

# Karakteristik Batu Basalt Sebagai Media Penyimpan Panas Pembakaran Biomassa pada Sistem Pengering Gabah

M Ridwan Dwi Astanto<sup>1</sup>, Leopold Oscar Nelwan<sup>1\*</sup>, Edy Hartulistiyoso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University

\*email korespondensi: lonelwan@yahoo.com

Info Artikel	Abstract
<p><i>Diajukan: 15 Juni 2022</i> <i>Diterima: 20 Desember 2022</i></p> <p><b>Keyword:</b> heat charging; heat discharging; basalt rock; heat storage; paddy</p> <p><b>Kata Kunci:</b> charging; discharging; batu basalt; penyimpanan panas; gabah</p>	<p><i>The objectives of this research were to study the characteristics of thermal storage basalt rock by using biomass combustion with respect to manual adjusted airflow, combustion rate and the gap distance between the storage base and the furnace base as well as to evaluate the performance of the heat storage system for paddy drying. The heat storage characteristics experiment was carried out in two stages, namely heat charging and discharging. The tests were carried out with two gap distances, namely 23 cm and 30 cm. In general, the closer distance (23 cm) gives better performance, where at the targeted outlet temperature of 40°C, an average discharging time of 664 minutes and a discharging efficiency of 73.5% were obtained. At the targeted outlet temperature of 45°C, an average discharging time of 452 minutes with an average discharging efficiency of 65.75% were obtained. Furthermore, the heat storage system was applied for paddy drying. The drying experiment was carried out twice, each using an average outlet air temperature of 45.5°C and 41.4°C with an initial grain moisture content of 22.82 and 13.88 %w.b., respectively. Drying time of 360 minutes for the first experiment and 420 minutes for the second experiment with specific energy consumption of 5.45 MJ/kg evaporated water and 5.31 MJ/kg evaporated water, respectively were obtained. Even though it uses direct heating by using coconut shell combustion, this drying method did not affect the aroma of the rice produced.</i></p> <p><b>Abstrak</b></p> <p>Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik penyimpanan termal batu basalt yang menggunakan pembakaran biomassa dengan pengaturan aliran udara secara manual, laju pembakaran dan jarak alas tungku serta mengevaluasi kinerja sistem penyimpanan panas pada tungku biomassa untuk pengeringan gabah. Percobaan penyimpanan panas dilakukan dengan dua tahap yaitu <i>charging</i> dan <i>discharging</i>. Pengujian dilakukan dengan dua jarak alas bahan bakar tungku dengan batu basalt yaitu 23 cm dan 30 cm. Secara umum jarak yang lebih dekat (23 cm) memberikan kinerja yang lebih baik yaitu pada suhu outlet 40°C diperoleh waktu discharging rata – rata sebesar 664 menit dan efisiensi discharging sebesar 73,5%. Pada suhu outlet 45°C, diperoleh waktu discharging rata-rata sebesar 452 menit dengan efisiensi discharging rata-rata sebesar 65,75%. Selanjutnya, sistem penyimpanan panas diaplikasikan untuk pengeringan gabah. Percobaan pengeringan dilakukan sebanyak dua kali yang masing-masing menggunakan dengan menggunakan suhu udara outlet rata-rata masing-masing 45,5°C dan 41,4°C dengan kadar air awal gabah masing-masing 22,82 %bb dan 13,88 %bb. Waktu pengeringan 360 menit diperoleh untuk percobaan yang pertama dan 420 menit diperoleh untuk percobaan kedua dengan konsumsi energi spesifik masing-masing sebesar 5,45 MJ/kg air yang diuapkan dan 5,31 MJ/kg air yang diuapkan. Walaupun menggunakan pemanasan langsung menggunakan pembakaran tempurung kelapa, metode pengeringan ini tidak mempengaruhi aroma beras yang dihasilkan.</p>

## 1. Pendahuluan

Salah satu sumber panas pada mesin pengering yang sering digunakan adalah biomassa. Salah satu kekurangan biomassa padat adalah panas yang dihasilkan berfluktuasi tergantung dari jumlah bahan bakar yang digunakan serta suplai udara. Oleh karena itu, jika pengeringan dilakukan dengan menggunakan tungku bahan bakar padat yang tidak dikontrol, pengoperasiannya kurang praktis karena tungku harus selalu diawasi dalam hal suplai bahan bakar ataupun suhu pembakaran. Penggunaan sistem penyimpanan panas dapat mengurangi fluktuasi suhu dari tungku biomassa.

Fungsi utama dari penyimpanan panas adalah untuk mengatasi ketidaksesuaian antara pembangkit energi dan penggunaan energinya (Cabeza *et al.* 2015). Terdapat tiga langkah dalam proses penyimpanan panas yaitu pengisian (*charging*), penyimpanan (*storage*), dan pengosongan (*discharging*) (Cabeza *et al.* 2015). Panas yang disimpan dapat dalam bentuk panas sensibel, panas laten, maupun energi potensial kimia. Penyimpanan panas juga dapat disimpan dengan cara mengkombinasikan antara sensibel dengan laten.

Sistem penyimpanan panas sensibel dan laten adalah sistem yang paling umum digunakan karena desain yang sederhana serta pengoperasiannya cukup mudah dan ekonomis. Menurut Singh *et al.* (2010) berdasarkan aspek teknologi dan ekonomi, penyimpanan panas sensibel lebih baik dibandingkan dengan penyimpanan panas laten. Bahan yang digunakan untuk penyimpanan panas sensibel tidak mahal dan memiliki konduktivitas yang lebih besar dibanding penyimpanan panas laten. Penyimpanan panas sensibel dengan batu sebagai bahan penyimpan panas cukup potensial karena teknologinya relatif sederhana dan biayanya rendah.

