

Analisa Kinerja Lemari Pendingin Alami Sebagai Penyimpan Sayur dan Buah-buahan dengan Media Pendingin Air

Tulus Burhanuddin Sitorus¹, Tekad Sitepu²

^{1,2}Departemen Teknik Mesin FT. Universitas Sumatera Utara, Kampus USU Medan
Jl. Almamater Kampus USU Medan - 20155, Telp/Fax. 061-8213250
e-mail: tburhanudin@yahoo.com

Abstract

One application of direct evaporation cooling system was a natural refrigerator. The advantages of this natural refrigerator was operating without using electrical energy or mechanical energy and environmentally friendly. This study aims to gain a performance analysis of natural refrigerator as a store of vegetables and fruits which uses water as the cooling medium. Material of natural refrigerator consists of teak wood and gunny. Experiments were conducted during seven days in the open space which exposure to solar radiation. The measurement of weather parameter was done by using HOBO devices and to record temperature changes of vegetables and fruits in the natural refrigerator was used acquisition data. The results showed that the efficiency of natural refrigerator maximum that can be obtained was 14.7% with an average air temperature of 25,55°C, air humidity average of 91.34% and an average solar radiation of 108.45 W/m². The experimental data showed that the freshness of vegetables and fruits heavily influenced by weather conditions.

Keywords: *natural refrigerator, environmentally friendly, performance*

1. Pendahuluan

Sesuai dengan data buku *blueprint* pengelolaan energi nasional [1] bahwa pemakaian bahan bakar minyak sebesar 60% dari total pemakaian energi keseluruhan di Indonesia pada tahun 2005. Dan hal ini terus meningkat setiap tahun seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi. Tentunya konsumsi bahan bakar minyak maupun energi cukup berdampak terhadap kondisi ekonomi nasional. Untuk itu perlu dipikirkan teknologi yang ramah lingkungan dan dapat menekan konsumsi energi terutama bahan bakar minyak dan energi listrik. Salah satu jenis teknologi yang berguna bagi manusia adalah mesin atau lemari pendingin. Mesin pendingin merupakan sebuah alat yang prinsip kerjanya hampir sama dengan mesin kalor yang menggunakan fluida kerja berupa refrijeran dan digunakan untuk memindahkan panas dari dalam ruangan ke luar ruangan sehingga temperatur benda/ruangan menjadi lebih rendah dari temperatur lingkungannya. Mesin pendingin atau lemari pendingin diperlukan mengingat Indonesia berada di daerah katulistiwa. Menurut [2, 3] bahwa wilayah Indonesia akan selalu terkena sinar matahari selama 10 -12 jam setiap hari dan diperkirakan rata-rata intensitas radiasi matahari yang jatuh di permukaan bumi Indonesia adalah 4,8 kWh/m²/hari. Lemari pendingin yang diuji pada penelitian ini tanpa menggunakan energi listrik atau energi mekanis sehingga disebut lemari pendingin alami. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan analisa kinerja dari suatu lemari pendingin alami yang menggunakan air sebagai media pendingin. Penelitian ini cukup menarik dilakukan karena selama ini sangat jarang ada publikasi mengenai riset lemari pendingin alami untuk sayuran dan buah walaupun sudah ada yang diaplikasikan. Disamping itu lemari pendingin alami ini ramah lingkungan dan menggunakan teknologi yang sederhana.

