

## Pengaruh Distribusi Aliran Udara Pengeriing dari Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap untuk Pengeriingan Gabah *Type Batch Dryer*

Damawidjaya Biksono<sup>1,\*</sup>, Maria Angela Kartawidjaya<sup>2</sup>, Melisa Mulyadi<sup>2</sup>, Deny Bayu Saefudin<sup>1</sup> dan Wahyu Hidayat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>)Program Studi Teknik Mesin, Fak.Teknologi Manufaktur Universitas Jenderal A.Yani Cimahi

<sup>2</sup>)Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

\*) *Corresponding author*: damawidjaya.b@lecture.unjani.ac.id

### Abstract

Vapor compression heat pump systems have been widely studied to obtain compressor performance. Some researchers use other models as well as compressor estimation. In this model, refrigerant flow rate and compressor power are modeled poly-tropically concerning inlet and discharge pressures. The model used in Stoecker for refrigeration capacity and compression power is much simpler because both are modeled empirically on the evaporator and condenser temperatures. This study aims to implement the batch dryer type model, as well as determine the amount of total energy and time needed for drying with that type without using swirling so that SMER and SMERTotal are efficient which are produced from the vapor compression heat pump system in the dryer and the energy requirements of each treatment. The SMERTotal value for the 30 kg mass variable is 0.69 kg/kWh, for the 60 kg mass variable is 1.06 kg/kWh, and for the 100 kg mass variable is 0.93 kg/kWh. This SMERTot value is relatively low. The more drying capacity, the greater the power and time needed.

### Abstrak

System *heat pump* kompresi uap telah banyak diteliti untuk mendapatkan kinerja kompresor. Beberapa peneliti yang menggunakan model-model pendugaan kompresor. Pada model ini laju aliran refrigeran dan daya kompresor dimodelkan secara politropik terhadap tekanan hisap dan *discharge*. Model yang digunakan pada Stoecker untuk kapasitas refrigerasi dan daya kompresi jauh lebih sederhana karena keduanya dimodelkan terhadap suhu evaporator dan kondensor secara empiris. Penelitian ini bertujuan ingin mengimplemintasikan model pengering *type batch dryer*, serta mengetahui besarnya *total energy* dan waktu yang dibutuhkan untuk pengeringan dengan tipe tersebut tanpa menggunakan *swirling*, sehingga efisiensi SMER dan SMERTotal yang dihasilkan dari sistem *heat pump* kompresi uap pada mesin pengering serta kebutuhan *energy* dari masing-masing perlakuan. Nilai SMERTotal pada variabel massa 30 kg sebesar 0.69 kg/kWh, untuk massa 60 kg sebesar 1,06 kg/kWh, dan *variable massa* 100 kg sebesar 0,93 kg/kWh. Nilai SMERTot ini terbilang rendah. Semakin banyak kapasitas yang dikeringkan semakin besar pula daya serta waktu yang dibutuhkan.

**Keywords** : Vapor compression heat pump, batch dryer, air flow distribution and drying system.

## PENDAHULUAN

Sistem *heat pump* kompresi uap merupakan suatu sistem yang dapat menyerap kalor pada tingkat suhu yang lebih rendah dan membuangnya ke tingkat suhu yang lebih tinggi. Sistem *heat pump* dapat memanfaatkan input panas lingkungan dan menghasilkan output panas yang lebih besar. Keuntungan lain dari penggunaan sistem *heat pump* kompresi uap adalah dapat mendehumidifikasi udara pengering dapat dilakukan dengan melewati udara pengering melalui evaporator. Penelitian yang telah dilakukan oleh Biksono, *et al.*, (2015) [1] memperlihatkan bahwa pemodelan parameter-parameter kinerja system *heat pump* kompresi uap yang mencakup  $Q_e$ ,  $Q_c$  dan  $P$  cukup baik dimodelkan terhadap suhu evaporator dan kondensor. Kondisi suhu dan kelembaban udara lingkungan serta laju alirannya tentu akan mempengaruhi perubahan suhu evaporator dan kondensor yang selanjutnya akan mempengaruhi  $Q_e$ ,  $Q_c$ , dan  $P$ . Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya daya dan efisiensi yang didapat dari sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU) pada mesin pengering serta pengaruh laju aliran, perpindahan panas dan proses pengkondisian udara yang terjadi pada mesin pengering.

Dalam penelitiannya mengenai “*Kinerja Pengeringan Gabah dengan Sistem Heat Pump Kompresi Uap*” Biksono, *et al.*, (2016) [2] menyimpulkan seluruh kondisi pengeringan yang dihasilkan oleh semua konfigurasi *heat pump* kompresi uap (HPKU) dan pemanas resistif yang dihasilkan hampir sama yaitu 35,7 – 37,9 °C dan rasio kelembaban (RH) yang dihasilkan sebesar 35,4 – 45,9 % sehingga waktu pengeringan yang dibutuhkan antara 11-12 jam. Karwito, (1998) [3]. pada penelitiannya menggambarkan pola aliran udara dengan mengubah posisi blower yang ada (metode *trial and error*) hasil penelitiannya menunjukkan adanya perbedaan distribusi aliran udara di atas plat dan dalam ruang pengering.

Suhu yang kontak antara udara dan bahan yang dikeringkan menjadi rendah merupakan masalah yang terjadi pada pengeringan *bed dryer*, dimana salah satu penyebabnya adalah didistribusi laju aliran udara panas yang tidak merata akibat terjadinya ketidak seragaman kadar air produk pada ruang pengering karena system tumpukan tebal sehingga membuat kualitas bahan atau produk secara keseluruhan menjadi menurun. Selain ketidak seragaman distribusi laju aliran udara dan suhu tersebut mengakibatkan kemungkinan hilangnya udara panas dari ruang pengering sebelum melewati produk dan akhirnya kebutuhan energi menjadi besar atau boros untuk pengeringan tersebut.

