

Peningkatan Efisiensi Termal Tungku Biomasa untuk Proses Pengeringan Biji Kakao di Desa Wiyono Kabupaten Pesawaran Propinsi Lampung

Mohammad Badaruddin¹, Ahmad Yudi Eka Risano², Ahmad Suudi²

Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145

¹mbruddin@eng.unila.ac.id

²yudi.eka@eng.unila.ac.id

³ahmad.suudi@eng.unila.ac.id

Abstract — The modification stove was designed and constructed for drying cocoa beans using biomass as fuel. The purpose of the modification stove is to increase production of 0.6 tonnes dry cocoa beans. The thermal efficiency of the stove is determined and compared with a conventional stove using hevea brasiliensis woods as fuel. The inside wall of stove and oven were built from SK34 fire brick and ceramic paper, respectively. The outer walls were made from red brick and was coated by cement. The results show that the thermal efficiency of the modification stove is increased by 37.34% compared with the conventional stove. The fuel consumption decreases by 25 % (25 kg-product), resulting a fuel cost saving of Rp. 1.8 million/year. In addition, the total cost of the stove can be paid back in a period of 3.5 years with the service lifetime of the stove for 10 years. The moisture contents ratio of cocoa beans with drying time are obtained to predict values of diffusivity (D_e) over range of drying temperature 50-80 °C. the values of diffusivity obtained ranged from 62.03×10^{-10} sampai 4.55×10^{-10} m²/s for the temperature used.

Keywords — biomass stove, cocoa been, thermal efficiency, efective diffusivity

I. PENDAHULUAN

Kabupaten Pesawaran memiliki perkebunan kakao dengan luas 9,023 Ha dengan produksi kakao sebesar 2,969 ton per tahun [1]. Sejumlah petani kakao mengembangkan sistem pengeringan menggunakan tungku pengering berbahan bakar kayu, karena lebih menguntungkan daripada dengan pengering matahari. Pengeringan biji kakao dengan sinar matahari membutuhkan waktu yang lama (sekitar 7 hari) dengan kadar air akhir hanya ~12% dan tergantung pada keadaan cuaca. Pengeringan biji kakao adalah proses pasca panen terakhir, yang menggunakan pemanas udara untuk mengurangi kadar air dalam biji kakao menjadi ~7.0% (w/w) [2].

Produksi kakao melalui pengeringan paksa dalam oven [3] menjadi pilihan utama karena proses produksinya lebih cepat. Pengeringan dengan memanfaatkan tenaga surya (solar dryer) [4], dan pengeringan dengan menggunakan batch dryer [5] sudah banyak dikembangkan. Namun kapasitas produksi biji kakao yang dihasilkan dari kedua metode tersebut masih rendah. Pengeringan udara paksa dilakukan untuk meningkatkan produksi biji kakao saat panen kakao bersamaan datangnya musin hujan.

Saat ini tungku konvensional banyak digunakan oleh petani kakao di desa Wiyono Kab. Pesawaran (Gbr. 1). Tungku tersebut dipakai untuk meningkatkan produksi biji kakao

meskipun saat musim hujan (Bulan Januari-Mei). Hasil observasi pada tungku konvensional menunjukkan bahwa disain sistem pembakaran dan transfer panas ke ruang suplai udara panas (oven) belum optimal karena banyak panas yang keluar melalui ruang bakar (tungku) dari drum baja. Usia pakai tungku konvensional hanya bertahan 1-1.5 tahun karena mengalami kebocoran/kerusakan akibat korosi temperatur tinggi dan dinding oven mudah retak dan pecah, seperti ditunjukkan pada Gbr. 1. Disain ruang oven yang dibuat dari bata merah menyebabkan kehilangan panas yang tinggi akibat absorpsi dinding ruangan. Oleh karena itu, temperatur ruang oven yang diinginkan (70 °C) tidak tercapai. Kehilangan panas yang terjadi pada tungku konvensional berkontribusi rendahnya efisiensi termal tungku. Phusrimuang dan Wongwuttanasatian [6] telah meningkatkan efisiensi tungku konvensional untuk proses memasak beras merah di Thailand dengan menggunakan dinding ganda yang diisi dengan sekam padi. Berrueta dkk. [7] mempelajari tungku biomasa tradisional menggunakan bata dan semen untuk dinding tungku di Meksiko. Efisiensi termal tungku yang diuji menggunakan standar air mendidih menunjukkan efisiensi termal sekitar 30%.



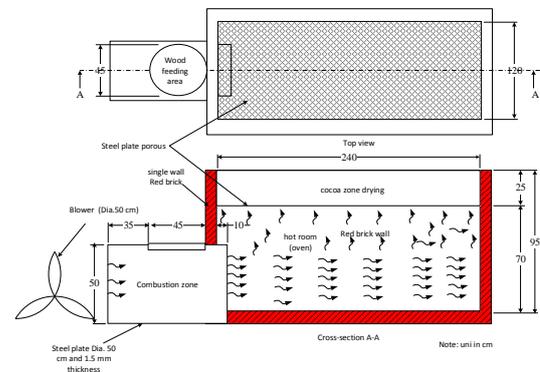
Gbr. 1 Foto makroskopik kondisi real tungku pengering kakao konvensional

Sekarang ini pengembangan tungku berdasarkan fitur dan desain yang lebih baik meliputi isolasi dinding, aliran udara paksa dan material yang tahan lama untuk menghasilkan pembakaran yang lebih bersih, rendah emisi, tahan lama, efisien, aman dan biaya pembuatan murah [8]. Oleh karena itu, tungku pengering biji kakao dirancang dan dibangun untuk meningkatkan produktifitas biji kakao, penghematan biaya produksi, efisien termal tungku, dan menurunkan emisi gas buang.

