkat

dan untuk menghindari efek berbahaya dan negatif dari polusi di lingkungan telah mendorong tren untuk bergeser ke arah penggunaan sumber daya energi yang berkelanjutan [2,3,4]. Akibatnya, sangat penting untuk mengeksplorasi sumber daya yang dapat diperbarui dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan konversi energi listrik. Sumber energi terbarukan lebih disukai daripada eksploitasi sumber daya

tak terbarukan karena ketersediaan jangka panjang, aksesibilitas dan kebaikan lingkungan [5].

Salah satu teknologi pembangkit energi terbarukan yang paling luas adalah penggunaan sistem Photovoltaik (PV) yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik [6,7]. Jenis teknologi energi terbarukan yang bebas polutan selama operasi, mengurangi masalah pemanasan global, menurunkan biaya operasional, dan menawarkan perawatan minimal dan kepadatan daya tertinggi dibandingkan dengan teknologi energi terbarukan lainnya, menyoroti keunggulan energi surya Photovoltaic (PV) [8,9]. Riset dan pengembangan masih terus mendorong efisiensi seiring dengan penurunan biaya [10,11]. Di sisi lain, photovoltaic sudah digunakan tetapi masalahnya adalah daya tahan sistem dan pengeluaran yang rendah karena panel tidak berfungsi sama dari waktu ke waktu. Begitu pula dengan baterainya yang juga sangat mahal dan tidak tahan lama. Namun, bersama dengan penghalang lainnya, penghalang utama adalah sinar matahari yang terputus-putus yang hanya tersedia untuk sebagian hari. Oleh karena, sifat *intermittency* dari sumber energi terbarukan, terutama energi matahari, merupakan kendala utama sejauh pasokan energi dari mereka diperhatikan, dan pengaturan khusus harus dibuat untuk kemampuan beradaptasi mereka [12]. Sistem energi terintegrasi / hybrid yang terdiri dari berbagai teknologi yang digabungkan bersama untuk memangkas permintaan daya puncak (perataan beban) sedang digunakan secara komplementer [13,14]. Sebagian besar sistem hybrid menggunakan berbasis bahan bakar berbasis karbon untuk mengatasi terputusnya sumber energi terbarukan [15].

Para ilmuwan dan ahli teknologi energi melakukan upaya mereka untuk mendapatkan pasokan energi yang lebih stabil, lebih efisien, stabil dan sepanjang waktu dari energi terbarukan, tetapi menangani permintaan energi membutuhkan upaya yang tak terhitung jumlahnya [16]. Ada banyak penekanan dalam mengambil tindakan korektif untuk mengatasi pemanasan global dan mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam sistem energi konvensional. Langkah-langkah tertentu sedang dilakukan untuk menunjukkan potensi sistem energi hijau yang berkelanjutan [17].

1.1. Penggunaan Energi Surya dalam sistem refrigerasi

Dampak dari pembakaran bahan bakar fosil telah menimbulkan pencemaran lingkungan yang memaksa komunitas riset energi untuk secara serius mempertimbangkan sumber terbarukan yang tersedia secara alami, seperti energi surya. Teknologi pendinginan tenaga surya memanfaatkan energi matahari dan menggunakannya untuk menjalankan sistem pendingin. Jenis aplikasi tenaga surya ini merupakan pilihan yang menarik untuk pengawetan makanan dan pendinginan vaksin dan obat-obatan di daerah dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi dan tidak ada pasokan listrik. Sistem refrigerasi yang menggunakan refrigeran ramah lingkungan memberikan keunggulan keberlanjutan jika dibandingkan dengan pilihan refrigeran lainnya. Namun, penggunaan energi yang terkait dengan pengoperasian sistem refrigerasi dan dampak lingkungan yang terkait dengan pembangkitan dan distribusinya sering kali melebihi pilihan refrigeran. Untuk meminimalkan dampak lingkungan yang terkait dengan pengoperasian sistem pendingin, adalah bijaksana untuk

mengevaluasi prospek sumber energi bersih seperti energi matahari.

1.2. Energi Matahari

Para ilmuwan semakin memanfaatkan energi matahari dalam beberapa tahun terakhir karena ancaman kekurangan energi global [18].

