

MODEL MATEMATIK TRANSFER PANAS PADA PENGGORENGAN MENGGUNAKAN PASIR¹

Siswanto², Budi Rahardjo³, Nursigit Bintoro³ dan Pudji Hastuti³

ABSTRAK

Sifat fisik dan sifat termis pasir seperti massa jenis (ρ), panas jenis (C_p), dan konduktivitas panas (k) diperlukan sebagai acuan pengembangan model matematik transfer panas pada penggorengan. Penelitian ini bertujuan membuat model matematik koefisien transfer panas permukaan (h) pada penggorengan dengan pasir sebagai media penghantar panas.

Penelitian ini merupakan percobaan laboratorium dengan bahan berupa pasir besi dan pasir kali. Diameter pasir besi yang digunakan adalah 0,15 mm – 0,50 mm, sedangkan pasir kali adalah 0,18 mm – 2,80 mm. Alat yang digunakan adalah alat pengukur sifat fisik dan termis pasir, alat penggoreng pasir bentuk silinder dengan variasi rpm, serta alat ukur suhu (termokopel, data logger, interface, computer).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa massa jenis (ρ) pasir turun dengan semakin bertambah ukuran diameter. Panas jenis (C_p) naik dengan bertambah ukuran diameter. Konduktivitas panas (k) turun dengan bertambah ukuran diameter. Koefisien transfer panas permukaan (h) pada penggorengan dengan pasir turun dengan bertambah ukuran diameter, dan meningkat dengan bertambah kecepatan putar (rpm) silinder penggoreng.

Kata kunci: *sifat fisik, sifat termis, pasir, penggorengan, model matematik.*

¹ Disampaikan dalam Gelar Teknologi dan Seminar Nasional Teknik Pertanian 2008 di Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian UGM, Yogyakarta 18-19 November 2008

² Staf Pengajar Jurusan Teknologi Pertanian UNSOED Purwokerto

³ Staf Pengajar Fakultas Teknologi Pertanian UGM Yogyakarta

PENDAHULUAN

Penggorengan adalah salah satu cara pemasakan produk pangan yang dilakukan secara cepat, dan cara ini dianggap paling efisien proses transfer panasnya ke produk pangan yang dimasak. Selain menggunakan media minyak ada juga penggorengan yang tidak menggunakan minyak, cara ini dikenal dengan metoda pemasakan kering (*dry cooking method*). Pada pemasakan kering tidak terjadi penyerapan minyak dan air ke dalam produk. Penggorengan tanpa minyak secara tradisional sudah lama dilakukan. Penggorengan dengan cara ini biasanya dilakukan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas (*hot sand frying*).

Penggorengan tanpa minyak lazim disebut penyangraian. Cara penggorengan seperti ini proses pemanasan berlangsung melalui kontak dengan permukaan pemanas atau melalui media pemanas butiran bahan padat berupa pasir atau bahan lain. Besarnya nilai koefisien pindah panas permukaan (unit surface conductance) (h) pada penggorengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas sangat tergantung oleh sifat-sifat fisik dan termis pasir yang digunakan, serta kecepatan pengadukan selama penggorengan berlangsung.

Ada beberapa keuntungan apabila penggorengan dilakukan tanpa menggunakan minyak (menggunakan pasir). Keuntungan tersebut antara lain : (1) produk tidak mengandung minyak goreng sehingga tidak mudah tengik; (2) pasir sebagai media penghantar panas mudah di dapat dan murah; (3) bila produk mengalami penurunan kerenyahan (melempem), dapat dilakukan rekondisi kerenyahannya dengan cara dijemur pada sinar matahari atau dipanaskan pada suhu yang tidak terlalu tinggi ($35^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$); (4) mengurangi ketergantungan penggorengan menggunakan minyak goreng.

Penggorengan makanan berpati (kerupuk) dengan pasir sebagai media penghantar panas telah dilakukan di beberapa daerah (Kediri, Cirebon, dan Palembang). Namun sejauh ini belum banyak informasi tentang penggorengan dengan pasir sebagai media penghantar panas, terutama yang terkait dengan proses pindah panas.

