

PEMANFAATAN GARAM CaCl_2 SEBAGAI *HEAT STORAGE* UNTUK SUMBER ENERGI TERMAL PADA *Thermo Electric Converter*

Bambang Poerwadi^{*)}, Dhanang Edy Pratama, Vivi Anita Aprilia, Diah Agustina
Puspitasari, dan Supriyono

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono No. 167, Malang, 6541, Telp: (0341) 587710 ext: 1333, Fax: (0341)574140

*) Penulis korespondensi : bampoer@brawijaya.ac.id

Abstract

Thermo Electric Converter (TEC) is a hardware that converts heat energy into electricity based on the electrons flow caused by temperature differences. To take the advantage of solar heat continuously, a material that can absorb and store the sun's heat is needed. This study used $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ salt as the absorbent and solar heat storage material. $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ salt is a latent heat storage material which has a principle of phase change when it absorbs or releases heat. This study was divided into two stages, i.e. laboratory and field tests. In laboratory tests, an electric heater was used to heat the salt to a temperature of 120°C . This test was performed on the fraction of 60%, 70%, and 80% of the container volume. The optimum salt fraction was then used for field testing, where the tools were tested to determine their effectiveness in direct sunlight at 7 am to 1 pm. The results showed that volume fraction of 60% was the optimum fraction. The salt having this fraction was able to receive and release heat and generate electricity in the highest amount. Field testing of the fraction of 60% gave the result that the tool was capable to store solar heat and convert it into electricity of 19.1 Watt on laboratory testing and 0.3 Watt on the field-testing at 12.00 am.

Keywords: solar energy; $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ salt; latent heat storage; thermo electric converter

Abstrak

Thermo Electric Converter (TEC) adalah sebuah peralatan yang mengkonversi energi panas menjadi listrik berdasarkan aliran elektron yang disebabkan oleh perbedaan suhu. Untuk dapat memanfaatkan panas matahari secara kontinyu, maka diperlukan material yang dapat menyerap dan menyimpan panas matahari. Penelitian ini menggunakan garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ sebagai material penyerap dan penyimpan panas matahari. Garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ merupakan material penyimpan panas laten yang memiliki prinsip perubahan fase saat menyerap atau melepaskan panas. Penelitian ini terbagi menjadi 2 tahap, yaitu uji laboratorium dan uji lapangan. Pada uji laboratorium, pemanas listrik digunakan untuk memanaskan garam hingga temperatur 120°C . Uji ini dilakukan pada fraksi 60%, 70%, dan 80% volume wadah. Fraksi garam yang optimum kemudian digunakan untuk uji lapangan, dimana alat diuji untuk mengetahui seberapa besar efektivitas alat pada sinar matahari langsung antara pukul 7 pagi hingga 1 siang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fraksi volume 60% merupakan fraksi yang paling optimum. Garam dengan fraksi tersebut mampu menerima dan melepas panas, dan menghasilkan listrik paling besar. Pengujian lapangan terhadap fraksi 60% memberi hasil bahwa alat ini mampu menyimpan panas matahari dan mengkonversinya menjadi listrik 19,1 Watt pada pengujian laboratorium dan 0,3 Watt pada pengujian lapang pada jam 12.00 siang.

Kata kunci: energi matahari; garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; latent heat storage; thermoelectric converter

PENDAHULUAN

Tingkat konsumsi listrik meningkat sebanding dengan pertumbuhan penduduk setiap

tahunnya (Tumiwa dan Imelda, 2011). Prediksi kebutuhan listrik Indonesia pada tahun 2050 mencapai sembilan kali lipat dari kebutuhan listrik

2010 (Mukhtasor, 2010). Kebutuhan listrik yang terus meningkat mengakibatkan dibutuhkannya eksplorasi terhadap sumber energi alternatif yang dapat dikonversi menjadi listrik, salah satu sumber energi alternatif yang memungkinkan adalah panas matahari.

Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki intensitas matahari yang tinggi, yaitu sekitar 10–12 jam dalam sehari. Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan sel surya. Selain energi matahari, juga ada beberapa energi panas yang belum dimanfaatkan, yaitu energi panas yang masih terbuang. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengkonversi energi panas menjadi listrik adalah *Thermo Electric converter* (TEC), atau untuk mengkonversi energi listrik menjadi energi panas (Wang dan Cohen, 2011). TEC tidak dapat digunakan untuk menangkap panas matahari secara langsung karena perpindahan panas matahari terjadi secara radiasi sedangkan perpindahan panas yang dapat dikonversi adalah secara konduksi, oleh karena itu diperlukan material tambahan yang dapat menyerap panas matahari dan menghantarkannya ke TEC secara konduksi. Material tambahan yang saat ini sudah diteliti adalah logam. Logam merupakan penyerap panas yang efisien, akan tetapi logam tidak memiliki kapasitas penyimpanan yang baik sehingga diperlukan material yang dapat menyimpan panas matahari dan meneruskannya ke TEC.

Pada beberapa tahun terakhir pemanfaatan TES (*Thermal Energi Storage*) menarik berbagai kalangan seperti komunitas peneliti, arsitek maupun insinyur. Hal ini dikarenakan material TES mudah dan murah dalam aplikasinya. TES merupakan material yang mampu menyimpan energi panas. Pada dasarnya penyimpanan energi panas ini dapat diklasifikasikan sebagai penyimpan energi dalam bentuk panas laten, panas sensibel dan gabungan dari panas sensibel dan panas laten. (Susilowati, 2015). Penyimpanan energi panas *sensible* telah menarik perhatian untuk berbagai macam aplikasi selama beberapa tahun, yang merupakan suatu hal penting dalam pemanfaatan energi. Energi listrik dapat dihasilkan dengan memanfaatkan TES (Li, 2015).

