

Pemodelan Satu-Dimensi Perambatan Panas Bahan Butiran dalam Proses Sangrai

Nuraina Fika Lubis^{1,a)}, Rafika Sari^{2,b)} dan Sparisoma Viridi^{3,c)}

¹Program Studi Magister Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Departemen Informatika,
Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jaya,
Jl. Raya Perjuangan no. 81 Bekasi, Indonesia, 17143

³Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{b)}nurainafikalubis@gmail.com

^{c)}rafikasari2909@gmail.com

^{a)}dudung@gmail.com (corresponding author)

Abstrak

Memasak beberapa jenis makanan yang berbentuk bahan butiran dengan menggunakan proses sangrai yang umumnya memanfaatkan pasir yang dipanaskan, yang juga merupakan bahan butiran, menarik untuk dipelajari mengingat terdapat dua mekanisme perambatan panas dari wajan ke obyek makanan. Mekanisme pertama adalah melalui konduksi dengan kontak langsung antara wajan dengan butiran pasir yang dilanjutkan dengan beberapa butiran pasir sampai ke obyek. Dan yang kedua adalah melalui radiasi antara wajan ke butiran pasir dan butiran pasir ke obyek melalui ruang kosong di antara butiran. Mekanisme pertama diakomodasi oleh Hukum Fourier, sementara yang kedua oleh Hukum Stefan-Boltzmann. Untuk penyederhanaan dibahas sistem dalam satu dimensi dengan ukuran butiran yang sama akan tetapi obyeknya dapat memiliki ukuran yang berbeda. Susunan dinding wajan, butiran pasir, ruang kosong, dan obyek makanan dapat diacak sehingga dapat tercipta berbagai konfigurasi. Dibahas bagaimana proses perambatan panas dapat terjadi di dalam perse sangrai dan juga radiasinya ke ruang sekitarnya pada bagian atas permukaan pasir. Perambatan panas akibat konveksi sementara diabaikan.

Kata-kata kunci: bahan butiran, sangrai, perambatan panas, simulasi, konfigurasi susunan

PENDAHULUAN

Memasak dengan pasir merupakan salah satu metode memasak yang dikenal dengan sangrai. Sangrai telah lama dikenal di Indonesia. Bahan makanan yang dimasak secara sangrai biasanya adalah kacang tanah. Kacang tanah yang disangrai menghasilkan aroma yang lebih harum dan rasa yang lebih nikmat daripada dimasak dengan cara digoreng. Selain itu, kacang tanah menjadi lebih gurih dan tahan lama membuat memasak secara sangrai semakin populer.

Di India, jelai (jawawut) dimasak dengan cara disangrai dan disebut dengan sattu. Jelai disangrai dengan pasir panas bersuhu 250-300° C dalam waktu singkat sampai butirannya mengembang terpisah dari kulit

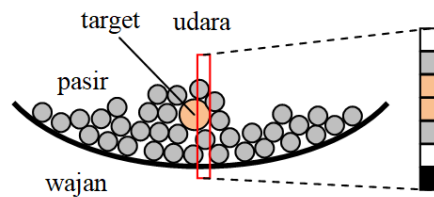
jelai[1]. Proses sangrai jelai ini sama dengan proses membuat berondong jagung. Satu menghasilkan rasa dan aroma jelai yang berbeda dengan jelai yang dimasak menggunakan metode memasak lainnya.

Pasir merupakan bahan butiran (granular material), yakni bahan yang tersusun atas partikel-partikel yang lebih kecil[2]. Sifat mekanik dan termal partikel-partikel tersebut ditentukan oleh interaksi antar partikelnya dan sifat termalnya. Pasir menjadi media tambahan yang cocok untuk sangrai karena dapat mendistribusikan suhu secara merata sehingga objek sangrai tidak hangus. Perambatan panas yang diteliti hanya konduksi dan radiasi yang terjadi pada pasir dan objek sangrai.

TEORI

Proses Sangrai

Pada penelitian ini, bahan-bahan sangrai adalah pasir dan objek sangrai yang berupa kacang tanah. Sangrai dilakukan di dalam wajan yang terbuat dari *stainless steel*. Posisi pasir berada di dasar wajan, sementara posisi kacang tanah berada di atas pasir dan memungkinkan tertutupi pasir. Terdapat celah kosong di antara pasir yang terbentuk akibat pengadukan bahan-bahan sangrai. Sumber panas dihasilkan dari kompor listrik yang diletakkan di bawah wajan. Deskripsi komposisi bahan sangrai ini diperjelas pada Gambar 1.



