

KARAKTERISASI METODE PENGERINGAN BEKU PADA PANGAN NABATI

CHARACTERIZATION OF FREEZE-DRYING METHODS FOR PLANT-BASED FOODS

Setyaning Pawestri¹, Fathma Syahbanu^{2*}

¹ *Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram*

² *Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Singaperbangsa Karawang*

*Email: fathma.syahbanu@fikes.unsika.ac.id

ABSTRACT

Freeze-drying is widely used to dry plant-based foods, including fruits, vegetables, herbs, and nontraditional foods. Even though it requires a long processing time and is expensive, the freeze-drying method is preferred because it can produce high-quality food products. This is because the freeze-drying method can maintain nutritional quality compared to other dehydration methods, especially if operated under vacuum conditions. Freeze-drying conditions will affect various food ingredients' nutritional properties and antioxidant activity. However, inappropriate selection of process parameters can cause undesirable changes in the product, such as shrinkage, colour changes, and damaged structure. This review manuscript aims to characterize the freeze-drying of plant-based foods and explain the influence of processing conditions on selected physical properties of different food products.

Keywords: process conditions, plant foods, freeze drying, physical properties

INTISARI

Pengeringan beku banyak digunakan untuk mengeringkan pangan nabati termasuk buah-buahan, sayuran, rempah-rempah, dan bahkan beberapa makanan nontradisional. Meskipun membutuhkan waktu pemrosesan yang lama dan merupakan metode pengeringan yang mahal, metode pengeringan beku lebih disukai karena dapat menghasilkan kualitas produk yang bermutu. Hal ini disebabkan metode pengeringan beku dapat mempertahankan kualitas gizi jika dibandingkan dengan metode dehidrasi lainnya, terutama jika dioperasikan dalam kondisi vakum. Kondisi pengeringan beku akan berpengaruh terhadap sifat nutrisi dan aktivitas antioksidan dari berbagai bahan pangan. Namun, pemilihan parameter proses yang tidak tepat dapat menyebabkan perubahan yang tidak diinginkan pada produk, seperti penyusutan, perubahan warna, serta struktur yang rusak. Tujuan dari review naskah ini adalah untuk mengkarakterisasi pengeringan beku pada pangan nabati, dan menjelaskan pengaruh kondisi proses terhadap sifat fisik yang dipilih produk makanan yang berbeda.

Kata kunci : kondisi proses, pangan nabati, pengeringan beku, sifat fisik

PENDAHULUAN

Pengeringan beku adalah proses di mana air disublimasikan dengan transisi langsung dari air padat (es) menjadi uap, sehingga menghilangkan kondisi cair, dan kemudian menyerap air dari lapisan "kering" (Haseley & Oetjen, 2018; Mellor 1978, Adams, *et al.*, 2015, Franks & Auffret, 2008, Liu, *et al.*, 2008). Metode ini banyak digunakan untuk stabilisasi makanan berkualitas tinggi, bahan biologis, dan obat-obatan, seperti protein, vaksin, bakteri, dan sel mamalia. Dalam prosesnya, kualitas produk kering (sifat biologis, nutrisi, dan organoleptik) dipertahankan (Ratti, 2001; Assegehegn, *et al.*, 2019). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa pembekuan air dalam bahan sebelum liofilisasi menghambat proses reaksi kimia, biokimia, dan mikrobiologi. Oleh karena itu, rasa, bau, dan kandungan berbagai nutrisi tidak berubah. Bahan makanan mentah mengandung banyak air, mulai dari 80% hingga 95%. Penghilangan air dengan sublimasi menghasilkan penciptaan struktur yang sangat

berpori dari produk kering-beku, dan rehidrasi liofilisat berlangsung dengan segera (Meda & Ratti, 2005, Jia, *et al.*, 2019).

Air dalam produk dapat berupa air bebas atau air yang terikat pada matriks oleh berbagai kekuatan. Air bebas membeku, tetapi air yang terikat tidak membeku. Dalam proses pengeringan beku, semua air es dan beberapa air terikat harus dihilangkan. Oleh karena itu, liofilisasi adalah proses yang sangat kompleks dan multi-langkah proses yang terdiri dari (Haseley & Oetjen, 2018; Mellor, 1978; Adams, *et al.*, 2015; Franks & Auffret, 2008; Liu, *et al.*, 2008; Ratti, 2001):

1. Pembekuan produk, paling sering di bawah tekanan atmosfer,
2. Pengeringan primer-pembekuan-pengeringan-pembekuan-es sublimasi, paling sering pada tekanan rendah,
3. Pengeringan sekunder-pengeringan desorpsi-pengeringan produk hingga mencapai kelembapan akhir yang dibutuhkan.

Studi yang dilakukan oleh Silva-Espinoza, *et al.* (2020) berfokus pada optimalisasi kondisi operasi pengeringan beku untuk mempertahankan sifat fisik-kimia puree jeruk dengan lebih baik. Para peneliti menyelidiki pengaruh laju pembekuan (konvensional dan *blast freezer*), tekanan kerja (5-100 Pa) dan suhu penyimpanan (30-50°C) terhadap parameter kualitas seperti warna, porositas, sifat mekanik, kadar air, vitamin C, total fenol, β -karoten, dan aktivitas antioksidan. Analisis warna menunjukkan bahwa warna lebih baik dipertahankan ketika tekanan operasi tertinggi, suhu tertinggi, dan kondisi pembekuan yang cepat (*fast freezing*). *Pure freeze-dried* menunjukkan tingkat porositas yang tinggi, tetapi porositas sampel yang diperoleh pada kondisi yang berbeda tidak berbeda secara statistik. Analisis mekanis menunjukkan bahwa ketahanan mekanis yang lebih tinggi dari sampel dicapai pada tekanan terendah dan suhu tertinggi. Selain itu, sampel dengan ketahanan mekanis yang tinggi terhadap kerusakan menunjukkan kadar air yang paling kecil. Degradasi nutrisi yang lebih rendah kemudian diamati pada suhu yang lebih tinggi karena proses pengeringan yang lebih cepat. Silva-Espinoza, *et al.* (2020) menyimpulkan bahwa kondisi pengeringan beku yang optimal untuk memaksimalkan kualitas puree jeruk kering adalah tekanan rendah dan suhu tinggi.