TES dapat dicapai dengan cara pemanasan, pelelehan, atau penguapan sejumlah bahan dimana terdapat sejumlah energi yang lepas sebagai panas ketika proses terjadi. TES adalah salah satu teknologi penting untuk konservasi energi. Sistem TES telah digunakan secara luas untuk banyak aplikasi, mulai dari penyimpanan air yang dipanaskan oleh tenaga matahari (Dincer, 2002). Kelemahan dari penyimpan panas *sensible* yakni terjadinya kehilangan panas pada lingkungan dan densitas energi rendah. Sedangkan kelemahan dari penyimpan panas laten yakni bersifat korosi, mudah terbakar, biaya mahal, dan stabilitas termal rendah (Xu, 2014).

Tatsidjoudong, Le Pierrès, dan Luo tahun 2013 menyatakan bahwa garam merupakan salah satu material yang dapat digunakan untuk menyimpan

panas. Jenis garam yang potensial adalah CaCl_2 karena garam tersebut beberapa keunggulan antara lain: memiliki titik leleh yang rendah akan tetapi dapat mengkristal dengan mudah pada temperatur ruang, konduktivitas panasnya yang tinggi, dan ketersediaannya di alam melimpah.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kapasitas penyimpanan panas yang optimal dari garam CaCl_2 dimana panas yang tersimpan dikonversi menjadi listrik dengan TEC. Penelitian ini dilakukan uji laboratorium untuk mendapatkan fraksi volume garam terhadap volume wadah yang optimum, dan uji lapang dilakukan untuk mengetahui efektivitas dari alat dengan menggunakan fraksi optimum dari uji laboratorium tersebut. Kemampuan garam CaCl_2 dalam menyimpan panas dan konversi panas menjadi listrik dengan TEC dibahas pada penelitian ini secara sistematis.

METODE PENULISAN

Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ yang dibuat dari proses hidrasi garam $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ teknis. Garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dipilih karena sifatnya yang stabil pada kondisi ruang.

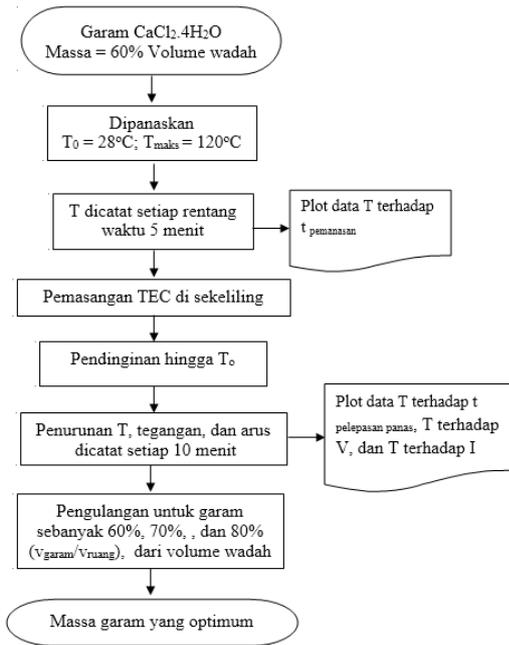
Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: wadah garam yang terbuat dari *stainless steel* 316 dengan tebal 0,4 cm berbentuk balok dengan dimensi 12 x 12 x 5 cm; *heater* untuk simulasi panas matahari pada pengujian laboratorium; *thermocontroller* untuk mengukur temperatur garam dan mengontrol temperatur *heater*; dan reflektor berbentuk parabola dari *stainless steel* 316 sebagai pemfokus cahaya matahari pada saat pengujian lapang.

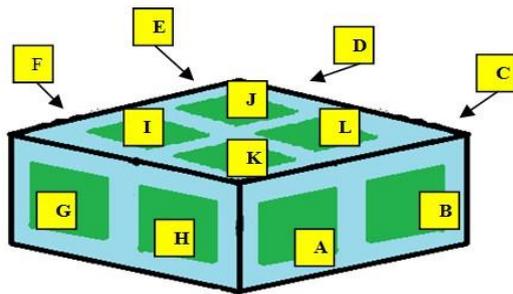
Prosedur Penelitian

Penelitian ini terbagi dalam dua tahap, yaitu uji laboratorium untuk mendapatkan fraksi volume garam terhadap volume wadah yang optimum, dan uji lapang dilakukan untuk mengetahui efektivitas dari alat dengan menggunakan fraksi optimum dari uji laboratorium tersebut.

Uji laboratorium (Gambar 1) dilakukan dengan cara memanaskan garam dalam wadah *stainless steel* menggunakan *heater* hingga temperatur garam mencapai 120°C . Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur tersebut dicatat. Ketika sudah mencapai temperatur 120°C , TEC ditempelkan di sisi atas dan samping wadah, dengan skema sesuai pada Gambar 2. Tegangan dan arus listrik tiap TEC diukur dengan menggunakan multimeter. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur semula dicatat. Prosedur ini dilakukan untuk tiap fraksi volume garam yang digunakan, yaitu 60%, 70%, dan 80% terhadap volume wadah.

