Rancang Bangun *Ice Block Machine* dengan Kapasitas 12 Kg Menggunakan *Calcium Chloride* sebagai Refrigeran Sekunder

Aldi Giovanni[1], Windy Hermawan Mitrakusuma[2,*], Bowo Yuli Prasetyo[3]

[1,2,3]Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
Email: [1]aldi.giovanni.tptu419@polban.ac.id; [2,]windyhm@polban.ac.id; [3]bowo_yuli@polban.ac.id*

ABSTRAK

Mesin es balok adalah mesin yang dapat memproduksi es berbentuk balok yang digunakan untuk mendinginkan ikan. Mesin es balok dirancang menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dengan metode pendinginan tidak langsung (*indirect expansion*). Dengan menggunakan refrigeran primer R404A dan refrigeran sekunder campuran air 69% dan Calcium Chloride 31% sebagai media penyerap kalor untuk mendinginkan produk hingga temperatur rancangan produk -10°C. sistem *ice block machine* ini memiliki kapasitas produksi es balok sebesar 12 kg dengan beban total pendinginan, yaitu 538,9 Watt. Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem *ice block machine* serta menguji kinerja sistem *ice block machine*. Dari hasil perancangan, dengan menggunakan *condensing unit* berkapasitas 542 Watt, mesin es balok ini dapat memproduksi es balok dengan massa total 12 kg pada 6 buah cetakan es balok selama 230 menit untuk mencapai temperatur produk -10,91°C. COP_{aktual} didapat sebesar 2,06 dan COP_{Carnot} sebesar 3,53 dengan efisiensi sistem sebesar 58,35%.

Kata Kunci

mesin es balok, sistem refrigerasi kompresi uap, calcium chloride

1. PENDAHULUAN

Mesin es balok (*ice block machine*) adalah mesin yang dapat memproduksi es balok secara praktis menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap. Mesin es balok ini memiliki cetakan yang berbentuk balok. Pada umumnya, *ice block machine* banyak digunakan di industri perikanan sebagai alat penghasil es balok untuk mendinginkan ikan. Untuk suatu mesin es balok yang praktis dan tidak membutuhkan lahan yang luas, penggunaan sistem pendingin ini dapat dengan mudah dipergunakan. Pada tugas akhir ini penulis mencoba melakukan percobaan menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dengan metode pendinginan secara tidak langsung (*indirect expansion*).

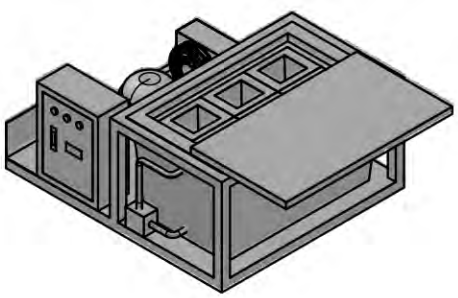
Perancangannya mesin es balok dengan kapasitas *condensing unit* sebesar 1/3 PK dan kapasitas produk sebanyak 5 kg menggunakan refrigeran sekunder *propyelene glycol* dapat menghasilkan es balok dengan *chilling time* 496 menit hingga temperatur -5,3°C [1]. Pada sistem kompresi uap tidak langsung, refrigeran sekunder yang digunakan tidak hanya *propylene glycol*, refrigeran sekunder bisa menggunakan larutan *brine* yang salah satunya adalah *calcium chloride*. Campuran *calcium chloride* dengan air sebagai refrigeran sekunder dapat mencegah pembekuan pada suhu serendah -55°C [2], sehingga cocok sebagai refrigeran sekunder pada sistem *ice block machine* yang memiliki temperatur rancangan produk beku. *Calcium chloride* yang digunakan pada tugas akhir ini aman untuk makanan (*Food Grade*) sehingga es balok dapat digunakan untuk pendinginan pada makanan.

Sehubungan dengan hal yang telah dijelaskan maka penulis mengambil judul "Rancang Bangun *Ice Block Machine* Dengan Kapasitas 12 Kg Menggunakan *Calcium Chloride* Sebagai Refrigeran Sekunder".

Adapun tujuan yang ingin dicapai oleh penulis dalam melaksanakan penelitian ini adalah untuk merancang sistem *ice block machine* dan mengetahui kinerja sistem *ice block machine* yang dirancang.