Penggunaan langsung energi surya menarik karena ketersediaannya yang universal, dampak lingkungan yang rendah, dan biaya bahan bakar yang rendah atau tidak ada sama sekali. Penelitian telah menunjukkan bahwa energi matahari adalah sumber ideal untuk aplikasi pemanas suhu rendah seperti ruang dan pemanas air panas rumah tangga. Aplikasi pemanas matahari bersifat intuitif karena, ketika energi matahari diserap di permukaan, suhu permukaan meningkat, memberikan potensi pemanasan. Penggunaan energi matahari untuk mendinginkan agak kurang intuitif. Daya dari matahari yang dicegat oleh bumi kira-kira $1,8 \times 10^{11}$ MW, yang jauh lebih besar daripada tingkat konsumsi di bumi dari semua sumber energi komersial. Dengan demikian, pada prinsipnya energi matahari dapat menyuplai seluruh kebutuhan energi dunia saat ini dan yang akan datang secara berkelanjutan. Selain itu, energi matahari merupakan sumber energi yang bersih, gratis dan tersedia dalam jumlah yang cukup di hampir seluruh belahan dunia.

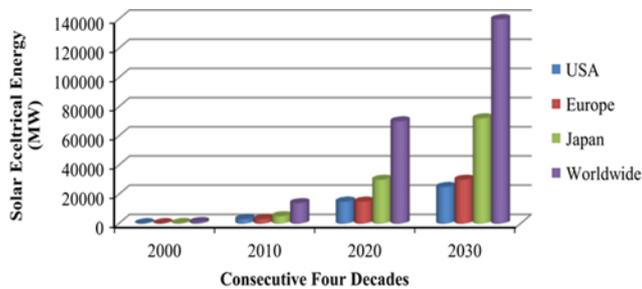
Dalam beberapa tahun terakhir, banyak negara menghadapi kesulitan dengan masalah sistem pendingin. Secara khusus, permintaan refrigerasi dan AC untuk tujuan komersial dan residensial selama musim panas terus meningkat [19]. Terdapat kekurangan energi listrik dan penyimpanan di negara berkembang untuk mengakomodasi sistem konsumsi energi tinggi seperti *refrigeration* dan *cooling*. Oleh karena itu, teknologi pendingin matahari telah menjadi titik fokus di seluruh dunia; krisis energi ini telah membuka pintu bagi energi surya untuk menangani tidak hanya kebutuhan puncak listrik tetapi juga masalah pendinginan.

1.3. Siklus refrigerasi yang dioperasikan sel-PV

Pendinginan surya melibatkan sistem di mana tenaga surya digunakan untuk tujuan pendinginan [20]. Pendinginan dapat dicapai, salah satunya melalui sistem energi surya berbasis PV (Photovoltaik), di mana energi matahari diubah menjadi energi listrik dan digunakan untuk pendinginan seperti metode konvensional [21].

Sel Photovoltaik (PV) pada dasarnya adalah perangkat semikonduktor solid-state yang secara langsung mengubah energi cahaya (radiasi matahari) menjadi energi listrik arus searah (DC). Panel fotovoltaik surya menghasilkan daya DC yang dapat digunakan untuk mengoperasikan motor DC yang digabungkan ke kompresor sistem pendingin kompresi uap. Pertimbangan utama dalam merancang siklus pendinginan PV melibatkan pencocokan yang tepat dengan karakteristik kelistrikan motor yang menggerakkan kompresor dengan arus dan tegangan yang tersedia yang dihasilkan oleh susunan PV. Sayangnya, modul PV akan beroperasi pada berbagai kondisi yang jarang menguntungkan seperti kondisi peringkat. Selain itu, daya yang dihasilkan oleh array PV sama variabelnya dengan sumber daya surya dari mana ia berasal. Kinerja modul PV, yang dinyatakan dalam karakteristik tegangan arus dan tegangan daya, pada dasarnya bergantung pada radiasi matahari dan suhu modul.

Untuk mengakomodasi permintaan listrik yang besar, Pembangkit listrik berbasis PV telah meningkat pesat di seluruh dunia bersama dengan pembangkit listrik konvensional selama dua dekade terakhir. Gambar 1 menunjukkan representasi komparatif dari pengembangan sistem PV surya di berbagai negara [22].