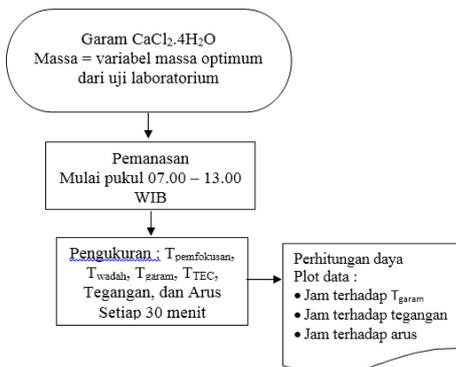


Gambar 1. Skema uji laboratorium

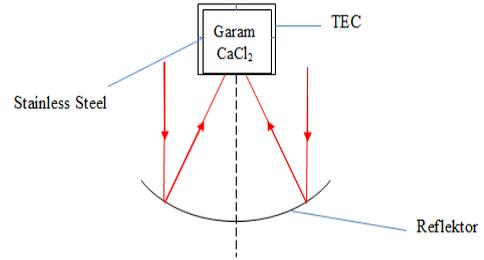


Gambar 2. Skema TEC wadah garam

Uji lapang (Gambar 3) dilakukan menggunakan garam dengan volume optimum hasil dari uji laboratorium. Uji ini dilakukan dengan menggunakan panas sinar matahari langsung yang difokuskan menggunakan kolektor surya berupa parabola, dengan skema pada Gambar 4 dan spesifikasi parabola pada Tabel 1. Waktu pengujian adalah dari pukul 07.00 hingga 13.00. Temperatur, tegangan, dan arus dicatat tiap 30 menit.



Gambar 3. Skema uji lapang



Gambar 4. Skema alat pada uji lapang

Tabel 1. Desain reflektor parabola

Dimensi	Keterangan
Diameter	45 cm
Kedalaman	10 cm
Material	Stainless steel
Focal point	12,66 cm
Material reflektor	Stainless steel
Tracking	Manual

Sumber: Rafeeu dan Ab Kadir, 2012

HASIL DAN PEMBAHASAN

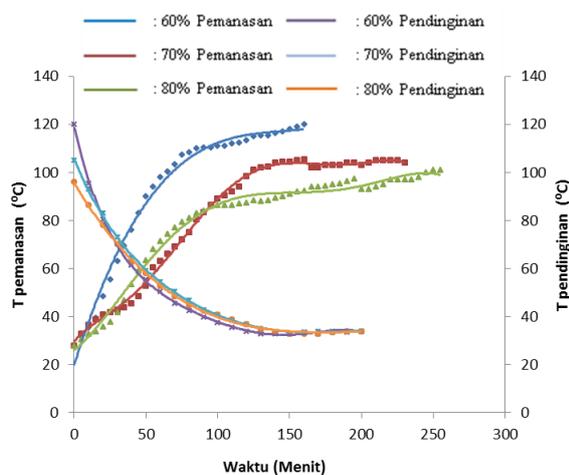
Uji Laboratorium

Pemanasan Garam $CaCl_2 \cdot 4H_2O$

Garam $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ yang ditempatkan pada wadah stainless steel dan dipanaskan menggunakan heater sebagai simulator panas matahari untuk uji laboratorium. Dari pemanasan garam tersebut didapatkan data waktu pemanasan garam yang diperlukan untuk mencapai temperatur $120^\circ C$

Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin lama waktu pemanasan maka temperatur yang dapat dicapai oleh garam juga semakin meningkat. Garam dengan fraksi 60% volume wadah dapat mencapai temperatur $120^\circ C$ dengan waktu pemanasan 160 menit. Pada fraksi 70% volume wadah temperatur $101^\circ C$ dicapai selama 245 menit. Temperatur maksimal yang dapat dicapai garam dengan fraksi 70% volume wadah adalah $105,5^\circ C$ yang dicapai pada pemanasan waktu ke-160 menit. Garam dengan fraksi 80% volume wadah juga tidak dapat mencapai temperatur $120^\circ C$, temperatur tertinggi yang dapat dicapai oleh garam 80% volume wadah adalah $101^\circ C$ selama 250 menit. Selanjutnya temperatur garam dinaikkan namun pada menit ke-255 mengalami penurunan menjadi $98^\circ C$. Pemanasan garam dengan fraksi 70% dan 80% volume wadah diteruskan, temperatur garam akan turun dan kembali lagi ke temperatur maksimalnya. Hal tersebut terjadi karena semakin banyak massa garam maka ketinggian garam dalam wadah akan semakin besar, sehingga panas yang dapat diserap oleh garam dengan fraksi 70% dan 80% volume wadah semakin kecil. Hal tersebut dibuktikan dengan profil pemanasan pada gambar 5, dimana hanya garam dengan fraksi 60% volume wadah yang dapat mencapai temperatur $120^\circ C$, sehingga garam dengan fraksi 60% volume wadah memiliki kemampuan menyerap panas yang paling optimal.

Garam yang telah melalui proses pemanasan dilanjutkan dengan proses pelepasan panas sampai temperatur ruang. Data hasil pengamatan temperatur garam terhadap waktu pelepasan panas pada uji laboratorium ditunjukkan pada Gambar 5. Dari pola pada grafik terlihat bahwa massa garam tidak berpengaruh terhadap penurunan temperatur garam. Hal ini dapat dilihat dari pola grafik yang cenderung konstan sesudah menit ke-150, meskipun massa garam dan temperatur awalnya berbeda. Garam 70% volume wadah memiliki performa yang lebih baik karena penurunan temperaturnya yang paling lambat di antara ketiganya. Hal tersebut dibuktikan pada kurva pemanasan pada Gambar 5. Saat menit ke 50–100 temperatur garam dengan fraksi 70% volume wadah paling tinggi dibanding variabel fraksi yang lain.