Munzenmayer, *et al.* (2020) mengkaji efek penerapan mikroperforasi laser CO₂ pada kulit blueberry sebelum pengeringan beku. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengeringan utama berkurang secara signifikan dari 17 jam untuk buah yang tidak diberi perlakuan menjadi 13 jam ketika sembilan mikroperforasi per buah diterapkan, dengan efek minimal pada penampilan buah. Pada saat yang sama, kualitas buah juga meningkat secara signifikan, karena persentase blueberry yang tidak rusak di akhir proses meningkat dari 47% menjadi 86%. Hal ini menunjukkan bahwa lubang mikro berfungsi sebagai jalur keluarnya uap dari bagian depan yang menyublim melalui resistensi transfer massa yang melemah pada kulit blueberry, sehingga mengurangi pengembangan tekanan di bawahnya, yang pada akhirnya menghindari pecahnya buah dan meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan dengan waktu pemrosesan yang lebih singkat.

Prosapio, *et al.* (2020) menerapkan pengeringan beku pada gel gellan gum yang mengandung vitamin B2 dan mempelajari pengaruh pH gel terhadap kinetika pengeringan

dan pelepasan vitamin B2. Prosapio, *et al.* (2020) mengamati bahwa gel gellan gum yang diasamkan pada pH 2,5 menunjukkan laju pengeringan tercepat, sedangkan gel pada pH 4 menunjukkan laju yang paling lambat. Untuk sampel pH alami (5,2), model *Page* memberikan deskripsi kinetika pengeringan beku yang paling akurat, sedangkan model Wang dan Singh memprediksi kinetika yang lebih akurat pada pH 4 dan 2,5. Prosapio, *et al.* (2020) juga menyelidiki pengaruh pH gel terhadap mekanisme pelepasan vitamin dengan menggunakan model *Korsmeyer-Peppas*. Gel beku-kering pada pH 4 mampu menyelesaikan pelepasan vitamin dalam waktu sekitar 9,5 jam; gel pada pH alami dalam waktu 6 jam, sedangkan sampel pada pH 2,5 dalam waktu 3 jam. Perbedaan ini disebabkan oleh struktur mikro gel yang berbeda. Gel gum gellan kering beku pada pH 4 menunjukkan struktur yang teragregasi dan kaku yang dapat menghambat perpindahan massa di dalam gel, sehingga meningkatkan waktu yang dibutuhkan untuk melepaskan vitamin sepenuhnya dari substrat. Sampel pada pH 2,5 menghasilkan struktur agregat yang rendah dan lemah sehingga menyebabkan terjadinya pemecahan selama percobaan pelepasan yang membuat pelepasan vitamin menjadi lebih cepat. Gel pH alami menunjukkan perilaku peralihan karena tingkat agregasi menengah. Model *Korsmeyer-Peppas* digunakan untuk menganalisis kurva pelepasan eksperimental, yang menunjukkan bahwa sampel pada pH 5,2 menunjukkan perilaku *Fickian* yang khas, sementara sampel yang diasamkan pada pH 4 telah menggabungkan mekanisme Fickian dan relaksasi.

Pengaruh kondisi pengeringan beku terhadap sifat nutrisi, aktivitas antioksidan (Krzykowski, *et al.*, 2018; Martinez-Navarrete, *et al.*, 2019; Wu, *et al.*, 2019; Silva-Espinoza, *et al.*, 2020) dan karakteristik transisi gelas (Martinez-Navarrete, *et al.*, 2019; Khalloufi & Ratti, 2003; Egas-Astudillo, *et al.*, 2020) dari berbagai bahan makanan dapat ditemukan dalam literatur. Para peneliti meyakini secara luas bahwa pengeringan beku adalah metode pengeringan terbaik. Namun, pemilihan parameter proses yang tidak tepat dapat menyebabkan perubahan yang tidak diinginkan pada produk, seperti penyusutan, perubahan warna, serta struktur yang rusak. Oleh karena itu, tujuan dari review naskah ini adalah untuk mengkarakterisasi pengeringan beku pada pangan nabati, dan menjelaskan pengaruh kondisi proses terhadap sifat fisik yang dipilih produk makanan yang berbeda.

METODE

Kajian literatur ini disusun menggunakan metode kajian literatur naratif. Penyusunan kajian literatur ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan berupa menentukan pertanyaan penting terkait isi literatur, pengumpulan jurnal ilmiah, penyaringan dan penilaian kualitas tulisan dan data jurnal, serta merangkum hasil.

Pertanyaan yang dijadikan acuan adalah:

- 1) karakteristik pengeringan beku pada pangan nabati
- 2) pengaruh kondisi proses terhadap sifat fisik pada produk makanan

Langkah pengumpulan naskah publikasi ilmiah difokuskan pada artikel ilmiah yang dipublikasikan antara tahun 1995 – 2023. Naskah tersebut dapat berupa artikel internasional dan nasional termuat dalam database jurnal ilmiah seperti, Scopus, Google Scholar, dan Sinta. Tahap berikutnya adalah melakukan identifikasi kata kunci yang termuat pada keywords di abstrak. Kata kunci yang digunakan berupa *freeze drying*, aplikasi pengeringan beku, perkembangan pengeringan beku. Langkah ketiga adalah melakukan ulasan dari abstrak dan isi artikel dari naskah jurnal. Tahap ini akan menentukan abstrak dan isi artikel dengan keyword yang sesuai, exclusion juga diterapkan pada tahap ini yakni mengeluarkan artikel yang tidak sesuai dengan tujuan kajian literatur. Tahap terakhir adalah sintesis temuan dari isi artikel dan diintegrasikan ke dalam naskah kajian literatur yang disusun.

PEMBAHASAN

Pengeringan Beku pada Pangan Nabati

a. Karakteristik Pangan Nabati

Perubahan pola konsumsi pangan cukup pesat dalam kurun satu dekade ini. Konsumen tidak hanya mengonsumsi makanan untuk meredakan rasa lapar, tetapi juga mulai menyadari pentingnya bahan makanan yang lebih sehat dan alami untuk mendapatkan pola makan yang seimbang dan bergizi. Dalam konteks ini, konsumen diimbau untuk meningkatkan asupan buah dan sayur setiap hari karena nilai gizinya sebagai pemasok vitamin dan mineral sudah diketahui. Hal ini mendorong tumbuhnya trend pangan nabati (Santos & Silva, 2008). Jumlah orang yang mengikuti pola makan nabati meningkat pesat, menurut berbagai komunitas vegan dan perusahaan konsultan. Di Amerika, jumlah vegan meningkat sebesar 500%, dari hampir empat juta pada tahun 2014 menjadi 19,6 juta pada tahun 2017 (Vegan Society, 2020).