Pengering dengan sistem *heat pump* kompresi uap merupakan metode pengeringan mekanis alternatif untuk mempersingkat waktu pengeringan dan menjaga kualitas produk. Keunggulan pengering HPKU jika dibandingkan dengan pengering konvensional ialah higienis, pengoperasian dapat dilakukan pada suhu rendah dan memiliki nilai *spesifik moisture extraction rate* (SMER) yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode pengeringan lainnya [4]. Selain itu, produk yang dikeringkan memiliki kualitas lebih baik jika dibandingkan pengeringan menggunakan suhu tinggi diantaranya bahan tidak mudah patah setelah proses akhir, tidak mengotori atmosfer karena tidak menghasilkan asap dan tidak dipengaruhi oleh kondisi cuaca luar [5]. Salah satu tipe yang dikembangkan adalah pengering oleh Nelwan *et al.* (2011) [6] dimana udara lingkungan melewati evaporator kemudian mengalami peningkatan suhu dari panas yang dilepaskan di kondensor sehingga diperoleh udara dengan RH rendah. Beberapa penelitian menggunakan sistem HPKU ini telah dilakukan. Biksono *et al.* (2016)

melakukan pengeringan gabah sistem terbuka dengan pengoperasian secara *intermittent*, mendapatkan nilai  $SMER_T$  sebesar 7,06 kg/kWh dan nilai  $COP_{hp}$  berkisar 3,2–3,8. Harini, R. (2013) [7] melakukan pengeringan jahe merah dengan mengkonfigurasi pengisian refrigeran R134a dan laju aliran udara yang berbeda, memberikan nilai  $SMER_T$  sebesar 1,777–1,814 kg/kWh serta nilai COP mencapai titik maksimal yaitu 3,84. Karwito, (1998) [3] melakukan pengeringan kunyit menggunakan tiga tingkat laju aliran udara pada sistem HPKU dan menghasilkan nilai  $SMER_T$  sebesar 0,83–0,91 kg/kWh dan nilai  $COP_{hp}$  yang diperoleh berkisar 4,21–4,38.

Pada pengering system HPKU ini, aliran udara lingkungan dilewatkan melalui evaporator dan kondensor. Hasil penelitian Biksono *et al.* (2022) [9] Sebaran suhu yang dihasilkan dari variasi yang digunakan suhu 41,85 °C merupakan hasil terbaik dibandingkan yang lainnya, konfigurasi aliran udara melalui kedua komponen ini dikaji proporsinya untuk meningkatkan efeknya pada kondisi udara pengering. Dan kecepatan udara 9 m/s merupakan variasi yang paling optimal untuk proses pengeringan dengan model ruang pengering tipe silinder horizontal. Tujuan dari penelitian ini adalah ingin mengimplemintasikan model pengering *type bed dryer*, serta mengetahui besarnya total energy dan waktu yang dibutuhkan untuk pengeringan dengan tipe *bed dryer* tanpa menggunakan *swirling*.

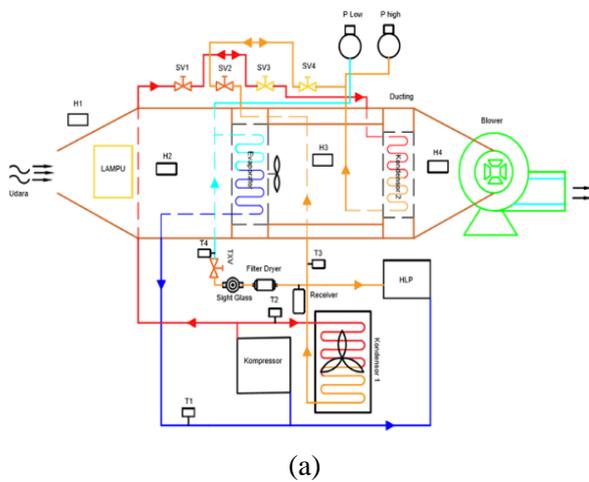
## METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi. Metode penelitian yang dilakukan adalah secara kualitatif dengan cara set-up alat uji system HPKU pengambilan data dan pengukuran distribusi aliran udara yang masuk keruang pengering dengan 11 titik alat ukur yaitu masuk dan keluar plenum, ruang pengering bagian bawah, tengah dan atas masing-masing tiga titik ukur, dimana model pengeringan *tipe batch* agar masing-masing titik ukur terekam lebih jelas dan akurat hasil pengukurannya dari masing-masing tebal tumpukan atau lapisan variasi massa gabah yang diuji. Udara dari lingkungan masuk ke sistem HPKU dengan proses diisap dari blower untuk didistribusi ke ruang pengering.

Sistem HPKU terdiri dari kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator dapat dilihat pada Gambar 1. Kompresor merupakan jantung dari sistem HPKU. Kompresor berfungsi untuk menekan uap refrigeran menjadi tekanan tinggi, sekaligus membangkitkan aliran refrigeran pada siklus HPKU. Banyak jenis kompresor yang terdapat di pasaran dan salah satu diantaranya adalah kompresor untuk refrigeran yang bertekanan rendah. Kondensor berfungsi untuk mengubah fase uap menjadi cair. Selanjutnya cairan refrigeran akan melalui katup ekspansi sehingga tekanannya menurun dan fasenya berubah menjadi campuran cairan-uap. Selanjutnya campuran ini diuapkan seluruhnya pada evaporator. Selain komponennya, refrigeran yang digunakan merupakan faktor utama dalam menentukan kinerja sistem HPKU. Sifat refrigeran yang dibutuhkan diantaranya mencakup tidak mudah terbakar, tidak beracun, ramah terhadap lingkungan. Gambaran dari siklus sistem HPKU dapat dilihat pada Gambar 1.

