PENENTUAN DIFUSIVITAS PANAS PEMPEK LENJER SELAMA PEREBUSAN MENGGUNAKAN METODE NUMERIK

Determination of Thermal Diffusivity Pempek Lenjer during Boiling Using Numerical Methods

Railia Karneta[1], Amin Rejo[2], Gatot Priyanto[2], Rindit Pambayun[2]

[1]Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian Sriwigama, Jl. Demang IV, Demang Lebar Daun Palembang 30137
[2]Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Palembang - Prabumulih Km. 32 Sumatera Selatan 30662
Email: railiakarneta@yahoo.com

ABSTRAK

Koefisien difusivitas panas pada perebusan pempek lenjer harus diketahui, karena dapat ditentukan waktu pengolahan pempek yang tepat (optimal). Formula dan suhu akan mempengaruhi koefisien difusivitas panas.Tujuan penelitian adalah menentukan koefisien difusivitas panas pada perebusan pempek lenjer secara numerik. Variabel yang diukur adalah suhu sampel pada titik pusat (r_0) = 0 cm, r_1 = 1 cm, r_2 = 2 cm, dan lama pemasakan pempek. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan model difusivitas panas di titik sembarang dan model difusivitas panas di titik pusat, dengan program computer *Engineering Equation Solver* (EES) Ver 8.91.Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien difusivitas panas pempek lenjer pada formula 1 adalah interval 0,321 - 1,515. 10^{-7} m^2/s, pada formula 2 adalah 0,297 - 1,389. 10^{-7} m^2/s, pada formula 3 adalah 0,378 - 1,471. 10^{-7} m^2/s, dan formula 4 adalah 0,2778 - 1,620. 10^{-7} m^2/s.

Kata kunci: Difusivitas panas, pempek lenjer, metode numerik

ABSTRACT

The knowledge of thermal diffusivity coefficient is important in order to determine the proper or optimum time for pempek lenjer processing. Formula and temperature will affect thermal diffusivity. The research objective was to numerically determine thermal diffusivity coefficient of pempek lenjer during boiling. The measured variables were sample temperature measured at pempek center point (r_0) = 0 cm, r_1 = 1 cm, r_2 = 2 c, and time for boiling pempek. Data was analyzed by using 9 and 12 models through computer program of *Engineering Equation Solver* (EES) Ver 8.91. The results showed that thermal diffusivity coefficient of pempek lenjer for formula 1, 2, 3, and 4 were between 0.321 and 1.515 .10^{-7} m^2/s, between 0.297 and 1.389.10^{-7} m^2/s, between 0.378 and 1.471. 10^{-7} m^2/s and between 0.2778 and 1.620. 10^{-7} m^2/s respectively

Keywords: thermal diffusivity, pempek lenjer, numerical method

PENDAHULUAN

Pempek merupakan makanan tradisional khas Sumatera Selatan, yang dibuat dari daging ikan giling, tepung tapioka atau tepung sagu, air, garam, dan bumbu-bumbu penambah cita rasa. Tahapan pengolahan pempek terdiri dari penggilingan daging ikan, pencampuran bahan, pembentukan pempek, dan pemasakan (Karneta, 2010). Tahap pemasakan (perebusan) merupakan salah satu tahap penting, karena pada tahap ini terjadi difusivitas panas dan massa, juga terjadi reaksi fisikokimia seperti denaturasi protein dan gelatinisasi pati. Difusivitas panas merupakan salah satu sifat fisik yang berkaitan dengan proses-proses pembauran/transfer panas dalam bahan atau diartikan sebagai laju pada saat panas terdifusi keluar atau masuk dalam bahan yang secara natural mendistribusikan panas keseluruh bagian produk (Fontana dkk., 2001; Huang dan Liu, 2009).

Koefisien difusivitas panas bahan merupakan salah satu sifat panas yang dibutuhkan untuk menduga laju perubahan suhu bahan sehingga dapat ditentukan kebutuhan energi atau waktu optimum dalam proses pengolahan terutama bahan yang sensitif terhadap panas (Singhal dkk., 2008 ; Tastra dkk., 2006; Suroso, 2006). Koefisien difusivitas panas yang tinggi menyebabkan semakin cepat terjadinya difusi panas di dalam

bahan (Jain dan Pathare, 2007; Singhal dkk., 2008), sehingga semakin singkat waktu pemasakan. Difusivitas panas pada perebusan pempek sangat penting, untuk mengetahui lama dan suhu optimal pemasakan pempek. Menurut Olivera dan Salvadori (2008), data difusivitas panas selama proses pemasakan digunakan untuk mengetahui spesifikasi kondisi memasak, terutama dapat menemukan waktu dan temperatur yang tepat, yang menjamin keamanan dari sudut pandang mikrobiologi, tanpa kehilangan karaktersitik gizi dan organoleptik makanan. Proses kenaikan suhu bahan yang direbus dipengaruhi oleh kecepatan transfer panas dari air perebusan ke bahan yang terjadi secara konveksi, dan transfer panas dalam bahan terjadi secara konduksi (Huang dan Liu, 2009). Transfer panas secara konduksi pada bahan yang dipanaskan terdapat titik yang paling lambat menerima panas (*cold point)* yaitu pada pusat bahan (Jaczynski dan Park, 2002, Opaku dkk. 2006). Transfer panas pada pempek lenjer (silinder) diasumsikan hanya terjadi pada arah radial sehingga distribusi suhu pada suatu titik sangat tergantung pada suhu lingkungan terdekat titik tersebut dan dapat ditentukan dengan menggunakan metode numerik (Crank, 1998; Heldman dan Lund, 2007). Penentuan koefisien dugaan difusivitas panas (α) pada bahan ada dua cara yaitu penentuan langsung nilai α secara numerik setelah diketahui data sebaran suhu T terhadap waktu t dan jarak dari pusat bahan r, dan secara tidak langsung, dimana difusivitas panas dinyatakan sebagai rasio dari nilai konduktivitas bahan terhadap panas jenis dan massa jenis (Abdullah, 1996)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{..... (1)}$$