Pangan nabati, termasuk di dalamnya buah-buahan, sayuran, biji-bijian, kacang-kacangan, dan rempah-rempah, merupakan komponen penting dari pola makan sehat. Konsumsi teratur pangan nabati dalam jumlah cukup dapat membantu mencegah penyakit degeneratif seperti kanker dan penyakit kardiovaskular. Berdasarkan joint report FAO dan WHO, direkomendasikan konsumsi minimal 400 g buah dan sayuran per hari untuk meminimalkan risiko penyakit kronis serta sebagai upaya mitigasi defisiensi mikronutrien (FAO/WHO, 2004). Perbedaan pangan nabati dengan makanan hewani terletak pada kandungan fraksi serat pada pangan nabati berasal dari senyawa yang tidak dapat dicerna, terutama selulosa, hemiselulosa, pektin, maupun pati resisten. Selain itu, produk pangan nabati seperti biji-bijian, polong-polongan, tanaman sereal, dan tanaman kacang-kacangan juga dicirikan oleh kandungan karbohidrat, protein, dan lipid yang tinggi. Sehingga bisa dikatakan bahwa pangan nabati tidak hanya sumber serat, tetapi juga mengandung zat makronutrien (protein, lipid, dan karbohidrat), mikronutrien (mineral, trace elements dan vitamin), dan fitonutrien (seperti polifenol dan karotenoid) (Fardet, 2017).

Pangan nabati memiliki kelemahan berupa kandungan air pada sebagian besar buah-buahan dan sayur-sayuran lebih tinggi dari 80%, sehingga membatasi umur simpannya dan menjadikannya lebih rentan terhadap kondisi penyimpanan dan pengangkutan. Hal ini juga yang menjadi alasan kenapa pangan olahan pabrik tetap diminati. Belakangan pemrosesan pangan yang mampu mendehidrasi air buah-buahan dan sayuran dehidrasi cukup menarik perhatian karena mudah diproduksi, dapat disimpan dan diangkut dengan biaya yang relatif rendah, mereduksi biaya pengemasan, dan menghasilkan produk akhir dengan kadar air rendah sehingga dapat mereduksi kemungkinan berkembangnya beberapa mikroorganisme yang menyebabkan kerusakan makanan segar. Meski demikian proses dehidrasi pangan nabati dengan proses pengeringan konvensional nutrisi memiliki kelemahan berupa bahan pangan nabati yang peka terhadap panas, cahaya, dan oksigen akan terdegradasi selama proses tersebut (Santos & Silva, 2008).

b. Keunggulan dan Tantangan Penerapan Pengeringan Beku

Pengeringan adalah salah satu metode pengawetan makanan tradisional, tertua, dan dapat diterima di seluruh dunia. Dari semua

metode pengawetan makanan, pengeringan merupakan metode yang paling banyak digunakan. Proses pengeringan didasarkan pada prinsip bahwa kadar air akan berkurang hingga tingkat dimana mikroorganisme pembusuk tidak dapat tumbuh atau penghambatan reaksi kimia. Selain berfungsi untuk mengawetkan, pengeringan akan membuat massa yang lebih ringan, serta memperpanjang umur simpan, mereduksi biaya penyimpanan, mempermudah transportasi, pergudangan, dan pengiriman (Bhatta et al., 2019).

Pengeringan beku (lío-filisasi) telah dipergunakan secara luas sejak akhir abad ke-19 untuk memproses makanan (Babic et al., 2009). Di antara proses pengeringan, pengeringan beku dianggap sebagai proses yang paling lembut dikarenakan kerusakan struktur mikro produk dapat diabaikan, memungkinkan laju rehidrasi yang cepat dan kapasitas rehidrasi yang tinggi, dan mempertahankan sifat fisik kimia yang baik. Disamping itu, alasan dibalik popularitas pengeringan beku adalah keuntungan yang dimilikinya dibanding dengan proses pengolahan lain, yakni : stabilitas sampel pada suhu kamar, kemudahan rekonstitusi dengan penambahan air, struktur produk berpori yang jelas, massa lebih ringan, dan adanya kemungkinan penanganan produk secara steril yang lebih mudah (Rindler, et al., 1999). Pengeringan beku adalah metode yang efektif untuk memperpanjang umur rata-rata makanan, karena dapat mencegah kerusakan akibat pertumbuhan mikroba atau oksidasi (Barbosa & Vega-Mercado, 2000). Selain itu, karakteristik produk kering beku rehidrasi mungkin serupa dengan produk segar (Babic, et al., 2009).

Pengeringan beku menghasilkan dehidrasi lebih menyeluruh, sehingga produk hasil pengeringan beku memerlukan ruang penyimpanan lebih kecil, mudah ditransportasikan pada suhu ruang dan memiliki masa simpan lebih panjang bilamana dikemas dengan baik. Dibandingkan dengan metode pengeringan lainnya, tingkat penyusutan produk pengeringan beku jauh lebih rendah. Proses pengeringan bahan dilakukan pada suhu yang sangat rendah sehingga menjaga nutrisi dan zat aktif dalam bahan mentah, serta mempertahankan warna dan bau alami (Liu, et al., 2021).

Seiring tuntutan zaman dan kebutuhan, sekarang ini kebutuhan untuk mengembangkan proses pengeringan beku dengan sistem yang lebih kompleks terus meningkat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kompleksitas

bahan biologis (struktur, aktivitas, dan metabolisme), maka prospek keberhasilan pengawetan dengan pengeringan beku semakin berkurang (Rindler, et al., 1999). Dibandingkan dengan teknologi pengeringan konvensional lainnya, manfaat utama pengeringan beku meliputi: retensi sifat morfologi, biokimia, dan imunologi, tingkat viabilitas tinggi, suhu lebih rendah, *recovery* zat volatil tinggi, retensi struktur, luas permukaan, dan rasio stoikiometri, hasil tinggi, umur simpan yang lama, dan reduksi berat dalam penyimpanan, pengiriman, dan penanganan [Dincer, 2003; Ciurzyńska & Lenart, 2011].