### Identifikasi Sistem HPKU

Gambar 1 memperlihatkan skema alat uji (a) dan (b) alat uji HPKU yang akan digunakan sebagai alat uji penelitian. *Set up* alat uji perlu dilakukan sebelumnya untuk mengetahui alat uji sudah siap untuk pengujian dan pengambilan data serta melakukan penelitian, *set up* juga memasukan batasan yang akan dilakukan pada saat pengujian. Pada skema alat uji (a) dapat dilihat adanya 2 kondensor yang terpasang dan memiliki perbedaan panas buang yang akan dikeluarkan, dimana kondensor yang pertama berfungsi sebagai siklus awal untuk sistem refrigerasi yang nantinya akan dimanfaatkan untuk proses pengkondisian udara dan penurunan RH dan kondensor kedua berfungsi sebagai pengatur kondisi udara agar udara yang dikeluarkan menjadi panas dan dapat dimanfaatkan untuk proses pengeringan. Ketika kondensor kedua aktif kondensor pertama tidak akan aktif dimana diatur oleh *solenoid valve*.



Gambar 1 Skema alat uji (a) dan (b) alat uji system *heat pump* kompresi uap (HPKU)

Pengukuran kinerja alat pengering HPKU dinyatakan dengan *Coefficient of Performance* (COP). Pengukuran suhu aliran udara sistem HPKU dilakukan pada titik (1) sebelum melewati evaporator, (2) setelah melewati evaporator, (3) sebelum melewati kondensor dan (4) setelah melewati kondensor. Nilai entalpi untuk setiap lokasi ditentukan berdasarkan suhu dan tekanan yang terukur dengan bantuan analisis *software* Coolpack versi 1.5 data-data yang terukur dan terecam dari system HPKU berupa suhu masuk dan keluar kondensor dan evaporator serta daya yang dibutuhkan kompresor dari masing-masing variasi yang dilakukan. Kemudian dari bantuan *software* coolpack tersebut menghasilkan perhitungan nilai energi kompresor ( $W_k$ ), energi kondensor ( $Q_c$ ) dan energi evaporator ( $Q_e$ ). Pengukuran  $COP_{hp}$  berdasarkan perbandingan jumlah rata-rata panas di kondensor ( $Q_c$ ) terhadap rata-rata kerja kompresor ( $W_k$ ) yang didefinisikan sebagai berikut [3] dengan pendekatan persamaan (1).

$$COP_{Heat Pump} = \frac{Q_e + W_k}{W_k} = \frac{Q_e}{W_k} + 1 = COP_{Ref} + 1 \quad (1)$$

Dimana  $W_k$  adalah energi kompresor (kJ/kg),  $Q_c$  adalah laju pindah panas kondensasi (kJ/kg) dan  $Q_e$  adalah laju pindah panas evaporator (kJ/kg).

**Kadar air bahan**

Peranan air dalam bahan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi aktivitas metabolisme seperti misalnya aktivitas enzim, aktivitas mikroba, dan aktivitas kimiawi yaitu terjadinya ketengikan dan reaksi-reaksi *nonenzimatis*, sehingga menimbulkan perubahan sifat-sifat *organoleptik*, penampakan, tekstur serta nilai gizinya. Cara mencegah pertumbuhan mikroba dapat dilakukan dengan cara mengganggu lingkungan hidupnya, dengan cara mengubah suhu, kadar air substrat (*aw*), pH kadar oksigen, komposisi substrat, serta penggunaan bahan pengawet anti mikroba.

Kadar air suatu bahan biasanya dinyatakan dalam persentase bobot terhadap bahan basah, misalnya dalam gram air untuk setiap 100 gram bahan, dan disebut kadar air berat basah atau basis basah (*bb*). Kadar air basis basah dapat didekatkan dengan persamaan (2).

$$k. a (\%bb) = \frac{\text{massa air dalam produk}}{\text{massa total produk}} \\ M = \frac{m_w}{m_t} \times 100\% \quad \rightarrow \quad M = \frac{m_w}{m_w + m_s} \times 100\% \quad (2)$$

Disamping kadar air bobot basah, kadar air bahan juga dapat dinyatakan dalam kadar air basis kering (*bk*) yaitu air yang diuapkan dibagi bobot bahan setelah pengeringan. Jumlah air yang diuapkan dibagi bobot bahan setelah pengeringan. Jumlah air yang diuapkan adalah bobot bahan sebelum pengeringan dikurangi bobot bahan setelah pengeringan, sebagaimana dapat dilihat pada persamaan (3).

$$k. a (\%bk) = \frac{\text{massa air dalam produk}}{\text{massa padatan produk}} \\ X = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (3)$$

Yang dimaksud dengan bobot bahan kering yaitu bobot bahan setelah mengalami pemanasan dalam waktu tertentu sampai tercapai bobot konstan. Pada keadaan bahan bobot konstan tersebut tidak seluruh air yang terkandung dalam bahan teruapkan, akan tetapi hasil yang didapat disebut bobot kering [8].

