

## PENGEMBANGAN DESAIN PENGERING VAKUM DENGAN MENGGUNAKAN NOZEL INJECTOR

Suryanto<sup>1)</sup>, Nur Hamzah<sup>1)</sup>, Akhmad Taufik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Mechanical Engineering Department, The State Polytechnic of Ujung Pandang, Makassar

### ABSTRACT

The present study evaluated the energy efficiency and drying time of a vacuum dryer. This novel vacuum dryer is the initial design which is being developed. The drying process experiment was carried out at temperature ranging from 60 to 65 °C, while vacuum pressure ranging from 97.0 to 97.2 kPa. The drying process applied for solid materials e.g. cocoa and coffee beans where its moisture ranging from 27 to 35 %. It was found that energy efficiency by using the vacuum dryer was lower 5 % and the drying time tend to be faster 1 hour than using dryer with atmosphere pressure. Efficient use of energy and drying time are not optimal. It may be caused by the condition of the achievement of pressure in the chamber is still relatively high, so it still needs to develop particularly the design on the injector nozzles. In addition, there is still a lot of heat lost to the surroundings where this occurs, possibly due to improper thermal insulation.

**Keywords:** efficiency, drying time, vacuum dryer, initial design.

### 1. PENDAHULUAN

Pada jenis industri tertentu, sebagian besar energi dihabiskan untuk pengeringan. Misalnya, dalam industri pengolahan makanan dan farmasi, sekitar 10-20% dari total penggunaan energi. Industri kayu dan ampas, konsumsi lebih tinggi yang bisa mencapai 30%. Pada perlakuan pascapanen, pengeringan membutuhkan hingga 70% dari total energi yang dibutuhkan [2]. Saat ini, beberapa metode pengeringan digunakan, dari pemrosesan tradisional hingga modern: mis. sinar matahari langsung, konvektif, gelombang mikro dan inframerah, suara ultra, centrifuge, freeze, dan pengeringan vakum [9]. Berbagai desain juga diterapkan mengacu pada karakteristik produk basah, yaitu; fluidized bed dryer untuk grain atau powder, spray dryer, untuk mendapatkan bubuk kering dari cairan, rotary dryer untuk biji-bijian, dan pengering untuk bahan dengan ukuran lebih tinggi besar seperti biji kakao dan sayuran. Berbagai desain diteliti untuk mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi serta kualitas produk. Pada pengeringan suhu tinggi, efisiensi energi bisa mencapai 60%, sedangkan pada freeze dryer di bawah 30% [2]. Dalam konteks ini pengembangan efisiensi pengeringan dengan konsumsi energi rendah merupakan masalah penting untuk penelitian teknologi pengeringan.

Suhu operasional yang lebih tinggi pada proses pengeringan dapat menjadi pilihan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mempercepat waktu pengeringan. Namun, kualitas produk akan menurun terutama untuk makanan, dan obat-obatan atau herbal. Penguapan (Dehumidification) yang berpotensi meningkatkan daya penggerak untuk suhu rendah atau sedang cocok untuk produk yang peka terhadap panas. Metode pengeringan vakum mungkin pilihan terbaik untuk mempercepat dehumidification air dan evaporasi. Keuntungan lain dari pengeringan material dengan cara ini kurang merusak selama proses pengeringan. Beberapa bahan bisa mengalami masalah pada suhu tinggi. Untuk makanan dan obat-obatan, ini dapat bermanfaat, karena proses pengeringan lainnya dapat menurunkan kualitas dan membuat makanan kurang menarik atau mempengaruhi potensi produk farmasi yang sensitif terhadap panas. Makalah ini membahas potensi penggunaan ejektor dalam pengeringan vakum dengan pengering suhu sedang yang terkait dengan efisiensi energi dan periode pengeringan. Studi ini menawarkan penggunaan ejektor sebagai pengganti pompa vakum, dengan tujuan meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Pengering vakum menjaga tekanan udara lebih rendah dari tekanan atmosfer. Titik didih air berkurang oleh kondisi ini, yang meningkatkan laju penguapan di permukaan dan menghasilkan suhu dan gradien tekanan total yang menguntungkan terhadap aliran kelembaban material objek yang dikeringkan.