Dalam industri makanan, pengeringan beku memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan metode pengeringan lainnya: (1) Mempertahankan warna, aroma, rasa, dan tampilan asli makanan segar, sampai batas tertentu dan melindungi komposisi serta menghindari hilangnya nutrisi, pengeringan beku cocok untuk produk yang sensitif terhadap panas (Berk, 2013; Cheng-Hai, et al., 2008), (2) makanan kering beku dapat dengan mudah direkonstitusi dengan kecepatan rehidrasi yang cepat, (3) makanan kering beku mempertahankan kadar air pada tingkat rendah, sehingga menjadi pangan ideal untuk dibawa bepergian dan praktis (Cheng-Hai, et al., 2008). Pengeringan beku adalah proses perpindahan panas dan massa yang sangat kompleks, dan pengaruhnya terhadap kualitas makanan kering beku harus diselidiki (Tse-Chao Hua & Zhang, 2010).

Produk-produk pengeringan beku tidak memerlukan rantai dingin dan hanya memiliki 10–15% dari berat aslinya sehingga memudahkan penyimpanan, distribusi, dan komersialisasi. Pengeringan beku melibatkan *deep freezing* dan tekanan rendah yang dilakukan bersamaan dalam durasi 1-3 hari (Babic, et al., 2009) dan biasanya terdiri dari tiga langkah: fase pembekuan, pengeringan primer, dan pengeringan sekunder. Di antara tahap-tahap tersebut, tahap pengeringan primer merupakan tahap krusial yang paling lama, memakan waktu dan tenaga. Cara terbaik untuk mengurangi waktu pengeringan adalah dengan mengoperasikan pengeringan beku pada suhu semaksimal mungkin. Namun, untuk menghasilkan produk beku-kering yang dapat diterima, sampel perlu dibekukan kering pada suhu yang lebih rendah dari suhu *collapsed* (T_c), di mana bahan kehilangan struktur mikroskopis dan hancur. T_c biasanya 2 °C lebih tinggi dari suhu transisi gelas (T_g) (Tang & Pikal, 2004).

c. Penerapan FD pada Pangan Nabati

Parameter kualitas pada produk pangan dapat dibagi menjadi 4 kelompok, yakni fisik, kimia, mikrobial, dan gizi. Pangan nabati berupa buah-buahan, sayuran, dan produk kering hasil turunannya merupakan sumber energi, mineral, dan vitamin yang baik. Namun demikian, ketika pangan nabati mengalami proses dehidrasi terjadi perubahan parameter kualitas pada produk kering. Besarnya perubahan tergantung pada preparasi bahan sebelum dehidrasi dan proses dehidrasi yang digunakan (Perera, 2005). Kualitas utama bahan pangan yang dapat dipengaruhi selama proses pengeringan adalah warna, daya tarik visual, rasa, bau, tekstur, sifat rehidrasi, sifat curah, sifat aliran, aktivitas air, retensi nutrisi, dan senyawa volatil (Sablani, 2006). Proses pengeringan juga berpengaruh pada parameter mikrobial, kepadatan *bulk-porosity*, pengendalian hama, serangga, dan kontaminan lainnya, bebas dari kotoran, dan bau tak sedap (Perera, 2005). Penelitian mengenai pengaruh pengeringan beku telah dilakukan pada sayuran dan buah-buahan. Sayur kaya akan vitamin dan mineral yang berfungsi untuk meningkatkan imunitas tubuh dan mencegah terjadinya penyakit. Buah-buahan kaya akan vitamin dan asam amino, tetapi sangat mudah rusak. Di bawah beberapa penelitian penerapan pengeringan beku pada pangan nabati sayuran dan buah. Parameter liofilisasi dan sifat fisik produk akhir disajikan pada Tabel 1.

1) Terong

Mbondo *et al.* (2018) meneliti efek dari 4 metode pengeringan kekeringan terhadap kadar total fenolik, karoten, kapasitas antioksidan dan likopen pada terong Afrika. *Freeze drying* memiliki keunggulan tingkat retensi total fenol (95,05%), hasil ini jauh lebih baik dibanding pengeringan sinar matahari, pengeringan vakum dan pengeringan oven. Kemungkinan dikarenakan dalam proses pengeringan beku sangat kecil terjadinya perubahan kimia, enzimatis, maupun bakteri.

2) Beetroot

Hamid dan Nour (2018) menerapkan 3 jenis pengeringan pada potongan beetroot (pengeringan matahari, pengeringan panas, dan pengeringan beku). Parameter yang diukur adalah komposisi kimia, nitrat dan betaine dari beetroot segar dan beetroot kering. Hasil menunjukkan bahwa komposisi kimia dan kandungan mineral di dari *freeze-dried* beetroot lebih tinggi dibandingkan di beetroot yang dikeringkan dengan pengeringan konvensional. Aktivitas bioaktif senyawa dan antioksidan *freeze-dried* beetroot juga lebih tinggi. Selain itu, *freeze-dried*

beetroot tidak mengalami perubahan karakteristik warna signifikan.

3) Blueberry

Reyes, *et al.* (2011) melakukan *freeze drying* (jenis vakum dan jenis atmosferik) pada blueberry pada kondisi -48 °C dan 60 Pa. Hasil menunjukkan asam askorbat menurun pada blueberry kering beku dibandingkan dengan buah segar, sementara polifenol menurun pada *atmospheric freeze-drying*, berbanding terbalik dengan *vacuum freeze-drying*, dimana kadar polifenol justru meningkat. Blueberry kering beku tidak menunjukkan penurunan aktivitas antioksidan yang signifikan bila dibandingkan dengan blueberry segar. Thi, *et al.* (2017) menunjukkan tingkat pembekuan berpengaruh pada penampilan dan aroma blueberry. Semakin lambat kecepatan pembekuannya, semakin gelap warnanya, semakin kecil volume produk beku-kering, dan semakin tinggi volatilitas komponen aromatik.

Munzenmayer, *et al.* (2020) mempelajari efek penerapan mikroperforasi laser CO₂ pada kulit blueberry sebelum pengeringan beku. Hasilnya menunjukkan bahwa waktu pengeringan primer berkurang secara signifikan dari 17 jam untuk buah beri segar, tetapi penerapan 9 lubang mikroperforasi mereduksi waktu yang diperlukan adalah 13 jam, tidak terjadi perubahan signifikan pada penampakan buah. Pada saat yang sama, kualitas buah juga meningkat secara signifikan, karena persentase blueberry yang tidak rusak pada akhir proses meningkat dari 47% menjadi 86%.

