

Uji Eksperimental Sistem Kompresi Uap *Mini Water Chiller* Untuk Kabin Penyimpanan Pendinginan Produk dengan Metode *Ice Bank*

Ade Suryatman Margana¹, Arda Rahardja Lukitobudi²

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : adesmargana@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : ardarl@yahoo.com

ABSTRAK

Kebutuhan manusia akan Alat Pendingin semakin meningkat setiap tahunnya, baik digunakan sebagai pengkondisi kenyamanan termal maupun tempat penyimpanan produk. Alat pendingin ini merupakan kontributor tunggal terbesar untuk penggunaan energi listrik terutama pada siang hari musim panas. Sehingga diperlukan solusi untuk dapat menghemat energi dan biaya dalam penggunaannya. Solusinya adalah Alat Pendingin dengan metode *Ice Bank* merupakan sistem yang efektif dalam penghematan penggunaan daya energi listrik dan konsumsi daya energi listrik, dimana dalam metode *Ice Bank* terdapat penyimpanan media pendingin sekunder berupa air didalam *thermal storage* yang telah dikondisikan sampai 0°C, yang nantinya akan digunakan untuk pendinginan terutama pada waktu beban puncak. Dari hasil perhitungan dan analisis pada sistem Alat Pendingin metode *Ice Bank* didapat nilai COP_{actual} rata-rata sebesar 3.32 sedangkan COP _{Carnot} rata-rata sebesar 5.94, sehingga nilai efisiensi yang didapat dari sistem refrigerasi metode *Ice Bank* adalah sebesar 55.96%. Untuk perbedaan biaya dilakukan perhitungan daya konsumsi energi ketika proses *charging* dan proses *discharging*. Konsumsi daya energi total selama 4 jam proses *charging* adalah 1,601 kWh dengan tarif sebesar Rp. 1615,46 Sedangkan untuk proses *discharging* selama 4 jam adalah 0,0096 kWh dengan tarif Rp. 8,55. Dari hasil perhitungan Alat pendingin ini dapat menghemat energy listrik sebesar 1600 kWh.

Kata Kunci

Ice Bank, COP_{actual}, COP_{Carnot}, *Charging*, *Discharging*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan manusia akan alat pendingin semakin meningkat setiap tahunnya, baik penggunaan alat pendingin sebagai pengkondisi kenyamanan termal maupun tempat penyimpanan produk, apabila produk disimpan dalam temperatur yang rendah akan menjaga kualitas produk dan dapat bertahan lebih lama, setelah panen banyak produk hortikultura (buah buahan, sayuran dan bunga) rentan terhadap kerusakan (quality losses) dan perlu mendinginkannya secepat mungkin. Salah satu faktor penting yang sering ditekankan ketika mempertimbangkan pendinginan produk hortikultura adalah jeda waktu antara panen dan dimulainya pra pendinginan. Pendinginan yang tertunda meningkatkan kehilangan air, menurunkan kekencangan jaringan kulit (tissue) pada produk hortikultura dan meningkatkan aktivitas metabolisme pada buah-buahan [1].

Dewasa ini alat pendingin sangat beragam, salah satunya adalah alat pendingin dengan menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap. Sistem kompresi uap

masih menjadi pilihan terbaik yang sering digunakan. Sistem refrigerasi uap mempunyai dua proses pendinginan, yaitu proses pendinginan secara langsung (direct cooling), dengan koil pendingin yang berisi refrigeran secara langsung menarik kalor dari beban produk atau ruangan yang akan didinginkan, sedangkan pada proses pendinginan secara tidak langsung (indirect cooling) koil pendingin yang berisi refrigeran mendinginkan fluida atau refrigeran sekunder terlebih dahulu untuk kemudian fluida atau refrigeran sekunder tersebut menarik beban kalor produk atau ruangan yang akan didinginkan.