Gambar 1. Susunan komposisi bahan pada proses sangrai.

Kompor listrik dengan resistansi kumparan pemanas R yang diberi tegangan V akan menghasilkan daya P_{coil} dirumuskan pada persamaan (1) berikut

$$P_{coil} = \frac{V_{in}^2}{R_{coil}} \quad (1)$$

Wajan yang digunakan pada proses sangrai bermassa m_{wok} dengan kalor jenis c_{wok} , awalnya memiliki temperatur wajan awal $T_{wok}(t)$. Dalam selang waktu Δt , temperatur pada wajan menjadi

$$T_{wok}(t + \Delta t) = T_{wok}(t) + \frac{P_{coil}\Delta t}{m_{wok}c_{wok}} \quad (2)$$

Persamaan (2) dengan menyamakan daya yang diberikan oleh arus listrik dengan yang digunakan untuk memanaskan kawat.

Hukum Fourier

Hukum Fourier merupakan hukum untuk menyatakan adanya peristiwa konduksi. Konduksi merupakan peristiwa penyebaran panas yang hanya terjadi pada partikel-partikel suatu materi. Secara umum, konduksi terjadi pada medium padat. Walaupun gradien suhu berlaku pada medium padat, panas akan mengalir dari area bersuhu tinggi menuju area bersuhu rendah[3]. Pada proses sangrai, panas berpindah dari wajan menuju pasir, lalu panas pada pasir berpindah menuju objek sangrai sampai pasir di atasnya.

Rumusan Hukum Fourier pada proses sangrai diawali dengan pernyataan setiap simbol dengan variabel-variabel yang terlibat dalam proses tersebut. Padatan seperti pasir atau objek sangrai, luas penampangnya dinyatakan dengan A , panjang L , dan konduktivitas termalnya κ . Panas yang dihantarkan pada setiap satuan waktu Δt dirumuskan pada persamaan (3) berikut

$$Q = \Delta t A \kappa \left(\frac{T_H - T_L}{L} \right), \tag{3}$$

dengan T_H dan T_L merupakan suhu kedua ujung permukaan padatan. Ujung yang lebih panas bersuhu T_H dan ujung yang lebih dingin bersuhu T_L .

Hukum Stefan-Boltzmann

Hukum Stefan-Boltzmann menyatakan proses terjadinya radiasi yang terjadi di alam semesta. Radiasi merupakan suatu peristiwa perambatan panas tanpa zat perantara dan terjadi di ruang vakum. Panas dari medan radiasi dipancarkan dengan gelombang elektromagnetik (alternatifnya berupa foton)[4]. Radiasi terjadi pada proses sangrai ketika panas merambat di antara celah butiran pasir dan di permukaan pasir teratas. Pada permukaan pasir teratas, panas yang diradiasikan akan menuju lingkungan di mana proses sangrai terjadi.

Rumusan Hukum Stefan-Boltzmann melibatkan variabel-variabel yang terlibat dalam proses sangrai untuk diberi simbol. Anggap suatu dengan luas permukaan A untuk setiap satuan waktu Δt akan meradiasikan panas yang dirumuskan pada persamaan (4) berikut

$$Q = \Delta t A \sigma \varepsilon (T^4 - T_{env}^4), \tag{4}$$

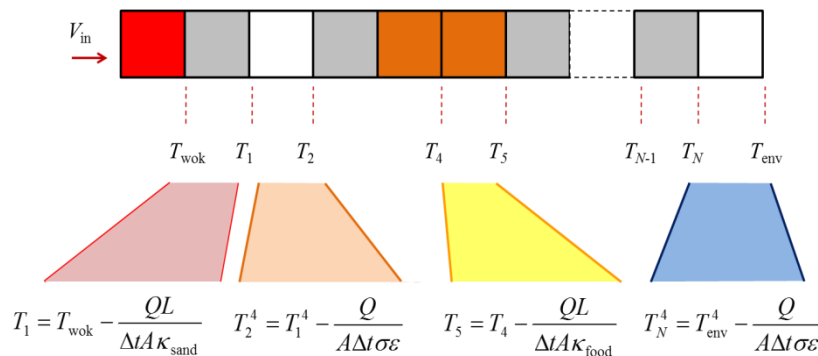
dengan suhu lingkungan dirumuskan dengan T_{env} , sedangkan σ dan ε masing-masing merupakan konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) dan emisivitas materi yang meradiasikan kalor.

