

**VALIDASI SIMULASI TEKANAN DAN SUHU AIR  
SERTA SUHU DAGING SAPI SELAMA PEMASAKAN DALAM PRESSURE COOKER**

**VALIDATION OF SIMULATION OF PRESSURE AND TEMPERATURE OF WATER AND BEEF FOR  
COOKING IN PRESSURE COOKER**

**Saparudin<sup>1)</sup>, Dyah Wulandani<sup>2)\*</sup>, dan Nanik Purwanti<sup>2</sup>**

<sup>1)</sup>Program Studi Master Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor  
E-mail: [saparudin3@yahoo.co.id](mailto:saparudin3@yahoo.co.id)

<sup>2)</sup>Program Studi Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor  
PO Box 220, Kampus Darmaga, Bogor, Jawa Barat 16002

Makalah: Diterima 1 Juli 2015; Diperbaiki 12 Februari 2016; Disetujui 26 Februari 2016

**ABSTRACT**

*Beef cooked with pressure cooker can produce soft texture in relatively short time. In previous study, polytetrafluoroethylene (PTFE) was used for developing a heat transfer model in pressure cooker. The aim of present study was to validate previously PTFE heat transfer model with actual beef. To get the simulation with an error rate as small as possible, the modification of the model as well as the assumptions adjusted in accordance with the characteristics of beef. Finite difference methods with Euler scheme was used to perform the computation. A commercial pressure cooker of 8 and 10 L in volume were used to validate the model. Cooking time was 60 minutes after releasing steam from pressure cooker outflow through the pressure valve. Meat used was knuckle section of ongole beef with the age of two to three years. The result showed that the developed model of steam pressure, water and beef temperatures could predict well the real phenomena during time process in the pressure cooker. The error of model was estimated with mean absolute percentage error methods. The error of model of gas pressure in the pressure cooker 10 and 8 L were 7.1% and 3.2%, respectively; water temperatures of 3.6% and 1.4%, respectively; and the meat mid point temperatures of 2.3% and 4.2%, respectively. Thus, the model could be used to estimate the cooking time and energy needed for cooking time and meat research purposes relating to cooking time and temperature.*

*Keywords: beef, pressure cooker, simulation, temperature*

**ABSTRAK**

Pemasakan dengan menggunakan *pressure cooker* dapat melunakkan/mengempukkan daging dengan waktu yang relatif singkat. PTFE (*Polytetrafluoroethylene*) telah digunakan sebagai bahan untuk mengembangkan model pindah panas pada *pressure cooker*. Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi model pindah panas yang digunakan pada PTFE dengan daging sapi. Untuk mendapatkan simulasi dengan tingkat kesalahan sekecil mungkin, maka dilakukan modifikasi pada model serta penyesuaian asumsi yang sesuai karakteristik daging sapi. Model diselesaikan dengan metode numerik beda hingga Euler. Volume *pressure cooker* yang digunakan adalah 10 L dan 8 L. Waktu pemasakan 60 menit setelah gas keluar dari *pressure cooker* melalui katup pengatur tekanan. Daging yang digunakan adalah *knuckle* sapi peranakan ongole dengan umur dua sampai tiga tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dapat menduga perubahan tekanan gas dan suhu yang terjadi selama pemasakan dalam *pressure cooker* dengan baik. Tingkat kesalahan model dihitung dengan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Tingkat kesalahan model untuk tekanan gas pada *pressure cooker* volume 10 L dan 8 L masing-masing 7,1% dan 3,2% , suhu air masing-masing 3,6% dan 1,4%, dan suhu titik tengah daging masing-masing sebesar 2,3% dan 4,2%. Sehingga model dapat digunakan untuk menghitung waktu pemasakan dan energi yang dibutuhkan selama pemasakan serta keperluan penelitian daging yang berkaitan dengan waktu dan suhu pemasakan.

Kata kunci : daging sapi, panci bertekanan, simulasi, suhu

**PENDAHULUAN**

Daging adalah semua jaringan hewan yang sesuai untuk dimakan serta tidak menimbulkan gangguan kesehatan bagi yang memakannya (Aberle *et al.*, 2001). Daging merupakan bahan pangan yang penting dalam memenuhi kebutuhan gizi manusia (Rosyidi *et al.*, 2009). Secara umum, komposisi daging terdiri atas air, lemak, protein, mineral dan

karbohidrat. Kandungan gizi yang lengkap dan keanekaragaman produk olahannya menjadikan daging sebagai bahan pangan yang hampir tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia (Prasetyo *et al.*, 2013). Biasanya daging selalu dimasak sebelum dimakan (Segovia *et al.*, 2007). Pemasakan merupakan proses termal dengan tujuan utama untuk meningkatkan cita rasa produk pangan. Proses pemasakan meliputi berbagai proses termal yang

umum dilakukan pada skala rumah tangga, seperti perebusan, pemanggangan, penggorengan, penyangraian, dan metode lain yang menggunakan panas. Pemasakan termasuk dalam metode pengawetan karena makanan yang matang umumnya dapat disimpan lama (Estiasih dan Ahmad, 2009). Pemasakan merupakan faktor penting yang dapat memperbaiki palatabilitas daging (Pearson dan Tauber, 1984). Penggunaan *pressure cooker* untuk memasak daging sudah meluas bukan saja di kalangan pengusaha tetapi sudah merambah ke masyarakat menengah ke bawah. Pemasakan dengan menggunakan *pressure cooker* dapat lebih cepat melunakkan/mengempukkan daging dengan waktu yang relatif singkat. Hal ini dikarenakan tekanan di dalam *pressure cooker* menghasilkan suhu yang tinggi (Pearson dan Tauber, 1984). Tapotubun *et al.* (2008) menyatakan bahwa suhu di dalam *pressure cooker* mencapai 120°C. Penggunaan *pressure cooker* dapat mengurangi waktu memasak dan menghemat energi (Flick *et al.*, 2007). Namun di sisi lain pemasakan dengan menggunakan *pressure cooker* dapat menyebabkan rusaknya tekstur daging. Kondjoyan *et al.* (2014) menyatakan bahwa metode pemasakan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kerusakan kualitas daging. Untuk mencegah rusaknya tekstur daging yang dimasak maka waktu pemasakan harus diperhatikan (Pearson dan Tauber, 1984). Suhu dan waktu memasak mempunyai pengaruh yang besar pada sifat fisik daging dan kualitas daging (Segovia *et al.*, 2007).