1.1. Prinsip Kerja Lemari Pendingin Alami

Prinsip kerja lemari pendingin alami ini merupakan peristiwa pendinginan dengan cara evaporasi (*evaporative cooling*). Pendinginan dengan cara evaporasi merupakan suatu fenomena fisik dimana proses penguapan cairan ke dalam udara sekitar untuk mendinginkan suatu benda yang bersentuhan dengannya. Hal ini mengakibatkan permukaan dari benda menjadi lebih dingin saat air menguap darinya karena air membutuhkan panas untuk dapat berubah fasa dari cair menjadi uap [4]. Atau dapat juga dikatakan suatu proses perpindahan panas dan massa yang menggunakan evaporasi air untuk pendinginan udara, dimana jumlah panas yang ditransfer dari udara ke air cukup besar sehingga temperatur udara menjadi menurun [5, 6]. Secara umum, sistem pendinginan dengan cara evaporasi diklasifikasikan menjadi 3 jenis yaitu pendinginan evaporasi secara langsung (*direct evaporative cooling*), pendinginan evaporasi secara tidak langsung (*indirect evaporative cooling*) dan sistem gabungan evaporasi langsung dan tidak langsung (*combined system*) [7]. Aplikasi dari sistem pendingin evaporasi tak langsung adalah pemanasan, ventilasi, HVAC untuk gedung dan pusat perbelanjaan. Salah satu aplikasi dari sistem pendinginan evaporasi langsung adalah lemari pendingin alami untuk menyimpan sayuran dan buah-buahan [8]. Berdasarkan laporan penelitian bahwa untuk pengawetan sayuran dan buah-buahan diperlukan temperatur udara rendah dan kelembaban udara tinggi sehingga akan memperlambat aktivitas patologis yang umumnya berada di dataran yang tinggi [9]. Dapat dikatakan bahwa sistem pendinginan alami ini sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca diantaranya temperatur dan kelembaban udara sehingga sangat sesuai diaplikasikan pada daerah subtropis dan tropis [10, 11]. Umumnya lemari pendingin alami ini menggunakan kain goni sebagai wadah atau tempat berkumpulnya air yang digunakan sebagai media pendingin.

1.2. Efisiensi Lemari Pendingin Alami

Untuk menentukan efisiensi lemari pendingin alami maka perlu ditinjau proses perpindahan panas yang terjadi di sekitar lemari pendingin tersebut. Besarnya perpindahan panas konduksi (watt) yang terjadi pada dinding lemari pendingin alami dapat dihitung dari persamaan [12]:

$$Q_{kond} = k A \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

dimana k adalah konduktivitas termal material ($W/m \cdot K$), A adalah luas penampang perpindahan panas konduksi (m^2), ΔT adalah perbedaan temperatur yang terjadi antara temperatur permukaan dinding lemari pendingin dengan temperatur udara lingkungan ($^{\circ}C$) dan L adalah tebal dinding lemari pendingin (m).

Sedangkan besarnya proses perpindahan panas konveksi (watt) yang terjadi pada dinding lemari pendingin alami adalah

$$Q_{konv} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

dimana h adalah nilai koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot K$), A adalah luas penampang perpindahan panas konveksi (m^2) dan ΔT adalah perbedaan temperatur yang terjadi antara temperatur permukaan dinding lemari pendingin dengan temperatur udara lingkungan ($^{\circ}C$).

Dan besarnya proses perpindahan panas radiasi (watt) yang terjadi pada dinding lemari pendingin alami adalah :

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

dimana ϵ adalah emisivitas material yang digunakan (untuk kayu 0,88 dan untuk kain goni 0,72), A adalah luas penampang perpindahan panas radiasi (m^2), σ adalah konstanta Stefan Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$), T_s adalah temperatur dinding lemari pendingin ($^{\circ}\text{C}$) dan T_{∞} adalah temperatur udara di sekitar lemari pendingin ($^{\circ}\text{C}$).

Berdasarkan uraian di atas maka besarnya perpindahan panas total dari lemari pendingin alami diperoleh dari penguapan yang terjadi pada dinding lemari pendingin yang merupakan gabungan dari proses perpindahan panas secara konveksi alamiah, konduksi dan radiasi yaitu :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{kond}} + Q_{\text{konv}} + Q_{\text{rad}} \quad (4)$$

Sehingga besarnya efisiensi lemari pendingin alami dapat ditentukan dari persamaan:

$$\eta = \frac{Q_s + Q_L}{Q_{\text{total}}} \quad (5)$$

dimana Q_s adalah besarnya kalor sensibel udara (watt) dan Q_L adalah besarnya kalor laten udara (watt).