2. METODOLOGI PERANCANGAN

Mesin es balok yang dirancang ini menggunakan kabin yang bernama *cool box*. Sistem *ice block machine* menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap. Pada tugas akhir ini dirancang alat berjenis *brine cooling* menggunakan sistem refrigeran sekunder yang digunakan untuk pembuatan *ice block machine*. Produk yang didinginkan adalah air dengan berat 12 kg pada 6 buah cetakan yang berbentuk balok. Untuk penjelasannya sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



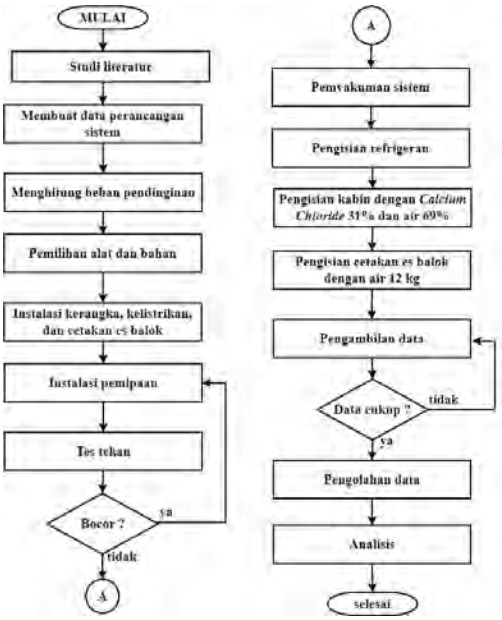
Gambar 1. Konstruksi sistem

Sistem ini menggunakan refrigeran R-404A sebagai media pendinginnya, di dalam kabin diisi dengan refrigeran sekunder yaitu campuran air dan *calcium chloride*. *Condensing unit* dipilih berdasarkan beban total yaitu 538,9 W. Spesifikasi dari sistem yang digunakan terdapat dalam Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Sistem

Dimensi Kabin	700 x 400 x 400 mm
Kompresor	*Tecumseh CAJ2432Z*, ¾ PK
Refrigeran Primer	R-404A
Refrigeran Sekunder	Campuran air dan *calcium chloride*
Alat Ekspansi	Pipa Kapiler
Evaporator	*Bare Tube Evaporator*
Produk	Es Balok, 12 liter
Temperatur Rancangan Produk	-10°C

Berikut ini merupakan metode perancangan yang dilakukan dalam mengerjakan tugas akhir rancang bangun sistem *ice block machine* ini:



Gambar 2 Diagram alir tugas akhir

2.1 Perhitungan Beban Pendinginan

Pada perancangan sistem refrigerasi diperlukan perhitungan beban pendinginan yang akan dikondisikan dengan memperhatikan nilai temperatur dan lamanya penyimpanan produk untuk mengetahui nilai kapasitas peralatan yang dibutuhkan untuk perancangan.

Beban Kalor Melalui Dinding

Beban panas ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) berikut [3]:

$$Q_{Transmisi} = U \times A \times \Delta T \qquad (1)$$

Nilai U dapat dihitung dengan persamaan (2) berikut [3].

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \ldots . \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_2} \qquad (2)$$

Beban Produk

Beban pendinginan produk ini dapat dihitung dengan persamaan (3) berikut [3]:

$$Q_{Produk} = Q_{Before\ Freezing} + Q_{Laten} + Q_{After\ Freezing} \qquad (3)$$

Nilai beban *before freezing* produk dapat diperoleh dengan persamaan (4):

$$Q_{Before\ Freezing} = \frac{m \times C_p \times (T_{awal\ produk} - T_{beku})}{n \times 3600} \qquad (4)$$

Nilai beban laten produk dapat diperoleh dengan persamaan berikut (5):

$$Q_{Laten} = \frac{\mathrm{m} \times \mathrm{L}}{\mathrm{n} \times 3600} \qquad (5)$$

Nilai beban *after freezing* produk dapat diperoleh dengan persamaan (6):

$$Q_{After\ Freezing} = \frac{m \times C_p \times (T_{beku} - T_{akhir\ produk})}{n \times 3600} \qquad (6)$$

Beban Cetakan

Nilai beban cetakan es balok dapat dihitung dengan persamaan (7) berikut [3]:

$$Q_{\mathrm{Cetakan}} = \frac{m \times C_p \times (T_{Air\ Produk} - T_{Brine})}{n \times 3600} \times n_{cetakan} \qquad (7)$$

Cetakan es balok pada sistem *ice block machine* ini menggunakan bahan plat galvanis. Menurut [4], nilai massa jenis bahan galvanis yaitu 7800 kg/m^3 dan nilai *specific heat* yaitu 0,49 kJ/kg.K.