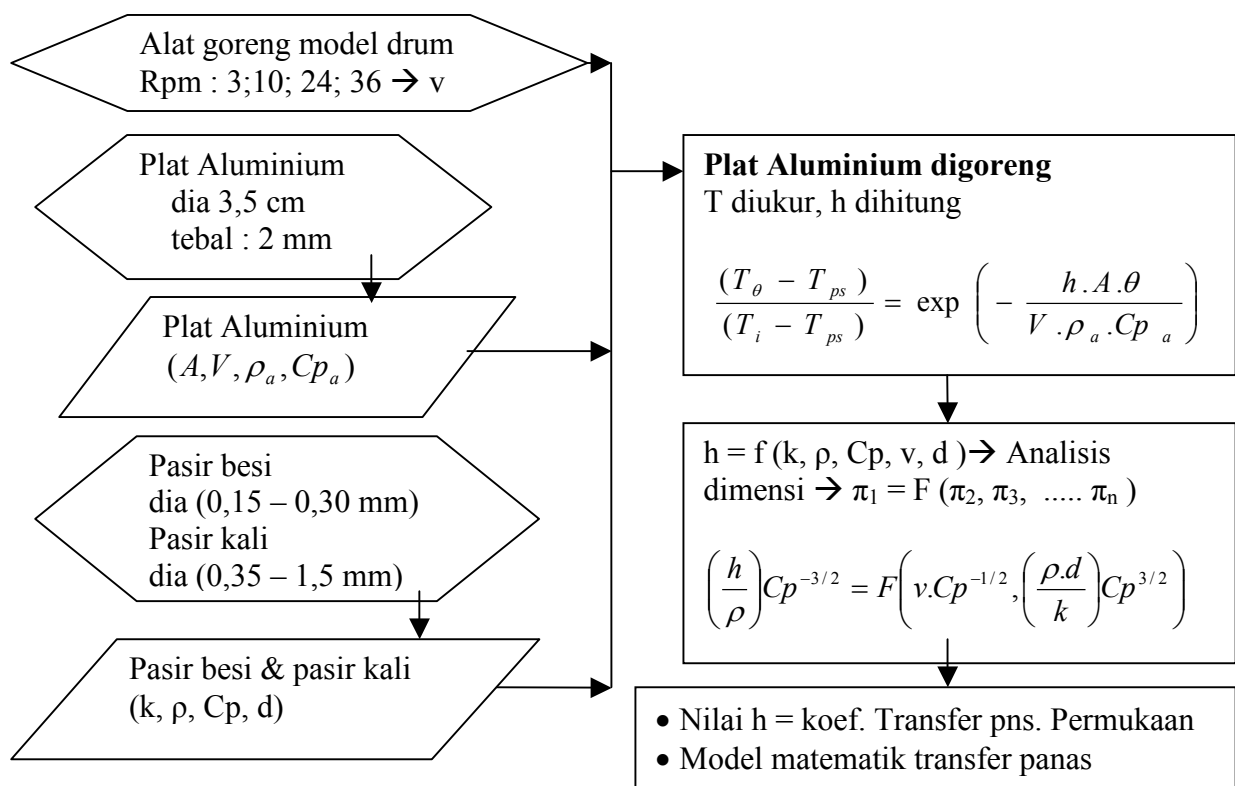
Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang sifat fisik dan termis pasir yang meliputi : koefisien pindah panas permukaan, konduktivitas panas, panas jenis, massa jenis, diameter pasir, dan variasi kecepatan putar (rpm) pengadukan pasir pada proses penggorengan.

Penelitian ini bertujuan: Membuat model matematik koefisien pindah panas permukaan (h) sebagai fungsi dari diameter pasir (d), massa jenis (ρ), panas jenis (C_p), konduktivitas panas (k), dan kecepatan pengadukan (v)

B. METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Teknik Pertanian UNSOED. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah pasir besi, dan pasir kali. Alat yang digunakan terdiri dari : Alat ukur suhu (data logger, termokopel, dan interface), komputer, oven, kalorimeter, neraca, gelas ukur, stop watch, volt meter, ampere meter, ayakan pasir, tabung dengan pembangkit panas dari pusat silinder (line heat source) untuk mengukur nilai k, alat penggoreng dengan pasir (hot sand frying).

1. Bagan alir pelaksanaan penelitian



2. Pengukuran dan perhitungan

Pasir yang digunakan dalam penelitian ini berupa pasir besi dan pasir kali. Kisaran diameter pasir yang digunakan dihitung dengan “fineness modulus” untuk mendapatkan ukuran diameter rata-rata (Henderson dan Perry, 1980), dengan bentuk persamaan berikut :

$$d = 0,0041(2)^{FM} \dots\dots\dots (1)$$

d = diameter pasir (in)

FM = fineness modulus

Panas jenis (C_p) diukur dengan kalorimeter vakum-jaket melalui hasil pengukuran suhu (Mohsenin, 1980), dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$C_{p_s} = \left(\frac{(mC_{p_k} + m_a C_{p_a})(T_a - T_c)}{m_s (T_c - T_b)} \right) \dots\dots\dots (2)$$

C_{p_s} = panas jenis sample (kJ/kg.C)

m_s = massa sample (kg)

mC_{p_k} = kapasitas kalori meter = 0,0211 kJ/C

m_a = massa air (kg)

C_{p_a} = panas jenis air (kJ/kg.C)

T_b = suhu sample awal (C)

T_a = suhu air awal (C)

T_c = suhu campuran (C)

Nilai k pasir dihitung melalui hasil pengukuran suhu-waktu dengan menempatkan termokopel pada jarak ≤ 2 mm dari pusat silinder. Data hasil pengukuran suhu-waktu dapat digunakan untuk menghitung konduktivitas panas (k) (Hsu *et al.*, 1991; Siswantoro, 1995), dengan rumus sebagai berikut :

$$k = \frac{Q.LN(\theta_2/\theta_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} = \frac{Q}{4.\pi.G} \dots\dots\dots (3)$$

