

Pengembangan Model Matematik Laju Penurunan Kafein dalam Biji Kopi dengan Metode Pelindian

Development of Mathematic Model for Coffee Decaffeination with Leaching Method

Sukrisno Widyotomo^{1*)}, Hadi K. Purwadaria²⁾ dan Atjeng M. Syarif²⁾

Ringkasan

Model matematik sederhana untuk menggambarkan kinetika kafein selama proses pelindian dalam biji kopi telah dikembangkan. Persamaan difusi pada kondisi tak mantap (*unsteady*) yang berkaitan dengan persamaan perpindahan massa makroskopik untuk pelarut telah dikembangkan dan diselesaikan secara analitis. Kinetika pelindian kafein dari dalam biji kopi ditentukan oleh kadar kafein awal, kadar kafein akhir, kadar kafein pada waktu tertentu, koefisien perpindahan massa, volume pelarut, luas permukaan biji kopi, waktu proses, jari-jari biji kopi, laju pelarutan kafein, difusivitas kafein, konsentrasi pelarut, energi aktivasi, suhu dan tetapan gas. Difusivitas massa internal kafein dapat diprediksi dari model untuk digunakan dengan menggunakan pelarut asam asetat dan limbah cair fermentasi biji kakao. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persamaan yang terbentuk mampu menerangkan kinetika proses pelindian kafein dari biji kopi. Laju pelindian kafein dalam biji kopi dapat diprediksi dengan persamaan tertentu. Nilai difusivitas kafein (D_k) antara $1,345 \times 10^{-7} - 4,1638 \times 10^{-7}$ m²/detik, dan nilai koefisien perpindahan massa (k_L) antara $2,445 \times 10^{-5} - 5,551 \times 10^{-5}$ m/detik dengan pelarut asam asetat tergantung pada suhu dan konsentrasi pelarut. Persamaan yang terbentuk untuk memprediksi waktu pelindian senyawa kafein dari kondisi awal sampai konsentrasi tertentu dalam biji kopi telah diperoleh. Nilai difusivitas (D_k) dan koefisien perpindahan massa (k_L) kafein yang diperoleh dari proses pelindian dengan menggunakan limbah cair fermentasi biji kakao masing-masing $1,591 \times 10^{-7} - 2,122 \times 10^{-7}$ m²/detik, dan $4,897 \times 10^{-05} - 6,529 \times 10^{-05}$ m/detik tergantung pada suhu dan konsentrasi pelarut.

Summary

A simple mathematic model for caffeine kinetic description during the extraction process (leaching) of coffee bean was developed. A non-steady diffusion equation coupled with a macroscopic mass transfer equation for solvent was developed and them solved analytically. The kinetic of caffeine extraction from coffee bean is depend on initial caffeine content, final caffeine content, caffeine content at certain time, mass-transfer coefficient, solvent volume, surface area of coffee beans, process time, radius of coffee bean, leaching rate of caffeine, caffeine diffusivity and a are constan, solvent concentration, activation energy, temperature absolute and gas constant. Caffeine internal mass diffusivity was estimated by fitting the model to an experiment using acetic acid and liquid waste of cocoa beans fermentation. The prediction equation for leaching rate of caffeine in coffee beans has been found. It was found that D_k (m²/sec) = $1.345 \times 10^{-7} - 4.1638 \times 10^{-7}$, and k_L (m/sec) = $2.445 \times 10^{-5} - 5.551 \times 10^{-5}$ by acetic acid as solvent depended on temperature

Naskah diterima (received) 24 Februari 2011, disetujui (accepted) 25 Maret 2011.

1) Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia, Jl. PB. Sudirman No. 90, Jember, Indonesia.

*) Alamat penulis (Corresponding Author): swidyotomo@yahoo.com

and solvent concentration. The prediction equation for length of time to reduce initial caffeine content to certain concentration in coffee beans has been developed, Caffeine diffusivity (D_k) and mass-transfer coefficient (k_f) was found respectively 1.591×10^{-7} – 2.122×10^{-7} m²/sec and 4.897×10^{-5} – 6.529×10^{-5} m/sec using liquid waste of cocoa bean fermentation as solvent which depend on temperature and solvent concentration.

Key words: Coffee, caffeine, decaffeination, leaching, mathematic model.

PENDAHULUAN

Pengembangan proses dekafeinasi biji kopi Robusta dalam reaktor kolom tunggal secara intensif telah dilakukan oleh Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia menggunakan pelarut air (Sri-Mulato *et al.*, 2004; Lestari, 2004), dan pelarut etil asetat teknis konsentrasi 10% (Widyotomo *et al.*, 2009). Pelindian kafein dari dalam biji kopi ke senyawa pelarut berlangsung dengan mekanisme pelindian (*leaching*), yaitu proses perpindahan senyawa kafein dari dalam biji kopi ke pelarut karena adanya pemicu berupa perbedaan konsentrasi dan kelarutan senyawa kafein yang terdapat di dalam biji kopi dengan pelarut (Brown, 1950; Treyball, 1980; Earley, 1983). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa laju dan waktu pelindian kafein untuk mencapai kadar kafein 0,3% ditentukan oleh suhu dan konsentrasi pelarut. Hal yang sama juga dilaporkan dari hasil penelitian Kirk-Othmer (1998) dan Perva-Uzunalic *et al.* (2006).

Dengan semakin meningkatnya kepedulian konsumen kopi terhadap kesehatan, maka penggunaan pelarut organik untuk proses dekafeinasi lebih diutamakan. Asam asetat merupakan salah satu senyawa organik yang dapat digunakan sebagai pelarut kafein dalam biji kopi. Asam asetat dalam jumlah yang cukup banyak dapat diperoleh dari proses fermentasi biji kakao. Selain diperoleh biji

kakao dengan mutu yang baik (SNI 2323; 2008), proses fermentasi akan menghasilkan limbah cair yang didominasi oleh senyawa asam asetat sebanyak 20% b/b (Sri-Mulato, 2001). Reaksi dalam proses fermentasi berbeda-beda tergantung pada jenis gula yang digunakan dan produk yang dihasilkan. Mikroba memanfaatkan senyawa gula tersebut sebagai media tumbuh sehingga lapisan pulpa terurai menjadi cairan yang encer dan keluar lewat lubang-lubang di dasar dan dinding peti fermentasi. Secara singkat, glukosa ($C_6H_{12}O_6$) yang merupakan gula paling sederhana, melalui fermentasi akan menghasilkan etanol ($2C_2H_5OH$) dan berlanjut menjadi asam asetat (CH_3COOH) (Rohan, 1963). Potensi tersebut perlu dikelola dengan baik salah satunya dengan memanfaatkan limbah cair fermentasi biji kakao sebagai pelarut kafein dalam proses dekafeinasi. Selain akan diperoleh mutu akhir yang baik, pemanfaatan limbah cair tersebut akan memberikan nilai tambah dan menekan dampak negatif terhadap lingkungan (Purwadaria *et al.*, 2007; 2008).

Prediksi laju dan waktu pelindian kafein yang tepat untuk mencapai persyaratan kopi rendah kafein sesuai standar perdagangan yang telah ditetapkan sangat diperlukan agar proses dapat dilakukan secara tepat dan efisien. Penelitian yang membahas pengembangan model matematik untuk memprediksi laju dan waktu pelindian kafein dari dalam biji kopi dengan menggunakan reaktor kolom tunggal belum

pernah dilakukan. Difusivitas senyawa kafein dari matriks padatan biji kopi ke pelarut merupakan salah satu parameter yang sangat menentukan laju dekafeinasi. Representasi matematika dari proses dekafeinasi biji kopi masih sangat terbatas dan umumnya menggunakan solusi analitik hukum Fick kedua (Bichsel, 1979; Hulbert *et al.*, 1998; Spiro & Selwood, 1984; Udaya-Sankar *et al.*, 1983). Pada sistem fase tunggal, laju perpindahan massa yang disebabkan adanya difusi molekular dijabarkan dalam hukum difusi Fick sebagaimana dijabarkan oleh Doran (1995), Crank (1975), Bichsel (1979), Hulbert *et al.* (1998), Spiro & Selwood (1984) dan Udaya-Sankar *et al.* (1983). Difusi molekular adalah perpindahan molekul dari komponen campuran yang dipengaruhi perbedaan konsentrasi dalam suatu sistem fluida. Sri-Mulato *et al.* (2004) melaporkan bahwa ukuran biji kopi tidak berpengaruh nyata terhadap laju pelindian kafein dalam reaktor kolom tunggal.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model matematik laju pelindian kafein dalam biji kopi dengan metode pelindian. Proses pelindian kafein dalam reaktor kolom tunggal berlangsung dengan mekanisme pelindian (Widyotomo *et al.*, 2009; Sri-Mulato *et al.*, 2004; Geankoplis, 1983). Senyawa pelarut yang digunakan untuk pengembangan model matematik adalah asam asetat, dan untuk validasi model matematik digunakan pelarut limbah cair fermentasi biji kakao. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan operator untuk memprediksi waktu pelindian yang tepat sehingga proses dekafeinasi biji kopi dalam reaktor kolom tunggal dengan menggunakan pelarut asam asetat dan limbah cair fermentasi biji kakao akan berlangsung efektif dan efisien.

Pendekatan Teori

Model perpindahan massa kafein dari dalam biji kopi diturunkan berdasarkan beberapa asumsi: 1) Biji kopi berbentuk bulat (*spherical*) dan perpindahan massa kafein terjadi sepanjang jari-jari (r), 2) Perpindahan massa kafein terjadi hanya secara difusi dari dalam ke permukaan biji kopi, 3) Sifat perpindahan massa kafein yang terjadi diasumsikan seragam, 4) Proses difusi dapat digambarkan dengan menggunakan hukum Fick dengan difusivitas efektif yang tetap, 5) Biji kopi memiliki sifat yang homogen dan selalu pada kondisi mantap (*steady*).