II. METODE PENELITIAN

Disain tungku konvensional yang dibuat oleh petani kakao dari bata plester semen dengan dinding persegi panjang memiliki dimensi 1.20 m × 2.40 m × 0.95 m (W × L × H) (Gbr. 2), tanpa cerobong asap atau lobang kontrol udara panas. Ruang bakar terbuat dari drum baja diameter 50 cm dan tebal sekitar 1.5 mm (Gbr. 1).

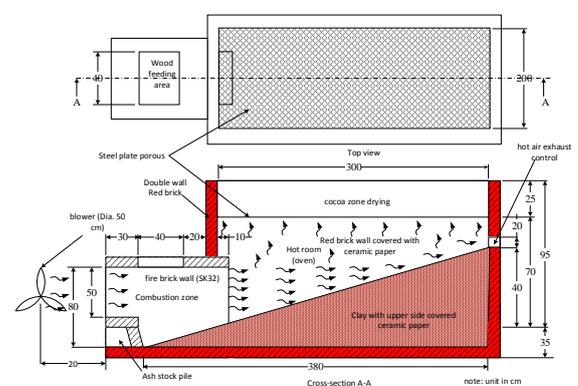
Tidak ada tempat pembuangan abu sisa pembakaran kayu. Selama proses pengeringan, udara panas dari ruang pembakaran dialirkan secara paksa menggunakan blower diameter 50 cm.



Gbr. 2 Disain dan ukuran tungku pengering kakao konvensional

Tungku baru dirancang bertujuan untuk meningkatkan transfer panas dari ruang bakar ke ruang oven. Agar udara panas cepat keluar dari oven melalui rak, volume oven diperkecil melalui pembuatan lantai oven yang dimiringkan 45° mulai dari ruang tungku sampai ujung dinding belakang (Gbr. 3). Disain tungku baru secara lengkap dapat dilihat pada Gbr. 3, dan hasil pembangunan tungku modifikasi dapat dilihat pada Gbr. 4.

Beberapa modifikasi dilakukan pada tungku konvensional lama, yaitu: (1) diameter lobang control pada dinding belakang (0.2 m) dengan tujuan untuk mengontrol laju aliran gas buang dalam oven, (2) ruang bakar dibuat dengan volume 0.55 m³, dan (3) ruang bakar agak menjorok kedalam dengan ukuran 0.5 m × 0.8 m (W × L) dan ruang pembuangan abu dibuat agar tungku dapat beroperasi secara kontinyu. Secara lengkap perbandingan kedua tungku dapat dilihat pada Tabel 1.



Gbr. 3 Disain dan ukuran tungku pengering modifikasi

Tabel 1. Perbandingan tungku konvensional dengan tungku modifikasi

Kriteria	Tungku konvensional	Tungku modifikasi
Dimensi ruang udara panas (m) (W×L×H)	1.1 × 2.4 × 0.70	2.0 × 3.0 × 0.70
Dimensi ruang bakar (m) (W×L×H)	0.9 × 0.5 × 0.5 × 3.14	0.5 × 0.6 × 0.5
Kontrol udara panas	Tidak ada	ada
Mulut ruang bakar	Ada/kecil luasnya	Ada/lebar luasnya
Tempat pembuangan abu	Tidak ada	Ada
Proses pengeringan	Sekitar 9-25 jam	Terus menerus
Dinding ruang bakar	Pelat baja tebal 1.5 mm, Nilai K tinggi	Bata api SK32 + ceramik wool K = 0.155 W/mK
Dinding ruang oven	Bata merah plester semen, K = 1.2 W/mK	Bata merah ganda bagian dalam dilapisi ceramik wool K= 0.09 W/mK



Gbr. 4 Tungku pengering biji kakao modifikasi

Pengambilan data untuk analisis efisiensi termal tungku modifikasi meliputi: pengukuran temperatur dalam ruang bakar, dinding dalam oven, temperatur sekitar ruang bakar (temperatur ambang), kecepatan angin dari blower dengan alat anemometer. Proses pengeringan biji kakao dilakukan untuk mengukur perubahan rasio kadar air berat basah (%) terhadap variasi temperatur 50-80 °C dan lama pengeringan 1-25 jam. Secara lengkap data-data yang diperoleh selama simulasi pengujian tungku konvensional dan modifikasi ditampilkan pada Tabel. 2.

Beberapa buah kakao kondisi matang diambil bijinya untuk simulasi proses pengeringan. Biji kakao yang masih segar ditimbang dan dilakukan uji kadar air sesuai standar SNI 2323 [2]. Sampel biji kakao ditimbang dengan timbangan analitik dengan presisi 0.1 mg. Setelah penimbangan berat awal biji kakao, kemudian sampel diletakan di atas rak ruang pengering pada lokasi yang berbeda. Proses pengeringan dilakukan dalam kondisi steady state (temperatur dalam ruang oven konstan: 50, 60, 70 dan 80 °C), dan kondisi transien dilakukan pada saat awal pengeringan (~25 °C) sampai temperatur mencapai 80 °C selama 1 jam. Plot data rasio kadar air terhadap waktu pengeringan pada temperatur yang berbeda,

digunakan untuk menentukan difusitas efektif biji kakao.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Efisiensi Termal Tungku Pengering Biji Kakao

Analisis efisiensi termal dan keseimbangan energi dilakukan pada tahap proses pengeringan kakao dengan menggunakan tungku konvensional dan tungku modifikasi. Perhitungan efisiensi kedua tungku pengering menggunakan persamaan (1) [9]:

$$\eta = \frac{(m_c C_p c \Delta T) + (m_e L_w)}{m_f \times LHV} \quad (1)$$

Bahan bakar kayu yang digunakan sebagai sumber panas biomasa adalah jenis kayu karet yang sudah dikeringkan. Kayu karet memiliki HHV sekitar 17,098 kJ/kg [10]. Kemudian LHV dihitung menggunakan hubungan berikut [11]:

$$LHV = HHV - 9\lambda H \text{ (kJ/kg)}$$

Dimana, HHV adalah nilai kalor tinggi bahan bakar kering (kadar air nol), λ adalah Nilai panas laten penguapan air (2.31 MJ/kg pada 25 °C), dan H adalah prosentase hidrogen dalam kayu (~6%) [6].

