

EFISIENSI MESIN PENGERING BEKU VAKUM PADA PENGERINGAN CABAI MERAH (*Capsicum annum L.*)

*MACHINE EFFICIENCY OF VACUUM FREEZE DRYER IN RED CHILI (*Capsicum annum L.*) DRYING*

Fadarina¹, Indah Purnamasari¹, Rahmad Fajar*¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jalan Sriwijaya Negara Bukit Besar Palembang , Telp: 0711353414/Fax: 0711355918

*e-mail : rahmadfajartanjung@gmail.com

ABSTRACT

Vacuum freeze drying is a drying method performed at low temperature, reducing product damage caused by high temperature. Red chilies are highly perishable and seasonal, so farmers who have applied the recommended cultivation technology will produce large quantities of chilies at harvest time. This study aimed to design a vacuum freeze dryer, obtained the performance of the dryer based on the efficiency of the cooling machine, and obtained red chilies that met the water content standards based on SNI No. 01-3389-1994. The parameters measured for the cooling machine performance including time, temperature of the evaporator inlet and outlet, temperature of the condenser inlet and outlet. For red chilies drying, the measured parameters were drying temperature with variations 40°C, 45°C, 50°C, and 55°C for 13 hours. Based on the test result, the design of this vacuum freeze dryer had a maximum capacity of 6.52 L for the cold room and 3 L for the heating room. The average of the actual COP, Carnot COP, and refrigeration efficiency were 3.33, 6.18, and 53.71% respectively. The dried chilies produced met the moisture content in accordance with SNI No. 01-3389-1994, namely at temperature 50°C and 55°C with water content of 10.66% and 9.50% respectively.

Keywords: vacuum freeze drying, COP, red chilies, temperature, drying

1. PENDAHULUAN

Pengeringan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode pengeringan yang lain, terutama pada metode ini pengeringan dilakukan pada suhu rendah sehingga mengurangi adanya kerusakan produk akibat suhu tinggi, dan produk kering memiliki bentuk fisik yang menarik. Pada metode ini kandungan uap air dari produk dapat dikontrol selama proses, bahkan produk dapat dikembalikan seperti keadaan sebelum dikeringkan (Maswan, 2012). Proses pemisahan pada pengeringan beku meliputi tiga tahap: (a) tahap pembekuan, (b) tahap pengeringan beku primer, dan (c) tahap pengeringan beku sekunder. Pada tahap pembekuan, bahan makanan atau larutan didinginkan pada temperatur dimana semua material dalam keadaan beku. Pada tahap pengeringan beku primer, pelarut yang telah mengalami pembekuan dihilangkan melalui proses sublimasi. Pada tahap pengeringan beku sekunder melibatkan penghilangan pelarut (air) yang tidak membeku (Mujumdar, 2006).

Beberapa penelitian telah mencoba melakukan kajian tentang pembekuan vakum, di antaranya adalah Marques dan Freire (2004) telah melakukan pengeringan beku nanas dengan kadar air sebesar 85,30%; Siregar (2004) telah melakukan kajian pengeringan beku vakum terhadap daging buah durian dengan kadar air sebesar 60,82%; Arlisdianto (2012) melakukan pengeringan beku lidah buaya dengan kadar air sebesar 98,70%; Januari dan Martin (2014) telah melakukan pengeringan beku vakum terhadap

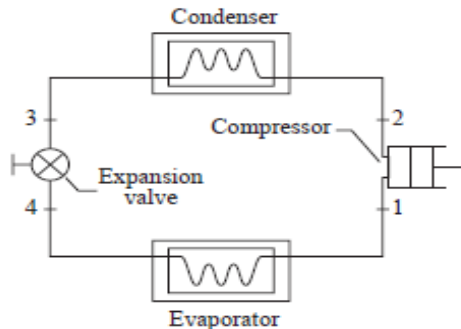
bengkuang hingga mengurangi kadar airnya sebesar 62%, dan Agustina dkk (2020) yang memanfaatkan panas buang kondenser pada pengering beku vakum untuk pengeringan bengkuang.

Salah satu hasil pertanian yang dapat dikeringkan menggunakan pengering beku vakum adalah cabai merah. Cabai sebagai salah satu produk agribisnis mempunyai sifat yang sangat mudah rusak dan bersifat musiman, sehingga petani yang sudah menerapkan teknologi budidaya yang dianjurkan akan menghasilkan jumlah cabai yang banyak pada saat panen raya. Inilah yang kemudian menimbulkan suatu masalah, dimana harga cabai menjadi turun dan cabai mudah membusuk apabila penanganannya tidak tepat (Setiadi, 1999).

