

# STUDI ANALISIS EFISIENSI ENERGI DAN TEKNO EKONOMI PENGERINGAN BUTIRAN MULTI TAHAP

J.P. Sitompul<sup>(1)</sup>, S. Sumardiono<sup>(2)</sup>, dan M.W. Sariyanto<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Lab. Termodinamika, Pusat Penelitian Antar Universitas ITB

<sup>(3)</sup> Alumni Jurusan Teknik Kimia ITB

Jl. Ganeca 10, Bandung, 40132

E-mail: johnner@termo.pauir.itb.ac.id

## Ringkasan

Makalah ini bertujuan menganalisis energi dalam operasi pengeringan, karena energi merupakan tolok ukur besarnya efisiensi proses. Lebih lanjut tekno ekonomi juga dipelajari pada pengeringan produk pertanian, seperti padi, dalam deep-bed (unggun diam) multi tahap dengan fokus kasus dua tahap. Evaluasi efisiensi dilakukan terhadap data-data eksperimen meliputi efisiensi termal, efisiensi pengeringan, dan tekno ekonomi terhadap kebutuhan energi selama operasi pengeringan. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk pengeringan satu dan dua tahap, kenaikan tinggi unggun pada temperatur udara pengering konstan menyebabkan efisiensi pengeringan, efisiensi termal, kebutuhan energi, dan biaya operasi naik secara signifikan. Efisiensi termal, efisiensi pengeringan, dan kebutuhan energi turun seiring dengan kenaikan temperatur udara masuk, kondisi ini mengakibatkan biaya operasi pengeringan turun. Lebih jauh, untuk pengeringan unggun diam dua tahap memberikan efisiensi termal dan efisiensi pengeringan yang lebih besar dengan kebutuhan energi dan biaya operasi yang lebih rendah di bandingkan pengeringan satu tahap.

## Abstract

This paper concerns on analysis of energy in drying operation, because energy is crucial and determines process efficiency throughout. Further, techno-economy is also studied for drying agricultural product, such as paddy, in a multi-stage deep-bed dryer with focussing in study two-stage one. Thermal and drying efficiency have been evaluated from experiment data. Moreover, the techno-economy in view of energy consumption for drying operation is also considered. The analysis shows that the increasing of bed height for constant drying air temperature will significantly increase thermal and drying efficiency as well as energy consumption for dryer operation. Further, thermal efficiency, drying efficiency and energy consumption decreases with increasing the inlet drying air temperature which in turn reducing of drying cost operation. The study shows that the two-stage deep-bed dryer have higher thermal and drying efficiency and lower energy consumption compared to one-stage dryer.

**Keywords:** drying, thermal efficiency, drying efficiency, techno-economy

## 1. PENDAHULUAN

Pengeringan produk pertanian di Indonesia umumnya masih memanfaatkan tenaga sinar matahari. Kondisi ini tentunya sangat dibatasi oleh keadaan musim, memerlukan waktu pengeringan yang relatif lebih lama, membutuhkan tempat yang luas dan tenaga kerja yang banyak serta sangat tergantung pada keadaan cuaca. Ditinjau dari sumber energi untuk operasi pengeringan, sumber energi tersebut dapat berasal dari batu bara,

minyak, listrik, matahari dan biomassa. Kebutuhan energi dalam pengeringan merupakan tolok ukur besarnya efisiensi yang bertujuan untuk meningkatkan keuntungan proses dan dapat dijadikan sebagai dasar perhitungan biaya operasi pengeringan. Pengeringan bahan butiran yang berkadar air tinggi, dapat dilakukan baik dalam jangka waktu lama pada suhu udara yang rendah dengan kelembaban udara yang tinggi atau dalam jangka waktu yang lebih pendek pada suhu udara

<sup>(2)</sup> Mahasiswa Magister Teknik Kimia ITB Program DUE Karyasiswa dengan penempatan di Fak. Teknik Univ. Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto Tembalang Semarang, 50239. E-mail:sumard@alumni.undip.ac.id

yang tinggi dengan kelembaban udara yang rendah. Jika waktu pengeringan terlalu lama, dapat menyebabkan penjamuran atau pembusukan terlebih dahulu sebelum kering, apalagi jika dilakukan pada musim penghujan. Sebaliknya temperatur pengeringan yang terlalu tinggi dengan kelembaban udara rendah bisa menyebabkan kerusakan fisik maupun kimia dalam bahan. Operasi pengeringan merupakan peristiwa perpindahan yang melibatkan perpindahan massa, panas dan momentum serta secara umum parameter-parameter model yang sangat berinteraksi [9].