Keterangan : α = difusivitas panas (m^2 /det), k = konduktivitas panas (J/m ºC detik)
ρ = massa jenis (kg/m^3), C_p= panas jenis (J/kg ºC)

Sifat difusivitas panas dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan, struktur bahan, dan suhu (Silalahi dan Tambunan, 2005; Sun, 2006). Tujuan penelitian adalah menentukan koefisien difusivitas panas pada perebusan pempek lenjer secara numerik.

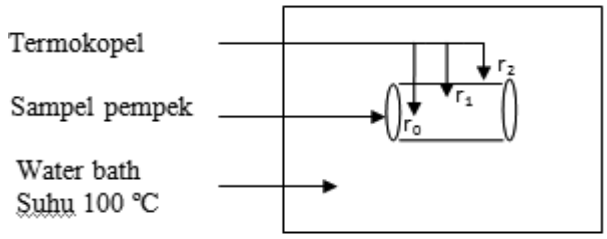
METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya, pada bulan Juli-September 2012. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah tepung tapioka, ikan gabus (*Ophicephallus striatus* Blkr), garam dapur, dan air es. Perlakuan pada penelitian ini adalah formulasi ikan dan tepung (F) dengan perbandingan :

F_1 = 1 : 0,5 ; F_2= 1 : 1,0 ;F_3=1: 1,5 ; F_4 = 1 : 2,0 dan perlakuan suhu (T) yaitu T_1 = 75 ºC ; T_2 = 80 ºC ; T_3 = 85 ºC; T_4 = 90 ºC ; T_5 = 95ºC. Sebagai kontrol dilakukan penentuan koefisien difusivitas panas secara analitik pada pempek setelah matang.

Pelaksanaan Penelitian

1. Membuat adonan pempek sesuai dengan formulasinya, dengan menambahkan air dan 2,5% garam dapur. Penambahan air mengikuti rumus : 75% berat adonan – (kadar air ikan x berat ikan) – (kadar air tepung x berat tepung).
2. Menimbang 350 gram adonan pempek lalu dicetak berbentuk silinder (lenjer) dan selanjutnya direbus dalam water bath pada suhu 100 ºC. Untuk pengukuran suhu pada pempek dibuatjaringan termokopel type K yang dipasang pada wadah sampel di tiga titik pengukuran selama perebusan. Penggunaan jaringan tersebut untuk menjaminkedudukanpengukuran suhu sampel pada titik pusat (r_0) = 0 cm, titik tengah (r_1) = 1 cm, dan titik permukaan (r_2) = 2 cm Sampel yang telah mencapai suhu 75 ºC, 80 ºC, 85 ºC, 90 ºC, dan 95 ºC pada titik pusat pempek, diangkat dan ditiriskan.

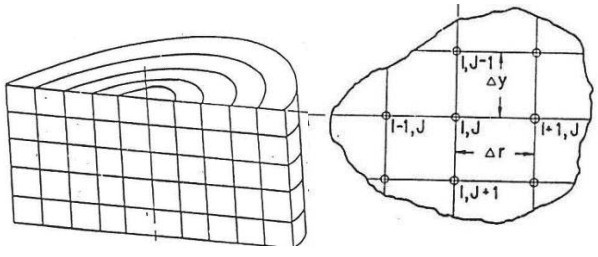


Gambar 1. Desain percobaan pengukuran distribusi suhu pada perebusan pempek

3. Analisis data difusivitas panas menggunakan model 9 dan 12, serta prediksi temperatur menggunakan model 10 dan 13, dengan program computer *Engineering Equation Solver* (EES) Ver 8.91.

Penentuan Model Difusivitas Panas Secara Numerik

Distribusi suhu menggunakan metode numerik ditentukan dari distribusi suhu pada titik yang berada didekatnya, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi suhu pempek lenjer menggunakan metode numerik

Ruang 3 dimensi berbentuk kubus, panjang sisinya adalah x y z (Gerald, 2005). Jika kuantitas bahan dapat dinyatakan dengan konsentrasi bahan (C), maka pada suatu priode t, perubahan konsentrasi bahan harus sama dengan jumlah netto fluks massa bahan yang masuk selama priode tersebut (F). dalam bentuk formulasi matematika adalah :

$$(C^{i+\Delta r} - C^{i})\Delta x\Delta y\Delta z = \Delta t \begin{vmatrix} F_X(x) - F_x(x+\Delta x)\Delta y\Delta z + \\ F_y(y) - F_y(y+\Delta y)\Delta x\Delta z + \\ F_z(z) - F_z(z+\Delta z)\Delta x\Delta y \end{vmatrix} \quad \text{..... (2)}$$

dengan $F_X(x+\Delta x) = F_x(x) + \frac{\partial F}{\partial X}.\Delta x$

Faktor $\Delta x\, \Delta y\, \Delta z$ dapat dihilangkan sehingga persamaan 2 menjadi