Gambar 5. Grafik hubungan temperatur garam terhadap waktu saat proses pemanasan dan pelepasan panas (pendinginan) pada uji laboratorium

Profil temperatur terhadap waktu pada Gambar 6 menunjukkan pola temperatur garam, temperatur wadah, serta selisih temperatur antar permukaan TEC yang mengalami penurunan hingga menit ke-120, kemudian cenderung konstan pada menit-menit berikutnya. Pada menit awal, temperatur wadah lebih tinggi daripada temperatur garam. Hal tersebut dikarenakan wadah yang terbuat dari *stainless steel* mampu menyerap panas lebih besar daripada garam, sehingga panas wadah diberikan panas langsung pada TEC. Selain mampu menyerap panas dengan baik, *stainless steel* juga mudah melepas panas sehingga penurunan temperaturnya lebih besar daripada garam. Saat mencapai menit ke-40, temperatur wadah sudah lebih kecil daripada temperatur garam, dan selisih temperatur keduanya semakin besar hingga akhir. Ini menunjukkan bahwa garam memiliki kapasitas penyimpanan panas yang baik.

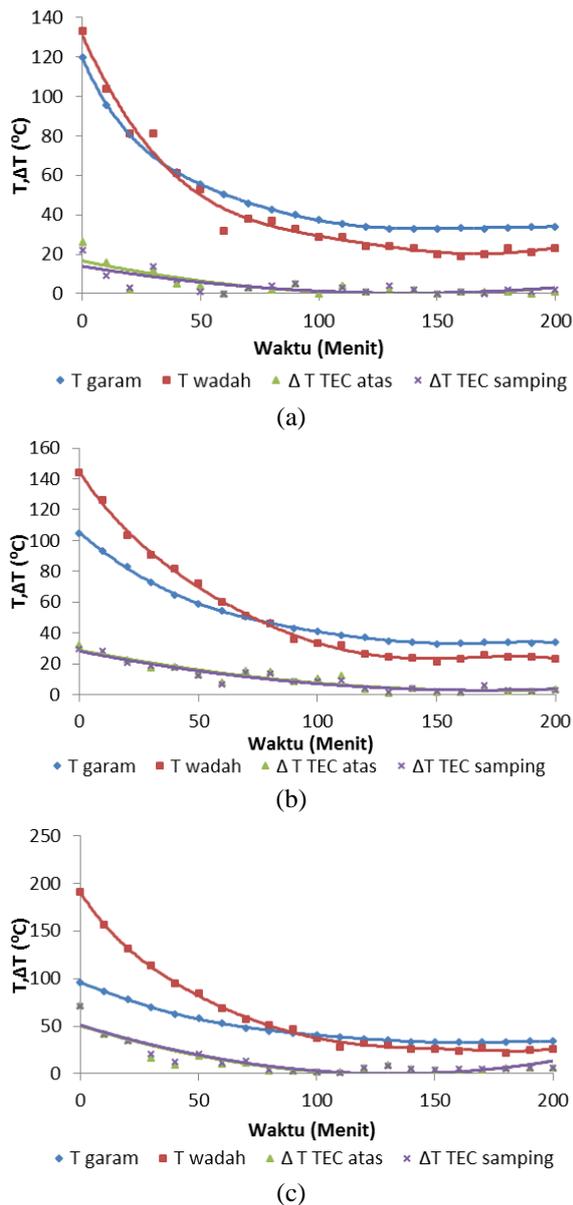
Hal tersebut juga berlaku pada fraksi 70% dan 80% volume wadah dimana *stainless steel* mempengaruhi penurunan temperatur wadah. Pada

menit-menit awal pengujian garam fraksi 70% volume wadah temperatur wadah lebih tinggi daripada temperatur garam kemudian pada menit ke-80 temperatur wadah mulai lebih kecil daripada temperatur garam. Pada pengujian garam dengan fraksi 80% volume wadah fenomena tersebut terjadi pada menit ke-100. Nilai selisih temperatur antara sisi panas dan sisi dingin TEC pada semua variabel tidak memiliki perbedaan yang signifikan antara TEC yang ditempel pada bagian atas wadah maupun pada samping wadah. Hal ini menunjukkan bahwa panas yang diberikan garam melalui wadah *stainless steel* bersifat merata pada semua sisi.

Gambar 6 menjelaskan hubungan antara perbedaan temperatur yang diperoleh TEC pada berbagai fraksi garam. Kemampuan TEC untuk mengkonversi panas menjadi energi listrik sangat dipengaruhi oleh perbedaan temperatur (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin TEC. Semakin besar ΔT , maka listrik yang dihasilkan juga akan semakin besar. Sisi panas TEC adalah bagian TEC yang menempel pada sisi luar wadah *stainless*, sedangkan sisi dinginnya merupakan sisi TEC yang kontak dengan udara.

Pada menit awal pelepasan panas ΔT terbesar adalah fraksi 80%, 70%, kemudian 60%. Hal tersebut terjadi karena sisi panas TEC sangat dipengaruhi oleh waktu pemanasan (Gambar 5). Semakin lama waktu pemanasan, maka wadah *stainless steel* akan semakin panas karena wadah terbuat dari *stainless* dimana *stainless* merupakan logam yang mudah menyerap panas. Dengan kondisi lingkungan pada sisi dingin TEC nilainya sama pada berbagai fraksi, maka akan terdapat perbedaan ΔT .