Prototipe alat pengering yang dibuat dalam penelitian ini merupakan pengering beku vakum. Untuk mengetahui apakah alat pengering beku vakum bekerja secara efektif dan sesuai dengan peruntukannya, maka dilakukan suatu uji kinerja alat ditinjau dari efisiensi mesin pendingin dan pengeringan terhadap sampel cabai merah. Parameter yang diukur pada pengujian kinerja mesin pendingin adalah temperatur inlet evaporator, temperatur inlet kondenser, temperatur outlet evaporator, dan temperatur outlet kondenser. Sementara variasi yang diambil pada pengeringan cabai merah adalah temperatur pemanasan 40°C, 45°C, 50°C, dan 55°C sehingga didapatkan cabai merah yang memenuhi kadar air sesuai dengan Standar Nasional Indonesia No. 01-3389-1994.

Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan suatu sistem yang memanfaatkan aliran perpindahan kalor

melalui refrigeran. Proses utama dari sistem refrigerasi kompresi uap adalah proses kompresi, proses kondensasi, proses ekspansi, dan proses evaporasi. Proses tersebut apabila berlangsung terus - menerus menghasilkan suatu siklus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



(Sumber: Wang dan Lavan, 1999)

Gambar 1. Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Standar

Analisis termodinamika sistem refrigerasi kompresi uap terdiri dari:

1. Laju Penyerapan Kalor di Evaporator

Pada saat refrigeran melewati evaporator, terjadi penyerapan kalor dari ruangan yang diinginkan sehingga menghasilkan penguapan refrigeran. Kalor yang diserap oleh evaporator dapat dihitung dengan rumus (Stoecker, 2005):

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$q_{rf} = h_1 - h_4 \quad (2)$$

Q_e = kalor yang diserap oleh evaporator (kW), \dot{m} = laju aliran refrigeran (kg/s), q_{rf} = efek refrigerasi (kJ/kg), h_1 dan h_4 = entalpi spesifik refrigeran pada titik 1 dan titik 4 (kJ/kg)

2. Laju Pelepasan Kalor di Kondenser

Pada saat refrigeran melewati kondenser, terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan yang lebih dingin sehingga menghasilkan pengembunan refrigeran. Laju aliran kalor pada proses kondensasi ini dinyatakan pada persamaan (Moran dan Shapiro, 2004).

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

Q_c = kalor yang diserap oleh kondenser (kW), h_2 dan h_3 = entalpi spesifik refrigeran pada titik 2 dan titik 3 (kJ/kg)

3. Daya Kompresor

Kerja kompresi/kebutuhan daya kompresor pada siklus ideal merupakan hasil kali laju aliran massa dengan kenaikan entalpi selama proses kompresi isentropik (Stoecker, 2005). Proses kompresi dianggap berlangsung secara adiabatik yang artinya tidak ada kalor yang dipindahkan baik masuk maupun keluar sistem. Kerja kompresi dirumuskan sebagai berikut (Moran dan Shapiro, 2004).

$$w_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (4)$$

w = daya atau kerja kompresor (kW), h_1 dan h_2 = entalpi spesifik refrigeran pada titik 1 dan titik 2 (kJ/kg)

4. Coefficient of Performance (COP)

Kinerja siklus refrigerasi biasanya dinyatakan dalam bentuk *Coefficient of Performance* (COP). *Coefficient of Performance* (COP) didefinisikan sebagai pemanfaatan dari siklus (jumlah panas yang dihilangkan) dibagi dengan energi yang dibutuhkan input untuk mengoperasikan siklus (ASHRAE, 2001).

$$COP_{ref} = \frac{q_{rf}}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

Karena ada kerugian mekanis dan termal pada siklus nyata, koefisien kinerja (COP) akan selalu kurang dari COP Carnot ideal (Trott dan Welch, 2000). Karena koefisien kinerja adalah energi yang diterima di evaporator dibagi dengan energi yang dipasok ke mesin, sehingga persamaan untuk siklus Carnot adalah (Jones, 2001):

$$COP_{carnot} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (6)$$

$$\eta_{ref} = \frac{COP_{ref}}{COP_{carnot}} \times 100\% \quad (7)$$

$COP_{Carnot} = COP_{Carnot/ideal}$, $COP_{ref} = COP_{refrigerasi/aktual}$, η_{ref} = efisiensi refrigerasi (%), T_e = temperatur evaporator (K), T_c = temperatur kondenser(K)

2. METODE PENELITIAN

Alat yang digunakan adalah pengering beku vakum, stopwatch, neraca digital, thermocontrol, pressure gauge, wadah, freezer, dan kunci inggris. Bahan yang digunakan adalah cabai merah.

Gambar 2 menunjukkan alat pengering beku vakum.