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad \text{..... (3)}$$

Berdasarkan hukum Fick 1, fluks difusi merupakan gradien konsentrasi dikalikan dengan suatu koefisien difusi, dinyatakan dengan rumus :

$$F_i = -D\frac{\partial c}{\partial x_i} \quad \text{..... (4)}$$

Substitusi persamaan 4 pada persamaan 3, dan diasumsikan perambatan panas hanya pada arah radial (jari-jari) silinder, dari arah aksial dan azimut terlalu kecil dan dianggap dapat diabaikan, sehingga diperoleh :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{D\frac{\partial c}{\partial x}\right\} = 0 \quad \text{..... (5)}$$

Dengan i = 1,2,3 dan D koefisien difusvitas panasi, maka persamaan 5 diatas dikenal sebagai persamaan penyusun proses difusi untuk 3 dimensi. Apabila konsentrasi c diganti dengan temperatur T dan ditulis dalam bentuk 2 dimensi, maka persamaan 5 menjadi :

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - D_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \text{..... (6)}$$

Dalam bentuk 1 dimensi, maka persamaan 6 menjadi

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{..... (7)}$$

Aplikasi skema numerik dari persamaan 7 adalah :

$$\frac{T_r^{t+1} - T_r^t}{\Delta t} = D\,\frac{T_{r-1}^t - 2T_r^t + T_{r+1}^t}{\Delta x^2} \quad \text{..... (8)}$$

Aplikasi model difusivitas panas secara numerik pada perebusan pempek

$$\text{D}=\alpha = \frac{\Delta r^2}{\Delta t}\left\{\frac{r(T_r^t - T_r^{t-1})}{(\Delta r+r)T_{r+1}^{t-1} - (\Delta r+2r)T_r^{t-1} + r(T_{r-1}^{t-1})}\right\} \quad \text{..... (9)}$$

Prediksi temperatur pada saat perebusan pempek adalah :

$$T_r^{t+1} = \alpha.\Delta t\{(\Delta r + r)T_{r+1}^t + rT_{r-1}^t - (\Delta r + 2r)T_r^t\} + T_r^t \quad \text{...(10)}$$

Dugaan sebaran suhu pada pusat pempek adalah dengan mengambil r adalah sumbu pusat, yaitu r =0 dan T adalah suhu pusat silinder (Tc) persamaan difusivitas menurut Moura dkk (1998):

$$\alpha = \frac{AR^2}{4\,(Ts - Tc)} = \quad \text{..... (11)}$$

Aplikasi model difusivitas panas pada titik pusat pempek secara numerik, adalah :

$$\alpha = \frac{(\Delta r)^2}{(4\Delta t)}\left\{\frac{(T_r^{t+1} - T_r^t)}{T_{r+1}^t - T_r^t}\right\} \quad \text{..... (12)}$$

Prediksi temperatur di titik pusat pempek lenjer saat perebusan adalah :

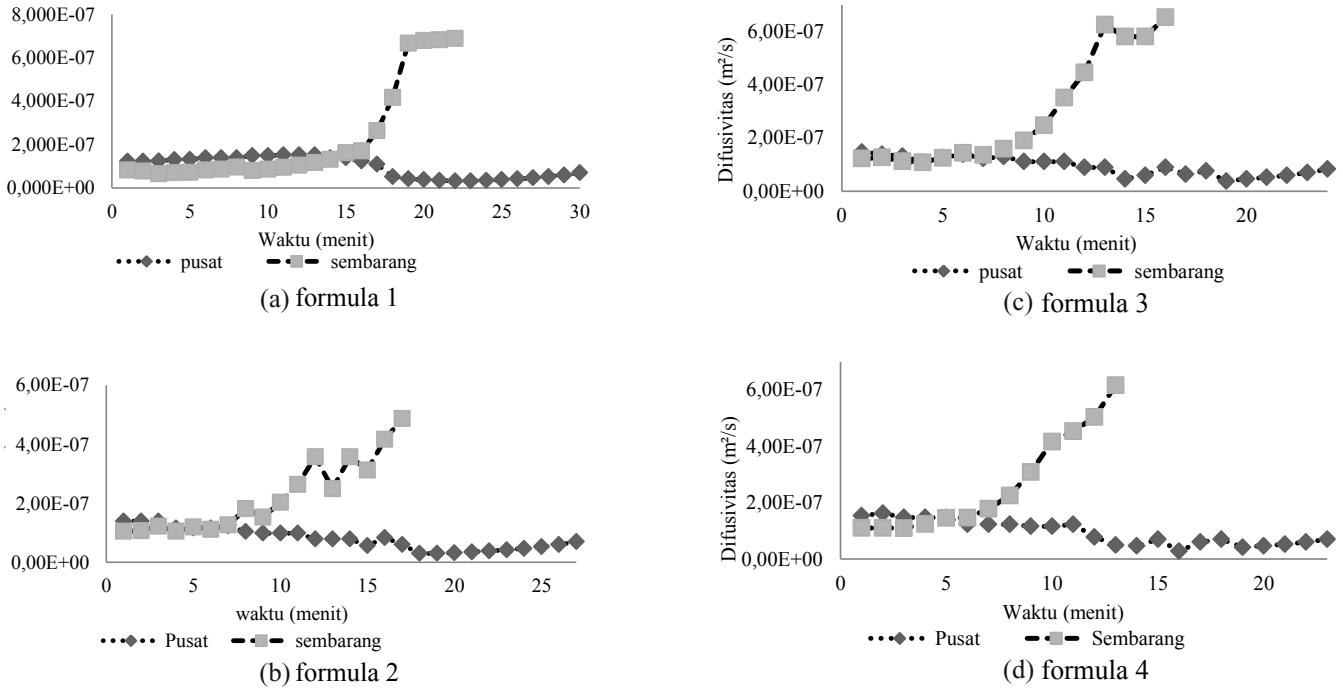
$$T_r^{t+1} = T_r^t + \frac{4\alpha\Delta t}{(\Delta r^2)}(T_{r+1}^t - T_r^t) \quad \text{..... (13)}$$

