

KAJIAN TEKNOLOGI PEMBEKUAN CEPAT UNTUK MEMPERTAHANKAN MUTU ALPUKAT (*Persea americana Mill.*)

RIZKI JUNAWAN PUTRA



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Kajian Teknologi Pembekuan Cepat Untuk Mempertahankan Mutu Alpukat (*Persea americana* Mill.)” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Rizki Junawan Putra
F1401221057



ABSTRAK

Rizki Junawan Putra. Kajian Teknologi Pembekuan Cepat Untuk Mempertahankan Mutu Alpukat (*Persea americana Mill.*). Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Rokhani Hasbullah, Msi. dan Dr. Indah Yuliasih, S.T.P., M.Si.

Alpukat (*Persea americana Mill.*) merupakan buah klimakterik berkadar air tinggi yang mudah mengalami penurunan mutu setelah panen. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh bentuk bahan dan metode pembekuan serta menentukan perlakuan terbaik dalam mempertahankan mutu alpukat beku. Penelitian menggunakan alpukat Miki dari Kebun Alpukat Miki Fresh, Kabupaten Bogor. Daging buah diolah menjadi bentuk pasta dan dadu, dikemas dalam plastik LDPE (± 80 g), kemudian dibekukan menggunakan *air blast freezer* (ABF) bersuhu -40°C atau *chest freezer* (CF) bersuhu -18°C . Sampel diamati pada hari ke-5 (H5) dan hari ke-10 (H10). Parameter yang diamati meliputi laju penurunan suhu, *Chroma*, *Hue angle*, pH, total padatan terlarut (TPT), kadar air, dan uji organoleptik. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap faktorial dua faktor dengan tiga ulangan. Data dianalisis menggunakan analisis ragam, uji Duncan, uji Friedman, dan metode De Garmo. Pada H10, bentuk bahan berpengaruh nyata terhadap *Hue angle*, pH, dan TPT, sedangkan interaksi kedua faktor berpengaruh nyata terhadap *Chroma*, pH, dan TPT; kadar air tidak berbeda nyata. ABF menghasilkan laju penurunan suhu tercepat. Uji Friedman menunjukkan hanya penerimaan keseluruhan berbeda nyata ($p = 0,032$). Berdasarkan metode De Garmo, perlakuan dadu-ABF merupakan perlakuan terbaik dengan nilai efektivitas 0,617 dan mampu mempertahankan mutu alpukat beku mendekati kondisi segar.

Kata kunci: *air blast freezer*, alpukat Miki, mutu fisikokimia, organoleptik, pembekuan.

ABSTRACT

Rizki Junawan Putra. A Study of Rapid Freezing Technology for Maintaining the Quality of Frozen Avocado (*Persea americana* Mill.). Supervised by Prof. Dr. Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si. and Dr. Indah Yuliasih, S.T.P., M.Si.

Avocado (*Persea americana* Mill.) is a climacteric fruit with high moisture content and rapid quality deterioration. This study evaluated the effects of material form and freezing method and determined the best treatment for maintaining avocado quality. Miki avocado obtained from Miki Fresh Avocado Farm, was processed into paste and diced forms, packed in LDPE plastic (approximately 80 g), and frozen using an air blast freezer (ABF) at -40°C or a chest freezer (CF) at -18°C . Samples were evaluated on day 5 (H5) and day 10 (H10). Parameters included cooling rate, Chroma, Hue angle, pH, total soluble solids (TSS), moisture content, and organoleptic evaluation. The experiment used a two-factor completely randomized design with three replications. Data were analyzed using analysis of variance, Duncan's, Friedman's, and De Garmo methods. At H10, material form significantly affected Hue angle, pH, and TSS, while factor interaction significantly affected Chroma, pH, and TSS; moisture content was not significantly different. ABF produced the fastest cooling rate. Friedman's test showed only acceptance differed significantly ($p = 0.032$). Based on the De Garmo method, diced avocado frozen using ABF was the best treatment, with an effectiveness value of 0.617, indicating the closest overall quality to fresh avocado.

Keywords: air blast freezer, freezing, Miki avocado, physicochemical quality, sensory evaluation.





@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**KAJIAN TEKNOLOGI PEMBEKUAN CEPAT UNTUK
MEMPERTAHANKAN MUTU ALPUKAT
(*Persea americana Mill.*)**

RIZKI JUNAWAN PUTRA

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:
1. Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.T.P, M.Si



Judul Skripsi : Kajian Teknologi Pembekuan Cepat Untuk Mempertahankan
Mutu Alpukat (*Persea americana Mill.*)
Nama : Rizki Junawan Putra
NIM : F1401221057

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si.
NIP 19640813 1991021 001



Pembimbing 2:
Dr. Indah Yuliasih, S.T.P., M.Si.
NIP 19700718 1995122 001

Diketahui oleh

Ketua Program Studi Teknik Pertanian
dan Biosistem:
Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso M.Sc.Agr.
NIP 19590720 198601 1 002

Tanggal Ujian:
28 Juli 2026

Tanggal Lulus:

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

@Hak cipta milik IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Desember 2025 sampai bulan Juli 2026 ini ialah metode pembekuan cepat, dengan judul “Kajian Teknologi Pembekuan Cepat Untuk Mempertahankan Mutu Alpukat (*Persea americana* Mill.)” Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa kelancaran dalam penyusunan skripsi ini tidak lain berkat bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si. selaku dosen pembimbing pertama atas bimbingan, arahan, masukan, saran dan ilmu pengetahuan yang telah diberikan kepada penulis sehingga menyelesaikan skripsi ini.
2. Dr. Indah Yuliasih, S.T.P., M.Si. selaku dosen pembimbing kedua atas bimbingan, arahan, masukan, saran dan ilmu pengetahuan yang telah diberikan kepada penulis sehingga menyelesaikan skripsi ini.
3. Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.T.P, M.Si selaku dosen penguji atas saran serta masukan yang diberikan untuk kesempurnaan skripsi ini.
4. Dr. Ir. Radite Praeka Agus Setiawan M.Agr. selaku moderator pada saat sidang skripsi.
5. Prof. Dr. Ir. Usman Ahmad, M.Agr. selaku kepala Lab. TPPHP dan Pak Bhaskara serta Bu Khania yang telah memberikan izin, arahan, dan saran kepada penulis selama pelaksanaan penelitian serta seluruh staff UPT TMB IPB yang telah membantu dalam proses administrasi.
6. Keluarga tercinta, Tri Yulianto, Isdiyati, Anjas Septanindo, dan seluruh keluarga besar yang turut mendukung proses belajar hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Tsabit, Tia, Dede selaku teman sebimbingan, Aldo, Moniqa, Heni, Dira yang telah memberikan saran, masukkan, serta dukungan proses penelitian.
8. Teman-teman UKM MAX!!, teman-teman Teknik Mesin dan Biosistem Angkatan 59, sahabat, serta semua yang membantu dan memberi dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan baik.

Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi masyarakat luas serta pengembangan khazanah ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Rizki Junawan Putra



x

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Kriteria Alpukat Miki	3
2.2 Perubahan Bentuk Bahan	4
2.3 Pembekuan	5
2.4 Mekanisme Perubahan Mutu Alpukat Miki Beku	7
2.5 Produk Alpukat Beku	8
III METODE	10
3.1 Waktu dan Tempat	10
3.2 Alat dan Bahan	10
3.3 Prosedur Kerja	10
3.4 Rancangan Percobaan	12
3.5 Metode Analisis	13
3.6 Penentuan Kombinasi Perlakuan Terbaik	16
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	18
4.1 Karakteristik Alpukat Segar	18
4.2 Proses Pembekuan Alpukat	19
4.3 Karakteristik Alpukat Beku	24
4.4 Neraca Massa Proses Pembekuan Alpukat	35
4.5 Penentuan Kombinasi Perlakuan Terbaik	36
4.6 Saran Penyajian Produk Jus Alpukat Beku	39
V SIMPULAN DAN SARAN	40
5.1 Simpulan	40
5.2 Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41
RIWAYAT HIDUP	60