Polimeni *et al.* (2011) mengembangkan model pindah panas dan massa yang terjadi di dalam *pressure cooker*. Peristiwa yang terjadi di dalam *pressure cooker* sangat kompleks dikarenakan banyaknya peristiwa yang terjadi secara bersamaan seperti peristiwa konduksi, konveksi, penguapan, pendidihan, dan kondensasi. Peristiwa yang terjadi di dalam *pressure cooker* terdapat tiga periode. Periode pertama *pressure cooker* hanya berisi air, daging, dan udara dingin mulai dipanasi. Selama periode pertama, tekanan di dalam *pressure cooker* lebih kecil dari tekanan katup tekan sehingga tidak ada massa yang mengalir keluar. Periode kedua *pressure cooker* terjadi ketika tekanan gas di dalam *pressure cooker* melebihi kekuatan tekanan katup pengatur tekanan, maka katup pengatur tekanan akan terbuka. Pada periode kedua ini tekanan gas dipertahankan konstan. Periode ketiga terjadi pada saat kompor atau sumber panas dimatikan dan katup pengatur tekanan dibuka, sehingga gas (udara dan uap air) keluar melalui katup tekan (Polimeni *et al.*, 2011).

Model yang dikembangkan bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan *pressure cooker* agar dapat mempertahankan vitamin dalam produk dan meminimalkan energi yang digunakan. Akan tetapi, model ini menggunakan *Polytetrafluoroethylene* (PTFE) sebagai model produk sehingga kurang merepresentasikan produk yang sebenarnya. Oleh

karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi model yang dikembangkan oleh Polimeni *et al.* (2011) pada produk yang sebenarnya (daging sapi). Polimeni *et al.* (2011) dalam percobaannya menggunakan pemasakan metode uap (PTFE dipanaskan dengan uap/*blanching*). Sedangkan pada penelitian ini, daging diletakkan di dalam air, sehingga perlu dilakukan modifikasi pada persamaan (model) yang dikembangkan oleh Polimeni *et al.* (2011) untuk menghasilkan simulasi dengan tingkat kesalahan sekecil mungkin. Selain itu, dilakukan penyesuaian asumsi yang sesuai dengan karakteristik daging sapi. Manfaat dari simulasi adalah untuk menentukan material atau bahan *pressure cooker* dan menduga waktu yang dibutuhkan selama pemasakan, sehingga dapat diketahui kebutuhan energi yang digunakan selama pemasakan. Selain itu, untuk memudahkan penelitian tentang daging yang diberi perlakuan suhu dan waktu (karena ruang tertutup sehingga pemasangan *thermocouple/termometer* akan merusak *pressure cooker* dan cenderung terjadi kebocoran gas).

## BAHAN DAN METODE

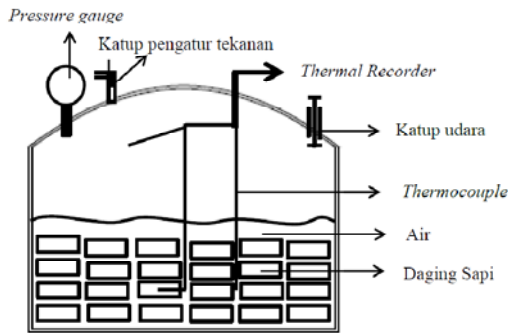
### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah daging bagian *knuckle* pada paha belakang sapi peranakan ongole (10 jam setelah sapi dipotong). Umur sapi 2 sampai 3 tahun yang berasal dari rumah potong hewan Kotamadya Bogor. Daging yang digunakan sebagai sampel dipotong searah serabut daging dengan ukuran 5 × 3, 5 × 1 cm. *Pressure cooker* yang digunakan adalah *pressure cooker* komersial volume 10 L dan 8 L yang terbuat dari bahan *stainless steel* dengan tekanan pembukaan katup pengatur tekanan 1,7×10<sup>5</sup> Pa (katup pengatur tekanan akan terbuka jika tekanan gas di atas 1,7×10<sup>5</sup> Pa). Diameter bawah *pressure cooker* volume 10 L dan 8 L masing-masing 22 dan 18 cm. Tebal dinding bawah dan dinding samping *pressure cooker* adalah 2 mm dan 1 mm. Alat pemanas yang digunakan adalah kompor listrik Mitseda HP-8080A dengan daya 1500 W. Selama pemasakan, tekanan gas diukur dengan menggunakan *pressure gauge* (Tekiro 2,5×10<sup>5</sup> Pa), suhu air, dan titik tengah (pusat) daging diukur dengan menggunakan *thermocouple* (tipe CC). Hasil ukur *thermocouple* direkam di *thermal recorder* (Yokogawa MV 1000) setiap detik.

### Percobaan

Daging sapi dimasak didalam *pressure cooker* dengan waktu pemasakan 60 menit (pada saat tekanan gas konstan). Air yang digunakan adalah air mineral yang tidak diberi tambahan bumbu. Jumlah air yang digunakan untuk memasak 1,5 L dengan berat sampel daging setiap satu kali masak 1 kg. *Thermocouple* diletakkan di titik tengah daging, air,

dan gas. Skema pengukuran suhu dan tekanan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema pengukuran suhu dan tekanan

Tekanan total adalah jumlah tekanan parsial dari semua unsur pokok pembentuk udara, nitrogen, oksigen, dan uap air. Persamaan tekanan total, Tekanan parsial udara, dan uap air berturut-turut dapat dituliskan dalam persamaan 1 - 6 (Polimeni *et al.*, 2011).