Q = daya yang dibangkitkan per satuan panjang (J/dt.m)

θ = waktu pengukuran (dt)

T = suhu pengukuran (C)

G = slope suhu terhadap LN waktu

Nilai h dihitung melalui pengukuran suhu Aluminium yang digoreng pasir dan suhu pasir sebagai media penghantar panas diukur dengan sensor suhu (termokopel) serta alat pencatat dan pentrasfer data berupa data logger dan interface, hasil pengukuran tersebut langsung terkirim ke computer. Data hasil pengukuran tersebut digunakan untuk menghitung nilai koefisien transfer panas permukaan (h) (Mohsenin, 1980), dengan rumus sebagai berikut :

$$h = -LN \left(\frac{T_\theta - T_{ps}}{T_i - T_{ps}} \right) / \left(\frac{A.\theta}{V.\rho.Cp} \right) \dots\dots\dots (4)$$

T_{ps} = suhu pasir yang digoreng (C)

T_θ = suhu logam (Aluminium) yang digoreng pada waktu θ (C)

T_i = suhu awal dari logam yang digoreng (C)

A = luas permukaan Aluminium yang digoreng (m²)

ρ = massa jenis Aluminium (kg/m³)

V = volume Aluminium (m³)

Cp = panas jenis Aluminium (J/kg.C)

Besarnya nilai koefisien pindah panas permukaan (h) pada proses penggorengan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas dipengaruhi oleh konduktivitas panas (k), massa jenis (ρ), panas jenis (Cp), dan diameter pasir (d) yang digunakan, serta rotasi per menit (rpm) atau kecepatan putar silinder (v). Bentuk formulasinya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$h = f(k, \rho, Cp, v, d) \rightarrow \text{dilakukan analisis dimensi} \rightarrow \pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$$

π = bilangan tak berdimensi

Menggunakan analisis dimensi (Glenn Murphy, 1950), diperoleh hubungan bilangan tak berdimensi sebagai berikut :

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3)$$

$$\left(\frac{h}{\rho}\right) Cp^{-3/2} = F\left(v.Cp^{-1/2}, \left(\frac{\rho.d}{k}\right) Cp^{3/2}\right) \dots\dots\dots (5)$$

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran diameter pasir kali dan pasir besi dengan menggunakan “fineness modulus” dapat dilihat pada Tabel 1

Table 1. Diameter pasir yang digunakan dalam penelitian

Kisaran diameter (mm)	FM	Diameter	
		(in)	(mm)
Pasir kali			
0,18 – 0,50	1,75	0,014	0,35
0,50 – 1,00	2,85	0,030	0,75
1,00 – 2,80	3,85	0,059	1,50
Pasir besi			
0,18 – 0,50	1,53	0,012	0,30
< 0,18	0,53	0,006	0,15

Hasil pengukuran dan perhitungan sifat fisik dan termis dari pasir yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Table 2. Nilai sifat fisik dan termis pasir yang digunakan dalam penelitian

Sifat fisik dan termis	Diameter pasir besi (mm)		Diameter pasir kali (mm)		
	0,15	0,3	0,35	0,75	1,5
Massa jenis (kg/m ³)	2373	2148	1477	1434	1395
Panas jenis (J/kg.C)	794	807	886	890	988
Konduktivitas panas (J/dt.m.C)	0,443	0,422	0,362	0,349	0,311

Hasil penelitian menunjukkan bahwa massa jenis (ρ) pasir menurun dengan semakin bertambah ukuran diameter, kenyataan ini disebabkan karena dengan semakin besar diameter maka ruang udara diantara butiran pasir curah (bulk) akan semakin besar, sehingga pada volume curah yang sama, berat pasir akan semakin kecil. Pasir besi mempunyai ρ yang lebih besar dibanding pasir kali, kondisi ini disebabkan karena kandungan besi pada pasir besi cukup besar. Kondisi ini cukup beralasan karena besi mempunyai ρ jauh lebih besar dibanding pasir, ρ besi sebesar 7801 kg/m³ sedangkan ρ pasir 1401kg/m³ (Mohsesnin, 1980; Rohsenow,1961).