Posisi grafik berubah saat pelepasan panas menit ke-80 hingga menit ke-140, dengan perbedaan ΔT tertinggi hingga terendah adalah pada fraksi 70%, 80%, dan 60%. Penyebabnya adalah temperatur wadah pada waktu tersebut telah dipengaruhi oleh temperatur garam dimana pada menit ke-80 berturut turut menurut besarnya ΔT adalah 47°C; 45°C; 42,5°C (Gambar 6). Pada menit ke-150 hingga 200 posisi ΔT adalah 80%, 70%, dan 60%. Temperatur garam pada waktu ke-200 pada semua fraksi garam adalah 34°C, sehingga temperatur wadah pada waktu tersebut tidak memiliki selisih yang besar. Faktor yang dapat mempengaruhi hal tersebut adalah faktor kondisi lingkungan, dimana udara yang kontak dengan TEC berfungsi sebagai pendingin. Saat dilakukan pengujian fraksi 80% temperatur ruang lebih kecil dari pada saat pengujian fraksi 70% dan 60%, oleh karena itu ΔT pada fraksi 80% lebih tinggi dibanding yang lain.



Gambar 6. Grafik hubungan temperatur garam dengan (a) fraksi 60%, (b) fraksi 70%, dan (c) fraksi 80% volume wadah terhadap waktu pelepasan panas pada uji laboratorium

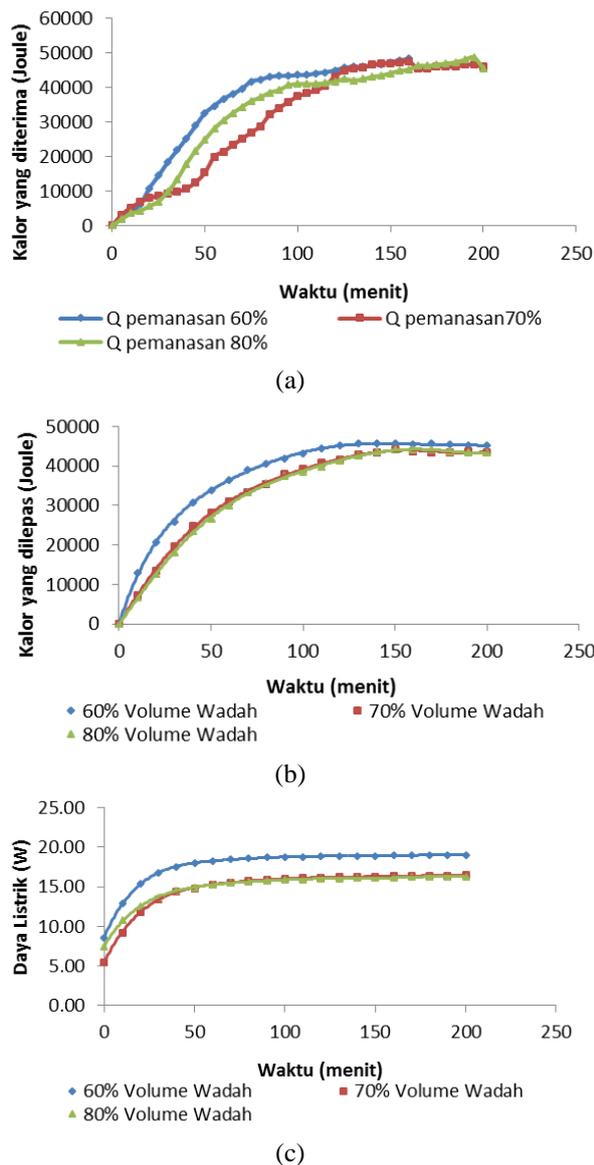
Jika dilihat dari pola ΔT_{atas} dan $\Delta T_{samping}$ pada setiap fraksi maka fraksi garam yang memiliki profil ΔT yang baik adalah garam fraksi 70% volume wadah. Garam fraksi 70% wadah memiliki profil grafik yang teratur, fluktuasi ΔT pada fraksi tersebut lebih stabil dibanding dengan garam fraksi 80% dan 60%. Hal ini dapat dijadikan patokan bahwa profil tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh fraksi 70% volume wadah akan memiliki profil yang baik karena tegangan dan arus hasil konversi dipengaruhi oleh ΔT .

Kalor yang Disimpan

Gambar 7a menggambarkan hubungan antara panas yang terakumulasi dalam garam akibat pemanasan terhadap waktu. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan panas dalam garam pada ketiga fraksi bisa terjadi hanya hingga menit tertentu. Pada fraksi 60% peningkatan terjadi hingga menit ke-80, fraksi 70% terjadi hingga menit ke-130, serta fraksi 80% hingga menit ke-100. Sesudah menit-menit tersebut jumlah panas dalam garam tidak mengalami peningkatan yang signifikan dan cenderung konstan. Hal ini bisa terjadi karena garam mendekati kapasitas penyimpanan kalor maksimalnya, yaitu titik dimana kemampuan garam dalam menyimpan panas menjadi cenderung konstan, dan sebagian besar panas yang diterimanya langsung dilepaskan ke lingkungan. Dari ketiga fraksi, garam fraksi 60% mampu menyimpan panas dengan dalam waktu yang cepat, hanya membutuhkan waktu hingga menit ke-80 untuk mencapai temperatur pada kapasitas penyimpanan kalor maksimalnya.

