

Model Matematis Pengeringan Pati Sagu pada *Pneumatic Conveying Recirculated Dryer*

Mathematical Model of Sago Starch Drying on Pneumatic Conveying Recirculated Dryer

Abadi Jading^{1*}, Nursigit Bintoro², Lilik Sutiarto², Joko Nugroho Wahyu Karyadi²

¹Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Papua, Jl. Gunung Salju, Amban, Manokwari, Papua Barat 98314, Indonesia

²Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia
Email: a_jading@yahoo.com

Tanggal submisi: 17 Oktober 2016; Tanggal penerimaan: 13 Desember 2017

ABSTRAK

Pengeringan bahan-bahan tepung dapat dilakukan dengan *pneumatic conveying dryer* (PCD) atau *flash dryer*, namun umumnya memerlukan pipa vertikal yang cukup tinggi. Pipa vertikal yang tinggi dapat diganti dengan proses resirkulasi untuk menghasilkan kadar air akhir bahan yang disyaratkan. Pada penelitian ini telah dirancang *pneumatic conveying recirculated dryer* (PCRD) untuk mengeringkan pati sagu basah, serta dicari model hubungan matematis antara variabel-variabel proses pengeringan dengan kadar air akhir. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model matematis hubungan antara kadar air akhir pati sagu basah dengan variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi secara kontinyu pada *pneumatic conveying recirculated dryer* (PCRD) menggunakan analisis dimensi. Metode *Buckingham Phi Theorem* dalam analisis dimensi digunakan untuk mencari hubungan variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kadar air akhir pati sagu basah pada mesin PCRD. Model matematis yang dihasilkan pada penelitian ini adalah

$$M_{ob} = 3,762(M_{ib})^{0,268} \left(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{-0,169} \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}} \right)^{0,723} \left(\frac{D_p}{L_p} \right)^{0,627} \left(\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}} \right)^{-0,211} \left(\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,139} \left(\frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,196} \left(\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{0,585}$$

Nilai koefisien determinasi (R^2) dari model matematis tersebut adalah 0,948 atau 94,8 %, menunjukkan bahwa model tersebut valid digunakan untuk memprediksi kadar air akhir pati sagu basah dalam merancang mesin PCRD. Sedangkan hasil uji sensitivitas menunjukkan bahwa *dimensionless product* yang paling berpengaruh adalah $\frac{T_{ib}}{T_{u3}}$

, $\frac{D_p}{L_p}$, dan $\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}$. Model tersebut berlaku untuk pengeringan pati sagu basah atau bahan-bahan tepung lainnya yang sifat fisiknya identik dengan pati sagu basah.

Kata kunci: Analisis dimensi; kadar air akhir; model matematis; pneumatic conveying recirculated dryer; pati sagu

ABSTRACT

Flour drying could be conducted by using pneumatic conveying dryer (PCD) or flash dryer, but generally it is required a high vertical pipe. The high of vertical pipe may be replaced with a recirculation process to produce a required final moisture content of the material. This study had designed pneumatic conveying recirculated dryer (PCRD) to dry of wet sago starch. Later, the design was used to determine a mathematical model of the relationship between the variables of drying process with final moisture content of the material. The purpose of this study was to develop a mathematical model of the relationship between the final moisture content of wet sago starch with variables drying process and recirculation continuously in the pneumatic conveying recirculated dryer (PCRD) using dimensional analysis. Buckingham Phi Theorem methods of dimensional analysis was used to find the relationship variables that

affect the final moisture content of wet sago starch on the PCR machine. The mathematical model generated in this study is

$$M_{ob} = 3,762(M_{ib})^{0,268} \left(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{-0,169} \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}} \right)^{0,723} \left(\frac{D_p}{L_p} \right)^{0,627} \left(\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}} \right)^{-0,211} \\ \left(\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,139} \left(\frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,196} \left(\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{0,585}$$

The coefficient of determination (R^2) of the mathematical model was 0.948, or 94.8 %, indicated that the model was valid to predict the final moisture content of wet sago starch in designing PCR machines. While the sensitivity of the test results showed that the dimensionless product of the most influential are $\frac{T_{ib}}{T_{u3}}$, $\frac{D_p}{L_p}$, and $\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}$. The

model was applicable for drying wet sago starch or other starch material which is similar to the physical properties of wet sago starch.

Keywords: Dimensional analysis; final moisture content; mathematical model; pneumatic conveying recirculated dryer; sago starch

PENDAHULUAN

Pneumatic Conveying dryer (PCD) atau *flash dryer* adalah mesin pengering yang menggunakan prinsip perpindahan panas, massa, dan pengangkutan secara pneumatik. Mesin PCD telah banyak digunakan pada pengolahan pangan, produk-produk pertanian, industri kimia, farmasi, dan beberapa industri lainnya (Bhattarai dkk., 2014). Mesin PCD memiliki konstruksi dan pengontrolan yang lebih sederhana, efisiensi pengeringannya lebih tinggi, waktu kontak atau waktu tinggal (*residence time*) antara bahan dan udara panas sangat singkat yaitu 0,5–10 detik, sehingga dapat mengurangi kerusakan bahan akibat panas (Barr dan Baker, 1997). Selain itu, mesin PCD mampu mengeringkan bahan atau partikel yang berukuran 10–500 μm . Namun demikian, kurang cocok digunakan untuk mengeringkan bahan yang membutuhkan waktu pengeringan lebih lama atau memiliki kandungan air yang cukup tinggi (Kisakurek, 1995).

Mesin PCD yang digunakan untuk mengeringkan bahan-bahan yang membutuhkan waktu pengeringan lebih lama atau memiliki kandungan air yang cukup tinggi, umumnya menggunakan pipa vertikal pengering yang tinggi yaitu 5–30 m (Levy dan Borde, 2006). Penelitian mengenai pengaruh tinggi pipa vertikal terhadap kadar air akhir bahan telah dilakukan oleh (Bhattarai dkk., 2014) untuk mengeringkan partikel serbuk kayu, (Bunyanichakul dkk., 2007) untuk pengeringan gabah, (Kaensup dkk., 2006) untuk pengeringan beras, (Nugroho dkk., 2012) untuk pengeringan singkong parut, (Suherman dkk., 2015; de Pádua dkk., 2015) untuk pengeringan tapioka, dan (Tolmač dkk., 2010) untuk pengeringan pati jagung. Hasil dari penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa tinggi pipa vertikal pengering sangat mempengaruhi perubahan kadar air akhir bahan.