Pengeringan butiran secara umum dapat dilakukan dengan dua mode operasi yaitu secara *batch* dan kontinyu pada kelembaban mutlak udara tertentu, operasi kontinyu dimaksudkan untuk proses-proses pengeringan skala besar. Sekarang ini, perkembangan perancangan pengeringan cenderung ke arah pengeringan dengan multi tahap yang bertujuan untuk memanfaatkan panas yang mungkin masih tersisa. Pada tahun 1998, Cook dan Dumont melakukan studi untuk meningkatkan kinerja pengering. Menurut mereka, operasi pengeringan dengan melakukan pemanasan awal atau melakukan pengeringan dengan dua alat yang disusun seri adalah yang paling banyak memberikan peningkatan efisiensi, baik dari segi energi ataupun jumlah bahan yang akan dikeringkan [1].

Bila ditinjau dari segi efisiensi energi, untuk dua rangkaian alat pengering yang disusun seri, maka pada tahun 1992 Meiners mengusulkan pemakaian udara bekas pengering sebagai pengering awal butiran segar sebelum butiran tersebut dimasukkan ke pengering utama. Hal ini dimaksudkan untuk pengeringan awal bahan sehingga pengeringan yang terjadi merupakan pengeringan air permukaan bahan dan dapat juga untuk mengantisipasi pemanasan bahan yang tiba-tiba yang dapat menurunkan kualitas bahan [4].

Sitompul dkk. (2000) mengembangkan pengering tipe *deep-bed* dua tahap (multi-tahap) secara counter-current dengan mempertimbangkan bahwa proses pengeringan didominasi oleh dua tahap, laju pengeringan konstan dan menurun. Lebih jauh, energi panas udara keluar tahap dua dapat dimanfaatkan lagi untuk mengeringkan bahan di tahap satu. Sebagai catatan, unggun tahap satu adalah unggun di bagian atas dengan udara mengalir ke atas. Pada pengeringan *deep-bed* dua tahap, tahap pertama dapat merupakan tahap pemanasan awal dan pengeringan sebagian air permukaan, sedangkan tahap ke dua untuk pengeringan air terikat di dalam butiran.

Dalam makalah ini, lebih jauh, alat pengering akan dianalisis terhadap segi *load*, pemakaian energi dan tekno ekonomi baik untuk mode satu tahap maupun dua tahap. Hasil analisis efisiensi, kebutuhan energi, dan tekno ekonomi proses dua

tahap selanjutnya akan dibandingkan dengan pengering satu tahap untuk berbagai variasi temperatur udara masuk dan ketinggian unggun.

## 2. EFISIENSI ENERGI DALAM OPERASI PENGERINGAN

Suatu industri yang berbasis pengeringan mengkonsumsi energi yang cukup signifikan dari total konsumsi energi untuk proses-prosesnya. Konsumsi energi dalam operasi pengeringan dihitung berdasarkan kebutuhan energi untuk penguapan tiap satu kg air. Secara teoritik jumlah panas yang dibutuhkan untuk penguapan tiap kg air pada kondisi standar adalah 2200 – 2700 kJ/kg. Kebutuhan energi untuk operasi pengeringan dapat dihitung secara empiris maupun semiempiris dengan melibatkan faktor geometris alat pengering. Efisiensi energi dan tekno ekonomi dalam operasi pengeringan merupakan faktor penting untuk melakukan prediksi dan seleksi alat pengering yang optimum. Untuk melakukan optimasi terhadap kebutuhan energi serta perancangan alat pengering, dua faktor penting di atas harus diperhatikan penggunaannya secara bersamaan. Suatu alat pengering akan dipilih penggunaannya dalam industri dengan alasan efisiensinya tinggi dan biaya operasi sekecil mungkin [12].

Kebutuhan energi untuk jenis-jenis pengering mempunyai harga yang berbeda-beda tergantung dari kapasitasnya. Kebutuhan energi untuk berbagai jenis pengering dengan kapasitas tertentu disajikan dalam Tabel 1. Harga-harga yang tersaji dalam Tabel 1. menunjukkan bahwa kebutuhan energi untuk operasi pengeringan bervariasi sesuai kapasitas alat pengering dan jenis bahan yang dikeringkan [6].