Oleh karena itu, LHV ditentukan dari:

$$LHV = 17,098 - 9 \times (2.31 \text{ MJ/kg}) \times (0.06) = 15,851 \text{ kJ/kg}$$

Persamaan untuk panas masuk dan keluar dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut: Panas masuk dihitung menggunakan persamaan (2) [9]:

$$Q_1 = m_f \times LHV \quad (2)$$

Tabel 2. Parameter yang diukur untuk analisis unjuk kerja kedua tungku

Parameter	tungku konvensional	tungku modifikasi
Temperatur dinding dlm kiri, T_{wi} (°C)	45.66	36.0
Temperatur dinding dlm kanan, T_{wn} (°C)	48.12	35.8
Temperatur dinding dlm belakang, T_{wb} (°C)	55.17	38.9
Temperatur udara dlm tungku, T_g (°C)	270.7	380.5
Temperatur ambang, T_a (°C)	37.3	35.2
Temperatur biji kakao steady state, (°C)	60	70
Kec. Gas buang, V_f (m/s)	10.0	8.10
Luas penampang tungku, (m ²)	0.2	0.25
Lama pengeringan biji kakao, (jam)	16	16
Massa biji kakao basah, m_k (kg)	272.32	544.64
Kadar air akhir setelah pengeringan, (%)	10	7
Massa air dalam biji kakao basah, m_c (kg)	124.34	295.96
Massa evaporasi uap air dalam biji kakao, m_e (kg)	134.16	277.24
Nilai panas latent uap air, L_w (kJ/kg)	2648.62	2617.65
Massa jenis gas buang, ρ (m ³ /kg)	1.0606	1.0291
Kapasitas udara panas, C_p (kJ/kg K)	1.0327	1.0562
Massa kayu bakar yang tersisa (kg)	5.8	1.3
Biaya pembuatan oven, (Rp)	5,000,000.00	15,000,000.00

Panas yang ditransfer ke biji kakao dapat ditentukan dengan persamaan (3) [9]:

$$Q_2 = (m_c C_{p,c} \Delta T) + (m_e L_w) \quad (3)$$

Berat biji kakao sebelum dan sesudah pengeringan diukur untuk menentukan kehilangan berat air. Panas masuk dari ruang bakar ke dalam oven ditentukan dengan persamaan (4)

$$Q_3 = \rho \times A_s \times V_f \times C_p \times (T_g - T_a) \quad (4)$$

Densitas udara panas pada temperatur tertentu dihitung dengan persamaan (5) [12]:

$$\rho = 12.701 \left(\frac{273}{T_g} \right) \times \left(\frac{10363+2.6}{10363} \right) \quad (5)$$

Kehilangan panas melalui konveksi dari setiap dinding ruang oven dapat didekati dengan menggunakan persamaan (6), (7) dan (8) [9]:

$$Q_4 = h_{aw} \times A_w \times (T_w - T_a) \quad (6)$$

$$h_{aw} = \left[0.28 \times \left(\frac{\Delta T_w}{L} \right)^{0.25} \right] \times 5.678 \quad (7)$$

Kehilangan panas melalui radiasi dihitung dengan menggunakan persamaan (8) [9]:

$$Q_5 = \sigma \times \varepsilon \times A_w (T_w^4 - T_a^4) \quad (8)$$

Kehilangan panas karena karbon tidak terbakar dihitung dengan persamaan (9) [6]:

$$Q_6 = (33,826 \times m_r) \times C_r \quad (9)$$

Jumlah karbon tidak terbakar ditentukan berdasarkan jumlah kayu yang tidak terbakar setelah dibersihkan dari abunya, dan kemudian ditimbang. Dimana m_r adalah massa kayu bakar yang tersisa setelah proses pengeringan (kg) dan C_r adalah jumlah karbon dalam kayu (~0.153) [10]. Kehilangan panas akibat kelembaban kayu dihitung menggunakan persamaan (10) [6]:

$$Q_7 = (m_f \times (\% \text{mois}_{\text{fuel}})) \times \left(2450 + (1.91 \times (T_g - T_a)) \right) \quad (10)$$

di mana % $\text{mois}_{\text{fuel}}$ adalah kadar air dari kayu karet (10.24%) [10].

Total kehilangan panas secara keseluruhan (Q_7) dinyatakan dalam persamaan (11):

$$Q_8 = \text{Panas dilepaskan dari bahan bakar} - \Sigma(\text{Panas yang digunakan} + \text{kehilangan panas})$$

$$Q_8 = Q_1 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7) \quad (11)$$

Pengujian karakteristik performansi tungku modifikasi dilakukan dengan melakukan simulasi pembakaran kayu karet dalam ruang bakar. Prosedur proses percobaan tungku sama dengan prosedur proses pengeringan biji kakao.