$$p = p_v + p_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_a = \frac{m_a \cdot R(T_g + 273)}{M_a \cdot V_g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p_v = \frac{m_v \cdot R(T_g + 273)}{M_v \cdot V_g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{(m_v \cdot Cp_v + m_a \cdot Cp_a)} \cdot (q_{l \rightarrow g} - q_{g \rightarrow w} + \dot{m}_{evap} \cdot Cp_v \cdot T_w + \dot{m}_{boil} \cdot Cp_v \cdot T_{sat} - \dot{m}_{cond \rightarrow w} \cdot cp_v \cdot T_g - (x_a \times Cp_a + x_v \times Cp_v) \cdot \dot{m}_{valve} \cdot T_g) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dm_a}{dt} = -\dot{m}_{valve} \cdot x_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{dm_v}{dt} = -\dot{m}_{valve} \cdot x_a - \dot{m}_{cond \rightarrow w} + \dot{m}_{boil} + \dot{m}_{evap} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$x_a = \frac{m_a}{m_a + m_v} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$x_v = 1 - x_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{m}_{valve} = (\dot{m}_{max} (1 - \exp(-\frac{p - p_{valve}}{\Delta p_{valve}}) \times 10^2)) \times 10 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{m}_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_g \cdot (p - p_{atm})}{K}} \cdot \pi \cdot r_{valve}^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Keseimbangan termal gas, keseimbangan massa udara, dan keseimbangan massa uap yang dikembangkan oleh Polimeni *et al.* (2011) termodifikasi dapat hitung dengan persamaan 4 - 6. Jumlah gas di dalam *pressure cooker* mengalami perubahan dikarenakan gas yang keluar selama periode kedua dan ketiga. Perubahan jumlah gas mempengaruhi fraksi massa udara dan uap. Perubahan fraksi massa udara dan uap selama pemasakan dapat hitung dengan Persamaan 7 dan 8.

**Persamaan Laju Gas yang Keluar Melalui Katup Pengatur Tekanan**

Selama proses pemasakan, gas (udara dan uap) keluar melalui katup pengatur tekanan. Gas yang keluar pada periode satu diasumsikan konstan, sedangkan laju massa gas yang keluar pada periode kedua dapat dituliskan pada persamaan 9 (Polimeni *et al.*, 2011) termodifikasi.

Laju massa yang keluar selama proses decompresi dapat dihitung dengan Persamaan 10 (Idel'cik, 1996). Perubahan densitas gas selama pemasakan terjadi karena gas keluar pada periode kedua dan ketiga. Perubahan densitas gas dapat dihitung dengan persamaan 11. Massa gas merupakan penjumlahan massa udara dan uap. Volume gas ( $V_g$ ) diasumsikan konstan.

**Persamaan Suhu Air**

Suhu air dihitung berdasarkan keseimbangan energi pada air yang dapat dituliskan persamaan 12 (Polimeni *et al.*, 2011) termodifikasi. persamaan keseimbangan air selama pemasakan di dalam *pressure cooker* dapat dituliskan pada persamaan 13 (Polimeni *et al.*, 2011) termodifikasi.

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} \dots\dots\dots (11)$$

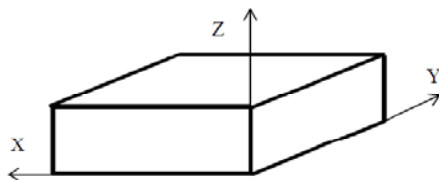
$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{1}{m_l \cdot Cp_l} \cdot (q_{b \rightarrow l} - q_{l \rightarrow g} - \dot{m}_{evap} \cdot Cp_v \cdot T_l - \dot{m}_{boil} \cdot Cp_v \cdot T_{sat} + \dot{m}_{cond \rightarrow w} \cdot (Cp_w \cdot T_w - \Delta \hat{H}_0)) \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = \dot{m}_{cond \rightarrow w} - \dot{m}_{boil} - \dot{m}_{evap} \dots\dots\dots (13)$$

**Persamaan Suhu Titik Tengah (Pusat) Daging**

Proses transfer panas pada daging yang sedang direbus terjadi dalam dua cara yaitu transfer panas dari air ke permukaan daging secara konveksi dan transfer panas dalam daging secara konduksi. Kecepatan transfer panas dari air ke daging dipengaruhi oleh temperatur air, konduktivitas termal (k), panas spesifik (Cp), bentuk dimensi, dan ukuran bahan. Model transfer panas pada daging diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut (Supriyanto *et al.*, 2006):

1. Daging yang dimasak berbentuk slab, dengan tebal daging lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar daging, sehingga transfer panas hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu z yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema transfer arah panas pada daging

2. Transfer panas dalam daging terjadi secara konduksi dari permukaan kedalam daging, transfer panas konveksi dari media ke permukaan daging dianggap konstan.
3. Suhu air di dalam *pressure cooker* dianggap seragam.
4. Pemekaran daging diabaikan sehingga perubahan tebal/dimensi daging dapat diabaikan.
5. Energi panas yang terkandung dalam air lebih besar dibandingkan dengan energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu daging yang direbus.
6. Perpindahan lemak dan protein terlarut kedalam air diabaikan (Ahmad *et al.*, 2015).

Simulasi temperatur titik tengah (pusat) daging menggunakan persamaan umum Fourier satu dimensi (Polimeni *et al.*, 2011) yang dapat dituliskan dalam persamaan 14.

$$\rho_f \cdot Cp_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{1}{z^n} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot z^n \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (14)$$

n = Koefisien bentuk produk (lempeng tak hingga = 0).

Kondisi awal (*Initial conditions/IC*):

$$T_f(z,0) = T_f$$

$$U(z,0) = T_f - T_l$$

Kondisi batas (*Boundary conditions/BC*):

$$U(0,t) = 0$$

$$U(X,t) = 0$$

Dimana  $U = T_f - T_l$

Solusi khusus persamaan 15 dapat dituliskan dalam persamaan:

$$T_{f+1} = \frac{2}{L} (T_f - T_l) \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \alpha t} \cdot \frac{1}{\lambda_n} (1 - (1)^n) \cdot \sin \lambda_n z + T_l \dots (15)$$

Selama proses pemasakan pada periode pertama, temperatur air dan daging mengalami kenaikan dan pada periode kedua temperatur air dan daging menjadi konstan. Sedangkan pada periode ketiga terjadi penurunan. Dengan demikian nilai temperatur air ( $T_l$ ) dan daging ( $T_f$ ) pada persamaan 9 berubah-ubah terhadap waktu.