### 2. MATERIAL DAN METODE

#### 2.1 Material

Proses pengeringan diimplementasikan untuk material padatan. Pada penelitian ini digunakan biji kakao dan biji kopi. Material diperoleh dari perkebunan rakyat yang ada di Sulawesi Selatan, Indonesia. Kadar air bahan bijia-bijian paska panen bervariasi dari 30 hingga 35% (kg air/kg bahan kering).

<sup>1)</sup> Korespondensi penulis: Suryanto, Telp 081243379562, suryanto@poliupg.ac.id

### 2.2 Skema dan Prosedur Eksperimental

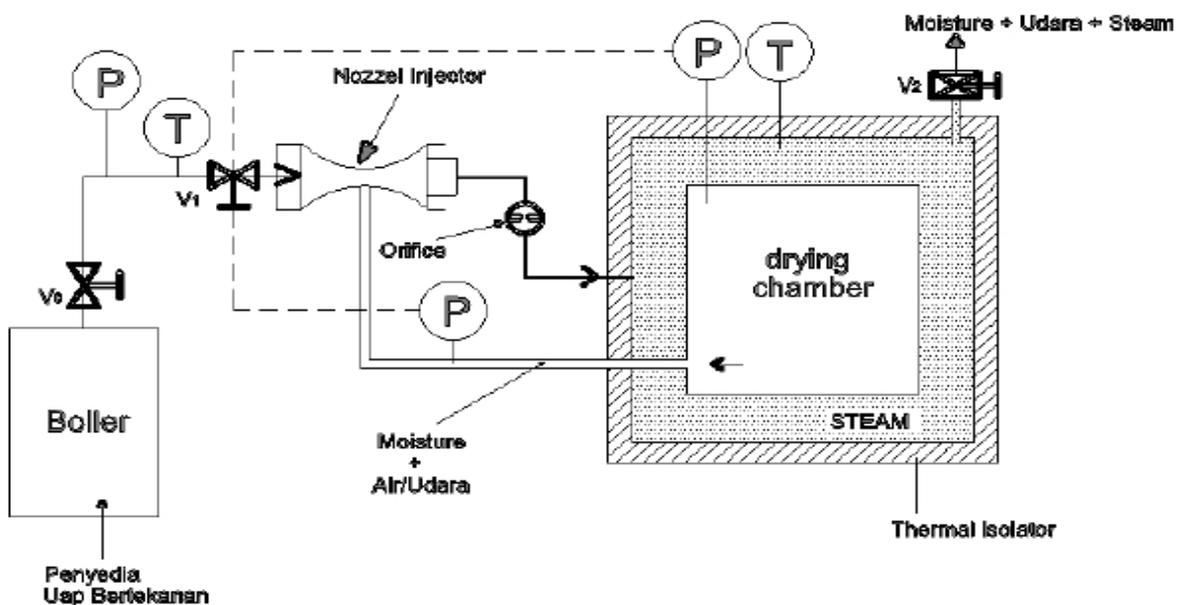
Gambar 1 adalah skema pengeringan vakum menggunakan ejector (nosel injector) untuk mendapatkan efek vakum menggantikan pompa vakum. Uap jenuh bertekanan dari ketel pertama melewati nosel injektor sebelum diumpankan ke jaket uap pengering. Uap bertekanan dengan kecepatan tertentu dipercepat pada injektor sebelum dilewatkan ke nosel. Akibatnya kecepatan aliran fluida uap meningkat di tenggorokan nozzle. Hal ini menyebabkan tekanan uap di daerah tenggorokan ejector turun secara dratis menjadi vakum (lebih rendah dari tekanan atmosfer, atau tekanan negatif). Fenomena tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut; di wilayah tenggorokan nozzle itu dapat diterapkan persamaan Bernoulli, dengan asumsi ketinggian di titik 1 dan 2 adalah sama,

$$P_1 + \left(\frac{\rho}{2}\right) V_1^2 = P_2 + \left(\frac{\rho}{2}\right) V_2^2 \tag{1}$$

dimana  $\rho$  = massa jenis fluida pada titik 1 dan 2 dapat dianggap konstan;  $V_1$  adalah kecepatan uap panas pada sisi input,  $V_2$  adalah kecepatan uap pada daerah throat nosel (point 2). Pada saat fluida uap memasuki nozzle throat, kecepatan meningkat sehingga  $V_2 > V_1$ , sebagai konsekuensinya tekanan fluida pada titik 2 turun ( $P_2$ ). Akibatnya  $P_2$  berada dibawah kondisi tekanan atmosfer (tekanan negative).