DAFTAR TABEL

1	Komposisi kandungan alpukat segar per 100 g	4
2	Standar mutu buah alpukat	4
3	Alat dan fungsi penelitian	10
4	Karakteristik mutu alpukat segar	18
5	Waktu pembekuan dan laju penurunan suhu setiap fase pembekuan	21
6	Karakteristik warna daging buah alpukat setelah pembekuan dan <i>thawing</i> pada hari ke-5 dan hari ke-10	25
7	Karakteristik pH daging buah alpukat setelah pembekuan dan <i>thawing</i> pada hari ke-5 dan ke-10	26
8	Karakteristik total padatan terlarut (TPT) daging buah alpukat setelah pembekuan dan <i>thawing</i> pada hari ke-5 dan ke-10	28
9	Karakteristik kadar air daging buah alpukat setelah pembekuan dan <i>thawing</i> pada hari ke-5 dan ke-10	30
10	Tingkat kesukaan panelis terhadap jus alpukat pada berbagai perlakuan	32
11	Uji lanjut Siegel & Castellan pada atribut penerimaan keseluruhan	34
12	Neraca massa penggunaan bahan baku alpukat untuk analisis parameter objektif	35
13	Kriteria penilaian metode De Garmo	37
14	Bobot parameter pada metode De Garmo	37
15	Nilai efektivitas total dan peringkat perlakuan	38

DAFTAR GAMBAR

1	Kurva pembekuan air murni dan bahan pangan (Castell-Perez 2024)	5
2	Kurva penurunan suhu alpukat bentuk pasta dan dadu selama proses pembekuan menggunakan: (a) <i>air blast freezer</i> (ABF) dan (b) <i>chest freezer</i> (CF)	19
3	Produk alpukat beku dalam kemasan	39

DAFTAR LAMPIRAN

1	Diagram alir proses penelitian	45
2	Data hasil pengujian parameter C* H5 beserta analisis ANOVA	46
3	Data hasil pengujian parameter h° H5 beserta analisis ANOVA	47
4	Data hasil pengujian parameter pH H5 beserta analisis ANOVA	48
5	Data hasil pengujian parameter Total Padatan Terlarut (TPT) H5 beserta analisis ANOVA	49
6	Data hasil pengujian parameter Kadar air H5 beserta analisis ANOVA	50
7	Data hasil pengujian parameter C* H10 beserta analisis ANOVA	51

8	Data hasil pengujian parameter h° H10 beserta analisis ANOVA	52
9	Data hasil pengujian parameter pH H10 beserta analisis ANOVA	53
10	Data hasil pengujian parameter Total Padatan Terlarut (TPT) H10 beserta analisis ANOVA	54
11	Data hasil pengujian parameter Kadar air H 10 beserta analisis ANOVA	55
12	Hasil Uji Friedman terhadap Atribut Organoleptik	56
13	Perhitungan deviasi terhadap H10 pada De Garmo	56
14	Perhitungan nilai perlakuan (NP) De Garmo	56
15	Dokumentasi Penelitian	57

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alpukat (*Persea americana* Mill.) merupakan salah satu jenis tanaman hortikultura yang berasal dari kelompok buah klimaterik berwarna hijau (Rahman 2019). Indonesia sendiri merupakan negara penghasil buah alpukat terbesar ke 5 di dunia dengan kapasitas produksi sebesar 304.938 ton (Verti *et al.* 2021). Dengan banyaknya produktivitas alpukat, tentunya komoditas ini bernilai ekonomi tinggi dengan permintaan yang terus meningkat baik pada pasar lokal maupun internasional (Dirjen Hortikultura, Kementerian Pertanian 2022). Hal ini dikarenakan alpukat memiliki kandungan gizi yang beragam, diantaranya karotenoid, lemak, mineral, fenolik, protein, dan vitamin yang mampu membantu memenuhi kebutuhan nutrisi harian tubuh (Hartati *et al.* 2022).

Sebagai buah klimaterik, alpukat masih mengalami fase peningkatan respirasi selama proses pematangan yang ditandai dengan proses pembentukan gas etilena. Menurut Hayati (2022), energi yang dihasilkan dari proses respirasi menyebabkan proses metabolisme sel masih berlangsung. Dikarenakan masih berlangsungnya proses metabolisme tersebut, buah alpukat mengalami perubahan terhadap mutu buah akibat dari adanya pemecahan lemak yang dapat menyebabkan timbulnya bau tak sedap (Wahyudi dan Purwandari 2018). Faktor lain yang mengindikasikan kerusakan buah alpukat adalah dengan terjadinya perubahan warna atau munculnya warna coklat pada daging buah alpukat. Warna coklat ini disebabkan oleh enzim polifenol oksidase (PPO) dan enzim perioksidase (POD) yang membentuk pigmen warna coklat, merah, hitam pada buah-buahan (Aprilliani *et al.* 2021). Kondisi lingkungan penyimpanan buah alpukat yang tidak sesuai juga menjadi penyebab turunnya mutu buah alpukat sehingga tidak dapat dikonsumsi (Nisah dan Barat 2019).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mempertahankan mutu buah alpukat adalah dengan penerapan teknologi pembekuan cepat menggunakan *air blast freezer* (ABF). Berbeda dengan metode pembekuan konvensional seperti *chest freezer* (CF), prinsip kerja alat ini bekerja dengan cara mensirkulasi udara bersuhu sangat rendah berkecepatan tinggi. *freezer* ini berupa ruang atau kabinet yang terisolasi secara termal, di mana udara pada suhu di bawah titik beku dipertahankan untuk menghambat kerusakan produk, keunggulan dari ABF ini adalah pada fleksibilitasnya, dikarenakan alat ini dapat menangani berbagai produk dengan bentuk yang beragam (Ajayi *et al.* 2022). Dari aspek mutu fisik dan kimia, pembekuan cepat umumnya dinilai lebih unggul dibandingkan dengan pembekuan lambat (*slow freezing*), hal ini dikarenakan pada pembekuan cepat mampu membentuk kristal es yang lebih halus sehingga kerusakan mekanis pada bahan pangan menjadi lebih kecil, serta mampu menghentikan pertumbuhan mikroba dan menghambat aktivitas enzim dalam waktu yang lebih singkat (Wisudawaty 2012). Hal tersebut dapat diterapkan pada alpukat dengan karakteristik daging buah yang lembut. Selain itu, efisiensi pembekuan cepat ini masih dapat dioptimalkan lebih lanjut melalui modifikasi bentuk fisik bahan sebelum proses pembekuan dilakukan sebagai perlakuan pendahuluan.

Proses perlakuan pendahuluan merupakan tahapan penting sebelum proses pembekuan. Dalam penelitian ini, perlakuan pendahuluan yang diaplikasikan adalah perubahan bentuk bahan secara fisik. Perubahan tersebut diklasifikasikan ke

dalam dua bentuk, yaitu penghancuran buah menjadi bentuk pasta dan pemotongan menjadi bentuk dadu. Proses ini pada dasarnya bertujuan untuk memperluas permukaan bahan yang kontak dengan suhu dingin, sehingga laju penurunan suhu dapat berjalan lebih cepat dan efisien. Geethu *et al.* (2023) telah menunjukkan bahwa perlakuan pendahuluan berperan besar dalam menjaga mutu alpukat beku, namun penelitian tersebut hanya menggunakan kondisi pembekuan bersuhu -20°C pada *quick freezing*. Padahal, menurut Fellows (2017), pembekuan dengan ABF pada suhu lebih rendah, hingga -40°C , dapat mempercepat pembentukan inti es (*nucleation*) dan menghasilkan kristal es berukuran mikro yang lebih aman bagi struktur sel buah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh bentuk bahan (pasta dan potongan dadu) yang dikombinasikan dengan metode pembekuan menggunakan ABF dan CF, serta mengevaluasi penerimaan sensoris untuk menentukan kondisi optimum yang mampu mempertahankan mutu alpukat beku.

1.2 Rumusan Masalah

Mengetahui bagaimana pengaruh bentuk bahan berupa pasta dan potongan dadu, metode pembekuan menggunakan ABF bersuhu -40°C dan CF bersuhu -18°C , serta interaksi antara kedua faktor terhadap karakteristik mutu alpukat yang meliputi laju penurunan suhu, perubahan warna, pH, total padatan terlarut (TPT), kadar air, dan karakteristik organoleptik.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh bentuk bahan berupa pasta dan potongan dadu, metode pembekuan menggunakan ABF bersuhu -40°C dan CF bersuhu -18°C , serta interaksi antara kedua faktor tersebut terhadap mutu alpukat beku yang meliputi laju penurunan suhu, perubahan warna, pH, total padatan terlarut (TPT), kadar air, dan karakteristik organoleptik.

1.4 Manfaat

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh bentuk bahan dan metode pembekuan yang paling tepat untuk mempertahankan mutu alpukat beku. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meminimalisasi kerusakan mutu produk, baik selama masa penyimpanan maupun saat proses *thawing*. Secara praktis, informasi dari pengujian ini diharapkan mampu memberikan referensi bagi pelaku usaha tani dalam menentukan pengolahan alpukat beku yang lebih efisien.