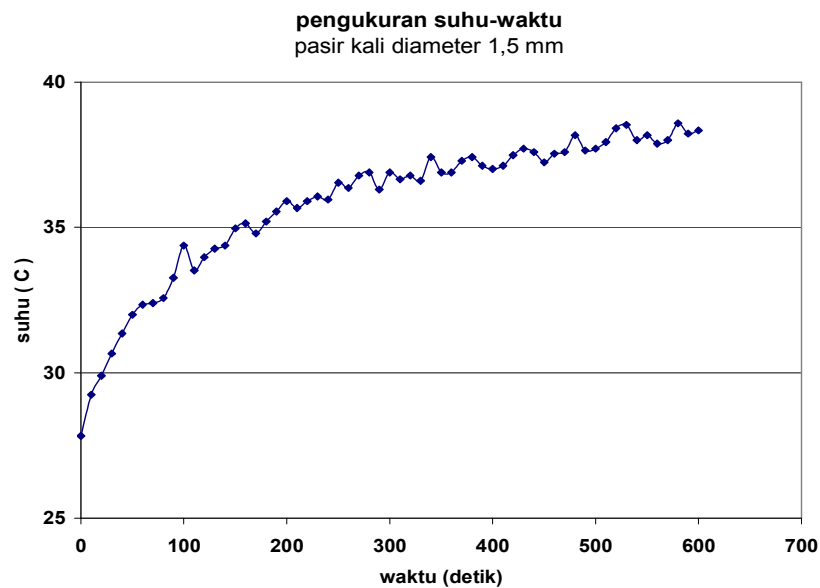
Panas jenis (Cp) pasir meningkat dengan semakin besar diameter butiran pasir, kondisi ini disebabkan karena semakin besar diameter maka semakin banyak udara yang terkandung pada tiap kg berat pasir. Kondisi ini cukup beralasan karena Cp udara jauh lebih besar dibanding Cp pasir. Cp udara sebesar 1005 J/kg.C, sedangkan Cp pasir sebesar 800 J/kg.C (Mohsenin, 1980).

Pasir besi mempunyai Cp yang lebih kecil dibanding Cp pasir kali, kondisi ini disebabkan karena pasir besi mempunyai kandungan besi yang lebih tinggi dibanding pasir kali, sehingga untuk menaikkan suhu pasir besi membutuhkan jumlah panas yang relative lebih kecil dibanding pasir kali. Kondisi ini didukung dengan pustaka bahwa Cp besi sebesar 502 J/kg.C sedangkan Cp pasir sebesar 800 J/k.C (Mohsenin, 1980).

Konduktivitas panas (k) pasir menurun dengan semakin bertambah diameter, kondisi ini disebabkan semakin besar diameter maka kandungan udara didalam tumpukan pasir akan semakin besar. Kondisi ini didukung dengan pustaka bahwa k udara jauh lebih kecil dibanding k pasir. Nilai k udara sebesar 0,0247 J/dt.m.C sedangkan k pasir sebesar 0,325 J/dt.m.C (Mohsenin, 1980).

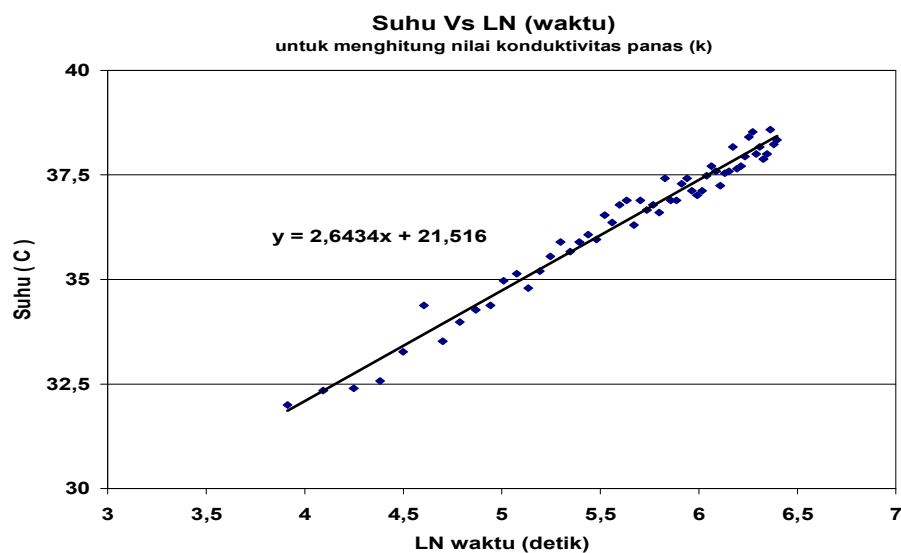
Pasir besi mempunyai nilai k yang lebih besar dibanding pasir kali, kondisi ini disebabkan karena kandungan besi lebih tinggi pada pasir besi dibanding pasir kali. Kenyataan ini didukung dengan pustaka bahwa k pasir jauh lebih kecil dibanding k besi. Nilai k pasir 0,325 J/dt.m.C sedangka nilai k besi sebesar 48,4 J/dt.m.C (Mohsenin, 1980).

Salah satu contoh hasil pengukuran data suhu-waktu untuk menghitung nilai k dapat Gambar 1, sedang hasil perhitungannya secara grafik dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar1. Hasil pengukuran suhu-waktu pasir kali diameter pasir 1,5 mm.