Profil akumulasi panas yang dikeluarkan garam terhadap waktu terdapat pada grafik pada Gambar 7b. Kurva pada fraksi 60% menunjukkan bahwa fraksi tersebut merupakan fraksi yang paling cepat melepas panas. Fraksi 60% melepaskan panas secara signifikan hingga menit ke-120, sedangkan fraksi 70% dan 80% melepaskan panas secara signifikan hingga menit ke-150. Sesudah menit-menit tersebut nilainya cenderung konstan, yang menandakan hampir tidak ada lagi kalor yang dilepaskan oleh garam. Fraksi 60% melepaskan kalor paling cepat karena massanya yang lebih sedikit dibanding variabel lain, sehingga kapasitas penyimpanannya lebih rendah dan cenderung untuk melepaskan panas. Fraksi 70% dan 80% memiliki profil yang hampir sama, menandakan bahwa garam sebanyak 70% volume wadah merupakan volume maksimum garam yang mampu melepaskan panas paling lama, dan volume yang lebih besar tidak mampu memperpanjang durasi pelepasan panas.

Pada Gambar 7c fraksi 60% menghasilkan daya listrik yang paling besar karena pada fraksi tersebut terjadi pelepasan kalor yang lebih besar dan lebih cepat daripada fraksi lain, seperti ditunjukkan pada Gambar 7b. Fraksi 70% dan 80% menunjukkan profil yang serupa, dimana fenomena ini mendukung penjelasan Gambar 7b yang menyatakan bahwa volume garam yang lebih dari 70% hanya akan menghasilkan performa yang sama dengan fraksi 70%.



Gambar 7. Grafik hubungan (a) akumulasi panas dalam garam saat pemanasan terhadap waktu, (b) akumulasi panas yang lepas dari garam terhadap waktu, dan (c) akumulasi daya listrik yang dihasilkan TEC terhadap waktu

Konversi Panas Menjadi Listrik

Pada menit-menit awal terlihat bahwa nilai tegangan pada fraksi garam 60% dan 80% lebih besar daripada 70%, kemudian pada menit ke-30 tegangan keduanya menjadi turun. Pada fraksi 60% nilainya jadi lebih rendah daripada fraksi 70%, dan tegangan pada fraksi 80% nilainya menjadi hampir sama dengan fraksi 70% hingga akhir.

Tegangan pada fraksi 80% memiliki nilai tegangan yang besar pada menit ke-0. Akan tetapi, hingga menit ke-20 tegangannya mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga akhirnya menyamai tegangan pada fraksi 70%. Hal ini bisa terjadi karena pada saat awal temperatur wadah

bernilai besar, dan menghasilkan tegangan yang besar pula. Akan tetapi, pada menit ke-10 hingga ke-20, terjadi penurunan tegangan meskipun ΔT yang tercatat cukup besar. Hal ini disebabkan perpindahan panas dari wadah berlangsung cepat melalui TEC. Perpindahan panas itu harus melalui lempeng keramik, logam, lapisan keramik lagi, kemudian bisa menuju ke lingkungan. Penurunan tegangan terjadi saat panas yang mengalir masih terakumulasi pada bagian logam dan belum bisa menembus lempeng keramik untuk menuju lingkungan, karena daya hantar panas logam lebih besar daripada lempeng keramik. Terakumulasinya panas dalam logam menjadikan nilai ΔT sesungguhnya dalam elemen penyusun TEC menjadi kecil.

Pada fraksi 70% nilai tegangan yang dihasilkan cukup rendah pada menit awal. Sepanjang waktu pengamatan, penurunan tegangan yang terjadi cukup teratur. Perpindahan panas yang terjadi dari garam hingga ke lingkungan tidak mengalami akumulasi panas di dalam salah satu bagiannya, sebagaimana yang terjadi pada fraksi 80%.

Tegangan yang cukup tinggi dihasilkan oleh fraksi 60% saat menit ke-0, dan kemudian mengalami penurunan drastis hingga menit ke-50. Hal ini terjadi karena temperatur garam fraksi 60% pada menit ke-0 merupakan yang paling tinggi. Panas dari garam ditransfer menuju TEC dan menghasilkan tegangan yang besar. Hal tersebut mengakibatkan pada menit-menit berikutnya temperatur garam menjadi turun dan berdampak pada signifikannya penurunan tegangan listrik menjadi yang paling rendah di antara ketiga variabel lainnya.

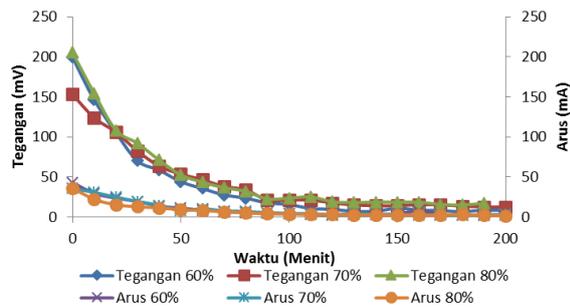
Pola grafik arus pada Gambar 8 pada menit-menit awal, fraksi 60% menghasilkan arus yang paling besar dibanding yang lain. Kemudian terjadi penurunan arus yang drastis pada ketiga fraksi hingga menit ke-50. Setelah 50 menit, arus paling besar dihasilkan oleh fraksi 70%, diikuti fraksi 60% dan 80%.