Uap yang keluar dari ejector masuk ke jaket uap (ruang di sekitar ruang pengering) sebagai pemanas. Ada pipa penghubung antara ruang pengering dan nozzle yang menyebabkan udara dan uap air di ruang pengering (the chamber) dapat disedot ke arah leher nozzle. Ini menyebabkan ruang pengering juga mengalami kondisi vakum. Terdapat orifice untuk mengurangi tekanan uap dan kecepatan masuk ke selubung uap. Hal ini diperlukan untuk mengurangi tekanan uap yang masuk ke selubung uap. Terdapat sensor tekanan dan suhu di ruang pengering dan di dalam selubung uap untuk mendeteksi tekanan dan kondisi suhu ruangan. Umpan balik sinyal dari sensor-sensor tersebut terhubung ke pengontrol lalu ditransmisikan ke katup solenoid sebagai aktuatur (V0, V1 dan V2) untuk mengatur aliran uap yang masuk dan keluar dalam sistem pengeringan. Tekanan dan suhu dalam ruangan dapat disesuaikan untuk menyesuaikan karakteristik material yang dikeringkan tanpa merusak kualitas. Hal ini sangat penting untuk tujuan penggunaan pada berbagai jenis bahan pertanian yang memiliki karakteristik berbeda dalam hal batasan pengeringan, ini merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh penulis [4] dan [6].

Uji eksperimental dilakukan untuk menilai kinerja objek pengering. Material padatan yang dalam hal ini biji-bijian ditempatkan di rak-rak (nampan) di ruang pengering dan ditutup rapat. Percobaan dilakukan pada tekanan vakum tertentu dan suhu sesuai dengan kondisi yang tidak merusak kualitas bahan uji yang dikeringkan untuk mengevaluasi laju pengeringan. Ini juga menganalisis keseimbangan energi untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan energi dan efektivitas nosel injektor yang memberikan efek vakum pada sistem pengering.



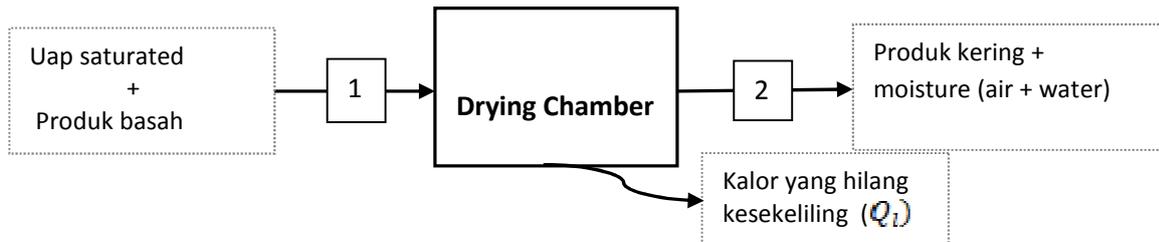
Gambar 1. Skema sistim pengering vakum dengan menggunakan nozzle injector

**2.2. Keseimbangan massa dan efisiensi energi**

Mengacu pada Gambar 2, persamaan keseimbangan massa dan energi untuk pengering diberikan sebagai berikut:

$$\dot{m}_{1s}(h_{1f} + xh_{1fg}) + \dot{m}_{1p}h_{1p} = \dot{m}_{2p}h_{2p} + \dot{m}_{2s}h_{2f} + \dot{m}_{2ws}L + Q_l \tag{2}$$

Di mana  $\dot{m}_{1s}$ ,  $\dot{m}_{1p}$ , and  $\dot{m}_{ws}$  massa input dari uap dan produk,  $\dot{m}_{2s}$ ,  $\dot{m}_{2p}$  and  $\dot{m}_{2ws}$  adalah massa output dari uap, produk dan kandungan air menguap masing-masing. Enthalpy  $h_{1f}$ ,  $h_{1fg}$  and  $h_{1p}$  adalah energi input uap dan  $h_{2p}$ ,  $h_{2s}$ , and  $L$  produk di mana energi output produk, uap dan energi laten masing-masing, dan  $Q_l$  kehilangan panas ke sekitarnya.