Tabel 1. Kapasitas dan Konsumsi Energi Untuk Berbagai Jenis Alat Pengering.

Jenis Pengering	Kapasitas Pengering (kg-air/j.m <sup>2</sup> ) atau (kg-air/j.m <sup>3</sup> )	Kebutuhan Energi (kJ/kg-air)
Tunnel Dryer	-	5.500-6.000
Band Dryer	-	4.000-6.000
Impin. Dryer	50 m <sup>-2</sup>	5.000-7.000
Rotary Dryer	30-80 m <sup>-3</sup>	4.600-9.200
Fluid Bed Dryer	-	4.000-6.000
Flash Dryer	5-100 m <sup>-3</sup>	4.500-9.000
Spray Dryer	1-30 m <sup>-3</sup>	4.500-11.500
Drum Dryer	6-20 m <sup>-2</sup>	3.200-6.500

(-) tidak ada data

Ada beberapa cara untuk menjelaskan efisiensi pengeringan yaitu : efisiensi pemanfaatan panas *sensible*, efisiensi bahan bakar dan efisiensi pengeringan. Pada tahun 1973 Foster telah

melakukan evaluasi terhadap efisiensi bahan bakar dan efisiensi pengeringan untuk beberapa jenis alat pengering. Berdasarkan studi yang telah dilakukan Foster, alat pengering dengan sistem operasi multi tahap memberikan efisiensi paling tinggi dibandingkan dengan sistem yang lain. Pada rentang kondisi operasi yang memungkinkan alat pengering aliran kontinu mempunyai efisiensi bahan bakar 38 % dan efisiensi pengeringan 51 %, alat pengering yang beroperasi secara *batch* 42 % dan 58 %, pengeringan dengan sistem penganginan (*reaeration*) memberikan efisiensi 61 % dan 78 %, serta pengeringan dengan sistem multi tahap memberikan efisiensi 60 % dan 79 % [2].

Efisiensi termal (*thermal efficiency*) dihitung berdasarkan perbandingan antara panas yang digunakan alat pengering dengan panas yang disediakan alat pengering. Parameter ini dapat dinyatakan sebagai :

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{(T_{in} - T_o)} 100\% \quad (1)$$

Efisiensi pengeringan (*Drying Efficiency*) didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang digunakan untuk memanaskan butiran dengan energi total yang disediakan alat pengering, dan dituliskan dalam persamaan (2) [7,8], yaitu :

$$\eta_{\text{drying}} = \frac{(E_g + E_{ev})}{ET} 100\% \quad (2)$$

dengan,

$$E_g = m_g \cdot C_{pg} \cdot (T_{gf} - T_{gi})/t_{hg} \quad (3)$$

$$E_{ev} = \Delta H \cdot (m_{ev}/t_{hg}) \quad (4)$$

$$ET = E_{\text{ter}} + EM \quad (5)$$

$$E_{\text{ter}} = W \cdot C_{pa} \cdot (T_a - T_{ao}) \quad (6)$$

$$EM = \Delta P_L \cdot Q \quad (7)$$

Secara umum efisiensi energi tergantung pada temperatur awal dan akhir dari media pengering, temperatur lingkungan dan kandungan air bahan yang dikeringkan. Hal ini juga tergantung pada fluks panas yang disediakan dan yang hilang, jumlah zona pemanas internal, sistem resirkulasi dan lain-lain. Berdasarkan data statistik neraca energi yang disusun Danilov dan Raichev (1986), alat pengering yang bekerja secara konvektif menunjukkan bahwa dari energi yang disediakan alat pengering, 20-60 % digunakan untuk penguapan kandungan air, 5-25 % untuk pemanasan bahan, 15-40 % untuk panas yang tak termanfaatkan bersama dengan aliran udara keluar, 3-10 % panas hilang dari dinding alat pengering menuju lingkungan dan 5-20 % untuk panas tak termanfaatkan yang lain [12].

### 3. PERHITUNGAN TEKNO EKONOMI DALAM OPERASI PENGERINGAN

Pada tahun 1994 di Thailand, Soponronnarit dan Prachayawarakorn melakukan studi tentang analisa ekonomi pengeringan padi tipe unggun terfluidakan. Hasil studi menunjukkan bahwa biaya operasi pengeringan US\$ 0,08 tiap kg air teruapkan dengan biaya penggunaan energi listrik sebesar US\$ 0,05/kW-jam [11].