Gambar 1. Produksi energi listrik tenaga surya global berbasis PV selama empat dekade

Sementara output dari sel PV biasanya listrik arus searah (DC), sedangkan sebagian besar peralatan listrik rumah tangga dan industri menggunakan arus bolak-balik (AC). Oleh karena itu, sistem pendingin PV lengkap biasanya terdiri dari empat komponen dasar: modul Photovoltaik, baterai, rangkaian inverter, dan unit refrigerasi kompresi uap [23,24].

- Modul PV: Sel PV menghasilkan listrik dengan mengubah energi cahaya (dari matahari) menjadi energi listrik arus searah (DC).
- Baterai: Baterai digunakan untuk menyimpan tegangan DC pada mode pengisian saat sinar matahari tersedia dan memasok energi listrik DC dalam mode pemakaian saat siang hari tidak ada. Itu juga dapat langsung menangani penggunaan DC untuk peralatan industri dan rumah tangga. Pengatur pengisian baterai dapat digunakan untuk melindungi pengisian daya baterai yang berlebihan.
- Inverter: Inverter adalah rangkaian listrik yang mengubah daya listrik DC menjadi AC dan menyalurkan energi listrik tersebut ke beban AC.
- Unit refrigerasi: Unit refrigerasi kompresi uap sebenarnya adalah sistem pendinginan atau pendinginan konvensional yang dijalankan oleh daya yang diterima dari inverter.

Sistem PV dapat berfungsi sebagai sistem mandiri, sistem hibrida (bekerja dengan pembangkit listrik) atau sebagai sistem jaringan atau utilitas yang saling terkait.

2. Metode dan Bahan

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen pada sebuah sistem refrigerasi jenis chest freezer dengan sumber daya energi matahari. Untuk dapat menjalankan sistem refrigerasi jenis chest freezer memanfaatkan energi matahari dibutuhkan sistem Photovoltaic (PV). Konversi dari sinar matahari menjadi listrik terjadi karena efek PV.

Sistem PV lengkap terdiri dari modul PV yang mengubah sinar matahari menjadi listrik. Di antara modul PV dan sistem refrigerasi chest freezer, terdapat seperangkat perangkat dan struktur yang memungkinkan listrik PV dapat diterapkan dengan baik ke beban. Seperangkat perangkat ini dikenal sebagai "*Balance of System*" yang terdiri dari

inverter (12 VDC-220VAC 1000W; dan V), pengontrol pengisian daya, dan baterai (100 Ah – 12VDC). Fungsi charger adalah untuk mengatur tegangan dan arus yang berasal dari panel surya yang menuju ke baterai. Baterai adalah komponen kunci dalam sistem PV karena berfungsi sebagai cadangan energi untuk sistem energi terbarukan. Ini juga berfungsi sebagai perangkat penyimpanan untuk menyimpan listrik yang dihasilkan PV selama hari berawan dan malam hari. Untuk menerapkan sistem ini pada beban refrigerasi chest freezer, diperlukan inverter untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh panel PV menjadi AC.

Fungsi dari charge controller adalah untuk mengatur arus dari modul PV untuk mencegah pengisian baterai yang berlebihan. Pengontrol pengisian daya digunakan untuk mendeteksi kapan baterai terisi penuh dan untuk menghentikan, atau mengurangi, jumlah arus yang mengalir ke baterai. Pengontrol muatan seperti yang dinilai oleh jumlah arus yang dapat mereka terima dari panel surya.

Cara kerja refrigerasi chest freezer bertenaga surya meliputi, energi matahari diterima oleh modul PV (dua panel fotovoltaik 12 VDC 150 Wp yang dihubungkan secara parallel) dan diubah menjadi energi listrik. Energi listrik kemudian diatur oleh pengontrol muatan baik dengan memasoknya langsung ke beban atau mengisi baterai. Karena energi listrik yang berasal dari modul PV dalam bentuk DC, inverter akan mengubahnya menjadi AC karena kompresor membutuhkan AC untuk beroperasi. Jenis sistem refrigerasi chest freezer yang digunakan dengan daya input 100 W dan 220 VAC, bahan pendingin R600a (ramah lingkungan) paling umum secara teknis disebut sebagai ekspansi langsung, mekanis, sistem refrigerasi kompresi uap.