**Pindah Panas Konveksi Pada Dinding *Pressure Cooker***

Pindah panas konveksi pada *pressure cooker* terjadi antara permukaan plat pemanas dan dinding bawah/dasar *pressure cooker* ( $h_{hp \rightarrow b}$ ), dinding bawah *pressure cooker* dan air ( $h_{b \rightarrow l}$ ), permukaan air dan gas ( $h_{l \rightarrow g}$ ), dinding dan gas ( $h_{g \rightarrow w}$ ), dan dinding *pressure cooker* dan udara lingkungan ( $h_{w \rightarrow amb}$ ). Pindah panas konveksi dari bagian A ke B dihitung dengan persamaan umum  $q_{A \rightarrow B} = S \cdot h_{A \rightarrow B} (T_B - T_A)$  dengan nilai koefisien ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai koefisien pindah panas konveksi

Koefisien	Nilai
$h_{hp \rightarrow b}$	360
$h_{b \rightarrow l}$	1500
$h_{l \rightarrow g}$	6
$h_{g \rightarrow w}$	4
$h_{w \rightarrow amb}$	12

Sumber: Polimeni *et al.* (2011)

**Persamaan Suhu Plat Pemanas dan Dinding *Pressure Cooker***

Persamaan suhu plat pemanas berdasarkan pada keseimbangan energi yang dapat dituliskan dalam persamaan 16.

$$\frac{dT_{hp}}{dt} = \frac{q_{heating} - q_{hp \rightarrow amb} - q_{hp \rightarrow b}}{m_{hp} \cdot C_{p_{hp}}} \dots\dots\dots (16)$$

Pada saat periode ketiga (*decompression*), daya listrik yang masuk ke plat pemanas diasumsikan nol. Suhu pada dinding bagian luar dan bagian dalam pada *pressure cooker* diasumsikan sama, sehingga persamaan keseimbangan energi pada dinding bagian bawah (horizontal) dan dinding (vertikal) pada *pressure cooker* dapat dituliskan pada persamaan 17 dan 18.

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{q_{hp \rightarrow b} - q_{b \rightarrow l}}{S_b \cdot th_b \cdot \rho_b \cdot C_{p_b}} \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{q_{g \rightarrow w} - q_{w \rightarrow amb} + \Delta q_{cond \rightarrow w}}{S_w \cdot th_w \cdot \rho_w \cdot C_{p_w}} \dots\dots\dots (18)$$

**Pendidihan dan Penguapan**

Pendidihan atau mendidih dapat terjadi jika suhu permukaan dinding bawah/dasar *pressure cooker* lebih tinggi dari pada suhu saturasi. Menguap adalah peristiwa yang terkait dengan perubahan wujud, biasanya zat cair ke wujud gas. Sebelum air menjadi uap air seluruhnya, air harus melewati peristiwa yang disebut mendidih (*boiling*). Persamaan laju massa pendidihan dapat dihitung dengan persamaan 19 (Polimeni *et al.*, 2011).

$$\dot{m}_{boil} = \gamma \cdot (T_w - T_{vsat}(p)) \dots\dots\dots (19)$$

Proses mendidih dapat terjadi ketika suhu dinding bawah *pressure cooker* (bagian dalam) lebih tinggi dari suhu saturasi.

Laju penguapan merupakan perbedaan konsentrasi uap air pada saat saturasi dan pada saat fase gas. Laju massa penguapan, densitas uap saturasi, densitas uap, dan koefisien pindah massa secara berturut-turut dihitung dengan menggunakan persamaan 20 - 23 (Polimeni *et al.*, 2011).

$$\dot{m}_{evap} = S_b \cdot k \cdot (\rho_{vsat} - \rho_v) \dots\dots\dots (20)$$

$$\rho_{vsat} = \exp\left(23,3265 - \frac{38027}{T_i + 273} - \frac{(223426)^2}{(T_i + 273)^2}\right) \cdot \frac{M_v}{R \cdot (T_i + 273)} \dots\dots (21)$$

$$T_{dew} = \frac{1}{\sqrt{7,242 \times 10^{-5} + 4,476 \times 10^{-6} \cdot [23,3265 - \ln(p_v)]} - 8,51 \times 10^{-3} - 273} \dots\dots\dots (28)$$

$$T_{sat} = \frac{1}{\sqrt{7,242 \times 10^{-5} + 4,476 \times 10^{-6} \cdot [23,3265 - \ln(p)]} - 8,51 \times 10^{-3} - 273} \dots\dots\dots (29)$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - F_i|}{X_i} \times 100\% \dots\dots\dots (30)$$

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_g} \dots\dots\dots (22)$$

$$k = h_{l \rightarrow g} \cdot \frac{Dm}{\lambda_a} \dots\dots\dots (23)$$

**Kondensasi pada Dinding Pressure Cooker**

Kondensasi merupakan kebalikan dari pendidihan. Kondensasi terjadi ketika uap jenuh bersentuhan dengan permukaan yang berada pada suhu yang lebih rendah. Nelwan *et al.* (2008) menyatakan bahwa kondensasi terjadi pada saat udara dan uap mengalami kelembapan yang cukup tinggi. Minkowycz dan Sparrow (1966) memprediksi koefisien kondensasi dengan persamaan 24.

$$h_{cond} = K_{udara} \cdot SC \cdot \left( \frac{k_i^3 \cdot \rho_i (\rho_i - \rho_g) \cdot g \cdot \Delta \hat{H}_v}{\mu_i (T_{vsat} - T_{surf}) \cdot l} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots (24)$$