Analisis tekno ekonomi terhadap kebutuhan energi pengeringan diterapkan untuk pengeringan tipe *deep-bed* satu tahap dan multi tahap, dalam hal ini diambil kasus dua tahap. Energi yang terlibat dalam operasi pengeringan adalah energi yang dikonsumsi pemanas dan energi yang dikonsumsi blower. Energi yang dikonsumsi pemanas digunakan untuk memanaskan udara, sedangkan energi yang dikonsumsi blower digunakan untuk mengalirkan udara sebagai media pengering butiran. Energi yang dikonsumsi pemanas dapat dinyatakan dengan persamaan (8) dan energi yang dikonsumsi blower dalam persamaan (9).

$$\text{Energi Pemanas : } E_p = \frac{V^2}{R} t \quad (8)$$

$$\text{Energi Blower : } E_b = V I t \quad (9)$$

dengan V adalah tegangan rata-rata, R adalah hambatan yang terjadi dalam pemanas, I adalah arus yang melewati blower dan t adalah lama operasi pengeringan.

Selanjutnya setelah dihitung kedua konsumsi energi di atas didapatkan energi total operasi pengeringan dengan menjumlahkan energi yang dikonsumsi pemanas dan energi yang dikonsumsi blower. Perhitungan kebutuhan energi operasi pengeringan didasarkan pada jumlah energi yang dikonsumsi selama waktu operasi dibagi dengan jumlah air bahan yang teruapkan. Perhitungan secara ekonomi terhadap kebutuhan energi dilakukan dengan mengalikan energi total yang dibutuhkan selama operasi dengan harga energi listriknya.

### 4. METODOLOGI PENELITIAN

Skema peralatan alat pengering tipe *deep-bed* satu tahap diberikan di tempat lain (Sitompul and Istadi, 2000), sedangkan untuk dua tahap dilakukan modifikasi terhadap alat yang sudah ada sehingga mampu mengakomodasikan mode pengeringan dua tahap. Dalam penelitian ini, digunakan alat pengering yang terdiri dari kolom pengering, blower udara dan sumber pemanas udara pengering berupa listrik. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah butiran padi dengan media pengering udara yang dipanaskan dengan pemanas listrik. Udara yang dialirkan blower, dilewatkan pemanas listrik untuk mendapatkan temperatur udara yang diinginkan. Udara panas tersebut dimasukkan melalui bagian bawah kolom

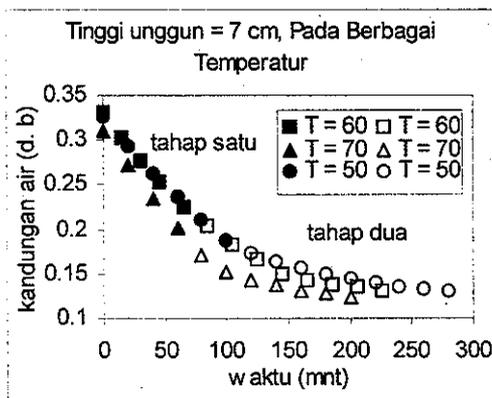
pengering. Bahan butiran yang akan dikeringkan dimasukkan dari bagian atas kolom pengering sampai ketinggian unggun tertentu. Sebelum butiran padi dimasukkan kolom pengering, bahan perlu direndam dahulu dalam air selama kurang lebih 6 jam (sampai kadar air tertentu) kemudian ditiriskan. Tujuan perendaman selain untuk mendapatkan kadar air tertentu juga agar didapatkan kadar air awal yang sama dari masing-masing bahan (*uniform*).

Setelah udara pengering mencapai temperatur yang diinginkan dan bahan basah sudah dimasukkan kolom pengering dengan ketinggian tertentu, kemudian dilakukan operasi pengeringan. Berat bahan ditimbang setiap waktu tertentu untuk mengetahui perubahan kadar airnya. Hal ini dilakukan hingga kandungan air bahan kira-kira mencapai 12 - 13 % basis kering, yaitu kandungan air yang aman untuk penyimpanan butiran padi [3].