2. Metodologi

2.1. Bahan

Lemari pendingin alami yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari bahan kayu jati dengan tebal 3,5 cm sebagai rangka lemari dengan pertimbangan kekuatan material yang cukup baik, tahan terhadap air dan rayap serta relatif lebih mudah diperoleh. Dimensi lemari pendingin alami yang diuji memiliki panjang 40 cm, lebar 60 cm dan tinggi 120 cm. Sebagai dinding penutup digunakan kain goni berwarna putih dengan tebal 1 mm yang digunakan pada sisi kanan, kiri, belakang dan depan. Sebagai atap dan alas bawah serta rak digunakan bahan triplek dengan ketebalan 1 cm yang memiliki sifat kedap air agar tidak cepat rusak. Sebagai media pendingin digunakan air yang memiliki temperatur sekitar 25°C dengan cara penyemprotan. Dan sebagai objek yang diletakkan di dalam lemari pendingin adalah sayuran dan buah-buahan. Fitur utama dari lemari pendingin alami yang digunakan ditampilkan pada tabel 1. Sedangkan bentuk lemari pendingin alami yang diuji ditampilkan pada gambar 1.

Tabel 1. Fitur utama dari lemari pendingin alami yang diuji

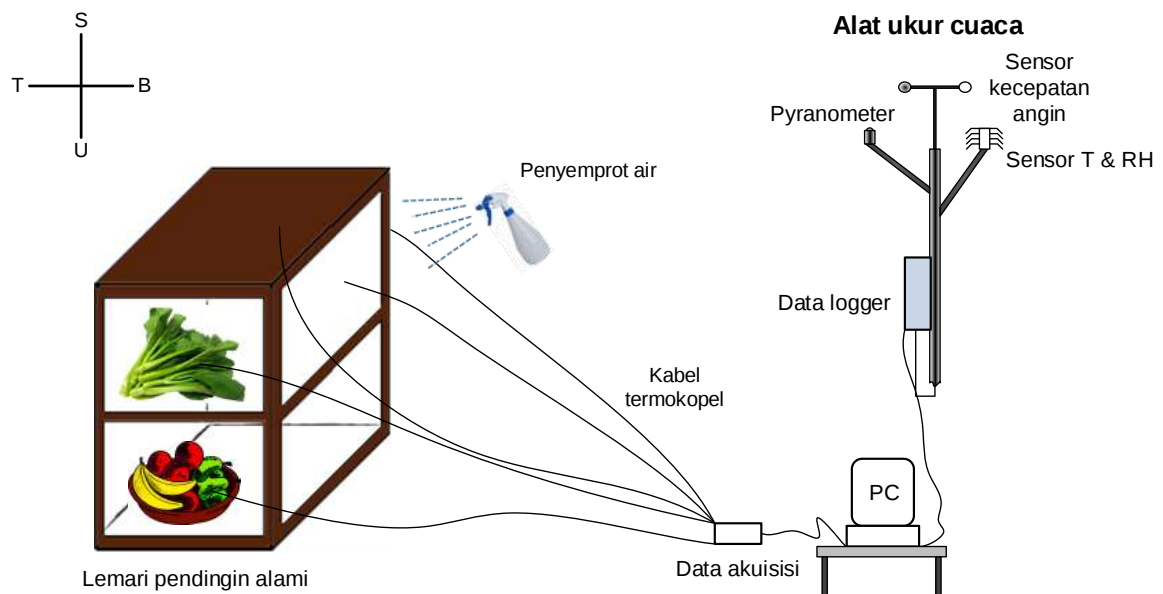
No	Data	Keterangan
1	Rangka lemari	Kayu jati, $k = 0,12 \text{ W/m. K}$ pada $T = 27^{\circ}\text{C}$
2	Dinding penutup	Kain goni, $k = 0,06 \text{ W/m. K}$ pada $T = 27^{\circ}\text{C}$
3	Media pendingin	Air dengan temperatur $\pm 25^{\circ}\text{C}$
4	Objek yang didinginkan	Sayuran dan buah-buahan sebanyak 15 kg