Hukum Kekekalan Energi

Peristiwa kekekalan energi pada proses sangrai terjadi saat adanya perambatan panas pada setiap lapisan komposisi sangrai. Dengan lingkungan hal ini dianggap tidak terpenuhi karena lingkungan dianggap sebagai tandon kalor. Sebagai konsekuensinya sistem akan dapat memiliki termperatur suatu akhir T_∞ , yang merupakan temperatur akhir, setelah peristiwa transien dilewati.

HASIL DAN DISKUSI

Langkah awal adalah membagi lapisan komposisi sangrai berdasarkan peristiwa konduksi dan radiasi yang terjadi pada setiap lapisan. Lapisan yang terjadi konduksi memakai persamaan (3), sedangkan lapisan yang terjadi radiasi menggunakan persamaan (4). Pada persamaan (3) dan (4), masing-masing variabel yang dicari adalah besarnya energi panas yang dihasilkan dari proses konduksi dan radiasi. Namun, pada persamaan tersebut, variabel suhu tertinggi dan suhu terendahnya diketahui. Pada penelitian ini, yang dicari adalah distribusi suhu pada setiap lapisan komposisi sangrai sehingga variabel yang dicari dari persamaan tersebut menjadi suhu terendah. Deskripsi variabel suhu terendah yang dicari pada setiap lapisan diperjelas pada Gambar 2.



Gambar 2. Susunan rumus untuk proses konduksi dan radiasi yang terjadi pada setiap lapisan komposisi proses sangrai.

Langkah berikutnya adalah menentukan reduksi parameter intensitas pada setiap lapisan komposisi sangrai. Parameter intensitas berguna untuk mengetahui seberapa banyak energi panas yang diemisikan per satuan luas dan waktu pada setiap permukaan lapisan. Rumusan parameter intensitas terdapat pada persamaan (5) berikut

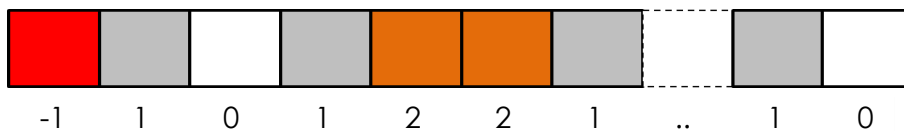
$$I = \frac{Q}{A\Delta t} \tag{5}$$

Nilai intensitas diberikan sama pada setiap lapisan. Batasan yang perlu diperhatikan adalah selisih suhu tertinggi dengan suhu terendah harus lebih besar daripada nol yang dirumuskan dengan $T_H - T_L \gg 0$. Nilai parameter intensitas yang digunakan $I = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, $\sigma = 5,670367 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$, $\Delta t = 10^{-5} \text{ s}$, $L = 10^{-3} \text{ m}$, tegangan $V = 220 \text{ V}$, hambatan $R = 10 \Omega$, dan temperatur lingkungan $T_{\text{env}} = 300 \text{ K}$.

Tabel 1 Konstanta komposisi lapisan proses sangrai.

Material	$\kappa (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_p (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	ε
Wajan berbahan <i>stainless steel</i> [4]	14,9	477	0,17
Pasir [4]	0,27	1515	0,9
Kacang tanah	0,168 [5]	2230 [5]	0,98 [6]

Penyelesaian distribusi suhu pada setiap lapisan proses sangrai menggunakan metode matriks baris. Setiap lapisan tersebut diberi notasi angka seperti Gambar 3. Dengan menggunakan *spreadsheet*, e.g. *Microsoft Excel*, persamaan (2) – (4) dipecahkan secara numerik yang langsung dengan saling melakukan substitusi satu sama lain dengan proses yang telah cukup jelas. Setiap notasi angka dimasukkan pada rumus di Gambar 2 untuk mengetahui suhu pada setiap lapisan.



Gambar 3. Notasi angka untuk matriks baris pada setiap lapisan komposisi proses sangrai (-1: pemanas; 0: udara di ruang vakum; 1: pasir; 2: makanan/objek sangrai).

Tabel 2 Perubahan distribusi temperatur pada setiap komposisi lapisan proses sangrai.