Model matematik untuk ekstraksi kafein harus meliputi perhitungan difusi kafein di dalam biji, konveksi kafein pada kondisi batas pelarut dan padatan dalam hal ini permukaan biji kopi, dan hubungan kesetimbangan yang terjadi antara konsentrasi kafein dalam biji kopi dan pelarut (Espinoza-Perez *et al.*, 2007). Solusi analitis untuk profil konsentrasi keadaan tak mantap $c_A(r, t)$ diperoleh dengan teknik pemisahan variabel (Gambar 1). Rincian solusi analitik dalam koordinat bundar adalah sebagai berikut (Crank, 1975; Saravacos & Maroulis, 2001; Welty *et al.*, 2001) :

$$\frac{c_A - c_{A0}}{c_{As} - c_{A0}} = 1 + \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \cdot e^{-D_k \cdot n^2 t / R^2}$$

$$r \neq 0, n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Di pusat butiran bundar ($r = 0$), konsentrasinya adalah :

$$\frac{c_A - c_{A0}}{c_{As} - c_{A0}} = 1 + \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-D_k \cdot n^2 t / R^2}$$

$$r \neq 0, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

..... (6)

... (3)

.... (7)

..... (4)

$t = 0$

$t > 0$

$N_A(R, t)$

Pelarut
Solvent
 $c_{A^*} = 0$

$c_A(r, 0) < c_{A0}$

$r = 0, c_A(r, 0) = c_{A0}$
 $dc_A/dc = 0$

$r = R$
 $c_{A0} = 0$

Biji kopi
Coffee bean

..... (6)

... (3)

.... (7)

..... (4)

$t = 0$

$t > 0$

$N_A(R, t)$

Pelarut
Solvent
 $c_{A^*} = 0$

$c_A(r, 0) < c_{A0}$

$r = 0, c_A(r, 0) = c_{A0}$
 $dc_A/dc = 0$

$r = R$
 $c_{A0} = 0$

Biji kopi
Coffee bean

..... (6)

... (3)

.... (7)

..... (4)

$t = 0$

$t > 0$

$N_A(R, t)$

Pelarut
Solvent
 $c_{A^*} = 0$

$c_A(r, 0) < c_{A0}$

$r = 0, c_A(r, 0) = c_{A0}$
 $dc_A/dc = 0$

$r = R$
 $c_{A0} = 0$

Biji kopi
Coffee bean

Laju pelindian kafein penguapan bahan pangan selama laju pengeringan menurun dapat diprediksi dengan persamaan difusi tak mantap. Setelah solusi analitik untuk profil konsentrasi diketahui, maka dapat dilakukan perhitungan laju pelindian kafein dan jumlah kumulatif pelindian kafein per satuan waktu. Laju pelindian kafein (W_A) pada waktu ke-t adalah hasil kali fluks di permukaan biji kopi ($r = R$), dan luas permukaan biji kopi yang berbentuk bundar (Welty et al., 2001; Bird et al., 1960).

$$W_A(t) = 8 \cdot \pi \cdot R \cdot c_{A0} \cdot D_k \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D_k \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t / R^2} \dots (3)$$

Jumlah kumulatif kafein yang dilepaskan dari dalam biji kopi terhadap waktu adalah integral dari laju pelindian kafein terhadap waktu.

$$V \cdot dc_A(t) = \int_0^t W_A(t) \partial t \dots (4)$$

Integrasi persamaan di atas akan menghasilkan persamaan sebagai berikut (Anderson et al., 2003; Crank, 1975) :

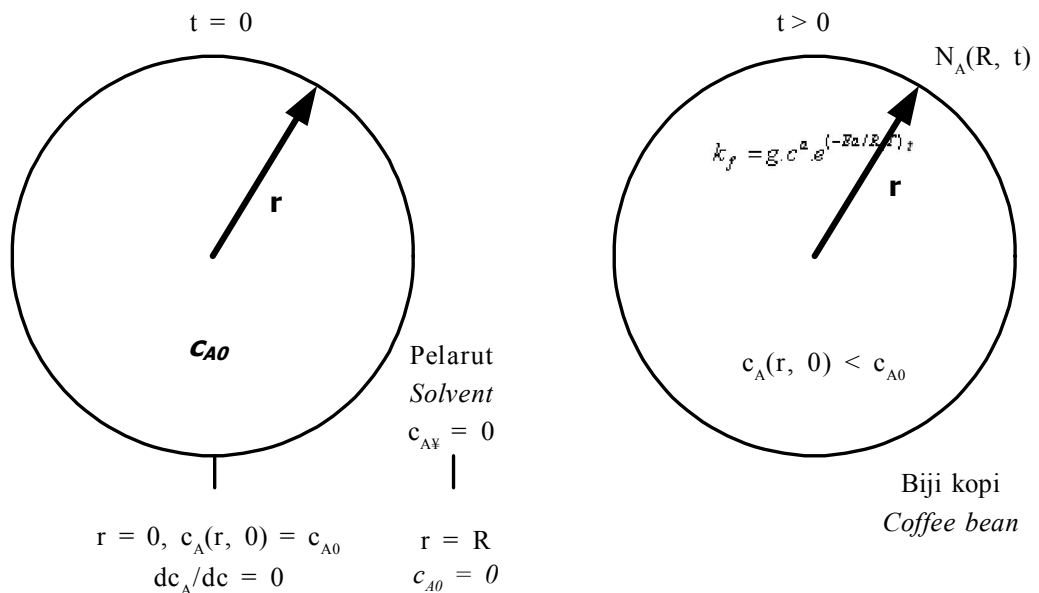
$$\frac{c_{AS} - c_A}{c_{A0} - c_A} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-D_k \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t / R^2} \dots (5)$$

Geankoplis (1983) melaporkan bahwa persamaan untuk menentukan laju pelindian (leaching) adalah sebagai berikut:

$$\frac{V \cdot dc_A}{dt} = k_L \cdot A_p (c_{A0} - c_A) \dots (6)$$

Integrasi persamaan di atas dengan kondisi batas $t = 0$ dan $c_A = c_{A0}$ sampai dengan $t = t$ dan $c_A = c_A$ adalah sebagai berikut :

$$\frac{c_{AS} - c_A}{c_{A0} - c_A} = e^{-(k_L \cdot A_p / V)t} \dots (7)$$



Gambar 1. Pelindian kafein dari dalam biji kopi.
Figure 1. Caffeine removed from coffee bean.

Persamaan (7) adalah bentuk sederhana dari Persamaan (5) dan akan terbukti mampu menggambarkan kinetika proses ekstraksi sistem padatan-cairan dalam hal ini larutan kafein-biji kopi dimana kafein akan diekstrak dari biji kopi. Dalam persamaan 7, c_{AS} adalah kadar kafein yang pada kondisi-t (%), c_A adalah kadar kafein yang diinginkan (0,1 atau 0,3%), c_{A0} adalah kadar kafein awal (%), k_L adalah koefisien perpindahan massa (m/det), A_p adalah luas permukaan (m^2), V adalah volume pelarut (m^3) dan t adalah waktu proses (detik).

Nilai laju pelindian kafein (k_p) merupakan fungsi dari konsentrasi (c) dan suhu pelarut (T) yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$k_f = g \cdot c^a \cdot e^{(-Ea/R_gT)} \quad (8)$$

Nilai difusivitas (D_k) dan koefisien perpindahan massa (k_L) dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$D_k = \frac{r^2}{\pi^2} \cdot k_f = \frac{r^2}{\pi^2} \cdot g \cdot c^a \cdot e^{(-Ea/R_gT)} \quad (9)$$

$$k_L = \frac{D_k}{r} \quad (10)$$

BAHAN DAN METODE

Penelitian pengembangan model matematik laju pelindian senyawa kafein dalam reaktor kolom tunggal dilaksanakan di Laboratorium Teknik Pengolahan Pangan dan Hasil Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Pengujian dan validasi model dilakukan di Laboratorium Pasca-panen, Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah biji kopi Robusta, asam asetat teknis, dan limbah cair fermentasi biji kakao. Biji kopi Robusta yang digunakan berasal dari kebun percobaan

Kaliwining. Metode pengolahan yang diterapkan oleh Kebun Percobaan Kaliwining adalah pengolahan kering dengan kadar air biji kering antara 13-14%, dan masuk dalam tingkat mutu IV (Tabel 1). Asam asetat teknis digunakan sebagai pelarut kafein dalam proses dekafeinasi untuk menentukan beberapa nilai parameter dalam model matematik yang akan dikembangkan. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap faktorial dengan parameter perlakuan suhu dan konsentrasi pelarut. Suhu pelarut divariasi dalam 6 tingkatan, yaitu 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C dan 100°C. Konsentrasi asam asetat divariasi dalam 5 tingkatan, yaitu 10%, 30%, 50%, 80% dan 100%. Validasi model matematik yang telah dibangun dilakukan dengan melakukan proses dekafeinasi menggunakan limbah cair fermentasi biji kakao. Limbah cair fermentasi biji kakao diperoleh dari proses fermentasi biji kakao lindak. Satu siklus proses fermentasi biji kakao lindak dilakukan selama 5 hari dalam peti dangkal dengan proses pembalikan dilakukan satu kali setelah 48 jam proses fermentasi berlangsung. Limbah cair diambil setelah proses fermentasi selesai. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa limbah cair fermentasi biji kakao mengandung senyawa asam asetat sebesar 1,32% (v/v).

Alat yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini terdiri dari reaktor kolom tunggal dan beberapa alat pendukung. Reaktor kolom tunggal yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini merupakan hasil pengembangan dari hasil kegiatan penelitian sebelumnya (Widyotomo *et al.*, 2009). Reaktor dibuat dari bahan aluminium tebal 2 mm dan memiliki ukuran diameter dan panjang masing-masing 300 mm dan 1.200 mm. Ruang di dalam reaktor kolom tunggal dibagi dalam

2 kompartemen. Kompartemen atas berfungsi menampung biji kopi yang akan diproses dengan ukuran dimensi panjang dan diameter masing-masing 350 mm dan 300 mm. Kompartemen bawah berfungsi untuk menampung air atau pelarut dengan ukuran dimensi panjang dan diameter masing-masing 800 mm dan 300 mm. Debit sirkulasi air yang mampu dihasilkan oleh pompa sebesar 1.550 L/jam. Sumber panas yang digunakan untuk membangkitkan panas selama proses pengukusan dan pelarutan adalah kompor bertekanan berbahan bakar LPG. Beberapa alat pendukung terdiri dari seperangkat komputer untuk membangun model matematik dan optimasi proses dekafeinasi, data *acquisition* FLUKE dengan sensor *Ni-Cr Ni* tipe K yang berfungsi sebagai pencatu suhu dilengkapi seperangkat komputer dengan penyimpanan data, dan lain-lain.