**Gambar 2.** Skema Thermodynamic proses input and output pengeringan

Efisiensi energi dari sistem pengering juga dapat dihitung menggunakan persamaan (3), merujuk[1], di mana Sistem efisiensi energi adalah total energi yang diperlukan untuk pengeringan objek dibagi dengan energi panas yang dipasok ke pengering. Efisiensi pengeringan dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\eta_s = \frac{Q_s}{Q_{in} + W_p} \times 100 \% \tag{3}$$

Dimana total energi yang diperlukan untuk pengeringan biji dihitung menggunakan persamaan (4) yang merujuk pada [7] dan [5],

$$Q_s = m_{2p}C_c(T_2 + T_1) + m C_p(T_2 + T_1) + m_{2pw}L \tag{4}$$

Di mana,  $m_{2p}$  adalah massa biji kering,  $C_c$  adalah panas spesifik kacang,  $T_1$  adalah suhu udara ambien,  $T_2$  adalah suhu ruang,  $m$  adalah massa produk konten air awal,  $m_w$  adalah massa air yang akan dihapus,  $C_p$  adalah air panas spesifik, dan  $L$  adalah panas laten penguapan air.

Energi termal berasal dari uap jenuh panas dan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$Q_{in} = \dot{m}_s(h_f + xh_{fg}) + \dot{m}_{1p}h_{1p} \tag{5}$$

Dimana,  $\dot{m}_s$  adalah laju aliran massa uap,  $h_f$  adalah entalpi cairan jenuh,  $h_{fg}$  adalah entalpi cairan gas uap dan fraksi kekeringan uap.

**2.4 Specific moisture extraction ratio (SMER)**

SMER didefinisikan sebagai rasio laju aliran massa lembab terhadap total masukan laju energi ke pengering atau dengan kata lain, total energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan 1 kg air (kelembaban) dari produk basah (lembab) , [1]. Total masukan energi ke pengering juga termasuk daya motor. Specific Moisture Extraction Ratio (SMER) dihitung oleh persamaan berikut, ini mengacu pada [8] dan [9].

$$SMER = \left( \frac{\dot{m}_{ws}}{(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_p)} \right)_r \tag{6}$$

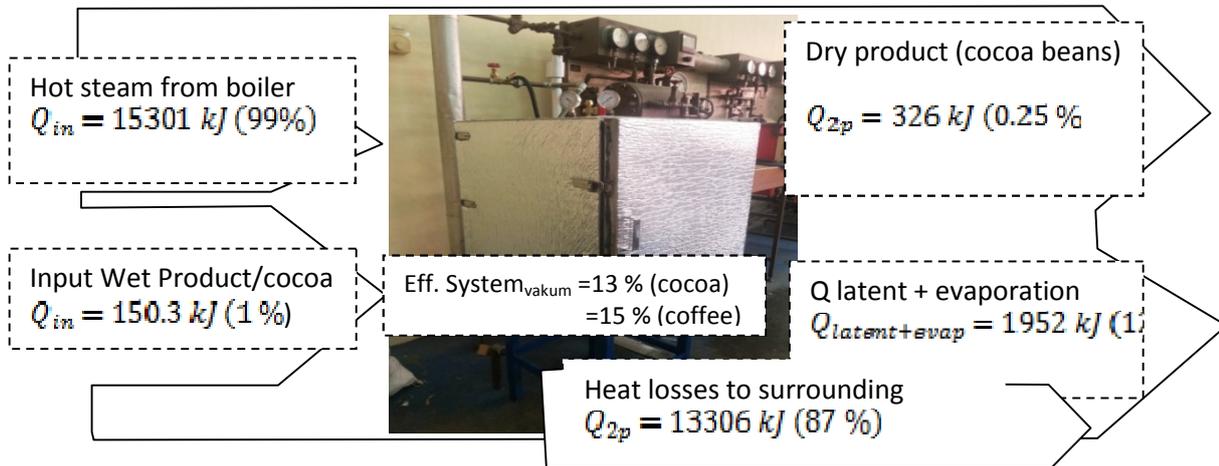
Dari persamaan SMER di atas, penggunaan pompa vakum pada sistem pengering dihindari, oleh karena itu besarnya energi pompa dapat diabaikan, atau  $\dot{W}_p = 0$ , sehingga persamaan (6) dapat ditulis menjadi

