

EFEK PENGERINGAN *INFRARED* TERHADAP PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR, SIFAT FISIK DAN KAPASITAS REHIDRASI BAHAN PANGAN

Resa Setia Adiandri*, Eka Rahayu dan Ridwan Rachmat

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian
Jl. Tentara Pelajar 12, Kampus Penelitian Pertanian, Bogor 16114
Email : setia_resa17@yahoo.com*)

ABSTRAK

Pengeringan *infrared* memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan pengeringan konvensional pada kondisi pengeringan yang sama. Beberapa keuntungan dari pemanfaatan *infrared* yaitu laju pengeringannya cukup tinggi, hemat energi, dan distribusi suhu yang seragam sehingga menghasilkan mutu produk yang lebih baik. Dalam perkembangannya, radiasi *infrared* tidak hanya diaplikasikan secara tunggal tetapi dikombinasikan dengan metode pengeringan lainnya untuk memperbaiki karakteristik mutu produk akhir. Kondisi proses dan intensitas radiasi *infrared* yang diaplikasikan pada pengeringan bahan pangan berpengaruh terhadap karakteristik produk akhir. Makalah ini membahas efek pengeringan *infrared* terhadap perubahan mikrostruktur, sifat fisik (tekstur, porositas, warna) dan kapasitas rehidrasi bahan pangan. Dari sejumlah literatur diketahui bahwa radiasi *infrared* memberikan efek terhadap mikrostruktur, sifat fisik (tekstur, porositas, warna) dan kapasitas rehidrasi. Dengan radiasi *infrared*, mikrostruktur produk kering menjadi lebih berongga dan poros sehingga porositas dan kapasitas rehidrasinya lebih tinggi dan tekstur yang dihasilkan lebih renyah namun terjadi penyusutan pada produk kering. Laju pengeringan radiasi *infrared* yang cukup tinggi menyebabkan penguapan berlangsung cepat, kontak suhu panas dengan bahan relatif singkat sehingga degradasi warna pada produk akhir dapat diminimalisasi.

Kata kunci : *infrared*, mikrostruktur, porositas, tekstur, rehidrasi

ABSTRACT. Resa Setia Adiandri, Eka Rahayu and Ridwan Rachmat. 2013. **Effect of Infrared Drying on Microstructural Changes, Physical Properties and Rehydration Capacity of Food Materials.** Infrared drying offers several advantages compared with conventional drying at the same drying conditions. Some of the advantages of the utilization of infrared are high drying rate, energy efficient, uniform temperature distribution resulting in a better quality product. Infrared radiation can be applied solely or in combination with other drying methods to improve the quality characteristics of final products. Processing conditions and the intensity of infrared radiation applied affect the final product quality. This paper reviews the effect of infrared drying on microstructural changes, physical properties (texture, porosity, color) and rehydration capacity of foods. Previous studies showed that infrared radiation influences microstructure, physical properties (texture, porosity, color) and rehydration capacity of foods. Infrared radiation results in more porous microstructures or a higher porosity of food structures. This produces crispier textures and leads to a higher rehydration capacity of foods. However, limited shrinkage may still occur in the final dried products. The higher drying rate of infrared radiation facilitates rapid evaporation and thus shortens heat exposure on foods so that degradation of color in the final product could be minimized.

Key word : *infrared*, *microstructure*, *porosity*, *texture*, *rehydration*

PENDAHULUAN

Dewasa ini pengeringan tidak hanya dianggap sebagai proses pengawetan tetapi juga untuk meningkatkan nilai tambah bahan pangan terutama untuk komoditas hortikultura yang bersifat mudah rusak (*perishable*) seperti aneka buah dan sayur. Pada umumnya bahan pangan dikeringkan secara konveksi dengan udara panas. Tetapi, pengeringan dengan udara panas masih memiliki beberapa kelemahan diantaranya yaitu (i) produk kering sulit direhidrasi karena *case hardening* dan terjadi penyusutan selama proses pengeringan, (ii) efisiensi energi yang rendah dan (iii) waktu pengeringan yang relatif lama. Dengan lamanya pengeringan dan meningkatnya suhu pengeringan dapat menyebabkan degradasi substansial pada beberapa atribut mutu seperti warna, nutrisi, perisa, densitas kamba dan kapasitas rehidrasi¹.

Teknologi pengeringan yang banyak digunakan yaitu pengeringan beku (*freeze drying*) karena dapat menghasilkan produk kering dengan kualitas yang tinggi. Tetapi, masalah utama dalam aplikasi *freeze drying* konvensional yaitu waktu pengeringan yang dibutuhkan sangat panjang sehingga menyebabkan konsumsi energi dan biaya produksi yang tinggi^{2,3}. Hal ini sebagian disebabkan oleh laju transfer panas yang kurang baik terkait dengan metode pemanasan elektrik dengan model transfer panas secara konduksi⁴. Untuk meningkatkan laju pengeringan beku, pemanfaatan pemanasan *microwave* menggantikan pemanasan konduksi telah terbukti memberikan panas dan laju perpindahan massa yang lebih baik⁵. Teknik ini dinamakan *microwave freeze drying* (MFD). Namun beberapa masalah masih dijumpai dalam aplikasi teknologi MFD. Menurut Venkatesh & Raghavan⁶, tingkat pemanasan bahan pangan dengan *microwave* sangat dipengaruhi oleh sifat dielektriknya (konstanta dielektrik dan *loss factor* dielektrik).

Teknologi pengeringan dengan *microwave* sangat terkenal sebagai salah satu alternatif metode pengeringan untuk beberapa produk pangan seperti buah-buahan, sayuran, kudapan, dan produk susu. Beberapa produk pangan telah berhasil dikeringkan dengan mengaplikasikan *microwave-vacuum* atau dikombinasikan antara *microwave* dengan proses konveksi. Beberapa peneliti melaporkan bahwa penggunaan *microwave* dapat mengurangi waktu pengeringan (25-90%) dan energi sehingga dapat memperbaiki kualitas akhir produk seperti warna, kapasitas rehidrasi, densitas dan porositas^{7,8}. Teknologi pengeringan dengan memanfaatkan *microwave* telah diaplikasikan pada berbagai

produk pangan, seperti *plain* yoghurt⁹, *cranberry*¹⁰, irisan wortel¹¹, gel buah-buahan¹², susu skim, susu utuh, bubuk kasein, mentega, dan pasta segar¹³, irisan kentang¹⁴, anggur¹⁵, apel dan jamur merang¹⁶, pada akar ginseng Amerika¹⁷, apel¹⁸ dan *blueberry*¹⁹.

Akhir-akhir ini banyak dikembangkan sistem pemanasan *infrared* yang memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan pengeringan konvensional pada kondisi pengeringan yang sama. Beberapa keuntungan dari pemanfaatan *infrared* adalah laju pengeringannya cukup tinggi, hemat energi, dan distribusi suhunya seragam sehingga menghasilkan mutu produk yang lebih baik. Oleh karena itu pengeringan *infrared* dapat digunakan sebagai metode pengeringan hemat energi. Pada saat ini banyak pengering menggunakan radiasi *infrared* untuk memperbaiki efisiensi pengeringan, menghemat ruangan, dan menyediakan lingkungan kerja yang bersih^{20,21}. Efisiennya pengeringan dengan *infrared* dikarenakan radiasi *infrared* dapat menembus bahan dan energi radiasi akan dikonversi menjadi panas²². Pengeringan *infrared* juga telah diteliti sebagai metode yang potensial untuk meningkatkan kualitas bahan pangan kering termasuk buah-buahan, sayuran dan biji-bijian^{23,24,25,22,26}. Beberapa penelitian telah dikembangkan untuk meneliti kemungkinan kombinasi pengering *infrared* dengan jenis pengering lainnya dengan harapan dapat meningkatkan efektivitas pengeringan serta kualitas produk kering yang dihasilkan. Beberapa teknik kombinasi yang telah diteliti antara lain adalah kombinasi radiasi *infrared* dengan pemanasan konveksi dan/atau *vacuum*^{23,27,28,29}, kombinasi radiasi *infrared* dengan pemanasan udara panas dan kombinasi radiasi *infrared* dengan *freeze drying*³⁰.