Metode penerapan refrigeran sekunder ini dipilih dengan dasar pertimbangan dengan mengoptimalkan konsumsi energi terpakai sehingga dapat menghemat energi, sementara energi yang tersimpan akan dapat digunakan sesuai rencana yang diperuntukannya. Pemilihan air ini karena sifat air yang memiliki nilai specific heat yang baik, sehingga dapat digunakan sebagai refrigeran sekunder. Air juga merupakan bahan yang murah, tidak beracun dan tidak korosif [2].

2. METODOLOGI PENELITIAN

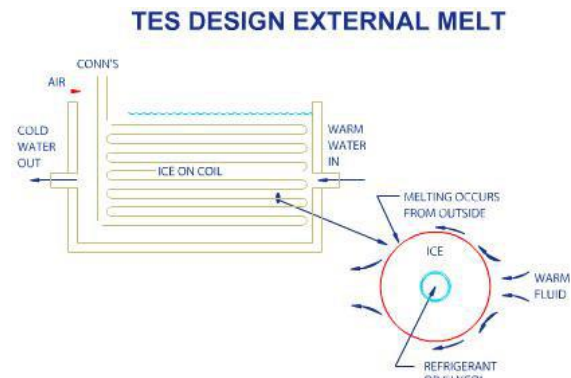
2.1 Sistem Ice Bank

Ice Bank merupakan sistem penyimpanan energi termal. Aplikasi utama *Ice Bank* adalah produksi air dingin dari es yang terbentuk pada evaporator, air dingin yang dihasilkan tersebut disimpan pada *thermal storage*, implementasi Thermal Energy Storage memungkinkan pergantian beban puncak energi listrik pada jam-jam tertentu di luar jam yang secara signifikan menurunkan biaya energi dan mengurangi beban puncak selama proses pendinginan. Selain itu, dapat menurunkan penggunaan energi total [3].

Pengguna sistem pendingin yang beban pendinginannya sangat besar memberi kontribusi pada kebutuhan akan peralatan tambahan pembangkit listrik yang jarang digunakan sebelumnya, hal ini akan dikenai biaya yang lebih tinggi untuk penggunaan energi tersebut [4].

2.2 External Melt Ice On Coil

External melt ice on coil adalah metode untuk membentuk es di sekeliling evaporator yang didinginkan oleh sirkulasi refrigeran sebagai penyimpanan kalor air secara laten. Kemudian air akan disirkulasikan disekitar es pada *thermal storage* untuk masuk ke dalam kabin. *External melt ice on coil* merupakan penyimpanan kalor yang terdiri dari penukar panas (evaporator) yang terendam dalam *thermal storage* atau disebut dengan *shell and coil*.



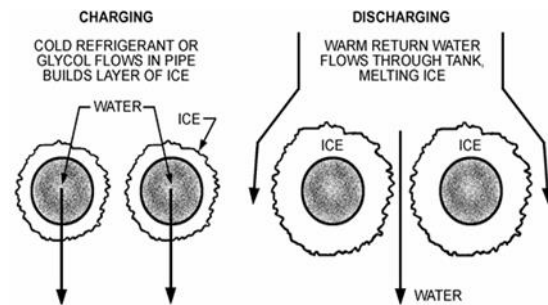
Gambar 1. *External melt ice on coil*

Sistem penyimpanan laten menggunakan air menjadi salah satu metode media penyimpanan bahan pendingin, karena air memiliki keandalan, biaya murah, kapasitas panas laten yang tinggi (344 kJ/kg), density rendah dan tidak membahayakan.

Pertimbangan air dingin (es) sebagai penyimpan panas adalah perubahan fasa dari cair ke es membutuhkan 0,0931 kWh/kg (344 kJ/kg) kalor laten, yang

merupakan kalor yang digunakan untuk membekukan satu kg es pada temperatur 0°C.