Gambar 1. Foto lemari pendingin alami yang diuji

2.2. Skema Pengujian

Saat pengujian, lemari pendingin alami dihubungkan dengan sebuah data akuisisi agilent 3497A melalui kabel termokopel J dengan akurasi 0,4% yang ditempelkan pada rangka lemari, dinding lemari dan sayur serta buah-buahan. Saat pengujian, digunakan sebuah data logger HOBO station untuk merekam kondisi cuaca yang meliputi radiasi matahari (*pyranometer* dengan akurasi 5%), temperatur dan kelembaban udara (*T & RH smart sensor* dengan akurasi 0,2°C dan 2,5% RH) serta kecepatan angin (*wind speed sensor* dengan akurasi 3%). Semua proses pengukuran dilakukan setiap menit. Lokasi pengujian dilaksanakan di kota Medan dengan koordinat geografis 3°35' Lintang Utara dan 98°40' Lintang Selatan selama 7 hari dari tanggal 1 April hingga 7 April 2016. Skema pengujian dan sistem pengukuran yang dilakukan ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. Skema pengujian dan sistem pengukuran yang digunakan

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian yang dilakukan dibagi ke dalam beberapa kajian yaitu kondisi cuaca saat pengujian berlangsung, kinerja dari lemari pendingin alami yang diuji serta korelasi yang terjadi antara kinerja lemari pendingin alami dengan kondisi cuaca saat pengujian.

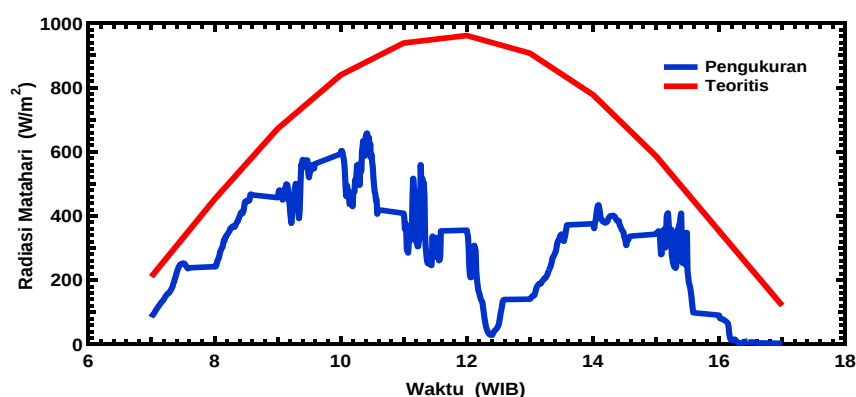
3.1. Kondisi Cuaca Saat Pengujian

Oleh karena pengujian dilakukan pada kondisi udara terbuka yang mengalami paparan radiasi matahari maka perlu ditinjau kondisi cuaca saat pengujian dilakukan. Proses pengukuran kondisi cuaca dilakukan selama 24 jam dalam tujuh hari. Dan proses pengukuran kondisi cuaca dilakukan dengan rentang waktu setiap menit. Tabel 2 menunjukkan kondisi parameter cuaca selama proses pengujian dilakukan.