**Specific moisture extraction rate (SMER)**

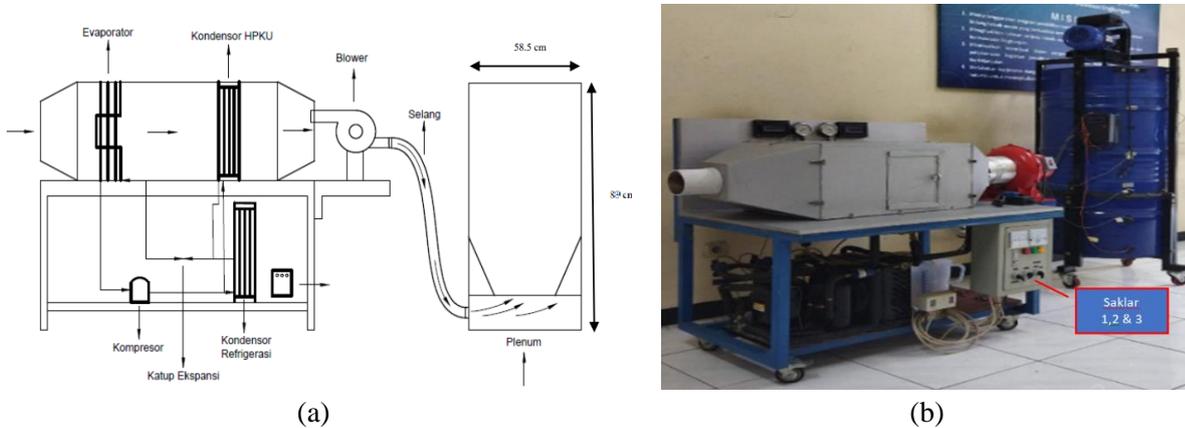
Nilai SMER merupakan rasio jumlah massa air yang diuapkan dari bahan terhadap energi listrik yang digunakan (kg/kWh) dapat didekatkan dengan persamaan (4). Nilai SMER dapat dinyatakan dalam dua ekspresi, yaitu untuk konsumsi energi listrik yang hanya digunakan untuk maksud pemanasan melalui blower.

$$SMER_T = \frac{W_{air}}{E_T} \quad \Rightarrow \quad SMER_{Total} = \frac{W_{air}}{E_{Total}} \quad (4)$$

$SMER_{Total}$  (*Specific moisture extraction rate termal* (kg/kWh),  $W_{air}$  Jumlah massa air yang diuapkan,  $E_T$  (Energi yang digunakan system HPKU) dan  $E_{TOT}$  (Energi total yang digunakan system HPKU dan Blower) kWh.

## Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini ruang pengering tipe *batch dryer* dengan laju aliran udara dari system HPKU udara panas dihisap oleh blower dialirkan keruang pengering tipe *batch dryer* sehingga aliran udara terdistribusi keruang pengering seperti pada gambar (2). (a) skema system HPKU dan ruang pengering dan (b) alat uji system HPKU dan ruang pengering, ruang pengering tersebut digunakan untuk mengeringkan gabah dengan tipe *batch dryer*.



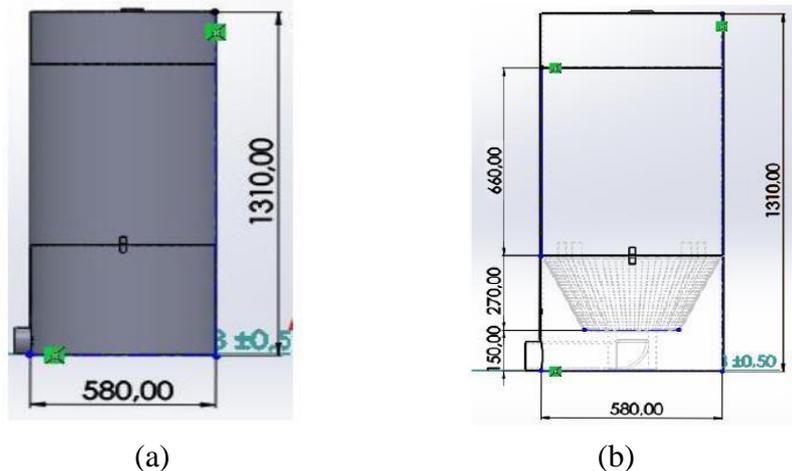
Gambar 2. Skema system (a) dan (b) alat uji HPKU dengan ruang pengering tipe *batch dryer*.

Gambar 2. memperlihatkan skema kerja *system* HPKU dan ruang pengering tipe *Swirling Bed Dryer* (SBD) Dimana pada sistem HPKU memiliki (3) tombol power yang memiliki fungsi yang berbeda - beda. Pada saat saklar (1) on maka mesin yang bekerja sistem refrigerasi pada saat tersebut sistem dinyalakan kurang lebih 5 menit sebagai *set up* bahwa system atau alat berjalan dengan baik, dilanjut menyalakan ke saklar (2), maka akan menjalankan system HPKU. Selanjutnya menyalakan saklar (3) untuk *on Blower* seperti terlihat pada gambar 2b. Pada saat penyalaan saklar (2) akan jika ingin melakukan *intermiten* per sembilan puluh menit sekali agar ada penghematan energy saat melakukan proses pengeringan. udara yang diahsilkan system HPKU dialirkan melewati selang menuju ruang plenum ke pengering. Didalam ruang plenum udara akan menyebar guna untuk mengeringkan gabah. Setelah HPKU dan belower berjalan selama sembilan puluh menit, system HPKU di Matikan selama 30 menit, dan blower tetap dinyalakan selama 30 menit. Setiap langkah pengujian dilakukan seperti itu selain data yg tersimpan dalam ordiano peneliti melakukan pengetesan kadar air bahan menggunakan *grain moister meter*, dan siklus akan terus bekerja hingga kadar air bahan mencapai antara 12 – 14 % bb. Gambar 2 merupakan gambaran ketika akan dilakukan pabrikasi setelah dilakukan disain, adapun langkah-langkah yang akan dilakukan proses pembuatan dan perakitan adalah membuat *frame*, pengaduk, lubang *inlet* dan *oulet*, *spindle* dan bantalan agar memudahkan saat pengadukan (*swirling*) dioperasikan dan alat ukur yang digunakan pada saat pengujian yaitu timbangan, *moister tester*, *thermocouple* tipe K, *hygrometer*, *anemometer* dan *arduino* untuk menampilkan dan merekam data hasil pengujian.