Dalam penelitian ini, diambil variasi temperatur udara 50, 60 dan 70 °C, sedangkan variasi ketinggian unggun butiran dalam kolom diambil 3 cm, 5 cm dan 7 cm dengan beban pengeringan antara 6 - 15 kg untuk tiap tahap pengeringan. Laju alir udara yang diambil adalah 0,055 m<sup>3</sup>/s. Temperatur bola kering dan bola basah diukur dibagian udara masuk dan keluar dari unggun butiran. Semua tahapan percobaan di atas dilakukan untuk sistem pengeringan baik satu dan dua tahap dengan variabel-variabel lain yang tak berubah.

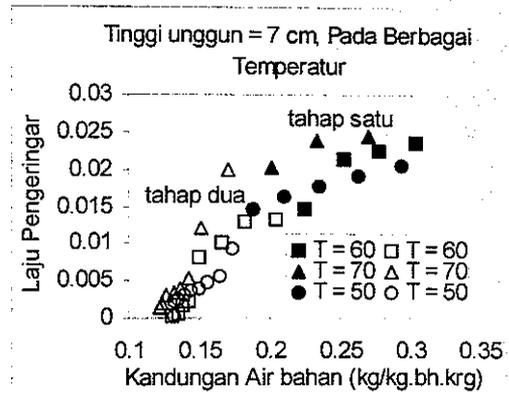
### 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengeringan bahan padat berbentuk butiran dalam unggun diam (*deep-bed*) dapat dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain temperatur udara masuk unggun butiran, ketinggian unggun butiran, kadar air awal bahan, serta jumlah tahap pengeringan. Pengaruh temperatur udara masuk terhadap perubahan kandungan air bahan pada pengeringan unggun diam dua tahap dapat dilihat pada Gambar 1 untuk laju alir udara 0,12 m/s dan ketinggian unggun butiran masing-masing tahap 7 cm.



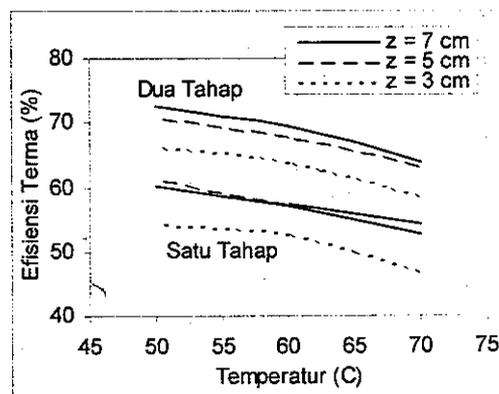
Gambar 1. Pengaruh temperatur udara pengering terhadap kurva pengeringan dua tahap pada laju alir udara 0,055 m<sup>3</sup>/s dan ketinggian unggun 7 cm.

Temperatur udara pengering mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap kurva pengeringan. Kenaikan temperatur udara pengering akan menyebabkan makin cepatnya pengeringan butiran yang disebabkan oleh besarnya panas yang dibawa aliran udara.



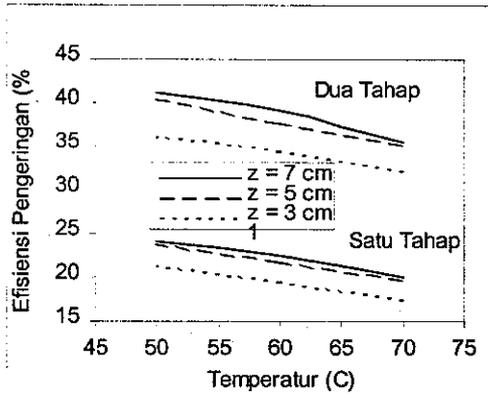
Gambar 2. Kurva laju pengeringan dua tahap pada laju alir udara 0,055 m<sup>3</sup>/s dan ketinggian unggun 7 cm untuk berbagai temperatur udara

Panas tersebut dipindahkan dari *bulk* udara ke permukaan butiran secara konveksi yang digunakan untuk menguapkan air yang ada di permukaan butiran. Selain digunakan untuk menguapkan air di permukaan butiran, panas tersebut juga dipindahkan ke bagian dalam butiran secara konveksi dan konduksi. Dengan demikian, semakin besar panas yang diberikan kepada butiran, semakin besar pula air yang dapat teruapkan dan air yang berdifusi ke permukaan butiran. Dalam pengeringan ini laju pengeringan dikendalikan oleh temperatur udara masuk. Tingginya temperatur udara masuk akan mengakibatkan waktu pengeringan yang diperlukan semakin singkat. Kurva laju pengeringan pada berbagai temperatur udara masuk dapat dilihat pada Gambar 2. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin tinggi temperatur udara masuk secara relatif semakin tinggi pula besarnya laju pengeringan pada kondisi yang sama.