Batu basalt merupakan salah satu dari beberapa material yang dapat digunakan untuk penyimpanan panas sensibel. Menurut Zanganeh *et al.* (2014) keuntungan menggunakan batu basalt sebagai media penyimpanan panas yaitu (1) sumber daya melimpah dan ekonomis, (2) bisa diaplikasikan dalam berbagai rentang suhu, (3) perpindahan panas secara langsung dalam ruang penyimpanan panas, (4) tidak mengalami penurunan kualitas, (5) aman untuk digunakan, (6) terhindar dari korosif. Tabel 1 menunjukkan material penyimpanan panas dari beberapa literatur dengan berbagai tipe material yang sesuai untuk sistem penyimpanan panas.

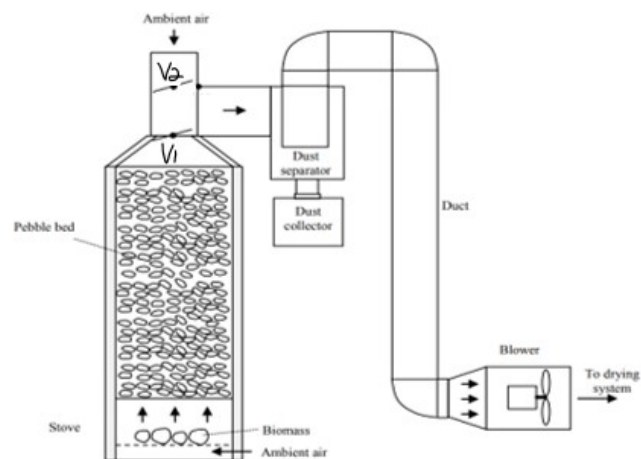
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi potensi dan daya tahan batuan alam sebagai material penyimpanan panas pada suhu tertentu dan suhu tinggi. Nahhas *et al.* (2019) mengidentifikasi komponen kristal, komposisi kimia dan mempelajari pengaruh fisik pada batu basalt yang dilakukan pada suhu mencapai 1000°C. Poole (2009) mengukur penurunan konduktivitas panas batu kapur mencapai 366 °C dan batu granit 537 °C dengan tiga kali pengulangan. Grirate *et al.* (2016) mengukur kapasitas panas jenis enam jenis batuan dari Maroko (kuarsit, basal, granit, hornfels, dan marmer) pada 300 °C dan diperoleh 620-950 kJ/kg°C dengan kerapatan 2570-3020 kg/m<sup>3</sup>. Jemmal *et al.* (2016) menyimpulkan bahwa batu kuarsit dan flint secara termal cukup stabil sebagai sistem penyimpanan panas sampai suhu 550°C dengan siklus sampai 1000 kali. Hanchen *et al.* (2011) menganalisis lapisan batuan steatit untuk pabrik CSP berbasis udara temperatur mencapai 520 °C dan mengembangkan model pindah panas untuk sistem penyimpanan dimana efisiensi keseluruhan lebih dari 90%. Liu *et al.* (2014) mempelajari secara eksperimental penyimpanan panas dan perilaku

perpindahan panas udara terkompresi yang mengalir melalui lapisan batu granit pada suhu mencapai 120 °C.

**Tabel 1.**Material penyimpanan panas

No	Medium	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Panas Spesifik (kJ/kg.K)	Konduktivitas Panas (W/m.K)
1	Basalt	2610 – 2670	0.898	1.55 – 3.2
2	Alumina	4000	0.900	11
3	Brick	1698	0.840	0.69
4	Cast Iron	7900	0.837	29.3
5	Ceramics	3550	0.900	1.3
6	Concrete	2240	1.130	0.9 – 1.3
7	Granite	2640	0.820.	1.73 – 3.98
8	Hornfels	2400 – 2800	0.700	1.5
9	Limerock	2500	0.900	1.26 – 1.33
10	Marble	2600	0.800	2.07 – 2.94
11	Pure Iron	7897	0.452	73
12	Quartize	2210 – 2770	0.800	2
13	Sandrock	2200	0.710	1.83

Sumber: Alva *et al*, 2018; Esence *et al*, 2017; singh *et al*, 2010



**Gambar 1.** Desain skematik sistem penyimpanan panas sensibel batu yang terintegrasi dengan tungku pembakaran biomassa (Nelwan *et al.* 2018)

Gambar 1 memperlihatkan diagram skematik sistem penyimpanan panas batu yang terintegrasi dengan tungku pembakaran biomassa yang didesain oleh Nelwan *et al.* 2018. Sistem tersebut terdiri dari ruang bakar di bagian bawah, kemudian tumpukan batu yang diletakkan di atas alas batu yang berpori serta ruang pencampuran udara di bagian atas. Pada penelitian tersebut pada saat proses discharging belum dilakukan konfigurasi katup secara optimum sehingga suhu yang didapatkan 60

°C dan terus meningkat hingga 80 °C dimana suhu tersebut tidak sesuai untuk diaplikasikan pada pengeringan gabah.