Penelitian dilakukan di laboratorium Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik Negeri Bali. Pengukuran Suhu dalam chest freezer, suhu udara dalam dan luar ruangan diukur menggunakan data logger dengan termokopel tipe K dengan akurasi ± 1 °C dan linieritas 0,5 °C. Alat analisa daya digunakan untuk mengukur arus, tegangan dan daya. Nilai arus dan tegangan pada keluaran panel PV dan chest freezer diukur untuk menentukan energi yang dihasilkan oleh panel PV dan energi yang dikonsumsi oleh chest freezer. Data dicatat ke pencatat data selama interval 10 menit. Nilai radiasi matahari diukur dengan Lutron Solar Power Meter SPM-1116SD dengan akurasi 10 W/m² dan resolusi 0,1 W/m² untuk radiasi di bawah 1000 W/m² dan resolusi 1 W/m² untuk radiasi lebih tinggi atau sama dengan 1000 W/m². Data yang direkam dari sistem pengukuran diolah dan dianalisis. Parameter kinerja sistem catu daya surya seperti daya yang dihasilkan dan konsumsi daya oleh chest freezer dihitung dan disajikan.

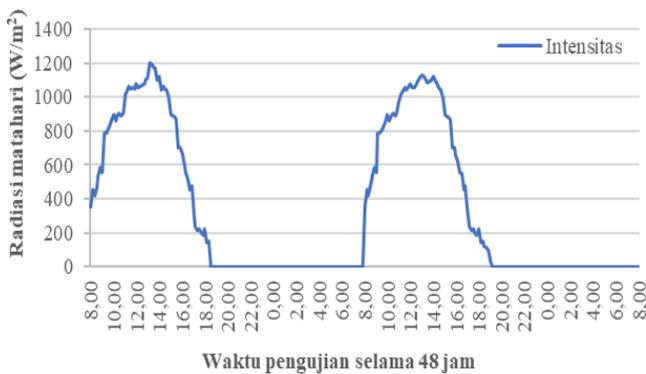
3. Hasil dan Pembahasan

Keluaran daya fotovoltaik bergantung pada banyak faktor, seperti posisi matahari, intensitas penyinaran matahari, suhu, dan kebutuhan beban. Oleh karena itu, respons dinamis dari sistem PV harus dievaluasi secara menyeluruh, karena menghubungkan sistem PV dengan jaringan utilitas dapat menyebabkan ketidakstabilan.

3.1. Iradiasi Matahari

Gambar 2 menampilkan nilai intensitas sesaat dari penyinaran matahari pada sistem sel-PV pada aplikasi

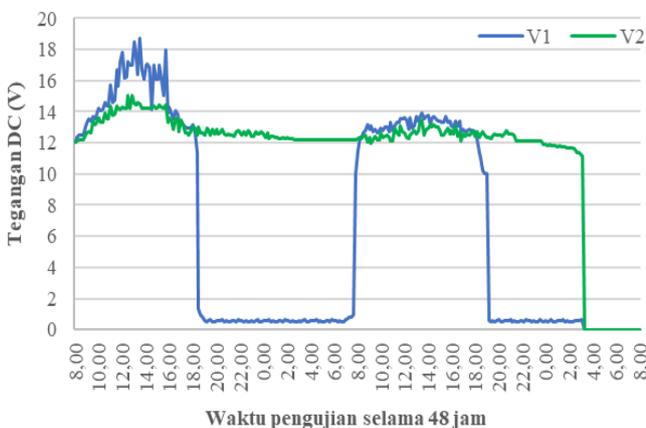
sistem refrigerasi jenis chest freezer. Proses pengujian dilakukan mulai dari jam 8.00 pagi selama 48 jam di Laboratorium Refrigerasi dan Tata Udara, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali. Nilai tertinggi iradiasi matahari langsung hasil pengujian pada hari ke-1 dan hari ke-2 masing-masing didapat 1.199 W/m² dan 1.127 W/m², serta nilai iradiasi rata-rata adalah 775,6 W/m² dan 731,2 W/m². Nilai maksimum iradiasi matahari terjadi sekitar dari jam 11 sampai jam 2 siang, yaitu antara 1.017 W/m² sampai 1.199 W/m². Nilai intensitas radiasi matahari pada hari ke-2 lebih rendah dari hari ke-1 disebabkan karena cuaca pada hari ke-2 kelihatan sedikit berawan sedangkan pada hari ke-1 cuaca cukup cerah. Dengan demikian kecerahan, awan dapat mempengaruhi nilai intensitas cahaya matahari.