Tetapi permasalahannya, teknik pengeringan apapun yang digunakan akan berpengaruh terhadap perubahan karakteristik bahan yang dikeringkan. Menurut Krokida dan Maroulis³¹ penguapan air selama pengeringan bahan-bahan selular menyebabkan perubahan besar dalam strukturnya sehingga mengurangi volume dan daerah permukaan bahan. Lima *et al.*³² melaporkan bahwa penyusutan bahan secara signifikan mempengaruhi koefisien difusi massa yang mengontrol proses pengeringan. Perubahan struktur selama pengeringan kemungkinan menyebabkan pembentukan pori dalam produk. Porositas diketahui berpengaruh langsung terhadap sifat fisik dan pemindahan uap air pada produk bahkan sifat sensori produk³³. Struktur yang berpori dapat mempercepat difusi air selama pengeringan

atau pemasakan. Sebaliknya struktur yang padat atau sedikit pori pada permukaan produk dapat menyebabkan lambatnya migrasi air selama pengeringan atau penetrasi air ke dalam produk selama rehidrasi atau pemasakan. Oleh karena itu pengamatan mikrostruktur dapat membantu memperkirakan seberapa besar perubahan produk selama proses dan kemungkinan dapat meningkatkan pemahaman mekanisme serta perubahan kualitas terutama perubahan tekstur produk^{34,35}.

Makalah ini membahas efek pengeringan *infrared* terhadap perubahan mikrostruktur, sifat fisik dan kapasitas rehidrasi bahan pangan. Perubahan-perubahan ini penting diketahui karena sangat berpengaruh terhadap kualitas produk akhir yang secara langsung maupun tidak langsung akan berpengaruh terhadap penerimaan konsumen secara umum.

TEKNOLOGI PENGERINGAN INFRARED

Selama dekade terakhir, radiasi *infrared* telah mendapat banyak perhatian sebagai sumber energi panas dan energi tambahan untuk pengeringan bahan pangan dan produk pertanian. Aplikasi radiasi *infrared* pada proses pengeringan dapat mengurangi kebutuhan energi karena gelombang elektromagnetnya terserap secara langsung ke dalam produk tanpa ada yang hilang ke lingkungan sehingga dapat menghemat energi^{36,37,20}.

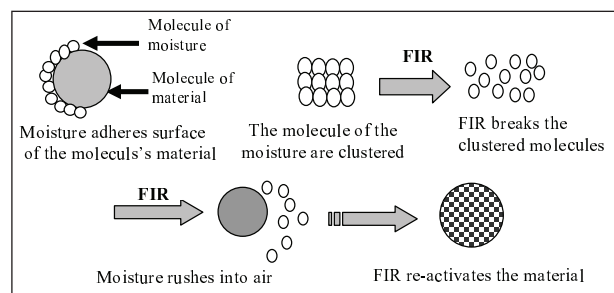
Secara umum berdasarkan panjang gelombangnya radiasi *infrared* dibagi ke dalam tiga kelompok yaitu *near-infrared radiation* (NIR) dengan panjang gelombang 0,78 sampai 1,4 μm , *mid infrared radiation* (MIR) dengan panjang gelombang 1,4 sampai 3 μm and *far infrared radiation* (FIR) dengan panjang gelombang 3 sampai 1000 μm . Selama radiasi *infrared* energi yang diserap dapat mendorong perubahan elektronik, vibrasi dan rotasi atom atau molekul suatu produk. Mekanisme penyerapan energinya ditentukan berdasarkan rentang panjang gelombang radiasi. Pada rentang panjang gelombang 0,2 sampai 0,7 μm (*ultraviolet dan visible light*) perubahan yang terjadi adalah elektronik, pada rentang panjang gelombang 2,5 to 100 μm (FIR) perubahan yang terjadi adalah vibrasi sedangkan untuk perubahan rotasi terjadi pada rentang panjang gelombang di atas 100 μm (*microwave*)^{38,39}.

Laju pengeringan bahan pangan dengan radiasi *infrared* lebih tinggi dibanding pengeringan

konvensional udara panas dan meningkat dengan peningkatan pasokan listrik ke *emitor infrared*^{40,41}. *Infrared* memanaskan buah lebih seragam, sehingga lebih baik kualitasnya dibanding dengan metode pengeringan lainnya^{42,43}. Aplikasi *infrared* dapat menekan kehilangan vitamin C, senyawa volatil dan perisa⁴⁴, menekan kehilangan β -karoten⁴⁵ dan dapat mempertahankan retensi warna⁴⁶.

Metode *far-infrared* (FIR) merupakan salah satu metode pengeringan yang banyak digunakan. Proses pengeringan yang terjadi melalui teknologi FIR yaitu melalui pemutusan ikatan molekul air karena panas radiasi langsung menembus bagian dalam molekul dan memutus ikatan molekul air pada molekul bahan tanpa melalui media perantara udara seperti pada proses pengeringan melalui konveksi termal dan konduksi⁴⁷. Radiasi FIR memiliki keunggulan dalam mengaktifkan sel-sel zat dalam bahan yang dikeringkan dan sangat bermanfaat untuk pengamanan karakteristik bahan kering karena perubahan karakteristik fisik dan kimia dari bahan hasil pertanian terjadi secara minimal. Penggunaan teknologi pengeringan/pemanasan FIR telah dicoba dilakukan pada pengolahan sayuran kering seperti bayam, seledri, cabe merah, dan jamur merang⁴⁸, gabah dan beras⁴⁹, dan pasteurisasi media bakteri⁵⁰. Pemanfaatan FIR untuk pengeringan tanaman rempah dan aromatik yang telah dilaporkan diantaranya bawang putih⁴⁸ dan ginseng⁵¹. Gambar efek pengeringan *far-infrared* ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam perkembangannya, radiasi FIR pada proses pengeringan tidak hanya dimanfaatkan secara tunggal tetapi dikombinasikan dengan metode pengeringan lainnya dengan tujuan untuk memperbaiki karakteristik mutu produk kering. Nimmol C.⁵² melakukan kombinasi *low-pressure superheated steam* (LPSS) dengan radiasi FIR dalam mengeringkan irisan buah pisang. Sedangkan Swadisevi *et al.*,⁵³ mengeringkan irisan buah pisang



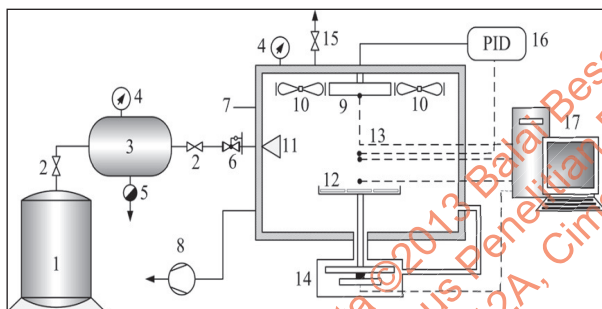
Gambar 1. Mekanisme pengeringan *far infrared*⁴⁷

Figure 1. Mechanism of far infrared drying⁴⁷

dengan mengkombinasikan FIR dengan pengering vakum. Gambar diagram skematik untuk kedua model kombinasi pengering disajikan berturut – turut pada Gambar 2 dan 3.

PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR

Venir *et al.*,⁵⁴ menyatakan bahwa struktur pangan merupakan faktor yang sangat penting dan kompleks dalam mutu pangan karena perubahan struktur pangan dapat mempengaruhi sifat penyerapan air dan tekstur pangan. Proses pengeringan menyebabkan perubahan pada tingkat mikrostruktur yang berpengaruh terhadap karakteristik makroskopiknya⁵⁵. Rajchert dan Rzca⁵⁶ menambahkan bahwa perubahan yang terjadi akibat pengeringan dapat berupa perubahan fisik, reaksi kimia dan efek biokimia. Perubahan fisik diantaranya adalah penyusutan, peningkatan porositas, penurunan kemampuan menyerap air dan rusaknya struktur mikroskopik. Laju pengeringan merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi perubahan struktur pangan. Pada



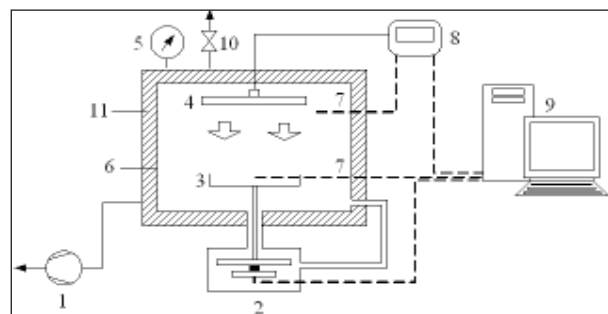
Gambar 2. Diagram skematik sistem pengering kombinasi LPSS (*low-pressure superheated steam*) and far-infrared radiation (FIR). 1: ketel uap; 2: katup uap; 3: waduk uap; 4: pengukur tekanan; 5: perangkat panas; 6: pengatur uap; 7: ruang pengering; 8: pompa vakum; 9: radiator far infrared; 10: kipas listrik; 11 tempat masuk dan distribusi uap panas; 12: pemegang sampel; 13: termokopel; 14: beban sel; 15: katup pemisah vakum; 16: pengontrol PID dan 17: komputer dengan kartu akuisisi data⁵²

Figure 2. Schematic diagram of combination drying system of LPSS (*low-pressure superheated steam*) and far-infrared radiation (FIR). 1: Boiler; 2: steam valve; 3: steam reservoir; 4: pressure gauge; 5: steam trap; 6: steam regulator; 7: drying chamber; 8: vacuum pump; 9: far-infrared radiator; 10: electric fans; 11: steam inlet and distributor; 12: sample holder; 13: thermocouples; 14: load cell; 15: vacuum break-up valve; 16: PID controller and 17: PC with data acquisition card⁵²

laju pengeringan yang tinggi kerusakan struktur jaringan akan lebih besar sehingga menyebabkan bahan menjadi mudah patah⁵⁷.

Studi mengenai perubahan mikrostruktur pada buah-buahan, sayuran dan produk pangan lainnya selama proses pengeringan telah banyak dilakukan sebelumnya. Vega-Gálvez *et al.*⁵⁸ telah melakukan penelitian untuk menentukan mutu dan sifat mikrostruktur paprika merah akibat pengaruh perlakuan pendahuluan (*pre-treatment*) dan suhu pengeringan udara. Hasilnya menunjukkan bahwa sampel dengan perlakuan pendahuluan berupa pencelupan dalam larutan yang mengandung NaCl, CaCl₂, dan N₂S₂O₅ mengalami kerusakan struktur lebih sedikit dibanding dengan sampel yang tidak diberikan perlakuan pendahuluan. Dari penelitian ini juga diketahui bahwa suhu pengeringan berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan mikrostruktur produk kering.

Shih *et al.*⁵⁹ telah melakukan penelitian menggunakan metode pengeringan baru yaitu *sequential infrared radiation* dan *freeze drying* (SIRFD) yang diaplikasikan pada irisan buah stroberi. Sebagai pembandingan dalam penelitian ini juga dilakukan metode pengeringan *freeze drying* (tunggal) dan *sequential hot air dan freeze drying* (SAHFD). Hasil mikograf *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan bahwa pengeringan



Gambar 3. Diagram skematik sistem pengering kombinasi far infrared dengan pengering vakum: (1) pompa vakum, (2) beban sel, (3) rak sampel, (4) radiator far infrared, (5) pengukur tekanan, (6) ruang pengering, (7) termokopel, (8) PID; (9) personal komputer, (10) katup pemisah vakum, (11) isolator⁵³

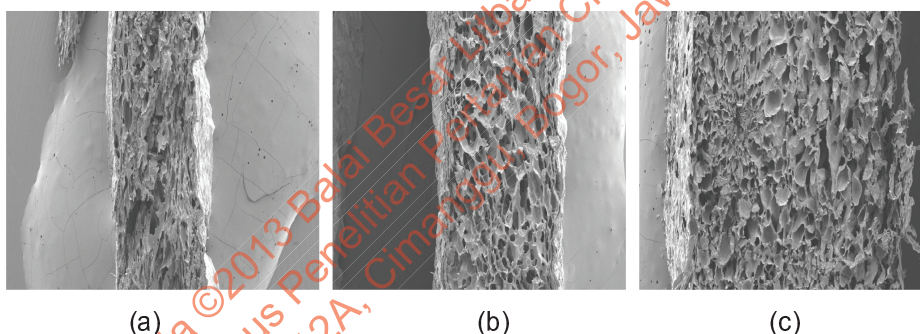
Figure 3. Schematic diagram of combination drying system of far infrared with vacuum dryer: (1) vacuum pump; (2) load cell; (3) sample tray; (4) far-infrared radiator; (5) pressure gauge; (6) drying chamber; (7) thermocouples; (8) PID controller; (9) personal computer; (10) vacuum break-up valve; (11) insulator⁵³

dengan SIRFD menyebabkan terjadinya perubahan mikrostruktur produk kering dengan struktur yang lebih berpori dibanding dengan produk yang dikeringkan dengan *freeze drying* dan SAHFD (Gambar 4). Perubahan mikrostruktur ditunjukkan dengan pori-pori yang besar (ruang intraseluler) dibagian tengah irisan strowberi yang disebabkan oleh terbentuknya uap air selama pengeringan katalitik *infrared*. Menurut Jamradloedluk *et al.*,⁶⁰ proses pemanasan *infrared* berjalan dengan cepat sehingga uap air yang terbentuk akan memperluas dinding seluler dan memperbesar pori-pori bahan kering. Sifat mikrostruktur yang unik inilah yang dapat meningkatkan kerenyahan produk kering⁵⁹.

Efek *infrared* terhadap perubahan mikrostruktur juga telah diteliti oleh Rajchert dan Rzca⁵⁶ yaitu pada irisan buah apel yang dikeringkan dengan metode konveksi, kombinasi *microwave* –konveksi dan *infrared*-konveksi. Mikrograf SEM dari hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 5. Dari hasil penelitian Rajchert dan Rzca⁵⁶ diketahui bahwa

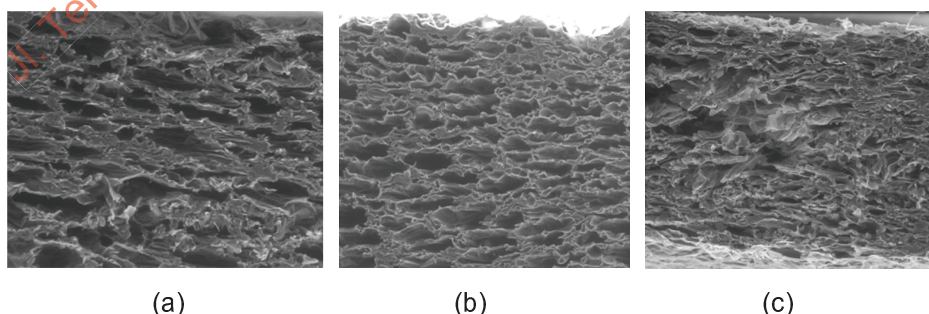
perbedaan metode pengeringan yang digunakan sangat berpengaruh terhadap karakteristik struktur irisan apel kering. Mikrostruktur yang terbentuk pada irisan apel kering dengan metode pengeringan konveksi yaitu berupa rongga–rongga kecil dengan densitas yang sangat tinggi. Sel-sel yang lebih besar dapat diamati hanya di daerah batas irisan. Dengan pengeringan *microwave*-konveksi, sel-sel yang terbentuk pada irisan apel kering lebih besar terutama di bagian tepi. Sementara itu, dengan pengeringan *infrared*, sel-sel yang terbentuk jauh lebih besar dan struktur regular mulai berkurang sehingga menghasilkan karakteristik struktur yang berbeda dengan hasil pengeringan konveksi (Gambar 5). Teknik pengeringan *infrared* dan kombinasi *microwave*-konveksi ditandai dengan tingkat penyusutan yang rendah (11-12%), penurunan volume (30-34%), densitas rendah (18-23%), dan porositas tinggi (25-28%).