4) Mulberry (Murbei Hitam)

Chen, *et al.* (2017) mempelajari efek dari metode pengeringan yang berbeda pada sifat fisikokimia, kandungan nutrisi dan kapasitas antioksidan murbei hitam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pengeringan beku dapat menjaga kadar air buah murbei pada level yang rendah tingkat rendah dan memiliki tingkat rehidrasi terbaik. Selain itu, *freeze-dried* murbei memiliki kualitas sensorik dan warna yang bagus, dan kandungan vitaminnya C, total fenol dan antosianin pada murbei hasil pengeringan beku lebih tinggi dibanding pengeringan lainnya.

Tabel 1. Parameter Liofilisasi dan Sifat Produk Kering Beku

Bahan	Ukuran dan Bentuk	Parameter Pembekuan	Suhu Rak	Tekanan	Waktu Pengeringan	Sifat Bahan	Referensi
Apel	Disk silinder (diameter 2,5 cm dan tinggi 0,7)	-40 °C	-45, -30, -20, -10, -5, 0, 10, dan 15 °C	100 Pa	72 jam	Peningkatan suhu rak pada kisaran -45-15 °C menyebabkan peningkatan porositas semu dari 0,876 menjadi 0,910.	Sablani & Rahman (2002)
	Semi sirkuler (panjang 55 mm, tebal 2,2-2,5 mm)	-25 °C	25 °C tahap 1 pengeringan, 40 °C tahap 2 pengeringan	20 Pa tahap 1 pengeringan, 5 Pa tahap 2 pengeringan	24 jam	Kadar air berkorelasi negatif dengan kekerasan apel kering beku. Penerapan pengeringan beku menghasilkan kekenyalan lebih rendah dibandingkan dengan metode <i>air-drying</i> . Selain itu, perbedaan warna ΔE apel kering beku (11,37) lebih rendah dibandingkan apel hasil <i>air-dried</i> (21.11).	Djekic <i>et al.</i> (2018)
	<i>Puree</i> —lapisan dengan ketebalan 4mm	-40 °C	20 °C	63 Pa	24 jam	<i>Puree</i> apel dikeringkan beku pada suhu 20 °C mengabsorpsi lebih sedikit air dibandingkan sampel <i>air-dried</i> . Penerapan pengeringan beku memungkinkan diperolehnya <i>puree</i> dengan	Jakubczyk <i>et al.</i> (2010)

						higroskopisitas lebih rendah dibandingkan hasil pengeringan <i>microwave</i> .	
Pisang	Silinder (diameter 20mm dan panjang 8mm)	-35 °C (48 jam), durasi 1 jam dalam cairan N ₂	Suhu produk dari -50 hingga -8 °C	3–300 Pa	24 jam	Nilai <i>bulk density</i> menurun setelah pengeringan beku dari 1900 kg·m ⁻³ ke 400 kg·m ⁻³ . Nilai <i>bulk density</i> meningkat (±30%) seiring peningkatan suhu -50 hingga -8 °C. Porositas pisang kering beku paling tinggi pada suhu rendah -50 °C (~0,9).	Krokida <i>et al.</i> (1998)
Wortel	Silinder (diameter 20mm dan tinggi 8mm)	-35 °C (48 jam), durasi 1 jam dalam cairan N ₂	Suhu produk dari -50 hingga -5 °C	3–300 Pa	24 jam	Nilai <i>bulk density</i> wortel menurun setelah pengeringan beku dari 1750 kg·m ⁻³ ke 250 kg·m ⁻³ . Nilai <i>bulk density</i> meningkat (±40%) seiring peningkatan suhu -50 hingga -8 °C. Porositas wortel kering berkurang ±10% setelah pengeringan pada suhu lebih tinggi	Krokida <i>et al.</i> (1998)
Buah Naga	Potongan dengan ketebalan 1 cm	-40 °C pembekuan cepat (<i>air blast freezer</i> dan <i>contact plate freezer</i>)	-5 °C pada pengeringan primer, 30, 40, dan 50 °C pada pengeringan sekunder	40 Pa	50 jam pada 30 °C, 55 jam pada 40 °C, 60 jam pada 50 °C	Densitas buah naga kering beku adalah 0,16, 0,19, dan 0,08 g × cm ⁻³ pada suhu pengeringan 30, 40, dan 50 °C.	Mawilai <i>et al.</i> (2017)

						Kekerasan buah kering menurun dari 9,26 menjadi 4,33 N dan kerenyahan meningkat dari 6,83 menjadi 10,56 seiring dengan meningkatnya suhu pemanasan.	
Terong	Kubus sisi 9 mm	-40 °C	1 set: -30, -15, dan 0 °C Tahap 1 pengeringan, 20 °C pada tahap 2 pengeringan 2 set: -30 dan 0 °C pada set pertama pengeringan, 20 °C pada tanggal 2 langkah pengeringan	1 set: 10 Pa 2 set: 10, 20, dan 40 Pa	1 set: 7-15,3 jam 2 set: 14-20,9 jam	Hilangnya kapasitas antioksidan masing-masing sebesar 49,9 dan 68,6%. sampel beku-kering dikeringkan masing-masing pada suhu -30 dan 0 °C. Peningkatan suhu pengeringan dari -30 menjadi 0 °C menyebabkan hilangnya asam askorbat dari 37,9 menjadi 12,2%. Polifenol total kandungan—TPC—dalam produk kering dipertahankan pada tingkat yang lebih tinggi tekanan. Hilangnya TPC adalah 32,5% pada 40 Pa dan 47,7% pada 10 Pa	Harguindeguy <i>et al.</i> (2019)

Pengaruh Kondisi Pengeringan Beku terhadap Sifat Fisik Bahan yang Dipilih

Perubahan fisikokimia dan struktural produk makanan selama pemrosesan dapat terjadi secara signifikan mempengaruhi kualitas produk akhir. Perubahan warna dan kurangnya stabilitas warna adalah masalah penting yang terjadi selama pengolahan dan penyimpanan makanan. Selain itu, prosedur pengolahan berdampak pada porositas, tekstur, rasa, retensi nutrisi, dan penyerapan bahan (Khalloufi & Ratti, 2003).