2.3 Proses charging dan discharging

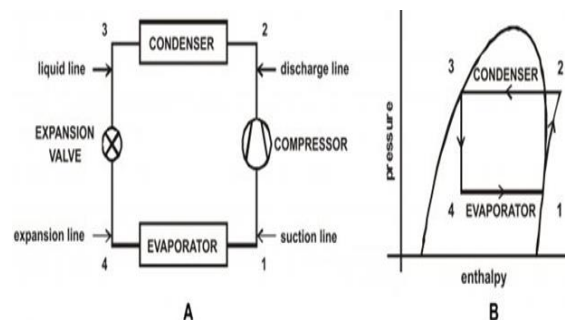


Gambar 2. Proses *charging* dan *discharging*

Proses *charging* merupakan proses menyimpan bahan pendingin dengan menyerap panas dari media pendingin tersebut atau menyimpan kalor dengan menambahkan kalor ke perangkat penyimpanan panas. Sedangkan proses *discharging* adalah menggunakan media pendinginan yang disimpan dengan menambahkan kalor terhadap media pendingin atau mengurangi kalor dari perangkat penyimpanan.

2.4 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Sistem refrigerasi kompresi uap merupakan salah satu dari sistem refrigerasi yang memiliki komponen yang paling sederhana dibandingkan dengan sistem refrigerasi yang lainnya. Sistem refrigerasi kompresi uap adalah sistem refrigerasi yang paling banyak digunakan dengan komponen utamanya adalah kompresor, kondensor, alat ekspansi (*throttling device*) dan evaporator. Keempat komponen tersebut akan saling berhubungan dan membentuk siklus refrigerasi kompresi uap. Adapun gambar sistem refrigerasi kompresi uap sebagai berikut :



Gambar 3 A. Siklus Refrigerasi Kompresi Uap B. Diagram P-h Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Performansi suatu sistem refrigerasi dinyatakan dengan besaran yang dinamakan COP (*Coefficient Of Performance*). Besaran ini menyatakan kemampuan sistem untuk menarik kalor dari ruangan (kabin/produk) per satuan daya kompresor. COP ini juga dipengaruhi oleh nilai tekanan dan temperatur kerja dari sistem itu sendiri. Performansi sistem dapat diketahui dengan melakukan perhitungan antara COP_{aktual} dan COP_{carnot} sehingga akan mendapatkan suatu efisiensi sistem. Berikut ini merupakan persamaan yang menunjang untuk melakukan perhitungan suatu performansi mesin refrigerasi [5].

$$COP_{aktual} = \frac{q_e}{q_w} \quad (1)$$

$$COP_{carnot} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (2)$$

Efisiensi sistem adalah kapasitas dalam satuan watt dibagi dengan daya input dalam satuan watt [6]

$$\mu R = \frac{COP_a}{COP_c} \times 100 \% \quad (3)$$

Dimana :

Efek refrigerasi (q_e) = $h_1 - h_4$ (kJ/kg)
Kerja spesifik per unit massa (q_w) = $h_2 - h_1$ (kJ/kg)
 T_e = Temperatur evaporasi (K)
 T_c = Temperatur kondensasi (K)

Daya Energi listrik adalah besaran listrik yang menyatakan besarnya energi yang digunakan untuk mengaktifkan komponen atau peralatan listrik atau elektronika. Besarnya daya listrik dapat dihitung berdasarkan rumus [7]

$$P = V \times I \cos \phi \quad (4)$$

Energi listrik yang terpakai biasanya dinyatakan dengan daya yang digunakan untuk menjalankan suatu alat atau mesin tertentu dalam suatu periode atau waktu. Energi listrik dinyatakan dengan besaran kWh artinya banyaknya daya yang dipakai dalam satuan Watt dalam jam [7].

$$W = P \times t \quad (5)$$

Dimana :

W = Energi Listrik (kWh)
 P = Daya Listrik (kW)
 t = Lamanya sistem beroperasi (jam)