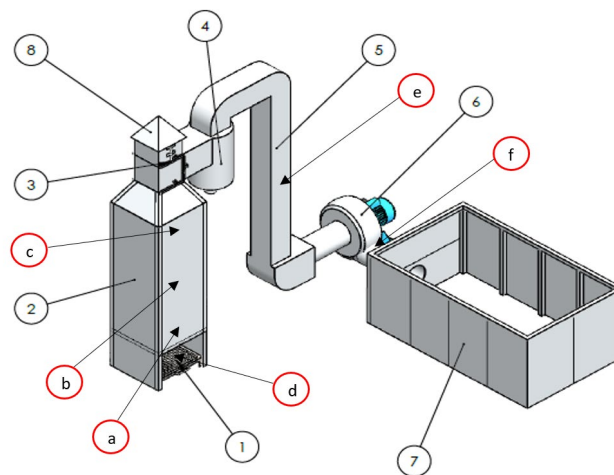
Dalam pengeringan gabah pada umumnya suhu yang dibutuhkan berkisar 40°C – 45°C, sedangkan suhu yang tersimpan pada sistem penyimpanan panas batu basalt terlalu tinggi untuk langsung dialirkan ke ruang pengering. Oleh karena itu komposisi laju aliran udara dari tungku dan udara lingkungan harus diatur agar proses pengeringan dapat berlangsung pada kondisi yang diijinkan dan lebih efisien dalam penggunaan energinya. Selain itu, efek dari jarak biomasa yang dibakar dengan alas batu pada tungku yang mempengaruhi proses pembakaran biomasa dan kehilangan panas belum dikaji. Tujuan penelitian ini mempelajari karakteristik sistem penyimpanan panas batu basalt yang dikembangkan Nelwan *et al* (2018) menggunakan tempurung kelapa sebagai bahan bakar biomasa dengan pengaturan aliran udara secara manual, laju pembakaran dan jarak alas tungku serta mengevaluasi kinerjanya untuk pengeringan gabah.

## 2. Metode Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Desember 2021 sampai Januari 2022 di Laboratorium Energi Terbarukan, Departemen Teknik Pertanian Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah tungku penyimpanan panas yang terintegrasi dengan tungku biomassa (Gambar 2), *blower*, *recorder*, oven, termometer bola basah, termometer bola kering, anemometer *hot wire*, *National Instrument*, termokopel kabel tipe K, termokopel batang tipe K, *moisture tester* PM – 300, mesin *huller* (Satake, Japan), dan *rice polisher* (Satake, Japan). Bahan yang digunakan pada penelitian adalah gabah varietas Ciherang sebanyak 840 kg, tempurung kelapa kadar air 10%b.b., dan batu basalt yang diperoleh dari Sukabumi.

### 2.1 Desain Sistem Alat Penyimpanan Panas

Desain penyimpanan panas yang terintegrasi dengan tungku biomassa dengan volume 540 L adalah desain dari Nelwan *et al* (2018) dan secara piktorial disajikan pada Gambar 2. Dinding ruang pembakaran dan penyimpanan panas terbuat dari pelat baja dan diisolasi dengan wol keramik dan wol kaca. Dinding saluran dari penyimpanan panas juga dilapisi dengan wol kaca. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi pada katup menggunakan sistem buka tutup seperti kaca nako kemudian dilakukan modifikasi pada jarak alas batu dengan lantai ruang pembakaran. Batu yang digunakan untuk menyimpan panas adalah batu basalt dengan karakteristik yang dapat dilihat pada Nelwan *et al* (2018). Batu tersebut diletakkan didalam ruang penyimpanan panas mencapai ketinggian 1500 mm atau sekitar 735 kg. Biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar adalah tempurung kelapa.



**Gambar 2.** Tungku penyimpanan panas terintegrasi dengan tungku biomassa Nelwan et al. (2018) yang dimodifikasi pada bagian katup dan alas batu

Keterangan: (1) ruang pembakaran; (2) tungku penyimpanan panas; (3) katup; (4) *dust collector*; (5) *ducting*; (6) *blower*; (7) bak pengering; (8) tutup katup; (a, b, c, d, e, f) titik pengukuran.

**2.2 Prosedur Penelitian**

**2.2.1 Percobaan Charging dan Discharging**

Skenario percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2. Berat tempurung untuk setiap percobaan adalah 15 kg. Selanjutnya, percobaan dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap *charging* dan *discharging*. Target suhu ruang pencampuran (suhu outlet) dicapai dengan mengatur katup V1 dan V2 secara manual.

**Tabel 2.** Skenario Percobaan

	Percobaan			
	X <sub>1</sub>  Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>  Y <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>  Y <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>  Y <sub>4</sub>
Lama <i>charging</i> (menit)	40	40	80	80
Target suhu ruang pencampuran/ Suhu Outlet (°C)	40	45	40	45

Berdasarkan tabel 2 Percobaan *charging* dan *discharging* terdiri dari 8 percobaan, 4 percobaan dengan kode X dan 4 percobaan dengan kode Y. perbedaan percobaan X dan Y terdapat pada jarak alas pembakaran dengan tumpukan batu basalt. Percobaan X jaraknya 30 cm dan percobaan Y jaraknya 23 cm. Berat tempurung kelapa yang digunakan sama untuk semua percobaan yaitu 15 kg dengan durasi *charging* berbeda yaitu *charging* cepat 40 menit dan *charging* lambat 80 menit. Waktu *charging* 40 menit dan 80 menit tersebut dihitung setelah pembakaran dimulai. Untuk *charging* cepat 40 menit dilakukan 2 kali percobaan dengan target suhu outlet 40 °C untuk percobaan X<sub>1</sub> dan target suhu 45 °C untuk

percobaan X<sub>2</sub>, kemudian untuk *charging* lambat 80 menit juga dilakukan 2 kali percobaan dengan target suhu outlet 40 °C untuk percobaan X<sub>3</sub> dan target suhu 45 °C untuk percobaan X<sub>4</sub>. Pada percobaan Y dilakukan hal yang sama seperti percobaan X.