Fraksi 60% menghasilkan arus yang paling besar pada saat awal. Hal tersebut dikarenakan pada menit ke-0 temperatur garam fraksi 60%, memiliki nilai yang paling besar daripada fraksi lain. Keadaan ini menjadikan garam bisa memberikan panas dalam jumlah besar menuju TEC. Kemudian arus mengalami penurunan, dan mengakibatkan nilai arusnya menjadi kecil pada menit-menit berikutnya.

Profil arus pada fraksi 70% menunjukkan bahwa arus yang dihasilkan selama percobaan cukup stabil. Arus tidak mengalami penurunan signifikan pada menit ke-0 hingga 50, dan nilainya relatif konstan pada menit-menit berikutnya. Selain itu, fraksi tersebut menghasilkan arus paling besar setelah menit ke-50, dibandingkan fraksi yang lain. Ini menunjukkan aliran panas yang terjadi di TEC tidak mengalami akumulasi yang menyebabkan nilai arus naik atau turun dengan signifikan.

Pada fraksi 80% penurunan yang signifikan terlihat saat menit ke-0 hingga 20. Jika dikaitkan

dengan tingginya temperatur wadah, hal ini terjadi karena pada saat-saat tersebut wadah memberikan panas yang besar kepada TEC, mengakibatkan panas sempit mengalami akumulasi pada lapisan dalam TEC karena terhambat oleh lapisan keramik untuk menuju ke lingkungan. Akumulasi panas pada TEC menyebabkan nilai ΔT TEC yang sesungguhnya menjadi berkurang, sehingga menurunkan arus secara signifikan.



Gambar 8. Grafik hubungan tegangan dan arus listrik terhadap waktu pelepasan panas pada uji laboratorium

Dari data tegangan dan arus, dapat dihitung daya yang dihasilkan TEC sesuai dengan persamaan berikut:

$$P = V \times I \quad (1)$$

P adalah daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah arus listrik (Ampere). Daya yang ditampilkan pada Gambar 9 merupakan daya akumulasi dari tiap menit. Misalkan daya pada menit ke-20 merupakan penjumlahan daya menit 0 hingga 20, daya pada menit 100 merupakan penjumlahan daya menit ke-0 hingga 100, dan seterusnya. Akumulasi daya ini diperlukan untuk mengetahui berapa besar daya yang dapat dikonversi oleh TEC pada setiap fraksi. Fraksi yang paling optimal dapat diketahui dengan cara mencari titik belok pada setiap garis kemudian dihitung luasan dari setiap garis. Garis yang memiliki luasan paling besar merupakan fraksi garam yang dapat menghasilkan daya paling optimal.

Luasan area pada grafik menunjukkan bahwa variabel yang paling optimum untuk menghasilkan listrik adalah fraksi 60%. Tingginya nilai daya ini dikarenakan pada menit-menit awal nilai tegangan dan arus pada fraksi 60% merupakan yang paling besar, sehingga menghasilkan grafik daya yang paling tinggi dan memiliki luas area yang paling besar.

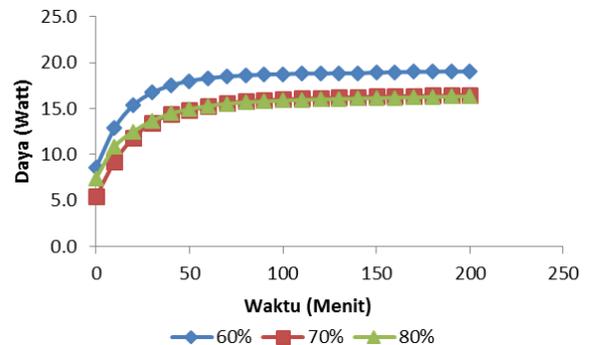
Uji Lapang

Pengujian lapang dilakukan pada tanggal 11 Maret 2015 mulai pukul 07.00–13.00 WIB. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ saat diaplikasikan dengan panas matahari yang difokuskan. Massa garam yang digunakan adalah fraksi 60% volume wadah karena

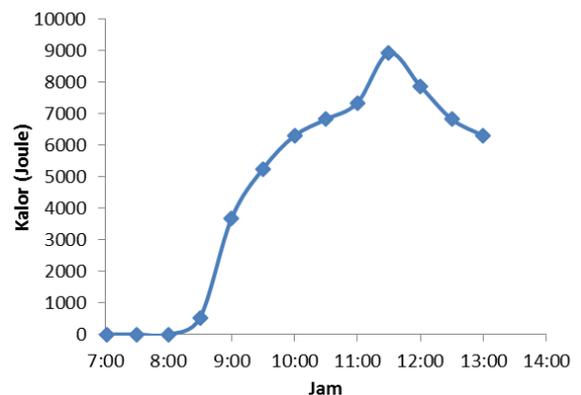
pada uji laboratorium massa tersebut dapat menghasilkan daya yang paling besar.

Saat temperatur panas hasil pemfokusan sinar matahari lebih tinggi dari pada temperatur garam maka akan terjadi proses pemanasan, sedangkan saat temperatur panas hasil pemfokusan sinar matahari lebih rendah dari pada temperatur garam akan terjadi proses pelepasan panas dari garam ke TEC.

Intensitas cahaya matahari yang fluktuatif mempengaruhi kalor yang disimpan oleh garam (Gambar 10). Panas yang terakumulasi pada garam mulai mengalami penurunan pada pukul 12.00 WIB karena pada waktu yang sama temperatur panas hasil pemfokusan sinar matahari mengalami penurunan. Dari panas yang terakumulasi pada garam $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ akan dikonversi menjadi listrik oleh TEC.