Untuk mengurangi tinggi pipa vertikal pada mesin PCD dapat dilakukan dengan meresirkulasi bahan secara kontinyu, sehingga waktu kontak antara udara panas dengan bahan atau waktu tinggal bahan lebih lama (Aichayawanik dkk., 2012). Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan diatas, maka telah dirancang *pneumatic conveying recirculated dryer* (PCR) untuk meresirkulasi dan memisahkan bahan secara kontinyu pada proses pengeringan pati sago basah (Jading dkk., 2016).

Namun demikian, sampai saat ini belum ada model hubungan matematis antara variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi bahan secara kontinyu dengan kadar air akhir pati sago basah pada mesin PCR, sehingga sulit dalam memprediksi kadar air akhir dalam perancangan mesin PCR tersebut. Oleh karena itu, pada penelitian ini dikembangkan model matematis hubungan kadar air akhir pati sago basah dengan variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi secara kontinyu pada mesin PCR. Menurut Jading dkk. (2016) kadar air akhir adalah salah satu parameter sangat menentukan tingkat keberhasilan perancangan mesin PCR untuk pengeringan pati sago basah.

Model matematis yang dikembangkan pada penelitian ini adalah hal yang baru dalam proses pengeringan pneumatik. Variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi secara kontinyu, seperti panjang pipa resirkulasi, kecepatan udara resirkulasi, dan pengatur atau siklon resirkulasi bahan (*manifold*), akan dicari hubungannya secara matematis menggunakan analisis dimensi. Witdarko dkk. (2016) telah mengembangkan model matematis hubungan antara kadar air akhir tepung kasava (K_a) dengan densitas dan diameter partikel (ρ_{pr} , D_{pr}), kapasitas *input* bahan (Q_i), waktu pengeringan (θ), suhu udara (T_u), suhu bahan awal (T_{bo}), dan kecepatan udara pengering (V_u) dengan analisis dimensi pada mesin PCD atau *flash dryer*.

$$Ka = 1,1968 \times 10^{-5} \left(\frac{\rho_{pr} D_{pr}^3}{Q_i \theta} \right)^{1,0121} \left(\frac{T_u}{T_{bo}} \right)^{-4,9698} \left(\frac{V_u}{D_{pr} \theta} \right)^{4,4752} \quad (1)$$

Model matematis yang telah dikembangkan pada Persamaan 1, menunjukkan bahwa model tersebut belum melibatkan beberapa variabel proses pengering PCD atau *flash dryer*, seperti kadar air awal bahan, panjang dan diameter pipa vertikal, dan dimensi siklon resirkulasi. Seperti halnya model matematis hubungan kadar air (M) dengan tekanan partikel (p_p), suhu partikel (T_p), kecepatan (v), tekanan saturasi (p_{sat}), aktivitas air (a_w), dan suhu (T) untuk pengeringan tepung beras pada mesin PCD (Tanaka dkk., 2008).

$$\left(\frac{dp_p(T_p, M)}{dT_p} \right)_v = \left(\frac{da_w(T_p, M)}{dT_p} \right)_v p_{sat}(T_p) + a_w(T_p, M) \left(\frac{dp_{sat}(T_p)}{dT} \right) \quad (2)$$

Asumsi yang digunakan untuk mengembangkan model matematis pada penelitian ini adalah kecepatan aliran udara pengering seragam dan laminar. Diameter, kehalusan, dan bahan pipa serta siklon resirkulasi yang digunakan dianggap seragam (*stainless steel*). Diameter, *bulk density*, dan suhu awal pati sugu basah seragam dan berbentuk bola (*spherical*). Sedangkan kecepatan partikel, dan efek turbulensi diabaikan. Waktu resirkulasi bahan dianggap konstan. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model matematis hubungan antara kadar air akhir pati sugu basah dengan variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi bahan secara kontinyu pada mesin PCR D menggunakan analisis dimensi.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan uji yang digunakan sebagai sampel pada penelitian ini adalah pati sugu basah yang diperoleh dari daerah Tulung, Klaten, Jawa Tengah. Pati sugu basah tersebut divariasikan kandungan airnya yaitu 21, 31, dan 41% (wb) menggunakan alat pengempa. Selanjutnya pati sugu basah tersebut dipadatkan dan dicetak dalam bentuk silinder dengan ukuran tertentu. Pati sugu basah yang telah berbentuk silinder diumpukan pada mesin PCR D sehingga menghasilkan diameter pati sugu basah yang seragam yaitu 2,36 mm dengan *bulk density* 550 kg/m³, serta panas spesifik 2,1–2,53 kJ/kg°C.

Alat

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin PCR D hasil rancangan pada penelitian terdahulu (Jading dkk., 2016). Mesin PCR D tersebut terdiri dari tujuh komponen (unit) utama yaitu tungku pemanas berbahan bakar LPG, *disintegrator* (*blower* sentrifugal dengan penggerak motor listrik 3 phase, 380 V, 2 hp), pengumpan *input* bahan (silinder bergigi dengan penggerak motor listrik 1 phase, 220 V, 1 hp), pipa pengering berbentuk *recirculated* (vertikal dan horizontal), *manifold* (siklon resirkulasi dan pemisah

bahan, dan *blower* sentrifugal dengan penggerak motor listrik 1 phase, 220 V, 1 hp), siklon *output* bahan, dan panel kontrol. Bagian pengumpan *input* bahan dilengkapi dengan silinder bergigi dengan ukuran tertentu, untuk mengatur laju umpan dan mempertahankan tingkat keseragaman ukuran partikel pati sugu basah yang masuk ke dalam pipa pengering. Susunan komponen-komponen dan titik-titik pengukuran nilai variabel mesin PCR D disajikan pada Gambar 1. Sedangkan alat bantu lainnya yang digunakan antara lain, pengempa hidrolik manual merek ESTICO untuk mengurangi kandungan air dan memadatkan pati sugu berbentuk silinder, termometer digital merek Lutron TM 946 dengan termokopel tipe K untuk mengukur suhu di luar dan di dalam mesin PCR D, *hygrometer meter* digital merek krisbow KW06-291 untuk mengukur kelembaban relatif lingkungan, *air flow meter* merek krisbow untuk mengukur kecepatan udara di dalam mesin PCR D, *Tacho meter* merek Lutron untuk mengukur putaran motor listrik penggerak, timbangan digital tiga digit merek OHAUS untuk mengukur berat sampel, dan oven listrik merek *memmert* untuk mengeringkan sampel analisis kadar air.