Proses *charging* atau pengisian dimulai dengan membakar biomassa di dalam tungku pembakaran. Kemudian menyalakan *blower*, pada proses pengisian penyimpanan panas katup V<sub>1</sub> dibuka dan V<sub>2</sub> ditutup agar panas tidak terbuang melalui katup V<sub>2</sub>.

Proses *discharging* dimulai dengan mengeluarkan bahan bakar biomassa dari ruang pembakaran kemudian katup V<sub>1</sub> dan V<sub>2</sub> dibuka. Buka katup V<sub>1</sub> diatur secara manual sedemikian hingga laju aliran udara dan udara panas yang masuk ke ruang pencampuran sesuai sehingga mencapai suhu yang ditargetkan. Percobaan ini dilakukan untuk mendapatkan perhitungan efisiensi *discharging* dari sistem penyimpanan panas batu basalt. Proses *discharging* dihentikan ketika suhu outlet dibawah 37 °C atau suhu outlet dibawah 40 °C selama 3 menit dengan kondisi suhu yang tersimpan pada batu basalt lapisan atas dibawah 55 °C untuk target suhu outlet 40°C. Sedangkan untuk target target suhu outlet 45°C, proses *discharging* dihentikan ketika suhu outlet dibawah 42 °C atau suhu outlet dibawah 45 °C selama 3 menit dengan kondisi suhu yang tersimpan pada batu basalt lapisan atas dibawah 60°C. Berdasarkan praperobaan yang dilakukan, penurunan suhu akan berlangsung cepat menuju suhu lingkungan setelah kriteria tersebut tercapai.

Berdasarkan Gambar 2, pengukuran suhu menggunakan termokopel dilakukan pada titik (a) batu basalt lapisan bawah, (b) batu basalt lapisan tengah, (c) batu basalt lapisan atas, (d) ruang pembakaran dan (f) ruang pencampuran suhu. Pada titik (e) dilakukan pengukuran laju aliran udara dan kelembaban (RH) menggunakan anemometer *hot wire*.

Hasil pengamatan dan pengukuran pada percobaan *charging* dan *discharging* kemudian dilakukan analisis energi pada sistem penyimpanan panas menggunakan persamaan (Nelwan *et al.* 2018). (1) Energi yang digunakan untuk menaikkan suhu udara lingkungan selama proses *discharging*, (2) analisis energi dari pembakaran biomasa atau *charging* dan (3) efisiensi *discharging*.

$$Q_{disc} = \int_{\theta_{awal}}^{\theta_{akhir}} \dot{m} c_p (t_i - t_o) d\theta \tag{1}$$

- $Q_{disc}$  : energi pada saat *discharging* (kJ)
- $\dot{m}$  : massa aliran udara (kg/s)
- $c_p$  : kapasitas panas spesifik (kJ/kg °C)
- $\theta_{awal}$  : waktu awal *discharging* (°C)
- $\theta_{akhir}$  : waktu akhir *discharging* (°C)
- $t_i$  : suhu udara lingkungan (°C)
- $t_o$  : suhu ruang pencampuran (°C)

analisis energi dari *charging* atau pembakaran biomassa dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_b = \dot{m}_b h_b \theta_{ch} \tag{2}$$

- $Q_b$  : energi dari pembakaran biomassa (kJ)
- $\dot{m}_b$  : rata-rata laju pembakaran (kg/s)
- $h_b$  : nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)
- $\theta_{ch}$  : waktu *charging* (s)

Efisiensi *discharging*:

$$\eta_{disc} = \frac{Q_{disc}}{Q_b} \tag{3}$$

$\eta_{disc}$  : efisiensi *discharging* (%)

$Q_{disc}$  : energi pada saat *discharging* (kJ)

$Q_b$  : energi dari pembakaran biomassa (kJ)

### 2.2.2 Percobaan Pengeringan

Bak pengering berukuran panjang 2 meter, lebar 1 meter dan tinggi 0,5 meter. Gabah yang dikeringkan pada setiap perlakuan sebesar 420 kg dengan tinggi tumpukan 0,37 m. Berdasarkan hasil percobaan *charging* dan *discharging* kemudian dilakukan uji pengeringan pada gabah dengan target suhu 45 °C (pengeringan 1) dan 40 °C (pengeringan 2). Pengeringan gabah dilakukan saat sistem penyimpanan panas pada tahap *discharging* dimana tidak ada lagi suplai biomassa yang masuk ke ruang pembakaran.

Pengukuran kinerja pengeringan dengan sistem penyimpanan panas mencakup:

a. Suhu udara pengeringan

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan termokopel kabel *type K* dengan selang waktu 30 menit. Pengukuran dilakukan pada titik (1) suhu tumpukan gabah, (2) suhu lingkungan, (3) suhu inlet bak pengering.

b. Kelembaban Relative (RH) udara pengering

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sensor suhu bola basah dan bola kering dengan selang waktu 30 menit. Pengukuran dilakukan pada (1) RH lingkungan, (2) RH inlet dan (3) RH outlet bak pengering.

c. Kadar air bahan

Pengukuran kadar air gabah dilakukan pada saat sebelum dan selama proses pengeringan. Selama proses pengeringan berlangsung pengukuran dilakukan dengan interval 1 jam menggunakan metode gravimetri (oven) pada suhu 105 °C.