$$SMER = \left( \frac{\dot{m} + \dot{m}_{2pw}}{(\dot{Q}_{in})} \right)_r \tag{7}$$

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

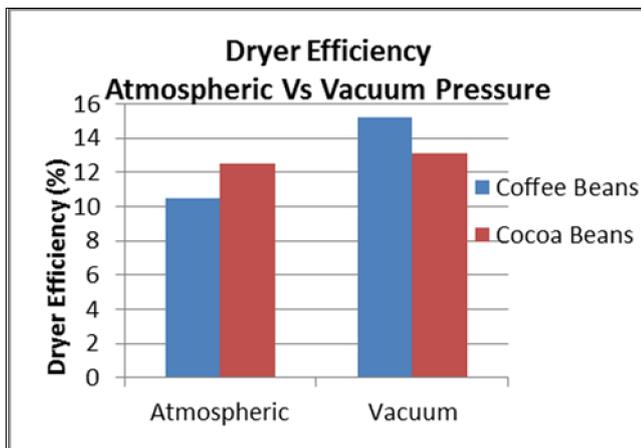
Sampel per batch adalah 3 kg dengan menempatkan 3 tray dalam bilik (1 kg untuk setiap tray). Uap saturated digunakan sebagai input energi untuk proses pengeringan. Kondisi uap jenuh rata-rata bertekanan

2,5 bar, dengan suhu dalam jaket uap sekitar 120 °C dan kekeringan uap (x) adalah 0,32. Suhu di ruang berkisar antara 60 hingga 65 °C. Proses pengeringan per batch telah dilakukan selama 9 jam dan mengkonsumsi 4 kg uap jenuh panas. Kondisi tekanan vakum dalam ruang adalah antara 970 hingga 97.2 kPa. Waktu pengeringan versus kadar air kopi dan biji kakao dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Diagram Sankey, yang menunjukkan contoh istilah input dan output energi dan nilai efisiensi energi, diambil untuk sistem pengeringan dan diberikan pada Gambar. 3. Total input energi dari uap panas dan produk basah (biji kakao) diperoleh sebagai 15.451,3 kJ (100%), sedangkan total energi yang berguna adalah 2278 kJ (13%) dan kerugian energi untuk sekitarnya adalah 13306 kJ ( 87%).



**Figure 3.** Diagram Sankey untuk keseimbangan energi (the energy balance)

Pada Gambar 4 menunjukkan efisiensi pengering vakum dengan menggunakan ejektor dibandingkan dengan pengering tanpa ejektor. Pengujian telah dilakukan dengan mengambil sampel biji kakao dan biji kopi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ada peningkatan efisiensi energi ketika digunakan pengering dengan efek vakum dibandingkan dengan pengering tanpa efek vakum (pengering pada tekanan atmosfer).



**Gambar 4.** Perbandingan efisiensi energi

**Table 1.** Specific Moisture Extraction Ratio (SMER) of Cocoa and Coffee Beans

$\dot{m}_{ew}$ (kg/s) $\times 10^{-5}$	$\dot{Q}_{in}$ (kJ/s)	SMER $\times 10^{-5}$	Mater	Chamber Conditions
2.1	0.472	4.45	Cocoa	Vacuum
2.0	0.472	4.42	Cocoa	atmospheric
2.31	0.472	4.89	Coffee	Vacuum
1.94	0.472	4.13	Coffee	atmospheric