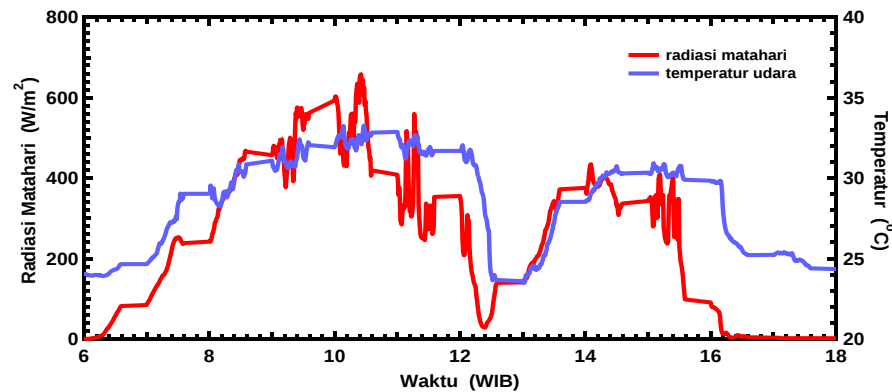
Tabel 2. Kondisi cuaca selama pengujian

Tanggal	Temperatur udara rata-rata (°C)	Kelembaban udara rata-rata (%)	Kecepatan angin rata-rata (m/s)	Radiasi matahari rata-rata (W/m^2)
1/04/2016	26.62	88.92	0.63	126.01
2/04/2016	26.49	89.28	1.11	95.25
3/04/2016	26.24	90.11	1.08	141.92
4/04/2016	25.55	91.34	1.65	108.45
5/04/2016	25.91	88.30	1.19	125.74
6/04/2016	27.56	84.67	0.57	170.05
7/04/2016	28.47	81.79	0.39	150.88

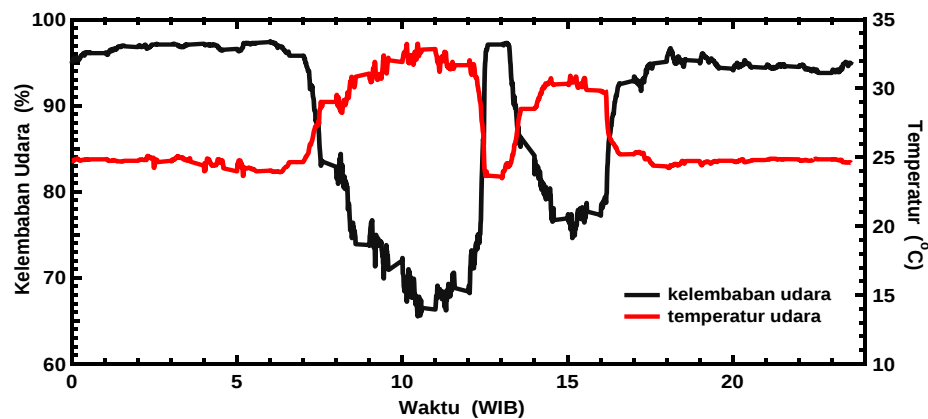
Dari tabel 2 tampak bahwa kondisi cuaca yang meliputi temperatur dan kelembaban udara, kecepatan angin serta radiasi matahari bervariasi setiap harinya. Tampak pada gambar 3 kondisi radiasi matahari pengukuran dan radiasi teoritis pada pengujian hari pertama. Perbedaan hasil terjadi karena pada radiasi teoritis diasumsikan kondisi langit cerah sedangkan radiasi pengukuran merupakan kondisi langit sebenarnya yang dapat berupa cerah, berawan dan hujan. Pada gambar 4 menampilkan tipikal radiasi matahari dan temperatur udara lingkungan saat pengujian pada hari pertama. Sedangkan pada gambar 5 tampak korelasi yang signifikan antara perubahan temperatur udara dengan kondisi kelembaban udara dan tentu saja berkorelasi dengan radiasi matahari yang terjadi pada lokasi pengujian. Dari data eksperimen tampak bahwa umumnya radiasi matahari mulai terdeteksi dari pukul 06.21 WIB hingga pukul 18.29 WIB. Selama pengujian berlangsung dalam tujuh hari diperoleh radiasi matahari rata-rata $171,26 \text{ W/m}^2$, temperatur udara rata-rata $25,92^\circ\text{C}$ dan kelembaban udara rata-rata sebesar 89,33%.