Pengembangan model matematik

Tahapan pelaksanaan penelitian pengembangan model matematik laju penurunan kafein dalam biji kopi dengan metode pelindian ditampilkan pada Gambar 2. Persamaan 7 digunakan sebagai dasar pengembangan model matematik tentang teori pelindian yang dijabarkan oleh Geankoplis (1983). Tahap awal penelitian ini adalah melakukan proses pengukusan dan pelarutan senyawa kafein dengan pelarut asam asetat pada perlakuan suhu 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C dan 100°C, dan perlakuan konsentrasi pelarut 10%, 30%, 50%, 80% dan 100%. Proses dekafeinasi diawali dengan tahap pengukusan biji kopi selama 1,5 jam dengan media uap air. Contoh biji kopi dari setiap perlakuan suhu dan konsentrasi dengan waktu pelindian (*t*) dari beberapa pelarut diambil setelah proses pelindian

Tabel 1. Sifat fisik dan kimia bahan baku

Table 1. Physical and chemical properties of raw material

Parameter <i>Parameters</i>	Kopi biji <i>Coffee beans</i>	Kopi bubuk <i>Coffee powder</i>
Kadar air, % b.b (<i>w.b</i>)	13 - 14	2 - 3
Densitas kabin, <i>kg/m</i>	703 - 757	350 - 420
Volume, m ³ /biji (<i>m³/bean</i>)	6.55x10 ⁻⁸ - 2.21x10 ⁻⁷	-
Luas area, m ² /biji (<i>m²/bean</i>)	7.85x10 ⁻⁵ - 1.77x10 ⁻⁴	-
Distribusi ukuran biji (<i>size distribution of beans</i>)		
<i>d</i> < 5.5 mm, %	5.3	-
5.5 < <i>d</i> < 6.5 mm, %	26.9	-
6.5 < <i>d</i> < 7.5 mm, %	55.8	-
<i>d</i> > 7.5 mm, %	12	-
Kafein (<i>caffeine</i>), % b.k	2.28	2.20
pH	5.6	4.5
Parameter cita rasa (<i>parameter of tastes</i>)		
Aroma	-	3.5
Flavor	-	3.5
Bitterness	-	3.5
Body	-	3.5
Apresiasi akhir	-	3.5
Final appreciation		

Ukur kadar air dan rerata diameter biji
To measure of moisture content and mean of beans diameter

Masukkan air dan biji kopi ke dalam reaktor
Water and coffee beans loading into reactor

Pengukusan dengan uap air
Steaming process

Kadar air maksimum?
Is it moisture content maximum?

Hitung waktu proses pengukusan
To calculate of steaming time

Tentukan konsentrasi pelarut dan suhu proses
To determine temperature process and solvent concentration

Penggantian air dengan pelarut kafein
Substitution water by solvent

Pelindian kafein
Leaching process

Kadar kafein
Caffeine content δ 0,3% ?

Hitung waktu proses pelindian
To calculate of leaching time?

Biji kopi rendah kafein
Decaffeinated coffee bean

(a)

MULAI
Start

Kembangkan model
Model development

Masukan parameter
Entering parameters

Perhitungan $t_{-0,3}$
Calculating $t_{-0,3}$

Waktu proses prediksi
Prediction of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis

Validasi
Validation

Selesai
Stop

(b)

Bahan dan peralatan
Raw materials & equipments

Proses dekafeinasi
Decaffeination process

Ukur suhu, kadar kafein,
 dll
Measuring temperature, caffeine content, etc

Waktu proses observasi
Observation of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis

Ukur kadar air dan rerata diameter biji
To measure of moisture content and mean of beans diameter

Masukkan air dan biji kopi ke dalam reaktor
Water and coffee beans loading into reactor

Pengukusan dengan uap air
Steaming process

Kadar air maksimum?
Is it moisture content maximum?

Hitung waktu proses pengukusan
To calculate of steaming time

Tentukan konsentrasi pelarut dan suhu proses
To determine temperature process and solvent concentration

Penggantian air dengan pelarut kafein
Substitution water by solvent

Pelindian kafein
Leaching process

Kadar kafein
Caffeine content δ 0,3% ?

Hitung waktu proses pelindian
To calculate of leaching time?

Biji kopi rendah kafein
Decaffeinated coffee bean

(a)

MULAI
Start

Kembangkan model
Model development

Masukan parameter
Entering parameters

Perhitungan $t_{-0,3}$
Calculating $t_{-0,3}$

Waktu proses prediksi
Prediction of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis

Validasi
Validation

Selesai
Stop

(b)

Bahan dan peralatan
Raw materials & equipments

Proses dekafeinasi
Decaffeination process

Ukur suhu, kadar kafein,
 dll
Measuring temperature, caffeine content, etc

Waktu proses observasi
Observation of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis

Ukur kadar air dan rerata diameter biji
To measure of moisture content and mean of beans diameter

Masukkan air dan biji kopi ke dalam reaktor
Water and coffee beans loading into reactor

Pengukusan dengan uap air
Steaming process

Kadar air maksimum?
Is it moisture content maximum?

Hitung waktu proses pengukusan
To calculate of steaming time

Tentukan konsentrasi pelarut dan suhu proses
To determine temperature process and solvent concentration

Penggantian air dengan pelarut kafein
Substitution water by solvent

Pelindian kafein
Leaching process

Kadar kafein
Caffeine content δ 0,3% ?

Hitung waktu proses pelindian
To calculate of leaching time?

Biji kopi rendah kafein
Decaffeinated coffee bean

(a)

MULAI
Start

Kembangkan model
Model development

Masukan parameter
Entering parameters

Perhitungan $t_{-0,3}$
Calculating $t_{-0,3}$

Waktu proses prediksi
Prediction of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis

Validasi
Validation

Selesai
Stop

(b)

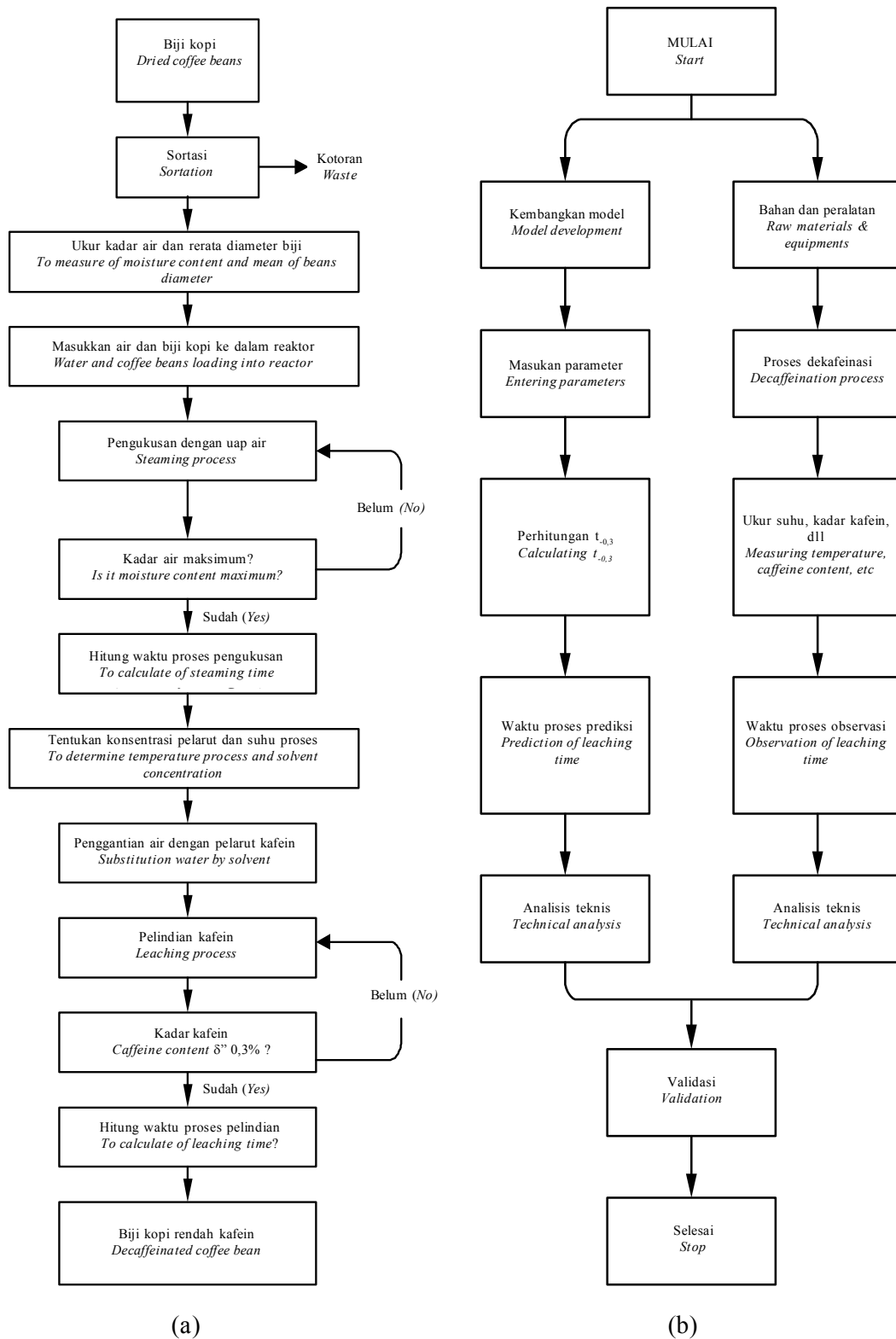
Bahan dan peralatan
Raw materials & equipments

Proses dekafeinasi
Decaffeination process

Ukur suhu, kadar kafein,
 dll
Measuring temperature, caffeine content, etc

Waktu proses observasi
Observation of leaching time

Analisis teknis
Technical analysis



Gambar 2. Tahapan penelitian (a) pengambilan data, dan (b) pengembangan model.
 Figure 2. Research stages (a) collecting data, and (b) model development.

berlangsung selama dua jam, dan selanjutnya pada setiap interval waktu satu jam untuk dilakukan analisis. Analisis biji kopi dilakukan terhadap kadar kafein yang masih tersisa di dalam biji kopi, dan citarasa yang meliputi sensori aroma, flavor, *body* dan *bitterness*.

Data kadar kafein yang diperoleh dari setiap perlakuan suhu dan konsentrasi pelarut diplotkan dalam bentuk grafik. Untuk mendapatkan hubungan laju pelindian kafein terhadap suhu dan konsentrasi pelarut secara simultan sebagaimana dijabarkan dalam Persamaan 8, maka dilakukan analisis muti regresi dengan membentuk persamaan berpangkat. Analisis multi regresi dilakukan dengan menggunakan program SPSS (*Statistical Product and Service Solution*) untuk menentukan nilai konstanta pada variabel suhu dan konsentrasi. Setelah diperoleh nilai k_f , maka dapat ditentukan nilai konstanta g , a dan E_a/R . Pada nilai A_p/V yang tetap, maka dapat dihitung waktu pelarutan ($t_{0,3}$) yang diperlukan untuk memperoleh kadar kafein dalam biji kopi sebesar 0,3%.