Gambar 2. Intensitas iradiasi matahari

3.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

3.2.1. Tegangan panel surya dan baterai



Gambar 3. Tegangan luaran sel-PV dan baterai

Tabel 1. Tegangan luaran sel-PV dan baterai

Pengujian	Tegangan rata-rata (V)		Tegangan max (V)		Tegangan min (V)	
	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂
Hari ke-1	14,83	12,93	18,75	15,03	0,51	12,01
Hari ke-2	12,91	12,35	13,95	13,47	0,51	11,18

Hasil pengujian nilai tegangan panel surya maksimum pada hari ke-1 terjadi sekitar jam 11 sampai jam 3.40 siang, berkisar antara 15,75 sampai 18,75 (V), sedangkan pada hari ke-2 terjadi sekitar jam 10.50 sampai jam 16.40 berkisar antara 13,3 sampai 13,95 (V). Nilai tegangan tertinggi

terjadi pada jam 1.30 baik untuk hari pertama dan kedua. Tegangan rata-rata panel surya pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing 14,8 dan 12,9 (V). Sedangkan tegangan rata-rata baterai baik untuk hari ke-1 dan ke-2 adalah masing-masing 12,9 sampai 12,4 (V), seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 1. Nilai tegangan hari ke-2 lebih rendah dari hari ke-1, disebabkan oleh kualitas penyinaran matahari yang tidak cerah atau sedikit berawan. Nilai tegangan panel surya menurun menjadi nol seiring dengan tidak adanya sinar matahari (malam hari) antara jam 6 sore sampai jam 7 pagi pada hari ke-1 dan dari jam 7 sore sampai jam 7 pagi pada hari ke-2.

3.2.2. Arus luaran panel surya dan baterai serta yang digunakan sistem refrigerasi

Gambar 4 menampilkan nilai arus maksimum yang dihasilkan sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 13,45 (A) dan 12,87 (A), terjadi sekitar jam 11 sampai dengan jam 2.40 siang. Nilai arus rata-rata sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 9,6 (A) dan 8,7 (A). Sedangkan nilai arus maksimum yang dihasilkan baterai pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 8,3 (A) dan 8,7 (A) dan nilai arus terendah adalah 0. Nilai arus rata-rata baterai pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 5,3 (A) dan 5,8 (A). Selama pengoperasian sistem refrigerasi chest freezer dalam pengujian mengalami siklus hidup dan mati. Nilai arus maksimum yang digunakan sistem refrigerasi chest freezer pada saat hidup, baik pada hari ke-1 maupun hari ke-2 adalah 0,4 (A) dan saat mati nilai arus adalah 0. Nilai arus rata-rata yang digunakan sistem refrigerasi chest freezer, baik pada hari ke-1 maupun hari ke-2 adalah 0,27 Ampere (A).

