

PENGARUH MATERIAL BERUBAH FASA (PCM) SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN PANAS TERHADAP KARAKTERISTIK COOLING BOX PELTIER

Novreza Pratama^{1,a)}, Imron Rosyadi^{2,b)}, Hadi Wahyudi³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin UNTIRTA ,
Jl. Jend. Surdirman Km.3, Cilegon-Banten, Indonesia, 42435

^{a)} 3331160009@untirta.ac.id (corresponding author), ^{b)} imrom_jtm@untirta.ac.id,

Abstrak

Vaksin yang digunakan untuk membentuk antibodi mempunyai beberapa kerentanan terhadap kerusakan. Pengelolaan suhu penyimpanan vaksin di tingkat puskesmas berada pada suhu antara 2°C - 8°C. Alat yang biasa digunakan untuk membawa vaksin adalah termos es yang menggunakan *icepack* untuk mendinginkan vaksin. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh *Phase Change Material* (PCM) sebagai penyimpan kalor pada *cooling box peltier* vaksin dan parameter terbaik untuk menghasilkan temperatur 2°C - 8°C. Membandingkan karakteristik *icepack* berbahan HDPE dan aluminium yang berisi air dan PCM pada modifikasi *coolbox* vaksin dengan pendingin termoelektrik (TEC). Menghasilkan analisis bahwa PCM dapat menggantikan air sebagai cairan penyimpan panas pada *icepack* berbahan aluminium, temperatur terendah dapat dicapai 2,91°C dalam waktu 33 menit dengan suhu rata – rata *coolbox* yaitu 5,57°C. Pada modifikasi *coolbox* vaksin dengan PCM dan sistem pendingin termoelektrik, rata – rata temperatur udara ruangan *coolbox* yaitu 3,86°C, temperatur terendah ruang *coolbox* yaitu 1,41°C dicapai dalam waktu 22 menit. Dari hasil analisis biaya, didapatkan biaya instalasi *coolbox* sebesar Rp. 320.000,00. Proses freezing PCM untuk 1 hari selama 5 jam sebanyak 2 kali dalam setahun membutuhkan biaya sebesar Rp1.794.317,40. Sementara biaya untuk pengoperasian *coolbox* selama 10 jam dalam setahun membutuhkan biaya sebesar Rp468.342,85. Jadi total biaya listrik selama 1 tahun sebesar Rp2.582.660,25.

Kata kunci: aluminium, coolbox, icepack, pendingin termoelektrik, PCM

Abstract

Vaccine which being used to create antibodies were susceptible to being damaged. Vaccine temperature management were at 2°C to 8°C. Because of that, a water flask with icepack were used to refrigerate vaccine. This research aimed to find how effective Phase Change Material (PCM) at vaccine peltier cooling box and best parameters to achieve constant temperature at 2°C to 8°C with a comparison between icepack made from HDPE, water filled aluminium and modified vaccine coolbox with thermoelectric cooler (TEC). Thir research concludes that PCM could replace water as a heat transfer in aluminium-based icepack, lowest temperature achieved was 2,91% in 33 minute with an average temperature of coolbox was at 5,57°C. This PCM-modified vaccine box and thermoelectric average number of 1,41°C while achieved in 22 minutes and 48 seconds. Meanwhile, installing the coolbox require as much as Rp320.000,00. The freezing process of PCM takes a day and five hours with a year needs for PCM made cost at Rp. 1.794.317. Meanhwile the cost to operate toolbox for ten hours in a year costed for Rp. 464.342,85 so the total electricity bill for a year were costed at Rp. 2.582.600,25.

Keywords: aluminium, coolbox, icepack, thermo electric cooler, PCM

I. PENDAHULUAN

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi membawa program kesehatan ke dalam penyelenggaraan pelayanan yang bermutu dan efisien. Program imunisasi terbukti pula paling efektif dan efisien dalam pemberian layanan kesehatan.

Vaksin yang digunakan untuk membentuk antibodi mempunyai beberapa kerentanan atau kelemahan terhadap kerusakan. Vaksin berpotensi mengalami kerusakan apabila terpapar dengan suhu panas dan suhu beku. Pengelolaan suhu penyimpanan vaksin di tingkat puskesmas berada pada

suhu antara 2 °C - 8 °C [1]. Karena itu, alat yang biasa digunakan untuk membawa vaksin adalah termos es yang menggunakan *icepack* untuk mendinginkan vaksin.

Menurut Kaplan pada tahun 2012, bahwa hampir setiap tahun di dunia ada sekitar 50% lebih vaksin yang terbuang percuma karena masalah gangguan sistim rantai dingin atau *cold chain* yang terjadi selama perjalanan dari pabrik pembuat hingga ketempat tujuan vaksin. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa penemuan vaksin beku dalam pengelolaan rantai dingin masih sering terjadi, sehingga

diperlukan sarana, prasarana, dan tenaga yang tepat guna mencegah terjadinya kerusakan pada vaksin [2].

Elemen *Peltier* adalah komponen termoelektrik yang dapat memompa panas dari satu sisi ke sisi lain sesuai arah arus yang diberikan. Prinsip kerja elemen *Peltier* berdasarkan efek *Peltier*, efek *Joule*, efek *Seebeck*, dan efek *Thomson*. Ketika arus DC dialirkan ke elemen *Peltier*, akan mengakibatkan salah satu sisi elemen *Peltier* menjadi dingin (kalor diserap) dan sisi lainnya menjadi panas (kalor dilepaskan). Elemen *Peltier* dapat dimanfaatkan sebagai pemanas dan pendingin bergantung pada arah arus yang diberikan. Elemen *peltier* memiliki bentuk yang *compact* dengan daya yang kecil, sehingga sangat sesuai digunakan sebagai alat pendingin *coolbox* [3].

Bahan-bahan berubah fasa dikenal sebagai *Phase Change Material* (PCM) disebut sebagai bahan-bahan penyimpan panas laten adalah bahan yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa perubahan suhu (Meng, 2008). PCM dapat melepaskan panas lebih 4-5 kali setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu.

Wiwik Pujiastuti pada tahun 2011, melakukan penelitian terhadap klasifikasi *Phase Change Materials* dan aplikasinya, menyimpulkan bahwa klasifikasi PCM terbagi menjadi 2 yaitu bahan organik dan anorganik serta kombinasi dari keduanya. Penggunaan PCM dirasa sangat menjanjikan sebagai material penyerap panas dan mempertahankan suhu, aplikasi PCM bisa sangat luas meliputi aplikasi untuk bangunan, perlindungan, dan transportasi produk yang peka terhadap suhu, serta *ice storage*.

Pada penelitian ini akan dirancang *coolbox* menggunakan *thermoelectric cooler* (TEC). Pada perancangan alat akan memilih komponen yang digunakan sebagai sistem pendingin komponen termoelektrik dan pemilihan jenis *Phase Change Material* (PCM) yang sesuai untuk produk makanan. Sehingga diharapkan dengan perancangan *coolbox* menggunakan termoelektrik yang diintegrasikan dengan *Phase Change Material* (PCM) dapat mengurangi penggunaan *icepack*.

II. LANDASAN TEORI

A. Perpindahan Panas

Panas merupakan Kalor yang bisa berpindah dari benda yang memiliki kelebihan kalor menuju benda yang kekurangan kalor. Kalor biasanya dinyatakan dalam suhu. Dalam satuan internasional, kalor dinyatakan dengan Joule (J). Perpindahan panas konduksi terjadi pada *heatsink* sisi panas *peltier* dan pada *heatsink* sisi dingin *peltier*. Sementara perpindahan panas konveksi terjadi pada udara yang melewati *heatsink*, dan udara dalam ruangan atau alat uji.

1. Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi akibat getaran molekul dan elektron bebas pada suatu media padat, atau pada media fluida yang diam. Persamaan laju konduksi dikenal dengan Hukum Fourier (*Fourier Law of Heat*

Conduction) tentang konduksi, yang persamaan matematikanya dituliskan sebagai berikut :

$$q_{kond} = -k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Holman pada tahun 1997 menyatakan persamaan (1) merupakan laju perpindahan kalor (Watt) dan $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ merupakan gradien suhu ke arah perpindahan kalor (K/m), konstanta positif k disebut konduktivitas *thermal* benda atau material, A merupakan luas penampang tegak lurus terhadap aliran panas (m), dan nilai minus (-) diselipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika.

2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari suatu permukaan media padat atau fluida yang diam menuju fluida yang mengalir atau bergerak, begitu pula sebaliknya, yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur.

Dalam memperhitungkan perpindahan panas konveksi maka digunakan hukum Newton tentang pendinginan :

$$q_{konv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

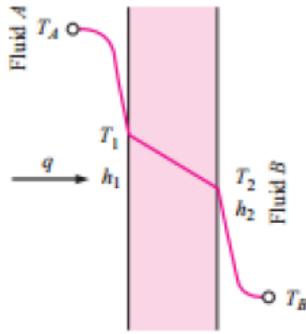
Suatu fluida memiliki temperatur (T) yang bergerak dengan kecepatan (V), diatas permukaan benda padat Temperatur media padat lebih tinggi dari temperatur fluida, maka akan terjadi perpindahan panas secara konveksi dari benda padat ke fluida yang mengalir.

Menurut perpindahan panas konveksi, aliran fluida dapat diklasifikasikan menjadi:

- Konveksi paksa (*forced convection*). Terjadi bila aliran fluida disebabkan oleh gaya luar. Seperti: *blower*, pompa, dan kipas angin.
- Konveksi bebas (*natural convection*). Terjadi bila aliran fluida disebabkan oleh efek gaya apungnya (*bouyancy forced effect*). Pada fluida, temperatur berbanding terbalik dengan massa jenis (*density*). Dimana, semakin tinggi temperatur suatu fluida maka massa jenisnya akan semakin rendah, begitu pula sebaliknya.

3. Perpindahan Panas Menyeluruh

Koefisien perpindahan panas total didefinisikan sebagai koefisien hambatan termal total menuju perpindahan panas diantara dua fluida. Koefisien perpindahan panas total juga didefinisikan sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi dengan memperhitungkan hambatan diantara fluida yang dipisahkan oleh dinding dan lapisan insulator.



Gambar 1. Perpindahan panas menyeluruh

Perpindahan kalor menyeluruh pada gambar 1 dihitung dengan cara membagi beda suhu menyeluruh dengan jumlah tahanan termal sebagai berikut :

$$q = U A \Delta T_{Menyeluruh} \tag{3}$$

Dengan U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh, yang didapat dari persamaan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k_1} + \frac{1}{h_2}} \tag{4}$$

Dengan h adalah koefisien lapisan udara, k adalah konduktivitas termal material, dan x adalah ketebalan dari material yang digunakan.

B. Termoelektrik

Elemen Peltier atau Thermo Electric Cooler (TEC) merupakan suatu komponen listrik yang dapat menghasilkan temperatur dingin pada satu sisi (*cold side*) dan temperatur panas pada sisi lainnya (*hot side*) bila dialiri arus listrik. Kenaikan atau penurunan temperatur di persambungan bergantung pada arah aliran arus listrik [4].

Fenomena termoelektrik pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Belakangan diketahui, hal ini terjadi karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek *Seebeck*.

Penemuan Seebeck ini memberikan inspirasi pada Jean Charles Peltier untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut. Dia mengalirkan listrik pada dua buah logam yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Penemuan yang terjadi pada tahun 1934 ini kemudian dikenal dengan efek *Peltier*. Efek *Seebeck* dan *Peltier* inilah yang kemudian menjadi dasar pengembangan teknologi termoelektrik.

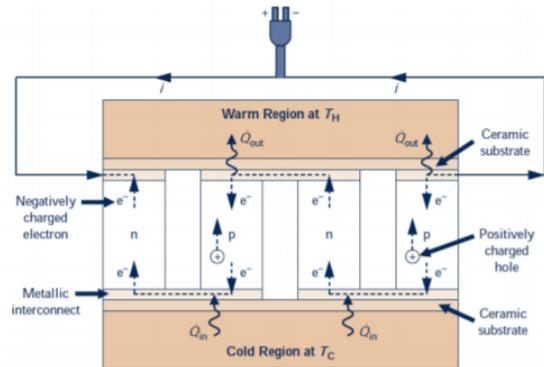
Semikonduktor adalah bahan pilihan untuk termoelektrik yang umum dipakai. Bahan semikonduktor termoelektrik

yang paling sering digunakan saat ini adalah *Bismuth Telluride* (Bi_2Te_3) yang telah diolah untuk menghasilkan blok atau elemen yang memiliki karakteristik individu berbeda yaitu N dan P.

Thermoelectric Cooler (TEC) terdiri dari semikonduktor tipe P dan N yang masing-masing terhubung seri secara elektrik, namun terhubung paralel secara *thermis*. Prinsip kerja pendingin termoelektrik berdasarkan efek Peltier, yaitu ketika arus listrik DC melewati material semikonduktor dengan tipe yang berbeda, semikonduktor tipe N (negatif) dan tipe P (positif) maka akan menimbulkan panas (panas dilepas) pada satu sisi dan dingin (panas diserap) pada sisi lainnya [5].

Penyebab sisi dingin elemen *peltier* adalah adanya aliran elektron dari tingkat energi yang lebih rendah pada semikonduktor tipe-P, ke tingkat energi yang lebih tinggi yaitu semikonduktor tipe-N. Supaya elektron tipe-P yang mempunyai tingkat energi yang lebih rendah dapat mengalir maka elektron menyerap energi yang mengakibatkan sisi tersebut menjadi dingin.

Pada sambungan sisi panas, elektron mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi (semikonduktor tipe-N) ke tingkat energi yang lebih rendah (semikonduktor tipe-P). Dengan tingginya tingkat energi yang dimiliki semikonduktor tipe-N, maka kelebihan energi pada semikonduktor tipe-N dilepas ke lingkungan, sehingga sisi termoelektrik tersebut menjadi panas. Kelebihan energi pada semikonduktor tipe-N dilepas ke lingkungan dan mengalir kembali ke semikonduktor tipe-P dan seperti itu seterusnya [6]. Seperti yang terlihat pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Skema susunan termoelektrik

Dalam menghitung kinerja dari termoelektrik, dibutuhkan beberapa persamaan, yaitu :

1. Koefisien *Seebeck*

Seebeck Coefficient (S_m) merupakan nilai yang sangat berpengaruh terhadap karakteristik bahan modul yang digunakan.

$$S_m = \frac{V_{max}}{T_h} \tag{5}$$

2. Konduktansi Termal

Thermal Conductance (K_m) sangat bergantung pada bertambahnya kecepatan rata – rata partikel dalam perpindahan energi.

$$K_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) \times V_{max} \times I_{max}}{2 \times T_h \times \Delta T_{max}} \tag{6}$$

3. Resistansi Elektrik

Electrical Resistance (R_m) merupakan nilai hambatan listrik pada modul termoelektrik.