### 2.2.3 Pengujian aroma

Pengujian aroma pada penelitian ini bertujuan untuk membandingkan beras dari gabah yang dikeringkan menggunakan sistem penyimpanan panas dengan beras dari gabah yang dikeringkan menggunakan panas dari sinar matahari. Penilaian yang dilakukan berupa ada atau tidaknya perbedaan dari beras hasil pengeringan dengan sistem tungku penyimpanan panas yang diuji dengan menggunakan analisis statistik t-test. Panelis yang digunakan adalah panelis dengan jumlah 22 orang.

### 2.2.4 Analisis Konsumsi Energi pada Pengeringan

Konsumsi energi spesifik adalah perbandingan antara total input energi pada sistem pengering (MJ) dengan masa air yang diuapkan dari dalam bahan (kg). Jumlah air yang diuapkan dihitung berdasarkan kadar air awal dan akhir serta masa produk yang dikeringkan. Konsumsi energi spesifik dihitung dengan persamaan:

$$KES = \frac{E_{total}}{M_{uap}} \tag{4}$$

dimana

KES : Konsumsi energi spesifik (MJ/kg uap air)

$E_{total}$  : Total energi dihitung dari bahan bakar yang digunakan dan energi listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan kipas (MJ)

$M_{uap}$  : Masa air gabah yang menguap (kg)

Untuk energi termal saat pengeringan yang digunakan dari sistem penyimpanan ( $Q_{tp}$ ), dihitung sebagai berikut:

$$Q_{tp} = \int_{\theta_{awp}}^{\theta_{akp}} \dot{m}c_p(t_i - t_o)d\theta$$

dimana

$\theta_{awp}$  : waktu awal pengeringan (s)

$\theta_{akp}$  : waktu akhir pengeringan (s)

Karena pengeringan telah selesai (kadar air mencapai 14% b.b.) sebelum energi yang tersimpan pada sistem penyimpanan panas tidak layak, maka rasio energi pengeringan dihitung sebagai berikut:

$$\text{Rasio energi pengeringan} = \frac{Q_{tp}}{Q_{dp}} \times 100\% \tag{5}$$

$Q_{dp}$  adalah energi selama discharging pada percobaan pengeringan yang dilakukan dengan meneruskan pengoperasian discharging walaupun pengeringan telah selesai sampai pada kriteria proses discharging yang telah dijelaskan sebelumnya.  $Q_{dp}$  juga berdasarkan persamaan (1).

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Kinerja Sistem Penyimpanan Panas

Penelitian pengeringan gabah menggunakan sistem penyimpanan panas dilakukan dengan dua tahap, yaitu tahap *charging* dan tahap *discharging*. Setiap proses *charging* yang dilakukan dimulai dari kondisi tungku berada pada kondisi suhu lingkungan. Proses *charging* secara *pictorial* dapat dilihat pada gambar 3. Proses *charging* dilakukan dengan dua tipe, yaitu *charging* cepat dengan durai 40 menit dan *charging* lambat dengan durasi 80 menit. Proses *charging* dilakukan dengan cara memasukan bahan bakar ke ruang pembakaran kemudian meyalakan blower. *Charging* parameter yang diukur adalah jumlah bahan bakar yang digunakan. Pengumpanan dilakukan setiap 5 menit sekali untuk waktu *charging* 40 menit dan 10 menit sekali untuk waktu 80 menit dengan berat setiap kali pengumpanan 1,9 kg tempurung kelapa.

Proses *discharging* dimulai ketika proses *charging* selesai atau dalam kondisi tidak ada lagi suplai bahan bakar biomassa tempurung kelapa yang masuk keruang pembakaran. Dalam proses *discharging* posisi katup dirubah, katup  $V_1$  dan  $V_2$  diatur sedemikian sehingga target yang diinginkan dalam penelitian ini yaitu outlet suhu 40 °C dan 45 °C tercapai. Selama proses *discharging* berlangsung dilakukan pengontrolan katup  $V_1$  agar suhu outlet tidak terlalu rendah dan tidak terlalu tinggi dari target suhu outlet. Tabel 3 menunjukkan hasil penelitian saat proses *charging* dan *discharging* berlangsung. Tempurung kelapa yang digunakan sebagai bahan bakar selama pengeringan adalah 15 kg





**Gambar 3.** Proses *charging* berlangsung.

**Tabel 3.** Kinerja sistem tungku penyimpanan panas

Tahap	Parameter	Skenario X				Skenario Y			
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
<i>Charging</i>	Waktu								
	<i>Charging</i> (menit)	40	40	80	80	40	40	80	80
<i>Discharging</i>	Waktu								
	<i>Discharging</i> (menit)	541	399	547	439	667	453	662	452
	Rata Rata Suhu Ruang Pencampur	40.9 ± 1.6	45.6 ± 1.2	41.2 ± 1.1	45.6 ± 1.6	41.5 ± 1.3	45.7 ± 1.3	41.6 ± 1.2	45.5 ± 1.6
	Rata Rata Suhu Lingkungan (°C)								
	<i>Discharging</i>								
	Rata Rata Suhu Lingkungan (°C)	30.6 ± 2.5	32.8 ± 2.8	30.9 ± 2.2	32.9 ± 2.7	29.6 ± 1.7	32.3 ± 2.4	29.7 ± 1.6	31.7 ± 2.9
	Laju Aliran Udara (m <sup>3</sup> /s)	0.29	0.3	0.29	0.30	0.29	0.30	0.28	0.31