Persamaan koefisien koreksi udara, laju massa kondensasi, dan laju pindah panas kondensasi dapat ditulis dalam persamaan 25, 26, dan 27 (Polimeni *et al.*, 2011).

$$K_{udara} = \frac{1}{2} \cdot (\exp(-47,7294 \cdot x_u^{0,6246}) + \exp(-2,8235 \cdot x_u^{0,3533})) \dots (25)$$

$$\dot{m}_{cond} = \frac{S \cdot h_{cond} (T_{dew} - T_{surf})}{\Delta \hat{H}_v} \dots\dots\dots (26)$$

$$\dot{m}_{cond} = \frac{S \cdot h_{cond} (T_{dew} - T_{surf})}{\Delta \hat{H}_v} \dots\dots\dots (27)$$

Persamaan suhu titik embun dan suhu jenuh dapat dituliskan dalam Persamaan 28 dan 29 (Nadeau dan Puiggali, 1995). Persamaan 4, 5, 6, 12, 13, 16, 17, dan 18 diselesaikan dengan metode numerik beda hingga Euler, dengan menggunakan program *microsoft Excel* 2010. Nilai parameter yang digunakan untuk simulasi disajikan pada Tabel 2.

**Validasi Model**

Validasi tekanan gas, suhu air, dan suhu titik tengah daging selama pemasakan dalam *pressure cooker* dihitung dengan menggunakan metode MAPE (mean absolute percentage error) yang dapat ditulis dalam persamaan 30.

Tabel 2. Nilai parameter yang digunakan pada simulasi

Parameter	Nilai	Sumber
Koefisien penurunan tekanan ( $K$ )	10	Polimeni <i>et al.</i> (2011)
Perbedaan tekanan pada katup pengatur tekanan ( $\Delta p_{valve}$ )	$6,3 \times 10^3$ Pa	Polimeni <i>et al.</i> (2011)
Faktor proporsional laju pendidihan ( $\gamma$ )	2	Polimeni <i>et al.</i> (2011)
Koefisien bentuk ( $SC$ )	0,85	Polimeni <i>et al.</i> (2011)
Difusivitas panas daging sapi suhu awal terjadi kondensasi	$1,33 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	
Jumlah air total (1,5 l + 75% berat sampel)	50°C 2,25 l	
Suhu awal air	27°C	
Suhu awal titik tengah daging	27°C	
Tekanan awal didalam <i>pressure cooker</i>	$10^5$ Pa	

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengukuran dan Simulasi Tekanan Gas

Hasil pengukuran dan perhitungan simulasi tekanan ditunjukkan pada Gambar 3. Secara umum kurva hasil simulasi gas dapat mengikuti kurva hasil pengukuran baik *pressure cooker* volume 10 L (Gambar 3a) dan 8 L (Gambar 3b). Pada periode pertama tekanan simulasi lebih cepat naik dibandingkan dengan hasil ukur. Hal ini dikarenakan selama periode pertama tidak ada gas (udara/uap) yang keluar.

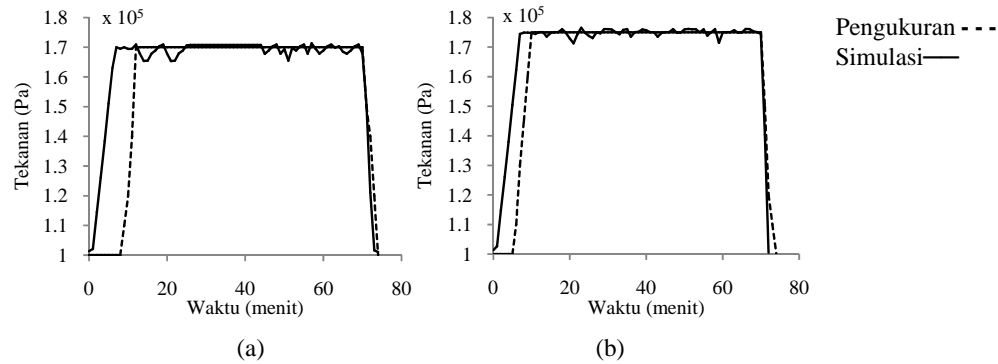
Hasil pengukuran pada 8 menit pertama untuk *pressure cooker* volume 10 L dan 5 menit pertama pada volume 8 L, perubahan tekanan yang terjadi sangat kecil (horizontal). Hal ini dikarenakan panas dari plat pemanas/kompur listrik masih digunakan untuk memberi panas pada dinding bawah *pressure cooker* dan memanasi air yang masih bersuhu rendah. Selain itu katup udara masih terbuka sehingga uap yang dihasilkan dan udara yang ada dalam *pressure cooker* mengalir keluar. Ketika uap yang dihasilkan terus bertambah, maka tekanan gas akan mendorong katup udara untuk menutup. Dengan menutupnya saluran udara, maka tekanan naik dengan cepat. Hal ini dikarenakan suhu air yang terus meningkat, sehingga menghasilkan uap yang lebih banyak. Pada saat tekanan gas di dalam *pressure cooker* melebihi tekanan katup pengatur tekanan, maka katup pengatur tekanan akan terbuka dan gas akan keluar (awal periode dua atau akhir periode pertama). Ketika gas keluar dan tekanan gas di dalam *pressure cooker* turun di bawah tekanan katup pengatur tekanan, maka katup pengatur tekanan menutup kembali. Proses ini terus berlangsung sampai plat pemanas dimatikan, sehingga pada periode dua tekanan gas di dalam *pressure cooker* menjadi konstan. Pada periode ketiga, tekanan gas turun dengan cepat. Hal ini dikarenakan plat pemanas/kompur listrik dimatikan dan katup pengatur tekanan dibuka, sehingga gas keluar dengan cepat.