		Bahan (-1: pemanas, 0: vakum, 1: pasir, 2: makanan)															
		-1	1	0	1	1	0	1	2	2	2	1	0	1	1	1	0
Waktu	0.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
	0.16	304.84	304.83	300.05	300.05	300.05	300.04	300.04	300.04	300.03	300.02	300.02	300.04	300.04	300.04	300.04	300.04
	0.45	313.60	313.60	300.13	300.13	300.13	300.12	300.12	300.12	300.11	300.10	300.10	300.12	300.12	300.12	300.12	300.12
	0.62	318.74	318.73	300.19	300.19	300.19	300.17	300.17	300.16	300.15	300.15	300.15	300.17	300.17	300.17	300.17	300.17
	0.92	327.80	327.80	300.30	300.30	300.30	300.25	300.25	300.24	300.24	300.23	300.23	300.25	300.25	300.25	300.25	300.25
	1.02	330.82	330.82	300.34	300.34	300.34	300.28	300.28	300.27	300.26	300.26	300.26	300.28	300.28	300.28	300.28	300.28
	1.29	339	339	300.5	300.5	300.5	300.4	300.4	300.4	300.3	300.3	300.3	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4
	1.43	343.2	343.2	300.5	300.5	300.5	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4	300.4
	1.70	351.4	351.4	300.7	300.7	300.7	300.5	300.5	300.5	300.5	300.4	300.4	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5
	1.95	358.9	358.9	300.8	300.8	300.8	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5	300.5
	2.20	366.5	366.5	300.9	300.9	300.9	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6	300.6
	2.67	380.7	380.7	301.2	301.2	301.2	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7
	2.67	380.7	380.7	301.2	301.2	301.2	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7	300.7
	3.14	394.9	394.9	301.6	301.6	301.6	300.9	300.9	300.9	300.9	300.8	300.8	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9
	3.26	398.5	398.5	301.7	301.7	301.7	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9
	3.42	403.4	403.4	301.8	301.8	301.8	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9	300.9
3.55	407.3	407.3	302	302	302	301	301	301	301	301	301	301	301	301	301	301	
3.62	409.4	409.4	302	302	302	301	301	301	301	301	301	301	301	301	301	301	

Melalui Tabel 2, suhu awal pada setiap lapisan sangrai adalah 300 K. Selama selang waktu 3,62 s, terjadi kenaikan suhu yang tidak jauh dari 300 K untuk lapisan yang jauh dari sumber panas. Artinya, suhu hampir terdistribusi merata akibat proses konduksi dan radiasi. Suhu tertinggi sebesar 409,4 K pada waktu 3,62 s terdapat pada lapisan wajan yang berhadapan langsung dengan sumber panas.

KESIMPULAN

Pemodelan satu dimensi perambatan panas bahan butiran dalam proses sangrai telah dapat dirumuskan. Perambatan panas yang dimodelkan pada penelitian ini bersifat searah. Formulasi faktor parameter intensitas panas $I = Q/A\Delta t$ masih perlu diverifikasi melalui eksperimen, agar hasil akan bebas dari parameter numeriknya, seperti Δt .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Hendro atas berbagai masukannya pada penyederhanaan simulasi dari sistem fisis sebenarnya.

REFERENSI

1. P. Sharma, H.S. Guiral. *Effects of Sand Roasting and Microwave Cooking on Antioxidant Activity of Barley*. Food Research International, 44: 235-240 (2011)
2. J.E. Andrade, C.F. Avila, S.A. Hail, and G. Viggiani. *Multiscale Modeling and Characterization of Granular Matter: From Grain Kinematics to Continuum Mechanics*, Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 59: 237-250 (2011)
3. A. Kreith, R.M. Manglik, and M.S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Cengage Learning, Stamford, USA (2011)

4. F.P. Incopera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer: Sixth Edition*, John Wiley & Sons, USA (2007)
5. ASHRAE, *Thermal Properties of Foods. In: ASHRAE Handbook of Fundamentals 1989*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, USA (1989)
6. M.R. Pandya, D.B. Shah, H.J. Trivedi, M.M. Lunagaria, V. Pandey, S. Panigrahy, and J. S. Parihar. *Field Measurements of Plant Emissivity Spectra: An Experimental Study on Remote Sensing of Vegetation in the Thermal Infrared Region*. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41:787-796 (2013)