Nilai prediksi laju pelarutan (k_f) dan waktu yang diperlukan untuk mencapai kadar kafein maksimum 0,3% ($t_{0,3}$) divalidasi dengan cara membandingkannya dengan nilai hasil observasi dari tahap penelitian sebelumnya. Validasi model yang telah dikembangkan dilakukan dengan menghitung nilai koefisien determinasi (R^2). Nilai koefisien determinasi (R^2) berkisar antara 0 dan 1. Apabila nilai R^2 mendekati 1 berarti keandalan data prediksi semakin baik, dan model yang telah dikembangkan dinyatakan valid.

Rangkaian kegiatan penelitian berikutnya adalah uji coba proses dekafeinasi biji kopi dengan pelarut limbah cair proses fermentasi biji kakao. Tujuannya adalah

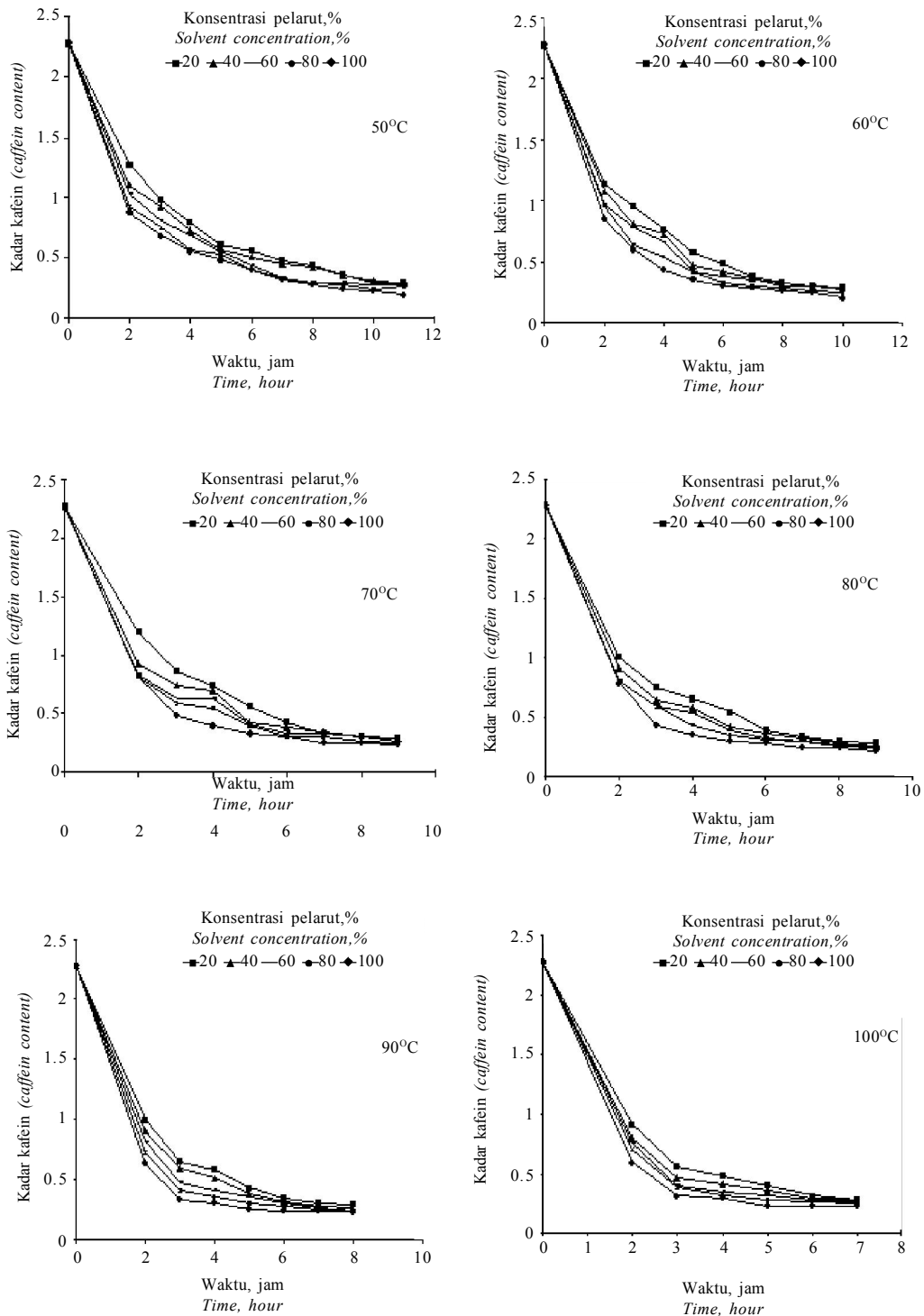
pengamatan dan pengukuran secara langsung berdasarkan matrik perlakuan yang ditampilkan oleh software *Response Surface Methodology* (RSM). Waktu pelindian kafein ($t_{0,3}$) prediksi diperoleh dari hasil perhitungan model matematik yang telah dibangun. Dengan menggunakan persamaan 9 dan 10 akan diperoleh nilai k_f , D_k dan k_L untuk pelarut limbah cair fermentasi biji kakao. Persamaan tersebut digunakan untuk membentuk kurva laju pelindian kafein prediksi, dan dibandingkan dengan kurva laju pelindian kafein observasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama proses pelindian terjadi proses perpindahan senyawa kafein yang terdapat di dalam pori-pori menuju permukaan biji, dan terlepas dari biji yang kemudian terikut dalam pelarut. Proses tersebut berlangsung secara difusi. Suhu dan konsentrasi pelarut merupakan dua parameter yang sangat menentukan tinggi rendahnya laju pelindian kafein dari dalam biji kopi. Gambar 4 menunjukkan bahwa dengan semakin tinggi suhu dan konsentrasi asam asetat, laju penurunan kafein akan semakin besar.

Foust (1959) melaporkan bahwa dengan semakin tinggi suhu akan menurunkan viskositasnya sehingga difusivitas akan naik. Dengan semakin tinggi difusivitas pelarut dan renggangnya pori-pori biji kopi, maka akan lebih mudah bagi pelarut untuk masuk ke dalam jaringan biji kopi sehingga kafein akan lebih mudah ikut terlarut kedalam pelarut untuk dikeluarkan dari dalam biji kopi.

Laju pelindian kafein (k_f) dihitung dari gradien kurva waktu pelindian terhadap rasio kadar kafein. Gambar 5 menunjukkan hubungan antara kadar kafein ($\ln c_A/R$) konsentrasi pelarut (0, 10, 30, 50, 80 dan



Gambar 4. Laju penurunan kafein dari perlakuan konsentrasi pelarut 10-100% dan suhu pelarut 50-100°C.
 Figure 4. Decaffeination rate from 10-100% solvent concentrations, and 50-100°C solvent temperatures treatment.

.....(11)

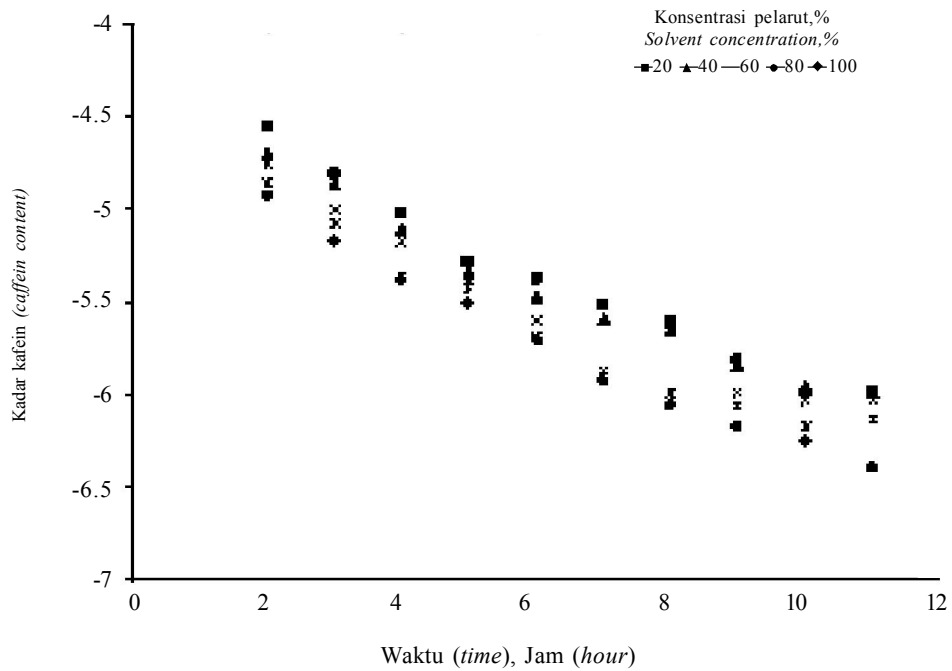
..(12)

.....(11)

..(12)

.....(11)

..(12)



Gambar 5. Hubungan antara waktu pelindian (t) terhadap kadar kafein ($\ln c_t/R$) dari beberapa konsentrasi pelarut (0, 10, 30, 50, 80 dan 100%) dan pada suhu pelarut 50°C.

Figure 5. Relationship between caffeine content ($\ln c_t/R$) with leaching time (t) from several solvent concentration (0, 10, 30, 50, 80 and 100%) and 50°C solvent temperature.

100%) pada suhu pelarut 50°C. Data tersebut mendeskripsikan pengaruh suhu dan konsentrasi pelarut terhadap perubahan kadar kafein di dalam biji kopi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam notasi positif, dengan semakin tinggi suhu dan konsentrasi pelarut, maka nilai laju pelindian (k_f) akan semakin besar. Notasi negatif pada nilai k_f menunjukkan arah peluruhan. Suhu pelarut menentukan *thermal driving force*. Makin tinggi suhu pelarut, maka *thermal driving force*-nya akan semakin besar. Kondisi tersebut menyebabkan proses perpindahan panas ke dalam biji kopi semakin cepat dan laju pelindian kafein semakin besar. Nilai laju perpindahan kafein yang selalu negatif menunjukkan bahwa terjadi proses perpindahan senyawa kafein dari dalam

pori-pori biji kopi menuju permukaan biji dan ikut terlarut dalam senyawa pelarut.