Gambar 2. Alat Pengering Beku Vakum

Spesifikasi alat pengering beku vakum (*vacuum freeze dryer*) yang digunakan adalah:

1. Ruang Pendingin:

- Bentuk : Silinder Vertikal
- Tinggi : 35 cm
- Diameter : 15,875 cm
- Kapasitas : 6,25 L (maks.)
- Material : Stainless steel

2. Ruang Pemanas:

- Diameter : 18 cm

- Kapasitas : 3 L (maks.)
- Material : *Stainless steel*
- Daya Pemanas : 50 W

3. Sistem Refrigerasi:

- Jenis Refrigeran : R22
- Panjang pipa evaporator : 5 m
- Jumlah lilitan koil : 18
- Jarak antarpipa evaporator : 0,5 cm
- Tipe evaporator : *Tubular coil*
- Material koil evaporator : Pipa tembaga
- Diameter pipa evaporator : 1/4 inci
- Material koil kondenser : Pipa tembaga
- Diameter pipa kondenser : 3/8 inci
- Daya pompa vakum : 1/4 HP
- *Flowrate* pompa vakum : 2 cfm
- Daya kipas : 75 W

Untuk pengujian kinerja mesin pendingin, parameter yang diamati meliputi waktu, temperatur inlet dan outlet evaporator, dan temperatur inlet dan outlet kondenser. Sementara untuk pengeringan, digunakan variabel-variabel berikut.

- a. Variabel bebas
 - Temperatur pemanasan : 40°C, 45°C, 50°C, dan 55°C
- b. Variabel kontrol
 - Bahan : Cabai merah
 - Massa : 25 gram
 - Tekanan vakum : -70 cmHg
 - Temperatur pendinginan : -15°C
- c. Variabel terikat
 - Kadar air cabai merah

Prosedur Penelitian

1. Pengujian kinerja mesin pendingin

Kabel utama pengering beku vakum dicolokkan ke stop kontak. Alat dihidupkan dengan menekan tombol *MAIN POWER*. Set point temperatur dengan cara tombol *SET* pada *THERMOSTAT* ditahan hingga angka berkedip dan tombol panah $\wedge \vee$ untuk diatur set point -15°C. Temperatur ruang pendingin yang tertampil pada *THERMOSTAT*, sementara temperatur inlet kondenser (T_1), temperatur inlet evaporator (T_2), temperatur outlet kondenser (T_3), temperatur outlet evaporator (T_4), dan temperatur pemanas (T_5) tertampil pada *DISPLAYCONTROL*. Temperatur dicatat setelah 30 menit mesin dihidupkan. Data temperatur dicatat hingga 60 menit dengan rentang pengambilan data setiap 10 menit. Setelah didapatkan semua data temperatur, alat dimatikan dengan cara tombol *RST* ditekan hingga display *THERMOSTAT* mati. Mencabut kabel dari stop kontak.

2. Pengeringan cabai merah

Cabai merah dimasukkan ke dalam wadah dan ditimbang sebanyak 25 gram. Alat dinyalakan dengan menekan tombol *mainpower* pada *control panel*

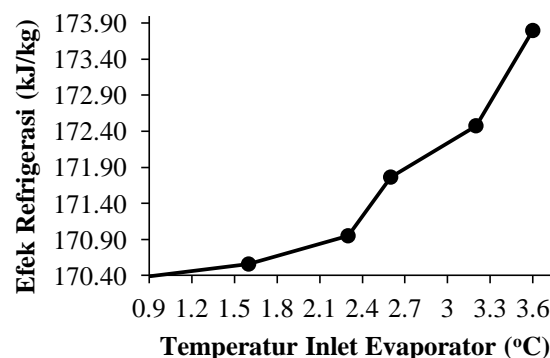
kemudian mengatur *set point* temperatur -15°C. Kemudian memasukkan sampel ke dalam ruang pendingin dan ditutup rapat hingga tidak ada celah udara. Proses pembekuan sampel terjadi selama 5 jam. Setelah pembekuan sampel, mesin pendingin dimatikan dan pompa vakum dihidupkan setiap 5 menit untuk memulai proses *primary drying*. Setelah 5 jam *primary drying*, sampel dikeluarkan dari ruang pengering dan ditimbang hasilnya. Kemudian dipindahkan ke ruang pemanas untuk proses *secondary drying* yang dilakukan selama 3 jam dengan variasi 40°C, 45°C, 50°C, dan 55°C. Sampel dikeluarkan dari ruang pemanas kemudian ditimbang dan dicatat hasilnya. Metode yang digunakan untuk uji kadar air cabai merah didasarkan pada SNI No. 01-2891-1992.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan prototipe alat pengering beku vakum ini memiliki kapasitas maksimal 6,52 L pada ruang pendingin dan 3 L pada ruang pemanas. Klorodifluorometana (CHClF_2) atau yang lebih dikenal dengan R22 digunakan sebagai refrigeran. Alat pengering yang digunakan pada penelitian ini mampu mencapai temperatur pendingin -25°C dan temperatur pemanas 70°C serta tekanan 73 cmHg di bawah tekanan atmosfer.