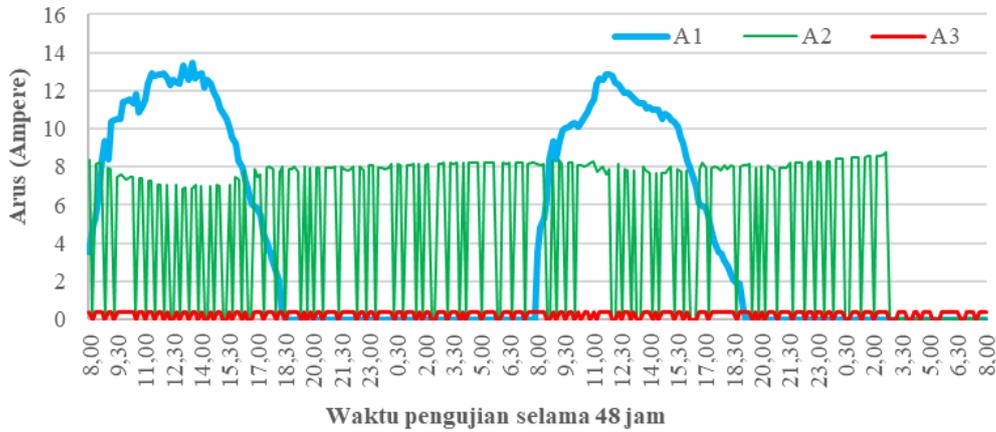
Dari grafik kelihatan bahwa baterai tidak mampu mensuplai arus yang dibutuhkan oleh sistem refrigerasi selama 48 jam operasi (sampai jam 8 pagi). Baterai hanya mampu mensuplai arus sampai jam 2.40 pagi. Untuk selanjutnya kebutuhan arus disuplai dari listrik PLN untuk pengujian selama 48 operasi. Hal ini menandakan bahwa sel-PV dan baterai yang terpasang tidak cukup untuk mengoperasikan sistem refrigerasi chest freezer selama 48 jam operasional pengujian. Nilai arus rata-rata, maksimum, dan minimum dihasilkan panel surya (A₁), arus dihasilkan baterai (A₂) dan arus digunakan sistem refrigerasi jenis chest freezer (A₃), dapat dilihat pada Tabel 2.

3.2.3. Daya yang dihasilkan sel-PV

Gambar 5 menunjukkan bahwa daya sesaat yang dihasilkan sel-PV (P₁) pada siang hari saat matahari cerah sangat tinggi dan menurun ketika cuaca kurang baik, seperti berawan. Demikian seterusnya hingga menjelang sore hari menuju malam hari, daya yang dihasilkan sel-PV terus menurun menuju mendekati nol. Daya sesaat maksimum yang dihasilkan sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing 254,1 W dan 178,3 W seperti ditampilkan pada grafik P₁. Daya sesaat yang tinggi dihasilkan pada siang hari oleh sel PV digunakan untuk mensuplai daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem refrigerasi chest freezer dan kelebihan daya yang tersedia disimpan pada baterai. Daya yang tersimpan pada baterai (P₂) digunakan pada saat daya dari sel-PV tidak mencukupi untuk memenuhi suplai daya yang dibutuhkan sistem refrigerasi chest freezer, misalnya pada cuaca buruk, khususnya terutama pada malam hari. Baterai hanya bisa terisi 70% dari kapasitas 300 Wp sel-PV

terpasang. Sehingga baterai hanya mampu mensuplai daya hingga sampai jam 2.40 pagi. Untuk pengoperasian selanjutnya selama pengujian 48 jam kekurangan daya dari

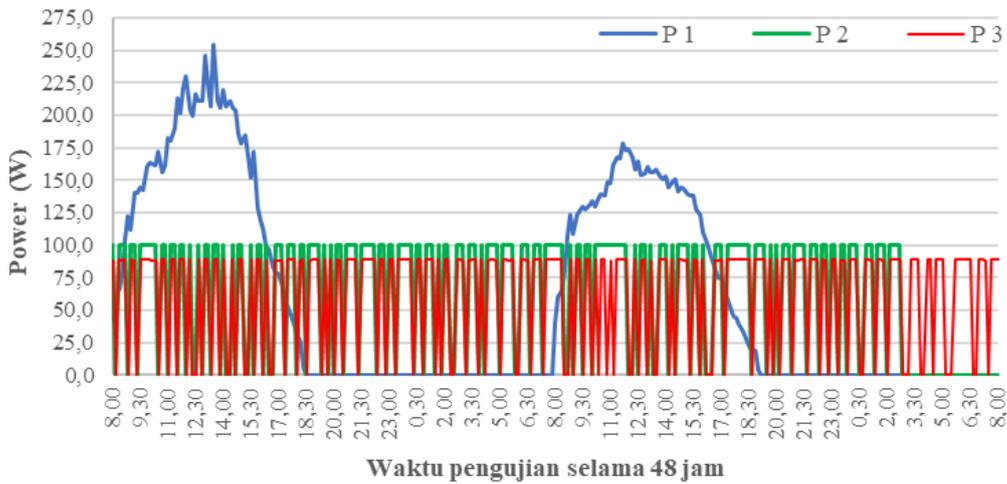
baterai disuplai dari listrik PLN seperti ditunjukkan pada grafik P₃.