Shi *et al.*⁶² juga melaporkan bahwa membran plasma dan dinding sel bluberi segar terlihat utuh



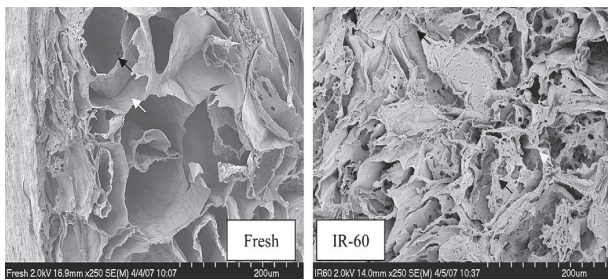
Gambar 4. Mikrostruktur dari irisan strawberi kering pada potongan melintang hasil pengeringan dengan metode yang berbeda a) *Freeze drying*, b) SIRFD dan c) SHAHFD. Mikrograf diambil menggunakan SEM pada resolusi 1280 x 960 pixel dan pembesaran 40 kali⁵⁹

Figure 4. Microstructure of cross section strawberry dried sliced as a result of different drying method a) *Freeze drying*, b) SIRFD dan c) SHAHFD. Micrographs were taken using Scanning Electron Microscopy (SEM) at resolution 1280 x 960 pixel and dilation 40 times⁵⁹



Gambar 5. Mikrostruktur irisan apel kering bagian tengah hasil pengeringan dengan metode pengeringan yang berbeda, a) pengeringan konveksi, b) kombinasi *microwave*-convective, c) *infrared*. Mikrograf diambil menggunakan SEM dengan pembesaran 177 kali⁵⁶

Figure 5. Microstructure of middle section of apple dried sliced as a result different drying method, a) convective drying, b) combination of *microwave*-convective, c) *infrared*. Micrographs were taken using Scanning Electron Microscopy (SEM) at dilation 177 times⁵⁶



Gambar 6. Perubahan membran plasma (tanda panah hitam) dan dinding sel (tanda panah putih) dari jaringan sel pada bluberi sebelum pengeringan (kiri) dan sesudah pengeringan (kanan) selama 60 menit⁶²

Figure 6. Change of plasma membran (black arrow) and cell wall (white arrow) from cell tissue of blueberry before drying process (left) and after drying process (right) for 60 minutes⁶²

sebelum dilakukan pengeringan tetapi kemudian mengalami keretakan pada tahap pengeringan (Gambar 6). Jaringan bagian dalam strukturnya terlihat longgar dan poros setelah pengeringan yang memungkinkan air dapat ditransfer dengan mudah dari dalam ke permukaan bluberi.

PERUBAHAN SIFAT FISIK

Tabel 1. Pengaruh perbedaan metode pengeringan terhadap karakteristik mutu wortel

Table 1. Effects of difference of drying method to carrot quality characteristics

Parameter analisis/ Analysis parameter	Metode Pengeringan/ Drying Method			
	Bahan mentah/ Raw matter	Udara panas/ Hot air	Gelombang pendek/ Microwave	Infra merah/ Infrared
Bahan kering/ Dry matter (g/100 g)	13,13	84,02	92,87	88,82
Warna/ Colour				
L	56,49	54,94	47,98	50,06
a	22,77	17,46	14,22	16,24
b	26,93	17,44	13,67	14,94
Sudut rona/ Hue angle	49,60	45,00	43,90	42,50
ΔE /	—	10,98	17,93	15,09
ΔC	—	10,87	15,78	13,65
Aktivitas air/ Water activity	—	0,75	0,58	0,64
Densitas kamba yang longgar/ Loose bulk density (g/ml)	1,04	0,14	0,11	0,13
Densitas kamba yang padat/ Tapped bulk density (g/ml)	0,43	0,16	0,13	0,14
Densitas partikel/ Particle density	0,46	1,40	0,70	1,12
Penyusutan/ Shrinkage	—	1,85	2,17	1,96
Porositas yang longgar/ Loose porosity	0,59	0,90	0,81	0,88
Porositas yang padat/ Tapped porosity	0,56	0,89	0,84	0,88

Sumber : Baysal *et al.*,⁶⁹ Keterangan / Remarks:

Sifat fisik jaringan tanaman akan mengalami perubahan selama proses pengeringan⁶³. Selama pengeringan terjadi proses penguapan air dari sel tanaman yang menyebabkan pergerakan senyawa larut air di dalam sel sehingga meningkatkan rigiditas (kekakuan) dinding sel, penyusutan, peningkatan tegangan internal sel dan kerusakan dinding sel^{64,65,66}. Kualitas produk kering ditandai oleh penampilan (warna) dan sifat fisik lainnya seperti tekstur, penyusutan dan porositas.

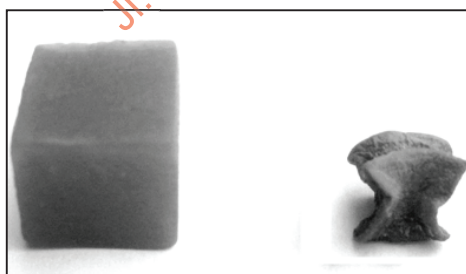
Penyusutan (Shrinkage)

Penyusutan merupakan salah satu perubahan fisik utama yang terjadi selama proses pengeringan. Penyusutan terjadi karena rusaknya dinding kapiler selama penguapan air yang berdampak negatif terhadap kualitas produk kering. Penyusutan menyebabkan perubahan bentuk pada produk yang disebabkan oleh tekanan pada saat air menguap dari bahan⁶⁷. Menurut Lewicki⁶³ bahan yang mengalami penyusutan secara ekstensif akan menunjukkan penurunan jumlah dan ukuran pori secara signifikan. Penyusutan juga mempengaruhi mutu produk dengan menurunnya sifat basah, perubahan tekstur dan menurunnya kemampuan adsorpsi. Genskow L.R.⁶⁸ menyatakan bahwa

secara umum terjadinya penyusutan tergantung pada struktur bahan kering dan untuk bahan yang berasal dari tumbuhan, penyusutan hampir berkorelasi secara linear dengan kadar air.

Selain struktur bahan, metode pengeringan yang digunakan juga berpengaruh terhadap penyusutan bahan kering. Hal ini ditunjukkan pada hasil penelitian Rajchert dan Rzca⁵⁶ dimana penyusutan irisan apel dengan metode konveksi menunjukkan hasil yang paling tinggi (74%) dibanding dengan metode pengeringan *microwave* dan *infrared* yang nilai penyusutannya hanya sekitar 11-12%. Secara statistik nilai penyusutan berbanding terbalik dengan porositas. Ketika nilai penyusutannya meningkat maka nilai porositasnya menurun. Hasil penelitian Baysal *et al.*,⁶⁹ juga menunjukkan bahwa metode pengeringan (udara panas, *microwave*, dan *infrared*) yang digunakan berpengaruh terhadap penyusutan wortel kering (Tabel 1).

Pemanfaatan radiasi *infrared* dalam pengeringan pangan sudah banyak dikembangkan baik sebagai sumber pemanas tunggal maupun dikombinasikan dengan metode pengeringan lainnya. Nimmol C. *et al.*,⁵² menyebutkan bahwa pada pengeringan menggunakan radiasi, intensitas radiasi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi mutu produk kering. Dari hasil penelitiannya menggunakan metode pengeringan kombinasi *Far Infrared Radiation-Vacuum* (FIR-Vacuum) menunjukkan bahwa penyusutan meningkat dengan menurunnya intensitas radiasi. Hal ini karena dengan intensitas radiasi rendah, air yang berada dalam bahan secara bertahap dan kontinu bergerak ke permukaan dan menyebabkan terjadinya kerusakan struktur bahan. Wortel sebelum dan sesudah pengeringan FIR-vacuum ditunjukkan pada Gambar 7.



(a) wortel segar (b) wortel setelah dikeringkan
(a) fresh carrot (b) dried carrot

Gambar 7. Wortel sebelum dan sesudah pengeringan menggunakan vaccum-FIR

Figure 7. Carrot before and after drying process using vaccum-FIR

Devahastin *et al.*,⁷² telah melakukan penelitian dengan mengkombinasikan metode radiasi *infrared* dengan metode lainnya yaitu *vacuum* dan LPSSD (*Low-Pressure Superheated Steam Drying*). Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat penyusutan wortel selama pengeringan dengan metode *far infrared - vacuum*, LPSSD maupun *vacuum* relatif sama. Namun, pola penyusutan wortel yang dikeringkan dengan *far infrared - vacuum* tidak seragam bila dibandingkan dengan yang dikeringkan dengan LPSSD. Hal ini karena bagian permukaan wortel yang dikeringkan dengan *far infrared - vacuum* menjadi kering dan rigid (kaku) jauh sebelum bagian tengahnya kering.