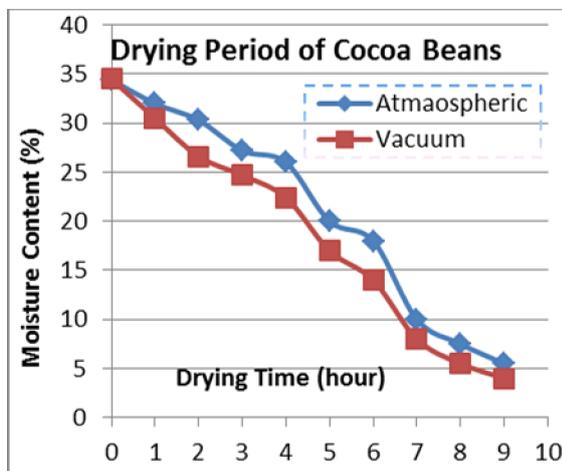
Dalam proses pengeringan biji kopi, dengan efek tekanan vakum dalam ruangan, efisiensi pengeringan keseluruhan mencapai 15%, sedangkan dengan tidak adanya efek tekanan vakum, efisiensi sistem keseluruhan adalah 10,4%. Sementara itu dalam proses pengeringan biji kopi, efisiensi pengeringan keseluruhan diperoleh 13% di bawah kondisi tekanan vakum dan 12% dalam kondisi dekat dengan tekanan atmosfer. Perbedaan dalam penggunaan energi relatif tinggi untuk pengeringan biji kopi, di mana dengan efek vakum; efisiensi adalah 4,5% lebih tinggi daripada tanpa efek vakum. Sementara proses pengeringan biji kakao, energi yang digunakan dalam kondisi vakum hanya 1% lebih tinggi daripada tekanan atmosfer.

Fenomena ini mungkin disebabkan oleh karakteristik permukaan luar biji kakao yang mengandung banyak serat dan guladibanding biji kopi.

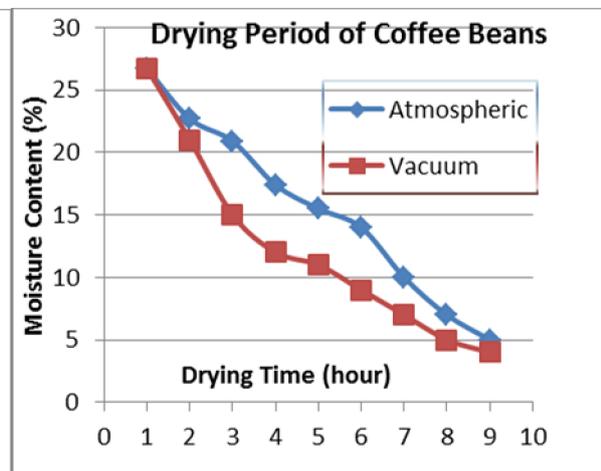
Tabel 1, menunjukkan Rasio Ekstraksi Kelembaban Spesifik (SMER) dari Kakao dan Biji Kopi. Nilai SMER yang diperoleh untuk dua jenis material tergantung pada kinerja mesin pengering yang digunakan dan parameter lain seperti suhu dan tekanan dalam ruangan. Secara umum ada banyak panas yang hilang ke sekitar (antara 85% dan 87% dari total masukan energi) seperti yang ditunjukkan pada diagram Sankey. Isolasi termal dan sirkulasi uap dalam jaket uap tampak tidak efektif. Kondisi uap jenuh dengan kekeringan uap rendah menyebabkan perubahan fasa uap menjadi cairan jenuh berlangsung relatif cepat di dalam jaket air. Hal ini menyebabkan distribusi panas menjadi tidak terdistribusi dengan baik di ruangan. Untuk mengurangi kehilangan panas karena kondisi uap berkualitas rendah, proses pengeringan uap diperlukan untuk mengubah fase jenuh menjadi uap super panas, sambil mempertahankan kondisi tekanan rendah. Selain itu, perlu untuk meninjau desain material dan spesifikasi insulasi termal.

### Karakteristik Pengeringan

Gambar 5 dan 6 menunjukkan perbandingan tingkat penurunan kelembaban dalam bahan yang dikeringkan di bawah tekanan vakum dan tekanan atmosfer untuk jenis; biji kakao dan kopi.