Gambar 3. Hubungan efisiensi termal terhadap temperatur udara masuk pada berbagai tinggi unggun untuk pengeringan unggun diam satu dan dua tahap.

Berdasarkan Gambar 3 dan 4 dapat dilihat bahwa efisiensi termal dan efisiensi pengeringan turun seiring dengan kenaikan temperatur udara masuk untuk pengeringan unggun diam satu dan dua tahap pada ketinggian unggun yang sama. Peristiwa ini terjadi karena fluks panas untuk memanaskan bahan dan menguapkan air adalah konstan, sementara panas *sensible* yang disediakan aliran udara berlebih. Pada temperatur yang lebih tinggi tidak semua panas dapat dimanfaatkan oleh bahan sehingga temperatur udara keluar alat pengering akan lebih tinggi meskipun masih di bawah temperatur basah udara masuknya, artinya belum terjadi kesetimbangan.

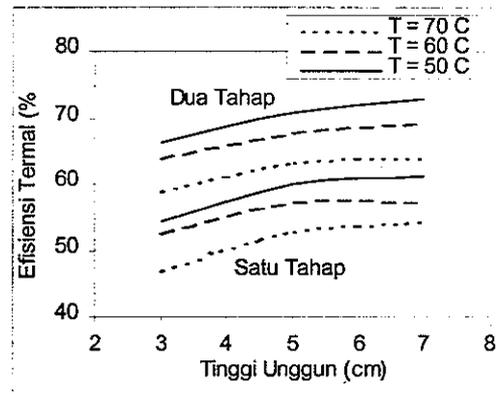


Gambar 4. Hubungan efisiensi pengeringan terhadap temperatur udara masuk pada berbagai tinggi unggun untuk pengeringan unggun diam satu dan dua tahap.

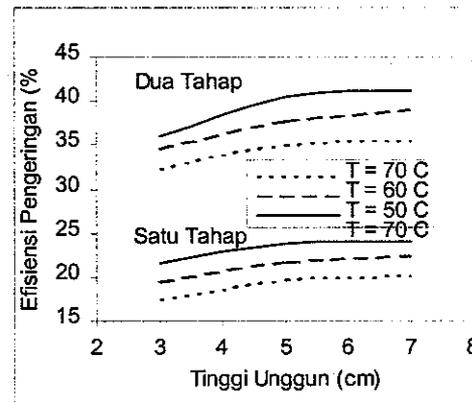
Bila ditinjau dari jumlah tahap, efisiensi termal dan efisiensi pengeringan akan lebih besar untuk dua tahap dibandingkan satu tahap. Pada pengeringan tipe *deep-bed* dua tahap energi panas yang dibawa aliran udara keluar tahap bawah dapat dimanfaatkan lagi untuk mengeringkan butiran di tahap atas. Pengeringan dengan unggun dua tahap ini dapat dijelaskan sebagai berikut : tahap pengeringan unggun bagian atas merupakan pengeringan kandungan air butiran yang ada di permukaan (air tak terikat) dan bersifat pemanasan awal (*preheating*), sedangkan unggun bagian bawah merupakan pengeringan kandungan air terikat yang ada di dalam butiran. Beban pengeringan untuk dua tahap jauh lebih besar dibandingkan satu tahap, sehingga panas yang dimanfaatkan juga lebih besar.

Pengaruh variasi tinggi unggun pada temperatur udara masuk yang konstan akan menaikkan efisiensi termal dan pengeringan seperti pada Gambar 5 dan 6. Kenaikan tinggi unggun akan menaikkan beban pengeringan (*drying load*) sehingga dihasilkan perbedaan temperatur udara pengering yang masuk dan keluar besar, sementara temperatur udara masuk dijaga konstan. Pada beban pengeringan yang relatif besar, panas yang tersedia dapat dimanfaatkan untuk menguapkan kandungan air yang ada. Kondisi ini dapat menurunkan temperatur udara keluar dan

mempercepat proses penguapan kandungan air bahan. Jika tinggi unggun dibuat rendah, panas yang tersedia hanya sebagian digunakan untuk menguapkan kandungan air dari bahan sehingga temperatur udara keluar kolom tetap tinggi dan efisiensinya menjadi rendah.