Metode pengeringan lainnya yang juga mengkombinasikan *infrared* dengan *vacuum* telah diaplikasikan pada irisan pisang dengan beberapa kombinasi perlakuan yaitu tekanan ruang absolut (5, 10, dan 15 kPa), suhu (50, 55, 60°C) dan ketebalan (2, 3, 4 mm)⁵³. Hasilnya menunjukkan bahwa penyusutan menurun dengan meningkatnya suhu permukaan. Hal ini karena pengeringan pada suhu tinggi menyebabkan permukaan irisan pisang menjadi lebih cepat kering dan terjadi pengerasan sehingga dapat mempertahankan bentuk irisan pisang. Sementara itu, penyusutan meningkat dengan meningkatnya tekanan akibat lambatnya proses pengeringan permukaan irisan pisang sehingga bentuk irisan tidak dapat dipertahankan dan menjadi susut.

Shih *et al.*,⁵⁹ telah melakukan penelitian dengan memanfaatkan radiasi *infrared* yang dikombinasikan dengan metode *freeze drying* (SIRFD= *Sequential Infrared Radiation Freeze Drying*) pada irisan stroberi. Ditemukan bahwa secara umum sampel dengan perlakuan pengeringan SIRFD mengalami penyusutan lebih tinggi dibandingkan sampel yang dikeringkan dengan *freeze drying reguler*, namun nilai penyusutannya lebih kecil bila dibandingkan dengan perlakuan SHAFD (*Sequential Hot Air Freeze Drying*). Hal ini karena dengan pengeringan *freeze drying reguler* (tanpa perlakuan pra dehidrasi), struktur yang rigid terbentuk selama tahap pembekuan dari proses *freeze drying*. Struktur yang rigid tersebut dapat mencegah terjadinya kerusakan matriks yang padat selama pengeringan²⁰.

Tekstur

Tekstur adalah sifat yang sulit didefinisikan. Menurut Aguilera dan Stanley³⁴, tekstur dapat dianggap sebagai refleksi dari karakteristik eksternal mikro dan makrostruktural suatu produk pangan, yang

secara langsung dapat mempengaruhi persepsi rasa. Pada produk kering, pengukuran tekstur dilakukan untuk menentukan tingkat kerenyahan produk karena kerenyahan merupakan salah satu atribut mutu yang cukup menentukan penerimaan konsumen secara umum.

Menurut Shih *et al.*,⁵⁹ kerenyahan sangat terkait dengan pembentukan lapisan padat dan perubahan struktural bahan. Pengujian kerenyahan irisan stroberi yang dikeringkan dengan metode pengeringan FD (*Freeze Drying*), SHAFD (*Sequential Hot Air-Freeze Drying*) dan SIRFD (*Sequential Infrared Radiation-Freeze Drying*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa secara statistik metode pengeringan yang digunakan berpengaruh terhadap kerenyahan produk akhir. Sampel yang dikeringkan dengan metode SIRFD memiliki tingkat kerenyahan lebih tinggi dibanding dengan sampel yang dikeringkan dengan FD dan SHAFD. Sampel dengan perlakuan SIRFD memiliki kepadatan sedang dan struktur pori yang besar pada bagian tengah menghasilkan produk dengan kerenyahan yang tinggi. Sampel SIRFD dengan intensitas radiasi 5000 Wm⁻² menunjukkan kerenyahan paling tinggi dibanding dengan intensitas radiasi 3000 Wm⁻² dan 4000 Wm⁻².

Selain intensitas radiasi, suhu pengeringan juga kemungkinan berpengaruh terhadap kerenyahan, karena dengan peningkatan suhu pada intensitas radiasi tinggi akan mempercepat penguapan air dari sampel. Sementara itu, untuk sampel dengan perlakuan SHAFD pori bagian tengahnya mengalami kerusakan sehingga membran sel terganggu dan lamela bagian tengah menjadi hilang. Menurut Alvarez *et al.*,⁷¹ menghilangnya lamela bagian tengah mengindikasikan terputusnya pektin di bagian tengah dinding sel dan lepasnya ikatan kuat antar sel. Hal inilah yang menyebabkan sampel dengan perlakuan SHAFD tidak begitu renyah.

Warna

Warna merupakan salah satu parameter mutu yang cukup menentukan daya tarik produk hasil pengeringan. Faktor yang berpengaruh terhadap pembentukan warna akhir produk hasil pengeringan antara lain suhu dan kelembaban relatif selama pengeringan. Ketidakesesuaian pilihan suhu dan kelembaban yang digunakan selama proses pengeringan menjadi salah satu penyebab degradasi warna dalam produk dehidrasi^{72,73}. Waktu pengeringan yang terlalu lama dan suhu pengeringan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan bahan mengalami *overheating* sehingga warna produk akhir menjadi lebih gelap. Selain itu, adanya

proses pencokelatan baik enzimatis maupun non-enzimatis berkontribusi terhadap perubahan warna bahan terutama pada produk hortikultura dan pati-patian. Untuk menonaktifkan enzim penyebab pencokelatan bahan dapat dilakukan perlakuan pendahuluan seperti pemanasan atau perendaman dalam larutan asam maupun garam.

Teknologi FIR merupakan teknologi pengeringan yang berlangsung secara cepat dan mampu mengurangi tingkat kehilangan bahan terutama pada produk buah dan sayuran. Interaksi antara sumber panas dengan bahan berlangsung singkat, sehingga perubahan warna bahan dapat diminimalisasi^{74,62}. Menurut Mongpraneet⁷³, intensitas radiasi *infrared* berpengaruh terhadap parameter warna. Hal ini dibuktikan dalam penelitiannya yang melakukan pengeringan bawang merah menggunakan FIR yang dikombinasikan dengan proses pengeringan vakum dengan intensitas radiasi 40, 50, 60, 90, dan 100 Wm⁻². Hasil penelitian menunjukkan bahwa bawang merah yang dikeringkan dengan intensitas radiasi 90 dan 100 Wm⁻² menghasilkan produk yang memiliki *a** yang lebih tinggi atau cenderung mendekati kemerahan. Sedangkan, pada intensitas radiasi yang lebih rendah akan menghasilkan *-a** yang cenderung tinggi atau mendekati kehijauan.

Metode pengeringan yang sama juga dilakukan oleh Nimmol *et al.*,⁷⁵ untuk mengeringkan wortel yang dibandingkan dengan metode pengeringan vakum dan LPSSD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wortel kering hasil pengeringan vakum-FIR mengalami peningkatan intensitas warna merah jika dibandingkan dengan wortel segar (sebelum proses pengeringan). Hal ini disebabkan karena meningkatnya konsentrasi pigmen warna merah akibat air bahan telah mengalami penguapan. Selain itu, nilai *L** wortel kering hasil pengeringan vakum-FIR menjadi lebih kecil yang menunjukkan bahwa tingkat kecerahan wortel kering menjadi lebih kecil sehingga warna wortel kering menjadi lebih gelap. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa produk hasil pengeringan menggunakan vakum-FIR berbeda secara signifikan dengan metode pengeringan lain yang diujikan.

Porositas

Porositas adalah rasio antara volume pori-pori terhadap volume penampang permukaan bahan. Parameter mutu ini dipengaruhi oleh kadar air dan kondisi pengeringan seperti suhu pengeringan. Porositas bahan yang beragam berasal dari perubahan volume permukaan bahan maupun volume pori-pori akibat penyusutan dan

pengkerutan struktur internal bahan. Pengkerutan menyebabkan penurunan volume awal bahan^{76,77}.

Salah satu kondisi pengeringan yang berpengaruh terhadap porositas yaitu suhu pengeringan. Hal ini berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Krokida dan Maroulis³¹ yang menunjukkan bahwa porositas terbesar diperoleh pada sampel yang dikeringkan menggunakan metode pengeringan konveksi pada suhu 70°C. Selain itu, porositas juga dipengaruhi kadar air awal komposisi dan ukuran bahan yang dikeringkan^{78,79,33,80}. Zogzas *et al.*,⁸¹ telah melakukan pengujian model pengeringan menggunakan apel, wortel dan kentang sebagai sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa apel dan wortel kering memiliki porositas yang cukup tinggi yaitu berkisar antara 20% – 70%, sedangkan porositas kentang hanya mencapai 10%. Rendahnya porositas kentang disebabkan karena adanya proses gelatinisasi pati kentang sehingga pori-pori bahan tidak terbentuk secara maksimal.