Metode Analisis

Variabel-variabel yang dianggap berpengaruh terhadap kadar air akhir pati sugu (M_{ob}) pada mesin PCR D dapat dilihat pada Tabel 1. Variabel-variabel tersebut terdiri dari variabel *independent* (bahan *input*, alat dan mesin, dan proses pengeringan), dan variabel *dependent* (kadar air akhir pati sugu). Hubungan variabel-variabel tersebut dinyatakan dalam bentuk *dimensionless product* (π) dengan analisis dimensi menggunakan metode *Buckingham Phi Theorem* (Murphy, 1950). Jumlah *dimensional product* yang diperoleh sebanyak 10 buah. Hubungan masing-masing π tersebut dinyatakan pada Persamaan 3.

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}) \quad (3)$$

Proses analisis dilakukan untuk mendapatkan *dimensionless product* dengan memilih variabel tertentu yang disusun dalam bentuk matriks dengan nilai determinan lebih besar dari nol. Variabel-variabel tersebut adalah C_6 (L_p), C_{11} (Q_{ib}), C_{12} (V_u), dan C_{14} (T_{u3}). Hubungan *dimensionless product* yang diperoleh dapat dituliskan pada Persamaan 4.

$$M_{ob} = f(M_{ib}, \frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}, \frac{T_{ib}}{T_{u3}}, \frac{D_p}{L_p}, \frac{D_{scrb}}{D_p}, \frac{L_{scrb}}{D_{scrb}}, \frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}}, \frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}}, \frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}) \quad (4)$$

Variabel D_p , D_{scrb} , γ_{ib} , T_{ib} dan Q_{ib} dianggap konstan, sehingga Persamaan 4 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 5. Selanjutnya Persamaan 5 diubah bentuknya menjadi bilangan berpangkat, seperti yang

Tabel 1. Variabel-variabel yang diduga berpengaruh terhadap kadar air akhir pati sagu pada mesin PCRD

Variabel <i>independent</i>	Simbol	Satuan	Dimensi
Bahan input			
Kadar air awal <i>input</i> bahan	M _{ib}	%	-
<i>Bulk density loose input</i> bahan	γ _{ib}	kg/m ³	ML ⁻³
Suhu awal <i>input</i> bahan	T _{ib}	°C	θ
Alat (mesin pengering)			
Diameter pipa resirkulasi bahan	D _p	M	L
Panjang pipa resirkulasi bahan	L _p	M	L
Diameter silinder siklon resirkulasi bahan	D _{scrib}	M	L
Tinggi silinder siklon resirkulasi bahan	L _{scrib}	M	L
Diameter pipa <i>outlet</i> atas pada siklon resirkulasi bahan	D _{Acrib}	M	L
Panjang pipa <i>outlet</i> atas pada siklon resirkulasi bahan	L _{Acrib}	M	L
Operasi (proses pengeringan)			
Kapasitas <i>input</i> bahan	Q _{ib}	kg/s	MT ⁻¹
Kecepatan udara pengering	v _u	m/s	LT ⁻¹
Kecepatan udara blower pada siklon resirkulasi bahan	v _{ucrb}	m/s	LT ⁻¹
Suhu udara pengering	T _{u3}	°C	θ
Variabel dependent			
Kadar air akhir bahan	M _{ob}	%	-

dinyatakan pada Persamaan 6. Nilai konstanta C, a, b, c, d, e, f, g, dan h pada Persamaan 6 ditentukan dengan regresi linier berganda menggunakan *Microsoft excel* 2013.

$$M_{ob} = f(M_{ib}, \frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}, \frac{T_{ib}}{T_{u3}}, \frac{D_p}{L_p}, \frac{L_{scrib}}{D_{scrib}}, \frac{D_{Acrib}}{D_{scrib}}, \frac{L_{Acrib}}{D_{scrib}}, \frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}) \quad (5)$$

$$M_{ob} = C(M_{ib})^a \left(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}\right)^b \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}}\right)^c \left(\frac{D_p}{L_p}\right)^d \left(\frac{L_{scrib}}{D_{scrib}}\right)^e \left(\frac{D_{Acrib}}{D_{scrib}}\right)^f \left(\frac{L_{Acrib}}{D_{scrib}}\right)^g \left(\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}\right)^h \quad (6)$$