II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kriteria Alpukat Miki

Tanaman alpukat merupakan komoditas hortikultura yang berasal dari wilayah Amerika Tengah, baik dataran rendah maupun tinggi, dan mulai diperkenalkan di Indonesia sekitar abad ke-18. Secara taksonomi, terdapat dua varietas unggulan yang secara umum dikenal oleh masyarakat, yakni alpukat hijau bundar (*Persea americana* Mill) dan alpukat hijau panjang (*Persea gratissima* Gaertn). Merujuk pada standar mutu nasional (BSN: SNI 01-3168-1992), buah alpukat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori ukuran berdasarkan bobot per buah, yaitu ukuran besar (451–550 g), ukuran sedang (351–450 g), dan ukuran kecil (250–350 g).

Alpukat Miki merupakan salah satu varietas alpukat unggul yang banyak dikembangkan di Indonesia dan termasuk dalam kelompok varietas hijau bundar. Varietas ini cocok dibudidayakan pada daerah dataran rendah dan memiliki beberapa keunggulan, antara lain mampu berbuah pada umur yang relatif muda, tidak bergantung pada musim, serta menghasilkan buah berukuran besar dengan bobot berkisar antara 400–600 g. Buah alpukat ini memiliki daging berwarna kuning, bertekstur tebal, bercita rasa manis, legit, dan tidak getir. Selain itu, tanaman alpukat Miki umumnya berbuah satu kali dalam satu tahun (Dept. AGH, IPB 2010).

Secara ilmiah, tanaman alpukat diklasifikasikan berdasarkan sistem taksonomi. Menurut Ardiansyah (2019), klasifikasi tanaman alpukat diklasifikasikan ke dalam taksonomi sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Subdivisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledoneae
Ordo	: Ranales
Famili	: Lauraceae
Genus	: <i>Persea</i>
Spesies	: <i>Persea americana</i> Mill.

Buah alpukat memiliki beragam manfaat kesehatan yang signifikan, sehingga memerlukan penanganan pascapanen yang tepat seperti pembekuan cepat guna mempertahankan kualitas nutrisinya. Komposisi zat gizi dan mutu yang terkandung dalam buah alpukat dapat dilihat secara rinci pada tabel berikut. Komposisi kandungan alpukat disajikan pada Tabel 1, serta standar mutu buah alpukat disajikan pada Tabel 2.



Tabel 1 Komposisi kandungan alpukat segar per 100 g

Komposisi	Konsentrasi
Air (g)	84,3
Energi (Kal)	85
Protein (g)	0,9
Karbohidrat (g)	7,7
Lemak (g)	6,5
Abu (g)	0,6
Kalsium (mg)	10
Fosfor (mg)	20
Besi (mg)	0,9
Natrium (mg)	2
Kalium (mg)	278
Tembaga (mg)	0,2
Vitamin C (mg)	13

Sumber : KKRI (2018)

Tabel 2 Standar mutu buah alpukat

Karakteristik	Syarat	
	Mutu I	Mutu II
Kesamaan sifat varietas	Seragam	Seragam
Tingkat ketuaan	Tua, tidak terlalu matang	Tua, tidak terlalu matang
Bentuk	Normal	Kurang normal
Tingkat kekerasan	Keras	Keras
Ukuran	Seragam	Kurang Seragam
Tingkat kerusakan maksimum (5%)	5	10
Tingkat pembusukan maksimum (%)	1	2
Kadar kotoran (%)	Bebas	Bebas

Sumber : BSN (SNI 01-3168-1992)

2.2 Perubahan Bentuk Bahan

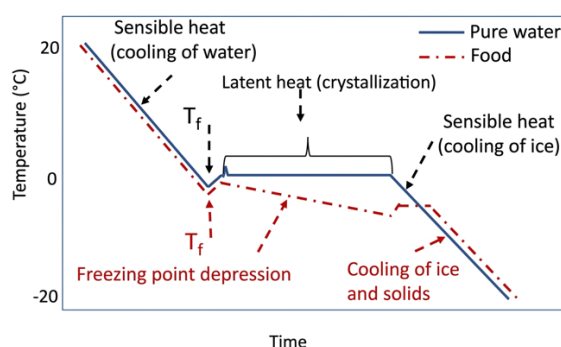
Perubahan bentuk bahan seperti pengecilan ukuran bahan (*size reduction*) merupakan salah satu perlakuan pendahuluan dalam pengolahan pangan yang bertujuan memperoleh ukuran bahan yang sesuai dengan kebutuhan proses selanjutnya (Brennan *et al.* 1974). Perlakuan ini dapat dilakukan melalui proses pemotongan, pengirisan, pencacahan, penghancuran, maupun penghalusan, bergantung pada karakteristik bahan dan produk yang akan dihasilkan. Selain mempermudah proses penanganan, pencampuran, dan pengemasan, pengecilan ukuran juga dapat meningkatkan luas permukaan kontak bahan sehingga perpindahan panas dan massa selama proses pengolahan berlangsung lebih efektif (Kaur *et al.* 2021). Peningkatan luas permukaan tersebut memungkinkan proses pembekuan berlangsung lebih efisien karena hambatan perpindahan panas dari bagian dalam menuju permukaan bahan menjadi lebih kecil.

Dalam proses pembekuan, ukuran bahan berpengaruh terhadap laju pelepasan panas dari bahan menuju media pendingin. Bahan yang memiliki ukuran lebih kecil mempunyai rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar, sehingga

panas dapat dilepaskan lebih cepat dibandingkan bahan berukuran besar (van der Sman 2020). Kondisi tersebut menyebabkan bahan melewati rentang suhu kritis kristalisasi dalam waktu yang lebih singkat sehingga kristal es yang terbentuk cenderung berukuran lebih kecil dan tersebar lebih merata di dalam jaringan (Parandi *et al.* 2022). Pada buah alpukat, perbedaan ukuran dan bentuk bahan diperkirakan memengaruhi laju penurunan suhu karena berkaitan dengan luas permukaan kontak terhadap media pendingin. Perbedaan tersebut berpotensi menghasilkan karakteristik mutu yang berbeda setelah proses pembekuan, terutama pada sifat fisik, kimia, dan sensori.

2.3 Pembekuan

Pembekuan merupakan salah satu metode pengawetan pangan yang dilakukan dengan menurunkan suhu bahan hingga berada di bawah titik bekunya sehingga sebagian besar air dalam bahan berubah menjadi kristal es (Basri *et al.* 2021). Penurunan suhu tersebut mampu memperlambat aktivitas enzim, pertumbuhan mikroorganisme, serta laju reaksi kimia yang menyebabkan kerusakan bahan pangan, sehingga umur simpan produk dapat diperpanjang. Berdasarkan kecepatan prosesnya, pembekuan dapat dibedakan menjadi pembekuan lambat (*slow freezing*) dan pembekuan cepat (*quick freezing*) (Fellows 2017). Perbedaan utama kedua metode tersebut terletak pada laju perpindahan panas, waktu yang diperlukan untuk melewati daerah kristalisasi, serta ukuran kristal es yang terbentuk di dalam jaringan bahan (Parandi *et al.* 2022). Perbedaan karakteristik tersebut berkaitan erat dengan pola penurunan suhu yang terjadi selama proses pembekuan. Oleh karena itu, tahapan pembekuan dapat dipahami melalui kurva pembekuan yang menunjukkan perubahan suhu pada titik pusat bahan terhadap waktu, sebagaimana disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Kurva pembekuan air murni dan bahan pangan (Castell-Perez 2024)

Secara termodinamika, proses pembekuan terdiri atas tiga tahap utama, yaitu tahap pra-pendinginan (*pre-cooling*), tahap pembekuan (*freezing*), dan tahap pendinginan lanjut (*post-freezing*) (Aldoradin *et al.* 2022). Tahap pra-pendinginan (*pre-cooling*) ditandai dengan penurunan suhu bahan hingga mendekati titik bekunya melalui pelepasan panas sensibel (*sensible heat*) dari bahan menuju media pendingin. Setelah mencapai titik beku, proses memasuki tahap pembekuan (*freezing*) yang ditandai dengan perubahan fase air menjadi kristal es melalui pelepasan panas laten (*latent heat*). Setelah sebagian besar air membeku, proses dilanjutkan dengan tahap pendinginan lanjut (*post-freezing*) yaitu penurunan suhu produk beku hingga mencapai suhu penyimpanan yang diinginkan (Aldoradin *et al.*

2022). Lama waktu yang dibutuhkan bahan untuk melewati tahap kristalisasi sangat menentukan ukuran kristal es yang terbentuk. Semakin lama bahan berada pada rentang suhu kritis kristalisasi, semakin besar peluang molekul air bermigrasi dan bergabung membentuk kristal es berukuran besar yang dapat merusak membran maupun dinding sel jaringan.