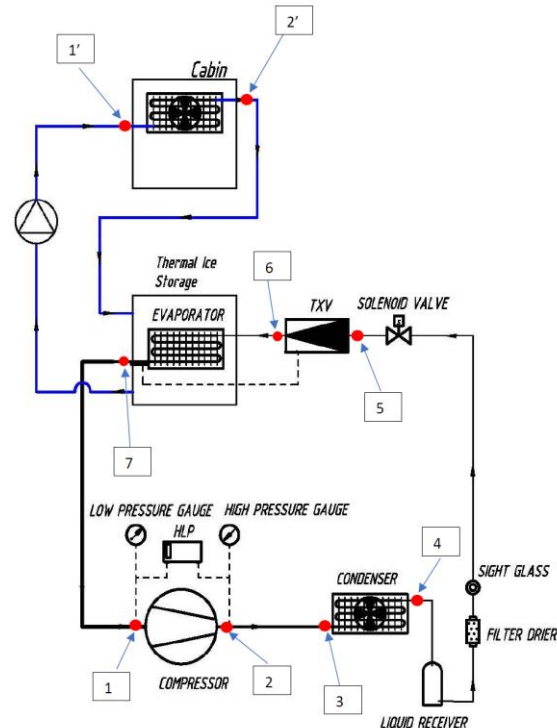
Biaya konsumsi energi listrik didapat dari persamaan berdasarkan Tarif Dasar Listrik PLN sebagai berikut :

$$\text{Biaya} = K \times (P \times t) \times \text{Tarif} \quad (6)$$

dimana,

K = Faktor Perbandingan
 P = Daya (kW)
 t = Waktu Operasi (Jam)
Tarif = (Rp/kWh)

Untuk menentukan performansi sistem dilakukan pengambilan data pada proses *Charging* dan proses *Discharging*. Penentuan titik pengukuran dapat dilihat pada gambar 4 dibawah ini :



Gambar 4. Titik penempatan sensor untuk proses pengukuran.

Keterangan :

fungsi proses *discharging* dilakukan. Titik pengukuran pada proses *charging* sebagai berikut :

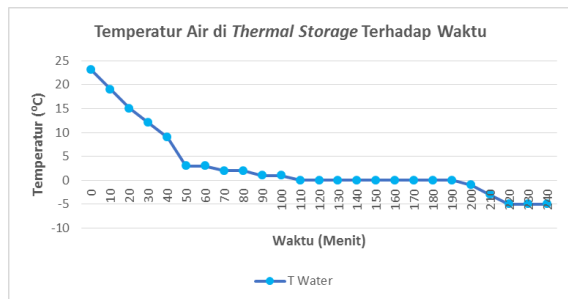
1. Tekanan Discharge = Bar
2. Tekanan Suction = Bar
3. Temperatur Masuk Kompresor = °C
4. Temperatur Keluar Kompresor = °C
5. Temperatur Masuk Kondensor = °C
6. Temperatur Keluar Kondensor = °C
7. Temperatur Masuk TXV = °C
8. Temperatur Keluar TXV = °C
9. Temperatur Keluar Evaporator = °C
10. Temperatur Air = °C
11. Temperatur Lingkungan = °C
12. Arus (Ampere) = A
13. Tegangan (Volt) = V

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data pengamatan yang telah diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mengetahui performansi sistem refrigerasi yang digunakan. Dalam analisis ini proses *charging* lebih kepada performansi dan konsumsi daya energi listrik, sedangkan proses *discharging* menganalisis kemampuan sistem pendingin sekunder dalam mencapai chilling time temperatur kabin dan penghematan konsumsi daya listrik.

3.1 Proses Charging

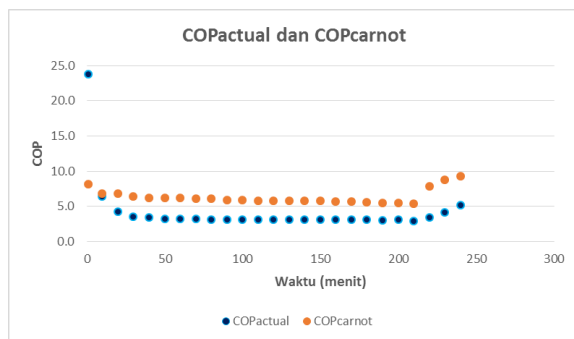
3.1.1 Analisis Temperatur Air di Thermal Storage



Gambar 5 Grafik temperatur air di Thermal Storage terhadap waktu.