Aplikasi dari proses pengeringan menyebabkan banyak perubahan dalam sifat fisik, kimia, dan nutrisi makanan (Bhatta, *et al.*, 2020). Pengeringan beku adalah proses yang tidak terlalu merusak dibandingkan pengeringan udara dan pengeringan semprot (Andrieu & Vessot, 2018). Oleh karena itu, liofilisasi diakui sebagai metode dehidrasi makanan terbaik (Hammami, *et al.*, 1999). Pengendalian laju pembekuan, tingkat suhu, tekanan gas total, dan kadar air rata-rata akhir diperlukan untuk mendapatkan produk kering beku dengan kualitas yang memadai (Andrieu & Vessot, 2018).

Suhu Penyimpanan

Parameter proses pengeringan beku dapat secara signifikan memengaruhi banyak atribut kualitas makanan dan bahan lain yang mengalami dehidrasi seperti ini. Suhu lempeng pemanas adalah salah satu parameter yang berperan penting dalam pembentukan struktur bahan selama pengeringan beku. Perubahan yang tidak diinginkan dalam struktur bahan dapat disebabkan oleh suhu yang tidak sesuai diterapkan dalam proses (Duan, *et al.*, 2016). Kerusakan struktur yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan laju pengeringan beku selama pengeringan sekunder, serta banyaknya atribut produk yang rusak seperti tekstur, porositas, volume, bentuk, kelengkungan, kapasitas rehidrasi, dan stabilitas (Patel, *et al.*, 2010; Tang, *et al.*, 2004). Alves dan Roos (2006) menunjukkan bahwa kondisi yang tepat untuk proses pengeringan beku telah diidentifikasi oleh banyak peneliti dengan menggunakan metode trial and error. Bahan makanan berbeda dalam hal struktur, kadar air awal, dan komposisi, sehingga sulit untuk memprediksi perilaku mereka selama pengeringan beku. Namun, Antelo, *et al.*, (2012) mengusulkan pendekatan yang berbeda berdasarkan kombinasi pemodelan dinamis dengan kontrol *off-line* dan *on-line* yang efisien

dan dioptimalkan dari pengeringan beku proses pengeringan beku untuk mendapatkan kualitas produk yang dibutuhkan.

Tekanan pada Chamber

Penerapan parameter kerja liofilisasi yang memadai, termasuk kerja tekanan, dapat secara signifikan mempengaruhi jalannya proses tetapi juga kualitas produk yang diperoleh produk (Wu, *et al.*, 2019). Pure jeruk dikeringkan dengan cara dibekukan pada tekanan yang berbeda di dalam ruangan (5 dan 100 Pa). Pengaruh tekanan yang signifikan terhadap atribut warna diamati. Tekanan rendah menyebabkan ke nilai yang lebih tinggi dari lightness L^* dan nilai yang lebih rendah dari chroma C^* . Sampel yang dikeringkan pada tekanan yang lebih tinggi lebih gelap dan memiliki warna jenuh. Peningkatan tekanan kerja dari 12 menjadi 100 Pa menghasilkan penurunan L^* , serta peningkatan kekuningan dan kehijauan kiwi kering beku (Domin, *et al.*, 2020; Udomkun, *et al.*, 2018). Udomkun, *et al.* (2018) melakukan pengeringan beku irisan pepaya pada tiga tingkat tekanan ruang yang berbeda dan pada suhu rak yang konstan yaitu 20°C. Semua indeks warna serupa untuk sampel yang dikeringkan pada tekanan kerja 28 dan 77 kPa. Penerapan tekanan yang lebih rendah sebesar 9 kPa menyebabkan peningkatan nilai L^* , b^* , dan ΔE (perbedaan warna total) tetapi penurunan nilai a^* . Hammami dan Rene (1999) juga mengamati penurunan nilai L^* pada tekanan yang lebih tinggi untuk stroberi kering beku, dan disertai dengan penyusutan sampel yang signifikan. Tekanan yang diberikan selama pengeringan beku harus lebih rendah dari 50 Pa untuk mengurangi penyusutan buah sampel, seperti stroberi.

Tekanan memiliki dampak yang kuat pada proses sublimasi, terutama suhu es sublimasi. Proses penghilangan es secara sublimasi menciptakan pori-pori dan celah dengan karakteristik yang berbeda-beda. Oleh karena itu, porositas, densitas, dan kadar air akhir yang diinginkan dapat diperoleh dengan memanipulasi parameter pengeringan beku. Pengkarakterisasi struktur, seperti kepadatan dan porositas, dapat mencirikan tekstur kering produk. Selain itu, pembentukan pori-pori dan distribusinya dalam produk selama pengeringan memungkinkan seseorang untuk merancang proses dan mempengaruhi banyak sifat yang berbeda, seperti sifat tekstur makanan.

Tekanan operasi yang berbeda memiliki sedikit pengaruh pada kekuatan pematangan puree jeruk kering, meskipun pengaruhnya signifikan secara statistik. Para peneliti menduga bahwa tekanan proses yang lebih rendah dapat menghasilkan produk kering dengan tekstur yang lebih tahan patah (Silva-Espinoza, *et al.*, 2019). Sebaliknya, Domin, *et al.* (2020) mencatat bahwa tekanan yang lebih rendah menyebabkan penurunan gaya penetrasi. Gaya yang lebih tinggi yang tercatat untuk sampel kiwi yang diperoleh pada tekanan yang lebih tinggi terkait dengan keruntuhan struktur selama pengeringan beku. Proses ini dilakukan tanpa pemanasan pelat. Oleh karena itu, peningkatan tekanan menyebabkan peningkatan suhu pengeringan beku yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sampel.

Laju Pembekuan

Pembekuan bahan sebelum proses sublimasi juga merupakan langkah penting dalam pembuatan produk beku-kering. Laju pembekuan memengaruhi struktur bahan yang dibekukan dan dikeringkan. Atribut warna pure jeruk kering beku, yang dibekukan dengan kecepatan lambat (-45 °C dalam freezer konvensional) dan laju cepat (-38 °C dalam *blast freezer*), dicirikan oleh nilai rata-rata yang sama. Tingkat pembekuan juga tidak secara signifikan mempengaruhi tekstur.