Gambar 3. Tipikal radiasi matahari pengukuran dan teoritis saat pengujian



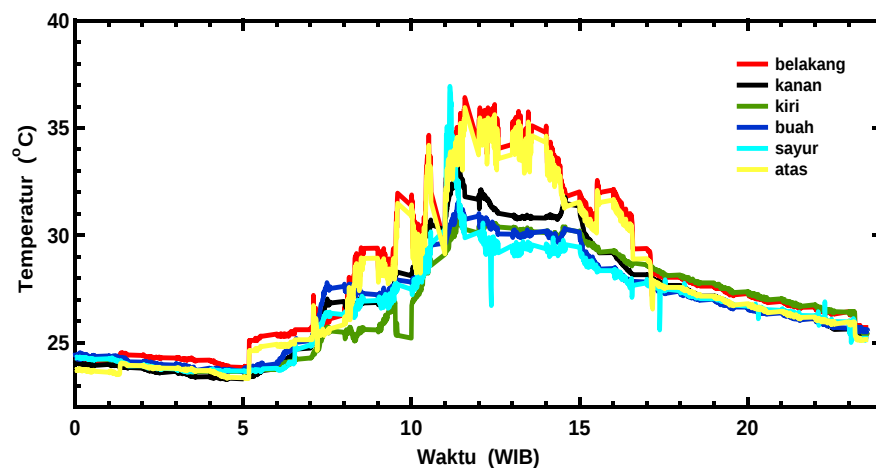
Gambar 4. Tipikal radiasi matahari dan temperatur udara saat pengujian



Gambar 5. Tipikal temperatur dan kelembaban udara saat pengujian

3.2. Kinerja Lemari Pendingin Alami

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa pengujian kinerja lemari pendingin alami ini dilakukan selama tujuh hari di luar ruangan dengan kondisi cuaca yang bervariasi.



Gambar 6. Perubahan temperatur dinding lemari pendingin, sayur dan buah yang terjadi

Proses pengukuran temperatur di lemari pendingin alami dilakukan dengan menempatkan sensor termokopel pada sisi atas, belakang, kanan, kiri lemari pendingin dan sayuran serta buah. Lemari pendingin alami diuji dengan kondisi sisi belakang menghadap timur. Tampak pada gambar 6 terjadi fluktuasi temperatur pada setiap komponen yang diukur untuk

pengujian hari pertama. Hal ini berkorelasi dengan perubahan kondisi cuaca yang terjadi setiap waktu. Besarnya temperatur pada setiap komponen umumnya meningkat mulai pukul 07.00 WIB pagi hari dan mencapai temperatur maksimum pada pukul 12.00 WIB - 14.00 WIB yang seiring dengan peningkatan radiasi matahari dan temperatur udara. Selama pengujian, temperatur maksimum sayuran dan buah berkisar 34°C - 35°C . Sedangkan temperatur minimum sayuran dan buah adalah 22°C - 23°C yang terjadi pada pukul 04.00 WIB - 05.00 WIB.

Secara umum temperatur pada kain goni sisi belakang lebih tinggi daripada sisi yang lain disebabkan pada sisi belakang ini langsung menghadap ke arah timur atau arah matahari terbit sehingga lebih banyak menyerap sinar radiasi matahari. Untuk menjaga kondisi sayuran dan buah-buahan agar tidak cepat layu maka digunakan air sebagai media pendingin dengan cara penyemprotan pada dinding kain goni. Proses penyemprotan dilakukan selama tiga kali dalam satu hari pengujian yaitu pada pukul 08.00 WIB, pukul 12.00 WIB dan pukul 18.00 WIB.

Dari hasil perhitungan dengan mempertimbangkan massa sayuran dan buah-buahan di dalam lemari pendingin serta adanya proses perpindahan panas yang terjadi maka volume air yang dibutuhkan untuk proses pendinginan berkisar 4,5 liter/hari. Volume air digunakan dengan mempertimbangkan kondisi cuaca rata-rata selama pengujian berlangsung yaitu temperatur udara rata-rata $26,70^{\circ}\text{C}$, kelembaban udara rata-rata 87,77% dan radiasi matahari rata-rata $131,19 \text{ W/m}^2$. Media pendingin air digunakan untuk mencegah panas dari udara luar masuk ke dalam lemari pendingin dan menyerap panas yang dikeluarkan buah dan sayur. Oleh sebab itu maka kandungan air pada kain goni harus tetap dijaga. Bila air sampai mengalami pengeringan maka panas dari lingkungan sekitar akan masuk ke dalam lemari pendingin dan panas yang dikeluarkan oleh sayur dan buah juga tidak dapat diserap oleh kain goni. Hal ini dapat mengakibatkan sayur dan buah-buahan yang terdapat di dalam lemari pendingin alami akan lebih cepat layu.