Keterangan : r = jarak antar titik pengukuran (cm), t = jarak waktu pengukuran (menit);
T = temperatur (ºC); F_i = fluks difusi; r = indek jarak antar titik pengukuran atau jari-jari (cm) t = indek jarak antar waktu pengukuran suhu (menit); T_r^t =temperatur pada jari-jari r dan waktu t

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi koefisien difusivitas panas formula 1 di titik pusat pempek lenjer cenderung naik pada tahap awal proses dan kemudian turun pada pertengahan hingga akhir proses, pada formula 2, 3 dan 4, cenderung turun dari awal hingga ahir proses. Distribusi koefisien difusivitas panas pada titik sembarang cenderung naik semakin tingginya suhu (Gambar 3).

Proses perebusan pempek lenjer dapat dibagi menjadi tiga fase berdasarkan perubahan koefisien difusi secara drastis, yaitu fase pertama adalah fase perubahan bahan dari kondisi mentah menjadi kondisi setengah matang yang berbentuk gel, karena terjadi proses gelatinisasi. Fase ini terjadi lonjakan suhu yang cukup tinggi dan kenaikan koefisien difusivitas panas. Produk akhir dari fase pertama adalah pempek dengan kondisi setengah matang, pada bagian luar pempek sudah tergelatinisasi sedangkan bagian dalam masih dalam keadaan



Gambar 3. Grafik distribusi koefisien difusivitas panas pada titik pusat dan titik sembarang (a) Formula 1, (b) Formula 2, (c) Formula 3, (d) Formula 4

Tabel 1. Pembagian fase pada perebusan pempek lenjer formula 1

t(menit)	Xi	Yi	Zi	$X_{old,i}$	$Y_{old,i}$	$Z_{old,i}$	T∞	$\alpha_{sembarang\ titik\ (m^2/s)}$	$\alpha_{pusat\ (m^2/s)}$
						Fase pertama			
0	14	31	89				100		
1	19	36	96	18,998	36,098	95,822	100	8,250E-08	1,225E-07
2	24	40	99	23,998	40,048	99,528	100	3,714E-08	1,225E-07
3	28	44	100	28,000	43,763	100	100	6,533E-08	1,041E-07
4	33	48	100	32,998	47,708	100	100	6,944E-08	1,302E-07
5	37	52	100	36,999	51,843	100	100	7,166E-08	1,111E-07
6	42	56	100	41,999	55,654	100	100	8,230E-08	1,389E-07
7	46	60	100	45,998	59,843	100	100	8,546E-08	1,190E-07
8	50	64	100	49,998	63,813	100	100	9,516E-08	1,190E-07
9	55	67	100	54,999	66,570	100	100	7,933E-08	1,488E-07
10	59	70	100	58,999	69,633	100	100	8,616E-08	1,389E-07
11	63	73	100	62,999	72,940	100	100	9,433E-08	1,515E-07
						Fase kedua			
12	67	76	100	67,000	75,754	100	100	1,042E-07	1,515E-07
13	71	79	100	70,999	78,873	100	100	1,163E-07	1,515E-07
14	75	82	100	75,000	81,881	100	100	1,315E-07	1,190E-07
15	77	85	100	77,000	84,892	100	100	1,613E-07	1,190E-07
16	80	87	100	80,000	86,791	100	100	1,502E-07	1,190E-07
17	82	90	100	81,999	89,895	100	100	2,632E-07	1,190E-07
18	83	93	100	83,000	91,000	100	100	4,166E-07	5,208E-08
19	84	95	100	84,000	94,500	100	100	6,666E-07	4,167E-08
20	85	97	100	84,999	96,998	100	100	3,087E-07	3,788E-08
21	86	99	100	85,999	98,998	100	100	3,030E-07	3,472E-08
22	87	100	100	86,999	99,999	100	100	1,282E-07	3,205E-08
						Fase ketiga			
23	88	100	100	87,999	100	100	100	0	3,205E-08
24	89	100	100	88,999	100	100	100	0	3,472E-08
25	90	100	100	89,999	100	100	100	0	3,788E-08
26	91	100	100	90,999	100	100	100	0	4,167E-08
27	92	100	100	91,999	100	100	100	0	4,630E-08
28	93	100	100	93,000	100	100	100	0	5,208E-08
29	94	100	100	93,999	100	100	100	0	5,952E-08
30	95	100	100	94,999	100	100	100	0	6,944E-08