Tabel 3 memperlihatkan bahwa kecenderungan waktu *discharging* yang lebih lama terjadi pada penggunaan suhu outlet 40 °C (skenario X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub>, Y<sub>1</sub> dan Y<sub>3</sub>). Pada saat suhu outlet diatur pada suhu 45 °C pada percobaan X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, Y<sub>2</sub> dan Y<sub>4</sub> waktu *discharging* lebih cepat, hal ini terjadi karena bukaan katup V<sub>1</sub> dibuka lebih besar pada saat suhu outlet diatur 45 °C dibandingkan pada saat suhu outlet 40 °C. Jadi walaupun total laju aliran udara sama untuk seluruh skenario, laju aliran udara yang melalui

sistem penyimpanan termal (tumpukan batu) lebih besar pada suhu outlet 45°C dibandingkan dengan suhu outlet 40°C.

Tabel 3 juga menunjukkan bahwa lama waktu *discharging* dari skenario Y (jarak alas batu 23 cm) lebih tinggi dibandingkan dengan skenario X (jarak alas batu 30 cm). Pada percobaan X<sub>1</sub> dan X<sub>3</sub> waktu *discharging* rata - rata 544 menit sedangkan pada percobaan Y<sub>1</sub> dan Y<sub>3</sub> 644 menit. Pada percobaan X<sub>2</sub> dan X<sub>4</sub> waktu *discharging* rata - rata 419 menit sedangkan pada percobaan Y<sub>2</sub> dan Y<sub>4</sub> 452 menit. Hal ini menunjukkan bahwa penyimpanan energi pada skenario Y lebih besar dibandingkan X. Artinya, volume ruang bakar pada jarak 23 cm telah memadai untuk terjadinya pembakaran yang baik dengan kehilangan panas yang lebih rendah.

**3.2 Energi Selama Proses Discharging**

Tabel 4 menunjukkan energi dan efisiensi *discharging* yang diperoleh. Seluruh skenario menggunakan energi biomasa yang sama yaitu 225 MJ, karena jumlah bahan yang digunakan sama yaitu 15 kg.

**Tabel 4.** Energi *charging*, energi *discharging* dan efisiensi *discharging*

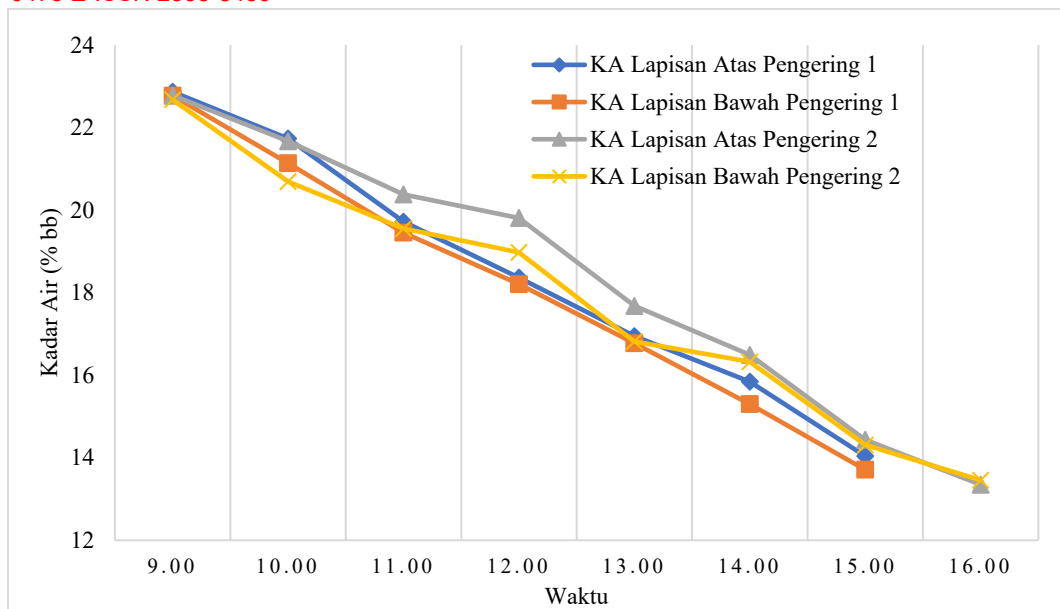
Parameter	Percobaan							
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
Energi								
<i>Discharging</i> (MJ)	117.7	119.7	125.1	124.2	172.5	147.1	162.8	148.7
Efisiensi								
<i>Discharging</i> (%)	52.4	53.2	55.6	55.2	74.6	65.4	72.4	66.1

Tabel 4 menunjukkan energi yang diperoleh selama proses *discharging* dan efisiensi *discharging*. Rendahnya efisiensi *discharging* pada percobaan X dipengaruhi oleh kehilangan panas pada saat proses pembakaran biomassa. Hal ini terjadi karena 1) penutup ruang pembakaran terbuat dari plat besi piringan yang tidak terisolasi dengan sistem, 2) jarak alas pembakaran biomasa dari batu basalt sehingga cukup banyak panas yang terbuang diruang pembakaran, 3) kehilangan panas juga terjadi melalui dinding tungku selama proses *charging* dan *discharging* berlangsung.