### Pengukuran kapasitas ruang pengering

Pada penelitian ini, tempat pengering berbentuk tabung (*drum*) untuk bagian dalam bawahnya dibuat kerucut agar didistribusi aliran udara merata. Ukuran geometri dari drum berkapasitas keseluruhan 200 Liter dan ditambah setengah drum dibuat kerucut, tujuan yang diharapkan adalah agar penyebaran udara panas dari plenum keruang pengering merata. Berdasarkan hasil pengukuran dari drum didapatkan beberapa parameter pengukuran, untuk diameter dalam drum ( $D$ ) = 0,58 m, tinggi drum ( $t$ ) = 1,31 m. Kapasitas gabah yang dapat ditampung sebelum dimodifikasi sebesar 205 kg, dan kapasitas yang didapat setelah dimodifikasi menampung kapasitas gabah sebesar 123 kg. Adapun ilustrasi bentuk drum sebagai ruang pengering yang akan dihitung dapat dilihat pada Gambar (3).

Pengujian pengeringan gabah dilakukan dengan tiga variasi kapasitas di ruang pengering maksimum 120 kg. Pengujian dilakukan dengan tiga variasi massa yaitu mulai dari 30 kg, 60 kg dan 100 kg dengan kecepatan aliran udara 10,6 m/s, kadar air awal dari produk hasil pengukuran bervariasi dari 24% sampai 28% basis basah (bb) dan kadar air yang ingin dicapai dalam pengujian antara 12% sampai 14% bb.



Gambar 3. (a) Dimensi ruang pengering dan (b) ruang pengering hasil modifikasi

### Waktu Pengeringan

Dalam metode pengeringan yang sangat dibutuhkan dan perlu untuk dianalisis adalah waktu pengeringan dimana waktu pengeringan semakin lama maka energy yang dibutuhkan semakin besar dan begitupun sebaliknya. Laju aliran udara dalam ruang pengering dan waktu pengeringan yang dibutuhkan ada dua kondisi yaitu ada kondisi Steady persamaan (5) dan kondisi *unsteady* persamaan (6) :

Kondisi *Steady state* waktu pengeringan.

$$0 = \left( \dot{m} \cdot Cp \right)_a (T_a - T_r) + (hA)_{abs} (T_{abs} - T_r) - (UA)_w (T_r - T_a) \quad (5)$$

Kondisi *Unsteady state* waktu pengeringan

Laju Perubahan Energi = Energi Masuk – Energi Keluar + Penambahan Energi ke ruang pengering dalam kondisi *unsteady state* dan waktu pengeringan :

$$m.Cp \cdot \frac{dT}{dt} = \left( \dot{m}.Cp \right)_a (T_a - T_r) + (hA)_{abs} (T_{abs} - T_r) - (UA)_w (T_r - T_a)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{m}.Cp}{m.C_p} (T_a - T_r) + \frac{(hA)_{abs}}{m.Cp} (T_{abs} - T_r) - \frac{(U.A)_w}{m.Cp} (T_r - T_a) \quad (6)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan penelitian pengaruh distribusi aliran udara terhadap waktu pengeringan gabah tipe *bed swirling dryer*, didapatkan hasil yang berbeda-beda karena variasi massa awal bahan pengering yang berbeda pula. Pada massa bahan yang makin ringan maka didapatkan waktu pengeringan yang semakin cepat serta untuk dsitribusi aliran udara dibuat konstan. Sedangkan untuk menentukan kadar air akhir dengan menggunakan persamaan 2 dari hasil perhitungan, dimana berat awal bahan sebesar 30 kg dengan kadar air awal sebesar 28% (b.b) diukur menggunakan alat ukur *Moisturemeter*. Lalu bahan dikeringkan dan didapat berat akhir bahan sebesar 26 kg didapatkan nilai kadar air akhir sebesar 13,33 % b.b. selanjutnya hasil perhitungan divalidasi menggunakan alat ukur *Moisture meter*, yang dimana peneliti mengecek 3 titik pada daerah tumpukan gabah dari bed dryer dan didapatkan masing – masing titik dengan kadar air beragam yaitu (13,33 %, 13,65 %, dan 14,00 %) b.b. dari hasil nilai ketiga titik tersebut dapat di katakana mendekati hasil perhitungan.

### Laju pengeringan dan jumlah air yang diuapkan

Untuk kadar air bahan dengan variabel yang lain disajikan pada Table 1. Hasil yang didapat dari hitungan jumlah air yang diuapkan (*Wair*) dan laju pengeringan (*Wair*), peneliti menggunakan data Berat awal (*Wi*), Kadar air awal (*mf*), Kadar air akhir (*mi*) dan lama waktu pengeringan ( $\Delta t$ ) dan data didapat pada table 2 dengan menggunakan persamaan 2 dan 3. Dari hasil tersebut didapatkan jumlah massa air yang diuapkan sebesar 3,86 kg, dengan laju pengeringan sebesar 0,64 kg/Jam atau 0,00018 kg/s dengan berat awal bahan 30 kg. sedangkan jumlah massa air yang diuapkan dan laju aliran udara ke pengeringan dengan variable massanya adalah 30 kg, 60 kg dan 100 kg dapat dilihat pada Tabel 1.