Menggunakan hasil pengukuran suhu-waktu nilai konduktivitas panas (k) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3), atau dapat juga dihitung secara grafik dengan cara memplotkan sumbu Y = suhu, dan sumbu X = LN (waktu), sehingga diperoleh grafik sebagai berikut:

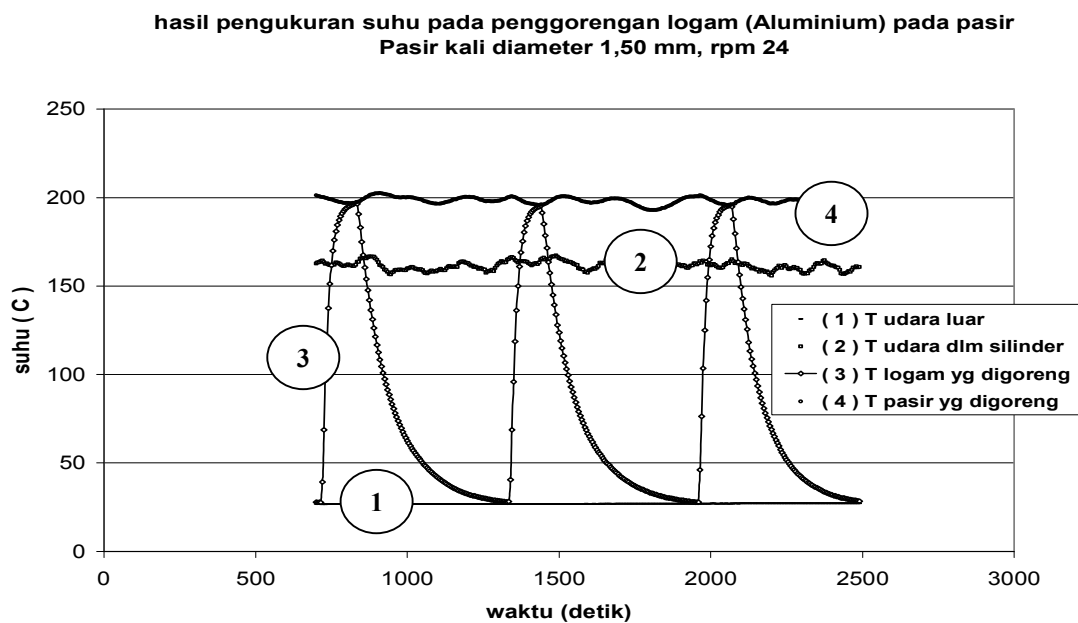


Gambar 2. Suhu-waktu hasil pengukuran dari pasir kali diameter 1,5 mm

Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa daya listrik yang dibangkitkan dari pusat silinder adalah sebesar 10,2 Watt/m, sedangkan dari grafik diperoleh bahwa slope (dY/dX) = 2,6434, sehingga nilai k dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3) sebagai berikut :

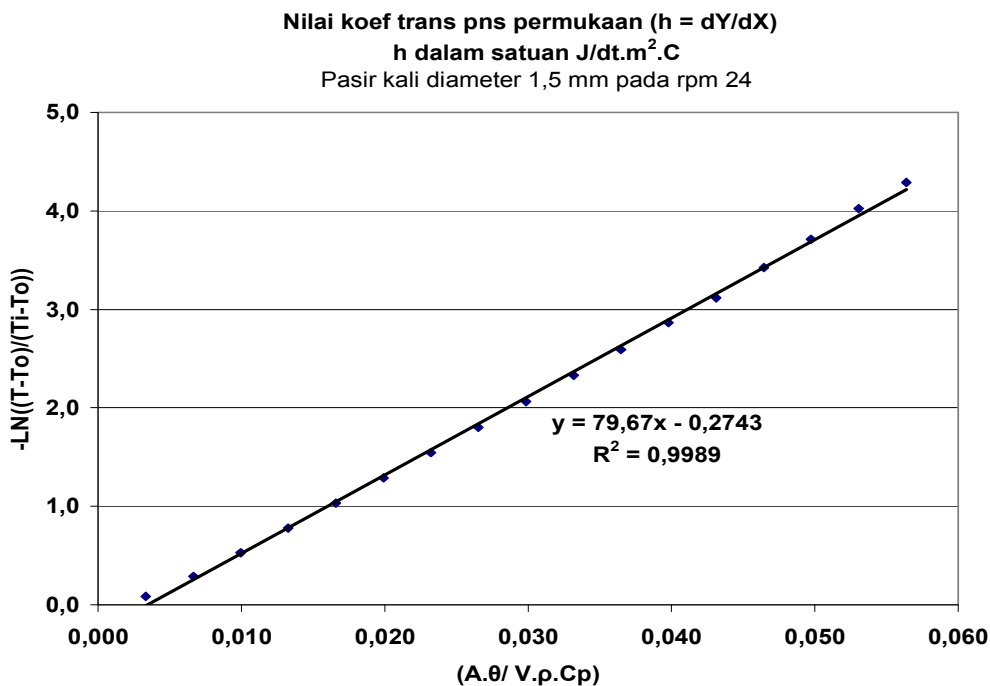
$$k = (10,2)/(4 * \pi * 2,6434) = 0,306W / m.C$$

Nilai koefisien pindah panas permukaan (h) pada penggorengan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas dapat dihitung dengan melakukan pengukuran suhu logam yang digoreng dalam pasir. Salah satu contoh hasil pengukuran tersebut dapat dilihat pada Gambar3.