Pengaruh Temperatur Inlet Evaporator terhadap Efek Refrigerasi

Efek refrigerasi merupakan jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran di evaporator untuk setiap satuan massa refrigeran (Agustina dkk, 2016). Temperatur inlet evaporator memengaruhi efek refrigerasi pada sistem refrigerasi kompresi uap. Hubungan antara temperatur inlet evaporator dan efek refrigerasi dapat dilihat pada Gambar 3.



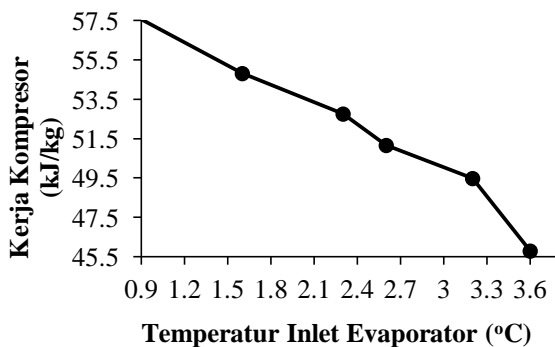
Gambar 3. Pengaruh Temperatur Inlet Evaporator terhadap Efek Refrigerasi

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa efek refrigerasi dipengaruhi oleh temperatur inlet evaporator dimana semakin tinggi temperatur inlet evaporator, semakin besar efek refrigerasi yang dihasilkan. Efek refrigerasi tertinggi dan terendah secara berturut-turut terjadi pada temperatur 3,6°C dengan nilai 173,795 kJ/kg; 3,2°C dengan nilai 172,473 kJ/kg; 2,6°C dengan nilai 171,761 kJ/kg; 2,3°C dengan nilai 170,947 kJ/kg; 1,6°C dengan

nilai 170,555 kJ/kg; dan 0,9°C dengan nilai 170,390 kJ/kg. Menurut Bolaji dkk (2014), meningkatnya efek refrigerasi terhadap peningkatan temperatur evaporator dikarenakan adanya peningkatan nilai panas laten refrigeran. Ketika nilai panas laten tinggi, efisiensi dan kapasitas kompresor sangat meningkat, sehingga menurunkan konsumsi daya kompresor. Selain itu juga disebabkan dari bentuk kurva uap jenuh pada diagram P-h (IIT Kharagpur, 2014).

Pengaruh Temperatur Inlet Evaporator terhadap Kerja Kompresor

Kerja kompresor merupakan selisih antara entalpi spesifik keluar kompresor dengan entalpi spesifik masuk kompresor. Temperatur inlet evaporator juga memengaruhi kerja kompresor pada sistem refrigerasi kompresi uap. Hubungan antara temperatur inlet evaporator dan kerja kompresor dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Temperatur Inlet Evaporator terhadap Kerja Kompresor

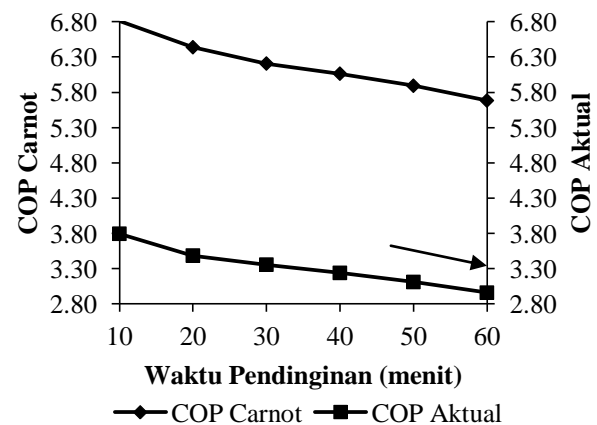
Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa kerja kompresor dipengaruhi oleh temperatur inlet evaporator dimana semakin tinggi temperatur inlet evaporator, semakin rendah kerja kompresor. Hal ini disebabkan fakta bahwa ketika suhu evaporator meningkat maka suhu hisap kompresor juga meningkat. Pada temperatur hisap tinggi, tekanan evaporasi tinggi sehingga densitas uap hisap yang masuk ke kompresor tinggi. Oleh karena itu, massa refrigeran yang diedarkan melalui kompresor per satuan waktu meningkat seiring dengan kenaikan temperatur hisap. Peningkatan massa refrigeran yang beredar menurunkan kerja kompresi (Bolaji dkk, 2014).