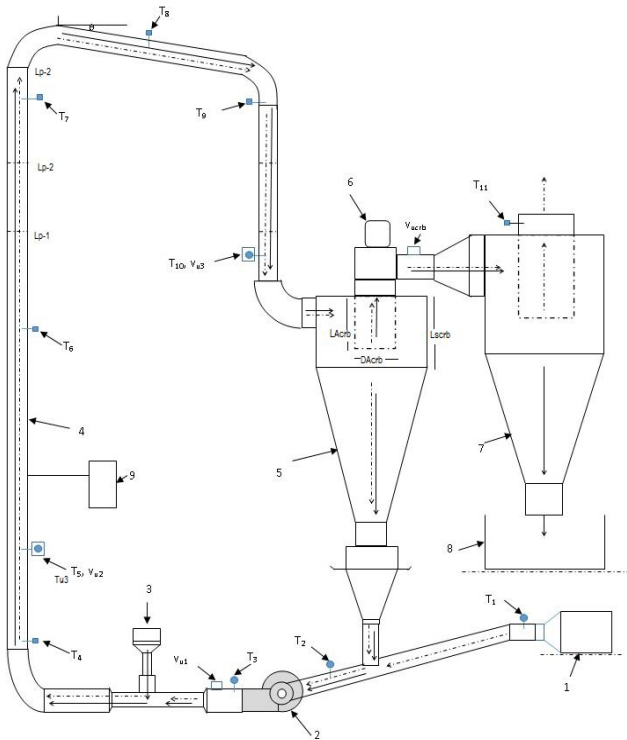
Prosedur Penelitian

Prosedur pengambilan data kadar air akhir pati sagu (M_{ob}) pada mesin PCRD dilakukan dengan memvariasi salah satu phi (π), sedangkan π yang lain konstan. Variasi dilakukan sebanyak 8 perlakuan dan 3 kali ulangan. Variabel yang divarisi pada setiap π dapat dilihat pada Tabel 2. Variabel-variabel seperti T_{ib}, γ_{ib}, Q_{ib}, D_p, dan D_{scrib} adalah konstan. Nilai variabel-variabel tersebut adalah T_{ib} = 27,2 °C, γ_{ib} = 550 kg/m³, Q_{ib} = 0,00278 kg/s, D_p = 0,1016 m (4 inci), dan D_{scrib} = 0,5 m. Nilai konstanta tersebut diperoleh dari hasil pengukuran secara langsung selama proses pengeringan pada mesin PCRD. Sedangkan nilai M_{ob} diperoleh dari hasil pengukuran kadar air pati sagu kering yang telah dikeringkan pada mesin

PCRD menggunakan metode gravimetri Nomor 2001.12 (AOAC, 2005).

Tabel 2. Prosedur pengambilan data hubungan variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kadar air akhir pati sagu basah pada mesin PCRD

π variasi	π konstan	Variabel variasi	Perlakuan	Satuan
π ₂	π ₃ , π ₄ , π ₅ , π ₇ , π ₈ , π ₉ , π ₁₀	M _{ib}	21, 31, dan 41	% wb
π ₃	π ₂ , π ₄ , π ₅ , π ₇ , π ₈ , π ₉ , π ₁₀	v _u	15, 28, dan 31	m/s
π ₄	π ₂ , π ₃ , π ₅ , π ₇ , π ₈ , π ₉ , π ₁₀	T _{u3}	75, 100, dan 125	°C
π ₅	π ₂ , π ₃ , π ₄ , π ₇ , π ₈ , π ₉ , π ₁₀	L _p	9,38, 11,38, dan 13,38	m
π ₇	π ₂ , π ₃ , π ₄ , π ₅ , π ₈ , π ₉ , π ₁₀	L _{scrib}	0,27, 0,54, dan 0,81	m
π ₈	π ₂ , π ₃ , π ₄ , π ₅ , π ₇ , π ₉ , π ₁₀	D _{Acrib}	0,1016, 0,17, dan 0,22	m
π ₉	π ₂ , π ₃ , π ₄ , π ₅ , π ₇ , π ₈ , π ₁₀	L _{Acrib}	0,20, 0,37, dan 0,65	m
π ₁₀	π ₂ , π ₃ , π ₄ , π ₅ , π ₇ , π ₈ , π ₉	v _{ucrb}	10,75, 12,75, dan 15,75	m/s



Keterangan: 1) unit tungku, 2) blower disintegrator, 3) unit pengumpan bahan input, 4) pipa resirkulasi, 5) unit siklon resirkulasi, 6) blower manifold (resirkulasi), 7) unit siklon output bahan, 8) unit penampung bahan output, 9) unit controller, T1-11 : titik pengukuran suhu udara pengering, v1-3 : titik pengukuran kecepatan udara pengering, vucrb : titik pengukuran kecepatan udara blower manifold

Gambar 1. Gambar skematis mesin PCR D

HASIL DAN PEMBAHASAN

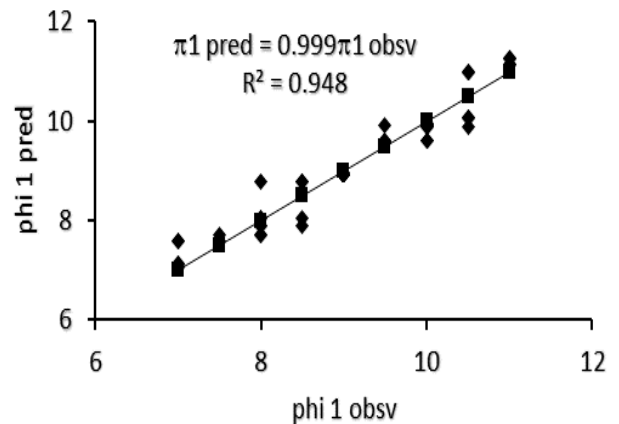
Nilai konstanta yang diperoleh dari hasil analisis regresi berganda yaitu, $C = 3,762$, $a = 0,268$, $b = -0,169$, $c = 0,723$, $d = 0,627$, $e = -0,211$, $f = 0,139$, $g = 0,196$, dan $h = 0,585$. Nilai-nilai tersebut kemudian disubstitusi ke dalam Persamaan 6 menggantikan konstanta-konstanta pada bilangan berpangkat. Model matematis hubungan antara kadar air akhir pati sagu basah dengan variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi bahan secara kontinyu pada mesin PCR D, dapat dinyatakan pada Persamaan 7.

$$M_{ob} = 3,762(M_{ib})^{0,268} \left(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{-0,169} \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}} \right)^{0,723} \left(\frac{D_p}{L_p} \right)^{0,627} \left(\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}} \right)^{-0,211} \left(\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,139} \left(\frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,196} \left(\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{0,585} \quad (7)$$

Model matematis yang dihasilkan pada Persamaan 7 tersebut, kemudian diuji validitas dan sensitivitasnya menggunakan data-data observasi yang diperoleh dari hasil pengeringan pati sagu basah pada mesin PCR D. Untuk menentukan nilai validitas dari model tersebut, maka dilakukan perbandingan antara kadar air akhir pati sagu (M_{ob}) atau π_1 prediksi dengan kadar air akhir pati sagu observasi atau π_1 observasi. Hasil perbandingan antara π_1 observasi dengan π_1 prediksi dinyatakan dalam

persamaan regresi, $\pi_{1pred} = 0,999 \pi_{1obs}$, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,948. Nilai 0,999 adalah nilai koefisien regresi yang menunjukkan bahwa untuk setiap penambahan π_1 observasi, maka π_1 prediksi naik sebesar 0,999 %wb.