Pengeringan menggunakan radiasi FIR merupakan pengeringan dengan laju pengeringan yang tinggi sehingga kadar air optimal produk dapat dicapai dalam waktu yang singkat. Menurut Guine⁸⁰, pengeringan berlangsung dengan cepat akan meningkatkan porositas struktur bahan. Sebaliknya, jika laju pengeringan rendah, maka porositas bahan menjadi rendah. Nowak dan Lewicki⁴³ telah melakukan penelitian untuk mengeringkan irisan apel menggunakan teknologi FIR yang dibandingkan dengan metode pengeringan konveksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transfer panas pada pengeringan menggunakan FIR mampu mengevaporasi air dalam jumlah yang lebih besar dan berlangsung dengan lebih cepat jika dibandingkan dengan pengeringan konveksi. Dengan demikian, irisan apel kering memiliki struktur yang lebih banyak pori-porinya dan lebar.

Kapasitas Rehidrasi

Menurut Al-Khuseibi *et al.*,⁸² kapasitas rehidrasi merupakan salah satu parameter penting yang dapat digunakan untuk mengukur kualitas produk pangan hasil pengeringan. Kapasitas rehidrasi dapat digunakan sebagai standar kualitas untuk mengukur tingkat kerusakan bahan akibat perlakuan pendahuluan sebelum pengeringan maupun selama proses pengeringan dilakukan. Ahmed, J., *et al.*,⁸³ mendefinisikan kapasitas rehidrasi sebagai rasio air yang dapat diserap kembali oleh bahan ketika direndam dalam air dengan jumlah air awal yang menguap selama proses pengeringan.

Menurut Shih, *et al.*,⁵⁹ kapasitas rehidrasi menunjukkan adanya perubahan fisikokimia seperti struktur sel, warna, dan daya ikat air selama pengeringan. Perubahan fisikokimia ini dipengaruhi oleh kondisi proses, perlakuan pendahuluan bahan dan komposisi bahan. Proses rehidrasi tergantung pada perubahan struktur di dalam jaringan tumbuhan dan sel bahan yang terjadi selama proses pengeringan sehingga berakibat pada terjadinya penyusutan dan pengkerutan (*collapse*) yang dapat berimplikasi pada rusaknya struktur bahan⁸⁴. Rusaknya struktur internal bahan kering dapat menyebabkan kapasitas rehidrasi rendah⁸². Singh *et al.*,⁸⁵ melaporkan bahwa salah satu faktor penyebab rusaknya struktur bahan yaitu lamanya proses pengeringan yang menyebabkan perubahan fisikokimia yang bersifat *irreversible*.

Kapasitas rehidrasi dapat dioptimalkan dengan cara meminimalisasi tingkat kerusakan struktur sel bahan⁸⁶. Aplikasi *far-infrared* (FIR) dalam proses pengeringan produk pangan dapat memberikan kualitas produk yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional. Hal ini dapat terjadi karena suhu pengeringan terdistribusi secara merata di seluruh permukaan bahan sehingga efisiensi pengeringan akan meningkat^{20,21,29}. Tingginya efisiensi pengeringan dapat mengoptimalkan proses pengeringan sehingga dapat mempersingkat waktu pengeringan^{42,43}. Dengan demikian, kontak antara bahan dan sumber panas dapat berlangsung secara singkat sehingga tingkat kerusakan struktur bahan dapat diminimalisasi.

Perlakuan pendahuluan sebelum proses pengeringan dapat juga dilakukan untuk menjaga stabilitas struktur seluler bahan sehingga proses rehidrasi berlangsung secara optimal. Perlakuan pendahuluan yang dilakukan antara lain perendaman bahan di dalam larutan garam atau gula seperti CaCl_2 atau sakarosa^{87,88}, trehalose baik dalam bentuk serbuk maupun larutan⁸⁹, pemanasan (*blanching*), larutan asam asetat⁹⁰, dan asam laktat⁹¹. Lebih lanjut Chiewchan *et al.*,⁹⁰ menjelaskan bahwa perlakuan pendahuluan berpengaruh signifikan terhadap karakteristik permukaan bahan yang akan mempengaruhi penampilan produk hasil pengeringan.

Aplikasi pengeringan menggunakan FIR secara vakum maupun dikombinasikan dengan pengeringan pada tekanan rendah (*Low Pressure Superheated Steam Drying*/LPSSD) terbukti efektif dalam mengeringkan irisan buah pisang⁵². Pada

vakum-FIR terlihat bahwa irisan pisang yang dikeringkan pada suhu lebih tinggi (90°C) memiliki kapasitas rehidrasi yang lebih tinggi (1,54 ±0,06 gram). Hal ini disebabkan karena suhu pengeringan yang lebih tinggi dapat meningkatkan porositas struktur bahan sehingga daya serap air menjadi lebih tinggi yang berimplikasi pada tingginya kapasitas rehidrasi. Pada kombinasi pengeringan LPSSD-FIR diketahui porositas bahan lebih tinggi jika dibandingkan dengan irisan pisang yang dikeringkan menggunakan vakum-FIR. Hal ini terjadi karena peningkatan suhu secara tiba-tiba hingga mendekati titik didih sehingga menyebabkan penguapan kandungan air bahan pada pisang secara cepat. Oleh karena itu pori-pori pada permukaan bahan lebih banyak dan lebar. Namun demikian, secara umum kapasitas rehidrasi bahan hasil pengeringan vakum-FIR dan LPSSD-FIR tidak berbeda nyata.

Hasil penelitian Shin *et al.*,⁵⁹ menunjukkan bahwa produk hasil pengeringan menggunakan *far-infrared* (FIR) yang dikombinasikan dengan *freeze drying* (SIRFD) memiliki kapasitas rehidrasi lebih tinggi daripada produk hasil pengeringan menggunakan metode SHAFD yaitu berturut-turut 1,0308 – 1,7138 gram dan 0,9174 – 1,0649 gram. Hasil yang sama juga diperoleh dari hasil penelitian Sakai *et al.*,⁴² dalam mengeringkan bawang merah menggunakan radiasi FIR di bawah kondisi vakum. Kemampuan rehidrasi bawang merah dengan menggunakan metode ini lebih besar daripada pengeringan menggunakan udara panas (*hot-air drying*). Hasil penelitian ini juga didukung oleh hasil penelitian Kumar *et al.*,²⁸ yang melakukan pengeringan bawang menggunakan FIR dan udara panas.

Dari hasil penelitian Baysal *et al.*,⁶⁹ diketahui bahwa teknologi pengeringan menggunakan *far-infrared* (FIR) mampu menghasilkan wortel kering dengan kapasitas rehidrasi yang lebih tinggi daripada produk kering hasil pengeringan menggunakan *microwave* dan *hot air drying*. Kapasitas rehidrasi wortel hasil pengeringan FIR adalah 8,95 g H₂O/g, sedangkan kapasitas rehidrasi wortel hasil pengeringan *microwave* dan udara panas (*hot air drying*) secara berturut-turut adalah 8,38 g H₂O/g dan 7,96 g H₂O/g. Pada proses rehidrasi terjadi peningkatan berat akhir bahan yang menunjukkan bahwa pori-pori yang terdapat pada permukaan bahan mampu menyerap air secara optimal selama proses rehidrasi.

Suhu pengeringan berpengaruh nyata terhadap kapasitas rehidrasi. Kapasitas rehidrasi cenderung menurun seiring dengan penambahan suhu pengeringan terutama untuk produk pangan dengan kadar gula tinggi seperti chesnut⁹², ubi jalar⁸⁵, dan kentang⁹⁴. Hal ini disebabkan karena pengeringan pada suhu tinggi menyebabkan terjadinya karamelisasi gula yang dapat menyumbat pori-pori permukaan bahan sehingga menurunkan difusi air melalui permukaan selama proses rehidrasi. Mongpraneet, S.⁷³ menambahkan, semakin lama dan semakin tinggi suhu pengeringan dapat menyebabkan menurunnya kapasitas rehidrasi. Hal ini terjadi karena adanya perubahan pori-pori pada permukaan bahan sehingga mengakibatkan air bahan masuk kembali ke dalam kernel.