Tabel 3. Analisis energi dan kerugian kalor pada tungku pengering biji kakao

Parameter	oven konvensional	oven modifikasi
Konsumsi bahan bakar, (kg)	100	75
Panas masuk, (kJ)	1,585,100	1,188,825
Panas yang ditransferkan ke biji kakao, (kJ)	376,996	726,653
Panas yang ditransfer ke ruang oven, (kJ)	682.99	716.06
Panas hilang oleh dinding, (kJ)	32916.30	1464.41
Panas hilang krn karbon tdk terbakar, (kJ)	30.02	6.73
Panas hilang krn kelembaban kayu, (kJ)	29,653	23,872
Kehilangan panas faktor lain, (kJ)	1,144,822	436,112
Efisiensi termal tungku pengering, (%)	23.78%	61.12%

Jumlah kayu bakar yang dihabiskan untuk mengeringkan biji kakao sebanyak ~0.3 ton adalah sekitar 100 kg kayu karet untuk satu kali proses pengeringan. Biasanya para petani setelah panen, langsung mengeluarkan biji kakao dari buahnya dan dihampar menggunakan terpal plastik, kemudian dikeringkan terlebih dahulu dengan panas matahari selama lebih kurang 3 jam. Proses pengeringan awal ini dilakukan saat cuaca panas terik untuk memperpendek proses pengeringan dengan tungku, selanjutnya pengeringan dilakukan menggunakan tungku konvensional (Gbr. 1). Umumnya setelah proses ini, kadar air terakhir kakao sekitar 8-9% dengan lama proses pengeringan selama 24-36 jam. Setelah itu biji kakao dijual ke pengepul dengan harga sekitar 20,000.-/kg.

Berdasarkan hasil pengukuran temperatur pada lokasi yang berbeda, diperoleh temperatur tertinggi 70-80 °C pada lokasi daerah tengah. Sedangkan temperatur 50-60 °C terukur pada daerah depan dekat ruang bakar. Perbedaan temperatur pada lokasi yang berbeda ini disebabkan oleh hembusan angin yang berasal dari blower dari mulut tungku dan kontinuitas proses pembakaran kayu dalam ruang bakar. Biasanya ini terjadi selama 1-6 jam. Untuk mengatasi masalah ini biasanya operator pengering melakukan pengadukan. Pengaturan temperatur yang diinginkan dalam oven 50 °C, 60 °C, 70 °C, dan 80 °C dapat dilakukan dengan mengurangi jumlah kayu yang dibakar dan mengatur kecepatan aliran udara dari blower masuk ke ruang oven.

Selain itu pada tungku modifikasi lobang kecil ukuran diameter 0.2 m dibuat pada dinding belakang dengan tujuan untuk mengatur sirkulasi temperatur bila temperatur dalam tungku lebih dari 350 °C dan temperatur dalam oven melebihi temperatur pengeringan yang diperlukan. Tingginya temperatur dalam ruang bakar karena bahan dinding tungku dibuat dari bata api SK34

dan bagian luar dilapisi *ceramic wool* dan kemudian dilapisi bata merah plester semen. Oleh karena itu, panas yang diserap oleh dinding tungku sangat rendah. Selain itu, temperatur dalam oven juga tidak banyak mengalami penurunan akibat konveksi dan radiasi panas yang diserap oleh dinding oven. Hal ini karena dinding oven dilapisi oleh ceramic paper dengan nilai emisifitas 0.75. Pengaturan temperatur dalam oven dapat dilakukan dengan membuka dan menutup lobang kontrol temperatur. Selain itu, operator pengering (petani) biasanya menambahkan kayu bakar ke dalam tungku secara rutin setiap 15-30 menit, untuk menjaga api dan bara dalam tungku tidak terlalu besar dan cepat habis karena terbakar. Pada kondisi ini biasanya temperatur dalam oven sudah mencapai kondisi steady state. Bila kondisi ini sudah tercapai, operator pengeringan hanya melakukan pengadukan beberapa kali dalam satu jam.

Hasil perhitungan kesetimbangan termodinamika tungku konvensional dan tungku modifikasi menggunakan persamaan (1) sampai persamaan (11) ditampilkan pada Tabel. 3. Hasil menunjukkan bahwa konsumsi penggunaan tungku modifikasi untuk mengeringkan sekitar 0.5 ton biji basah kakao menurun sampai 25 kg atau menurun 25%. Nilai kalor yang dibutuhkan untuk mengeringkan biji kakao dengan kadar air 7 % berat kering lebih besar ~349,657 kJ. Hal ini disebabkan peningkatan kapasitas produksi pengeringan kakao sebesar 0.2 ton biji kakao basah. Jumlah kalor yang masuk ke oven juga lebih besar ~33.07 kJ. Penurunan kehilangan panas karena absorpsi dinding oven sebesar ~31,452 kJ. Penurunan kalor karena proses konveksi dan radiasi dinding dalam oven yang dibuat dari bahan keramik insulasi. Pembuatan ruang penampungan abu kayu bakar memberikan pengaruh yang besar pada penurunan karbon yang tidak terbakar pada ruang bakar. Oleh karena itu, kerugian karbon yang tidak terbakar

menurun sebesar ~23.29 kJ atau turun sebesar 77.59%.

Hasil konsumsi kayu bakar yang lebih rendah berkontribusi terhadap kerugian kalor akibat kelembaban kayu bakar turun sebesar ~5,781kJ atau sebesar 19.49%, sebagaimana ditabulasikan pada Tabel 3. Disamping itu, kerugian panas akibat faktor lain mengalami kenaikan sebesar ~5,781 kJ (19.49%), seperti ditampilkan pada Tabel 3. Hal ini disebabkan oleh panas yang diserap rak penyangga dari baja siku dan rak pelat baja berlobang dalam oven. Jumlah penyangga rak pada tungku lebih banyak 10 batang, dan luas permukaan bentangan rak baja lebih luas 0.05 m² dibandingkan jumlah penyangga dan luas bentangan rak baja pada tungku konvensional. Secara keseluruhan efisiensi termal tungku modifikasi lebih tinggi (~61.12%) dibandingkan tungku konvensional (~23.78%). Secara keseluruhan efisiensi tungku pengering kakao modifikasi meningkat 37.34%.