Keterangan : X_i = Suhu observasi pada r = 0 cm ; Y_i = Suhu observasi pada r = 1 cm , Z_i = suhu observasi pada r =2 cm , T∞ =temperatur media air , $X_{old\ i}$ = Suhu prediksi pada r =0 cm, $Y_{old\ i}$ = Suhu prediksi pada r = 1 cm, $Z_{old\ I}$ = Suhu prediksi pada r = 2 cm

mentah. Fase kedua adalah fase perubahan dari kondisi setengah matang menjadi cukup matang. Produk ahir dari fase kedua adalah pempek yang masih dalam kondisi setengah matang namun wilayah gelatinisasi lebih dalam dari fase pertama, dan koefisien difusivitas panas mulai mengalami penurunan. Fase yang ketiga adalah fase pematangan seluruh lapisan pempek, sehingga pempek sudah tergelatinisasi sempurna. Pembagian fase dan pola distribusi koefisien difusivitas panas pempek lenjer selama proses perebusan pada Tabel 1, 2, 3, dan 4.

Jumlah ikan yang tinggi pada formula 1, membutuhkan waktu pemasakan yang lebih lama karena laju difusivitas panas yang rendah. Pertama disebabkan karena suhu denaturasi pada ikan > 70 ºC (Suzuki, 1981) lebih tinggi dari suhu gelatinisasi tepung tapioka 64.5 ºC (Haryadi, 1995). Kedua karena jumlah ikan yang tinggi menyebabkan kadar air adonan menjadi lebih tinggi, yang dapat menurunkan titik didih sehingga peningkatan suhu menjadi lebih lambat, juga air memiliki panas jenis yang tinggi dan bersifat menghambat panas. Ketiga keberadaan lemak dan protein membentuk kompleks dengan amilosa, sehingga membentuk lapisan atau endapan pada permukaan yang dapat menghambat pengeluaran amilosa dari granula karena menghambat penyerapan air, sehingga diperlukan energi yang lebih besar untuk melepas`amilosa dari kompleks protein dan lemak.

9

Tabel 2. Pembagian fase pada perebusan pempek lenjer formula 2

t(menit)	Xi	Yi	Zi	$X_{old,i}$	$Y_{old,i}$	$Z_{old,i}$	T∞	$\alpha_{sembarang\ titik}$ (m^2/s)	α_{pusat} (m^2/s)
					Fase pertama				
0	14	33	90				100		
1	21	39	95	20,999	38,550	94,566	100	1,042E-07	1,389E-07
2	27	45	100	26,997	45,004	100	100	1,064E-07	1,389E-07
3	33	51	100	32,997	50,854	100	100	1,219E-07	1,389E-07
4	38	56	100	37,998	55,575	100	100	1,042E-07	1,157E-07
5	43	61	100	42,997	60,852	100	100	1,191E-07	1,157E-07
6	48	65	100	47,719	64,533	100	100	1,111E-07	1,157E-07
7	53	69	100	52,704	68,742	100	100	1,258E-07	1,225E-07
8	57	74	100	57,147	73,804	100	100	1,811E-07	1,041E-07
					Fase kedua				
9	61	78	100	60,529	77,886	100	100	1,524E-07	9,804E-08
10	65	82	100	65,000	81,456	100	100	2,030E-07	9,804E-08
11	69	85	100	68,528	84,770	100	100	2,632E-07	9,804E-08
12	72	88	100	72,000	87,714	100	100	3,571E-07	7,813E-08
13	75	91	100	75,000	91,000	100	100	2,491E-07	7,813E-08
14	78	93	100	77,812	92,000	100	100	3,571E-07	7,813E-08
15	81	95	100	80,000	94,627	100	100	3,118E-07	5,556E-08
16	83	97	100	82,799	97,000	100	100	4,166E-07	8,333E-08
17	85	99	100	84,999	99,000	100	100	4,865E-07	5,952E-08
					Fase ketiga				
18	86	100	100	85,999	100	100	100	0	2,976E-08
19	87	100	100	86,926	100	100	100	0	2,976E-08
20	88	100	100	87,923	100	100	100	0	3,205E-08
21	89	100	100	88,916	100	100	100	0	3,472E-08
22	90	100	100	89,909	100	100	100	0	3,788E-08
23	91	100	100	90,900	100	100	100	0	4,167E-08
24	92	100	100	91,800	100	100	100	0	4,630E-08
25	93	100	100	92,887	100	100	100	0	5,208E-08
26	94	100	100	93,857	100	100	100	0	5,952E-08
27	95	100	100	94,833	100	100	100	0	6,944E-08

Formula 1, 2,3, dan 4, membutuhkan waktu perebusan berturut-turut 30, 27, 24 dan 23 menit, karena semakin besar koefisien difusivitas panas, maka semakin cepat energi panas yang didifusikan ke dalam bahan, sehingga pempek semakin cepat matang. Koefisien difusivitas panas pempek lenjer pada masing-masing fase berbeda, karena perubahan konduktivitasnya selama proses perebusan.