Gambar 3. Hasil pengukuran suhu logam yang digoreng dalam pasir

Dari hasil pengukuran pada Gambar 3 dapat diplotkan grafik hubungan antara rasio suhu tak berdimensi $-\ln((T_{\theta} - T_{ps})/(T_i - T_{ps}))$ sebagai sumbu Y, dan $(A.\theta/ V.\rho. C_p)$ sebagai sumbu X, sehingga diperoleh Gambar 4.



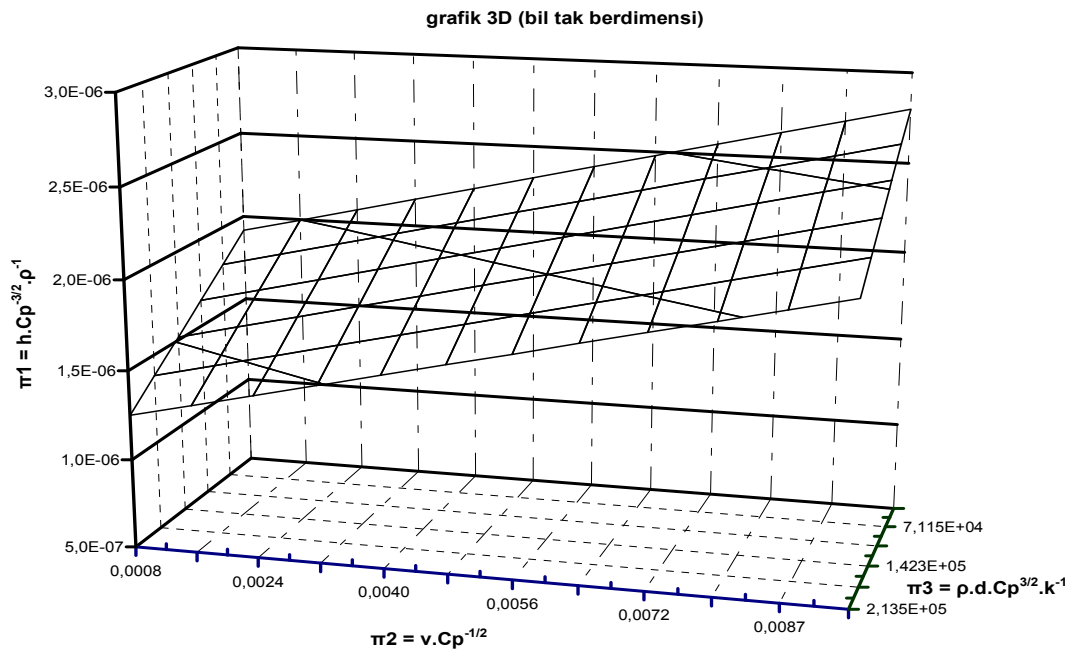
Gambar 4. Grafik untuk mengukur nilai koefisien pindah panas permukaan (h)

Dari Gambar 4 dengan menggunakan persamaan (4) nilai h dapat diketahui, yaitu merupakan slope dari persamaan garis yang terbentuk, sehingga nilai h hasil pengukuran tersebut adalah 79,67 J/dt.m².C.

Hasil eksperimen laboratorium untuk mengukur nilai h dilakukan pada variasi diameter pasir besi dan pasir kali, serta pada variasi rpm (kecepatan putar silinder penggoreng). Menggunakan data hasil pengukuran dan perhitungan secara eksperimen, maka dikembangkan model matematik koefisien pindah panas permukaan (h) dengan menggunakan analisis dimensi yang mengacu pada persamaan (5). Model matematik tersebut adalah sebagai berikut :

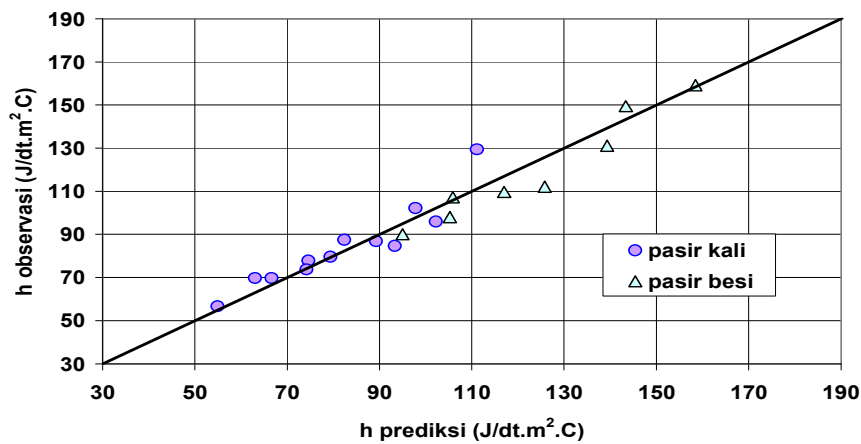
$$h \cdot \rho^{-1} \cdot Cp^{-3/2} = 1,97 \times 10^{-6} + 1,01 \times 10^{-4} \cdot v \cdot Cp^{-1/2} - 3,76 \times 10^{-12} \cdot \rho \cdot d \cdot k^{-1} \cdot Cp^{3/2}$$