B. Analisis Ekonomi

Tungku modifikasi dirancang menghabiskan biaya pembangunan sekitar Rp. 15,000,000.00 sedangkan tungku konvensional dibangun dengan biaya hanya Rp. 5,000,000.00. Satu kali proses pengeringan kakao 0.3 ton menggunakan tungku konvensional menghabiskan 100 kg kayu bakar. Jika harga kayu bakar karet per kg adalah Rp. 2,000.00. Maka biaya bahan bakar setiap kali proses pengeringan Rp. 200,000.00. Sebaliknya konsumsi kayu bakar diperlukan untuk satu kali proses pengeringan kakao menggunakan tungku modifikasi dengan kapasitas 0.5 ton, diharapkan hanya menghabiskan 70%–75% kayu bakar dibandingkan total kayu bakar yang dihabiskan menggunakan tungku konvensional. Jadi perkiraan penghematan penggunaan kayu bakar sekitar Rp. 50,000.00/satu kali proses pengeringan. Jika masa panen kakao sekitar bulan Januari sampai Mei (5 bulan) dan proses pengeringan dilakukan seminggu tiga kali, maka penghematan kayu bakar (*pkb*) dapat diperoleh sekitar Rp. 1,800,000.00.

Peningkatan produksi sebanyak 0.2 ton berat basah biji kakao kadar air 54.62% menjadi kadar air 7-8% menghasilkan berat akhir total biji kakao sekitar 50% dari berat awal sebelum pengeringan. Bila harga jual biji kakao dengan kadar air 7-8% adalah Rp. 25,000.00/kg. Maka keuntungan peningkatan produksi biji kakao (*kppbk*) yang diperoleh petani sekitar Rp. 2,500,000.00. Periode pengembalian modal (*PM*) pembangunan tungku modifikasi dapat dihitung menggunakan persamaan (12) [6]:

$$PM = \frac{\text{Selisi biaya pembuatan tungku}}{pkb+kppbk} \quad (12)$$

Sehingga biaya pengembalian modal pembangunan tungku modifikasi pengering kakao adalah sekitar 3.5 tahun. Usia pakai tungku modifikasi diperkirakan adalah 10 tahun. Jadi para petani kakao akan mendapatkan tambahan penghasilan yang besar setelah tahun ke-empat sampai tahun ke-sepuluh.

C. Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca

Pengurangan emisi gas rumah kaca dianalisis berdasarkan pengurangan konsumsi bahan bakar. Karena performansi termal dari tungku pengering kakao ditingkatkan, maka penurunan konsumsi bahan bakar dan pengurangan emisi gas rumah kaca dapat dilakukan. Gas CO₂ dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomasa menimbulkan efek rumah kaca yang berdampak pada pemanasan global. Perhitungan emisi didasarkan pada fakta bahwa pembakaran kayu karet (biomasa) menyebabkan emisi gas rumah kaca setara dengan 104 × 10³ kg CO₂ per TJ HHV [11], yang dapat dinyatakan dengan persamaan (13):

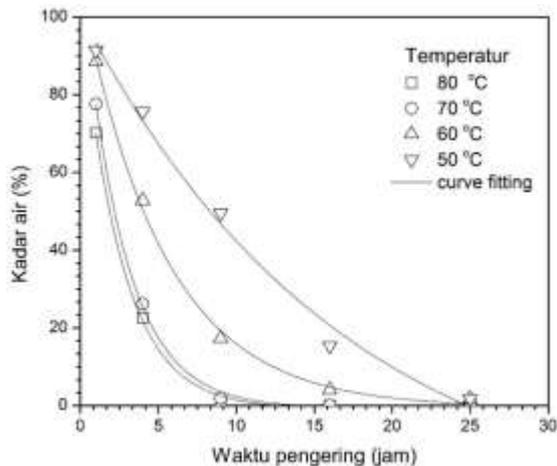
$$\text{Emisi gas rumah kaca} = (114.64 \text{ ton CO}_2/\text{TJ HHV}) \times m_{\text{kayu}} \times \text{HHV (TJ)} \quad (13)$$

Jika massa kayu bakar dapat dihemat sekitar 25 kg satu kali proses pengeringan biji kakao dengan menggunakan tungku modifikasi, yang hanya beroperasi selama musim panen kakao (5 bulan), maka total penghematan kayu bakar = 60 × 25 kg = 1500 kg. Sehingga penurunan emisi gas CO₂ ke atmosfer dapat dihemat sebesar = (114.65 ton CO₂/TJ HHV) × 1500 kg × 17,098 kJ/kg) = (114.65 ton CO₂) × 0.025647 = 2.94 ton CO₂.

D. Analisa Kadar Air Biji Kakao Setelah Proses Pengeringan

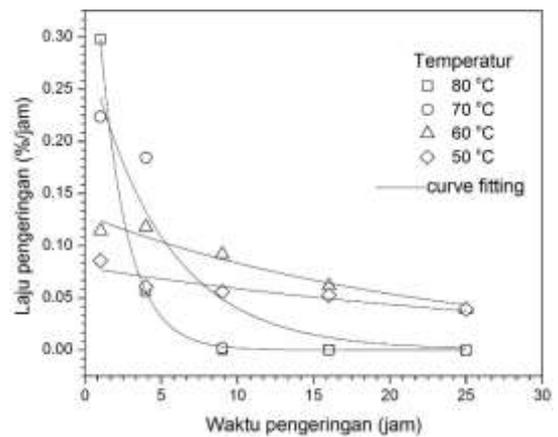
Hasil pengujian kadar air sampel biji kakao basah dilakukan menurut SNI 2322 [2]. Kadar air awal biji kakao diperoleh sekitar 54.62%. Kadar air ini merupakan banyaknya air yang terkandung dalam biji-bijian. Selain itu kadar air merupakan karakteristik dari biji-bijian yang dapat mempengaruhi sifat dan komposisi biji. Kadar air sampel biji kakao yang dikeringkan menggunakan tungku modifikasi pada temperatur 50-80 C° selama 1–25 jam ditampilkan pada Gbr. 5. Kandungan air dalam biji kakao basah menurun seiring lama waktu pengeringan dan

temperatur. Gbr. 5 menunjukkan kurva karakteristik khas penurunan kandungan air dalam biji kakao setelah proses pengeringan.