Laju pengeringan yang dibutuhkan dalam massa 30 kg adalah  $0,18 \cdot 10^{-3}$  kg/s dan waktu yang dibutuhkan 6 jam, dan massa awal 60 kg dan 100 kg untuk laju pengeringan sebesar ( $0,36$  dan  $0,41$ )  $10^{-3}$  kg/s dan waktu yang dibutuhkan 7,5 dan 11 jam

Tabel 1 jumlah air yang diuapkan dan laju pengeringan

No	Berat awal (kg)	Berat Akhir (kg)	Waktu pengeringan (jam)	Kadar air awal (% bb.)	Kadar air akhir (% bb.)	Jml Air yg Diuapkan (kg)	Laju Pengeringan (kg/s) x (10 <sup>-3</sup> )
1	30	26,0	6,0	24,5	13,33	3,86	0,18
2	60	51,2	7,5	28,,0	14,00	9,76	0,36
3	100	88,0	11,0	28,0	14,00	16,27	0,41

**Kebutuhan energi dan *specific moisture extraction rate total* (SMER<sub>Total</sub>)**

Nilai SMER ini adalah jumlah massa air yang diuapkan dari sebuah bahan terhadap energi listrik yang digunakan (kg/kWh) [3]. Ada dua perhitungan untuk SMER, yaitu SMER untuk pemanasan (SMER<sub>T</sub>) dan sedangkan konsumsi energi listrik untuk pemanasan dan mekanik (SMER<sub>tot</sub>). Yang dibutuhkan pada perhitungan ini yaitu Jumlah massa air yang diuapkan dan energi yang digunakan pada sistem HPKU dan Blower. Berikut perhitungan yang dilakukan pada variabel 30 kg. Maka didapatkan SMER<sub>T</sub> sebesar 1,14 kg/ kWh dan SMER<sub>Total</sub> sebesar 0.62 kg/kWh untuk variabel 30 kg. Untuk SMER<sub>T</sub> dan SMER<sub>Total</sub> pada pengujian variabel 60 kg dan 100 kg disajikan pada Tabel 2.

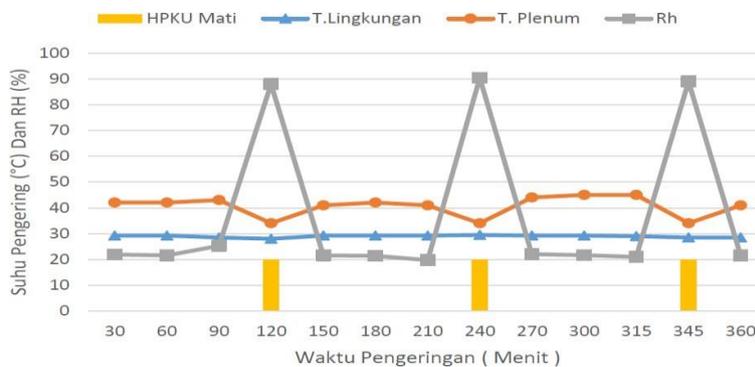
Tabel 2 data *Spesifik Moisture Extraction Rate* (SMER)

Massa bahan awal (kg)	Daya HPKU (kWh)	Waktu HPKU Bekerja (jam)	SMER <sub>T</sub> (kg/kWh)	SMER <sub>Total</sub> (kg/kWh)
30	0,75	4,50	1.14	0,62
60	0,75	6,00	2,17	1,20
100	0,84	9,00	2,16	1,23

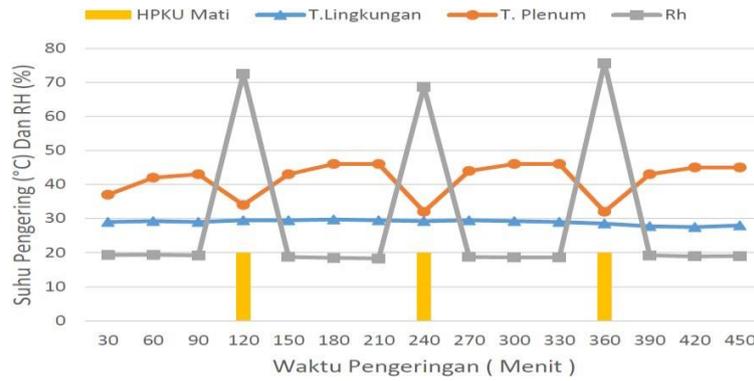
Dari data hasil tersebut diatas, nilai SMER<sub>T</sub> berada pada rentang 1,14 – 2,16 kg/kWh dan SMER<sub>Total</sub> berada pada rentang 0,62 – 1,23 kg/kWh. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan hasil penelitian dari [3]. Rendahnya nilai SMER<sub>T</sub> dan SMER<sub>Total</sub> ini dikarnakan laju aliran massa yang lebih rendah, dan ada panas yang terbuang pada plenum, sehingga nilai suhu pada plenum terbilang rendah dan mempengaruhi proses pengeringan

**Sebaran suhu dan rasio kelembaban terhadap waktu**

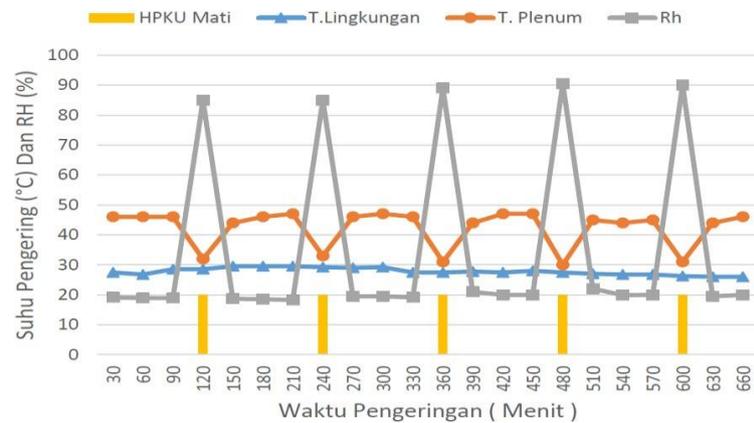
Gambar 6 (a,b,c) memperlihatkan penyajian grafik sebaran suhu pengering dan kelembaban udara terhadap waktu pengeringan dari masing – masing variabel massa bahan yang dikeringkan di *bed dryer* dengan didistribusi udara panas dari system *heat pump* kompresi uap.