Dari model matematik tersebut dapat digambarkan dalam grafik 3 dimensi seperti dapat dilihat pada Gambar 5, sedang grafik hasil pengukuran (observasi) dan pendugaan (prediksi) dari nilai h dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil pengukuran secara keseluruhan dari penelitian ini dapat dilihat pada Lampiran (Tabel 3 dan Tabel 4).



Gambar 5. Hubungan 3 bilangan tak berdimensi (π_1 , π_2 , dan π_3)

nilai koefisien transfer panas permukaan (h)



Gambar 6. Nilai h prediksi dan h observasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai h meningkat dengan rpm (kecepatan aliran pasir) yang semakin besar, serta pada diameter pasir semakin kecil. Hasil ini sejalan dengan beberapa pustaka yang menyatakan bahwa semakin besar aliran media disekitar bahan maka nilai h akan semakin besar, sedangkan semakin besar diameter partikel (d) yang mengalir

disekitar bahan, maka akan menyebabkan nilai h semakin menurun (Masoumifard *et al.*, 2008; Grewal dan Zimmerman, 1988; Loveday dan Taki, 1996; Zabrodsky *et al.*, 1981).

Hasil pengukuran (observasi) dan pendugaan (prediksi) terhadap nilai h seperti ditunjukkan pada Gambar 6, dapat dikatakan bahwa hasil pengukuran mempunyai nilai yang cukup dekat dengan hasil pendugaan dengan model matematik yang diperoleh, dengan penyimpangan rata-rata 5,6 persen.

Hasil pengujian kepekaan model matematik koefisien transfer panas permukaan (h) terhadap perubahan variable (C_p , ρ , d , k , dan rpm) menunjukkan bahwa nilai h paling peka terhadap perubahan C_p , dan tidak peka terhadap perubahan k . Hasil ini sejalan dengan pustaka yang diperoleh, perubahan ukuran diameter partikel (d) cukup berpengaruh terhadap perubahan nilai h , serta nilai h tidak peka terhadap perubahan nilai k (Li Wang *et al.*, 2004). Hasil pengujian kepekaan nilai h terhadap perubahan variable dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Tingkat kepekaan (sensitivitas) nilai h terhadap perubahan variabel

Perubahan variabel	perubahan h (Δh)	perubahan variable Maksimum	perubahan h (Δh)
ΔC_p (10 %)	13,82%	124%	172,55%
$\Delta \rho$ (10 %)	9,19%	170%	136,15%
Δd (10 %)	0,74%	1000%	73,90%
Δk (10 %)	0,67%	142%	4,34%
Δrpm (10 %)	0,44%	1200%	53,39%

D. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

- Massa jenis (ρ) pasir turun dengan diameter semakin besar, dan pasir besi mempunyai nilai massa jenis yang lebih besar dibanding pasir kali.
- Panas jenis (C_p) pasir meningkat dengan diameter semakin besar, dan pasir besi mempunyai panas jenis yang lebih kecil dibanding pasir kali.
- Konduktivitas panas (k) pasir turun dengan diameter semakin besar, dan pasir besi mempunyai nilai konduktivitas panas lebih besar dibanding pasir kali.
- Koefisien pindah panas permukaan (h) pasir turun dengan diameter semakin besar, serta meningkat dengan semakin besar rpm silinder penggoreng.
- Nilai koefisien pindah panas permukaan (h) pasir besi lebih besar dibanding pasir kali

- f. Model matematik yang telah dikembangkan untuk memprediksi nilai koefisien pindah panas permukaan (h) menunjukkan hasil yang cukup baik, karena nilai h prediksi hampir sama dengan h observasi, dengan penyimpangan rata-rata sebesar 5,6 persen.
- g. Dari model matematik transfer panas permukaan (h) yang diperoleh, nilai h paling peka (sensitive) terhadap perubahan panas jenis (C_p) pasir.
- h. Hasil prediksi menggunakan model matematik, diperoleh nilai h terbesar (158,4 $J/dt.m^2.C$) pada saat rpm , ρ , k maksimum, dan d , C_p minimum.

2. Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk diaplikasikan pada penggorengan produk.