Hasil analisis SPSS (*Statistical Product and Service Solution*) diperoleh persamaan untuk menentukan nilai koefisien laju pelarutan sebagai berikut,

$$k_f = 4,4106 \cdot C^{0,01282} \cdot \exp(-1041,82/T) \dots\dots(11)$$

Nilai difusivitas kafein (D_k) dapat ditentukan dengan persamaan berikut,

$$D_k = \left(\frac{r^2}{\pi^2}\right) \cdot k_f = \left(\frac{r^2}{\pi^2}\right) \cdot 4,4106 \cdot C^{0,01282} \cdot \exp(-1041,82/T) \dots(12)$$

Persamaan tersebut di atas menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi pelarut terhadap nilai difusivitas kafein ditunjukkan dengan pangkat positif. Perpindahan massa

kafein atau difusivitas senyawa kafein akan semakin cepat dengan semakin tingginya konsentrasi kafein di dalam biji kopi dan makin tingginya suhu pelarut. Sedangkan hubungan antara suhu dengan laju pelindian kafein mengikuti pola linier dengan nilai energi aktivasi (E_a) sebesar 8,68 kJ/mol.

Gambar 6 menunjukkan grafik *scatter plot* nilai laju pelindian observasi (k_{f-obs}) versus prediksi (k_{f-pred}) selama proses dekafeinasi dalam reaktor kolom tunggal pada rentang suhu 50–100°C dan konsentrasi pelarut 10–100%. Analisis statistik menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9328. Hasil tersebut menunjukkan bahwa persamaan yang telah dikembangkan cukup valid untuk memprediksi laju pelindian kafein (k_f) dengan kisaran kondisi yang telah disebutkan.

Biji kopi dianggap berbentuk bulat (*spherical*) dan rasio nilai A_p terhadap V merupakan fungsi diameter biji kopi (d). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai A_p/V dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan $(A_p/V) = 3,3319d + 10,302$ sebagaimana ditampilkan pada Gambar 7. Analisis statistik menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9567.

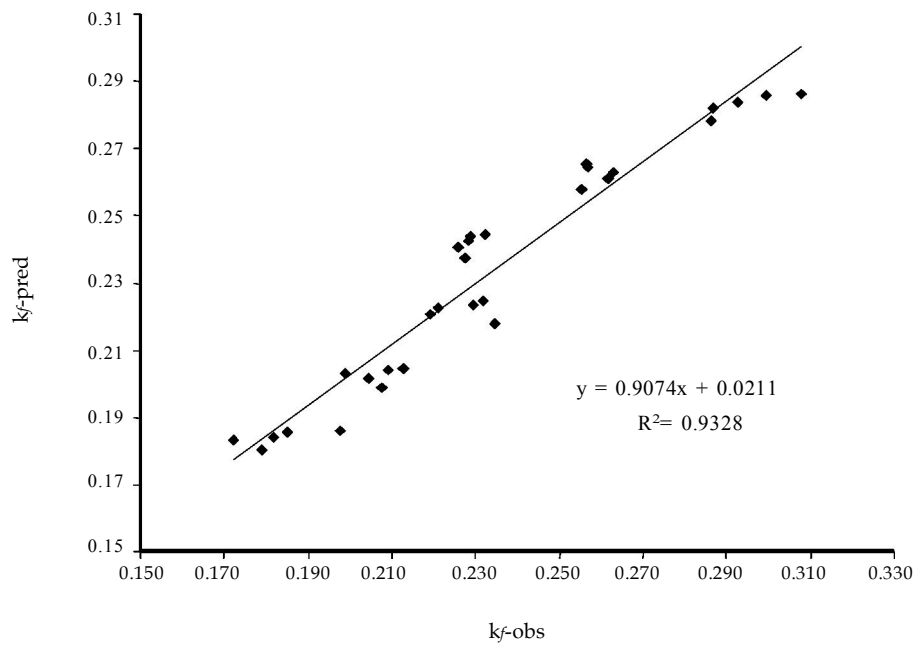
Model matematik perpindahan massa kafein pada elemen volume berbentuk bola berjari-jari ditunjukkan dengan perubahan kadar kafein sebagai fungsi posisi (r) dan waktu (t) (Espinoza-Perez *et al.*, 2007; Saravacos & Maroulis, 2001; Welty *et al.*, 2001; Crank, 1975). Proses pelarutan kafein biji kopi dalam reaktor kolom tunggal merupakan proses pencucian dengan metode perkolasi (Sri-Mulato *et al.*, 2004). Penyelesaian persamaan Geankoplis (1983) untuk menghasilkan prediksi pelindian kadar kafein di dalam biji kopi memerlukan sejumlah masukan data antara lain kadar kafein awal (c_{A0}),

kadar kafein akhir (c_A), diameter biji kopi (d), suhu pelarut (T), konsentrasi pelarut (c), massa kopi (m_k), suhu lingkungan (T_l) dan volume pelarut (V).

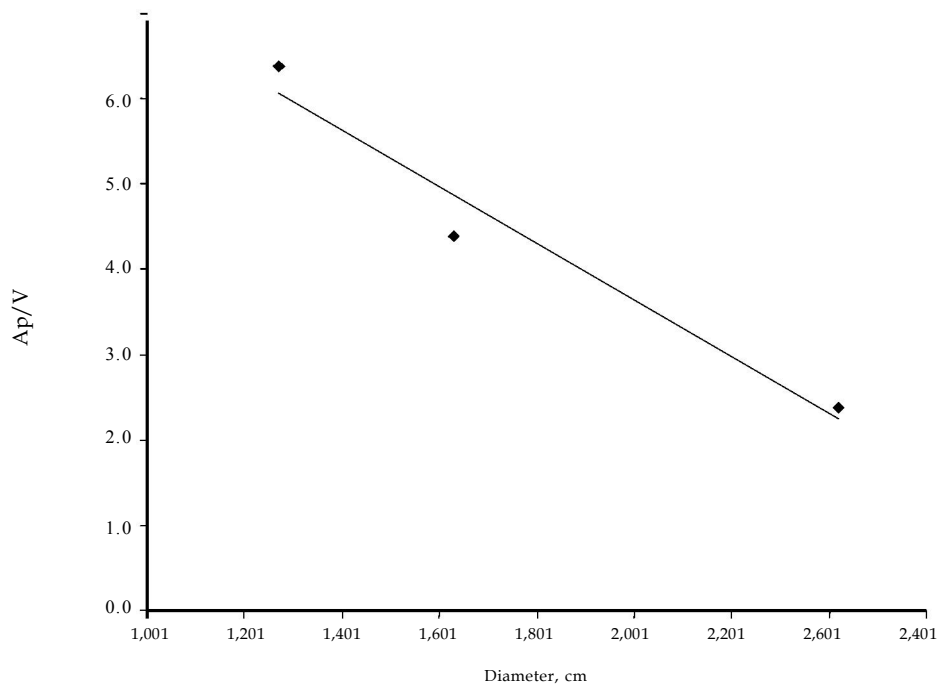
Penyelesaian perhitungan laju pelindian dan difusivitas kafein dari dalam biji kopi dalam menentukan waktu yang diperlukan untuk memperoleh kadar kafein maksimum (c_A) 0,3% digunakan bahasa program *Visual Basic 6.0*. Tampilan layar masukan data dan keluaran nilai perhitungan serta laju pelindian kafein ($c_{AS-pred}$) dari dalam biji kopi mengikuti persamaan eksponensial sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8 dan 9. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara umum laju pelindian kafein dengan pelarut asam asetat yang diukur ($c_{AS-obsr}$) memiliki trend yang sama dengan laju pelindian kafein hasil perhitungan ($c_{AS-pred}$) (Gambar 10). Persamaan yang terbentuk dari pengembangan model matematik untuk menentukan waktu pelindian sampai kadar kafein 0,3% adalah :

$$t_{-0,3}(\text{det}) = -\left(\frac{r}{\pi^2}\right) \cdot (4,4106 \cdot C^{0,01282} \exp^{-1041,82/T}) \cdot (-3,3319d + 10,302)^{-1} \ln\left(\frac{c_{AS} - 0,3}{c_{A0} - 0,3}\right) \quad (13)$$

Kinerja model secara umum menunjukkan kesesuaian antara nilai prediksi dan observasi terutama pada selang kadar kafein di dalam biji dari 2,28% sampai dengan 1%, baik proses dekafeinasi dengan pelarut asam asetat. Namun, setelah kadar kafein di dalam biji mencapai 1% dan terus menurun sampai 0,3%, angka observasi selalu lebih kecil dibandingkan angka prediksi. Hal ini dapat diterangkan bahwa bukan hanya difusivitas kafein di dalam biji kopi yang tergantung pada suhu dan konsentrasi pelarut yang berpengaruh terhadap kinerja model, tetapi yang lebih penting disebabkan oleh pelarut pada periode itu telah mengandung kafein



Gambar 6. Hubungan antara laju pelindian pengamatan (k_{f-obs}) dan perkiraan (k_{f-pred}).
 Figure 6. Relationship between of leaching rate observed (k_{f-obs}) and predicted (k_{f-pred}).



Gambar 7. Pengaruh ukuran diameter biji kopi terhadap nilai A_p/V .
 Figure 7. Influence of diameter size of coffee bean on A_p/V value.

Program Pengembangan Model Matematik Proses Dekafeinasi Biji Kopi
Dalam Reaktor Kolom Tunggal