Grafik hubungan antara π_{1obs} dengan π_{1pred} dapat dilihat pada Gambar 2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa hubungan kadar air akhir prediksi dengan kadar air akhir observasi menghasilkan nilai koefisien determinasi mendekati satu yaitu 0,948 atau 94,8%. Nilai koefisien determinasi model non matematis (model jaringan syaraf tiruan) hubungan kadar air akhir pati sagu prediksi dengan kadar air akhir pati sagu observasi pada mesin PCR D adalah 0,96 (Jading dkk., 2017). Sedangkan nilai koefisien determinasi model hubungan kadar air akhir pada proses pengeringan tepung kasava menggunakan *pneumatic dryer* adalah 0,722 (Witdarko dkk., 2016). Bhattarai dkk. (2014) mengembangkan model pengeringan partikel kayu pada mesin PCD dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,998. Berdasarkan nilai koefisien determinasi yang dihasilkan, maka model matematis pada penelitian ini, sangat valid dan layak digunakan untuk memprediksi perubahan kadar air akhir dalam proses perancangan mesin PCR D untuk pengeringan pati sagu.



Gambar 2. Grafik hubungan π_1 observasi dengan π_1 prediksi

Hubungan antara *dimensionless product* (π) yaitu antara π_1 dengan π yang lainnya (π_2 sampai π_{10}) dapat dilihat pada Tabel 3. Hubungan tersebut dapat ditentukan berdasarkan hasil persamaan regresi dan nilai koefisien determinasi. Tabel 3 menunjukkan bahwa hubungan antara *dimensionless product* sangat valid sebab nilai koefisien determinasi yang diperoleh mendekati satu. Nilai koefisien determinasi yang paling rendah adalah hubungan π_1 dengan π_3 , sedangkan yang paling tinggi adalah hubungan π_1 dengan π_8 , dan π_1 dengan π_{10} . Dari hubungan tersebut menunjukkan bahwa variabel diameter pipa *outlet* atas (D_{Acrb}) dan kecepatan udara *blower* (v_{ucrb}) pada siklon resirkulasi sangat berpengaruh dalam proses resirkulasi bahan

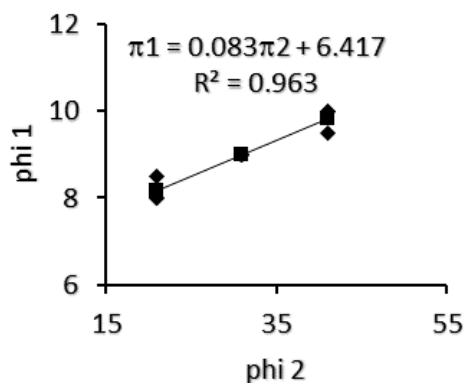
Tabel 3. Hubungan antara *dimensionless product* dengan nilai variasi variabel terhadap kadar air akhir bahan

Varibel	Nilai variasi	Persamaan	R ²
M _{ib}	21 sampai 41% (wb)	$\pi_1 = 0,083 \pi_2 + 6,4167$	0,963
v _u	15 sampai 31 m/s	$\pi_1 = -0,00004 \pi_3 + 11,149$	0,857
T _{u3}	75 sampai 100 °C	$\pi_1 = 22,321 \pi_4 + 2,548$	0,951
L _p	9,38 sampai 13,38 m	$\pi_1 = 605,38 \pi_5 + 4,536$	0,936
L _{scrib}	0,27 sampai 0,81 m	$\pi_1 = -1,852 \pi_7 + 9,944$	0,965
D _{Acrib}	0,1016 sampai 0,2200 m	$\pi_1 = 4,189 \pi_8 + 8,127$	0,996
L _{Acrib}	0,200 sampai 0,6500 m	$\pi_1 = 2,090 \pi_9 + 8,467$	0,933
V _{ucrb}	10,75 sampai 15,75 m/s	$\pi_1 = 0,0002 \pi_{10} + 2,949$	0,993

secara kontinyu selama proses pengeringan pada mesin PCRD.

Pengaruh Kadar Air Awal Pati Sagu Basah

Pengaruh kadar air awal pati sagu basah (M_{ib}) terhadap kadar air akhir pati sagu basah (M_{ob}) dapat dilihat pada Gambar 3. Semakin besar nilai π_2 , maka semakin besar pula nilai π_1 . Begitu pula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan maksimum π_2 (M_{ib}) yaitu antara 21-41. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar air awal, maka semakin besar pula kadar air akhir pati sagu basah. Oleh karena itu, kadar air awal pati sagu basah sangat menentukan besarnya suhu dan waktu resirkulasi bahan selama proses pengeringan. Penurunan kadar air akhir pati sagu berdasarkan variasi kadar air awal bahan adalah 41% (wb) menjadi 9,83% (wb), 31% (wb) menjadi 9% (wb), dan 21% (wb) menjadi 8,17% (wb).



Gambar 3. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 2

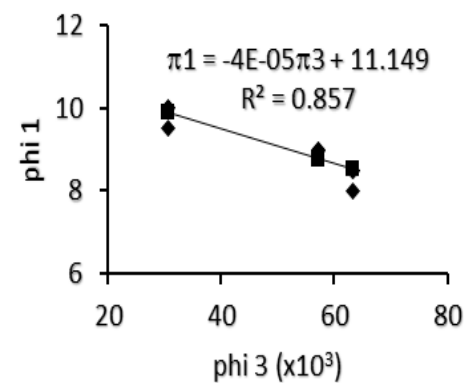
Pengaruh Kecepatan Udara Pengering

Pengaruh kecepatan udara pengering (v_u) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 4. Semakin besar nilai π_3 maka semakin kecil nilai π_1 , begitupula sebaliknya sampai

mencapai batas minimum dan maksimum π_3

$(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}})$ yaitu antara $30,633 \times 10^3 - 63,309 \times 10^3$. Hal

ini menunjukkan bahwa apabila kecepatan udara pengering bertambah, sedangkan variabel yang lain konstan, maka kadar air akhir akan berkurang (Bhattarai dkk., 2014). Hal ini menyebabkan penurunan kadar air akhir pati sagu dari 31% (wb) menjadi 8–10% (wb). Kecepatan udara pengering akan lebih besar daripada kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi bahan, menyebabkan pati sagu basah melakukan resirkulasi yang lebih lama, sehingga waktu kontak antara pati sagu basah dengan udara pengering juga lebih lama.