Gambar 6a. Grafik distribusi suhu dan RH terhadap waktu massa 30 kg



Gambar 6b. Grafik distribusi suhu dan RH terhadap waktu massa 60 kg



Gambar 6c. Grafik distribusi suhu dan RH terhadap waktu massa 100 kg

Pengujian dilakukan per 120 menit dari setiap 120 menit dilakukan 30 menit *intermitten* dimana di setiap 90 menit system HPKU dan blower hidup dan 30 menit kemudian dilakukan *intermitten* yaitu system HPKU dimatikan dan blower tetap nyala dan pengujian dilakukan berulang sampai mendapatkan kadar air bahan mencapai kadar air antara 12 – 14 % bb. Sehingga dapat dilihat pada grafik berwarna kuning digambar 6 (a, b, c). Suhu pada *drum dryer* menurun akan tetapi kelembaban relative (RH) udara naik mendekati suhu lingkungan dengan rasio kelembaban antara (85 - 90 %). dikarenakan udara tetap dialirkan oleh blower dalam keadaan udara yang tidak diberikan panas dari kondensor, sehingga ada kenaikan kelembaban relative dan penurunan suhu yang signifikan. Namun suhu *drum dryer* tetap ada diatas suhu ruangan dikarenakan masih ada panas yang tertinggal pada kondensor dan terbawa oleh hisapan dari blower.

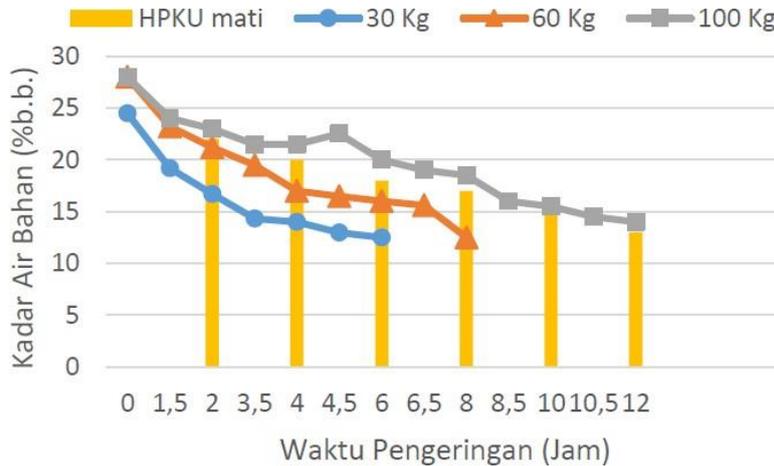
Pada gambar grafik 6a dan 6b variable massa 30 kg dan 60 kg, dapat terlihat suhu dalam *drum dryer* fluktuatif diatas 40°C, dikarenakan besarnya panas yang terbuang saat melewati selang saluran udara yang menghubungkan blower dan *drum dryer* sehingga proses pengeringan terbilang lambat.

Lalu pada gambar grafik 6c variabel pada massa 100 kg, suhu pada waktu awal terlihat konstan diatas 40°C, dikarenakan selang sudah diganti dengan selang yang lebih tebal serta dilapisi insulasi sebagai fungsi insulasi. Namun menjelang 8 jam waktu pengeringan, dapat terlihat suhu lingkungan menurun dan mempengaruhi suhu yang dihasilkan untuk pengeringan.

Sehingga saat pengujian mendekati waktu malam, dimana suhu lingkungan semakin dingin, suhu pada *drum dryer* juga menurun dan mempengaruhi lamanya waktu proses pengeringan.

**Penurunan kadar air terhadap waktu**

Gambar 7 memperlihatkan penurunan kadar air terhadap waktu pengeringan dengan menggunakan system *heat pump* kompresi uap dengan variable massa antara 30 kg, 60 kg dan 100 kg.



Gambar 7. Grafik kadar air bahan terhadap waktu pengeringan

Dari Gambar 7 memperlihatkan grafik kadar air bahan terhadap waktu pengeringan didapat waktu yang dibutuhkan untuk mengeringkan bahan hingga kadar air dalam bahan antara 12-14% bb. Dimana massa 30 kg mendapatkan waktu tercepat yaitu 6 jam, kapasitas gabah yang sedikit pada ruang pengering akan semakin cepat meratanya distribusi panas pada bahan dan tekanan refrigerant R-404a sebesar 25 bar. Sedangkan untuk massa 60 kg dan 100 kg berturut-turut membutuhkan waktu 7,5 jam dan 11 jam, lamanya pengeringan pada variabel ini dikarenakan adanya panas yang terbuang dari plenum yang tidak dilapisi dengan insulasi. Dimana kadar air pada massa 60 kg dan 100 kg mengalami fluktuatif naik turun suhu pada ruang pengering, dikarenakan pada saat system *heat pump* kompresi uap dilakukan *intermitten* udara panas yang didapatkan atau disalurkan keruang pengering tidak merata diakibatkan dari tumpukan bahan uji yaitu gabah yang lebih tebal dibandingkan pada massa 30 kg.