DAFTAR PUSTAKA

- Glenn Murphy, C.E. 1950. *Similitut in Engineering*. The Ronald Press Company, New York.
- Grewal, N.S., and A. T. Zimmerman. 1988. *Heat Transfer From a Horizontal Tube Immersed in a Liquid-Solid Fluidized Bed*. J. Powder Technology, 54 : 137-145.
- Henderson, S.M. dan R.L. Perry. 1980. *Agricultural Process Engineering*. AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.
- Hsu, H.M., J.D. Mannapperuma, dan R.P. Singh. 1991. *Physical and Thermal Properties of Pistachios*. J. Agric. Eng. Res. 49 : 311 – 321.
- Li Wang, Ping Wu, Yanping Zhang, Jing Yang, Lige Tong, Xuezi Ni. 2004. *Effects of Solid Particle Properties on Heat Transfer Between High-temperature Gas Fluidized Bed and Immersed Surface*. J. Applied Thermal Engineering, 24 : 2145-2156.
- Loveday, D.L. and A.H. Taki. 1996. *Convective Heat Transfer Coefficients at a Plane Surface on a Full Scale Building Façade*. Int. J. Heat and Mass Transfer, 39 : 1729 – 1742.
- Masoumifard, N., N. Mostoufi, H.Ali-Asghar, and R. Sotudeh-Gharebagh. 2008. *Investigation of Heat Transfer Between a Horizontal Tube and Gas–Solid Fluidized Bed*. Int. J. Heat and Fluid Flow, 29 : 1504-1511.
- Mohsenin, N.N. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Rohsenow, W.M., and H. Choi, 1961. *Heat Mass and Momentum Transfer*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Siswantoro. 1995. *Pengukuran Konduktivitas dan Difusivitas Panas Biji-bijian dalam Bentuk Curah Menggunakan Sumber Panas Lini*. Tesis S2, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Zabrodsky, S.S., Yu. G. Epanov, D. M. Galershtein, S. C. Saxena and, A. K. Kolar. 1981. *Heat Transfer in a Large-Particle Fluidized Bed With Immersed in-line and Staggered Bundles of Horizontal Smooth Tubes*. Int. J. Heat and Mass Transfer, 24 : 571-579.

LAMPIRAN

pers model matematik koefisien transfer panas permukaan

$$h \cdot \rho^{-1} \cdot Cp^{-3/2} = 1,971 \times 10^{-6} + 1,009 \times 10^{-4} v \cdot Cp^{-1/2} - 3,758 \times 10^{-12} \rho \cdot d \cdot k^{-1} \cdot Cp^{3/2}$$

$$\pi_1 = b_0 + b_1 \cdot \pi_2 + b_2 \cdot \pi_3$$

Tabel 3. Hasil pengukuran sifat fisik dan termis pasir kali

rpm	kecepatan (v) (m/dt)	diameter (d) M	Cp (J/kg.C)	ρ (kg/m ³)	k (J/dt.mC)	π_2	π_3	π_1	h prediksi (J/dt.m ² .C)	h observasi (J/dt.m ² .C)
3	0,025	0,00035	886	1477	0,362	0,0008	37660,89	1,92E-06	74,6	77,9
10	0,084	(0,35 mm)				0,0028	37660,89	2,11E-06	82,3	87,5
24	0,201					0,0068	37660,89	2,51E-06	97,8	102,2
36	0,302					0,0101	37660,89	2,85E-06	111,1	129,5
3	0,025	0,00075	890	1434	0,349	0,0008	81821,98	1,75E-06	66,6	69,8
10	0,084	(0,75 mm)				0,0028	81821,98	1,95E-06	74,1	73,8
24	0,201					0,0067	81821,98	2,34E-06	89,3	86,9
36	0,302					0,0101	81821,98	2,68E-06	102,2	95,9
3	0,025	0,0015	988	1395	0,311	0,0008	208949,10	1,27E-06	54,9	56,7
10	0,084	(1,5 mm)				0,0027	208949,10	1,46E-06	63,0	69,8
24	0,201					0,0064	208949,10	1,83E-06	79,4	79,7
36	0,302					0,0096	208949,10	2,15E-06	93,3	84,6

Tabel 4. Hasil pengukuran sifat fisik dan termis pasir besi

rpm	kecepatan (v) (m/dt)	diameter (d) M	Cp (J/kg.C)	ρ (kg/m ³)	k (J/dt.mC)	π_2	π_3	π_1	h prediksi (J/dt.m ² .C)	h observasi (J/dt.m ² .C)
-----	---------------------------	---------------------	----------------	--------------------------------	----------------	---------	---------	---------	--	---

3	0,025	0,00015	794	2373	0,443	0,0009	17976,95	1,99E-06	105,9	107,2
10	0,084	(0,15 mm)				0,0030	17976,95	2,20E-06	117,0	109,7
24	0,201					0,0071	17976,95	2,62E-06	139,3	131,1
36	0,302					0,0107	17976,95	2,98E-06	158,4	159,2
3	0,025	0,0003	807	2148	0,422	0,0009	35006,88	1,93E-06	95,0	90,1
10	0,084	(0,3 mm)				0,0030	35006,88	2,14E-06	105,3	98
24	0,201					0,0071	35006,88	2,55E-06	125,8	112,1
36	0,302					0,0106	35006,88	2,91E-06	143,4	149,5