$$R_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) \times V_{max}}{T_h \times I_{max}} \quad (7)$$

4. Figure of Merit (Z)

Semakin besar nilai Z maka performansi dari modul termoelektrik akan semakin baik.

$$Z = \frac{S^2}{R_m \times K_m} \quad (8)$$

5. Heat Rejection

Heat Rejection (Q_h) merupakan laju perpindahan panas yang dilepas pada sisi panas termoelektrik.

$$Q_h = (S \times I \times T_h) + (0,5 \times R_m \times I^2) - (K_m \times \Delta T) \quad (9)$$

6. Heat Absorption

Heat Absorption (Q_c) merupakan laju perpindahan panas yang diserap pada sisi dingin termoelektrik.

$$Q_c = (S \times I \times T_c) + (0,5 \times R_m \times I^2) - (K_m \times \Delta T) \quad (10)$$

7. Electrical Driven Power

Electrical Driven Power (Q_{te}) merupakan nilai kerja listrik yang diperoleh dari perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin.

$$Q_{te} = (S \times I \times \Delta T) + (0,5 \times R_m \times I^2) \quad (11)$$

8. Coefficient of Performance

Semakin tinggi nilai COP dari suatu sistem refrigerasi maka sistem tersebut bekerja lebih baik (memiliki efisiensi yang tinggi).

$$COP = \frac{Q_c}{Q_{te}} \quad (12)$$

Dalam sistem kotak pendingin, termoelektrik memiliki beberapa beban pendinginan, yaitu :

1. Beban Produk

Beban panas dari dalam ruangan merupakan beban panas yang harus dibuang dari ruangan tersebut untuk mencapai temperatur yang diinginkan.

$$Q_p = m \times C_p \times (\Delta T) \quad (13)$$

2. Beban Transmisi

Beban transmisi adalah beban yang didapat pada bahan yang digunakan untuk mentransmisikan energi dari termoelektrik ke produk yang didinginkan. Berdasarkan persamaan (3) dan persamaan (4).

$$Q_t = U \times A \times (\Delta T) \quad (14)$$

C. Phase Change Material (PCM)

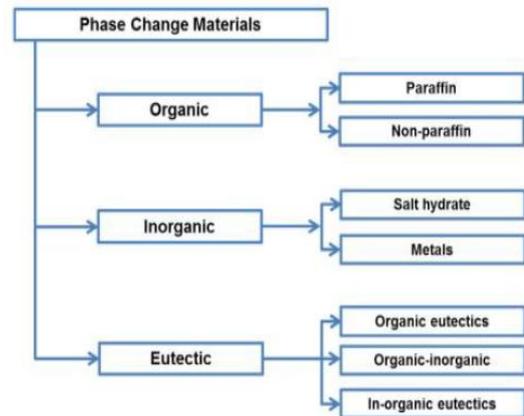
Bahan-bahan berubah fasa atau lebih dikenal sebagai Phase Change Material (PCM) yang juga seringkali disebut sebagai bahan-bahan penyimpan panas laten adalah bahan

yang mempunyai kemampuan untuk melepaskan energi panas yang sangat tinggi dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa perubahan suhu. Perpindahan energi panas terjadi saat bahan berubah bentuk dari padat ke cair atau cair ke padat.

Tidak seperti halnya bahan penyimpan energi konvensional, PCM dapat menyerap dan melepaskan panas mendekati suhu konstan. PCM dapat melepaskan panas lebih 4-5 kali setiap satuan volume dibandingkan bahan penyimpan energi konvensional seperti air atau batu [7].

PCM merupakan satu cara penyimpanan energi panas yang paling efisien. PCM dapat digunakan untuk penyimpanan energi dan kontrol suhu. PCM menjadi menarik karena mempunyai kelebihan yaitu perbandingan yang cukup tinggi antara panas yang dilepaskan dengan variasi suhu [8].

Secara umum PCM dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis seperti pada gambar 3 yaitu organik, anorganik dan eutectic[9].



Gambar 3. Klasifikasi PCM

1. Organik

PCM organik dapat berupa alifatik atau organik lain. Umumnya PCM organik mempunyai rentang suhu rendah. PCM organik mahal dan mempunyai rata-rata panas laten per satuan volume serta densitas rendah. Sebagian besar PCM organik mudah terbakar di alam. PCM organik terbagi menjadi 2, yaitu :

a) Parafin

Parafin merupakan ikatan hidrokarbon yang tersusun atas CH₃-(CH₂)-CH₃. Dalam hal ini ikatan hidrokarbon jenuh bersifat non polar. Titik leleh dari parafin akan bergantung pada panjang rantai dari ikatan CH₃.

Parafin merupakan senyawa organik yang tidak berbahaya sehingga cocok pada kategori food grade level.

b) Nonparafin

Jenis ini merupakan kategori terbanyak dari PCM. Di antara bahan-bahan non parafin tersebut yang paling banyak adalah jenis ester, asam lemak, alkohol dan jenis-jenis glikol.

2. Anorganik

PCM anorganik diklasifikasikan sebagai hidrat garam (*salt hydrate*) dan logam (*metallic*). PCM jenis ini tidak terlalu dingin dan panas peleburan tidak akan berkurang selama berlangsungnya siklus.

a) Hidrat Garam (*salt hydrate*)

Hidrat garam dapat dilihat sebagai campuran garam anorganik dengan air membentuk padatan kristal tertentu. Perubahan bentuk padat-cair dari hidrat garam merupakan sebuah proses dehidrasi dari hidrasi garam. Hidrat-hidrat biasanya meleleh menjadi sebuah hidrat garam dengan mol air yang sangat kecil.

b) Logam (*Metallic*)

Jenis ini juga mencakup logam dengan titik leleh rendah dan campuran logam. PCM jenis ini belum banyak menjadi perhatian sebab sangat berat. Namun, jika volume dapat dikendalikan, jenis ini menjadi pilihan karena mempunyai panas peleburan laten per satuan volume yang tinggi.

3. Kombinasi (*Eutactic*)

PCM kombinasi adalah sebuah komposisi dengan lelehan terendah dari dua komponen atau lebih, masing-masing meleleh dan membeku membentuk campuran dari komponen-komponen kristal selama proses kristalisasi. PCM jenis ini hampir selalu meleleh dan membeku tanpa pemisahan karena mereka membeku menjadi sebuah campuran kristal, memberikan sedikit kesempatan pada komponen-komponennya untuk memisahkan diri.

III. METODE PENELITIAN

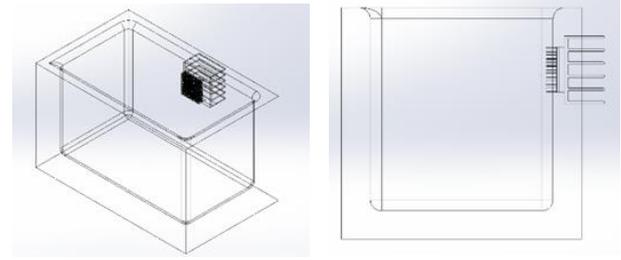
A. Konsep Pengambilan Data

Permasalahan saat ini yang dihadapi yaitu penggunaan media pendingin pada *coolbox* yang masih menggunakan *icepack* berisi air dan sistem pendingin kompresi uap.