Temperatur air yang dikondisikan untuk proses charging tercapai pada menit ke 110 dengan temperatur air 0°C. Sedangkan running time yang dirancang selama 240 menit. Hal ini dapat terjadi dikarenakan temperatur lingkungan ketika pengambilan data lebih rendah dari rancangan sehingga mempercepat penyerapan kalor laten air.

3.1.2 Analisis COP_{Actual} dan COP_{Carnot}



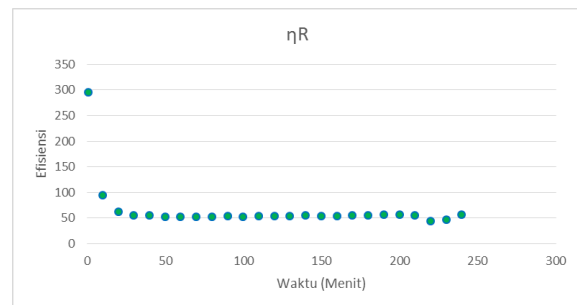
Gambar 6 Grafik COP_{Actual} dan COP_{Carnot}

Jika dilihat dari nilai enthalpy selisih antara efek refrigerasi (q_e) dengan kerja kompresi (q_w) terlalu dekat sehingga nilai COP_{actual} yang dihasilkan lebih kecil dari COP_{actual} rancangan. Untuk hasil rata-rata

COP_{actual} yang didapat ketika sistem sedang menyala yaitu sebesar 3,23.

Nilai COP_{carnot} dipengaruhi oleh tekanan discharge dan tekanan suction yang didapat ketika pengambilan data, jika selisih antara tekanan discharge dan tekanan suction semakin besar maka nilai COP_{carnot} yang dihasilkan akan semakin kecil, sebaliknya jika selisih antara tekanan discharge dan tekanan suction semakin kecil maka nilai COP_{carnot} yang dihasilkan semakin besar.

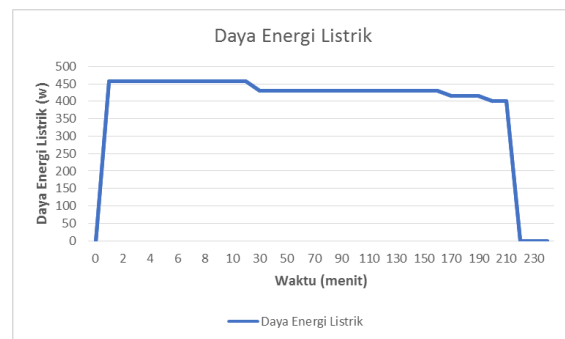
3.1.3 Analisis Efisiensi Sistem



Gambar 7 Grafik Efisiensi Sistem

Nilai efisiensi sistem secara rata-rata yaitu sebesar 55,96%, nilai efisiensi tersebut merupakan perbandingan nilai antara COP_{actual} dengan COP_{carnot}. Pada menit 220 sampai 240 sebenarnya tidak ada nilai efisiensi, hal itu karena sistem dalam keadaan cut-out maka tidak ada nilai perbandingan antara COP_{actual} dengan COP_{carnot} sehingga nilai efisiensinya tidak dapat dihitung.

3.1.4 Analisis Energi Listrik



Gambar 8 Grafik Efisiensi Sistem

Perhitungan konsumsi daya energi listrik merupakan daya energi listrik yang hanya ketika sistem menyala atau beroperasi. Untuk konsumsi daya energi listrik secara rata-rata ketika proses charging diasumsikan sama dengan menit ke-210 yaitu sebesar 400.4 watt,

sedangkan untuk daya energi total selama proses charging yaitu sebesar 1,601 kWh.