Gbr. 5 Pengaruh temperatur dan waktu pengeringan terhadap rasio kadar air biji kakao kondisi steady state

Proses pengeringan yang kontinyu memainkan peranan penting dalam komposisi biji kakao kering. Kandungan polifenol dalam biji kakao sangat sensitif terhadap waktu dan temperatur pengeringan [13]. Pengeringan terlalu cepat berpengaruh terhadap produksi berlebihan asam, termasuk asam asetat yang merusak ke cita rasa, sementara hasil pengeringan terlalu lambat menghasilkan pH yang lebih rendah pada biji kakao [14,15]. Proses pengeringan tidak boleh terlalu cepat untuk menjaga kandungan asam yang dapat mengurangi cita rasa biji kakao setelah pengeringan [16]. Pengeringan cepat pada biji kakao menyebabkan jumlah kadar air menurun drastis yang berdampak pada kandungan asam asetat tidak dapat bermigrasi keluar dari dalam biji kakao [17]. Oleh karena itu terjadi penumpukan kandungan asam asetat pada kulit biji kakao. Di sisi lain, laju pengeringan terlalu lambat akan menghasilkan keasaman rendah, warna biji kakao yang coklat pudar. Gbr. 5 menunjukkan penurunan rasio kadar air yang cepat bila temperatur pengeringan berkisar antara 70-80 °C. Sedangkan pada temperatur 60 °C, penurunan rasio kadar air menunjukkan tingkat yang sedang. Penurunan rasio kadar air yang lambat dapat diamati pada biji kakao bila temperatur pengeringan 50 °C.



Gbr. 6 Kurva laju pengeringan biji kakao pada variasi temperatur berbeda

Pengeringan biji kakao basah dengan panas matahari juga dilakukan untuk mengetahui tingkat laju pengeringan. Sampel 10 biji kakao yang sudah ditimbang, kemudian disebar diatas terpal plastik dan dijemur dengan panas matahari terik. Pengukuran temperatur biji kakao saat awal penjemuran pertama pada jam 9.30 WIB, adalah sekitar 36.3 °C. Setelah tiga jam kemudian temperatur biji kakao diukur sekitar 49.3 °C. Kadar air biji kakao setelah dijemur selama tiga jam sekitar 25.20% dengan laju pengeringan 411.93 mg/jam (8.4%/jam).

Laju pengeringan merupakan faktor yang sangat penting terhadap kualitas akhir biji kakao. Kurva pengeringan biji kakao basah pada kondisi kadar air awal 54.62% sampai ~7-12% dengan proses pengeringan kontinyu selama 1- 25 jam ditunjukkan pada Gbr. 6. Gbr. 6 menunjukkan kurva laju pengeringan dalam %/jam. Laju pengeringan yang cepat dapat dilihat untuk pengeringan biji kakao pada temperatur 70-80 °C, yaitu saat pengeringan 4 jam pada temperatur 80 °C dan saat 9 jam pada temperatur 70 °C. Selama periode waktu pengeringan berjalan 9-25 jam pada temperatur 70-80 °C, laju pengeringan berjalan sedikit konstan. Hal ini menunjukkan pengurangan kadar air dalam biji kakao sudah mencapai 7% atau lebih. Sedangkan laju pengeringan pada temperatur 50-60 °C, penurunan laju pengeringan berjalan lambat sampai periode pengeringan 25 jam.

Prosedur pengeringan kontinyu pada interval waktu tertentu sampai rasio kelembaban kadar air yang diinginkan tercapai, maka tingkat pengeringan ditentukan oleh difusi uap air dari dalam biji kakao ke lapisan permukaan terluar. Proses difusi uap air selama proses pengeringan biji kakao dapat dinyatakan dengan hukum kedua Fick. Diasumsikan bahwa biji kakao dengan bentuk lonjong (bulat telur) dengan radius

ekuivalen 0.00664 m [4]. Pada tingkat temperatur dan waktu pengeringan yang berbeda, difusi air dan molekul uap air pada biji kakao dapat ditentukan melalui difusitas efektif (D_e) uap air [18]. Melalui plot hubungan linier kurva $\ln MR$ (moisture ratio) terhadap waktu pengeringan (s), maka difusivitas efektif dapat ditentukan [5]. Slope kurva $\ln MR$ versus waktu pengeringan (s) (K_1) diperoleh, selanjutnya digunakan untuk menentukan difusitas efektif (D_e) menggunakan persamaan (14) [5]:

$$K_1 = \frac{\pi^2 D_e}{r^2} \tag{14}$$

Tabel 4. Nilai difusitas efektif biji kakao dengan pengeringan tungku modifikasi

Efektif Difusitas	Temperatur pengeringan (°C)			
	80	70	60	50
D_e (m ² /s)	4.55×10^{-10}	3.46×10^{-10}	2.31×10^{-10}	2.03×10^{-10}