Gambar 4. Nilai arus luaran sel PV, baterai dan yang digunakan sistem refrigerasi

Tabel 2. Nilai arus luaran sel-PV, baterai dan yang digunakan sistem refrigerasi

Pengujian	Arus rata-rata (A)			Arus maksimum (A)			Arus minimum (A)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
Hari ke-1	9,60	5,33	0,27	13,45	8,33	0,4	0,51	0	0
Hari ke-2	8,74	5,80	0,27	12,87	8,78	0,4	0,51	0	0



Gambar 5. Daya yang dihasilkan sel-PV, disimpan baterai dan digunakan sistem refrigerasi

Tabel 3. Daya yang dihasilkan sel-PV, disimpan baterai dan digunakan sistem refrigerasi

Pengujian	Daya rata-rata (W)			Daya maksimum (W)			Daya minimum (W)		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
Hari ke-1	148,1	68,1	60,4	254,1	100	89,2	6,5	0	0
Hari ke-2	119,3	70,8	59,4	178,3	100	89,2	4,7	0	0

Selama pengoperasian dalam pengujian sistem refrigerasi jenis chest freezer mengalami siklus hidup dan mati. Daya yang dikonsumsi oleh chest freezer saat hidup berkisar antara 88,4 - 89,2 (Watt) dan saat mati sama dengan 0. Dari sistem sel-PV yang terpasang sebesar 300 Wp tidak mampu memenuhi daya yang dibutuhkan oleh sistem refrigerasi

jenis chest freezer (P₃) untuk operasional pengujian 48 jam, sehingga perlu ditambahkan 1 buah modul sel-PV 150 Wp lagi sehingga sistem refrigerasi chest Freezer sepenuhnya dapat digerakkan oleh solar panel (sel-PV). Nilai luaran daya rata-rata, maksimum, dan minimum yang dihasilkan panel surya fotovoltaik (P₁), daya yang

dihasilkan baterai (P₂) dan daya yang digunakan sistem refrigerasi jenis chest freezer (P₃), seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