Beban Infiltrasi

Banyaknya panas atau kalor yang sengaja atau tidak sengaja masuk dari celah atau pintu dapat diketahui dengan persamaan (8) berikut [5].

$$\mathrm{Q}_i = q . D_t . D_{\mathrm{f}} . (1 - E) \qquad (8)$$

Penentuan Kapasitas Mesin

Untuk menghitung beban pendinginan yang dibutuhkan dapat menggunakan persamaan (9).

$$Q_{Total} = Q_{Transmisi} + Q_{Produk} + Q_{\text{Cetakan}} + Q_{infiltrasi} \quad (9)$$

Pada umumnya beban pendinginan menggunakan *safety factor* untuk mengantisipasi kemungkinan perbedaan antara kriteria desain dan operasi yang sebenarnya yang dapat dihitung dengan persamaan (10).

$$Q_{Total\ with\ Safety\ Factor} = Q_{Total} + (Q_{Produk} \times Safety\ Factor) \quad (10)$$

Kapasitas pendinginan mesin dapat dihitung dengan persamaan (11).

$$Q_{Cooling\ Capacity} = \frac{Q_{Total\ with\ Safety\ Factor} \times 24\ jam}{Running\ Time} \quad (11)$$

2.2 Perhitungan Panjang Evaporator

Persamaan yang digunakan untuk menghitung panjang evaporator adalah persamaan perpindahan panas konveksi [6].

Penentuan Efek Refrigerasi

Untuk menghitung panjang evaporator, data yang diperlukan untuk proses perhitungan harus dikumpulkan. Pertama, *cooling capacity* dari kompresor yang digunakan, suhu evaporasi dan suhu kondensasi harus diamati. Dengan memasukkan data tersebut ke dalam *software coolpack*, siklus ideal pada sistem kompresi dapat digambarkan. Lalu, efek pendinginan yang diperoleh dapat digunakan dalam tahap perhitungan panjang evaporator.

Penentuan Laju Aliran Massa Refrigeran

Langkah selanjutnya adalah menghitung laju aliran massa dengan menggunakan variabel yang telah didapatkan sebelumnya dapat digunakan persamaaan (12):

$$\dot{m} = \frac{Q}{qe} \quad (12)$$

Perhitungan Kecepatan Refrigeran

Untuk menghitung kecepatan, data dari massa jenis refrigeran pada temperatur evaporasi yang diinginkan diperlukan. Massa jenis ini dapat ditemukan pada tabel properti refrigeran yang digunakan. Kemudian, kecepatan refrigeran dapat dicari dengan menggunakan persamaan (13):

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho x \frac{\pi}{4} di^2} \quad (13)$$

Menentukan Nilai Koefisien Konveksi Bagian Dalam Pipa

Untuk mendapatkan koefisien konveksi dapat menggunakan persamaan (14):

$$h = \frac{Nu.k}{d} \quad (14)$$

Sebelum melakukan perhitungan koefisien konveksi, variabel-variabel yang akan digunakan harus diketahui terlebih dahulu, meliputi:

Menghitung bilangan *Reynolds*

Nilai bilangan *Reynolds* pada koefisien konveksi bagian dalam pipa dapat diketahui dengan persamaan (15):

$$Re = \frac{v.di}{\mu_k} \quad (15)$$

Menghitung bilangan *Prandtl*

Nilai bilangan *Prandtl* pada koefisien konveksi bagian dalam pipa dapat diketahui dengan persamaan (16):

$$Pr = \frac{\mu_d.Cp}{k} \quad (16)$$

Menghitung bilangan *Nusselt*

Nilai bilangan *Nusselt* pada koefisien konveksi bagian dalam pipa dapat diketahui dengan persamaan (17):

$$Nu = C\ (Re)^n\ (Pr)^{0,4} \quad (17)$$

Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Setelah melakukan perhitungan koefisien konveksi bagian dalam dan luar pipa, maka selanjutnya perhitungan perpindahan panas menyeluruh yang terjadi dari fluida dingin yaitu refrigeran menuju fluida panas yaitu *brine* bisa diperoleh dengan persamaan (18):

$$U = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i\ x\ h_i} + \frac{d_o\ x\ ln\ (d_o/d_i)}{2\ .k} + \frac{1}{h_o}} \quad (18)$$