3.1.4 Biaya Komsumsi Energi Listrik

Proses charging dilakukan selama 4 jam, tetapi terjadi cut-out selama 30 menit pada menit ke-220 sampai dengan menit 240, maka perhitungan konsumsi daya energi listrik hanya dilakukan selama sistem menyala yaitu selama 3,5 jam. Berikut data rata-rata yang diperoleh untuk dapat menghitung konsumsi daya ketika proses charging.

Tabel 1 Parameter untuk menghitung konsumsi daya energi

Beban	Tegangan	Arus	Daya	Lama beroperasi
Kompresor	220V	2,98A	400,4w	3,5 Jam

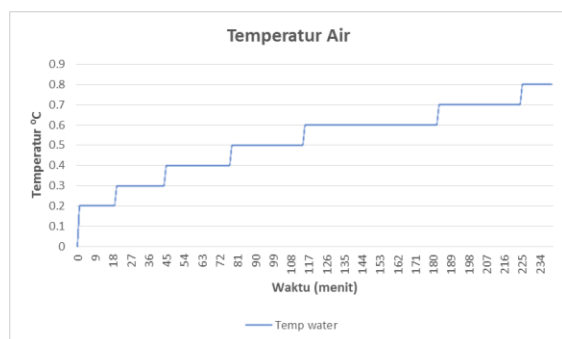
Tarif listrik per-kWh dapat diketahui dari surat penyesuaian tarif listrik (tarif adjustment) pada 2020 PT. PLN (PERSERO) dengan batas daya 1300VA.

$$\begin{aligned} \text{Biaya} &= P \times t \times \text{Tarif} \\ &= 0,4004 \text{ kWh} \times 3,5 \text{ Jam} \times \text{Rp.1049/kWh} \\ &= \text{Rp. 1615,46} \end{aligned}$$

Maka tarif untuk proses charging selama 4 Jam memakan biaya sebesar Rp. 1615,46. Hal ini dikarenakan selama proses charging beban kerja yang dilakukan yaitu pada kompresor yang mempunyai tegangan 220V, sehingga daya listrik yang digunakan selama proses charging yaitu sebesar 0,4004 kWh. Perhitungan dilakukan dengan daya diambil pada menit ke 210 dan diasumsikan sebagai daya rata-rata sistem kompresi uap selama proses charging.

3.2 Proses Discharging

3.2.1 Analisis Temperatur Air



Gambar 9 grafik temperatur air

Faktor lambatnya kenaikan temperatur air didalam thermal storage adalah beban pendinginan didalam kabin terlalu sedikit sehingga pertukaran kalor antara

air dingin yang bersirkulasi dalam koil pendingin dengan beban didalam kabin tidak terlalu besar.

Dalam hasil percobaan untuk mengetahui efektifitas penggunaan proses discharging mampu digunakan untuk menjaga temperatur kabin dan produk yang sesuai selama 20 jam dalam satu kali proses charging. Hal ini dikarenakan selama pengkondisian didalam kabin kalor yang diserap koil pendingin sedikit, sehingga temperatur keluar evaporator tidak terlalu tinggi dan temperatur air didalam thermal storage kenaikannya lambat.

3.2.2 Komsumsi Energi Listrik Proses Discharging

Pengambilan data proses discharging dilakukan selama 4 jam, tetapi ketika proses discharging sistem pompa hanya menyala selama 51 menit. Untuk mengetahui konsumsi daya pompa dapat dilakukan dengan parameter berikut :

Tabel 2 Parameter untuk menghitung konsumsi daya energi

Beban	Tegangan	Arus	Daya	Lama beroperasi
Pompa	12V	0,8A	9,6w	0,85 Jam

$$\begin{aligned} \text{Biaya} &= P \times t \times \text{Tarif} \\ &= 0,0096 \text{ kW} \times 0,85 \text{ Jam} \times \text{Rp.1049/kWh} \\ &= \text{Rp. 8,55} \end{aligned}$$

Maka daya energi listrik yang digunakan selama proses discharging hanya dengan terkena tarif sebesar Rp. 8,55. Tentunya nominal berikut jauh berbeda dengan proses charging, karena pompa yang digunakan mempunyai tegangan hanya 12V, arus yang mengalir 0,8A, dan daya yang digunakan selama 0,85 jam per 4 jam hanya 9,6 watt.