Gambar 5. Hubungan efisiensi termal terhadap tinggi unggun pada berbagai temperatur udara masuk untuk pengeringan unggun diam satu dan dua tahap.



Gambar 6. Hubungan efisiensi pengeringan terhadap tinggi unggun pada berbagai temperatur udara masuk untuk pengeringan unggun diam satu dan dua tahap.

Data-data hasil perhitungan konsumsi energi dan biaya operasi pengeringan mode operasi pengeringan tipe *deep-bed* satu dan dua tahap disajikan secara lengkap dalam Tabel 2 dan 3. Perhitungan konsumsi energi ini didasarkan pada dua alat yang terlibat langsung pada operasi pengeringan yaitu pemanas dan blower. Biaya operasi pengeringan dihitung dengan mengalikan total konsumsi energi dengan harga satuan listriknya. Energi yang dikonsumsi dan biaya operasi untuk menguapkan satu kg air pada sistem satu tahap jauh lebih besar bila dibandingkan dua tahap pada kondisi operasi yang sama (temperatur udara masuk dan tinggi unggun). Hal ini terjadi karena jumlah air yang teruapkan untuk sistem dua tahap jauh lebih besar dibandingkan satu tahap, sementara energi total yang dipasok ke alat pengering pada kondisi yang sama adalah konstan (energi pemanas dan energi blower).

Tabel 2. Konsumsi energi tiap kg air teruapkan untuk satu dan dua tahap pengeringan

Tinggi Unggun (cm)	Temperatur Udara (° C)	Konsumsi Energi (kJ/kg-air)	
		Satu Tahap	Dua Tahap
7	70	7135,1	3714,9
5	70	3851,7	2685,7
3	70	2341,9	1375,3
7	60	8163,0	4110,7
5	60	5107,5	2786,8
3	60	2576,4	1388,6
7	50	9476,9	4685,0
5	50	6196,9	3146,1
3	50	4621,1	2558,3

Kenaikan temperatur udara pengering pada tinggi unggun yang konstan mengakibatkan turunnya konsumsi energi dan biaya operasi pengeringan baik untuk mode operasi satu maupun dua tahap. Jumlah beban pengeringan yang konstan dengan temperatur yang lebih tinggi menyebabkan waktu operasi yang relatif lebih singkat dengan energi total yang dipasok ke alat pengering konstan setiap waktu. Energi total yang dipasok ke alat pengering untuk tiap tempuhan akan menjadi kecil dengan waktu operasi yang lebih lebih singkat. Total biaya operasi tiap tempuhan akan turun dengan turunnya total energi yang dipasok ke alat pengering.

Tabel 3. Biaya operasi tiap kg air teruapkan untuk satu dan dua tahap pengeringan

Tinggi Unggun (cm)	Temperatur Udara (° C)	Biaya Operasi (US\$/kg-air)	
		Satu Tahap	Dua Tahap
7	70	0.099	0.052
5	70	0.053	0.037
3	70	0.033	0.019
7	60	0.113	0.057
5	60	0.071	0.039
3	60	0.036	0.019
7	50	0.132	0.065
5	50	0.086	0.044
3	50	0.064	0.036

## 6. KESIMPULAN

Pengeringan bahan padat berbentuk butiran dalam unggun diam (*deep-bed*) dapat dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain temperatur udara masuk unggun butiran dengan kelembaban mutlak tertentu, ketinggian unggun butiran, kadar air awal bahan, serta jumlah tahap pengeringan. Semakin tinggi temperatur udara masuk maka waktu

pengeringan yang diperlukan akan semakin singkat.

Efisiensi termal, efisiensi pengeringan, dan kebutuhan energi turun seiring dengan kenaikan temperatur udara masuk. Kondisi ini mengakibatkan biaya operasi pengeringan turun. Pengeringan unggun diam dua tahap memberikan efisiensi termal dan efisiensi pengeringan yang lebih tinggi. Lebih jauh, pengeringan multi tahap ini menunjukkan kebutuhan energi dan biaya operasi yang lebih rendah di dibandingkan pengeringan satu tahap.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagian dana untuk penelitian ini berasal dari Dewan Riset Nasional melalui proyek RUT VII dan disampaikan terima kasih.

## DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

$C_{p,a}$	panas spesifik udara (kJ/kg.K)
$C_{p,g}$	panas spesifik butiran (kJ/kg.K)
$E_p$	energi pemanas (kJ/jam)
$E_b$	energi blower (kJ/jam)
$E_g$	energi butiran (kJ/jam)
$E_{ev}$	energi evaporasi (kJ/jam)
$ET$	energi total (kJ/jam)
$E_{ter}$	energi termal (kJ/jam)
$EM$	energi mekanik (kJ/jam)
$m_g$	masa butiran (kg)
$m_{ev}$	masa air yang teruapkan (kg)
$I$	arus listrik (Ampere)
$Q$	laju alir udara (m <sup>3</sup> /jam)
$R$	tahanan ( $\Omega$ )
$T_{in}$	temperatur udara masuk pengering (K)
$T_{out}$	temperatur udara keluar pengering (K)
$T_o$	temperatur lingkungan (K)
$T_{gf}$	temperatur butiran akhir (K)
$T_{gi}$	temperatur butiran awal (K)
$T_a$	temperatur udara keluar pemanas (K)
$T_{ao}$	temperatur udara sebelum pemanas (K)
$t_{hg}$	waktu pengeringan (jam)
$V$	tegangan listrik (volt)
$W$	masa udara (kg/jam)
$\eta_{ther}$	efisiensi termal (%)
$\eta_{dry}$	efisiensi pengeringan (%)
$\Delta H$	panas laten penguapan air (kJ/kg)
$\Delta P_L$	hilang tekan (kg/m.s <sup>2</sup> )

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cook, E.M., dan Dumont, H.D., (1988), "New Ideas to Improve Dryer Performance", *Chemical Engineering*, May 9, hal. 71-78.

- [2] Foster, (1973), "Drying Methods-Drying Principles and General Considerations", <http://www.fao.org/inpho/vlibrary/t1838e/T1838E0u.htm>
- [3] Hellevang, K.J., (1994), "Grain Drying", <http://ndsuext.nodak.edu/extpubs/plantsci/smgrains/ae701-1.htm>.
- [4] Meiners, E.R., (1990), "Process and Apparatus for Drying Grain", *US Patent #5,142,794*.
- [5] Molnar, K., (1995), "Experimental Techniques in Drying", dalam *Handbook of Industrial Drying*, A.S. Mujumdar (ed.), Vol. 1, Marcel Dekker, Inc., New York, hal. 41-79.
- [6] Mujumdar, A.S., dan A.S. Menon, (1995), "Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers", dalam *Handbook of Industrial Drying*, A.S. Mujumdar (ed.), Vol. 1, Marcel Dekker, Inc., New York, hal. 1-39.
- [7] Oliveira, C.A., dan S.C.S. Rocha, (2000), "Drying of Beans Intermitten Spouted Bed Regime : Analysis of Energy Efficiency of The Drying Process", *Proc. of International Drying Symposium (IDS 2000)*, Netherlands, 28 - 31 August.
- [8] Pan, Y.K., J.G. Li, L.J. Zhao, W.H. Ye, A.S. Mujumdar, dan T. Kudra, (2000), "Drying of Dilute Suspension in a Vibrated Fluidized Bed of Inert Particles", *Proc. of International Drying Symposium (IDS 2000)*, Netherlands, 28 - 31 August.
- [9] Sitompul, J.P., dan Istadi, (2000), "Deep Bed Drying of Corn in A Large Diameter Column: Modelling and Experimental Studies", *Proc. of International Drying Symposium (IDS 2000)*, Netherlands, 28-31 August, Paper No.224.
- [10] Sitompul, J.P., S. Sumardiono, M.W., Sariyanto dan H.A., Wicaksono, (2000), "Studi Analisis Efisiensi Energi Terhadap Pengeringan Butiran dalam Tipe Deep-Bed Dua Tahap", Pros. Seminar Nasional Soehadi Rekso Wardoyo 2000, Bandung, 3-4 November.
- [11] Soponronnarit, S., dan S. Prachayawarakorn, (1994), "Optimum Strategy For Fluidized Bed Paddy Dryer", *Jurnal Drying Technology*, Vol. 12(7), hal. 1667-1686.
- [12] Strumillo, C., Jones, L. Peter, dan Zylla, Romuold, (1995), "Energy Aspects in Drying", dalam *Handbook of Industrial Drying*, A.S. Mujumdar (ed.), Vol. 2, Marcel Dekker, Inc., New York, hal. 1241-1274.