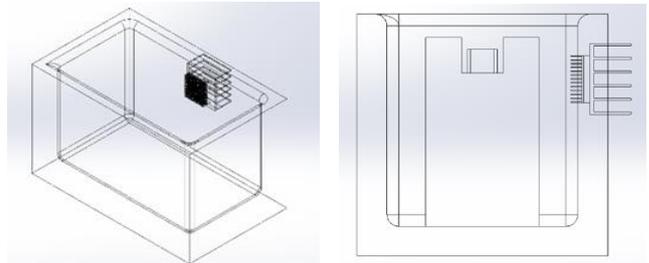
Studi literatur yang dilakukan mempelajari konsep perpindahan panas, pembebanan panas, efek *peltier* pada termoelektrik dan *phase change material* (PCM).

Pada tahapan ini dilakukan perhitungan beban panas yang dihasilkan oleh *coolbox*. Panas yang dihasilkan oleh *coolbox* merupakan panas yang berasal dari lingkungan yang masuk melewati rongga pada dinding *coolbox*. *Coolbox* yang digunakan menggunakan material *high density polyethylene* (HPDE).

Pada penelitian ini direncanakan menggunakan *coolbox* berukuran (34 x 21 x 23) cm dan tebal 2,5 cm. sistem pendinginan yang dirancang menggunakan termoelektrik yang diletakkan pada dinding *coolbox* seperti pada gambar 4. PCM akan diletakkan pada setiap sisi dari *coolbox* seperti pada gambar 5, sehingga akan didapatkan pendinginan yang merata di dalam *coolbox*.



Gambar 4. Aparatus tanpa PCM



Gambar 5. Aparatus dengan PCM

Pengujian dan kalibrasi perlu dilakukan guna mendapatkan data hasil pengamatan yang sesuai dengan *output* temperatur yang direncanakan. Kalibrasi dilakukan pada *coolbox* dan peralatan yang digunakan dalam pengambilan data. Dalam tahap pengujian akan menentukan sistem yang dirancang sesuai atau tidak, jika sistem tidak sesuai maka akan kembali pada tahap pembuatan aparatus.

Pengambilan data yang dilakukan menggunakan variasi jumlah termoelektrik dan volume PCM. Sehingga data yang akan didapatkan dari percobaan, pertama yaitu besarnya temperatur pada beberapa titik ketika proses pendinginan menggunakan termoelektrik dan menggunakan PCM. Kedua, waktu lamanya temperatur bertahan di dalam ruang *coolbox* dengan PCM.

Karena tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji potensi penggunaan PCM dengan modul termoelektrik, prototipe kotak pembawa vaksin telah dibuat dan diuji dengan menggunakan PCM parafin cair untuk mengetahui kemampuan pendinginan dibandingkan dengan penggunaan es batu. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh PCM pada sistem pendingin termoelektrik. Ini juga menunjukkan kinerja sistem pendingin saat beban pendinginan disediakan di dalam ruang pendinginan. Untuk alasan ini, pengujian ini dilakukan untuk kotak pembawa vaksin skala kecil yaitu 8 liter, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sistem pendingin termoelektrik. Skema pengaturan eksperimental yang digunakan untuk menguji kinerja kotak pembawa vaksin. Suhu diukur pada berbagai posisi, termasuk sisi dingin dan panas dari modul termoelektrik, *heatsink* berada pada bagian dalam lemari vaksin, dan udara lingkungan.

Termokopel tipe-K digunakan untuk mengukur temperatur pada bagian sisi panas dan dingin dari elemen *peltier*, dan bagian dinding-dinding *coolbox*. Prototipe kotak pembawa vaksin terhubung ke data akuisisi Labjack yang dipantau melalui aplikasi LJLogM di komputer. Akurasi keseluruhan dari sensor suhu adalah 0,5 °C. Catu daya DC digunakan untuk mengoperasikan modul

termoelektrik dan kipas. Daya input (tegangan dan arus) dicatat dari LCD.

Pengukuran dimulai dari suhu ruangan. Dalam praktiknya, kotak pembawa vaksin ini digunakan untuk menjaga rantai dingin vaksin, dimana suhu vaksin sudah antara 2°C – 8°C sehingga kontrol temperatur otomatis berupa termostat sangat diperlukan untuk mengaktifkan daya listrik dan mematakannya apabila suhu pendinginan tercapai.

B. Teknis Pengambilan Data

Beberapa model dalam pengambilan data diperlukan guna memenuhi kelengkapan data percobaan dari modifikasi termoelektrik dan penggunaan PCM dalam kotak vaksin.

1. Percobaan Coolbox Dengan Icepack Air

Percobaan *coolbox* dilakukan hanya menggunakan icepack untuk mendapatkan data pembandingan dengan percobaan menggunakan PCM. Jumlah *icepack* standar pada *Coolbox Vaccine Carrier* adalah 6 buah *icepack*. Sehingga memunculkan variasi 2 *icepack*, 4 *icepack*, dan 6 *icepack* berbahan HDPE, setiap 1 *icepack* HDPE berisi fluida dengan volume 300 ml. Sehingga total volume fluida air pada *icepack* adalah 600ml, 1200ml, dan 1800ml.

2. Percobaan Coolbox Dengan Icepack PCM

Percobaan *coolbox* dengan PCM dilakukan dengan menyusun PCM pada setiap sisi dinding *coolbox*. Variasi jumlah PCM yang digunakan pada percobaan ini adalah 2 *icepack*, 4 *icepack*, dan 6 *icepack* berbahan HDPE dan aluminium, setiap 1 kotak berisi fluida dengan volume 300ml. Sehingga total volume fluida PCM pada *icepack* adalah 600ml, 1200ml, dan 1800ml.

3. Percobaan Coolbox Dengan Termoelektrik, Icepack Air dan PCM

Percobaan ini akan membandingkan antara *coolbox* berpendingin termoelektrik dikombinasikan dengan *icepack* air berbahan Aluminium, dan *coolbox* berpendingin termoelektrik dikombinasikan dengan *icepack* PCM berbahan aluminium, dilakukan dengan menyusun 2 kotak *icepack* pada sisi dinding *coolbox*. Variasi *icepack* yang digunakan pada percobaan ini adalah 2 *icepack* air aluminium dan 2 *icepack* PCM aluminium. Sementara termoelektrik yang digunakan berjumlah 1 buah.

Sehingga memunculkan beberapa variasi percobaan pada penelitian, yaitu :

1. Pengambilan data perubahan temperatur *coolbox* terhadap waktu hanya dengan *icepack* berbahan HDPE berisi air berjumlah 2 buah, 4 buah, dan 6 buah.
2. Pengambilan data perubahan temperatur *coolbox* terhadap waktu hanya dengan *icepack* berbahan HDPE berisi PCM berjumlah 2 buah, 4 buah, dan 6 buah.
3. Pengambilan data perubahan temperatur *coolbox* terhadap waktu hanya dengan *icepack* berbahan aluminium berisi PCM berjumlah 2 buah, 4 buah, dan 6 buah.

4. Pengambilan data perubahan temperatur *coolbox* terhadap waktu hanya dengan variasi termoelektrik berjumlah 1 buah.
5. Pengambilan data perubahan temperatur *coolbox* terhadap waktu dengan kombinasi 1 buah termoelektrik dan *icepack* berisi PCM berbahan aluminium berjumlah 2 buah.