Gambar 5. Drying time biji kakao



Gambar 6. Drying time biji kopi

Ini menunjukkan bahwa ada perbedaan waktu pengeringan untuk berbagai kondisi tekanan untuk dua bahan sampel yang diuji. Misalnya, untuk mencapai kondisi biji kakao dan biji kopi dengan kadar air 5% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6, untuk kondisi vakum, butuh 8 jam sementara untuk kondisi pada tekanan atmosfer butuh 9 jam. Itu berarti proses pengeringan dengan kondisi vakum (97 kPa) adalah 1 jam lebih cepat daripada kondisi pengeringan pada tekanan atmosfer. Tingkat pengeringan menurun pada tahap terakhir ketika kelembaban material di bawah 10% sebagai karakteristik proses pengeringan untuk umumnya pasca panen [3]. Dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh [5], waktu pengeringan biji kakao dari kondisi kadar kelembaban 38% hingga 7,5% adalah 7 jam menggunakan gas panas dalam jenis pengering baki batch, waktu pengeringan hampir sama seperti yang diperoleh dalam sistem pengeringan yang diuji.

### 4. KESIMPULAN

Efek dari pengering vakum menggunakan ejector telah diuji dan diselidiki. Waktu pengeringan yang lebih pendek dan suhu yang lebih rendah meningkatkan efisiensi energi yang disebabkan oleh penggunaan ejector pada pengering dibandingkan pengeringan pada tekanan atmosfer.

Uji eksperimental pada pengembangan desain pengering vakum menggunakan ejector menunjukkan efisiensi keseluruhan yang rendah, (13-15%). Penyelidikan awal menyimpulkan bahwa ada dua faktor penyebab, yaitu kondisi kualitas uap yang rendah dan sistem isolasi termal yang digunakan tidak sesuai.

### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Rustam, Arum dan Hardianti atas keterlibatannya selama penelitian, Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang untuk menyediakan fasilitas, dan Kementerian Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat DRPM) untuk mendukung pendanaan penelitian, di bawah kontrak No.:043/SP2H/LT/DRPM/2018.

## 6. REFERENCES

- Coskun C., Bayraktar M., Oktay Z., Dincer I., (2009), Energy and Exergy Analyses of an Industrial Wood Chips Drying Process, *Int Journal Low-Carbon Tech* 4 (4): 224-229.
- Djaelani M. and A.J.B. Van Boxtel, 2014, Development of A Novel Energy- Efficient Adsorption Dryer with Zeolite for Food Product, *Drying Technology*, vol. 25, issue 6; 1063-1077.
- Davahastin, S., P. Suvarnakuta, S. Soponronnarit and A.S. Mujumdar, (2014), A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material, *Drying Technology*, Vol. 22, No 8, pp. 1845-1867.
- Franck J. A. A.E., Gaston Z., Steve C. Z., Robert N., (2015), Optimization of drying parameters for mango, seed kernels using central composite design, *Bioresources and Bioprocessing* 2:8 DOI 10.1186/s 40643-015-0036-x
- Komolafe C.A, Adejumo A.O.D, Awogbemi O, Adeyeye A.D, 2014, Development of cocoa beans batch dryer, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol. 3 issue 9, pp 171-176.
- Milly A. P., Zhongli P., Griffiths G. A., Gary S., James F. T. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating, (2013), *Int J Agric & Biol Eng. Vol. 6 No.3*.
- Seveda M.C., (2012), Design and development of walk-In, Type of Hemi cylindrical solar tunnel dryer for industrial use, *Int. Scholar research Network*, , Vol.2012.
- Schmidt EL, Klocker K, Flacke N, Steimle F. (1998), Applying the transcritical CO<sub>2</sub> process to a drying heat pump, *Int J Refrig*, vol. 21.
- Jia X, Jolly P, Clemets S. , (1990), Heat pump assisted continues drying. Part 2: simulation results, *Int J Energy Res*, , vol. 14.
- Van Boxtel, (2013), Processing and Drying of Foods, Vegetables and Fruits, *Journal of Drying Technology* , Vol 25.