Kondisi fisik sayuran dan buah-buahan selama pengujian dapat dilihat pada gambar 7 dan 8. Tampak bahwa sayuran dan buah-buahan masih kondisi baik mulai hari pertama hingga kelima dan mulai mengalami kondisi layu pada hari ketujuh.



Hari pertama

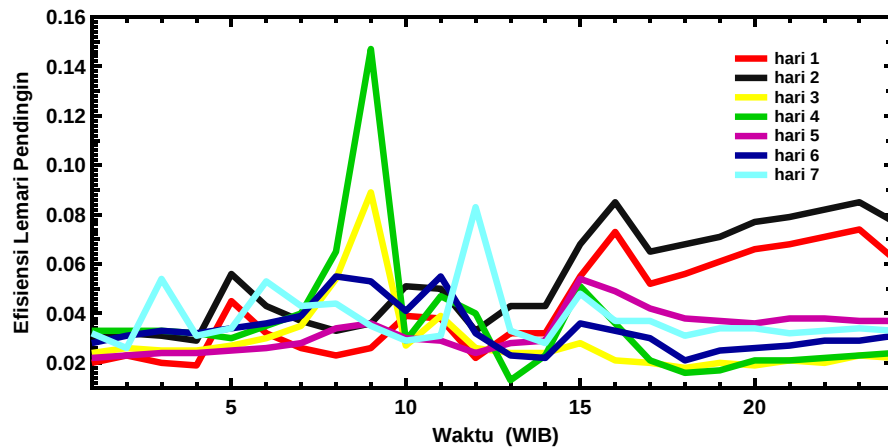
Hari ketiga

Gambar 7. Kondisi sayuran dan buah pada hari pertama dan ketiga

Hari kelima

Hari ketujuh

Gambar 8. Kondisi sayuran dan buah pada hari kelima dan ketujuh



Gambar 9. Efisiensi lemari pendingin alami selama pengujian

Gambar 9 menampilkan nilai efisiensi lemari pendingin alami setiap jam selama tujuh hari. Besarnya nilai efisiensi lemari pendingin alami maksimum yang diperoleh selama pengujian adalah 14,7% pada pengujian hari keempat. Efisiensi lemari pendingin alami maksimum diperoleh saat kondisi temperatur udara rata-rata 25,55°C, kelembaban udara rata-rata 91,34% dan radiasi matahari rata-rata 108,45 W/m². Besarnya nilai efisiensi lemari pendingin alami berfluktuasi setiap hari. Berdasarkan data pengukuran dan perhitungan bahwa besarnya efisiensi lemari pendingin alami dipengaruhi oleh proses perpindahan panas yang terjadi pada lemari pendingin secara radiasi, konduksi dan konveksi serta panas dari sayuran maupun buah-buahan. Dan hal ini tentunya sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca yang bervariasi saat pengujian.

3.3. Korelasi Kondisi Cuaca dengan Kinerja Lemari Pendingin Alami

Korelasi parameter cuaca yang meliputi radiasi matahari, temperatur dan kelembaban udara serta kecepatan angin terhadap efisiensi lemari pendingin alami juga dikaji. Data yang digunakan adalah kondisi cuaca dan efisiensi lemari pendingin alami selama tujuh hari pengujian. Dengan menggunakan fungsi statistik maka diperoleh korelasi efisiensi lemari pendingin alami terhadap kondisi cuaca saat diuji. Tampak dari tabel 3 bahwa parameter radiasi matahari, temperatur dan kelembaban udara serta kecepatan angin memiliki korelasi yang cukup signifikan terhadap nilai efisiensi lemari pendingin alami. Dengan menggunakan fungsi regresi berganda (*multiple regression*) diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar 0,88 dimana hal ini menyatakan bahwa pengaruh parameter cuaca terhadap efisiensi lemari pendingin alami yang diuji saat pengujian berlangsung sebesar 88%.