Kecepatan penurunan suhu bahan selama proses pembekuan merupakan salah satu indikator yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pembekuan suatu bahan. Semakin cepat suhu bahan menurun hingga mencapai suhu target, semakin singkat waktu yang diperlukan untuk melewati rentang suhu kritis pembentukan kristal es, sehingga kristal es yang terbentuk cenderung berukuran lebih kecil, tersebar lebih merata, dan mampu meminimalkan kerusakan jaringan (Kiani 2022). Oleh karena itu, pada penelitian ini karakteristik pembekuan dinyatakan berdasarkan laju penurunan suhu, yaitu perubahan suhu inti bahan terhadap waktu selama proses pembekuan. Dawson *et al.* (2020) menjelaskan bahwa pendekatan tersebut dapat dinyatakan sebagai perubahan suhu produk terhadap waktu pembekuan dalam satuan °C/menit atau °C/jam, bergantung pada satuan waktu yang digunakan. Dengan demikian, laju penurunan suhu dapat digunakan sebagai indikator untuk membandingkan kecepatan proses pembekuan antar perlakuan, di mana nilai yang lebih besar menunjukkan proses penurunan suhu berlangsung lebih cepat. Secara umum, semakin tinggi laju penurunan suhu, semakin cepat bahan melewati fase kristalisasi sehingga kualitas produk beku cenderung lebih baik.

Berdasarkan karakteristik perpindahan panas selama proses pembekuan, metode pembekuan secara umum dibedakan menjadi pembekuan lambat (*slow freezing*) dan pembekuan cepat (*quick freezing*) (Halimah 2021). Perbedaan utama kedua metode tersebut terletak pada kecepatan perpindahan panas yang memengaruhi laju penurunan suhu bahan selama proses pembekuan, sehingga menentukan lamanya bahan melewati zona kritis pembentukan kristal es (Wisudawaty 2012). Pembekuan konvensional atau pembekuan lambat (*slow freezing*) umumnya dilakukan menggunakan freezer rumah tangga atau ruang penyimpanan beku seperti *chest freezer* (CF) dengan suhu operasional berkisar antara -10 °C hingga -24 °C. Pada metode ini, perpindahan panas berlangsung dari bahan menuju media pendingin tanpa adanya sirkulasi udara berkecepatan tinggi sehingga laju perpindahan panas relatif rendah. Kondisi tersebut menyebabkan bahan berada lebih lama pada zona kritis kristalisasi, sehingga molekul air memiliki waktu yang cukup untuk bermigrasi dan bergabung membentuk kristal es ekstraseluler berukuran besar. Kristal es tersebut berpotensi merusak membran dan dinding sel sehingga dapat menurunkan mutu alpukat setelah proses pencairan (*thawing*) (Basri *et al.* 2021). Sebaliknya, pembekuan cepat (*quick freezing*) dirancang agar bahan mampu melewati fase kristalisasi dalam waktu sesingkat mungkin. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *air blast freezer* (ABF), yang bekerja dengan mengalirkan udara bersuhu sangat rendah berkecepatan tinggi di dalam ruang pembekuan. Sistem ini menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi sehingga bahan melewati zona kritis kristalisasi dalam waktu yang lebih singkat. Kondisi tersebut mendorong terbentuknya kristal es berukuran lebih kecil dan tersebar lebih merata di dalam jaringan bahan. Ajayi *et al.* (2022) menjelaskan bahwa sistem sirkulasi udara pada ABF memiliki fleksibilitas tinggi untuk membekukan berbagai jenis bahan pangan, termasuk produk dengan bentuk yang tidak beraturan.

Perbedaan laju penurunan suhu yang dihasilkan oleh masing-masing metode pembekuan secara langsung memengaruhi karakteristik kristal es yang terbentuk dan pada akhirnya menentukan tingkat kerusakan jaringan bahan. Semakin cepat bahan melewati rentang suhu kritis kristalisasi, semakin sedikit waktu yang tersedia bagi molekul air untuk bermigrasi dan bergabung membentuk kristal es berukuran besar. Menurut Parandi *et al.* (2022), kondisi tersebut menghasilkan kristal es yang lebih kecil sehingga kerusakan jaringan dapat diminimalkan. Sejalan dengan itu, Wisudawaty (2012) menyatakan bahwa pembekuan cepat menghasilkan kristal es berukuran lebih kecil dan tersebar lebih merata di dalam jaringan, sehingga mampu mengurangi kerusakan mekanis pada sel serta menghambat aktivitas mikroorganisme dan enzim penyebab penurunan mutu. Mekanisme tersebut menjadi sangat penting pada buah alpukat karena memiliki tekstur daging buah yang lunak, kadar air tinggi, dan rentan mengalami kerusakan jaringan selama proses pembekuan maupun pencairan (*thawing*) (Aldoradin *et al.* 2022).

Pada penelitian ini, kedua metode pembekuan tersebut diterapkan menggunakan perangkat dengan spesifikasi yang berbeda sesuai prinsip kerjanya masing-masing. Proses pembekuan konvensional dilakukan menggunakan *chest freezer* (CF) merek RSA model CF-220 dengan kapasitas ruang sebesar 220 L, rentang suhu operasi -15°C hingga -25°C , serta sistem refrigerasi berbasis refrigeran R134a atau R600a yang bebas *chlorofluorocarbon* (CFC). Alat ini memiliki kapasitas penyimpanan hingga 132 kg dan umumnya digunakan pada skala rumah tangga maupun industri kecil. Sementara itu, pembekuan cepat dilakukan menggunakan *Air Blast Freezer* (ABF) merek Modena tipe BZ 1050 yang memiliki volume ruang sebesar 170 L dengan kapasitas pembekuan hingga 15 kg. Perangkat ini dilengkapi lima unit *gastronom pan* (GN1/1) berukuran 40 mm dan lima buah *tray* pembekuan berdimensi $59,5 \times 39,5 \times 0,8$ cm. ABF ini memiliki empat siklus operasi (*cycle*), dan penelitian menggunakan siklus keempat yang dirancang khusus untuk pembekuan cepat guna mencegah pembentukan lapisan es pada permukaan bahan sehingga dapat meminimalkan kerusakan mekanis pada struktur fisik daging buah alpukat selama proses pembekuan. Seluruh komponen interior alat menggunakan *stainless steel* tipe 304 yang memenuhi standar *food grade*.

2.4 Mekanisme Perubahan Mutu Alpukat Miki Beku

Pembentukan kristal es merupakan tahapan kritis dalam proses pembekuan yang sangat menentukan kualitas akhir produk pangan. Proses ini diawali oleh nukleasi (*nucleation*), yaitu pembentukan inti kristal es, yang kemudian diikuti oleh pertumbuhan kristal (*crystal growth*). Kedua proses tersebut sangat dipengaruhi oleh laju penurunan suhu. Semakin tinggi laju penurunan suhu, semakin singkat waktu yang dibutuhkan bahan untuk melewati zona kritis pembentukan kristal es (-1 hingga -5°C), sehingga pembentukan kristal es berukuran besar dapat diminimalkan (Tan *et al.* 2021). Kondisi ini mendorong terbentuknya kristal es dalam jumlah banyak dengan ukuran kecil dan tersebar lebih merata di seluruh jaringan akibat terjadinya nukleasi secara simultan (James *et al.* 2015). Sebaliknya, laju penurunan suhu yang lambat, seperti pada *chest freezer*, memberikan waktu yang lebih lama bagi molekul air untuk bermigrasi dan bergabung membentuk kristal es ekstraseluler berukuran besar serta tidak beraturan (Zhu *et al.* 2019).

Perbedaan ukuran kristal es tersebut berpengaruh langsung terhadap tingkat kerusakan jaringan bahan. Kristal es berukuran kecil umumnya menyebabkan kerusakan jaringan yang lebih minimal karena terbentuk secara merata di dalam sel, sedangkan kristal es berukuran besar mampu merobek membran dan dinding sel sehingga menyebabkan kerusakan jaringan yang bersifat ireversibel (Mahmud *et al.* 2026). Kerusakan ini mengakibatkan hilangnya tekanan turgor sel serta menurunnya kemampuan jaringan dalam mempertahankan air ketika produk kembali mencair. Akibatnya, tekstur bahan menjadi lebih lunak dan integritas jaringan menurun dibandingkan sebelum pembekuan. Dengan demikian, laju penurunan suhu berperan penting dalam menentukan tingkat kerusakan mikrostruktur yang selanjutnya memengaruhi mutu produk beku.