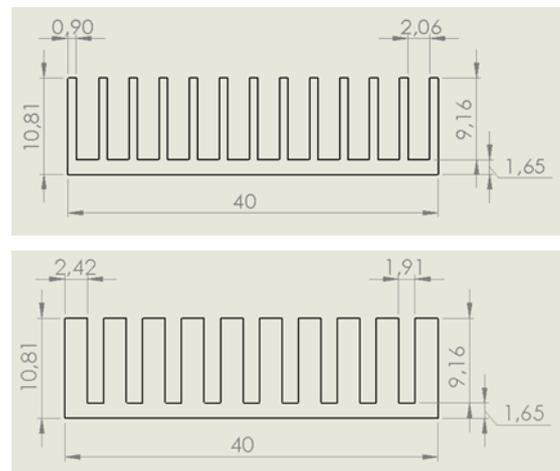
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Perpindahan Panas

Menghitung perpindahan panas dari *coolbox* membutuhkan koefisien udara dari dalam dan luar *coolbox*, sehingga luas heatsink dalam dan luar perlu diketahui.

1. Perhitungan Koefisien Udara Dalam

Koefisien lapisan udara di dalam *coolbox* dapat dihitung dari perpindahan panas termoelektrik dengan *heatsink* yang berada di dalam *coolbox*, dengan memperhatikan dimensi *heatsink* dalam *coolbox* pada gambar 6.



Gambar 6. Dimensi heatsink dalam

$$\begin{aligned} Q &= V \times I \\ &= 15,4 \text{ V} \times 6,4 \text{ A} \\ &= \mathbf{98,56 \text{ W}} \end{aligned}$$

$$\Delta T = 31,64 \text{ } ^\circ\text{C} = \mathbf{304,64 \text{ K}}$$

$$\begin{aligned} A_{Total} &= 0,007452 + 0,009632 + 0,000684 + 0,00098 \\ &= \mathbf{0,01875 \text{ m}^2} \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan (2) maka koefisien udara di dalam *coolbox* menjadi

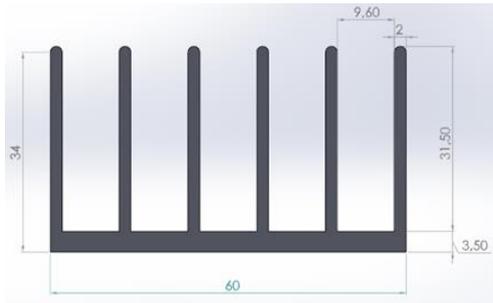
$$h_1 = \frac{98,56 \text{ W}}{0,01875 \text{ m}^2 \times 304,64 \text{ K}}$$

$$h_1 = \mathbf{17,255 \text{ W/m}^2 \text{ K}}$$

2. Perhitungan Koefisien Udara Luar

Koefisien lapisan udara di luar *coolbox* dapat dihitung dari perpindahan panas termoelektrik dengan *heatsink*

yang berada di luar *coolbox*, dengan memperhatikan dimensi *heatsink* luar *coolbox* pada gambar 7.



Gambar 7. Dimensi *heatsink* luar

$$Q = V \times I$$

$$= 15,4 \text{ V} \times 6,4 \text{ A}$$

$$= \mathbf{98,56 \text{ W}}$$

$$\Delta T = 31,64 \text{ }^\circ\text{C} = \mathbf{304,64 \text{ K}}$$

$$A_{Total} = 0,0231 + 0,00288$$

$$= \mathbf{0,02976 \text{ m}^2}$$

Berdasarkan persamaan (2) maka koefisien udara di luar *coolbox* menjadi :

$$h_2 = \frac{98,56 \text{ W}}{0,02976 \text{ m}^2 \times 304,64 \text{ K}}$$

$$h_2 = \mathbf{10,871 \text{ W/m}^2 \text{ K}}$$

3. Perhitungan Beban Panas Melalui Dinding *Coolbox*

Tabel 1. Luas permukaan dinding *coolbox*

Dinding	Panjang (m)	Lebar (m)	Luas (m ²)
Kiri	0,16	0,17	0,0272
Kanan	0,16	0,17	0,0272
Atas	0,29	0,16	0,0464
Bawah	0,29	0,16	0,0464
Depan	0,29	0,17	0,0493
Belakang	0,29	0,17	0,0493

Berdasarkan persamaan (4) dapat diketahui koefisien perpindahan panas menyeluruh dengan memperhatikan dimensi *coolbox* pada tabel 1.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{17,255 \text{ W/m}^2 \text{ K}} + \frac{0,025 \text{ m}^2}{0,16 \text{ W/m K}} + \frac{1}{10,871 \text{ W/m}^2 \text{ K}}}$$

$$U = \frac{1}{1,1342} = \mathbf{0,8817 \text{ W/m}^2 \text{ K}}$$

Pada *coolbox* ketebalan seluruh dinding sama yaitu 0,025 m sehingga nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh bernilai sama pada tiap dinding. Namun nilai perpindahan panas tiap dinding berbeda dikarenakan luasan dinding *coolbox* yang berbeda. Sehingga besar perpindahan panas berdasarkan persamaan (3) pada dinding *coolbox* sebagai berikut :

Pada Dinding Kiri :

$$q = 7,174 \text{ W} = 25,827 \text{ KJ/h}$$

Pada Dinding Kanan :

$$q = 7,174 \text{ W} = 25,827 \text{ KJ/h}$$

Pada Dinding Atas :

$$q = 12,238 \text{ W} = 44,057 \text{ KJ/h}$$

Pada Dinding Bawah :

$$q = 12,238 \text{ W} = 44,057 \text{ KJ/h}$$

Pada Dinding Depan :

$$q = 13,001 \text{ W} = 46,804 \text{ KJ/h}$$

Pada Dinding Belakang :

$$q = 13,001 \text{ W} = 46,804 \text{ KJ/h}$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan total laju perpindahan panas melalui dinding *coolbox* sebesar :

$$q_{Total} = (7,174 + 7,174 + 12,238 + 12,238 + 13,001 + 13,001) \text{ W}$$

$$q_{Total} = \mathbf{64,826 \text{ W} = 233,376 \text{ KJ/h}}$$

Maka besar energi panas yang berpindah melalui dinding *coolbox* selama 2 jam sebesar :

$$Q = q \times t$$

$$Q = 233,376 \text{ KJ/h} \times 2 \text{ h}$$

$$Q = \mathbf{466,752 \text{ KJ}}$$

Beban panas infiltrasi dengan asumsi secara umum sebesar 15% dari beban total penerimaan panas pada permukaan. (Ilyas,1983) :

$$Q_{Infiltrasi} = 466,752 \text{ KJ} \times 15\%$$

$$Q_{Infiltrasi} = \mathbf{70,0125 \text{ KJ}}$$

Beban panas total adalah total panas yang dipindahkan melalui *coolbox* dan beban panas infiltrasi.

$$Q_{Total} = 466,752 \text{ KJ} + 70,0125 \text{ KJ}$$

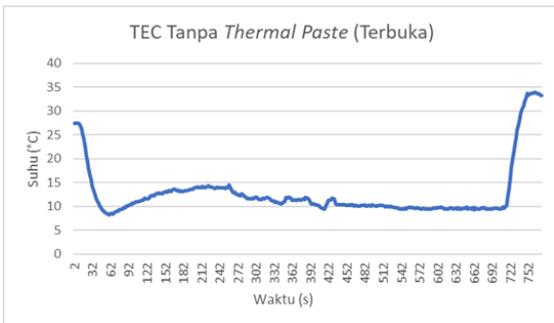
$$Q_{Total} = \mathbf{536,7645 \text{ KJ}}$$

B. Analisis Model Sisi Dingin TEC

Pada bagian ini dilakukan percobaan beberapa model perancangan pada sisi dingin modul TEC.