**KESIMPULAN**

Setelah melakukan pengujian dan analisis, peneliti dapat menyimpulkan bahwa, Pengujian dengan laju aliran udara sebesar 0,103 kg/s, didapatkan waktu pengeringan pada massa 30 kg selama 6 jam dengan daya listrik total sebesar 7,34 kWh. Sedangkan pada massa 60 kg didapatkan waktu 9 jam dengan daya listrik total sebesar 10,85 kWh, dan terakhir pada massa 100 kg didapatkan waktu pengeringan 11 Jam dengan daya total sebesar 17,17 kWh. Nilai *SMER<sub>Total</sub>* pada massa 30 kg sebesar 0.69 kg/kWh, untuk massa 60 kg sebesar 1,06 kg/kWh, dan massa 100 kg sebesar 0,93 kg/kWh. Nilai *SMER<sub>Total</sub>* ini terbilang rendah jika dibandingkan dengan penelitian [3] yang mendapatkan *SMER<sub>tot</sub>* berkisar 2.45–5.06 kg/kWh. Hasil pengujian yang dilakukan bisa dibilang cukup lambat, dimana pada variabel massa 60 kg dan 100 kg membutuhkan waktu pengeringan yang lebih lama dengan suhu antara 40 °C

sampai 45 °C karena tumpukan gabah (*batch*) pada drum *dryer* lebih tinggi dibandingkan variabel 30 kg sehingga udara panas untuk mengeringkan gabah lebih lama terserap pada tumpukan gabah yang bagian paling atas. Faktor utama yang mempengaruhi lambatnya pengeringan ini, diantaranya adalah terjadi *heat loss* pada drum *dryer* dikarenakan tidak dilakukan penginsulasian pada saluran udara panas pada *drum dryer* dan tidak terpengaruh oleh suhu lingkungan.

## DAFTAR NOTASI

$M$  = Kadar air basis basah (%)  
 $m_w$  = Massa air dalam produk (kg)  
 $m_s$  = Massa padatan (kg)  
 $m_t$  = Massa total produk (kg)  
 $X$  = Kadar air basis kering (%)  
 $m_w$  = Massa air dalam produk (kg)  
 $m_s$  = Massa padatan produk (kg)  
 $L$  = Panjang (m)  
 $\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\dot{m}$  = Laju aliran massa (kg/s)  
 $A$  = Luas penampang ( $\text{m}^2$ )  
 $v$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)  
 $\mu$  = Viskositas absolut fluida (Pa.s)  
 $k_f$  = Konduktifitas termal refrigeran ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ )  
 $\rho_f$  = Massa jenis refrigeran ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $bb$  = Basis basah (%)  
 $bk$  = Basis kering (%)  
 $k.a.$  = Kadar air (%)  
 $T_E$  = Suhu pengembunan ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T_C$  = Suhu penguapan ( $^\circ\text{C}$ )  
 $Q_{Eva}$  = Panas evaporator (W)  
 $P_{Comp}$  = Tekanan kompresor (Pa)  
 $Q_{Cond}$  = Panas condenser (W)  
 $T_{Ling}$  = Suhu lingkungan ( $^\circ\text{C}$ )  
 $SMER$  = *Spesifik Moisture Extraction Rate* (kg/ kWh)  
 $SMER_T$  = *Spesifik Moisture Extraction Rate Total* (kg/ kWh)

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Biksono, *Analyzing the Characteristic of Vapor Compression Heat Pump System*, *International Journal Innovative Reseach in Advancend Enngineering (IJIRAE)*, vol. 2, no. 10, pp. 123-118. 2015
- [2] D. Biksono, *The Analysis of Vapor Compression Heat Pump System for Rough Rice Drying*, *Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP)*, vol. 4, no. 2, pp. 139-146. 2016.
- [3] Karwito, 1998. *Kajian distribusi aliran dan suhu udara dalam model alat pengering*, Bogor: Institut Pertanian Bogor, Bogor.

- [4] A.S. Mujumdar, S.V. Jangam, *Some innovative drying technologies for dehydration of foods*. In : Proceedings of ICEF. Athens. Greece. 555–556. 2011.
- [5] C.O. Perera, M.S. Rahman. *Heat pump dehumidifier drying of food*. *Trends Food Sci. Technol.* Vol.8(3):75-79. doi:10.1016/S0924-2244(97) 01013-3. 1997.
- [6] L.O. Nelwan, Simulasi Konsumsi Energi Pengeringan Jagung Pipilan pada Berbagai Suhu dan Laju Aliran Udara Pengering. Prosiding Seminar Nasional Teknik Pertanian. Bandung, 11-12 Desember 2011.
- [7] R.Harini, Tingkat efisiensi perubahan usaha tani jahe merah di Kecamatan Seyegan Kabupaten Sleman. *J. Majalah Geografi Indonesia* 17 (2) 81-94. 2013.
- [8] D. Biksono, Distribusi Suhu dan Kecepatan Aliran Udara dari Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap untuk Ruang Pengering Tipe Drum Horizontal dengan Bantuan *Computational Fluid Dynamics*, *Jurnal Teknologi*, Vol.10 no.1. Pp.86-99, 2022.
- [9] D. Biksono, *Teknik Pengeringan Dasar*, Penerbit Deepublish, Yogyakarta, ISBN : 978-623-02-3880-2, ISBN-E : 978-623-02-5134-4 (PDF). 2021.
- [10] BSN, *Gabah standar mutu*, Badan Standar Nasional, Jakarta. 1987
- [9] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* (Edisi ke-3). Boca Raton, Florida, Amerika Serikat: CRC Press Taylor & Francis Group. 2006
- [12] H.J. Shei and Y.L. Chen, *Computer Simulation on Intermittent Drying of Rough Rice* . *Drying Technology*. 20(3) : 615-636. 2002.
- [13] W.F, Stoecker and J.W. Jones, *Refrigeration and Air Conditioning Second Edition*, McGraw-Hill, Inc. New York. 1992.