Jika temperatur evaporasi meningkat jumlah kerja kompresor yang dibutuhkan semakin menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk kerja kompresor yang dibutuhkan semakin menurun bilamana temperatur evaporasi meningkat. Dengan kata lain untuk menghasilkan temperatur evaporasi yang tinggi rasio kompresi yang dibutuhkan cukup rendah (Hendri dkk, 2014).

Kerja kompresor tertinggi dan terendah secara berturut-turut terjadi pada temperatur 0,9°C dengan nilai 57,550 kJ/kg; 1,6°C dengan nilai 54,811 kJ/kg; 2,3°C dengan nilai 52,755 kJ/kg; 2,6°C dengan nilai 51,160 kJ/kg; 3,2°C dengan nilai 49,478 kJ/kg; dan 3,6°C dengan nilai 45,794 kJ/kg.

Pengaruh Waktu Pendinginan terhadap COP Aktual dan COP Carnot

Untuk menentukan seberapa besar efisiensi sebuah mesin maka diperlukan perbandingan. Maka siklus Carnot adalah perbandingan terbaik untuk semua mesin yang ada. Jadi bisa dibandingkan efisiensi dua mesin aktual yg berbeda, semakin efisien sebuah mesin, semakin hemat dalam konsumsi arus listrik (Hermawan, 2011). *Coefficient of Performance* (COP) aktual merupakan perbandingan efek refrigerasi dengan kerja kompresor (Irawan dkk, 2015). Sementara itu, menurut Mitrakusuma (2009), tidak ada siklus yang mempunyai COP lebih besar dari COP siklus Carnot pada temperatur kerja yang sama. Pengaruh waktu pendinginan terhadap COP Carnot dan COP aktual ditunjukkan pada Gambar 5.



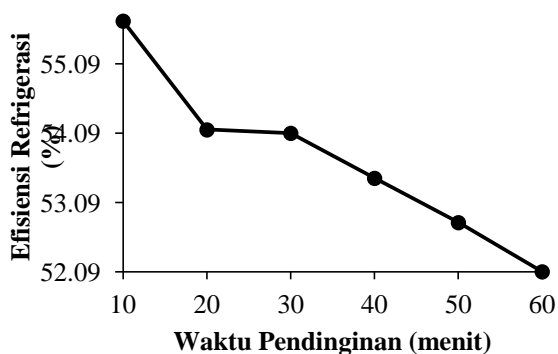
Gambar 5. Pengaruh Waktu Pendinginan terhadap COP Aktual dan COP Carnot

Dari Gambar 5 dapat diketahui bahwa baik COP aktual maupun COP Carnot memiliki hubungan yang berbanding terbalik terhadap waktu. Artinya, semakin lama proses pendinginan, COP aktual dan COP Carnot semakin menurun. Nilai COP Carnot dan COP aktual pada menit ke-10 hingga menit ke-60 secara berturut-turut adalah 6,81; 6,44; 6,21; 6,06; 5,89; 5,68 dan 3,80; 3,49; 3,36; 3,24; 3,11; 2,96 dengan rata-rata 6,18 dan 3,33.

Pengaruh Waktu Pendinginan terhadap Efisiensi Refrigerasi

Ukuran kinerja yang lain adalah efisiensi refrigerasi yang didefinisikan sebagai perbandingan COP aktual terhadap COP siklus Carnot pada temperatur kerja yang sama (Mitrakusuma, 2009). Hubungan antara efisiensi refrigerasi dan waktu pendinginan dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6, waktu pendinginan berpengaruh terhadap efisiensi refrigerasi dimana semakin lama waktu pendinginan, efisiensi refrigerasi semakin menurun.

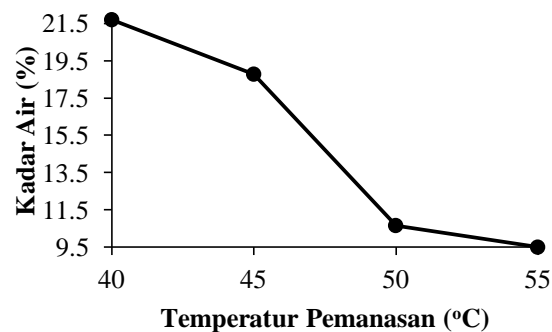


Gambar 6. Hubungan Waktu Pendinginan terhadap Efisiensi Refrigerasi

Efisiensi refrigerasi tertinggi terjadi pada menit ke-10, yaitu 55,71%, diikuti oleh menit ke-20;30;40;50;60 dengan efisiensi refrigerasi secara berturut-turut 54,14%; 54,09%; 53,44%; 52,80%; dan 52,09% dengan rata-rata 53,71%. Seperti halnya COP aktual dan COP Carnot, efisiensi refrigerasi cenderung menurun dengan bertambahnya waktu pendinginan. Efisiensi refrigerasi pada menit ke-10 tinggi dikarenakan COP Aktual sebesar 3,80 dan COP Carnot sebesar 6,81. Sementara itu, efisiensi refrigerasi pada menit ke-60 rendah dikarenakan COP Aktual sebesar 2,96 dan COP Carnot sebesar 5,68.