4. KESIMPULAN

Sistem refrigerasi dengan metode *Ice Bank* merupakan salah satu alternatif sistem yang efektif dalam penghematan penggunaan daya energi listrik dan konsumsi daya energi listrik. Dari perhitungan dan analisis pada sistem refrigerasi dengan metode *Ice Bank* ini didapat nilai COP_{actual} rata-rata sebesar 3,32 sedangkan untuk COP_{carnot} rata-rata yaitu sebesar 5,94, sehingga nilai efisiensi yang didapat dari perbandingan nilai COP_{actual} dan COP_{carnot} sistem refrigerasi metode *Ice Bank* adalah sebesar 55,96%. Untuk perbedaan biaya dilakukan perhitungan daya konsumsi energi ketika proses *charging* dan proses *discharging*. Konsumsi daya energi total selama 4 jam proses *charging* adalah 1,601 kWh dengan tarif sebesar Rp. 1615,46 Sedangkan untuk proses *discharging* selama 4 jam adalah 0,0096 kWh dengan tarif Rp. 8,55. Dari

hasil perhitungan Alat pendingin ini dapat menghemat energy listrik sebesar 1600 kWh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Senthilkumar, R.M. Vijayakumar, S. Kumar,(2015), Advances In Precooling Techniques And Their Implications In Horticulture Sector: A Review. International Journal Of Environmental & Agriculture Research (Ijoear) [Vol-1, Issue-1, May- 2015
- [2] Althouse, A D. Et All, 2004, Modern Refrigeration And Air Conditioning, Good Heart Wilcok, Illinios
- [3] Brian Silvetti P.E. Member Ashrae (2002), Application Fundamentals Of Ice Based Thermal Storage, Ashrae Journal 2002, 020311_Emjas_Emailablearticle_Ashraejournalfeb02
- [4] Neeraj Gupta, Roshan Rajput, Viral Shah, Swapnil Mane, (2016), Study Of Air Cooling System With The Use Of Ice Bank, Iosr Journal Of Mechanical And Civil Engineering (Iosr-Jmce), E-Issn: 2278-1684,P-Issn: 2320-334x, Volume 13, Issue 2 Ver. I (Mar. - Apr. 2016), Pp 123-126, Www.Iosrjournals.Org
- [5] Dossat, R J. 1985, Principle Of Refrigeration And Air Conditioning (2nd Edition), John Willey And Sons, New York.
- [6] Ashrae, 2008, Ashrae Handbook – Heating Ventilation, And Air Conditioning System Equipment (I-P Edition)
- [7] Joseph A, Edminister, Sahat Pakpahan (Translator) (1985), Seri Buku Schaum: Teori Dan Soal-Soal Rangkaian Listrik = Electric Circuits, Erlangga, Jakarta, 1985
- [8] Coolpack, Software Danfoss
- [9] França Cfm, Ribeiro Ws, Silva Fc, Costa Lc, Rêgo Er, Finger Fl (2015) Hydro Cooling On Post Harvest Conservation Of Butter Lettuce. Horticultura Brasileira 33(3):383-387. [Links]
- [10] Oró E, Castell A, Chiu J, Martin V, Cabeza Lf(2013) Stratification Analysis In Packed Bed Thermal Energy Storage Systems. Applied Energy 109:476-487. [Links]
- [11] Rutberg M, Hasbacka M, Cooperman A, Bouza A(2013) Save Energy, Money: Thermal Energy Storage. Ashrae Journal P62-66. [Links]
- [12] Yi W, Dong W (2015) Modeling And Simulation Of Discharging Characteristics Of External Melt Ice-On Coil Storage System. International Journal Of Smart Home9(2):179-192. [Links].