Tabel 3. Pembagian fase pada perebusan pempek lenjer formula 3

t(menit)	Xi	Yi	Zi	$X_{old,i}$	$Y_{old,i}$	$Z_{old,i}$	T∞	α sembarang titik (m^2/s)	α pusat (m^2/s)
					Fase pertama				
0	14	32	88				100		
1	21	39	94	21,038	38,778	94,88	100	1,228E-07	1,471E-07
2	27	46	100	26,999	45,771	100	100	1,268E-07	1,388E-07
3	33	52	100	32,999	51,912	100	100	1,124E-07	1,316E-07
4	38	57	100	37,999	56,451	100	100	1,082E-07	1,096E-07
5	44	62	100	43,684	61,728	100	100	1,244E-07	1,263E-07
6	50	67	100	49,664	66,724	100	100	1,437E-07	1,388E-07
7	55	71	100	54,704	70,628	100	100	1,361E-07	1,225E-07
8	60	75	100	59,688	74,857	100	100	1,587E-07	1,302E-07
9	64	79	100	63,999	78,855	100	100	1,905E-07	1,111E-07
10	68	83	100	67,999	82,815	100	100	2,469E-07	1,111E-07
11	72	86	100	71,999	85,947	100	100	3,508E-07	1,111E-07
					Fase kedua				
12	75	89	100	74,999	88,714	100	100	4,459E-07	8,928E-08
13	78	92	100	77,996	81,750	100	100	6,250E-07	8,928E-08
14	80	94	100	79,555	94.000	100	100	5,803E-07	4,629E-08
15	82	96	100	81,999	96.000	100	100	5,803E-07	5,952E-08
16	85	98	100	84,786	98.000	100	100	6,535E-07	8,928E-08
					Fase ketiga				
17	87	100	100	86,999	100	100	100	0	6,410E-08
18	89	100	100	88,999	100	100	100	0	7,575E-08
19	90	100	100	89,909	100	100	100	0	3,787E-08
20	91	100	100	90,999	100	100	100	0	4,629E-08
21	92	100	100	92,000	100	100	100	0	5,208E-08
22	93	100	100	92,999	100	100	100	0	5,952E-08
23	94	100	100	93,999	100	100	100	0	6,944E-08
24	95	100	100	95,000	100	100	100	0	8,333E-08

Koefisien difusivitas panas pempek lenjer pada fase pertama lebih tinggi, karena tepung tapioka yang masih dalam bentuk granula pati memilki banyak gugus hidroksil bebas, ketika dipanaskan dengan cepat air melakukan penetrasi ke dalam granula sehingga terjadi pengembangan. Pada fase ini koefisien konduktivitas panas masih tinggi sehingga pempek dengan cepat mampu menyerap panas yang berasal dari media air.

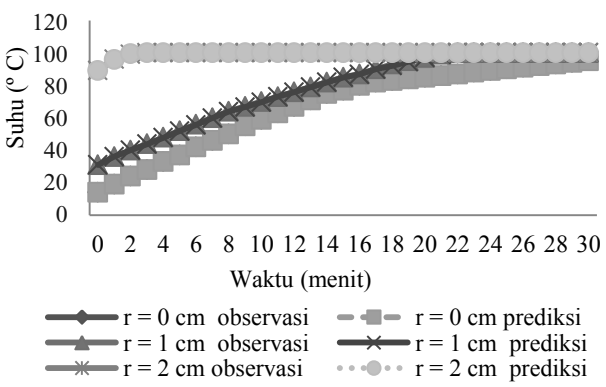
Tabel 4. Pembagian fase pada perebusan pempek lenjer formula 4

t(menit)	Xi	Yi	Zi	$X_{old,i}$	$Y_{old,i}$	$Z_{old,i}$	T∞	α sembarang titik (m^2/s)	α pusat (m^2/s)
					Fase pertama				
0	14	33	88				100		
1	21	39	95	20,999	39,094	88	100	1,098E-07	1,535E-07
2	28	45	100	27,998	45,013	95	100	1,098E-07	1,620E-07
3	34	51	100	33,999	50,724	100	100	1,095E-07	1,471E-07
4	40	57	100	39,999	56,718	100	100	1,235E-07	1,471E-07
5	46	63	100	45,999	62,956	100	100	1,449E-07	1,471E-07
6	51	68	100	51,000	67,722	100	100	1,462E-07	1,225E-07
7	56	73	100	56.000	72,936	100	100	1,773E-07	1,225E-07
8	61	78	100	61,000	77,648	100	100	2,252E-07	1,225E-07
9	65	83	100	64,998	82,963	100	100	3,086E-07	1,157E-07
10	70	87	100	69,999	85,255	100	100	4,166E-07	1,157E-07
11	75	91	100	75,000	90,808	100	100	4,535E-07	1,225E-07
					Fase kedua				
12	78	95	100	78,000	94.500	100	100	5,033E-07	7,813E-08
13	80	98	100	79,999	97,000	100	100	6,169E-07	4,902E-08
					Fase ketiga				
14	82	100	100	81,999	100	100	100	0	4,630E-08
15	85	100	100	84,999	100	100	100	0	6,944E-08
16	86	100	100	85,999	100	100	100	0	2,778E-08
17	88	100	100	87,999	100	100	100	0	5,952E-08
18	90	100	100	89,999	100	100	100	0	6,944E-08
19	91	100	100	91,000	100	100	100	0	4,167E-08
20	92	100	100	91,999	100	100	100	0	4,630E-08
21	93	100	100	93,000	100	100	100	0	5,208E-08
22	94	100	100	93,999	100	100	100	0	5,962E-08
23	95	100	100	94,999	100	100	100	0	6,944E-08