Selain menyebabkan perubahan fisik pada jaringan, proses pembekuan juga memicu berbagai perubahan kimia dan biokimia yang memengaruhi karakteristik mutu bahan. Salah satu fenomena utama yang terjadi adalah *freeze concentration*, yaitu pemisahan air dari larutan selama pembentukan kristal es sehingga padatan terlarut, seperti gula, asam organik, garam, dan senyawa terlarut lainnya, terkonsentrasi pada fase cair yang tidak membeku (*unfrozen phase*) (Roos 2021). Peningkatan konsentrasi zat terlarut tersebut mengubah keseimbangan ionik di dalam jaringan dan dapat memengaruhi distribusi asam organik, sehingga berpotensi menyebabkan perubahan nilai pH setelah proses pembekuan (Tan *et al.* 2019). Selain itu, konsentrasi zat terlarut yang semakin tinggi juga meningkatkan peluang terjadinya interaksi antar molekul di dalam sel, termasuk antara enzim dan substratnya, sehingga berbagai reaksi kimia tetap dapat berlangsung meskipun berada pada suhu rendah (Neri *et al.* 2020).

Kerusakan membran sel akibat pembentukan kristal es juga menyebabkan enzim polifenol oksidase (PPO) dan peroksidase (POD), yang semula terpisah dari senyawa fenolik di dalam vakuola, menjadi saling berkontak (Aprilliani *et al.* 2021). Interaksi tersebut memicu reaksi pencoklatan enzimatis (*enzymatic browning*) yang menghasilkan pigmen melanin berwarna cokelat hingga hitam, sehingga menurunkan kualitas visual produk alpukat beku (Mahmud *et al.* 2026). Meskipun suhu pembekuan mampu memperlambat aktivitas enzim, reaksi oksidasi fenolik masih dapat berlangsung secara perlahan dan semakin nyata apabila terjadi fluktuasi suhu selama penyimpanan beku (Liao *et al.* 2024). Dengan demikian, mekanisme yang terjadi selama proses pembekuan menjadi dasar dalam menjelaskan perubahan berbagai parameter mutu alpukat beku, seperti warna, pH, total padatan terlarut, kadar air, dan karakteristik sensoris.

2.5 Produk Alpukat Beku

Upaya peningkatan nilai tambah (*value added*) pada komoditas hortikultura seperti alpukat sangat diperlukan mengingat sifat buah yang mudah rusak. Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah melalui diversifikasi produk olahan pangan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Hastuti *et al.* (2025) yang menyatakan bahwa pengolahan buah alpukat menjadi berbagai varian menu dapat meningkatkan nilai jual secara signifikan dibandingkan penjualan buah segar tanpa perlakuan. Selain meningkatkan nilai ekonomi, diversifikasi produk juga bertujuan untuk memperpanjang masa simpan dan memperluas jangkauan pasar.

Salah satu bentuk diversifikasi produk yang memiliki potensi pasar tinggi adalah pengembangan buah beku (*frozen fruit*), khususnya alpukat beku.

Taskirawati *et al.* (2025) melaporkan bahwa program diversifikasi produk olahan, termasuk pemanfaatan buah menjadi produk beku, terbukti efektif sebagai strategi pemberdayaan untuk meningkatkan pendapatan ekonomi masyarakat. Produk alpukat beku menawarkan keunggulan berupa ketersediaan sepanjang tahun tanpa bergantung pada musim panen, serta kepraktisan bagi pelaku usaha kuliner yang membutuhkan bahan baku siap pakai dengan mutu yang terjaga.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

III METODE

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari sampai Juni 2026. Analisis data dan pembekuan konvensional menggunakan *chest freezer* (CF) dilakukan di Laboratorium Pascapanen dan Pengolahan Hasil Pertanian, Fakultas Teknik dan Teknologi IPB University. Proses pembekuan cepat dilakukan menggunakan *air blast freezer* (ABF) yang tersedia di *Think Fresh* IPB Kawasan *Agribusiness and Technology Park* (ATP) IPB University.

3.2 Alat dan Bahan

Bahan baku utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah buah alpukat berjenis alpukat Miki yang berasal dari Kebun Alpukat Miki Fresh, Kabupaten Bogor dengan tingkat kematangan pohon 85% dan telah melewati fase pengeraman selama 5 hari. Alpukat Miki memiliki karakteristik daging buah alpukat yang tebal dengan tekstur lembut dan tidak berair serta berwarna kuning. Alpukat yang telah matang dapat ditandai dengan warna kulit hijau tua, bila buah diketuk dengan punggung jari menimbulkan bunyi yang nyaring dan apabila buah digoyang-goyang akan terdengar guncangan biji (Marsya 2016). Bahan lain yang digunakan yaitu air bersih untuk pencucian. Selain itu, alpukat ini mendapatkan perlakuan perubahan bentuk bahan dan dikemas menggunakan plastik LDPE (*Low Density Polyethylene*) atau plastik *food-grade* yang tahan suhu beku. Adapun alat yang akan digunakan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Alat dan fungsi penelitian

Alat	Fungsi
<i>air blast freezer</i> (ABF) Modena BZ 1050	Pembekuan dengan metode pembekuan cepat
<i>chest freezer</i> (CF) RSA CF 220	Pembekuan dengan metode konvensional (<i>slow freezing</i>)
<i>Thermocouple</i>	Mengukur suhu dan lama proses pembekuan pada unit percobaan
Timbangan analitik	Menimbang massa sampel pada unit percobaan
<i>Oven drying</i>	Analisis kadar air pada unit percobaan
Refraktometer	Mengukur presentase kandungan gula atau zat terlarut
pH meter	Mengukur nilai derajat keasaman (pH)
<i>Chromameter</i>	Analisis perubahan warna pada unit percobaan
Pisau <i>stainless steel</i> , talenan, Blender dan plastik <i>food-grade</i>	Persiapan unit percobaan

3.3 Prosedur Kerja

Prosedur kerja penelitian meliputi tahapan persiapan dan sortasi bahan baku, pengecilan ukuran dan pengemasan, pembekuan menggunakan *air blast freezer* (ABF) dan *chest freezer* (CF), penyimpanan beku, proses thawing, serta analisis mutu alpukat pada hari ke-5 dan hari ke-10. Tahapan tersebut dilakukan secara

sistematis sesuai dengan kombinasi perlakuan bentuk bahan dan metode pembekuan yang telah ditetapkan. Secara keseluruhan, tahapan dan alur pelaksanaan penelitian disajikan dalam diagram alir prosedur kerja yang terdapat pada Lampiran 1.

3.3.1 Proses Sortasi Alpukat

Proses penelitian diawali dengan persiapan bahan baku buah alpukat, alpukat segar selanjutnya disortasi untuk menyeragamkan tingkat kematangan dan memastikan tidak ada cacat fisik atau kebusukan pada buah. Buah kemudian dicuci dan dibelah untuk memisahkan bijinya. Daging buah alpukat yang telah disiapkan kemudian dibagi menjadi dua kelompok untuk diberikan perlakuan pendahuluan secara fisik. Kelompok pertama dihaluskan menggunakan blender hingga menghasilkan pasta yang homogen, sedangkan kelompok kedua dipotong membentuk dadu menggunakan pisau *stainless steel*. Masing-masing sampel alpukat kemudian ditimbang dengan berat yang sama (± 80 g) dan dimasukkan ke dalam wadah pengemas berupa plastik LDPE. Pada perlakuan berbentuk pasta, sampel diratakan mengikuti bentuk kemasan untuk menghasilkan lapisan yang relatif seragam dengan ketebalan $\pm 0,5$ cm, sedangkan perlakuan berbentuk dadu dengan ukuran $3 \times 3 \times 3$ cm dikemas sesuai bentuk potongannya tanpa dilakukan perataan.

3.3.2 Proses Pembekuan

Setelah proses pengemasan selesai, sampel buah alpukat dibagi ke dalam dua kelompok sesuai dengan metode pembekuan yang digunakan, yaitu ABF untuk pembekuan cepat dan pembekuan konvensional menggunakan CF. Masing-masing metode terdiri atas dua bentuk bahan, yaitu pasta dan potongan dadu, sehingga diperoleh empat kombinasi perlakuan. Sampel yang diberi perlakuan pembekuan cepat dimasukkan ke dalam ABF dengan suhu operasi -40 °C. Pembekuan ini dilakukan secara terpisah berdasarkan bentuk bahan, yaitu pasta dan potongan dadu, dengan berat 240 g pada setiap proses pembekuan. Selama proses pembekuan, sampel dibiarkan di dalam ruang pembeku hingga suhu pusat (*core temperature*) mencapai -18 °C.