Perhitungan LMTD

Untuk menentukan panjang evaporator diperlukan nilai LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*) yang merupakan

perbedaan suhu rata-rata antara aliran panas dan dingin di setiap akhir alat penukar panas yang dapat diperoleh dengan persamaan (19):

$$\Delta T_m = \frac{[(T_{h0} - T_{c1}) - (T_{h1} - T_{c0})]}{ln\left[\frac{(T_{h0} - T_{c1})}{(T_{h1} - T_{c0})}\right]} \quad (19)$$

2.3 Alat Ukur Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan pada pengukuran data untuk mengetahui kinerja sistem adalah *Multimeter*, *Thermometer Digital*, dan *Pressure Gauge.*

2.3.1 Perhitungan Untuk Menentukan Kinerja Sistem

Untuk mengetahui besarnya kerja kompresi per satuan massa refrigeran refrigeran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (20).

$$q_w = h2 - h1 \quad (20)$$

Untuk mengetahui Nilai kalor per satuan massa refrigeran yang diserap oleh evaporator dapat dihitung dengan menggunakan rumus (21).

$$q_e = h1 - h4 \quad (21)$$

Untuk menghitung nilai COP_{aktual} sistem dapat diperoleh dengan persamaan (22) dan untuk menghitung nilai COP_{Carnot} dapat diperoleh dengan persamaan (23).

$$COP_{aktual} = \frac{(h1 - h4)}{(h2 - h1)} \quad (22)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_E}{T_K - T_E} \quad (23)$$

Adapun ukuran untuk menyatakan kinerja efisiensi suatu sistem refrigerasi yang didefinisikan dengan perbandingan dari nilai COP_{aktual} dan COP_{Carnot} dengan persamaan (24).

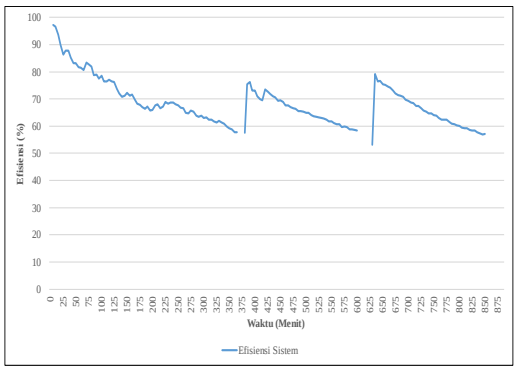
$$\eta = \frac{COP_{aktual}}{COP_{Carnot}} \text{ x } 100\% \quad (24)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan sistem *Ice block Machine* berhasil memproduksi es balok dengan massa total es balok yang dihasilkan yaitu 12 kg dan memiliki temperatur -10,9°C dengan *chilling time* selama 230 menit. Sementara itu *chilling time* hasil perancangan yaitu 225 menit dengan massa total balok es yang dihasilkan 12 kg dan memiliki temperatur -10°C.

3.1 Efisiensi Sistem

Dari grafik efisiensi sistem terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 3, didapatkan nilai efisiensi sistem pada setiap waktu pengukuran mengalami perubahan, terjadi kenaikan dan penurunan yang dipengaruhi dari nilai COP_{aktual} dan COP_{Carnot}. Pada saat sistem dalam keadaan bekerja dengan normal (*cooling*) dan sistem sudah bekerja dengan keadaan *steady* didapat nilai efisiensi sistem rata-rata dari menit ke-575 sampai menit ke-600 yaitu sebesar 59,1%. Pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa nilai efisiensi tinggi disebabkan oleh nilai COP_{aktual} yang hampir mendekati nilai COP_{Carnot} yang menghasilkan nilai efisiensi sistem bertambah besar dan nilai efisiensi yang rendah disebabkan oleh nilai COP_{aktual} yang semakin jauh dari nilai COP_{Carnot} yang menghasilkan nilai efisiensi sistem menjadi semakin kecil.