Hasil perhitungan nilai difusivitas efektif biji kakao dari proses pengeringan oven berkisar 2.03×10^{-10} sampai 4.55×10^{-10} m²/s. Nilai difusitas efektif pada proses pengeringan biji kakao dalam kisaran temperatur 50-80 °C hampir sama dengan yang dilaporkan oleh MacManus dkk. [5]. Perbedaan sedikit nilai difusitas efektif mungkin disebabkan oleh perbedaan temperatur pengeringan (55-81 °C). Sedangkan nilai difusitas efektif yang dilaporkan oleh Hii dkk. [19] berkisar pada nilai 7.46×10^{-11} sampai 1.87×10^{-10} m²/s dari hasil pengeringan biji kakao pada temperatur 60-80 °C dalam oven sedikit lebih rendah, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Ketergantungan temperatur terhadap koefisien difusitas (D) dianggap penting bahwa difusivitas efektif bervariasi terhadap temperatur menurut Fungsi Arrhenius [20] dalam bentuk persamaan (15):

$$D_e = D \exp\left(-\frac{E}{R(T+273)}\right) \tag{15}$$

di mana D adalah koefisien difusivitas tergantung pada temperatur pengeringan, E adalah energi aktivasi untuk kelembaban difusi air dan uap air selama pengeringan, R adalah konstanta gas ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) dan T adalah temperatur pengeringan (°C). Plot $\ln D_e$ terhadap $1/T$ akan menghasilkan garis lurus (slope). Kemiringan kurva $\ln D_e$ versus $1/T$ dapat digunakan untuk memprediksi koefisien difusivitas dan energi aktivasi (E) dengan mengalikan nilai 8.314 J mol^{-1} dengan koefisien eksponensial. Temperatur

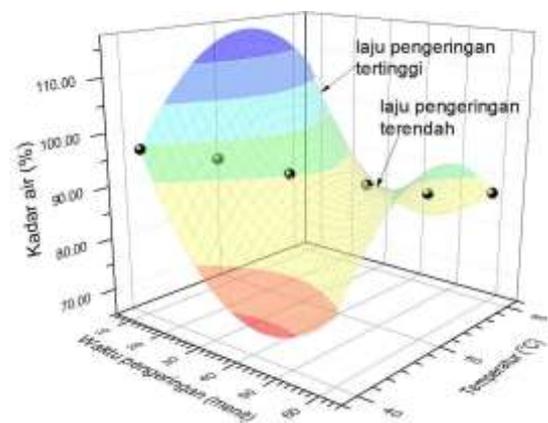
mempunyai pengaruh paling besar pada disfusitas efektif dan tingkat difusi air dalam biji kakao. Energi aktivasi dapat dianggap sebagai energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan 1 mol air dalam biji kakao melalui proses difusi. Maka persamaan Arrhenius untuk proses pengeringan biji kakao pada kisaran temperatur 50-80 °C, dapat dinyatakan dengan persamaan (16):

$$D_e = 3.49 \times 10^{-13} \exp\left(-\frac{E}{26055.8T}\right) \tag{16}$$

Pengaruh temperatur dan lama proses pengeringan biji kakao pada kondisi transien tidak bisa diabaikan. Jelas dari persamaan (3) kalor yang dibutuhkan untuk mengurangi kadar air dari temperatur awal (~25 °C) sampai temperatur ~70 °C pada kondisi transien cukup besar, ~87.00 kJ (dengan pengeringan tungku modifikasi). Kurva pengeringan biji kakao pada kondisi transien ditampilkan pada Gbr. 7. Untuk menentukan pengaruh variabel temperatur dan waktu pengeringan, optimisasi variabel temperatur dan waktu dilakukan menggunakan polinomial kuadratik. Hasil kurva optimisasi ditampilkan bersama kurva pengeringan transien (Gbr. 7). Persamaan hasil optimisasi dijabarkan dalam persamaan (17):

$$z = -0.035 - 0.022x + 0.044y + 2.54 \times 10^{-4}x^2 - 3.43 \times 10^{-4}y^2 \tag{17}$$

Dimana z adalah kadar air (%) dalam biji kakao, x dan y masing-masing adalah variabel waktu dan temperatur pengeringan. Persamaan (17) dapat digunakan untuk mengetahui perubahan kadar air biji kakao terhadap temperatur dan waktu pengeringan dalam kondisi transien.



Gbr. 7 Kurva proses pengeringan biji kakao basah kondisi transien

IV. KESIMPULAN

Tungku konvensional pengering biji kakao kapasitas 0.3 ton hanya dapat dioperasikan selama 1.5 tahun. Disain dan bangunan dinding tungku modifikasi dibuat dari bahan-bahan keramik insulasi (SK32 dan ceramic paper), yang sesuai untuk aplikasi selama 10 tahun dengan kapasitas pengeringan biji kakao 0.5 ton. Kerugian kalor melalui dinding tungku dan dinding oven adalah poin kunci dari disain. Meskipun biaya modal pembuatan tungku modifikasi lebih mahal dibandingkan biaya pembuatan tungku konvensional. Namun periode pengembalian modal hanya butuh waktu selama 3.5 tahun. Selain itu, efisiensi termal tungku modifikasi ditingkatkan sebesar 37.34% dan penurunan emisi gas buang CO₂ sebesar 2.94 ton per tahun.

Hasil investigasi terhadap pengurangan rasio kadar air (%) dalam biji kakao selama proses pengeringan dengan variasi temperatur 50-80 °C selama 1-25 jam, berpengaruh terhadap difusitas efektif (D_e, m²/s). Nilai D_e meningkat terhadap temperatur pengeringan dari 2.03 × 10⁻¹⁰ sampai 4.55 × 10⁻¹⁰ m²/s. Nilai D_e yang diperoleh dapat digunakan untuk mengontrol tingkat keasaman rendah dan kualitas rasa yang baik pada biji kakao selama proses pengeringan dengan udara panas paksa.