Untuk *pressure cooker* volume 10 L katup pengatur tekanan hasil simulasi mulai terbuka pada

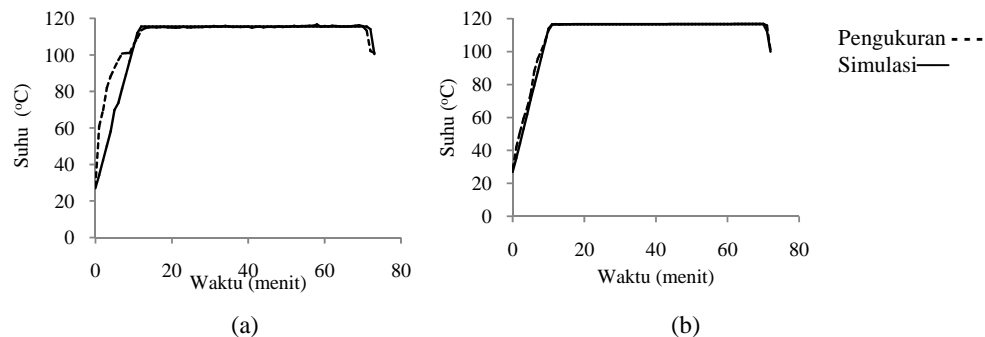
waktu ke 7,5 menit dengan tekanan  $1,7 \times 10^5$  Pa atau lebih awal 5,5 menit dari hasil pengukuran. Sedangkan *pressure cooker* volume 8 L, katup pengatur tekanan hasil simulasi mulai terbuka pada waktu ke 6,5 menit dengan tekanan  $1,75 \times 10^5$  Pa atau lebih awal 4 menit dari hasil pengukuran. Perbedaan ini disebabkan pada periode pertama diasumsikan tidak ada gas yang keluar. Setelah katup pengatur tekanan terbuka, tekanan berfluktuasi dari  $1,65 \times 10^5$  -  $1,72 \times 10^5$  Pa volume 10 L dan  $1,7 \times 10^5$  -  $1,76 \times 10^5$  Pa untuk volume 8 L. Berfluktuasinya tekanan gas dikarenakan kurang sesuainya nilai asumsi koefisien penurunan tekanan ( $K$ ) dan  $\Delta p_{valve}$ . Tingkat kesalahan (MAPE) model untuk *pressure cooker* volume 10 L 17,1% dan 3,2% untuk volume 8 L. Tekanan yang dihasilkan *pressure cooker* volume 8 L pada hasil pengukuran lebih tinggi  $0,05 \times 10^5$  Pa dari *pressure cooker* volume 10 L. Hal ini disebabkan ruang gas yang ditempati pada volume 8 L lebih kecil sehingga menyebabkan densitas gas lebih tinggi dibandingkan pada *pressure cooker* volume 10 L. Dengan tekanan pembukaan katup pengatur tekanan yang sama ( $1,7 \times 10^5$  Pa) akan menghasilkan tekanan gas di dalam *pressure cooker* yang berbeda. Oleh karena itu model yang dikembangkan dapat digunakan untuk menduga tekanan maksimum selama pemasakan, sehingga model atau persamaan dapat digunakan dalam desain *pressure cooker*. Dengan dapat diduga tekanan gas maksimum, maka penentuan bahan atau material *pressure cooker* dapat ditentukan dengan baik atau tekanan katup pengatur tekanan dapat disesuaikan dengan material *pressure cooker*.

### Hasil Pengukuran dan Simulasi Suhu Air

Perubahan suhu air hasil simulasi dan hasil pengukuran disajikan pada Gambar 4. Hasil pengukuran suhu air pada *pressure cooker* volume 8 L pada periode pertama lebih cepat dibandingkan volume 10 L. Hal ini dikarenakan jumlah uap yang dibutuhkan *pressure cooker* volume 10 L untuk mencapai tekanan dan suhu maksimum lebih banyak dari pada volume 8 L.



Gambar 3. Perubahan hasil pengukuran dan simulasi tekanan gas terhadap waktu untuk 10 L (a) dan 8 L (b)



Gambar 4. Perubahan hasil pengukuran dan simulasi suhuair terhadap waktu untuk 10 L (a) dan 8 L (b)

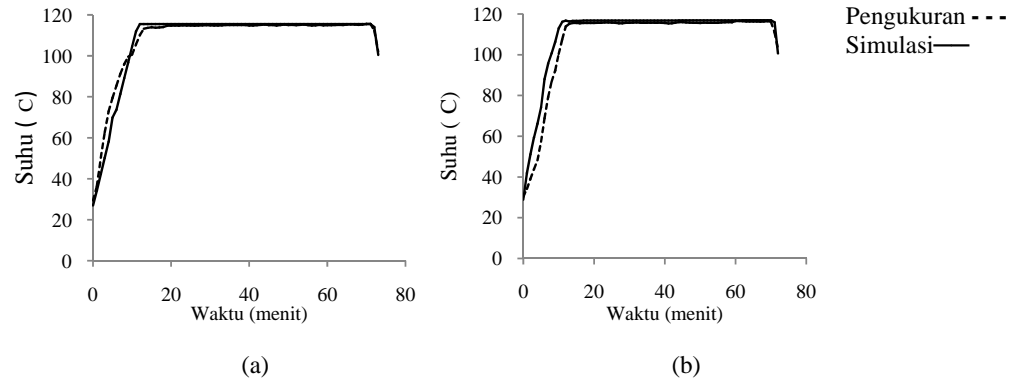
Hasil pengukuran suhu air dari 7-9 menit pertama pada volume 10 L, suhu air terlihat konstan dengan suhu 100°C (Gambar 4a). Hal ini terjadi karena tekanan gas di dalam *pressure cooker* belum mampu menekan katup udara, sehingga katup udara masih terbuka yang menyebabkan gas (udara dan uap) mengalir keluar. Setelah katup udara tertutup suhu air naik dengan cepat. Suhu dan tekanan merupakan properti yang saling terikat pada proses perubahan fase. Sebagai akibatnya, suhu didih akan tergantung pada tekanan. Semakin tinggi tekanan, maka suhu didih akan menjadi semakin tinggi.