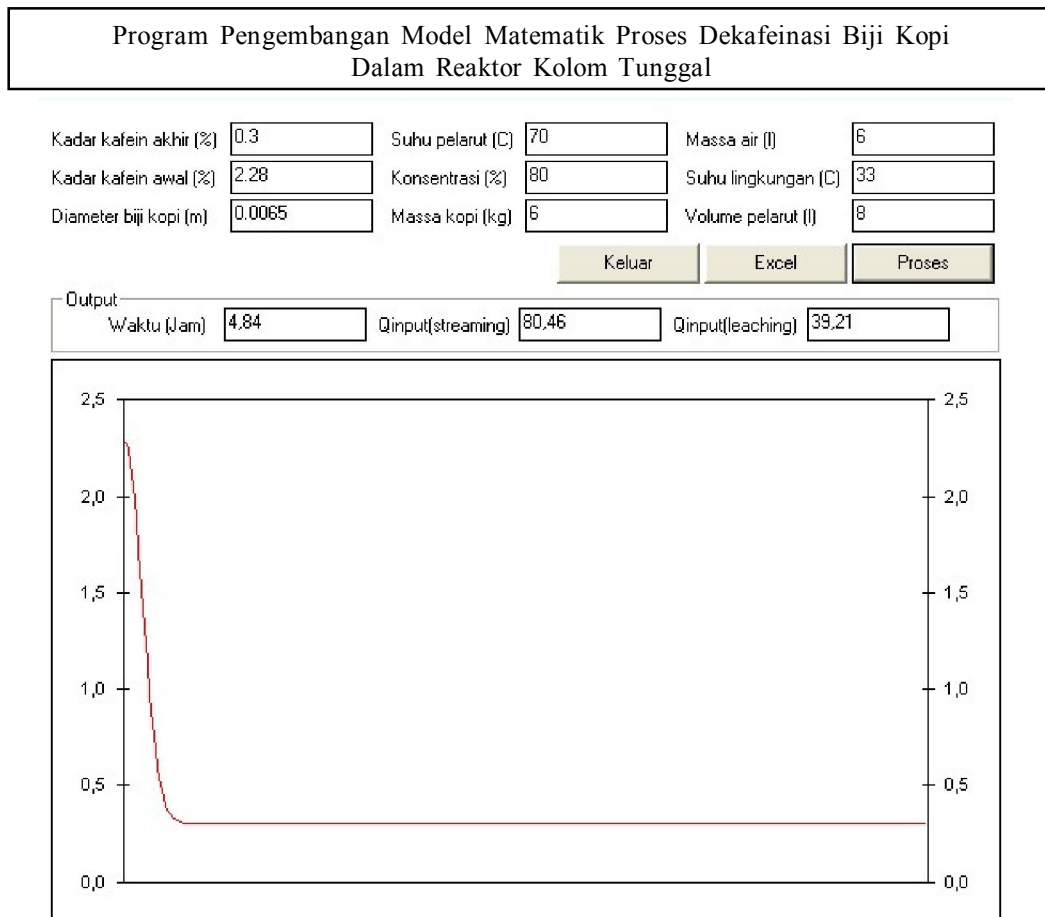
Program Pengembangan Model Matematik Proses Dekafeinasi Biji Kopi
Dalam Reaktor Kolom Tunggal

Program Pengembangan Model Matematik Proses Dekafeinasi Biji Kopi
Dalam Reaktor Kolom Tunggal

Tabel 2. Parameter masukan data untuk memprediksi waktu dan laju pelindian kafein

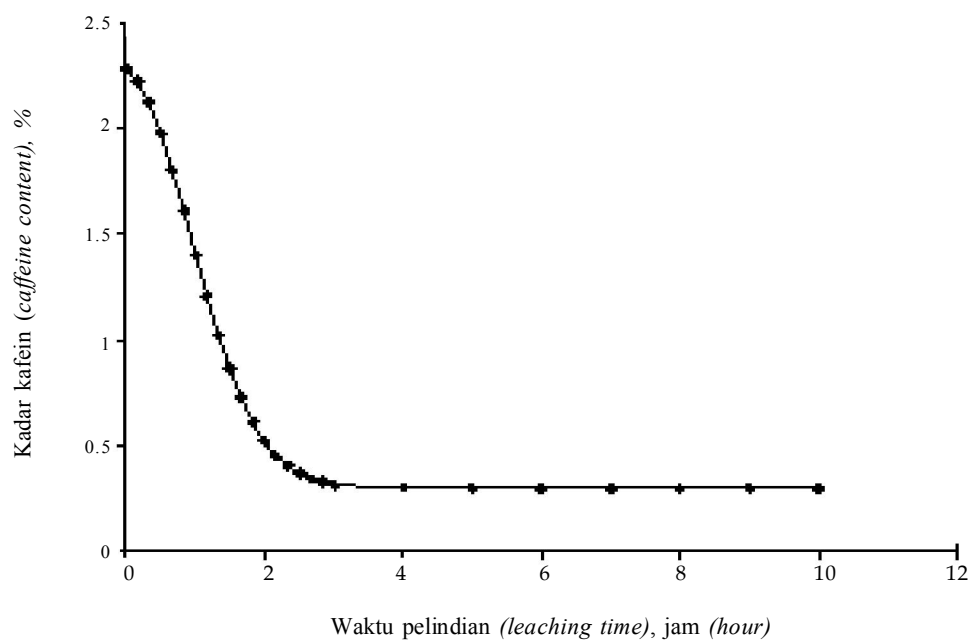
Table 2. Data entry parameters to predict leaching time and leaching rate of caffeine

Parameter Parameters	Nilai Value	Satuan Unit
Kadar kafein awal (Initial caffeine content), c_{A0}	2.28	%
Kadar kafein akhir (Final caffeine content), c_A	0.3	%
Diameter biji kopi (Diameter of coffee bean), d	0.0065	m
Suhu pelarut (Solvent temperature), T_p	70	°C
Konsentrasi pelarut (Solvent concentration), c	80	%
Massa kopi (Weight of coffee beans), m_k	6	kg
Suhu lingkungan (Ambient temperature), T_l	33	°C
Volume pelarut (Solvent volume), V	8	liter

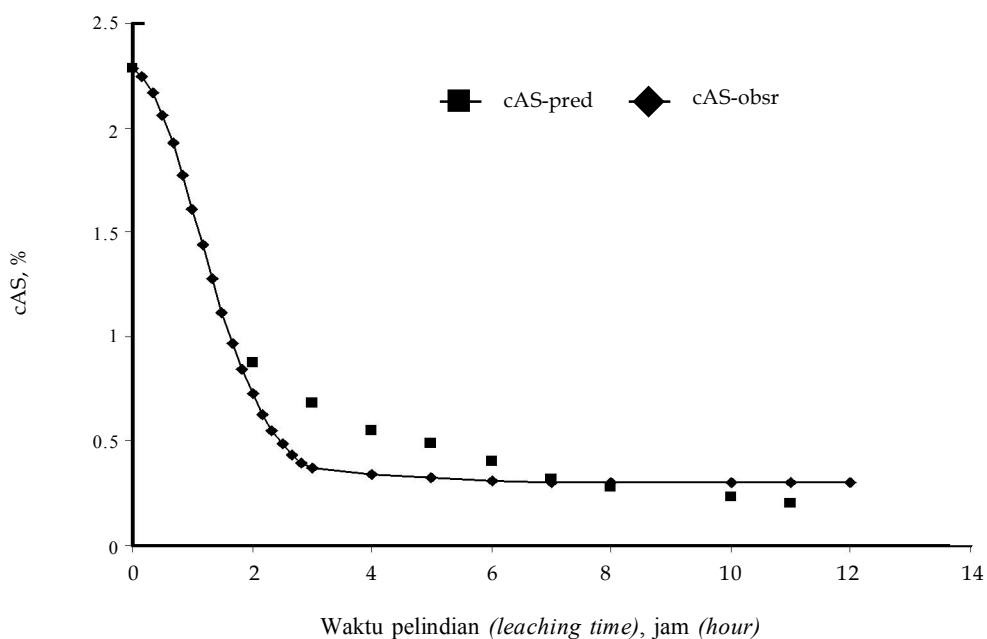


Gambar 8. Tampilan menu program dan kurva prediksi kadar kafein hasil pengembangan model matematik.

Figure 8. View of program menu and prediction curve of caffeine content resulted from mathematical model.



Gambar 9. Perkiraan kadar kafein dari hasil pengembangan model matematik.
 Figure 9. Prediction of caffeine content resulted from mathematic model.



Gambar 10. Laju pelindian kadar kafein perkiraan ($c_{AS-pred}$) dan pengamatan ($c_{AS-obsr}$) pada suhu pelarut 50°C dan konsentrasi pelarut 100%.
 Figure 10. Leaching rate of by predicted ($c_{AS-pred}$) and observed ($c_{AS-obsr}$) caffeine content at 50°C temp. and 100% solvent concentration.

sehingga menurunkan perbedaan konsentrasi kafein di permukaan biji dengan konsentrasi kafein di dalam pelarut sehingga model memperkirakan lebih dibandingkan data percobaan (Gambar 10).

Validasi Model

Validasi dilakukan untuk mengetahui seberapa layak nilai yang diperoleh dari proses perhitungan (*perkiraan*) terhadap kedekatan nilai dari proses pelindian sebenarnya (*pengamatan*). Gambar 11 menunjukkan waktu observasi (t_{-obs}) untuk mencapai kadar kafein dalam biji kopi maksimum 0,3% dengan menggunakan pelarut asam asetat pada suhu 50–100°C dan konsentrasi pelarut 10–100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan semakin tinggi suhu dan konsentrasi pelarut, maka waktu proses dekafeinasi akan semakin cepat. Waktu proses tercepat, yaitu 4 jam diperoleh pada proses dekafeinasi dengan suhu dan konsentrasi pelarut 100°C dan 100%. Waktu proses terpanjang, yaitu 11 jam diperoleh pada proses dekafeinasi dengan suhu dan konsentrasi pelarut 50°C dan 10%.

Gambar 12 menunjukkan hubungan antara waktu dekafeinasi observasi (t_{-obs}) versus prediksi (t_{-pred}) dengan menggunakan pelarut asam asetat. Garis linier regresi yang terbentuk, yaitu $t_{-pred} = 0,8914 t_{-obs} + 0,5045$ menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9326. Hal tersebut mendiskripsikan bahwa model matematik yang telah dibangun valid untuk memprediksi laju pelarutan kafein biji kopi dalam reaktor kolom tunggal dengan pelarut asam asetat.

Uji coba proses dekafeinasi dalam reaktor kolom tunggal dengan pelarut limbah cair fermentasi biji kakao dilakukan dengan perlakuan parameter suhu dan konsentrasi pelarut sebagaimana ditampil-

kan pada Tabel 3. Persamaan garis yang terbentuk dari hubungan antara waktu dekafeinasi prediksi (t_{-pred}) versus observasi (t_{-obs}) adalah proses $t_{-obs} = 0,8365t_{-pred} + 2,5215$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9576. Hal tersebut mendiskripsikan bahwa model matematik yang telah dibangun valid untuk memprediksi laju pelindian kafein biji kopi dalam reaktor kolom tunggal dengan pelarut limbah cair fermentasi pulpa kakao.