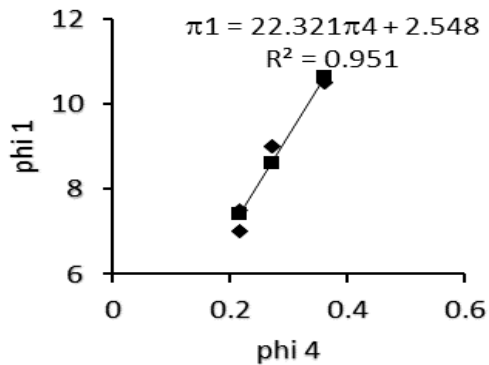
Gambar 4. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 3

Pengaruh Suhu Udara Pengering

Pengaruh suhu udara pengering (T_{u3}) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 5. Semakin besar nilai π_4 , maka semakin besar pula nilai nilai π_1 , begitupula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan

maksimum $\pi_4 \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}}\right)$ yaitu antara 0,218–0,363. Hal ini

menunjukkan bahwa apabila suhu udara pengering bertambah, maka kadar air akhir pati sagu basah akan berkurang. Penurunan kadar air akhir pati sagu berdasarkan variasi suhu udara pengering adalah 31% (wb) menjadi 7,17–10,5% (wb). Penambahan suhu udara pengering dapat mempercepat proses perpindahan panas dan massa di dalam pati sagu basah yaitu menguapkan air yang ada di dalam bahan selama proses pengeringan secara resirkulasi. Kadar air akhir bahan akan menurun seiring dengan peningkatan suhu udara pengering (Kaensup dkk., 2006). Namun demikian, peningkatan suhu udara dapat menyebabkan konsumsi energi yang cukup tinggi (Banooni dkk., 2017).



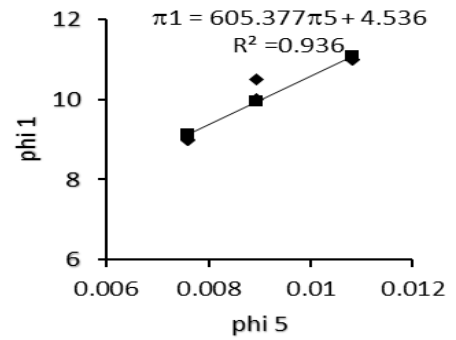
Gambar 5. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 4

Pengaruh Panjang Pipa Resirkulasi

Pengaruh panjang pipa resirkulasi (L_p) terhadap kadar air akhir M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 6. Semakin besar nilai π_5 maka nilai π_1 juga semakin besar, begitupula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan

maksimum $\pi_5 \left(\frac{D_p}{L_p}\right)$ yaitu antara 0,008–0,011. Hal ini

menunjukkan bahwa apabila panjang pipa resirkulasi bertambah, maka kadar air akhir pati sagu berkurang 9–11% (wb). Penambahan panjang pipa resirkulasi menyebabkan waktu resirkulasi atau kontak pati sagu basah dan udara pengering lebih lama di dalam mesin PCRD. Waktu kontak antara udara pengering dan bahan yang lebih lama dapat mneurunkan kadar air secara signifikan (Otuu dkk., 2013). Hasil simulasi profil kadar air sebagai fungsi tinggi ruang pengering pada mesin PCD menunjukkan perubahan kadar air tepung kasava dari 50% (wb) menjadi 35% (wb) dengan tinggi pipa vertikal 10 m (Rahayoe dkk., 2011).



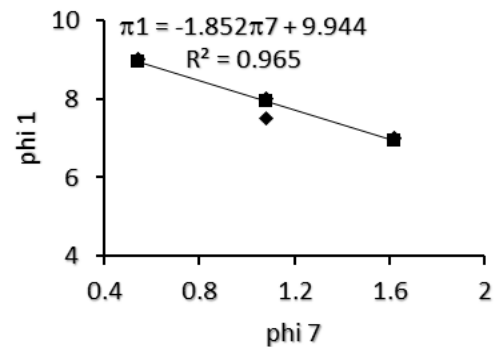
Gambar 6. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 5

Pengaruh Tinggi Silinder Siklon Resirkulasi

Pengaruh tinggi silinder siklon resirkulasi (L_{scrb}) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 7. Semakin besar nilai π_7 , maka semakin kecil nilai π_1 , begitupula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan

maksimum $\pi_7 \left(\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}}\right)$ yaitu antara 0,54–1,62. Hal ini

menunjukkan bahwa semakin tinggi silinder siklon resirkulasi bahan, maka semakin kecil kadar air akhir pati sagu basah (7–9% (wb)). Penambahan tinggi silinder siklon resirkulasi bahan menyebabkan waktu resirkulasi atau kontak bahan dengan udara pengering menjadi lebih lama. Laju perpindahan panas dan massa dalam siklon menyebabkan laju evaporasi yang lebih tinggi, sehingga mempercepat penurunan kadar air bahan (Kaensup dkk., 2006).



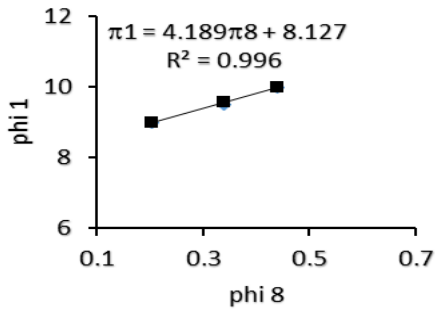
Gambar 7. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 7

Pengaruh Diameter Pipa Outlet Atas pada Siklon Resirkulasi

Pengaruh diameter pipa outlet atas pada siklon resirkulasi (D_{Acrb}) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 8. Semakin besar nilai π_8 , maka semakin besar pula nilai π_1 , begitupula sebaliknya sampai mencapai

batas minimum dan maksimum $\pi_8 \left(\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}}\right)$ yaitu antara 0,203–0,440. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar

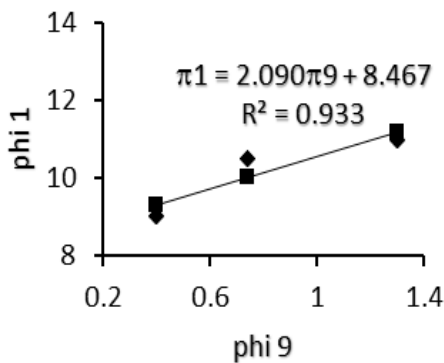
diameter pipa *outlet* atas pada siklon resirkulasi, maka semakin besar kadar air akhir pati sagu basah. Kadar air akhir pati sagu yang dihasilkan berdasarkan variasi diameter pipa *outlet* atas siklon resirkulasi adalah 9–10% (wb). Pati sagu basah mengalami resirkulasi yang lebih singkat, bahkan lebih cepat keluar menuju siklon *output*. Diameter pipa *outlet* atas pada siklon resirkulasi sangat mempengaruhi besarnya kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi pada mesin PCRD.