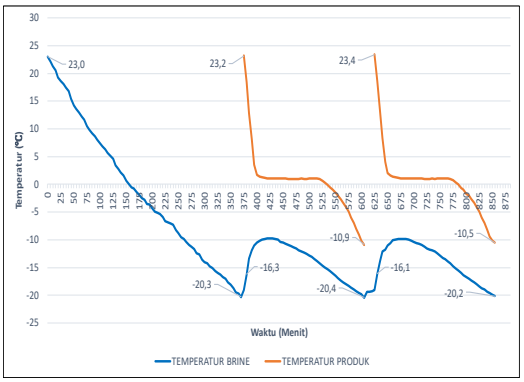


Gambar 3. Grafik efisiensi sistem terhadap waktu

3.2 Temperatur *Brine* dan Temperatur Produk

Dari grafik temperatur *brine* dan temperatur produk terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 4, menunjukkan bahwa temperatur *brine* dengan temperatur produk berbanding lurus. Dapat dilihat ketika temperatur *brine* pada sistem mencapai *setpoint* dengan temperatur *brine* sebesar -20°C, sistem berada pada keadaan *cut-off* atau mati dan produk dimasukkan. Pada awal produk sebelum dimasukkan memiliki temperatur sebesar 23,2°C, dalam rentang waktu 230 menit, produk mencapai temperatur -10,9°C. Hal ini terlihat dari grafik bahwa baik temperatur produk maupun *brine* mengalami penurunan yang dikarenakan kondisi sistem yang mengalami *cut-in* atau beroperasi. Produk dapat dipanen setelah semua produk dalam kondisi beku dengan temperatur -10,9°C. Pada menit ke-605, produk dipanen bersamaan dengan mesin *cut-off* atau mati yang disebabkan temperatur *brine* tercapai. Produk berikutnya dimasukkan saat mesin berada

dalam keadaan *cut-off* yang kedua dan *brine* memiliki temperatur sebesar -19,1°C. Pada grafik terlihat temperatur *brine* mengalami penurunan mengakibatkan temperatur produk ikut turun dengan rentang waktu pendinginan selama 230 menit. Pada menit ke- 855, produk telah mencapai temperatur -10,5°C dan berada dalam kondisi siap untuk dipanen.



Gambar 4. Grafik temperatur *brine* dan temperatur produk terhadap waktu

Produk yang siap panen memiliki temperatur -10,9°C dan berat 2 kg per cetakan, pada sistem *ice block machine* ini dapat memproduksi es balok sebanyak 6 buah pada saat panen dapat dilihat pada Gambar 5.

Gambar 5. Es balok hasil panen

4. KESIMPULAN

Hasil perancangan, dengan menggunakan *condensing unit* berkapasitas 542 Watt, mesin es balok ini dapat memproduksi es balok dengan massa total 12 kg pada 6 buah cetakan es balok selama 230 menit untuk mencapai temperatur produk -10,91°C. COP_{aktual} didapat sebesar 2,06 dan COP_{Carnot} sebesar 3,53 dengan efisiensi sistem sebesar 58,35%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung yang sudah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Purbatin, “Rancang Bangun Prototype Mesin Pembuat Es Balok Menggunakan Alat Ekspansi Pipa Kapiler,” 2006.

[2] ASHRAE, *ASHRAE Fundamental Handbook*. 2001.

[3] R. J. Dossat, *Principles of Refrigeration*. 1961.

[4] E. AGA, “Hot-Dip Galvanized Steel After Fabrication Galvanized Hot-Rolled Sections, Plate, and Hollow Structural Sections American Galvanizers Association,” America, 2022.

[5] ASHRAE, *Fundamentals (I-P Edition)*, vol. 32. 2005.

[6] J. P. Holman, *Heat Transfer*, Tenth., vol. 15, no. 3. McGraw-Hill, 2010.

[7] U. Zafer, *Secondary Refrigeration European Experiences*, vol. 19, no. 8. Chicago, USA, 2003.

[8] G. Servei, “Technical Data Sheet R-404A,” Barcelona, 2023.

[9] C. Occidental, “Calcium chloride A Guide to Physical Properties,” 2002.

[10] T. L. Bergman and A. S. Lavine, “Appendix A: Thermophysical Properties of Matter,” *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. pp. 897–927, 2017.

[11] M. A. Farras, “Rancang Bangun Ice Cube Maker Metode Semprot yang Dilengkapi dengan Propylene Glycol sebagai Refrigeran Sekunder,” 2019.

[12] B. A. Nugroho, “Rancang Bangun Ulang Mini Brine Cooling R404a yang Dilengkapi dengan Intercooler,” 2019.