Tabel 4 memperlihatkan perbedaan efisiensi *discharging* antara percobaan X dan Y. Jarak alas pembakaran 23 cm lebih dekat dengan tumpukan batu basalt dapat mengurangi kehilangan panas atau energi pada saat proses pembakaran biomasa atau proses *charging* berlangsung.

**3.3 Sistem Penyimpanan Panas untuk Pengeringan Gabah**

Berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran pada sistem penyimpanan panas maka dilakukan pengeringan gabah dengan suhu yang berbeda yaitu pengeringan dengan target suhu 45 °C (pengeringan 1) dan suhu 40 °C (pengeringan 2) dengan waktu *charging* selama 40 menit. Hasil pengukuran kadar air selama pengeringan berlangsung dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan kinerja umum dari pengeringan disajikan pada Tabel 5.



**Gambar 4.** Hubungan penurunan kadar air terhadap waktu selama proses pengeringan 1 dan pengeringan 2

**Tabel 5.** Kinerja pengeringan gabah

Parameter	Perlakuan	
	Pengeringan 1	Pengeringan 2
Suhu udara lingkungan (°C)	32,84	29,43
KA awal (% bb)	22,82%	22,73
KA akhir (% bb)	13,88%	13,40%
Suhu inlet pengering (°C)	45,52	41,37
RH inlet (%)	39,12	43,2
Laju aliran udara (kg/s)	0,31	0,29
Waktu Pengeringan (menit)	360	420
Energi bahan bakar (MJ)	225	225
Energi discharging (MJ)	151,1	167,8
Energi selama waktu pengeringan (MJ)	104,3	109,0
Energi listrik (MJ)	13,0	15,1
Konsumsi energi spesifik (MJ/kg uap air)	5,45	5,31
Rasio energi pengeringan (%)	69,0	65,0

Kondisi udara pada pengeringan 1 dengan suhu yang lebih tinggi dan RH yang lebih rendah menghasilkan waktu pengeringan yang lebih singkat, namun kadar air akhir yang dicapai pada pengeringan 2 lebih rendah. Pada waktu pengeringan 360 menit, kadar air pada pengeringan 2 masih lebih besar dari 14%b.b. sehingga pengeringan dilanjutkan. Gabah dikeringkan hingga kadar kurang dari 14% bb mengacu pada SNI (6128:2015) terkait kadar air optimum gabah kering giling. Perbedaan suhu pengeringan yang dilakukan mempengaruhi kecepatan pengeringan, semakin tinggi suhu yang digunakan akan mempercepat proses pengeringan gabah. Kecepatan aliran udara merupakan salah

satu faktor yang mempengaruhi suhu dan kelembaban yang ada didalam ruang pengering. Suhu pengeringan yang meningkat menyebabkan kelembaban relatif udara menjadi lebih rendah sehingga kapasitas udara untuk membawa uap semakin meningkat dan mempersingkat waktu pengeringan (Djaeni *et al.* 2013). Selama proses pengeringan berlangsung dapat dilihat pada gambar 4, penurunan kadar air pada gabah lapisan atas dan gabah lapisan bawah pada pengeringan 1 dan 2 terjadi di bawah 1%. Hal ini terjadi karena selama proses pengeringan berlangsung dilakukan pengadukan. Pengadukan dilakukan 90 menit sekali selama pengeringan berlangsung agar terjadi pencampuran antara gabah dengan kadar air yang berbeda sehingga terjadi perpindahan air antar gabah yang membuat kadar air menjadi lebih merata.

### 3.4 Konsumsi Energi Pengeringan Tungku Penyimpanan Panas

Hasil analisis konsumsi energi proses pengeringan juga dapat dilihat pada Tabel 5. Dalam perhitungan ini, energi bahan bakar berdasarkan perhitungan pada saat charging untuk kedua percobaan pengeringan adalah 225 MJ karena sama-sama menggunakan 15 kg tempurung. Akan tetapi dengan pengaturan suhu outlet dan waktu pengeringan yang berbeda, maka energi yang digunakan untuk proses discharging berbeda, yaitu masing-masing sebesar 151,1 MJ dan 167,8 MJ. Karena kadar air akhir yang lebih tinggi pada pengeringan 1, maka jumlah air yang diuapkan menjadi lebih sedikit. Oleh karena itulah konsumsi energi spesifik pada pengeringan 1 sebesar 5,45 MJ/kg air yang diuapkan sedangkan pada pengeringan 2 konsumsi energinya menjadi sedikit lebih rendah yaitu sebesar 5,31 MJ/kg air yang diuapkan. Perhitungan ini belum memperhitungkan energi yang masih tersimpan dalam batu yang masih dapat digunakan. Konsumsi energi yang paling tinggi terjadi pada saat proses pembakaran biomasa atau proses charging berlangsung karena cukup banyak energi panas yang hilang diruang pembakaran. Rasio energi pengeringan pada pengeringan 1 dan pengeringan 2 masing-masing adalah 69,0% dan 65,0%. Hal ini disebabkan penggunaan energi termal pada pengeringan 2 lebih besar sehubungan dengan waktu pengeringan yang lebih lama. Selain itu, hal ini juga berarti bahwa pada kedua percobaan terdapat 31% dan 35% energi yang tersimpan yang belum digunakan untuk pengeringan.