Gambar 8. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 8

Pengaruh Panjang Pipa *Outlet* Atas pada Siklon Resirkulasi

Pengaruh panjang pipa *outlet* atas pada siklon resirkulasi (L_{Acrb}) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 9. Semakin besar nilai π_9 , maka semakin besar pula nilai π_1 , begitupula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan maksimum π_9 ($\frac{L_{Acrb}}{D_{scr b}}$) yaitu antara 0,400–1,300. Hal ini menunjukkan bahwa semakin panjang pipa *outlet* atas pada siklon resirkulasi, maka kadar air akhir pati sagu basah semakin besar. Hal ini diduga karena bahan mengalami resirkulasi yang lebih singkat, bahkan pati sagu basah cepat terhisap oleh *blower* resirkulasi yang terpasang pada siklon resirkulasi dan keluar menuju siklon *output*. Besarnya nilai kadar air akhir pati sagu adalah 9–11% (wb).

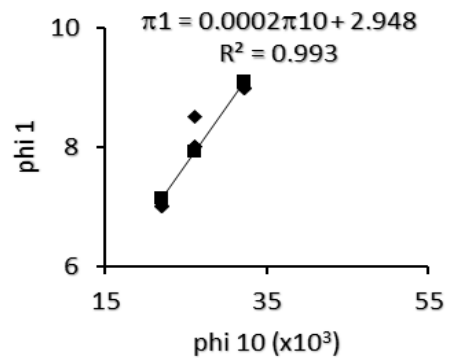


Gambar 9. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 9

Pengaruh Kecepatan Udara *Blower* pada Siklon Resirkulasi

Pengaruh kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi (v_{ucrb}) terhadap M_{ob} dapat dilihat pada Gambar 10. Semakin besar nilai π_{10} , maka semakin besar pula nilai π_1 , begitu pula sebaliknya sampai mencapai batas minimum dan maksimum π_{10} ($\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}$) yaitu antara $21,969 \times 10^3$ – $32,188 \times 10^3$.

Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi, sedangkan variabel yang lain konstan, maka kadar air akhir pati sagu semakin besar. Hal ini diduga terjadi karena pati sagu basah mengalami resirkulasi yang lebih singkat, lebih cepat terhisap oleh *blower* pada siklon resirkulasi dan keluar menuju siklon *output*. Sedangkan apabila kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi diperkecil, maka pati sagu basah akan mengalami resirkulasi yang lebih lama sehingga waktu kontak bahan dengan udara panas lebih lama. Nilai kadar air akhir yang dihasilkan adalah 7–9% (wb). Penurunan kecepatan udara pengering mampu meningkatkan waktu tinggal bahan (Chapuis dkk., 2016).



Gambar 10. Grafik hubungan phi 1 dengan phi 10

Analisis Sensitivitas Model

Hasil uji kepekaan (uji sensitivitas) menunjukkan pengaruh *dimensionless product* terhadap kadar air akhir pati sagu basah yang dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel menunjukkan bahwa *dimensionless product* yang paling berpengaruh terhadap kadar air akhir adalah rasio suhu *input* pati sagu basah dengan udara pengering, rasio diameter dengan panjang pipa resirkulasi, dan rasio kecepatan udara *blower* pada siklon resirkulasi, *bulkdensity* pati sagu basah, diameter pipa resirkulasi dengan kapasitas *input* pati sagu basah. *Dimensionless product* yang paling berpengaruh hasil uji sensitivitas model matematis hubungan kadar air akhir dengan variabel proses pengeringan mekanis tepung kasava menggunakan *pneumatic dryer* atau *flash dryer* adalah rasio suhu udara pengering dengan suhu bahan awal (Witdarko dkk., 2016). Hal ini menunjukkan bahwa

variabel suhu dan pipa resirkulasi sangat berpengaruh dalam proses perancangan mesin PCRD, seperti halnya pada model non matematis (jaringan syaraf tiruan) hubungan kadar air akhir dengan proses pengeringan pati sagu pada mesin PCRD (Jading dkk., 2017).

Tabel 4. Pengaruh *dimensionless product* terhadap kadar air akhir pati sagu basah

<i>Dimensionless product</i>	Perubahan nilai kadar air akhir		Rata-rata perubahan nilai kadar air akhir (%)
	Penambahan 10 %	Pengurangan 10 %	
M_{ib}	2,59	-2,79	2,69
$(v_u \gamma_{ib} D_p^2) / Q_{ib}$	-1,59	1,79	1,69
T_{ib} / T_{u3}	7,14	-7,34	7,24
D_p / L_p	6,16	-6,39	6,28
L_{scrb} / D_{scrb}	-1,99	2,25	2,12
D_{Acrb} / D_{scrb}	1,34	-1,46	1,40
L_{Acrb} / D_{scrb}	1,89	-2,05	1,97
$(v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2) / Q_{ib}$	5,73	-5,97	5,85

KESIMPULAN

Model matematis hubungan antara kadar air akhir pati sagu basah dengan variabel-variabel proses pengeringan resirkulasi secara kontinyu pada mesin PCRD adalah:

$$M_{ob} = 3,762(M_{ib})^{0,268} \left(\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{-0,169} \left(\frac{T_{ib}}{T_{u3}} \right)^{0,723} \left(\frac{D_p}{L_p} \right)^{0,627} \left(\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}} \right)^{-0,211} \left(\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,139} \left(\frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}} \right)^{0,196} \left(\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}} \right)^{0,585}$$