Sementara itu, perlakuan pembekuan konvensional dilakukan menggunakan CF pada suhu operasi -18 °C. Sampel dibekukan, dengan berat total 480 g, yang terdiri atas sampel berbentuk pasta dan potongan dadu. Proses pembekuan dilakukan hingga suhu pusat (*core temperature*) sampel mencapai -18 °C. Setelah seluruh sampel mencapai suhu pusat -18 °C, sampel disimpan pada kondisi beku di dalam CF hingga digunakan pada tahap pengujian sesuai dengan parameter penelitian.

3.3.3 Analisis Mutu

Setelah proses pembekuan selesai, sampel alpukat beku dikeluarkan dari *freezer* masing-masing untuk dilakukan proses pelelehan (*thawing*). Sampel dari masing-masing metode pembekuan dilelehkan dengan diletakkan pada ruang terbuka bersuhu (± 25 °C). Proses *thawing* dihentikan ketika sampel telah meleleh secara sempurna atau tidak terdapat partikel es yang tersisa pada produk dengan waktu ± 20 menit pada pasta dan ± 50 menit pada dadu. Sampel yang telah di *thawing* tersebut selanjutnya segera dilakukan pengujian parameter mutu.

Analisis mutu dilakukan terhadap seluruh sampel dari masing-masing kombinasi perlakuan pada hari ke-5 dan hari ke-10 setelah penyimpanan beku dan proses *thawing*. Parameter yang diamati meliputi karakteristik warna (C^* , dan h°), nilai pH, total padatan terlarut ($^\circ\text{Brix}$), kadar air, serta uji organoleptik. Pengujian organoleptik meliputi penilaian terhadap atribut warna, tekstur, aroma, rasa, dan penerimaan keseluruhan (*overall acceptability*). Seluruh pengujian dilakukan sesuai dengan metode analisis yang dijelaskan pada masing-masing subbab parameter pengamatan.

3.4 Rancangan Percobaan

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor perlakuan, yaitu faktor bentuk bahan yang terdiri dari bentuk pasta (A1) dan dadu (A2), serta metode pembekuan yang mencakup penggunaan ABF bersuhu -40°C (B1) dan CF bersuhu -18°C (B2). Interaksi kedua faktor tersebut menghasilkan empat kombinasi perlakuan. Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh 12 satuan percobaan pada setiap waktu pengamatan. Karena pengamatan dilakukan pada dua waktu, yaitu hari ke-5 (H5) dan hari ke-10 (H10), maka total satuan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 24 satuan percobaan. Setiap satuan percobaan direpresentasikan oleh sampel alpukat seberat ± 80 gram dalam satu kemasan. Respon yang diamati meliputi laju penurunan suhu, karakteristik warna (L^* , a^* , b^* , C^* , dan h°), nilai pH, total padatan terlarut ($^\circ\text{Brix}$), kadar air, serta uji organoleptik yang dianalisis pada hari ke-10 (H10) setelah penyimpanan beku. Model matematis rancangan percobaan RAL adalah seperti pada Persamaan (1).

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk}. \quad (1)$$

Keterangan:

- Y_{ij} = Nilai pengamatan/respon pada perlakuan ke-i, ke-j, ulangan ke-k
- μ = Nilai rata-rata umum hasil pengamatan
- A_i = Pengaruh utama perlakuan faktor pertama (bentuk) taraf ke-i
- B_j = Pengaruh utama perlakuan faktor kedua (metode pembekuan) taraf ke-j
- $(AB)_{ij}$ = Pengaruh interaksi antara bentuk dan pembekuan
- ε_{ijk} = Galat Percobaan

Data parameter fisikokimia selanjutnya dianalisis menggunakan analisis ragam (Analysis of Variance/ANOVA) sesuai dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial pada taraf nyata 5% ($\alpha = 0,05$) menggunakan IBM SPSS Statistics versi 27. Apabila hasil ANOVA menunjukkan pengaruh yang nyata ($p < 0,05$), maka dilanjutkan dengan uji Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf nyata 5% untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Parameter organoleptik dianalisis menggunakan uji Friedman karena data yang dihasilkan bersifat ordinal dan berasal dari panelis yang sama (*related samples*) yang mengevaluasi seluruh perlakuan. Apabila uji Friedman menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), maka dilakukan uji lanjut menggunakan metode Siegel dan Castellan (1988) untuk mengetahui pasangan perlakuan yang berbeda nyata.

3.5 Metode Analisis

3.5.1 Laju Penurunan Suhu Selama Pembekuan

Laju penurunan suhu dalam penelitian ini dihitung berdasarkan perubahan suhu inti (*core temperature*) bahan terhadap waktu selama proses pembekuan berlangsung dan dinyatakan dalam satuan °C/menit. Metode perhitungan ini mengacu pada pendekatan yang digunakan oleh Dawson *et al.* (2020), di mana laju penurunan suhu ditentukan dari selisih antara suhu awal dan suhu akhir produk dibagi dengan total waktu pembekuan. Pengamatan dilakukan secara kontinyu sejak awal proses pembekuan hingga suhu inti sampel mencapai target akhir sebesar -18 °C. Suhu tersebut dipilih sebagai target karena merupakan standar suhu penyimpanan internasional yang umum diterapkan untuk mempertahankan stabilitas mutu fisikokimia serta keamanan mikrobiologis produk pangan beku (Parandi *et al.* 2022).

Selama proses berlangsung, perubahan suhu inti dipantau menggunakan *thermocouple* yang ditempatkan tepat pada pusat termal (*thermal center*) atau bagian tengah geometri sampel guna merepresentasikan kondisi termal pada bagian terdalam bahan selama kristalisasi es terjadi (Fellows 2017). Interval pencatatan suhu dilakukan setiap 1 menit pada perlakuan pasta-Air Blast Freezer (ABF), 2,5 menit pada perlakuan dadu-ABF, serta 5 menit pada perlakuan pasta dan dadu-chest freezer (CF) hingga mencapai suhu target. Data suhu yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung laju penurunan suhu pada fase *pre-cooling* dan *post-freezing* menggunakan Persamaan (2) yang diadopsi dari Dawson *et al.* (2020).

$$\text{Laju Penurunan Suhu} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

Dimana ΔT adalah perubahan suhu inti bahan dari suhu awal hingga mencapai target (°C), dan Δt adalah total waktu yang diperlukan untuk mencapai perubahan suhu target tersebut (menit). Penggunaan istilah laju penurunan suhu ini secara teknis mendeskripsikan kecepatan penarikan panas sensibel dan panas laten dari dalam jaringan alpukat selama melewati zona kritis pembentukan kristal es. Pengendalian laju ini sangat krusial karena menentukan ukuran dan distribusi kristal es di dalam jaringan, di mana laju yang tinggi akan menghasilkan kristal es berukuran kecil yang meminimalisir kerusakan struktur sel.

Khusus pada fase *freezing* atau fase kristalisasi, karakteristik proses pembekuan tidak dinyatakan menggunakan laju penurunan suhu dalam satuan °C/menit, tetapi menggunakan waktu spesifik terhadap massa bahan (s/g). Fase *freezing* ditentukan secara operasional berdasarkan rentang suhu -1 hingga -5 °C dengan mengacu pada penelitian Aldoradin Puza pada alpukat varietas Hass. Rentang tersebut digunakan sebagai kriteria yang seragam untuk mengidentifikasi periode kristalisasi pada seluruh kombinasi perlakuan. Durasi fase *freezing* ditentukan dari waktu yang dibutuhkan suhu inti bahan untuk melewati rentang -1 hingga -5 °C. Selanjutnya, waktu tersebut dinyatakan dalam satuan detik dan dinormalisasi terhadap massa sampel sebesar 80 g. Waktu spesifik fase *freezing* dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Waktu Spesifik Freezing} = \frac{tf}{m} \quad (3)$$

Dimana t_f adalah durasi fase *freezing* yang dihitung sejak suhu inti mencapai $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (detik), sedangkan m adalah massa bahan yang dibekukan (g). Hasil perhitungan dinyatakan dalam satuan s/g. Nilai s/g yang lebih rendah menunjukkan bahwa bahan membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk melewati rentang suhu kristalisasi pada massa bahan yang sama. Parameter ini digunakan sebagai parameter khusus fase *freezing* untuk membandingkan durasi proses kristalisasi antarperlakuan, sedangkan $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ digunakan untuk menggambarkan kecepatan perubahan suhu pada fase *pre-cooling* dan *post-freezing*.