4. Kesimpulan

Sistem teknologi surya fotovoltaik (PV) dapat menyediakan energi listrik untuk pengoperasian sistem refrigerasi jenis chest freezer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh sistem sel PV pada hari ke-2 lebih kecil dari hari ke-1 hal ini disebabkan oleh iradiasi matahari hari kedua lebih rendah dari hari ke-1. Iradiasi matahari yang baik menjadi kebutuhan sangat vital untuk sistem refrigerasi dengan sumber tenaga sinar matahari menggunakan sistem sel-PV. Teknologi refrigerasi menggunakan energi matahari merupakan teknologi yang menjanjikan untuk masa depan karena permintaan pendinginan terus meningkat terkait dengan perubahan iklim. Teknologi refrgerasi dengan sumber tenaga panas matahari menggunakan sel-PV dapat digunakan untuk keperluan pendingin industri dan rumah. Sistem pendingin ini dapat diterapkan di daerah terpencil atau pulau-pulau di mana pendinginan konvensional sulit dilakukan dan energi matahari selalu tersedia. Pendinginan tenaga surya bisa memainkan peran penting di negara-negara yang memiliki potensi matahari yang sangat baik, dapat digunakan untuk menyimpan obat-obatan dan vaksin pada suhu yang lebih rendah, dan sistem ini dapat dibuat portabel jika diperlukan. Salah satu kelemahan sistem refrgerasi dengan sumber tenaga solar panel adalah sifat *intermittency* panas matahari (ketersediaannya terputus-putus), maka sangat perlu dikembangkan alat penyimpan energi (*energy storage*) salah satunya dengan menggunakan *phase hange material* (PCM) untuk bisa menjamin ketersediaan sumber energi sepanjang waktu dan terus menerus.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan dukungannya kepada rekan-rekan dosen dan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali yang terlibat dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bali atas bantuan dan dukungan administratif dalam penyelesaian artikel yang diberikan terkait dengan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] H.Z. Hassan, and A.A. Mohamad, "A review on solar-powered closed physisorption cooling systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 2516-38.
- [2] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook with projections to 2050," 2017.
- [3] J.P. da-Cunha, and P. Eames, "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - a review," *Applied Energy*, 177, 2016, pp. 227-238.
- [4] I.N. Suamir, I.M. Rasta, Sudirman, K.M. Tsamos, "Development of corn-oil ester and water mixture phase change materials for food refrigeration applications", *Energy Procedia*, 161, 2019, pp. 198-206.
- [5] A. Hussain, S.M. Arif, and M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: state of the art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017, pp. 12-28.
- [6] J. Hu, W. Chen, D. Yang, B. Zhao, H. Song, and B. Ge, "Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days," *Applied Energy*, 173, 2016, pp. 40-51.
- [7] Y.H. Yau, and K.S. Lim, "Energy analysis of green office buildings in the tropics Photovoltaic system," *Energy Building*, 126, 2016, pp. 177-93.
- [8] Y. Wang, S. Zhou, and H. Hou, "Cost and CO2 reductions of solar photovoltaic power generation in China: perspectives for 2020," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 2014, pp. 370-80.
- [9] P. Bhubaneswari, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 1625-36.
- [10] M.J. Li, and W.Q. Tao, "Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry," *Applied Energy*, 187, 2017, pp. 203-215.
- [11] F. Ascione, "Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling," *Solar Energy*, 154, 2017, pp. 34-100.
- [12] M. Waterson, "The characteristics of electricity storage, renewables and markets," *Energy Policy*, 104, 2017, pp 466-473.
- [13] X. Huang, J. Guo, J. He, Y. Gong, D. Wang, Z. Song, "Novel phase change materials based on fatty acid eutectics and triallyl isocyanurate composites for thermal energy storage," *Journal of Applied Polymer Science*, 134, 2017, pp. 44866.
- [14] L. Nkhonjera, T. Bello-Ochende, G. John, C.K. King'ondo, "A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 2017, pp. 157-167.
- [15] H. Mehling, S. Hiebler, C. Keil, C. Schweigler, M. Helm, "Test results from a latent heat storage developed for a solar heating and cooling system," in: *Proceedings. EuroSun 2008 Conference*, Lisbon: International Solar Energy Society, 2010, pp. 1-8.
- [16] S.F. Ahmed, M. Khalid, W. Rashmi, A. Chan, K. Shahbaz, "Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 2017, pp. 450-460.
- [17] S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight, S. McGarry, "Selection of materials for high temperature latent heat energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 2012, pp. 20-27.
- [18] Z.F. Li, and K. Sumathy, "Technology development in the solar absorption air conditioning systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 2000, pp. 267-93.
- [19] N. Kalkan, E.A. Young, and A. Celiktas, "Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 6352-83.

- [20] C. Koroneos, E. Nanaki, and G. Xydis, "Solar air conditioning systems and their applicability-an exergy approach," *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 2010, pp. 74-82.
- [21] R. Saidur, H. Masjuki, M. Hasanuzzaman, T. Mahlia, C. Tan, J. Ooi, et al., "Performance investigation of a solar powered thermoelectric refrigerator," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 7, 2008, pp. 7-16.
- [22] K.H. Solangi, M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, and H. Fayaz, "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 2149-63.
- [23] I.N. Suamir, I.G.A.B. Wirajati, I.D.M.C. Santosa, I.D.M. Susila, I.D.G.A. Tri Putra, "Experimental Study on the Prospective Use of PV Panels for Chest Freezer in Hot Climate Regions, *Journal of Physics: Conference Series*, 1569, p. 032042.
- [24] T. Otanicar, R.A. Taylor, and P.E. Phelan, "Prospects for solar cooling an economic and environmental assessment," *Solar Energy*, 86, 2012, pp. 1287-99.