Hasil uji validitas model diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar 0,948 atau 94,8%, hal ini menunjukkan bahwa model tersebut valid atau sah digunakan untuk memprediksi perubahan kadar air akhir pati sagu basah dalam merancang mesin PCRD. Sedangkan hasil uji sensitivitas diperoleh *dimensionless product* yang berpengaruh terhadap kadar air akhir pati sagu basah, yaitu $\frac{T_{ib}}{T_{u3}}$ sebesar 7,24 %, $\frac{D_p}{L_p}$ sebesar

6,28 %, $\frac{v_{ucrb} \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}$ sebesar 5,85 %, M_{ib} sebesar 2,69 %, $\frac{L_{scrb}}{D_{scrb}}$ sebesar 2,12 %, $\frac{L_{Acrb}}{D_{scrb}}$ sebesar 1,97 %, $\frac{v_u \gamma_{ib} D_p^2}{Q_{ib}}$ sebesar 1,69 %, dan $\frac{D_{Acrb}}{D_{scrb}}$ sebesar 1,40

%. Model matematis tersebut berlaku untuk pati sagu basah dengan batas nilai variabel tertentu. Namun demikian, memungkinkan digunakan untuk bahan-

bahan tepung lainnya yang memiliki sifat yang sama dengan pati sagu basah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sampai selesainya penelitian ini, lebih khusus Staf Teknisi Laboratorium Energi dan Mesin Pertanian (EMP) dan Teknik Pangan dan Pascapanen (TPP) Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem UGM, serta asisten lapangan yang telah membantu dalam pembuatan dan pengujian mesin PCRD.

DAFTAR PUSTAKA

Aichayawanic, S., Nopharatana, M., Nopharatana, A., & Songkasiri, W. (2012). Effects of pneumatics conveying drying conditions on damaged starch content and particle size of cassava starch. *Advance Materials Research*, 554-556, 1433-1438.

AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. Arlington, Virginia USA.

Banooni, S., Hajidavallo, E., & Dorfeshan, M. (2017). A comprehensive review on modeling of pneumatic and flash drying. *Drying Technology*, 35(15), 1-19. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1080/07373937.2017.1298123>.

Barr, D. J., & Baker, C. G. J. (1997). Specialized Drying Systems. In C. G. . Baker (Ed.), *Industrial Drying of Foods* (pp. 179-193). New York: Blackie Academic & Professional.

Bhattacharai, S., Jae-Heun, O. H., Euh, S. H., Kim, D. H., & Yu, L. (2014). Simulation study for pneumatic conveying drying of sawdust for pellet production. *Drying Technology*, 32, 335-344.

Bunyanawichakul, P., Walker, G. J., Sargison, J. E., & Doe, P. E. (2007). Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a simple pneumatic dryer. *Biosystems Engineering*, 96(3), 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.004>.

Chapuis, A., Precoppe, M., Meot, J. M., Sriroth, K., & Tran, T. (2016). Pneumatic drying of cassava starch: Numerical analysis and guidelines for the design of efficient small-scale dryers. *Drying Technology*, 35(4), 393-408. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1177537>.

de Pádua, T. F., Béttega, R., & Freire, J. T. (2015). Gas-solid flow behavior in a pneumatic conveying system for drying applications : Coarse particles feeding with a venturi vevice. *Advance in Chemical Engineering and Science*, 5(July), 225-238.

Jading, A., Bintoro, N., Sutiarsa, L., & Karyadi, J. N. W. (2016). Analisis efisiensi pneumatic conveying recirculated dryer untuk pengeringan bahan-bahan tepung. In Partoyo, Y. . Ratih, D. Mulyanto, & E. Al (Eds.), *Seminar Nasional Fakultas Pertanian UPN Veteran Yogyakarta* (pp. 370-378). Yogyakarta.

Jading, A., Bintoro, N., Sutiarsa, L., & Karyadi, J. N. W. (2017). Model jaringan syaraf tiruan untuk memprediksi kadar air bahan pada pneumatic conveying recirculated dryer. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 27(2), 141-151. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2017.27.2.141>.

Kaensup, W., Kulwong, S., & Wongwises, S. (2006). A Small-

- scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*, 24(1), 105–113. <https://doi.org/10.1080/07373930500538899>.
- Kisakurek, B. (1995). Flash Drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (2nd ed, pp. 503–524). New York: Marcel Dekker.
- Levy, A., & Borde, I. (2006). *Pneumatic and Flash Drying*. (A. S. Mujumdar, Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (Third). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9781420017618.ch16>.
- Murphy, G. (1950). *Similitude in Engineering*. New York: The Ronald Press Company.
- Nugroho, J. K. W., Primawati, Y. F., & Bintoro, N. (2012). Proses pengeringan singkong (Manihot esculenta crantz) parut dengan menggunakan pneumatic dryer. In *Seminar Nasional PERTETA* (pp. 96–104). Denpasar, Indonesia.
- Otuu, O. O., Omenyi, S., & Nwigbo, S. (2013). Finite element modelling of cassava flash drying in a vertically upward pneumatic conveying dryer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 24–41.
- Rahayoe, S., Distantina, S., & Perdana, I. (2011). Simulasi perancangan flash dryer untuk pengeringan tepung tapioka pada tingkat UMKM. In *Seminar Nasional PERTETA* (pp. 270–281). Jember.
- Suherman, Kumoro, A. C., & Kusworo, T. D. (2015). Eksperimental study on drying kinetics of cassava starch in a pneumatic drying system. In *ICCM* (pp. 1–6). Semarang, Indonesia: AIP Publishing LLC. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1063/1.4938337>.
- Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., & Atungulu, G. G. (2008). Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.014>.
- Tolmač, D., Blagojević, Z., Prvulović, S., Tolmač, J., & Radovanović, L. (2010). Experimental study on drying kinetic and energetic characteristics of convection pneumatic dryer. *Facta Universitatis: Mechanical Engineering*, 8(1), 89–96.
- Witdarko, Y., Bintoro, N., & Rahardjo, B. (2016). Pemodelan matematis hubungan kadar air tepung dengan variabel proses pada pengeringan mekanis tepung kasava menggunakan pneumatic dryer. *Agritech*, 36(1), 111–116.