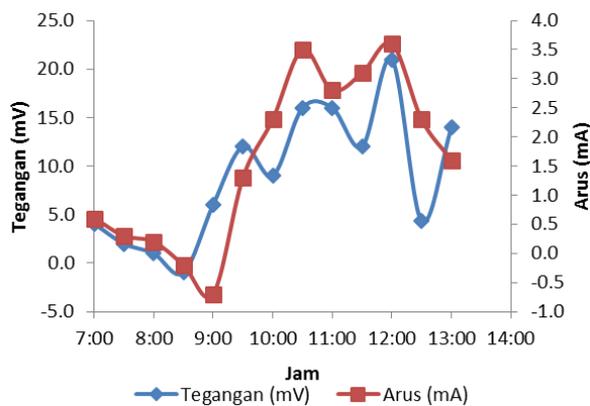
Gambar 9. Grafik hubungan daya terhadap waktu pada uji laboratorium



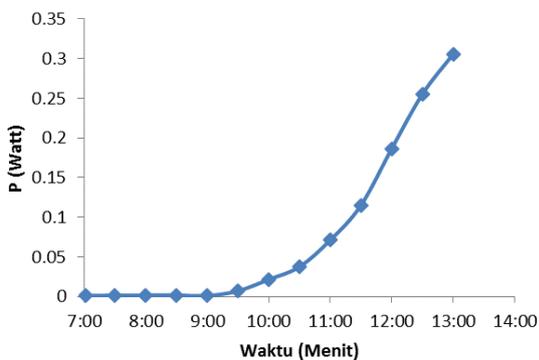
Gambar 10. Grafik hubungan antara kalor yang disimpan garam terhadap jam pengujian pada uji lapang

Konversi listrik hasil konversi panas adalah daya dimana daya merupakan hasil pengkalian tegangan dengan arus listrik (Persamaan (1)) yang ditunjukkan pada Gambar 11a. Dari gambar 11b dapat diketahui bahwa akumulasi daya hasil dari panas yang tersimpan oleh garam terus mengalami kenaikan selama proses pengujian pada pukul 07.00 sampai pukul 13.00.

Daya yang dihasilkan pada pukul 07.00 sampai 09.00 sangat rendah yaitu 0,0012 Watt dan 0,0018 Watt. Hal tersebut disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang sedikit sehingga temperatur panas hasil pemfokusan sinar matahari tidak mencukupi untuk dapat memanaskan garam. Temperatur pemfokusan pada rentang waktu tersebut adalah 22°C (Gambar 10). Setelah pukul 09.00 WIB grafik menunjukkan kenaikan meskipun temperatur pemfokusan turun, karena garam telah menyimpan panas yang ditransferkan oleh panas matahari. Gambar 11 di bawah ini adalah hasil konversi panas menjadi energi listrik.



(a)



(b)

Gambar 11. Grafik hubungan antara (a) tegangan dan arus, dan (b) daya terhadap jam pengujian pada uji lapang

KESIMPULAN

1. Massa garam CaCl_2 sebesar 60% dari volume wadah menghasilkan kapasitas penyimpanan panas dan arus yang paling besar dibanding yang lain.
2. Pada kondisi optimal (60% massa garam CaCl_2 dari volume wadah), kalor yang disimpan oleh garam CaCl_2 ketika pengujian laboratorium adalah 48276,4 Watt, sedangkan pada pengujian lapang adalah 6296,9 Watt.
3. Listrik yang dapat dikonversi pada pengujian laboratorium adalah 19,1 Watt dan pada pengujian lapang adalah 0,3 Watt

DAFTAR NOTASI

ΔT	Perbedaan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
I	Arus (Amphere)
P	Daya (Watt)
Q	Kalor (Joule)
t	Waktu (Menit)
T	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
V	Voltase (Volt)

DAFTAR PUSTAKA

Dincer, I. dan Rosen, M.A. (2002). *Thermal Energy Storage, Systems and Applications*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

DOW Chemical Company (2003). *Calcium Chloride Handbook A Guide To Properties, Forms, Storage, and Handling*. USA: DOW Chemical Company.

Hastings, R., dan Wall, M. (2007). *Sustainable Solar Housing Exemplary Buildings and Technologies*. United Kingdom: Earthscan.

Pielichowska, K. dan Pielichowski, K. (2014). Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.

Putra, N., Koestoer, Raldi A., Adhitya, M., Roekettino, A., dan Trianto, B. (2009). Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik untuk Kendaraan Hibrid. *Makara, Teknologi*, 13(2), 53-58.

Rafeeu, Y. dan Ab Kadir, M. Z. A. (2012) Thermal Performance of Parabolic Concentrators under Malaysian Environment: A Case Study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3826-3835.

Saidur, R., Rezaei, M., Muzammil, W.K., Hassan, M.H., Paria, S., dan Hasanuzzaman, M. (2012). Technologies to Recover Exhaust Heat from Internal Combustion Engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5649-5659.

Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., dan Luo, L. (2013). A Review of Potential Materials for Thermal Energy Storage in Building Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327-349.

Xu, J., Wang, R.Z., Li, Y. (2014). A Review of Available Technologies for Seasonal Thermal Energy Storage. *Solar Energy*, 103, 610-63.

Wang, P. dan Cohen, A.B. (2011). *On-Chip Thermal Management of Nanoelectronic Hot Spots*. Portland: ASME InterPack Conference.