Nomenklatur

η	Efisiensi termal tungku (%)
LHV	Nilai rendah kalor kayu (biomasa) (kJ/kg)
$C_{p,c}$	konstanta kapasitas panas biji kakao (diasumsikan sama dengan air 4.18 kJ/kg °K)
ΔT	Perbedaan temperatur dari temperatur awal biji kakao ke temperatur kering (°C)
m_f	Massa kayu bakar yang digunakan dalam satu kali proses pengeringan (kg)
m_c	Massa air dalam biji kakao (prosentasi kadar air dalam berat basah biji kakao sebelum dikeringkan adalah 54.62%)
m_e	Massa evaporasi uap air (kg)
$C_{p,c}$	Nilai panas spesifik air (4.18 kJ/kg °C) [9]
L_w	Nilai kalor laten uap air (kJ/kg °C) [9]
A_s	Luas permukaan ruang pembakaran [m ²] (tungku konvensional $A_{sk} = (3.14 \times 0.5^2)/4 = 0.2$ m ² dan tungku modifikasi $A_{sm} = 0.5 \times 0.5 = 0.25$ m ²)
ρ	Densitas udara panas pada temperatur T dan tekanan atmosfer 1 atm (1.01325 bar)
V_f	Kecepatan udara panas masuk ke ruang oven (m/s)
C_p	Kapasitas udara panas (kJ/kg °K)
T_a	Temperatur ambient (°C)
T_g	Temperatur udara panas dalam tungku (°C)

h_{aw}	Koefisien transfer panas konveksi udara pada sisi dinding tungku [W/m ² °C]
A_w	Luas permukaan dinding tungku (m ²)
L	Tinggi dinding tungku (m)
T_w	Temperatur dinding (°C)
σ	Konstanta Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m ² K ⁴) [9]
ε	Emisivitas dinding oven, bata merah 0.93 dan bata api 0.75 [9]

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti atas bantuan dana melalui program hibah PkM IbM 2016, dengan No. kontrak: 391/UN26/8/LPPM/2016.

REFERENSI

- [1] Dirjen Perkebunan, Statistik Perkebunan Indonesia Komoditas Kakao 2013–2015, Kementerian Pertanian, 2014.
- [2] Standar Nasional Indonesia (SNI) 2323, Biji Kakao, Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2008.
- [3] R. Hayati, Yusmanizar, Mustafiril, H. Fauzi, Kajian Fermentasi dan Suhu Pengeringan pada Mutu Kakao (*Theobroma cacao L.*), *Jurnal Keteknik Pertanian (JTEP)*, vol. 46, pp. 129–135, Okt. 2012.
- [4] S. F. Dina, H. Ambarita, F. H. Napitupulu, H. Kawai, Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans, *Case Studies in Thermal Eng.*, vol. 5, pp. 32–40, Mar. 2015.
- [5] N. C. MacManus, A. S. Ogunlowo, O. J. Olukunle, Cocoa bean (*Theobroma cacao L.*) drying kinetics, *Chilean Journal of Agricultural Res.*, vol. 70, pp. 633–639, Dec. 2010.
- [6] J. Phusrimuang, T. Wongwuttanasatian, Improvements on thermal efficiency of a biomass stove for a steaming process in Thailand, *Applied Thermal Eng.*, vol. 98, pp. 196–202, Apr. 2016.
- [7] V. M. Berrueta, R. D. Edwards, O. R. Masera, Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico, *Renewable Ener.*, vol. 33, pp. 859–870, May 2008.
- [8] M. Kumar, S. Kumar, S. K. Tyagi, Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, vol. 26, pp. 265–285, Okt. 2013.
- [9] Y. A. Cengel, Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2003.
- [10] Kurniawan, Karakteristik konvensional updraft gasifier dengan menggunakan bahan bakar kayu karet melalui pengujian variasi flow rate udara,

- Skripsi S1, Fakultas Teknik, Departemen Teknik Mesin-Universitas Indonesia, Jan. 2012.
- [11] The International Council of Forest and Paper Associations (ICFPA), Calculation Tools for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Wood Product Facilities, National Council for Air and Stream Improvement, Inc. (NCASI) Research Triangle Park, NC, USA, Jul. 2005. (http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Wood_Products.pdf), diakses tanggal 10 oktober 2016.
- [12] Peace software, http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft_e.html, diakses tanggal 15 November 2016.
- [13] J. Alean, F. Chejne, B. Rojano, Degradation of polyphenols during the cocoa drying process, *Journal of Food Eng.*, vol. 189, pp. 99–105, Nov. 2016.
- [14] P. G. Alamillaa, M. A. S. Cervantes, M. Barel, G. Berthomieu, G. C. R. Jimenes, M. A. G. Alvarado, Moisture, acidity and temperature evolution during cacao drying, *Journal of Food Eng.*, vol.79, pp. 1159–1165, Apr. 2007.
- [15] T. S. Guehi, I. B. Zahouli, L. B. Koffi, M. A. Fae1, J. G. Nemlin, Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material, *International Journal of Food Science and Technol.*, vol. 45, pp. 1564–1571, Jul. 2010.
- [16] J. R. Campos, H. B. E. Buendía, S. M. C. Ramos, I. O. Avila, Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa, *Food Chemistry*, vol.132, pp. 277–288, May 2012.
- [17] J. R. Campos, H. B. E. Buendía, I. O. Avila, E. L. Cervantes, M. F. J. Flores, Dynamics of volatile and non-volatile compounds in cocoa (*Theobroma cacao* L.) during fermentation and drying processes using principal components analysis, *Food Research Int.*, vol. 44, pp. 250–258, Jan. 2011.
- [18] C. L. Hii, C. L. Law, M. Cloke, Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, *Journal of Food Eng.*, vol. 90, pp. 191–198, Jan. 2009.
- [19] C. L. Hii, C. L. Law, M. Cloke, Determination of Effective Diffusivity of Cocoa Beans using Variable Diffusivity Model. *Journal of Applied Sci.*, vol. 9, pp. 3116–3120, 2009.
- [20] W. D. Callister, Jr., D. G. Rethwisch, Materials science and engineering: an introduction. 8th Ed., John Wiley & Sons, Inc, USA, 2009.