Pengaruh Temperatur Pemanasan terhadap Kadar Air Cabai Merah

Penentuan kadar air dalam produk pangan merupakan faktor penting yang mempengaruhi kualitas suatu produk. Prinsip pengukuran kadar air pada cabai kering bubuk, yaitu dengan menguapkan air yang terkandung pada cabai dengan cara pemanasan, kemudian bahan ditimbang hingga berat konstan yang berarti semua air sudah diuapkan (Reringga dkk, 2019). Dari hasil analisis kadar air yang dilakukan berdasarkan metode oven dengan SNI No. 01-2891-1992 didapatkan kandungan kadar air dalam cabai merah awal adalah sebesar 76,18%. Hubungan antara kadar air dan temperatur pemanasan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan antara Kadar Air dan Temperatur Pemanasan

Dari Gambar 7s kadar air cabai merah dipengaruhi oleh temperatur pemanasan, dimana semakin tinggi temperatur pemanasan, semakin rendah kadar air dalam cabai merah. Kadar air cabai merah yang didapatkan pada temperatur 40°C, 45°C, 50°C, dan 55°C secara berturut-turut adalah 21,70%, 18,78%, 10,66%, dan 9,5%. Menurut Taib dkk (1997), kemampuan bahan untuk melepaskan air dari permukaannya akan semakin besar dengan meningkatnya suhu udara pengering yang digunakan dan semakin lamanya proses pengeringan sehingga kadar air yang dihasilkan juga semakin rendah.

Berdasarkan SNI No. 01-3389-1994, kadar air pada cabai kering adalah maksimal sebesar 11%, sehingga dapat dikatakan bahwa pada variasi temperatur 50°C dan 55°C dengan kadar air 10,66% dan 9,5% yang diuji coba pada alat pengering beku vakum telah memenuhi syarat kadar air cabai kering.

Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Perbandingan hasil penelitian pengeringan cabai yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Bahan	Metode Pengeringan	Massa (kg)	Temperatur (°C)	Waktu (jam)	Kadar Air (%)		Referensi
					Sebelum	Setelah	
Cabai besar	<i>Cabinet drying</i>	-	60	48	86,527	10,00	Sudaryati, dkk (2013)
	<i>Oven</i>					6,36	
	<i>Freeze drying</i>					13,28	
Cabai keriting	<i>Cabinet drying</i>	-	60	48	88,669	12,26	Sudaryati, dkk (2013)
	<i>Oven</i>					8,69	
	<i>Freeze drying</i>					15,87	
Cabai rawit	<i>Oven</i>	0,05	50	14	81,2	77,73	Parfiyanti, dkk (2016)
			60			75,96	
			70			72,4	
Cabai merah	<i>Open sun drying</i>	40	-	65	80	10	Fudholi, dkk (2013)
	<i>Solar drying</i>					80	
Cabai merah	<i>Vacuum freeze drying</i>	0,025	40	13	76,18	21,70	Hasil penelitian
			45			18,78	
			50			10,66	
			50			9,5	

Berdasarkan Tabel 1, pengeringan cabai dapat dilakukan dengan berbagai macam metode pengeringan, seperti yang dilakukan oleh Sudaryati, dkk (2013) yang melakukan pengeringan cabai besar dan cabai keriting dengan menggunakan metode *cabinet drying, oven*, dan *freeze drying* dengan temperatur 60°C selama 48 jam. Metode paling efektif yang didapatkan adalah metode *oven* yang dapat mengeringkan cabai besar dengan kadar air dari 86,527% menjadi 6,36% dan cabai keriting dari 88,669% menjadi 8,69%. Parfiyanti, dkk (2016) mengeringkan cabai rawit dengan metode *oven* dengan variasi temperatur 50°C, 60°C, dan 70°C selama 14 jam, dimana didapatkan kadar air cabai rawit terendah pada temperatur 70°C dengan kadar air berkurang dari 81,2% menjadi 72,4%. Penelitian cabai merah juga dilakukan oleh Fudholi, dkk (2013) yang menggunakan metode *open sun drying* dan *solar drying* dengan waktu pengeringan selama 65 jam dan 33 jam yang dapat mengeringkan cabai dari kadar air 80% menjadi 10%.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Prototipe alat pengering beku vakum ini memiliki kapasitas maksimal 6,52 L pada ruang pendingin dan 3 L pada ruang pemanas. Jenis refrigeran yang digunakan adalah R22. Temperatur minimum dan maksimum pada ruang pendingin dan pemanas yang dapat dicapai adalah -25°C dan 70°C. Tekanan vakum yang dapat dicapai adalah 73 cmHg di bawah tekanan atmosfer.
2. Secara berturut-turut, rata-rata dari COP aktual, COP Carnot, dan efisiensi refrigerasi dari mesin pendingin pengering beku vakum adalah 3,33; 6,18; dan 53,71%.
3. Cabai kering yang dihasilkan dari pengering beku vakum telah memenuhi kadar air yang sesuai dengan SNI No. 01-3389-1994, yaitu pada temperatur 50°C dan 55°C dengan kadar air 10,66% dan 9,50%.