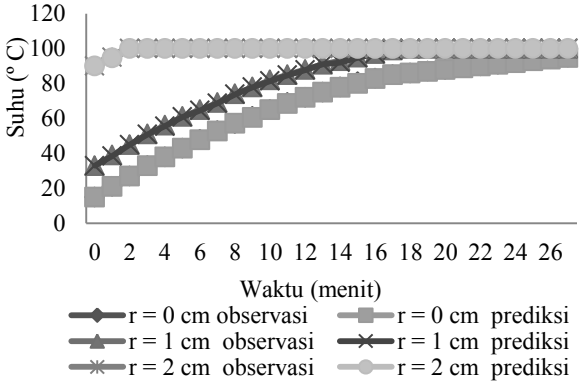
Fase selanjutnya ketika terjadi gelatinisasi dan terbentuk gel pada lapisan paling luar dari pempek menyebabkan daya serap panasnya menurun. Saat terjadi gelatinisasi atau saat granula pecah, strukturnya menjadi rapat, sehingga koefisien difusivitas panas menjadi lebih kecil. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Fournier dkk (2004), bahwa terdapat korelasi antara kekerasan bahan dengan koefisien difusivitas panas.

Laju difusivitas panas pada titik pusat (*center)* cenderung lebih lambat secara transient (Ansari dkk, 2007, Singhal dkk, 2008), sehingga suhu pada titik pusat cenderung lebih lambat mendekati suhu medium dibandingkan dengan suhu di dekat permukaan. Koefisien difusivitas panas di titik pusat pempek pada formula 1 adalah interval 0,321 - 1,515. 10^{-7} m^2/s, pada formula 2 adalah 0,297 – 1,389. 10^{-7} m^2/s, pada formula 3 adalah 0,378 – 1,471. 10^{-7} m^2/s, dan formula 4 adalah 0,2778 – 1,620. 10^{-7} m^2/s. Koefisien difusivitas panas pempek lenjer secara analitik adalah interval 1, 313 – 1,483 10^{-7} m^2/s. Penelitian Huang dan Mittal (1995), koefisien difusivitas selama perebusan bakso adalah 1,6 E-07 m^2/s, difusivitas panas pada perebusan ubi jalar interval 1,98 – 2,25 E-07 m^2/s (Fasina dkk., 2003). Koefisien difusivitas panas sosis type Lyoner interval 1,35 – 1,52 E-07 m^2/s (Markowski dkk.,2004). Koefisien difusivitas beberapa makanan di atas serupa dengan koefisien difusivitas pada perebusan pempek, karena serupa komposisinya yaitu berupa protein dan pati.

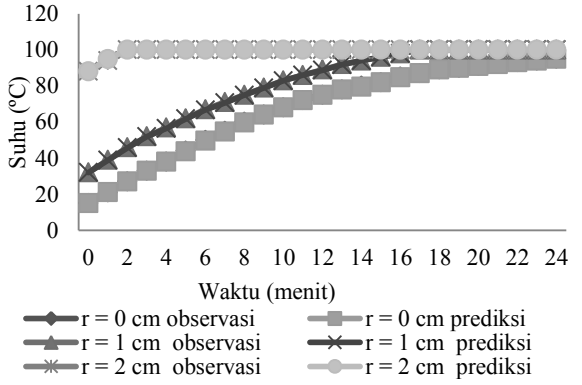
Metode numerik dapat mendeteksi laju difusivitas panas pada tiap fase selama proses perebusan pempek, terutama bila jarak pengamatan lebih dekat dengan pengambilan langkah



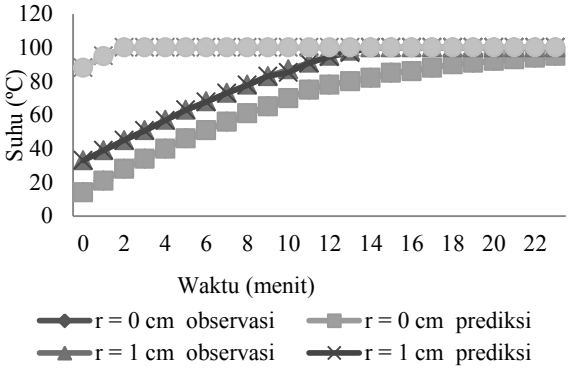
a. Formula 1



b. Formula 2



c. Formula 3



d. Formula 4

Gambar 4. Grafik suhu vs waktu pada perebusan pempek lenjer (a = formula 1, b = formula 2, c = formula 3, d = formula 4)

waktu lebih kecil, sehingga dapat menghasilkan penyimpangan rata-rata suhu perhitungan terhadap suhu pengukuran yang lebih kecil. Menurut Haryanto (2008) langkah waktu untuk menerapkan model difusi adalah $\Delta t \leq \Delta X^2/2D$ (menit). Grafik suhu prediksi, suhu observasi dan lama perebusan pempek disajikan pada Gambar 4.