1. Model Modul TEC Tanpa Thermal Paste Pada Coolbox terbuka

Sebanyak 1 buah termoelektrik dibiarkan terbuka dalam coolbox dan dilakukan percobaan selama 10 menit. Didapatkan temperatur rata-rata ruang coolbox sebesar 10,97°C dan temperatur minimal yang dicapai termoelektrik sebesar 8,24°C dalam waktu 1 menit. Percobaan ini untuk mengetahui kemampuan termoelektrik setelah dilakukan instalasi dan diukur tanpa menggunakan thermal paste.

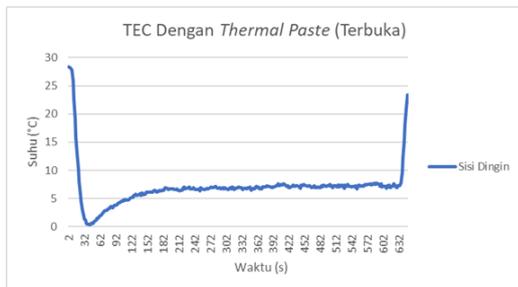


Gambar 8. Grafik percobaan TEC tanpa thermal paste pada coolbox terbuka

Terlihat pada gambar 8, grafit menyatakan temperatur mengalami kenaikan sesaat setelah menyentuh angka minimal karena termoelektrik berusaha mendinginkan udara sekitarnya. Termokopel yang ditempatkan di sisi dingin pun mengalami penurunan pembacaan karena permukaan probe lebih banyak bersentuhan dengan udara.

2. Model TEC Dengan Thermal Paste Pada Coolbox Terbuka

Sebanyak 1 buah termoelektrik diberi tambahan thermal paste diseluruh sisi dingin dan probe dalam keadaan coolbox terbuka, dilakukan percobaan selama 10 menit. Didapatkan temperatur rata – rata ruang coolbox sebesar 6,29°C dan temperatur minimal yang dicapai termoelektrik sebesar 0,28°C dalam waktu 40 detik.

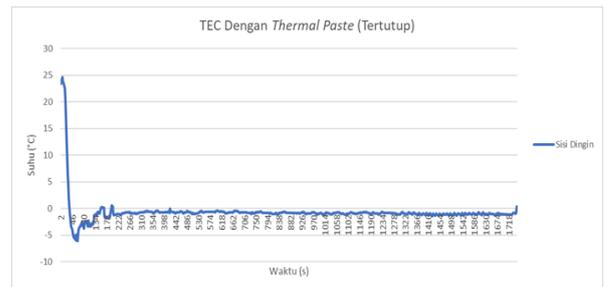


Gambar 9. Grafik percobaan TEC dengan thermal paste pada coolbox terbuka

Pada gambar 9, Termoelektrik mencapai temperatur minimal dalam waktu yang lebih singkat karena penyerapan panas pada sisi dingin di sekitar termoelektrik menjadi lebih cepat karena adanya thermal paste yang menyelimuti sisi dingin dan juga termokopel.

3. Model TEC Dengan thermal paste Pada Coolbox Tertutup

Sebanyak 1 buah termoelektrik diberi tambahan thermal paste diseluruh sisi dingin dan probe dalam keadaan coolbox tertutup, dilakukan percobaan selama 30 menit. Didapatkan temperatur rata – rata ruang coolbox sebesar -0,98°C dan temperatur minimal yang dicapai termoelektrik sebesar -6,1°C dalam waktu 1 menit.



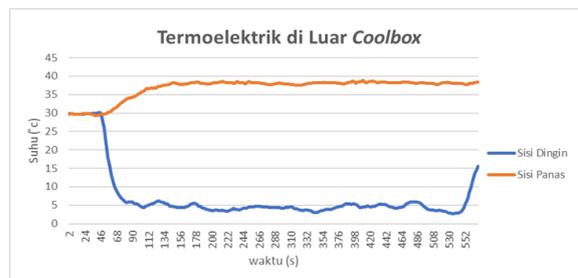
Gambar 10. Grafik percobaan TEC dengan thermal paste pada coolbox tertutup

Pada gambar 10, termoelektrik mencapai temperatur terdingin saat instalasi di coolbox dalam waktu yang relatif singkat lalu suhu yan dihasilkan relatif stabil, karena coolbox tertutup membuat sisi dingin lebih fokus mendinginkan udara di dalam ruang coolbox. Ini membuktikan instalasi termoelektrik yang terpasang sudah baik dan tidak ada kebocoran panas dari sisi panas TEC, juga membuktikan bahwa suhu lingkungan sangat berpengaruh terhadap performa pendinginan dari TEC, semakin udara terisolasi dari lingkungan luar di dalam coolbox, maka pendinginan udara di sekitar sisi dingin semakin baik.

C. Analisis Hasil Percobaan

Dari hasil pengambilan data yang telah dilakukan maka menghasilkan beberapa analisis pada beberapa percobaan.

1. Percobaan 1 Modul TEC di Luar Coolbox

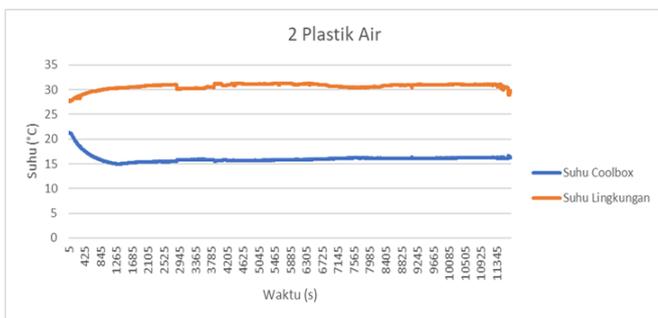


Gambar 11. Grafik percobaan 1 modul termoelektrik di luar coolbox

Grafik gambar 11 merupakan hasil percobaan termoelektrik di luar kotak pendingin dengan tujuan mengetahui kemampuan termoelektrik sebelum dilakukan instalasi. Percobaan dilakukan penyalaan termoelektrik terbuka dalam suhu ruang 30°C selama 10 menit dan menunjukkan nilai yang konstan dalam waktu 10 detik setelah dinyalakan, namun setelah itu terjadi banyak noise dikarenakan termoelektrik dalam keadaan terbuka yang memungkinkan pembacaan sensor pada sisi dingin terganggu dengan udara yang bergerak di sekitar termoelektrik.

Rata-rata temperatur pada sisi dingin termoelektrik adalah 4,61°C dan suhu minimal yang dicapai termoelektrik adalah 2,64°C dalam waktu 8 menit dengan total energi yang diserap sebesar 87,442 W, sedangkan rata-rata temperatur sisi panas termoelektrik adalah 37,65°C dan suhu maksimal yang dicapai adalah 38,84°C dengan total energi yang dilepas sebesar 97,93 W. Termoelektrik mencapai rata-rata ΔT kedua sisi pada suhu 33°C dan menggunakan energi listrik sebesar 140,506 W dengan COP sebesar 0,622.

2. Percobaan 2 Icepack Air di Dalam Coolbox

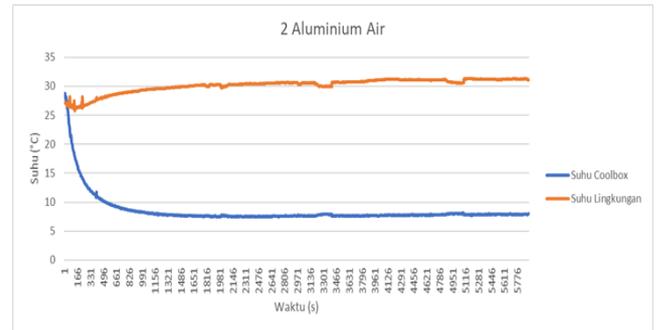


Gambar 12. Grafik percobaan 2 icepack plastik air di dalam coolbox

Grafik pada gambar 12 menunjukkan suhu ruang di dalam coolbox terhadap waktu dengan menggunakan 2 buah icepack air berbahan plastik, percobaan ini dilakukan guna mengetahui karakteristik dasar coolbox sebelum dilakukan modifikasi menggunakan termoelektrik dan PCM.