DAFTAR PUSTAKA

Agustina, E., Sani, A. A., dan Aminullah, S. 2016. *Perencanaan Mesin Mini Freezer Pengawetan Ikan Giling 20 Kg*. *PETRA: Jurnal Teknologi Pendingin dan Tata Udara*, 2(1), 37-43.

Agustina, D., Dhewaji, R. D., dan Martin, A. 2020. *Pemanfaatan Panas Kondenser pada Pengering Beku Vakum (Freeze Vacuum Drying) Bengkuang*. *Jurnal Energi dan Manufaktur* Vol, 13(1), 32-36.

Arlisdianto, J. 2012. *Pengaruh Wadah Material terhadap Laju Pengeringan pada Alat Pengering Beku Vakum untuk Aloe Vera*. Depok: UI.

ASHRAE. 2001. *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE.

Badan Standardisasi Nasional. 1992. *SNI No. 01-2891-1992: Cara uji makanan dan minuman*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Diakses pada Diakses tanggal 21 Agustus 2020 dari <https://www.slideshare.net/Fitrijasmineandriani/sni-01-28911992-cara-uji-makanan-minuman>.

Badan Standardisasi Nasional. 1994. *SNI No. 01-3389-1994: Syarat Mutu Cabai Kering*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. Diakses pada tanggal 21 Agustus 2020 dari https://bsn.go.id/uploads/download/12._draft_skema_lombok_kering.pdf.

Bolaji, B. O., Huan, Z., dan Borokinni, F. O. 2014. *Energy Performance of Eco-friendly R152a and R600a Refrigerants as Alternative to R134a in Vapour Compression Refrigeration System*. Researchgate.

Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., dan Kazem, H. A. 2014. *Performance Analysis of Solar Drying System for Red Chili*. *Solar Energy*, 99, 47-54.

Hendri, Prayudi dan Nurhasanah, Roswati. 2014. *Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur Evaporasi Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pendingin dengan Refrigerant R134a dan MC134*. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII)*.

Hermawan. 23 April 2011. *Efisiensi Mesin Pendingin*. Diakses pada 5 September 2020 dari <http://citrapelanginusantara.blogspot.com/2011/04/efisiensi-mesin-pendingin.html>.

IIT Kharagpur. 2014. *Lesson 19: Performance of Reciprocating Compressors*.

Irawan, R., Andrizal, A., dan Basri, I. Y. 2015. *Perbandingan Coefficient of Performance (COP) Refrigerant R-134a dengan Refrigerant MC-134 pada Sistem Pengkondisian Udara Mobil*. *Automotive Engineering Education Journals*, 1(2).

Januari, A., dan Martin, A. 2014. *Pengeringan Bengkuang dengan Sistem Pengeringan Beku Vakum (Vacuum Freeze Drying System)*. *Jom FTEKNIK*, 1, 1-13.

Jones, W. P. 2001. *Air Conditioning Engineering Fifth Edition*. UK: Butterworth-Heinemann.

Politeknik Negeri Sriwijaya,
Jurnal Kinetika Vol. 11, No. 01 (Maret 2020): 1-8

Marques, L., dan Freire, J. 2004. *Analysis of Freeze Drying of Pineapple and Guava Pulps*. Brazil: Federal University of São Carlos.

Wang, S. K., dan Lavan, Z. 1999. *Air Conditioning and Refrigeration*. Boca Raton: CRC Press.

Maswan, A. 2012. *Model Simulasi Pengerian Beku Vakum dengan Kombinasi Pembekuan Internal dan Pemanfaatan Panas Buang Kondenser*. Universitas Indonesia, Depok.

Mitrakusuma, W. H. 2009. *Buku I Bahan Ajar: Panduan Kuliah Dasar Refrigerasi*. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.

Moran, M. J. dan Shapiro, Howard. N. 2004. *Termodinamika Teknik Jilid, 1*.

Mujumdar, A. S. 2006. *Handbook of Industrial Drying*. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC.

Oetjen, G.-W., dan Haseley, P. 2004. *Freeze-drying*: John Wiley & Sons.