3.5.2 Uji Warna

Perubahan warna diamati menggunakan alat *colorimeter* DS-200 dengan sistem CIELAB. Sebelum pengukuran dilakukan, permukaan sampel dibersihkan dari sisa air atau kotoran yang dapat memengaruhi hasil pembacaan warna. Untuk sampel berbentuk pasta, pengukuran dilakukan dengan menempelkan sensor *chromameter* secara tegak lurus pada permukaan sampel yang telah diratakan hingga diperoleh pembacaan yang stabil. Sementara itu, pada sampel berbentuk potongan dadu, pengukuran dilakukan pada dua sisi yang berbeda, yaitu permukaan luar daging buah yang sebelumnya bersentuhan dengan kulit buah dan permukaan dalam daging buah yang menghadap ke arah biji. Pengukuran pada kedua sisi tersebut dilakukan untuk memperoleh gambaran perubahan warna yang lebih representatif pada seluruh bagian daging buah alpukat.

Parameter warna yang dianalisis dalam penelitian ini difokuskan pada nilai *Chroma* (C^*) dan *Hue angle* (h°) yang diturunkan dari koordinat sistem warna CIELAB. Nilai C^* digunakan untuk menggambarkan atribut kuantitatif berupa tingkat kejenuhan atau intensitas warna (*color saturation*), di mana semakin tinggi nilainya maka intensitas warna yang dirasakan semakin kuat. Sementara itu, h° merepresentasikan atribut kualitatif atau rona warna dominan (seperti merah, kuning, atau hijau) yang dinyatakan dalam satuan derajat dari hingga . Perhitungan kedua parameter tersebut dilakukan berdasarkan nilai koordinat dan yang diperoleh menggunakan Persamaan (4) dan Persamaan (5)

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (4)$$

Dimana C^* merupakan nilai *chroma*, a^* nilai a (merah-hijau), b^* nilai b (kuning-biru).

$$h^{\circ} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (5)$$

Dimana h° merupakan nilai *Hue angle* yang menunjukkan arah rona warna, sedangkan a dan b masing-masing merupakan nilai koordinat warna pada sumbu merah-hijau dan kuning-biru.

3.5.3 Uji pH (Derajat keasaman)

Analisis nilai pH dilakukan untuk menentukan derajat keasaman sampel alpukat menggunakan pH meter digital. Sebelum pengukuran dilakukan, alat terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan larutan penyangga (*buffer solution*) standar pH 4,00 dan 7,00 hingga diperoleh pembacaan yang stabil untuk menjamin

ketelitian dan akurasi hasil pengukuran. Pada sampel alpukat berbentuk potongan dadu dilakukan penghancuran terlebih dahulu hingga diperoleh massa yang homogen, sedangkan pada bentuk pasta dapat langsung dilakukan proses pengukuran.

Sebelum digunakan, elektroda pH meter dibilas menggunakan akuades kemudian dikeringkan secara perlahan menggunakan tisu untuk menghilangkan sisa larutan dan mencegah terjadinya kontaminasi silang antar sampel. Selanjutnya elektroda dicelupkan ke dalam sampel hingga seluruh bagian sensor terendam sempurna. Pengukuran dilakukan dengan membiarkan elektroda berada di dalam sampel hingga nilai pH yang ditampilkan pada layar digital mencapai kondisi stabil. Nilai yang telah stabil kemudian dicatat sebagai nilai pH sampel.

3.5.4 Uji total padatan terlarut (TPT)

Analisis total padatan terlarut (TPT) dilakukan menggunakan digital *pocket refractometer* (PAL-α, Atago Co., Ltd., Jepang) dengan rentang pengukuran 0-85 °Brix untuk menentukan kadar padatan terlarut dalam sampel alpukat. Sebelum digunakan, alat dikalibrasi menggunakan akuades hingga menunjukkan nilai 0 °Brix. Sampel kemudian diteteskan pada permukaan prisma refraktometer hingga menutupi seluruh permukaan pengukuran. Selanjutnya, tombol *read* ditekan dan nilai total padatan terlarut dibaca secara langsung pada layar digital dalam satuan °Brix.

3.5.5 Uji Kadar Air

Analisis kadar air dilakukan dengan metode oven pengering berdasarkan standar AOAC (2019). Cawan porselen yang akan digunakan terlebih dahulu dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama 1 jam, kemudian didinginkan di dalam desikator selama 15 menit dan ditimbang sebagai berat cawan kosong (W0). Sampel alpukat ditimbang sebanyak 3-5 gram di dalam cawan tersebut (W1), yang selanjutnya dimasukkan ke dalam oven pengering bersuhu 105°C selama 24 jam hingga diperoleh berat konstan. Setelah proses pengeringan selesai, cawan berisi sampel diletakkan kembali ke dalam desikator selama 15 menit, lalu ditimbang sebagai berat akhir (W2). Presentase kadar air dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (3)$$

3.5.6 Uji Organoleptik

Pengujian organoleptik dilakukan menggunakan uji hedonik untuk mengetahui tingkat kesukaan panelis terhadap produk jus alpukat yang dihasilkan dari masing-masing perlakuan. Sebelum pengujian, sampel alpukat beku terlebih dahulu mengalami proses *thawing*, kemudian diolah menjadi jus menggunakan blender dengan penambahan air dan gula dalam jumlah yang sama pada setiap perlakuan. Penyeragaman formulasi dilakukan agar perbedaan karakteristik sensori yang diamati berasal dari perlakuan perbedaan bentuk bahan, dan metode pembekuan, bukan dari perbedaan komposisi bahan tambahan.

Uji organoleptik dilakukan terhadap sampel alpukat pada hari ke-10 (H10) setelah proses pembekuan dan *thawing*. Pengujian melibatkan 30 panelis tidak terlatih yang diminta memberikan penilaian terhadap lima atribut sensori, yaitu

warna, tekstur, aroma, rasa, dan penerimaan keseluruhan. Seluruh panelis mengevaluasi keempat sampel perlakuan yang disajikan secara acak menggunakan kode tiga digit (*three-digit random code*) untuk meminimalkan bias selama proses penilaian. Di antara penyajian setiap sampel, panelis diberikan air mineral sebagai penetral rasa (*palate cleanser*) sebelum melanjutkan penilaian terhadap sampel berikutnya. Penilaian dilakukan menggunakan skala hedonik lima titik, yaitu 1 = sangat tidak suka, 2 = tidak suka, 3 = netral, 4 = suka, dan 5 = sangat suka.

3.6 Penentuan Kombinasi Perlakuan Terbaik

Penentuan kombinasi perlakuan terbaik dilakukan menggunakan metode indeks efektivitas De Garmo (De Garmo *et al.* 1984) dengan melakukan pendekatan kepada mutu awal (*reference quality approach*). Metode ini digunakan sebagai teknik pengambilan keputusan multikriteria untuk mengintegrasikan seluruh parameter mutu menjadi satu nilai efektivitas sehingga setiap kombinasi perlakuan dapat dibandingkan secara objektif. Berbeda dengan penerapan metode De Garmo pada umumnya yang mengelompokkan parameter berdasarkan kriteria semakin besar semakin baik (*larger is better*) atau semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), penelitian ini menggunakan mutu alpukat segar (H_0) sebagai nilai acuan (*reference quality*). Pemilihan nilai acuan (*reference quality*) didasarkan pada tujuan penelitian untuk mempertahankan mutu awal produk (*quality retention*), sehingga evaluasi keberhasilan perlakuan dilakukan berdasarkan tingkat perubahan terhadap kondisi awal, bukan menghasilkan nilai parameter yang paling tinggi maupun paling rendah. Dengan demikian, keberhasilan setiap perlakuan dinilai berdasarkan tingkat penyimpangannya terhadap mutu awal produk.

Parameter objektif yang meliputi warna (C^* dan h°), pH, total padatan terlarut (TPT), serta kadar air dievaluasi berdasarkan deviasi absolut terhadap nilai H_0 , sehingga semakin kecil deviasi menunjukkan mutu produk yang semakin mendekati kondisi segarnya. Sementara itu, parameter organoleptik keseluruhan dievaluasi menggunakan prinsip semakin tinggi tingkat kesukaan panelis semakin baik, karena parameter tersebut tidak memiliki nilai acuan pada kondisi awal (H_0). Tahapan analisis diawali dengan menghitung deviasi absolut setiap parameter terhadap mutu awal (H_0) menggunakan persamaan:

$$D_i = |X_i - X_{H_0}| \quad (6)$$

Dimana D_i deviasi parameter terhadap mutu awal; X_i nilai parameter pada setiap perlakuan; X_{H_0} nilai parameter pada alpukat segar (H_0).