PENUTUP

Radiasi *infrared* memberikan efek terhadap mikrostruktur, sifat fisik (tekstur, porositas, warna) dan kapasitas rehidrasi. Dengan radiasi *infrared*, mikrostruktur produk kering menjadi lebih berongga dan poros sehingga porositas dan kapasitas rehidrasinya lebih tinggi dan tekstur yang dihasilkan lebih renyah namun terjadi penyusutan pada produk kering. Laju pengeringan radiasi *infrared* yang cukup tinggi menyebabkan penguapan berlangsung cepat, kontak suhu panas dengan bahan relatif singkat sehingga degradasi warna pada produk akhir dapat diminimalisasi. Dalam perkembangannya, radiasi FIR pada proses pengeringan tidak hanya dimanfaatkan secara tunggal tetapi dikombinasikan dengan metode pengeringan lainnya dengan tujuan untuk memperbaiki karakteristik mutu produk kering. Beberapa kombinasi pengeringan FIR dengan pengeringan lainnya telah dikembangkan antara lain adalah *low-pressure superheated steam* dengan *far-infrared radiation* (LPSS –FIR), vacuum- FIR, dan SIRFD (*Sequential Infrared Radiation-Freeze Drying*). Masing-masing kombinasi pengering memberikan efek yang berbeda terhadap karakteristik produk kering yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Feng H, Tang J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed, J Food Sci 1998; 63: 679–683.
2. Hammami C, Rene F. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. Journal of Food Engineering 1997; 32: 133-154.
3. Liu Y, Zhao Y, Feng X. Energy analysis for a freeze-drying process. Applied Thermal Engineering 2008; 28(7): 675 – 690.

4. Varith J, Dijkanarukkul P, Achariyaviriya A, Achariyaviriya S. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering* 2007; 81: 459-468
5. Wang R, Zhang M, Mujumdar AS, Sun JC. Microwave freeze-drying characteristics and sensory quality of instant vegetable soup. *Drying Technology: An International Journal* 2009; 27(9): 962 – 968.
6. Venkatesh MS, Raghavan GSV. An overview of microwave processing and properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering* 2004; 88(1): 1-18.
7. Prabhanjan DG, Ramaswamy HS, Raghavan GSV. 1995. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 1995; 25(2): 283 – 293.
8. Funebo T, Ahrné L, Kidman S, Langton M, Skjöldebrand C. Microwave heat treatment of apple before air dehydration-effects on physical properties and microstructure. *Journal of Food Engineering* 2000; 46(3) : 173-182.
9. Kim SS, Bhowmik SR. Survival of lactic acid bacteria during spray drying of plain yogurt. *Journal of Food Science* 1990; 55(IV): 1008 – 1010.
10. Yongsawatdigul J, Gunasekaran S. Microwave-vacuum drying of cranberries: part ii. quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation* 1996; 20(2): 145-156
11. Lin TM, Durance TD, Scaman CH. Characterization of vacuum microwave, air, and freeze dried carrot slices. *Food Research International* 1998; 31(2): 111-117
12. Drouzas AE, Tsami E, Saravacos GD. Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering* 1999; 39: 117-122.
13. Al-Duri B, McIntyre S. Comparison of drying kinetics of food using a fan-assisted convection oven, a microwave oven, and a combined microwave/convection oven. *Journal of Food Engineering* 1992; 15: 139-155.
14. Bouraout M, Richard P, Durance T. Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering* 1994; 17: 353-363.
15. Tulasidas T N, Raghavan GSV, Norris ER. Effects of dipping and washing pre-treatments on microwave drying of grapes. *Journal Food Process Engineering* 1996; 19: 15-25
16. Funebo T, Ohlsson T. Microwave assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering* 1998; 38: 353 – 367.
17. Ren G, Chen F. Drying of american ginseng (*Panax quinquefolium*) roots by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering* 1998; 35(4) : 433 – 443.
18. Prothon F, Ahrné LM, Funebo T, Kidman S, Maud L, Ingegerd S. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT-Food Sci. Technol* 2001; 34 (2): 95-10.
19. Feng H, Tang J, Mattison DS, Fellman JK. Microwave and spouted bed drying of frozen blueberries : the effect of drying and pretreatment methods on physical properties and retention of flavor volatiles. *Journal of Food Processing and Preservation* 1999; 23(6): 463 – 479
20. Ratti C, Mujumdar AS. Infrared drying. In: Mujumdar, AS [Ed]. *Handbook of industrial drying* : 567-588. New York : Marcel Dekker, Inc.; 1995.
21. Yamazaki Y, Hashimoto T, Honda T, Shimizu M. Optical characteristics gelatinous materials in infrared radiation drying. *Proceeding of the 8th International Drying Symposium* 1992; section VI: 712.
22. Hebbar HU, Rostagi NK. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering* 2001; 47(1): 1- 5.
23. Abe T, Afzal TM. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal Agricultural Engineering Research* 1997; 67(4): 289-29.
24. Afzal TM, Abe T. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering* 1998; 37(4): 353-365.
25. Afzal TM, Abe T. Simulation of moisture changes in barley during far-infrared radiation drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 2000; 26(2): 137 - 145
26. Zhu K, Schiff EA, Ganguly G. Infrared modulation spectroscopy of interfaces in amorphous silicon solar cells. *Journal of Non-Crystalline Solids* 2002; 1162 – 1166.
27. Hebbar HU, Vishwanathan KH, Ramesh MN. Development of combined infrared and hot-air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering* 2004; 65(4): 557-563.
28. Kumar DGP, Hebbar HU, Sukumar D, Ramesh MN. Infrared and hot-air drying of onions. *Journal Food Processing And Preservation* 2005; 29(2): 132-150.
29. Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering* 2002; 55: 147 – 156.

30. Lin YP, Tsen JH, King VAE. Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 2005; 68 (2): 249 – 255.
31. Krokida MK, Maroulis ZB. Effect drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology* 1997; 15 (10): 2441 – 2458.
32. Lima RD, De Ros LF. The Role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of late devonian sandstones from the Solimões Basin, Brazilian Amazonia. *Marine and Petroleum Geology* 2002; 19: 1047 – 1071.
33. Rahman MS. Toward prediction of porosity in food during drying: A brief review. *Drying Technology* 2001; 19: 1–13
34. Aguilera JM, Stanley DW. Microstructural principles of food processing and engineering. Gaithersburg: Aspen Publishers; 1999.
35. Xiao HW, Lin H, Yao XD, Du ZL, Lou Z, Gao ZJ. Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying. *International Journal of Food Engineering*. 2009; 5: Article 5
36. Ginzburg AS. Application of infrared radiation in food processing. *Chemical and Process Engineering Series*. London : Leonard Hill Books; 1969.
37. Sandu C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress* 1986; 2: 109–119.
38. Shimizu M, Hashimoto A, Igarashi H. Far-infrared radiation technology. *New Food Industry*. 1991; 33: 23–30.
39. Sakai N, Mao W. Infrared heating. In: *Thermal food processing: New technology and quality issues*, Sun DW [ed] : 493 – 52. Boca Raton: CRC Press; 2006.
40. Gabel M, Pan Z, Amaratunga KSP. Quality and safety characteristics of infrared dried onion products. *ASAE Paper No. 046189*. St. Joseph, Mich.: ASAE; 2004.
41. Masamura A, Sado H, Honda T, Shimizu M, Nabethani H, Hakajima M, Watanabe A. Drying of potato by far-infrared radiation. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi* 1998; 35(5): 309–314
42. Sakai N, Hanzawa T. applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. and Tech.* 1994; 5 (11): 357–362.
43. Nowak D, Lewicki PP. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2004; 5: 353 – 360
44. Niibori F, Motoi S. Evaporation of vegetables used by infrared rays. *Food Processing* 1988; 23: 38–42.
45. Mogi T, Ito T, Yamamoto I. Research and development of rapid drying technique for vegetables by use of heating combination with far infrared rays and infrared rays. *Technical Report of Japan Food Industry Center* 1990; 16: 17–32.
46. Itoh K. Drying of vegetable by far infrared radiation. *Shokuhin Kikai Souchi* 1986; 23: 45–53.
47. Rahmat R, Lubis S, Hadipernata M, Sudaryono, Widaningrum IA, Santoso BAS. *Teknologi pengeringan far-infrared untuk sayuran instan [Laporan Penelitian]*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Bogor 2003; 25 – 28.
48. Rachmat R, Lubis S, Hadipernata M, Agustinisari I. Perubahan senyawa volatil pada sayuran kering akibat radiasi far-infrared. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Inovatif Pascapanen Untuk Pengembangan Industri Berbasis Pertanian*, Balai Besar Litbang Pascapanen Pertanian, Bogor 2005; 17–25.
49. Kashiwazaki M, Kubota K, Ichikawa T. Development of far infrared drying system for paddy. *Proceedings of ARBIP 95 Kobe Japan*; 1995.
50. Hashimoto A, Igarashi H, Shimizu N. 1992. Far infrared radiation effect on pasteurization of bacteria on or within wet-solid medium. *Journal Chemical Engineering* 1992; 25(6): 666–671
51. Kim MH, Kim SM, Kim CS, Park SJ, Lee CH, Rhee JY. quality of korean ginseng dried by a prototype continuous flow dryer using far-infrared radiation and hot air. *Canadian Biosystems Engineering* 2002; 44 : 347–354
52. Nimmol C, Devastin S, Swadisevi T, Soponronnarit S. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering* 2007; 81: 624 – 633.
53. Swadisevi T, Devastin S, Ngamchum R, Soponronnarit S. Optimazation of a drying process using infrared – vacuum drying of cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal Science Technology* 2007; 29(3): 809 – 816.
54. Venir E, Munari M, Tonizzo A, Maltini E. Structure related changes during moistening of freeze dried apple tissue. *Journal of Food Engineering* 2007; 81 (1): 27–32.
55. Mattea M, Urbicain MJ, Rotstein E. Computer model of shrinkage and deformation of cellular tissue during dehydration. *Chemical Engineering Science* 1989; 44: 2853–2859.
56. Rajchert DW, Rzaca M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology: An International Journal* 2009; 27: 903–909.