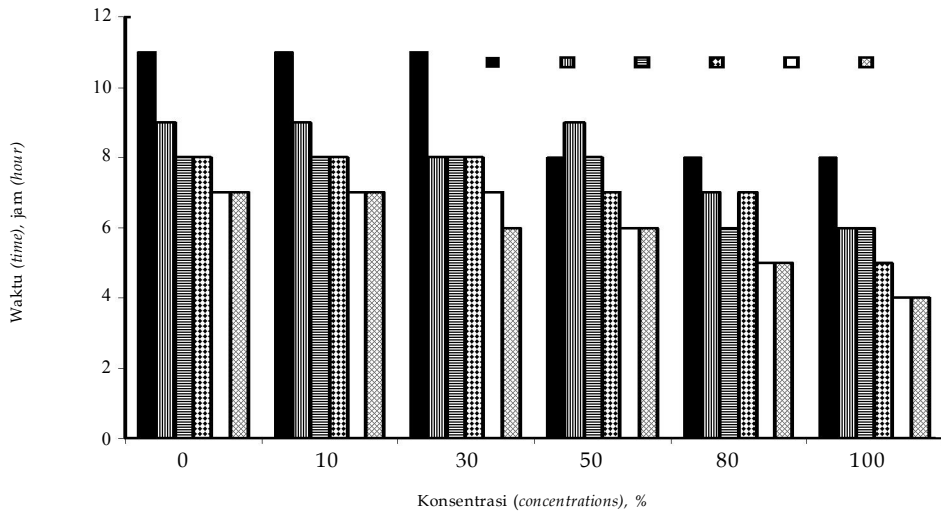
Waktu proses prediksi ($t_{0,3-prediksi}$) ditentukan berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan model matematik yang telah diperoleh pada kegiatan penelitian sebelumnya (persamaan 12). Waktu proses observasi ($t_{0,3-observasi}$) diperoleh dari hasil pengukuran sampai diperoleh kadar kafein akhir 0,3%. Koefisien perpindahan massa (k_L) dan difusivitas kafein (D_k) dalam proses dekafeinasi dengan menggunakan pelarut limbah cair fermentasi biji kakao masing-masing antara $4,897 \times 10^{-5}$ - $6,529 \times 10^{-5}$ m/detik, dan $1,591 \times 10^{-07}$ - $2,122 \times 10^{-07}$ m²/detik tergantung suhu dan konsentrasi pelarut. Gambar 14 menampilkan kurva laju pelarutan kafein dari dalam biji kopi yang terbentuk dari nilai koefisien perpindahan massa sebagaimana tercantum dalam Tabel 3. Untuk pelarut asam asetat dan limbah cair fermentasi biji kakao yang bersifat cair, maka dengan semakin tinggi suhu akan menurunkan viskositasnya sehingga difusivitas akan naik (Foust, 1959). Dengan semakin tinggi difusivitas pelarut dan renggangnya pori-pori biji kopi, maka akan lebih mudah bagi pelarut untuk masuk ke dalam jaringan biji kopi sehingga kafein akan lebih mudah ikut terlarut ke dalam pelarut untuk dikeluarkan dari dalam biji kopi.

Espinoza-Perez *et al.* (2007) melakukan pengembangan model matematika kinetika kafein selama proses ekstraksi fase

t_{pred}

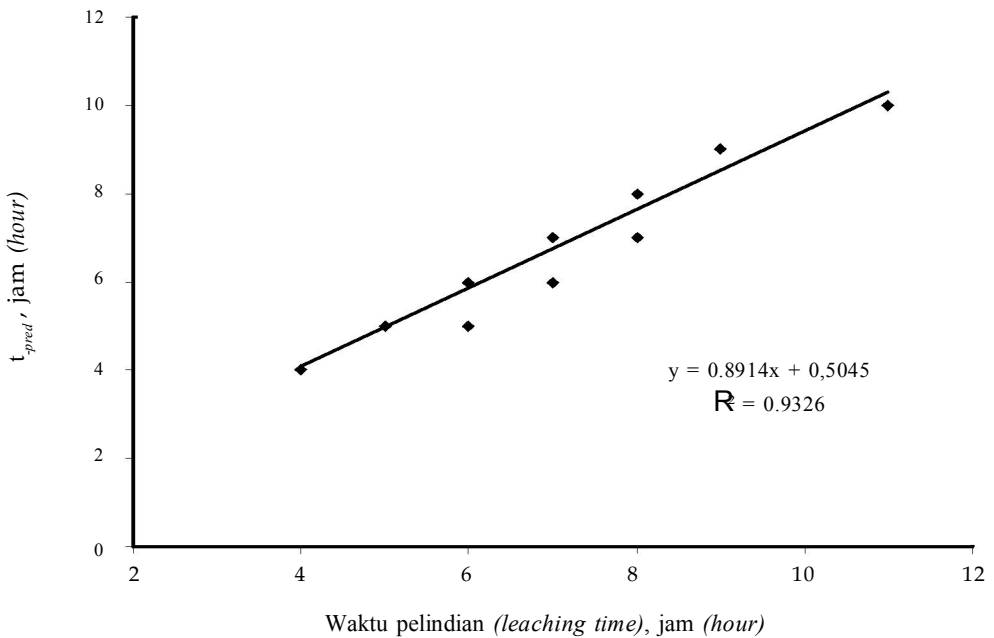
t_{pred}

t_{pred}



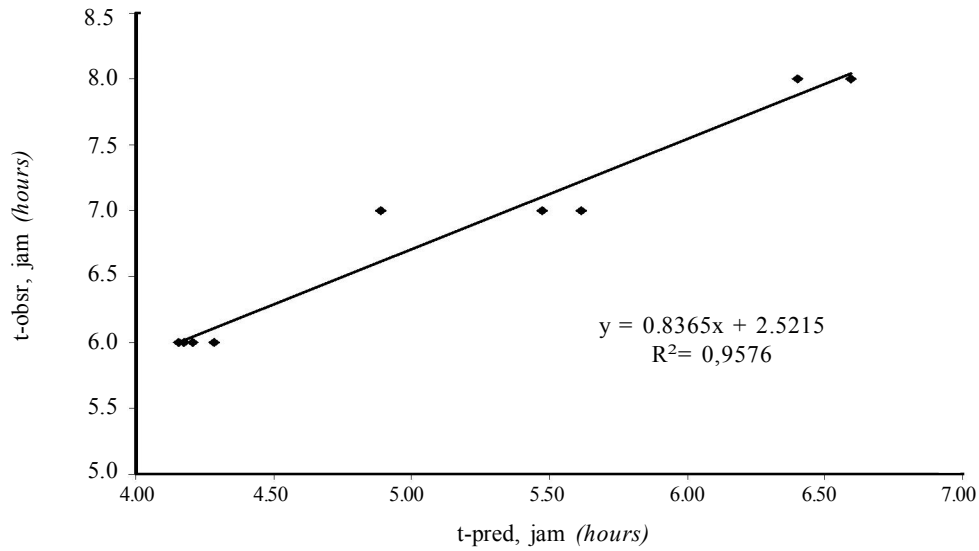
Gambar 11. Pengaruh konsentrasi dan suhu pelarut terhadap waktu untuk mencapai kadar kafein maksimum 0,3%.

Figure 11. Influence of concentration and temperature if solvent with observation time to achieve 0.3% caffeine content.



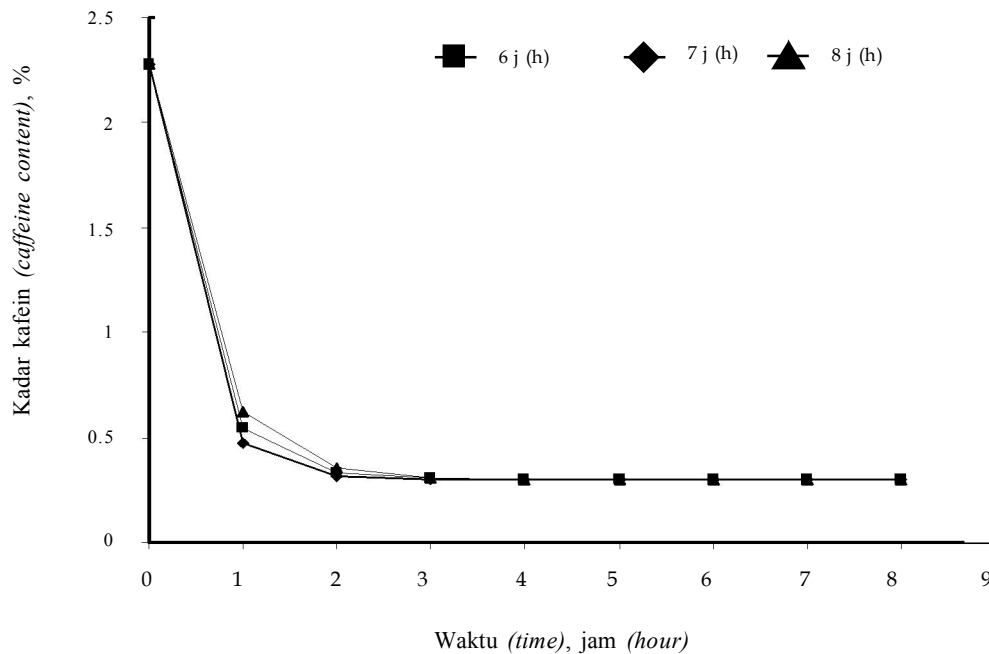
Gambar 12. Hubungan antara waktu dekafeinasi pengamatan dan perkiraan (t_{pred}) dengan pelarut asam asetat.

Figure 12. Relationship between observed and predicted (t_{pred}) decaffeination time using acetic acid as solvent.



Gambar 13. Hubungan antarwaktu dekafeinasi perkiraan (t_{-pred}) dan pengamatan (t_{-obsr}) dengan pelarut limbah cair fermentasi biji kakao.

Figure 13. Relationship between observed (t_{-obsr}) and predicted (t_{-pred}) decaffeination time using liquid waste of cocoa beans fermentation.



Gambar 14. Laju pelindian kadar kafein (perkiraan setelah 6 jam, 7 jam dan 8 jam) dengan pelarut limbah cair fermentasi biji kakao.

Figure 14. Leaching rate of caffeine (predicted after 6 h, 7 h, and 8 h) using liquid waste of cocoa beans fermentation as solvent.