Untuk *pressure cooker* volume 10 L, tekanan gas mencapai  $1,7 \times 10^5$  Pa dengan suhu air maksimum (titik didih) mencapai 115°C, sedangkan pada *pressure cooker* volume 8 L tekanan gas mencapai  $1,75 \times 10^5$  Pa dengan suhu air maksimum (titik didih) 116°C. Jika panas terus ditambahkan, maka uap yang terbentuk semakin banyak, namun suhu air tidak berubah. Hal ini disebabkan energi kalor yang diberikan saat pemanasan digunakan untuk mengubah struktur molekul air atau digunakan untuk merubah fase cair menjadi fase uap (*latent heat of vaporization*). Dengan tekanan pada periode dua dipertahankan konstan, maka suhu air akan menjadi konstan. Gambar 4b menunjukkan hasil simulasi dapat mengikuti perubahan hasil pengukuran suhu air, sedangkan pada *pressure cooker* volume 10 L, suhu air hasil simulasi pada periode pertama (0-8 menit) lebih rendah dari pada hasil pengukuran. Hal ini disebabkan oleh nilai parameter-parameter penguapan yang kurang tepat.

Adapun tingkat kesalahan model berdasarkan perhitungan dengan metode MAPE adalah 3,6% untuk *pressure cooker* volume 10 L dan 1,4% untuk *pressure cooker* volume 8 L. Dengan demikian, model dapat digunakan untuk menduga waktu yang dibutuhkan dalam proses pemasakan, sehingga dapat diketahui kebutuhan energi yang digunakan selama pemasakan.

#### Hasil Pengukuran dan Simulasi Suhu Titik Tengah (Pusat) Daging

Proses transfer panas dari air ke daging menyebabkan suhu titik tengah daging naik (Gambar 5), mula-mula suhu titik tengah daging sama dengan suhu air (27,9°C). Ketika *pressure cooker* mulai dipanasi, maka suhu air naik lebih cepat dari pada suhu titik tengah daging dan pada akhirnya suhu titik daging sama dengan suhu air. Secara umum, hasil simulasi perubahan suhu titik tengah daging dapat mengikuti perubahan suhu hasil pengukuran (Gambar 5) dengan tingkat kesalahan/error (MAPE) sebesar 2,3% untuk *pressure cooker* volume 10 L dan 4,2% untuk volume 8 L. Dengan demikian, model dapat menduga perubahan suhu, sehingga dapat digunakan pada penelitian tentang daging yang diberi perlakuan suhu dan waktu tanpa memasang *thermocouple* /termometer pada daging. Pemasangan *thermocouple*/termometer akan merusak (melubangi) *pressure cooker* dan cenderung terjadi kebocoran gas.



Gambar 5. Perubahan hasil pengukuran dan simulasi suhu titik tengah daging terhadap waktu untuk 10 L (a) dan 8 L (b)

Suhu dan lama pemasakan mempunyai efek yang sangat signifikan terhadap sifat-sifat fisik dan kualitas daging. Peningkatan suhu dapat meningkatkan denaturasi protein-potein miofibril, sehingga menyebabkan terjadinya perubahan sifat-sifat protein tersebut, termasuk kemampuannya mengikat air (Jamhari *et al.*, 2007). Segovia *et al.* (2007) menyatakan bahwa meningkatnya suhu menyebabkan jumlah air yang diikat menurun sehingga jumlah cairan daging yang keluar selama pemasakan menjadi lebih besar. Pearson dan Tauber (1984) menyatakan bahwa daging sapi yang dimasak di *pressure cooker* mengalami susut masak lebih tinggi dibandingkan metode pemasakan lainnya. Susut masak adalah selisih antara berat sebelum dimasak dan setelah dimasak (Suryati *et al.*, 2008). Terjadinya penurunan kemampuan mengikat air tersebut menyebabkan jumlah cairan daging yang keluar selama pemasakan semakin besar, sehingga kehilangan massa daging selama pemasakan menjadi semakin besar. Hal yang sama juga terjadi pada peningkatan lama pemasakan. Daging yang dimasak dengan lama pemasakan yang lebih panjang juga menyebabkan peningkatan jumlah protein daging yang terdenaturasi, sehingga kemampuan mengikat airnya juga akan menurun, yang menyebabkan meningkatnya susut berat selama pemasakan. Hal ini sesuai dengan pendapat Soeparno (2009) yang menyatakan bahwa kehilangan berat akibat proses pemasakan merupakan fungsi dari suhu dan lama pemasakan. Peningkatan susut masak daging selama pemasakan juga dapat disebabkan oleh perubahan struktur jaringan dan perubahan kimia protein-protein daging, terutama protein miofibrilar dan protein sarkoplasmik. Lama pemasakan akan mempengaruhi panjang sarkomer otot. Dengan meningkatnya lama pemasakan maka pembebasan cairan daging akan menjadi lebih besar sampai pengkerutan protein-protein miofibrilar dan solubilitas kolagen sudah mencapai maksimal. Pemendekan protein-protein miofibrilar akan memaksa cairan daging dibebaskan selama pemasakan (Bouton *et al.*, 1976). Vasanthi *et*

*al.* (2006) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu dan lama pemasakan daging menyebabkan kolagen lebih banyak yang larut. Pengaruh pemasakan terhadap kemampuan melibatkan perubahan protein daging, yang terdiri dari protein miofibrilar, protein sarkoplasmik dan protein jaringan ikat, terutama kolagen (Bouton *et al.*, 1976).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Secara umum model yang dikembangkan oleh Polimeni *et al.* (2011) yang dimodifikasi dan penyesuaian asumsi yang sesuai dengan karakteristik daging sapi dapat menduga perubahan tekanan gas serta suhu air dan daging selama pemasakan dalam *pressure cooker* dengan baik.

### Saran

Perlunya penelitian lanjut tentang kualitas daging yang dimasak di dalam *pressure cooker*, sehingga dapat diketahui dampak tekanan dan suhu yang tinggi terhadap kualitas daging yang dihasilkan. Dengan demikian dapat menjadi pertimbangan pihak desain *pressure cooker* dalam mengembangkan *pressure cooker* yang mampu menjaga vitamin dan nutrisi dalam produk.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada DIKTI yang telah memberikan Bantuan Biaya Pendidikan Dalam Negeri (BPDN) kepada penulis.