Tabel 3. Korelasi parameter cuaca terhadap efisiensi lemari pendingin alami

	Temperatur udara	Kelembaban udara	Radiasi matahari	Kecepatan angin	Efisiensi lemari pendingin
Temperatur udara	1				
Kelembaban udara	-0.95	1			
Radiasi matahari	0.66	-0.69	1		
Kecepatan angin	-0.90	0.83	-0.68	1	
Efisiensi lemari pendingin	0.68	-0.58	-0.73	-0.55	1

4. Kesimpulan

Lemari pendingin alami tanpa menggunakan energi listrik atau energi mekanis serta ramah lingkungan telah berhasil dibuat dan diuji kinerjanya. Proses pengujian dilakukan di ruangan terbuka dengan kondisi cuaca yang bervariasi. Kondisi cuaca yang diamati adalah temperatur dan kelembaban udara, kecepatan angin serta radiasi matahari. Dalam penelitian ini, diperoleh temperatur rata-rata sayur dan buah berkisar 26,08 °C selama pengujian. Dari data pengujian dan perhitungan diperoleh efisiensi maksimum lemari pendingin alami selama pengujian adalah 14,7%. Berdasarkan perhitungan secara statistik maka diperoleh besarnya pengaruh kondisi cuaca terhadap kinerja lemari pendingin alami yang diuji berkisar 88% selama pengujian berlangsung. Pada penelitian berikutnya akan difokuskan terhadap peningkatan efisiensi lemari pendingin alami agar waktu kesegaran buah dan sayuran dapat bertahan lebih lama.

Daftar Pustaka

- [1] Buku Putih Penelitian. *Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025*. Kemenristek, Jakarta. 2006.
- [2] Handayani A. N., Ariyanti D., *Potency of Solar Energy Applications in Indonesia*, *International Journal of Renewable Energy Development*, 2, pp.33-38., 2012
- [3] Meita Rumbayan, Ken Nagasaka, 2012, *Solar Irradiation Estimation With Neural Network Method Using Meteorological Data In Indonesia*. *International Journal of Technology* 2: pp.110-120, ISSN 2086-9614. 2012
- [4] M. C. Ndukwu, S. I. Manuwa. *Review of research and application of evaporative cooling in preservation of fresh agricultural produce*. *Int J Agric & Biol Eng*. Vol. 7 No.5 85, October, 2014.
- [5] O. Amer, R. Boukhanouf, and H. G. Ibrahim. *A Review of Evaporative Cooling Technologies*. *International Journal of Environmental Science and Development*. Vol. 6, No. 2, February 2015.
- [6] Y. M. Xuan, F. Xiao, X. F. Niu, X. Huang, and S. W. Wang. *Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) - research*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 16, pp. 3535-3546. 2012.
- [7] Z. Duan et al. *Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 16, pp. 6823 - 6850, 2012.
- [8] B. Porumba, P. Ungureşana, L.F. Tutunarua, A. Şerban, M. Bălana. *A review of indirect evaporative cooling technology*. *Energy Procedia* 85 pp. 461 – 471, 2016.
- [9] Adebisi O W, Igbeka J C, Olurin T O. *Performance evaluation of absorbent materials in evaporative cooling system for the storage of fruits and vegetables*. *International Journal of Food Engineering*. 2009; 5(3): 1-15, 2009.
- [10] T. Pistochini and M. Modera. *Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates*. *Energy and Buildings*. vol. 43. pp. 631-638. 2011.
- [11] Isaac F. Odesola, Onwuka Onyebuchi. *A Review of Porous Evaporative Cooling for the Preservation of Fruits and Vegetables*. *The Pacific Journal of Science and Technology*. Volume 10. No. 2 - November 2009.
- [12] Y. A. Çengel. *Fundamentals of Thermal Fluids Science : A Practical Approach*. McGraw-Hill. 2003.