Selain itu, proses yang lambat dan pembekuan cepat tidak mempengaruhi indeks warna dan tekstur sampel wortel kering beku. Namun, penerapan pembekuan cepat dalam nitrogen cair alih-alih pembekuan lambat (freezer rumah tangga pada suhu -15 °C) mengurangi penyusutan sampel wortel kering-beku dari 3,2% menjadi 2,2% (Reyes, *et al.*, 2008).

Pengaruh laju pembekuan terhadap sifat-sifat produk kering-beku dapat dikaitkan dengan struktur awal dan komposisi bahan. Genin dan Rene (1996) telah melaporkan bahwa tekstur, tingkat kematangan, dan kadar air dalam jaringan tanaman memiliki dampak yang cukup besar pada proses pengeringan beku. Kepadatan pengepakan, ketinggian lapisan produk, permukaan produk, dan kapasitas kondensor juga dapat mempengaruhi laju pengeringan beku.

SIMPULAN

Pengeringan beku banyak digunakan untuk mengeringkan pangan nabati termasuk buah-buahan, sayuran, rempah-rempah, dan bahkan beberapa makanan nontradisional. Meskipun

membutuhkan waktu pemrosesan yang lama dan merupakan metode pengeringan yang mahal, metode pengeringan beku lebih disukai karena kualitas akhir yang tinggi karena dapat mempertahankan kualitas gizi jika dibandingkan dengan metode dehidrasi lainnya, terutama jika dioperasikan dalam kondisi vakum. Perlu adanya pemahaman terkait perubahan yang akan dialami oleh bahan pangan yang dipilih pada setiap tahap pengeringan beku, dan parameter setiap tahap harus dipilih berdasarkan kekhususan bahan baku. Pemilihan kondisi yang tepat untuk pengeringan beku suatu bahan makanan harus dilakukan berdasarkan karakteristik bahan baku, seperti komposisi (kadar air, keberadaan gula, protein, dan senyawa bioaktif), jenis bahan (jaringan, bahan cair, bahan semi-cair, dan gel), dan suhu transisi gelas bahan makanan. Pemilihan parameter pengeringan beku kadang-kadang berubah-ubah, tetapi harus didasarkan pada penelitian pendahuluan karena setiap bahan makanan memiliki karakteristik yang berbeda, dan tidak mungkin menggunakan beberapa parameter pengeringan beku untuk semua jenis makanan. Kontrol dari suplai panas diperlukan agar tidak melebihi titik leleh, yang dapat menyebabkan degradasi bahan. Kontrol seperti itu akan memastikan waktu pengeringan yang lebih singkat dan konsentrasi air terikat yang lebih seragam akhir pengeringan sekunder. Hal ini merupakan cara untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, G.D.J.; Cook, I.; Ward, K.R. (2015). The Principles of Freeze-Drying. In Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols, 3rd ed.; Wolters, W.F., Oldenhof, H., Eds.; Humana Press Inc.: Totowa, NJ, USA.; Volume 1257, pp. 121–143.
- Andrieu, J.; Vessot, S. (2018). A review on experimental determination and optimization of physical quality factors during pharmaceutical freeze-drying cycles. *Dry. Technol.*, 36: 129–145
- Assegehegn, G.; Brito-de la Fuente, E.; Franco, J.M.; Gallegos, C. (2019). The importance of understanding the freezing step and its impact on freeze-drying process performance. *J. Pharm. Sci.*, 108: 1378–1395

- Babic, J.; Cantalejo, M.J.; and Arroqui, C. (2009). The effects of freeze-drying process parameters on Broiler chicken breast meat. *LWT - Food Science and Technology*, 42: 1325–1334.
- Bhatta, S.; Stevano, T.; and Ratti, C. (2019). Freeze-drying of maple syrup: Efficient protocol formulation and evaluation of powder physicochemical properties. *Drying Technology*, 38: 1138-1150. DOI: 10.1080/07373937.2019.1616751.
- Bhatta, S.; Janezic, T.S.; Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant-based foods. *Foods*, 9, 22.
- Cheng-Hai, X. U.; Z. Shi-Wei; P. Run-Ling, and Z. Zhi-Jun. (2008). Today and tomorrow of vacuum freeze-drying technology(II). *Vacuum*, 3:1–13.
- Ciurzyński, A.; Lenart, A. (2011). Freeze-Drying - Application in Food Processing and Biotechnology - A Review *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 61(3): 165-171.
- Djekic, I.; Tomic, N.; Bourdoux, S.; Spilimbergo, S.; Smigic, N.; Udovicki, B.; Hofland, G.; Devlieghere, F.; Rajkovic, A. (2018). Comparison of three types of drying (supercritical CO₂, air and freeze) on the quality of dried apple—Quality index approach. *LWT*, 94: 64–72.
- Domin, M.; Dziki, D.; Kłapsia, S.; Blicharz-Kania, A.; Biernacka, B.; Krzykowski, A. (2020). Influence of the freeze-drying conditions on the physicochemical properties and grinding characteristics of kiwi. *Int. J. Food Eng.* 16.
- Duan, X.; Liu, W.C.; Ren, G.Y.; Liu, L.L.; Liu, Y.H. (2016). Browning behavior of button mushrooms during microwave freeze-drying. *Dry. Technol.*, 34: 1373–1379
- Egas-Astudillo, L.A.; Martínez-Navarrete, N.; Camacho, M.M. (2020). Impact of biopolymers added to a grapefruit puree and freeze-drying shelf temperature on process time reduction and product quality. *Food Bioprod. Process.* 120: 143–150.
- Fardet, A. (2017). New Concepts and Paradigms for the Protective Effects of Plant-Based Food Components in F. Mariotti (Ed.). *Relation to Food Complexity in Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* 1st edition. Academic Press: New York, USA, pp. 293-312.
- FAO/WHO. (2004). *Fruit and Vegetables for Health: Report of a Joint FAO/WHO Workshop*; FAO/WHO: Kobe, Japan.
- Franks, F.; Auffret, T. (2008). *Freeze-Drying of Pharmaceuticals and Biopharmaceuticals*; RSC Publishing: Cambridge, UK, p. 218.
- Hammami, C.; Rene, F.; Marin, M. (1999). Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 34: 145–160.
- Hamid, M. G.; and A. A. A. M. Nour. (2018). Effect of different drying methods on quality attributes of beetroot (*Beta vulgaris*) slices. *World Journal of Ence Technology and Sustainable Development*, 15 (5):287–298. doi: 10.1108/WJSTSD-11-2017-0043
- Harguindeguy, M.; Bobba, S.; Colucci, D.; Fissore, D. (2019). Effect of vacuum freeze-drying on the antioxidant properties of eggplants (*Solanum melongena* L.). *Dry. Technol.*, 1–16.
- Haseley, P.; Oetjen, G.W. (2018). *Freeze-Drying*; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, p. 421.
- Jakubczyk, E.; Ostrowska-Ligeza, E.; Gondek, E. (2010). Moisture sorption characteristics and glass transition temperature of apple puree powder. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 45: 2515–2523.
- Khalloufi, S.; Ratti, C. (2003). Quality deterioration of freeze-dried foods as explained by their glass transition temperature and internal structure. *J. Food Sci.*, 68, 892–903.
- Krokida, M.K.; Karathanos, V.T.; Maroulis, Z.B. (1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *J. Food Eng.*, 35, 369–380.
- Krzykowski, A.; Dziki, D.; Rudy, S.; Gawlik-Dziki, U.; Polak, R.; Biernacka, B. (2018). Effect of pre-treatment conditions and freeze-drying temperature on the process kinetics and physicochemical properties of pepper. *LWT*, 98, 25–30.