## DAFTAR SIMBOL

$C_p$	panas spesifik ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )
$D_m$	difusivitas massa ( $m^2\ s^{-1}$ )
$F_t$	data simulasi ke-t
$f$	fungsi
$h$	koefisien pidah panas konveksi ( $ms^{-1}$ )
$K$	konstanta penurunan tekanan
$k$	koefisien pindah massa ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ )



$K_{udara}$	faktor koreksi udara
$L$	tebal daging (m)
$l$	panjang
$M$	massa molar (kg mol <sup>-1</sup> )
$m$	massa (kg)
$N$	jumlah data
$p$	tekanan (Pa)
$q$	pindah panas (W)
$q_{A \rightarrow B}$	pindah panas konveksi dari A ke B
$R$	konstanta gas (8,31 J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )
$r$	jari-jari (m)
$S$	luas permukaan (m <sup>2</sup> )
$SC$	koefisien bentuk
$T$	suhu (°C)
$t$	waktu (s)
$th$	tebal <i>pressure cooker</i> (m)
$U$	selisih antara suhu daging dan suhu air (°C)
$V$	volume (m <sup>3</sup> )
$X_t$	data aktual periode t
$x$	fraksi massa (kg kg <sup>-1</sup> )
$z$	Jarak dari permukaan daging ke titik tengah daging (m)
$\hat{H}$	<i>specific enthalpy</i> (J kg <sup>-1</sup> )
$\square$	laju massa (kg s <sup>-1</sup> )
$\Delta \hat{H}_v$	panas laten penguapan pada $T_{sat}(p_{valve})$ (J kg <sup>-1</sup> )
$\Delta \hat{H}_0$	panas laten penguapan pada $T_{ref}$ (J kg <sup>-1</sup> )
$\rho$	densitas (kg m <sup>-3</sup> )
$\alpha$	difusivitas (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$\lambda$	konduktivitas termal (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\mu$	viskositas dinamik (Pa s)
$\gamma$	faktor proporsional

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aberle ED, Forrest JH, Gerrard DE, Mills EW. 2001. *Principles of Meat Science*. USA: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Ahmad S, Khan MA, dan Kamil M. 2015. Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT - Food Sci and Technol*. 60:678-683.
- Bouton PE, Harris, dan Shorthose WR. 1976. Factors influencing cooking losses from meat. *J Food Sci*.40:1122-1126.
- Estiasih T dan Ahmad K. 2009. *Teknologi Pengolahan Pangan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Flick D, Richard R, Christophe D, Jean V. 2007. Modeling Heat Transfer and Fluid Flow Inside a Pressur Cooker. 17<sup>th</sup> Euro Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE17 V.
- Huelsz G, Barrios G, dan Rojas J. 2014. Differences on results from steady-state and time-dependent wall/roof heat transfer models in mexican climates. *Energy Procedia*. 57:1825-1833.
- Idel'cik IE. 1996. *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3<sup>th</sup> ed. Redding: Begell House Inc.
- Jamhari, Suryanto E, dan Rusman. 2007. Pengaruh temperatur dan lama pemasakan terhadap keempukan dan kandungan kolagen daging sapi. *Bul Peternakan*.31 (2): 94-100.
- Kondjoyan A, Kohler A, Realini CE, Portanguen S, Kowalski R, Clerjon S, Gatellier P, Chevolleau S, Bonny JM, Debrauwer L. 2014. Towards models for the prediction of beef meat quality during cooking. *Meat Sci*. 97: 323-331.
- Tapotubun AM, Nanlohy, dan Louhenapessy JM. 2008. Efek waktu pemanasan terhadap mutu presto beberapa jenis ikan. *Ichthyos*. 7:65-70.
- Minkowycz WJ dan Sparrow EM. 1966. Condensation heat transfer in the presence of noncondensables, interfacial resistance, superheating, variable properties, and diffusion. *Int J Heat Mass Tran*. 9:1125-1144.
- Nadeau JP dan Puiggali JR. 1995. *Sechage Des Processus Physiques Aux Procedes Industriels*. Paris: Lavoisier.
- Nelwan LO, Suastawa IN, dan Sulikah. 2008. Pemodelan dan simulasi pengeringan jagung pipilan dalam pengeringan rotari tumpukan. *JTEP*. 22 (2): 93-98.
- Pearson AM dan Tauber. 1984. *Processed Meats*. Connecticut: AVI Publishing Company.
- Polimeni RR, Flick D, dan Jean V. 2011. A model heat and transfer inside a pressure cooker. *J Food Eng*. 107: 393-404.
- Prasetyo H, Padaga MC, dan Sawitri. 2013. Kajian kualitas fisiko kimia daging sapi di pasar kota malang. *JITEK*.8 (2):1-8.
- Rosyidi D, Lilik ERLE, dan Uyun N. 2009. Kualitas kimia daging kambing peranakan etawah (pe) jantan dan kambing peranakan boer (pb) kastrasi. *JITEK*. 4 (2): 9-16.
- Segovia G, Bello AA, dan Monzo JM. 2007. Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (*M pectoralis*). *J Food Eng*. 80:813-821.
- Supriyanto, Rahardjo B, Marsono Y, Supranto. 2006. Pemodelan matematik transfer panas dan massa pada proses penggorengan bahan makanan berpati. *JTIP*.17 (1): 28-37.
- Suryati T, Arief II, dan Polii BN. 2008. Korelasi dan kategori keempukan daging berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat dan panelis. *Anim Prod*.10 (3):188-193.
- Soeparno. 2009. *Ilmu dan Teknologi Daging*. Yogyakarta: Gadjah Mada Press.
- Vasanthi C, Venkataramanujam V, dan Dushyanthan K. 2007. Effect of cooking temperature and time on the physico-chemical, histological and sensory properties of female carabeef (buffalo) meat. *J Food Eng*. 76: 274-280.