### 3.5 Pengujian Aroma

Hasil pengujian aroma dari 22 panelis yang diperoleh menunjukkan 18 panelis menyatakan nilai yang sama antara beras hasil pengeringan tungku penyimpanan panas dengan beras hasil penjemuran matahari, sedangkan 4 panelis lainnya memberikan nilai berbeda. Berdasarkan hasil uji independent t-test antara nilai beras hasil pengeringan tungku pada data sama dan data berbeda diperoleh nilai *F* hitung *levange test* pada sebesar 1,265 dengan probabilitas adalah 0,274 karena probabilitas  $> 0,05$  maka  $H_1$  ditolak berarti nilai beras hasil pengeringan tungku pada data sama dan data berbeda mempunyai varian yang sama (identik). Jadi dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan antara nilai beras hasil pengeringan tungku dengan beras hasil pengeringan sinar matahari. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, pengeringan dengan metode sistem penyimpanan panas tidak menimbulkan bau atau aroma asap pada beras hasil pengeringan dengan sistem penyimpanan panas.

#### 4. Kesimpulan

Sistem pengaturan katup udara lingkungan secara manual pada sistem penyimpanan panas telah dapat digunakan untuk mendekati target suhu udara untuk pengeringan yaitu 40-45°C. Jarak alas tungku yang lebih dekat (23 cm) memberikan kinerja dari sistem penyimpanan panas yang lebih baik (efisiensi discharging 65.4% - 74.6%) dibandingkan dengan jarak yang lebih jauh (30 cm) yang memberikan efisiensi discharging 52.4% - 55.6%). Hal ini menunjukkan jarak 23 cm telah memadai untuk volume ruang bakar dan kehilangan panas yang lebih rendah. Waktu charging 40 menit dan 80 menit tidak banyak memberikan perbedaan terhadap kinerja efisiensi discharging sistem penyimpanan panas. Target suhu outlet 40°C memberikan waktu discharging yang lebih lama yaitu 541-667 menit dibandingkan 45°C yaitu 399-453 menit. Pada percobaan pengeringan, gabah yang digunakan 420 kg dengan kadar air awal 22,7-22,8 %b.b. Kadar air akhir yang dituju adalah di bawah 14% b.b dan waktu charging yang digunakan adalah 40 menit. Dengan mengatur katup secara manual dilakukan dua percobaan pengeringan dengan target suhu udara pengeringan masing-masing 45°C dan 40°C. Untuk kedua percobaan ini diperoleh masing-masing rata-rata udara pengeringan adalah suhu 45,52 dan 41,37°C, kadar air akhir 13,88 %bb dan 13,44%b.b. lama pengeringan 360 menit dan 420 menit serta konsumsi energi spesifik 5,45 dan 5,30 MJ/kg air yang diuapkan. Energi termal tersimpan yang belum digunakan untuk pengeringan mencapai 35%, sehingga jumlah gabah yang dikeringkan masih berpotensi untuk ditingkatkan. Uji independent t-test pada hasil pengujian aroma menunjukkan tidak ada perbedaan antara beras hasil pengeringan tungku dengan beras hasil penjemuran.

#### 5. Daftar Pustaka

- Alva, G., Lin, Y., Fang, G., 2018. *An Overview Of Thermal Energy Storage Systems*. Energy 144, 341–378.
- Cabeza LF, Martorell I, Miro L, Fernandez AI, Barreneche C. 2015. *Advance In Thermal Energy Storage (TES) Systems*. Woodhead publishing series energy. Number 66
- Djaeni M, Ayuningtyas D, Asiah N, Hargono, Ratnawati, Jumali, dan Wiratno. 2013. *Paddy drying in mixed adsorption dryer with zeolite: drying rate and time estimation*. Reaktor. 14(3):73-178.
- Esence, T., Bruch, A., Molina, S., Stutz, B., Fourmigué, J.F., 2017. *A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems*. Sol. Energy 153, 628–654.
- Grirate H, Zari N, Elamrani Iz, Couturier R., Elmchaouri A, Belcadi S, Tochon, P. 2013. *Characterization of several Moroccan rocks used as filler material for thermal energy storage in CSP power plants*. Energy Procedia 00(2013).
- Hanchen M, Bruckner S, Steinfeld A. 2011. *High Temperature Thermal Storage Using a Packed Bed Of Rocks-Heat Transfer Analysis and Experimental Validation*, Appl. Therm. Eng. 311798-1806.
- Jemmal Y, Zari N, Maaroufi M. 2017. *Experimental Characterization of Siliceous Rocks to be Used as Filler Materials For Air – Rock Packed Bed Thermal Energy Storage Systems in Concretated Solar Power Plants*. Sol Energy Mater Sol Cell;171:33-42.
- Liu J, Wang L, Yang L, Yue L, Chai L, Sheng Y, Chen H, Tan C. 2014. *Experimental Study On Heat Storage And Transfer Characteristics Of Supercritical Air in Rock Bed*. Int. J. Heat. Mass Trans. 77 883-890.

- Nahhas T, Py X, Sadiki N. 2019. Experimental investigation of basalt rocks as storage material for high temperature concreted solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110 (2019) 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.060>
- Nelwan LO, Wulandari D, Subrata IDM. 2018. A preliminary study on rock bed heat storage from biomass combustion for rice drying. *J IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 147: 1-8.
- Poole HH. IV. 2009. *On Thermal Conductivity Of Some Rocks At High Temperatures*. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal Of Science. 24:45-62.
- Singh H, R.P. Saini, J.S. Saini. 2010. *A Review On Packed Bed Solar Energy Storage Sitems*, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14: 1059-1069.
- Zanganeh G, Pedretti A, Haselbacher A, Steinfeld A. 2014. Design of Packed Bed Thermal Energy Storage Sitems For High-Temperature Industrial Process Heat. *Applied Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.110>