- Liu, Y., Zhang, Z., & Hu, L. (2021). High efficient freeze-drying technology in food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-18. DOI:10.1080/10408398.2020.1865261
- Liu, Y.Z.; Zhao, Y.F.; Feng, X. Exergy analysis for a freeze-drying process. (2008). *Appl. Therm. Eng.*, 28: 675–690.
- Mawilai, P.; Chaloeichitratham, N.; Pongsuttiyakorn, T.; Pornchaloempong, P. Effect of Final Drying Condition on Qualities of Freeze Dry Dragon Fruit (*Hylocercus undatus*). In *Proceedings of the 18th TSAE National Conference and 10th TSAE International Conference*, Bangkok, Thailand, 7–9 September 2017; pp. 66–70.
- Martinez-Navarrete, N.; Salvador, A.; Oliva, C.; Camacho, M.M. (2019). Influence of biopolymers and freeze-drying shelf temperature on the quality of a mandarin snack. *LWT*, 99, 57–61.
- Mbondi, N. N., W. O. Owino, J. Ambuko, and D. N. Sila. (2018). Effect of drying methods on the retention of bioactive compounds in African eggplant. *Food Ence & Nutrition*, 6 (6):1–10. doi: 10.1002/fsn3.623.
- Meda, L.; Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *J. Food Process Eng.*, 28: 233–246.
- Mellor, J.D. (1978). *Fundamentals of Freeze-Drying*; Academic Press Inc.: London, UK, p. 386.
- Munzenmayer, P.; Ulloa, J.; Pinto, M.; Ramírez, C.; Valencia, P.; Simpson, R.; Almonacid, S. (2020). Freeze-drying of blueberries: effects of carbon dioxide (CO₂) laser perforation as skin pretreatment to improve mass transfer, primary drying time, and quality. *Foods*, 9: 211.
- Patel, S.M.; Doen, T.; Pikal, M.J. (2010). Determination of end point of primary drying in freeze-drying process control. *AAPS Pharm Sci Tech*, 11: 73–84
- Perera, C.O. (2005). Selected quality attributes of dried foods. *Drying Technology*, 23 (4), 717–730
- Prosapio, V.; Norton, I.T.; Lopez-Quiroga, E. (2020). Freeze-dried gellan gum gels as vitamin delivery systems: modelling the effect of pH on drying kinetics and vitamin release mechanisms. *Foods*, 9, 329.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *J. Food Eng.*, 49, 311–319.
- Reyes, A.; A. Evseev; A. Mahn; V. Bubnovich; R. Bustos, and E. Scheuermann. (2011). Effect of operating conditions in freeze-drying on the nutritional properties of blueberries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62 (3):303–306. doi: 10.3109/09637486.2010.534078.
- Rindler V.; Lüneberger S.; Schwindke P.; Heschel I.; Rau G. (1999). Freeze-drying of red blood cells at ultra-low temperatures. *Cryobiology*, 38: 2–15.
- Santos, P.H.S, & Silva, M.A. 2008. Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables—A Review. *Drying Technology: An International Journal*, 26:12, 1421-1437, DOI: 10.1080/07373930802458911.
- Sablani, S.S.; Rahman, M.S. (2002). Pore formation in selected foods as a function of shelf temperature during freeze drying. *Dry. Technol.*, 20: 1379–1391.
- Sablani, S.S. (2006). Drying of Fruits and Vegetables: Retention of Nutritional/Functional Quality. *Dry. Technol.*, 24: 123–135
- Silva-Espinoza, M.A.; Ayed, C.; Foster, T.; Camacho, M.D.M.; Martínez-Navarrete, N. (2019). The Impact of Freeze-Drying Conditions on the Physico-Chemical Properties and Bioactive Compounds of a Freeze-Dried Orange Puree. *Foods*, 9: 32.
- Tang, X.; Pikal, M. J. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice. *Pharm. Res.*, 21: 191–200. DOI: 10.1023/B:PHAM.0000016234.73023.75
- The Vegan Society. Statistics. Available online: <https://www.vegansociety.com/news/media/statistics> (accessed on 20 October 2023).

- Thi, N. H.; T. Seishu; B. Takuya; and C. Tadashi. (2017). Effects of prior freezing conditions on the quality of blueberries in a freeze-drying process. *Transactions of the ASABE* 60 (4):1369–1377. doi: 10.13031/trans.12153.
- Tang, X.L.; Pikal, M.J. (2004). Design of freeze-drying processes for pharmaceuticals: Practical advice. *Pharm. Res.*, 21, 191–200.
- Udomkun, P.; Argyropoulos, D.; Nagle, M.; Mahayothee, B.; Oladeji, A.E.; Müller, J. (2018). Changes in microstructure and functional properties of papaya as affected by osmotic pre-treatment combined with freeze-drying. *J. Food Meas. Charact.*, 12: 1028–1037.
- Wu, X.F.; Zhang, M.; Bhandari, B. (2019). A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris*. *Innov. Food Sci. Emerg.*, 54: 34–42.
- Zhang, Q. L., and Y. Huang. (2011). Study on process parameters of mulberry vacuum drying. *Agricultural Products Processing*, 2:57–59.