Didapatkan hasil suhu terendah belum berada di dalam rentang suhu vaksin yaitu 14,92°C yang ditempuh dalam waktu 21 menit 55 detik dengan suhu rata-rata coolbox yaitu 16°C.

3. Percobaan 2 Icepack Aluminium Air di Dalam Coolbox

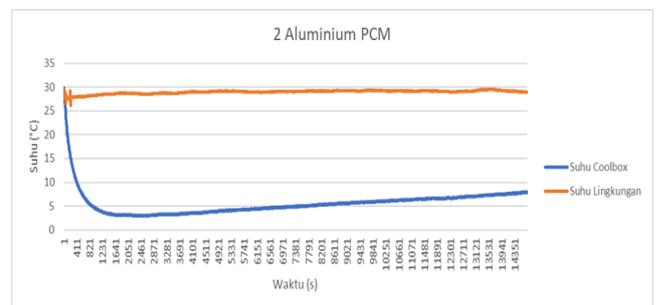


Gambar 13. Grafik percobaan 2 icepack aluminium air di dalam coolbox

Grafik pada gambar 13 menunjukkan suhu ruang di dalam coolbox terhadap waktu dengan menggunakan 2 buah icepack air berbahan aluminium pada suhu ruangan 30°C, percobaan ini dilakukan guna mengetahui perbandingan antara menggunakan wadah icepack plastik dan aluminium.

Didapatkan hasil suhu terendah sudah berada di dalam rentang suhu vaksin yaitu 7,42°C dalam waktu 37 menit 56 detik, namun suhu rata-rata coolbox berada di ambang batas suhu vaksin yaitu 8,49°C. Dari suhu terendah coolbox hingga ambang batas suhu vaksin 8°C ditempuh dalam waktu 1 jam. Percobaan ini membuktikan bahwa menggunakan wadah icepack dari bahan aluminium sangat mempengaruhi distribusi dan menurunkan suhu pendinginan di dalam ruang coolbox.

4. Percobaan 2 Icepack Aluminium PCM di Dalam Coolbox



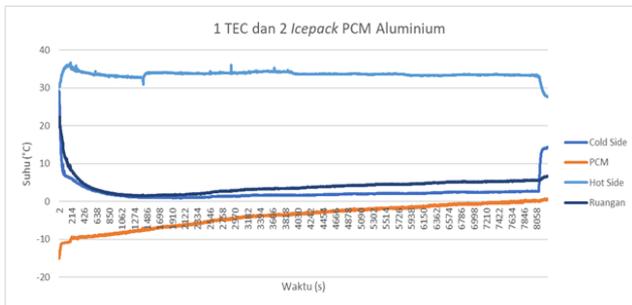
Gambar 14. Grafik percobaan 2 icepack aluminium PCM di dalam coolbox

Grafik pada gambar 14 diatas menunjukkan suhu ruang di dalam coolbox terhadap waktu dengan menggunakan 2 buah icepack PCM berbahan aluminium dan pada suhu ruangan 30°C, percobaan ini dilakukan guna mengetahui perbandingan antara menggunakan fluida air dan PCM sebagai media penyerap panas di dalam ruang coolbox sebelum dilakukan modifikasi.

Didapatkan hasil suhu terendah sudah berada di dalam rentang suhu vaksin yaitu 2,91°C dalam waktu 33 menit dengan suhu rata-rata coolbox yaitu

5,57°C dan suhu *coolbox* dapat bertahan direntang suhu vaksin selama 3 jam 57 menit 47 detik. *Coolbox* vaksin menggunakan 6 icepack berukuran 11cm x 9cm x 3cm dengan fluida sebanyak 300ml perkotak, menyebabkan ruang yang tersisa di dalam *coolbox* menjadi 4,4L. Namun, ketika menggunakan 2 *icepack* PCM terjadi ekspansi ruang menjadi 6,4L. Data ini membuktikan bahwa fluida PCM yang digunakan dapat menyerap panas lebih baik dari pada air dan dapat menghemat ruang sebanyak 45,5% untuk meletakkan produk vaksin.

5. Percobaan 1 Modul TEC dan 2 *Icepack* Aluminium PCM



Gambar 15. Grafik percobaan 1 modul termoelektrik dan 2 *icepack* aluminium PCM di dalam *coolbox*

Grafik pada gambar 15, kombinasi 1 modul termoelektrik dan 2 *icepack* PCM Aluminium yang dilakukan selama 2 jam pada suhu lingkungan 30°C, menunjukkan titik terendah dari ruang *coolbox* mencapai 1,41°C dalam waktu 22 menit 48 detik, lebih cepat dari percobaan tanpa TEC yaitu 33 menit. Temperatur rata-rata ruang *coolbox* mencapai 3,86°C, lebih rendah dari percobaan tanpa TEC yaitu 5,57°C. Temperatur terendah yang dicapai sisi dingin yaitu 0,88°C dengan temperatur rata-rata 2°C. Rata-rata temperatur sisi panas TEC yaitu 33,68°C, dapat melepaskan kalor sebanyak 98,553 W, dan sisi dingin yaitu 2°C dengan penyerapan kalor sebanyak 88,388 W. Perbedaan temperatur pada sisi panas dan dingin TEC mencapai 31,64°C, hal ini yang dijadikan variabel untuk menghitung COP dari modul TEC yaitu 0,622 dan tidak terjadi penurunan COP ketika sebelum instalasi dan sesudah instalasi modul, membuktikan bahwa instalasi terpasang dengan baik.

D. Analisis Ekonomi

Tabel 2. Biaya PCM dan kotak aluminium

Barang	Jumlah	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
PCM Pioneer 2071 P	2	Liter	85.000	170.000

Kotak Aluminium	6	Pcs	30.000	180.000
Total Biaya				350.000

Berdasarkan tabel 2, pada pengambilan data dengan PCM menghabiskan dana sebesar Rp350.000, berarti 1 *icepack* Aluminium PCM (300ml) menghabiskan dana sebesar Rp25.500 + Rp30.000 = Rp55.500. Untuk percobaan 2 *icepack* PCM Aluminium (600ml) menghabiskan dana sebesar Rp111.000.

Tabel 3. Biaya PCM dan modul TEC

Barang	Jumlah	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
<i>Icepack</i> PCM	2	Pcs	55.500	111.000
TEC	1	Pcs	30.000	30.000
<i>Heatsink</i> Luar	1	Pcs	20.000	20.000
<i>Heatsink</i> Dalam	1	Pcs	15.000	15.000
<i>Fan</i> Luar	1	Pcs	40.000	40.000
<i>Fan</i> Dalam	1	Pcs	15.000	15.000
<i>Cotton</i>	5	Pcs	4.000	20.000
<i>Insulation</i>				
<i>Thermal Paste</i>	5	Pcs	7.000	35.000
<i>Red Silicon</i>	1	Pcs	10.000	10.000
LM25-96				
<i>Step Down</i>	1	Pcs	25.000	25.000
Total Biaya				320.000

Berdasarkan tabel 3, jadi total biaya untuk instalasi modul TEC dan *icepack* PCM Aluminium pada *coolbox* vaksin adalah Rp 320.000.