Parfiyanti, E. A., Hastuti, R. B., dan Hastuti, E. D. 2016. *Pengaruh Suhu Pengerian yang Berbeda terhadap Kualitas Cabai Rawit (*Capsicum frutescens L.*)*. Jurnal Akademika Biologi, 5(1), 82-92.

Reringga, L., Mursalin, M., dan Rahmayani, I. 2019. *Kajian Proses Pengerian Cabai Merah (*Capsicum Annum L.*) Menggunakan Vacuum Dryer dengan Penambahan Maltodekstrin dan Aplikasinya dalam Pembuatan Abon Cabai*. Prosiding SEMIRATA BKS-PTN WILAYAH BARAT BIDANG ILMU PERTANIAN 2019, 1(1), 1395-1414.

Setiadi. 1999. *Bertanam Cabai*. Jakarta: Penebar Swadaya.

Siregar, K. 2004. *Kajian Pengerian Beku dengan Pembekuan Vakum dan Pemanasan Terbalik untuk Daging Buah Durian*. Bogor: IPB.

Stoecker, W. F. 2005. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Jakarta: Erlangga.

Sudaryati, L., dan Donny, E. H. 2011. *Pembuatan Bubuk Cabe Merah Menggunakan Variasi Jenis Cabe dan Metode Pengerian*. Jurnal Prodi Tek. Pangan, FTI UPN "Veteran" Jawa Timur.

Taib, G., Sa'id, G., dan Wiraatmadja, S. 1988. *Operasi Pengerian pada Pengolahan Hasil Pertanian*. Jakarta: PT. Mediyatama Sarana Perkasa.

Trott, A. R., dan Welch, T. 2000. *Refrigeration and Air-Conditioning*. UK: Butterworth-Heinemann.

$$\begin{aligned}\eta_{ref} &= \frac{COP_{aktual}}{COP_{carnot}} \times 100\% \\ &= \frac{3,7951}{6,8128} \times 100\% \\ &= 55,71\%\end{aligned}$$

Untuk perhitungan pada menit selanjutnya, dengan menggunakan cara yang sama, hasilnya ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 2. COP Aktual, COP Carnot, dan Efisiensi Refrigerasi pada Waktu dan Temperatur Tertentu

Waktu (menit)	Inlet Evaporator (°C)	COP Aktual	COP Carnot	Efisiensi Refrigerasi (%)
10	3,6	3,80	6,81	55,71
20	3,2	3,49	6,44	54,14
30	2,6	3,36	6,21	54,09
40	2,3	3,24	6,06	53,44
50	1,6	3,11	5,89	52,80
60	0,9	2,96	5,68	52,09
Rata-Rata		3,33	6,18	53,71

LAMPIRAN

- Perhitungan efek refrigerasi di evaporator, kerja kompresor, dan pelepasan kalor di kondenser

Contoh Perhitungan pada Menit ke-10

- Efek refrigerasi di evaporator

$$h_1 = 429,108 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 255,313 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{rf} = h_1 - h_4$$

$$= (429,108 - 255,313) \text{ kJ/kg}$$

$$= 173,795 \text{ kJ/kg}$$

- Kerja kompresor

$$h_2 = 474,902 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 429,108 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{in} = h_2 - h_3$$

$$= (474,902 - 429,108) \text{ kJ/kg}$$

$$= 45,794 \text{ kJ/kg}$$

Untuk perhitungan pada menit selanjutnya, dengan menggunakan cara yang sama, hasilnya ditabulasikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Efek Refrigerasi dan Kerja Kompresor pada Waktu dan Temperatur Tertentu

Waktu (menit)	Inlet Evaporator (°C)	Efek Refrigerasi (kJ/kg)	Kerja Kompresor (kJ/kg)
10	3,6	173,795	45,794
20	3,2	172,473	49,478
30	2,6	171,761	51,160
40	2,3	170,947	52,755
50	1,6	170,555	54,811
60	0,9	170,390	57,550

- Perhitungan COP aktual, COP carnot, dan efisiensi refrigerasi

Contoh Perhitungan pada Menit ke-10

- COP aktual

$$\text{Efek refrigerasi } (q_{rf}) = 173,795 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Kerja kompresor } (w_{in}) = 45,794 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}COP_{aktual} &= \frac{q_{rf}}{w_{in}} \\ &= \frac{173,795 \text{ kJ/kg}}{45,794 \text{ kJ/kg}} \\ &= 3,80\end{aligned}$$

- COP carnot

$$\text{Temperatur evaporasi } (T_e) = 3,6^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatur kondensasi } (T_c) = 44,2^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}COP_{carnot} &= \frac{T_e + 273}{T_c - T_e} \\ &= \frac{3,6 + 273}{44,2 - 3,6} \\ &= 6,81\end{aligned}$$

- Efisiensi refrigerasi