57. Nowak D, Lewicki PP. Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology* 2005; 23: 831 – 846.
58. Vega-Gálvez A, Lemus-Mondaca R, Bilbao-Sáinz, C, Fito P, Andrés A. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*. 2008; 85: 42-50.
59. Shih C, Pan Z, McHugh T, Wood D, Hirschberg E. Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2008; 51 (1): 205 – 216.
60. Jamradloedluk J, Nathakaranakule A, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S. Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality attributes of durian chip. *Journal of Food Engineering* 2007; 78(1): 198-205.
61. Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S, Kunwisawa J, Soponronnarit S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food Science and Technology*. 2011; 44, 1502-1510.
62. Shi J, Pan Z, McHugh TH, Wood D, Hirschberg E, Olson D. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *Food Science and Technology*. 2008; 41: 1962 – 1972.
63. Lewicki, PP. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissues properties: A review. *International Journal of Food Properties* 1998; 1(1): 1 – 22.
64. Mayor L, Sereno AM. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering* 2004; 61(3): 373 – 386.
65. Proton F, Ahrne L, Ingegerd S. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration: A critical review. *Food Science and Nutrition* 2003; 43(4): 447 – 479.
66. Funebo, T., Ahrne, L., Kidman, S., Langton, M., Skjoldebrand, C. Microwave heat treatment of apple before air dehydration - effects on physical properties and texture. *Journal of Food Engineering* 2000; 46: 173-182.
67. Mayor L, Moreira R, Chenlo F, Sereno AM. Kinetics of osmotic dehydration of pumpkin with sodium chloride solutions. *Journal of Food Engineering* 2006; 74: 253 – 262.
68. Genskow LR. Considerations in drying consumer products. In: *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium*; Roques MA, Mujumdar AS [Eds]; Versailles, 1998; 39–46.
69. Baysal T, Icier F, Ersus S, Yildiz H. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur Food Res Technol* 2003; 218: 68 – 73
70. Devahastin S, Suvarnakuta P, Soponronnarit S, Mujumdar AS. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material,” *Drying Technology* 2004; 22: 1845–1867.
71. Alvarez CA, Aguerre R, Gomez R, Vidales S, Alzamora S, Gerschenson L. Air Dehydration of Strawberries: Effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. *Journal of Food Engineering* 1995; 25(2): 167-178.
72. Lozano JE, Ibarz A. Color changes in concentrated fruit pulp drying heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering* 1997; 31: 365–373.
73. Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering* 2002; 55: 147 – 156.
74. Baysal T, Icier F, Ersus S, Yildiz H. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology* 2004; 218 (1): 68 e
75. Nimmol C. Vacuum far-infrared drying of foods and agricultural materials. *The Journal of KMUTNB* 2010; 20 (1): 37 – 44.
76. Rahman MS. A Theoretical model to predict the formation of pores in foods during drying. *International Journal of Food Properties* 2003; 6: 61 – 72
77. Khalloufi S, Almeida-Rivera C, Bongers P. A Theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function of shrinkage and collapse phenomena during drying. *Food Research International* 2009; 42: 1122 – 1130.
78. Khraisheh MAM, Cooper TJR, Magee TRA. Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology* 1997; 15(3&4): 1003–1022.
79. Lang W, Sokhansanj S, Rohani S. Dynamic shrinkage and variable parameters in bakker-arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. *Drying Technology* 1994; 12(7): 1687–1708.
80. Guine R. Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing* 2006; 84 (C3): 179 – 185
81. Zogzas N, Maroulis ZB, Marinou-Kouris D, Saravacos GD. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology* 1994; 12(7): 1653 – 1666.

82. Al-Khuseibi MK, Sablani SS, Perera CO. Comparison of water blanching and high hydrostatic pressure effects on drying kinetics and quality of potato. *Drying Technology* 2005; 23: 2449–2461.
83. Ahmed J, Shivhare S, Singh G. Drying characteristics and product quality of coriander leaves. *Trans IchemE* 2001; 79 (C): 103 – 106
84. Kaymak-Ertekin F. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science* 2002; 67(1): 168–175
85. Singh NJ, Pandey RK. Rehydration characteristics and structural changes of sweet potato cubes after dehydration. *American Jurnal of Food Technology* 2011; 6 (8): 709 – 716
86. Crapiste GH. Simulation of drying rates and quality changes during dehydration of foodstuffs. In : Lozano JE, Añón MC, Parada Arias E, Barbosa-Cánovas GV [Eds]. *Trends in Food Engineering* : 2000;135–148. Technomic Publishing Co., Inc.
87. Lewicki P. 2006. Design of hot air-drying for better foods. *Trends in Food Science and Technology*, 17: 153–163
88. Papageorge LM, Mc Feeters RF, Fleming HP. 2003. Factors influencing texture retention of salt-free, acidified, red bell peppers during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5): 1460–1463.
89. Aktas T, et al., 2007. Effects of Pretreatment of Sliced Vegetables With Trehalose on Drying Characteristics and Quality of Dried Product. *Trans IchemE*, 85 (C3): 178 – 183.
90. Chiewchan N, Praphraiphetch C, Devahastin S. 2010. Effect of pretreatment on surface topographical features of vegetables during drying. *Journal of Food Engineering*, 101: 41 – 48.
91. Uyttendaele M, Rajkovic A, Benos G, Francois K, Devlieghere F, Debevere J. Evaluation of a challenge testing protocol to assess the stability of ready-to-eat cooked meat products against growth of *Listeria monocytogenes*. *Int. J. Food Microbiol.* 2004; 90, 219–236.
92. Singh GD, Sharma R, Bawa AS, Saxena DC. Drying and rehydration characteristics of water chestnut (trapa natans) as a function of drying air temperature. *Journal of Food Engineering* 2008; 87: 213 – 221.
93. Rajchert DW, Lewicki, PP. Rehydration properties of dried plant tissues. *International Journal of Food Science and Technology* 2006; 41: 1040–1046.
94. Isengard HD, Prager H. Water Determination in products with high sugar content by infrared drying. *Food Chemistry* 2003; 82: 161 – 167

Hak cipta ©2013 Balai Besar Litbang Pascapanen
 Kampus Penelitian Pertanian Cimanggu, Bogor - Jawa Barat, Indonesia
 Jl. Tentara Pelajar no 12A, Cimanggu, Bogor