Biaya listrik yang diperlukan untuk proses freezing PCM berdasarkan percobaan selama 5 jam. Dengan asumsi Tarif Dasar Listrik (TDL) yang ditetapkan pemerintah pada tahun 2021 sebesar Rp 1.444,70/kWh untuk golongan rumah tangga kecil (R-1/TR) [9].

- Waktu proses freezing PCM selama 5 jam

$$\begin{aligned} \text{Jumlah kWh} &= (V \times I) \times t \\ &= (230 \times 1,5) \times 5 \\ &= \mathbf{1,725 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

- Biaya yang dikeluarkan untuk proses freezing selama 5 jam

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= \text{Jumlah kWh} \times \text{TDL} \\ &= 1,725 \times 1444,70 \\ &= \mathbf{Rp 2.492,11} \end{aligned}$$

- Biaya per hari dengan asumsi proses *freezing* sebanyak 2 kali

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= \text{Biaya sekali Freezing} \times 2 \\ &= \text{Rp } 2.492,11 \times 2 \\ &= \text{Rp } \mathbf{4.984,22} \end{aligned}$$

- Biaya per tahun proses *freezing* PCM

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= \text{Biaya per hari} \times 30 \text{ hari} \times 12 \text{ bulan} \\ &= \text{Rp } 4.984,22 \times 30 \text{ hari} \times 12 \text{ bulan} \\ &= \text{Rp } \mathbf{1.794.317,40} \end{aligned}$$

Jadi pada proses *freezing* PCM selama 2 kali perhari dalam setahun akan menghabiskan biaya sebesar Rp1.794.317,40

Tabel 4. Spesifikasi daya instalasi TEC

Komponen	Tegangan (V)	Arus (I)	Watt
TEC	12	6,4	76,8
Fan Luar	12	1	12
Fan Dalam	5	0,25	1,25

Dari tabel 4 dapat dihitung biaya listrik yang diperlukan untuk proses pengoperasian *coolbox* dengan asumsi penyalaan selama 10 jam per hari.

- Waktu proses pengoperasian *coolbox* selama 10 jam
- $$\begin{aligned} \text{Jumlah kWh} &= (\text{TEC} + \text{Fan Luar} + \text{Fan Dalam}) \times t \\ &= (76,8 + 12 + 1,25) \times 10 \\ &= \mathbf{0,9 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

- Biaya per hari yang dikeluarkan untuk proses selama 10 jam

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= \text{Jumlah kWh} \times \text{TDL} \\ &= 0,9 \times 1444,70 \\ &= \text{Rp } \mathbf{1.300,95} \end{aligned}$$

- Biaya per tahun proses pengoperasian *coolbox*

$$\begin{aligned} \text{Biaya Listrik} &= \text{Biaya per hari} \times 30 \text{ hari} \times 12 \text{ bulan} \\ &= \text{Rp } 1.300,95 \times 30 \times 12 \\ &= \text{Rp } \mathbf{468.342,85} \end{aligned}$$

Jadi pada proses pengoperasian *coolbox* selama 10 jam perhari dalam setahun akan menghabiskan biaya sebesar Rp468.342,85.

$$\begin{aligned} \text{Total Biaya} &= \text{Instalasi} + \text{Biaya Freezing PCM} + \\ &\quad \text{Biaya Pengoperasian} \\ &= 320.000,00 + 1.794.317,40 + 468.342,85 \\ &= \text{Rp } \mathbf{2.582.660,25} \end{aligned}$$

Jadi total biaya yang dikeluarkan untuk proses pengoperasian *coolbox* selama setahun akan menghabiskan biaya Rp 2.582.660,25.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan, analisis, dan perhitungan yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan bahwa :

1. PCM sebagai penyimpan panas bisa digunakan untuk menggantikan air pada *icepack* di dalam *coolbox*. Pada penggunaan air didapatkan hasil suhu terendah yaitu 7,42°C dalam waktu 37 menit 56 detik dengan rata – rata yaitu 8,49°C dan bertahan dalam waktu 1 jam. Pada penggunaan PCM didapatkan hasil suhu terendah yaitu 2,91°C dicapai dalam waktu 33 menit dengan suhu rata – rata *coolbox* yaitu 5,57°C dan dapat bertahan direntang suhu vaksin selama 3 jam 57 menit 47 detik.
2. Pada modifikasi *coolbox* vaksin dengan PCM dan sistem pendingin termoelektrik, rata – rata temperatur udara ruangan *coolbox* yaitu 3,86°C, temperatur terendah ruang *coolbox* yaitu 1,41°C dicapai dalam waktu 22 menit 48 detik. Pada variasi percobaan 1 modul termoelektrik dan 2 *icepack* aluminium PCM dengan durasi pengambilan data selama 2 jam.
3. Rata- rata nilai kinerja atau COP dari kotak vaksin dengan PCM sebagai penyimpan panas dan sistem pendingin termoelektrik pada percobaan 1 modul termoelektrik dan 2 *icepack* Aluminium PCM dengan durasi pengambilan data selama 2 jam yaitu bernilai 0,622. Dari hasil analisis biaya, didapatkan biaya instalasi *coolbox* sebesar Rp320.000,00. Proses *freezing Phase Change Material* (PCM) untuk 1 hari selama 5 jam sebanyak 2 kali dalam setahun membutuhkan biaya sebesar Rp1.794.317,40. Sementara biaya untuk pengoperasian *coolbox* selama 10 jam dalam setahun membutuhkan biaya sebesar Rp468.342,85. Total biaya listrik selama 1 tahun sebesar Rp2.582.660,25.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Laboratorium Konversi Energi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Nur. Dian, *Buku Ajar Imunisasi*, Pusat Pendidikan dan Pelatihan Tenaga Kesehatan, 2019.
- [2] Margreth. Marleni, Pengaruh Penambahan Elemen Peltier Terhadap Kemampuan Menjaga Temperatur Penyimpanan Vaksin Dengan Berbahan Dasar Polivinil Klorida (PVC), *Jurnal Teknik Mesin Undana*, Vol. 01, No. 02, 2019, pp. 40-46.
- [3] Brahmhatt. Jitendra, A Design Of Thermoelectric Cooler And Optimization, *International Journal Of Science Technology And Engineering*, Vol. 2, No. 6, 2015, pp. 24-30.
- [4] Nugroho, Kinerja Susunan dan Jumlah Elemen Peltier pada TEC Alat Transportasi Ikan Segar, *JPB Kelautan dan Perikanan*, Vol. 14, No.1, 2019, pp. 75–84.
- [5] Atoyo. Jonathan, Improvement to the thermoelectric properties of PEDOT: PSS, *Ph.D Thesis*, Swansea University, Wales, 2021.

- [6] Tranggono. Alfi, Studi Eksperimental Karakteristik Elemen Termoelektrik Peltier Tipe TEC, *Journal of Electrical Electronics Control and Automotive Engineering*, Vol. 3, No. 1, 2018, pp. 179–182.
- [7] Fauzan. Iwan, Penggunaan PCM sebagai Material Penyimpan Kalor pada Lemari Pendingin, *Jurnal SIMETRIS*, Vol. 13, No. 1, 2019, pp. 6-8.
- [8] Irsyad. Muhammad, Pemanfaatan Material Fasa Berubah Untuk Mempertahankan Kesegaran Sayuran, *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, Vol. 9, No. 2, 2020, pp. 199-207.
- [9] ESDM, *Penetapan Penyesuaian Tarif Dasar Listrik (Tariff Adjustment)*, 2021. Website: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-tariff-adjustment-tenaga-listrik-tw-ii-2021.html>, diakses tanggal 1 Desember 2021.