Tabel 3. Kombinasi perlakuan RSM untuk *test run* proses dekafeinasi

Table 3. RSM treatment combinations for decaffeination test run

No. trial <i>Trial number</i>	Pelarat (<i>solvent</i>)		$t_{0,3\text{-prediksi}}$ jam (<i>hours</i>)	$t_{0,3\text{-observasi}}$ jam (<i>hours</i>)	k_L	D_k
	Suhu (<i>temp</i>), °C	Konsentrasi Concentration, %				
1	50	100	6,40	8	$4,897 \times 10^{-05}$	$1,591 \times 10^{-7}$
4	100	100	4,16	6	$6,529 \times 10^{-05}$	$2,122 \times 10^{-7}$
11	67	70	5,48	7	$5,596 \times 10^{-05}$	$1,818 \times 10^{-7}$
9	100	40	4,21	6	$6,529 \times 10^{-05}$	$2,122 \times 10^{-7}$
10	100	70	4,17	6	$6,529 \times 10^{-05}$	$2,122 \times 10^{-7}$
8	67	10	5,61	7	$5,596 \times 10^{-05}$	$1,818 \times 10^{-7}$
6	50	10	6,60	8	$4,897 \times 10^{-05}$	$1,591 \times 10^{-7}$
7	83	10	4,89	7	$5,596 \times 10^{-05}$	$1,818 \times 10^{-7}$
5	100	10	4,28	6	$6,529 \times 10^{-05}$	$2,122 \times 10^{-7}$

padat-cair dalam biji kopi Arabika dengan asumsi bentuk lempeng. Hasil perhitungan menunjukkan nilai difusivitas kafein dalam biji kopi sebesar $3,209 \times 10^{-10}$ m²/detik pada suhu 90°C. Bichsel (1979) melaporkan bahwa pada kondisi percobaan optimum dekafeinasi diperoleh nilai difusivitas dalam biji kopi Robusta antara $0,5 \times 10^{-6}$ – $1,3 \times 10^{-6}$ cm²/detik. Anderson *et al.* (2003) melakukan penelitian kinetika difusi karbon-dioksida biji kopi dan kopi sangrai dengan menggunakan hukum Fick pada kondisi tak mantap. Difusivitas efektif rata-rata sebesar $5,30 \times 10^{-13}$ m²/detik dari kisaran nilai $3,05 \times 10^{-13}$ – $10,37 \times 10^{-13}$ m²/detik. Nilai tersebut lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai difusivitas yang diperoleh Spiro & Chong (1997) yaitu 2×10^{-11} – 20×10^{-11} m²/detik untuk difusi kafein di dalam biji kopi selama proses dekafeinasi. Difusivitas efektif air pada buah kopi yang dikeringkan dengan pengering tipe tray getar adalah antara $0,1 \times 10^{-10}$ – 1×10^{-10} m²/detik pada suhu 45°C, dan antara $0,3 \times 10^{-10}$ – 3×10^{-10} m²/detik pada suhu 60°C (Sfredo *et al.*, 2005).

KESIMPULAN

Persamaan yang terbentuk mampu menerangkan kinetika proses ekstraksi kafein dari biji kopi. Laju pelindian kafein dalam biji kopi dapat diprediksi dengan persamaan. Nilai difusivitas kafein (D_k) antara $1,345 \times 10^{-7}$ – $4,1638 \times 10^{-7}$ m²/detik, dan nilai koefisien perpindahan massa (k_L) antara $2,445 \times 10^{-5}$ – $5,551 \times 10^{-5}$ m/detik dengan pelarut asam asetat tergantung pada suhu dan konsentrasi pelarut.

Persamaan yang terbentuk untuk memprediksi waktu pelarutan senyawa kafein dari kondisi awal c_{A0} sampai 0,3% dalam biji kopi adalah, nilai difusivitas (D_k) dan koefisien perpindahan massa (k_L) kafein yang diperoleh dari proses pelarutan dengan menggunakan limbah cair fermentasi biji kakao masing-masing $1,591 \times 10^{-7}$ – $2,122 \times 10^{-7}$ m²/detik, dan $4,897 \times 10^{-05}$ – $6,529 \times 10^{-05}$ m/detik tergantung pada suhu dan konsentrasi pelarut.

a : konstanta

a : konstanta

a : konstanta

DAFTAR SIMBOL

a	: konstanta
A_p	: luas permukaan biji kopi, m^2
c_{A0}	: kadar kafein awal, %
c_A	: kadar kafein akhir, 0,3%
c_{AS}	: kadar kafein pada kondisi waktu ke-t, %
$c_{AS-obsr}$: kadar kafein pada kondisi waktu ke-t observasi, %
$c_{AS-pred}$: kadar kafein pada kondisi waktu ke-t prediksi, %
c	: konsentrasi pelarut, %
d	: diameter biji kopi, m
D_k	: difusivitas kafein, $m^2/detik$
E_a	: energi aktivasi, kJ/mol
g	: konstanta
k_f	: laju pelindian kafein, $detik^{-1}$
k_{f-obs}	: laju pelindian kafein observasi, $detik^{-1}$
k_{f-pred}	: laju pelindian kafein prediksi, $detik^{-1}$
k_L	: koefisien perpindahan massa, m/detik
m_k	: massa kopi, kg
R^2	: koefisien determinasi
R_g	: konstanta gas, $8,314 \times 10^{-03}$ kJ/mol.K
R	: jari-jari biji kopi sampai permukaan luar, m
r	: jari-jari biji kopi, m
$t_{0,3-observasi}$: waktu proses pada kadar kafein 0,3% observasi, detik
$t_{0,3}$: waktu proses pada kadar kafein 0,3%, detik
T_l	: suhu lingkungan, $^{\circ}C$
t_{obsr}	: waktu proses, detik
t_{pred}	: waktu proses, detik
T_p	: suhu pelarut, $^{\circ}C$
T	: suhu mutlak, K
t	: waktu proses, detik
V	: volume pelarut, m^3
W_A	: laju pelepasan kafein, g/detik
p	: $\phi = 22/7$

DAFTAR PUSTAKA

- Almada, D.P. (2009). *Pengaruh Peubah Proses Dekafeinasi Kopi dalam Reaktor Kolom Tunggal Terhadap Mutu Kopi*. Tesis. Sekolah Pasca-sarjana IPB, Bogor.
- Anderson, B.A.; E. Shimon; R. Liardon & T.P. Labuza (2003). The diffusion kinetics of carbon dioxide in fresh roasted and ground coffee. *Journal of Food Engineering*, 59, 71–78.
- Bichsel, B. (1979). Diffusion phenomena during the decaffeination of coffee beans. *Journal of Food Chemistry*, 4, 53–62.
- Bird, R.B.; W.E. Stewart & E.N. Lightfoot (1960). *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, New York.
- Brown G.G. (1950). *Unit Operation*. Webster School and Office Supplier, Manila.
- Clifford, M.N. (1985). Chemical and Physical Aspects of Green Coffee and Coffee Products. p. 305–374. *In*: M.N. Clifford & K.C. Wilson (Eds). *Botany, Biochemistry, and Production of Coffee Beans and Beverage*. The AVI Publ.Co.Inc., Wesport, Connecticut.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Second Eds. Clarendon Press. Oxford.
- Doran, P.M. (1995). *Bioprocess Engineering Principles*. Academic Press Inc., San Diego.
- Earle. R.L. (1983). *Unit Operation in Food Processing*. 2nd ed., Pergamon Press, Oxford.
- Espinoza-Perez, J.D.; A. Vargas; Robles-V.J. Olvera; G.C. Rodriguez-Jimenes

- & M.A. Garcia-Alvarado (2007). Mathematical modeling of caffeine kinetic during solid-liquid extraction of coffee beans. *Journal of Food Engineering*, 81, 72–78.
- Foust, A.S. (1959), *Principles of Unit Operations*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Geankoplis, C.J. (1983). *Transport Processes and Unit Operations*. 2nd eds. Allyn and Bacon, Inc., 7 Wells Avenue, Newton, Massachusetts, USA.
- Hulbert, G.J.; R.N. Biswal; C.B. Mehr; T.H. Walker & J.L. Collins (1998). Solid/liquid extraction of caffeine from guarana with methyl chloride. *Food Science and Technology International*, 4, 53–58.
- Kirk-Othmer (1998). *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th Ed. 10:88.
- Lestari, H. (2004). *Dekafeinasi biji kopi (Coffee canephora) varietas robusta dengan sistem pengukusan dan pelarutan*. Tesis. Program pascasarjana. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Perva-Uzunaliya, A.; M. Škerget; Ž. Knez, B. Weinreich, F. Otto & S. Gruner (2006). Extraction of active ingredients from green tea (*Camellia sinensis*): Extraction efficiency of major catechins and caffeine. *Food Chemistry*, 96, 597–605.
- Purwadaria, H.K.; Sri-Mulato & A.M. Syarif (2007). *Dekafeinasi Kopi dalam Reaktor Kolom Tunggal dengan Pelarut Tersier dari Pulpa Kakao. Laporan Hasil Penelitian Tahun I. LPPM. IPB*.
- Purwadaria, H.K.; Sri-Mulato & A.M. Syarif (2008). Dekafeinasi kopi dalam reaktor kolom tunggal dengan pelarut tersier dari pulpa kakao. *Laporan Hasil Penelitian Tahun II. LPPM. IPB*.
- Rohan T.A. (1963). *Processing of Raw Cocoa for the Market*. FAO Agriculture Study 60: 207p.
- Saravacos, G.D. & Z.B. Maroulis (2001). *Transport Properties of Foods*. Marcel Dekker, Inc. USA.
- Sfredo, M.A.; J.R.D. Finzer & J.R. Limaverde (2005). Heat and mass transfer in coffee fruits drying. *Journal of Food Engineering*, 70, 15–25.
- Spiller, G.A. (1999). *Caffeine*. Boca Raton London, New York Washington DC.
- Spiro, M. & R.M. Selwood (1984) The kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee: the effect of particle size. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35, 915–924.
- Spiro, M. & Y.Y. Chong (1997). The kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee: the temperature variation of the hindrance factor. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 74, 416–420.
- Sri-Mulato (2001). *Development and Evaluation of a Solar Cocoa Processing Center for Cooperative Use in Indonesia*. Ph.D Dissertation. Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen. The University of Hohenheim, Germany.
- Sri-Mulato; S. Widyotomo & H. Lestari (2004). Pelarutan kafein biji kopi Robusta dengan kolom tetap menggunakan pelarut air. *Pelita Perkebunan*, 20, 97–109.
- Sutarsih; B. Rahardjo & P. Hastuti (2009). Difusivitas air pada wortel selama penggorengan hampa. *Jurnal AGRI-TECH*, 29, 184–188.
- Treyball, R.E. (1980), *Mass-Transfer Operations*, 4th ed., McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Udaya-Sankar, K.; C.V. Raghavan; P.N. Srinivasa-Rao; K. Lakshiminarayana-

- Rao; S. Kuppuswany & P.K. Ramathan (1983). Studies on the extraction of caffeine from coffee beans. *Journal of Food Science and Technology*, 20, 64–67.
- Wedy, J.R.; C.E. Wicks; R.E. Wilson & G. Rorrer (2001). *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, Inc.
- Widyotomo, S.; Sri-Mulato; H.K. Purwadaria & A.M. Syarief (2009). Karakteristik proses dekafeinasi kopi Robusta dalam reaktor kolom tunggal dengan pelarut etil asetat. *Pelita Perkebunan*, 25, 101–125.
- Wilbaux, R. (1963). *Coffee Processing*. Food and Agriculture. Organization of United Nation, Roma.