Gambar 4 tampak bahwa titik suhu prediksi berdekatan dengan titik suhu observasi, namun suhu prediksi sedikit lebih rendah dari suhu observasi. Kedekatan nilai nilai tersebut secara statistik ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasi r (Steel dan Torrie, 1993). Pada r = 0 cm, r formula 1 adalah 0,996 , r pada formula 2 adalah 0,998, r pada formula 3 adalah 0,999, dan pada formula 4 adalah 0,999. Nilai nilai r tersebut menunjukkan bahwa model valid untuk memprediksi riwayat suhu perebusan pempek.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Formula pempek dominan ikan, menghasilkan distribusi koefisien difusivitas panas pada titik pusat cenderung naik pada fase awal perebusan dan turun pada fase ahir perebusan. Formulasi pempek dominan tepung menghasilkan distribusi koefisien difusivitas panas pada titik pusat cenderung turun dari awal hingga ahir fase perebusan.
2. Koefisien difusivitas panas pempek lenjer pada formula 1 adalah interval 0,321 - 1,515. 10^{-7} m^2/s , pada formula 2 adalah 0,297 – 1,389. 10^{-7} m^2/s, pada formula 3 adalah 0,378 – 1,471. 10^{-7} m^2/s, dan formula 4 adalah 0,2778 – 1,620. 10^{-7} m^2/s.
3. Metode numerik dapat digunakan dengan baik untuk mendeteksi laju difusivitas panas pada tiap fase selama proses perebusan pempek.

Saran

Perlu penelitian lebih lanjut pengukuran difusivitas panas pempek dengan langkah waktu lebih kecil, sehingga penyimpangan rata-rata suhu perhitungan terhadap suhu pengukuran lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, K. (1996). *Penerapan Energi Surya dalam Proses Termal Pengolahan Hasil Pertanian*. Orasi Ilmiah Guru Besar Tetap Ilmu Teknik Pengolahan Hasil Pertanian. Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Crank, J. (1998). *The Mathematics of Difusion*. Published in The United States by Oxford University Press Inc. New York.

Fasina, O., Farkas, B.E. dan Fleming, H.P. (2003). Thermaland dielectric properties of sweetpotato puree. *International Journal of Food Properties* **6**(3): 461-472.

Fontana, A.J., Wacker, B. dan Campbell, C.S.(2001). *Simulaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils*. The Society for engineering in agricultural, food and biological system.ASAE California. USA.

Fournier, D., Roger, J.P., Bellouati, A., Boue, C., Stamn, H. dan Lakestani, F. (2001). Correlation between hardness and thermal diffusivity. *Analytical Sciences*. *The Japan Society for Analytical Chemistry* Special Issue (17): 158-160.

Gerald, C.F. (2005). *Applied Numerical Analysis*. Addison-Wisley Publishing Company.

Haryadi (1995). *Kimia dan Teknologi Pati*. Program Pasca Sarjana. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Haryanto. B. (2008). Pengaruh pemilihan kondisi batas, langkah ruang, langkah waktu dan koefisien difusi pada model difusi. *Jurnal APLIKA* **8**(1): 1-7.

Heldman, D.R. dan Lund, D.B. (2007). *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker Inc. New York.

Huang, L. dan Liu, L.S. (2009). Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method. *Journal of Food Engineering* **95**: 179-185.

Huang, E. dan Mittal, G.S. (1995). Meatball cooking-modeling and simulation. *Journal of Food Engineering* **24**(1): 87-100.

Jaczynski, J. dan Park, J.W. (2002). Temperature predicting during thermal processing of surimi seafood. *Journal Food Engineering and Physical Properties* **34**(1):182-186

Jain, D. dan Pathare, P.B. (2007). Determination of thermal diffusivity of freshwater fish during ice storage by using a one dimensional fourier cylindrical equation. Central Institute of Post Harvest Engineering and Technology, PAU Campus Ludhiana, India.

Karneta, R. (2010). Analisis kelayakan ekonomi dan optimasi formulasi pempek lenjer skala industri. *Jurnal Pembangunan Manusia* **4**(3): 264-274.

Markowski, M., Ireneusz, B., Marek, C. dan Agnieszka, P. (2004). Determination of thermal diffusivity of lyoner type sausages during water bath cooking and cooling. *Journal of Food Engineering* **65**: 591-598.

Moura, S.C., Jardim, D.L. dan Sadahira, M.S. (1998). Thermophysical properties of tropical fruit juices. *Journal of Food Technology* **1**(12): 70-76.

Olivera, D.F. dan Salvodari (2008). Finite element modeling of food cooking. *Latin American Applied Research* **38**: 377-383.

Opaku, A., Tabil, L.G., Crear, B. dan Shaw, M.D. (2006). Thermal conductivity and thermal diffusivity of timothy hay. *Canadian Biosystems Engineering* **48**: 31-37.

Silalahi, F.R. dan Tambunan, A. (2005). Pengukuran difusivitas termal dan sifat dielektrik pada frekuensi radio dari andaliman. *Buletin Agricultural Engineering BEARING* **1**(2): 55-61.

Singhal, D.K., Singh, U. dan Singh, A.K. (2008).Effective thermal diffusivity of persishable produce as a function of temperature by transient method. *Indian Journal of Pure and Applied Physics* **46**: 862-865.

Steel, R.G.D. dan Torrie. J.H. (1993). *Prinsip dan Prosedur Statistika*. Diterjemahkan oleh Bambang Sumantri. PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Sun.D.W. (2006). *Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues* (edited). CRC Taylor and Francis Group, New York.

Suroso (2006). Pengembangan metode pengukuran difusivitas panas hasil pertanian dengan metode inversi. *Jurnal Keteknikan Pertanian* **20**(1): 65-73.

Suzuki, T. (1981). *Fish and Krill Protein*. Applied Science Publishing Ltd. New York.

Tastra, I.K., Ginting, E. dan Ratnaningsih (2006). Thermal diffusivity of sweetpotato flour measured using dickerson method. *Jurnal Keteknikan Pertanian* **20**(2): 149-156.