Nilai deviasi kemudian dinormalisasi menjadi Nilai Perlakuan (NP) pada rentang 0–1 sehingga seluruh parameter memiliki skala yang seragam dan dapat dibandingkan secara langsung meskipun memiliki satuan pengukuran yang berbeda. Pada penelitian ini seluruh parameter diberi bobot yang sama karena masing-masing parameter dipandang memiliki tingkat kepentingan yang setara dalam merepresentasikan mutu fisik, kimia, dan organoleptik alpukat setelah proses pembekuan dan *thawing*. Nilai Perlakuan (NP) selanjutnya dikalikan dengan bobot masing-masing parameter untuk memperoleh Nilai Efektivitas (NE), kemudian dijumlahkan untuk menghasilkan nilai efektivitas total setiap kombinasi perlakuan. Kombinasi perlakuan dengan nilai efektivitas total tertinggi ditetapkan sebagai

perlakuan terbaik. Perhitungan nilai efektivitas dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$NE_i = \sum_{j=1}^n (NP_{ij} \times W_j) \quad (7)$$

Dimana NE_i = nilai efektivitas total perlakuan ke- i ; NP_{ij} = nilai perlakuan parameter ke- j pada perlakuan ke- i ; W_j = bobot parameter ke- j ; n = jumlah parameter yang diamati.





IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Alpukat Segar

Karakterisasi mutu awal dilakukan dengan tujuan mengetahui kondisi fisik dan kimia alpukat Miki sebelum diberikan perlakuan. Sampel yang dipilih memiliki tingkat kematangan pohon sebesar 85%, lalu melalui proses pemeraman selama 5 hari untuk mencapai kematangan yang optimal. Selanjutnya, data mutu awal ini digunakan menjadi dasar dalam mengevaluasi perubahan mutu yang terjadi setelah perlakuan perubahan bentuk bahan menjadi pasta maupun potongan dadu serta proses pembekuan menggunakan *air blast freezer* (ABF) dan *chest freezer* (CF). Dengan demikian, perubahan yang diamati pada setiap parameter dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh perlakuan yang diberikan terhadap mutu alpukat. Karakteristik mutu awal alpukat Miki yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Karakteristik mutu alpukat segar

Parameter Mutu	Nilai
<i>Chroma</i> (C*)	29,76
<i>Hue angle</i> (h°)	93,96
pH	6,49
Total padatan terlarut (TPT)	4,30
Kadar Air	84,73

Berdasarkan hasil pengukuran warna, alpukat segar yang digunakan sebagai kondisi awal memiliki nilai *Chroma* (C*) sebesar 29,76 dan *Hue angle* (h°) sebesar 93,96°. Nilai C* menunjukkan intensitas atau kejenuhan warna daging buah, sedangkan nilai h° menunjukkan arah atau rona warna yang terbentuk berdasarkan kombinasi nilai a* dan b*. Nilai C* sebesar 29,76 menunjukkan bahwa warna daging buah alpukat pada kondisi awal memiliki intensitas warna yang relatif tinggi. Sementara itu, nilai h° sebesar 93,96° menunjukkan bahwa warna daging buah berada pada kisaran hijau kekuningan (*yellow-green*). Kondisi warna awal tersebut digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi perubahan intensitas dan rona warna alpukat setelah perlakuan pembekuan. Menurut Aprilliani dan Hernowo (2022), parameter C* dan h° dapat digunakan untuk menggambarkan perubahan karakteristik warna buah selama penyimpanan maupun pengolahan.

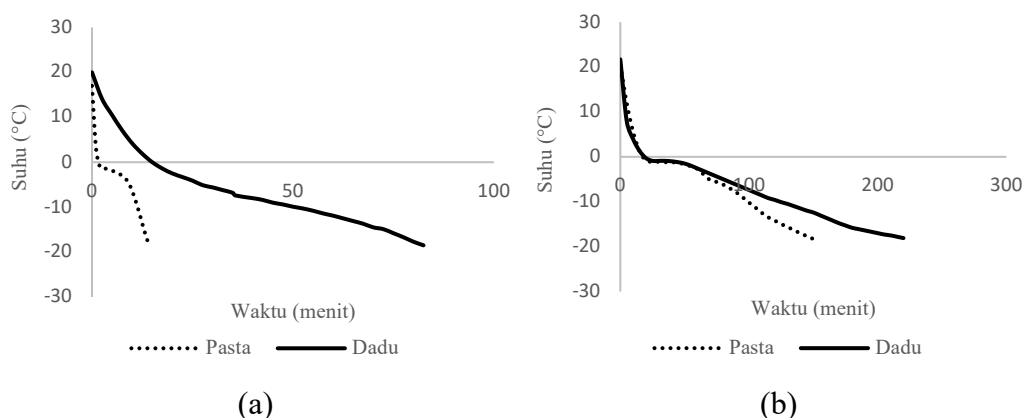
Selain parameter warna, karakteristik kimia alpukat segar juga diamati melalui pengukuran pH, total padatan terlarut (TPT), dan kadar air. Berdasarkan hasil pengujian, alpukat Miki sebelum perlakuan memiliki nilai pH sebesar 6,49, total padatan terlarut sebesar 4,30 °Brix, dan kadar air sebesar 84,73%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa alpukat yang digunakan memiliki karakteristik fisikokimia yang masih baik sebagai bahan baku penelitian. Parameter pH, total padatan terlarut, dan kadar air merupakan indikator penting dalam mengevaluasi mutu awal alpukat karena mencerminkan tingkat kematangan buah serta berpengaruh terhadap perubahan mutu selama penyimpanan dan pengolahan pascapanen (Kassim dan Workneh 2020). Berdasarkan seluruh parameter yang diamati, alpukat segar yang digunakan sebagai bahan baku penelitian menunjukkan karakteristik mutu awal yang baik. Hal tersebut ditunjukkan oleh warna yang masih

menunjukkan dominasi warna khas alpukat, pH yang berada pada kisaran normal, total padatan terlarut yang mencerminkan tingkat kematangan buah serta kadar air yang masih tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sampel memiliki kualitas awal yang seragam sehingga layak digunakan sebagai bahan penelitian. Oleh karena itu, data karakteristik mutu awal digunakan sebagai nilai acuan (*baseline*) untuk mengevaluasi perubahan mutu setelah perlakuan.

4.2 Proses Pembekuan Alpukat

Laju penurunan suhu selama proses pembekuan menunjukkan kecepatan perubahan suhu inti (*core temperature*) bahan hingga mencapai suhu target sesuai pendekatan perhitungan dari Dawson *et al.* (2020). Parameter ini digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi karakteristik kinetika termal pada masing-masing perlakuan pembekuan (Tan *et al.* 2021). Semakin tinggi laju penurunan suhu, maka semakin singkat waktu yang dibutuhkan bahan untuk melewati zona kritis pembentukan kristal es (rentang suhu hingga), sehingga pembentukan kristal es berukuran besar yang dapat merusak struktur jaringan secara ireversibel dapat diminimalkan (Parandi *et al.* 2022).

Pada penelitian ini, laju penurunan suhu diamati pada empat kombinasi perlakuan, yaitu bentuk pasta dan dadu serta metode pembekuan ABF -40°C dan CF -18°C . Perbedaan bentuk bahan memengaruhi rasio luas permukaan terhadap volume dan hambatan perpindahan panas dari inti ke permukaan bahan (van der Sman 2020). Selain itu, perbedaan suhu media dan mekanisme perpindahan panas konveksi turut menentukan kecepatan pelepasan panas selama pembekuan (Fellows 2017). Laju perpindahan panas yang lebih tinggi mempercepat pelepasan panas sensibel dan laten, sehingga waktu pembekuan lebih singkat dan kristal es yang terbentuk lebih kecil serta merata (Zhu *et al.* 2019). Laju penurunan suhu pada setiap metode pembekuan disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Kurva penurunan suhu alpukat bentuk pasta dan dadu selama proses pembekuan menggunakan: (a) *air blast freezer* (ABF) dan (b) *chest freezer* (CF)

Gambar 2 menunjukkan kurva penurunan suhu inti alpukat berbentuk pasta dan dadu selama proses pembekuan menggunakan metode *Air Blast Freezer* (ABF) dan *chest freezer* (CF). Secara umum, seluruh perlakuan menunjukkan pola penurunan suhu dari suhu awal menuju suhu target -18°C , tetapi waktu yang diperlukan berbeda antara bentuk bahan dan metode pembekuan. Perlakuan pasta-ABF menunjukkan proses penurunan suhu paling cepat, yaitu dari suhu awal 17°C

hingga mencapai -18°C dalam waktu 14 menit. Sementara itu, sampel dadu-ABF memerlukan waktu 82,5 menit untuk mengalami penurunan suhu dari 20°C hingga mencapai -18°C . Pada metode CF, sampel pasta memerlukan waktu 150 menit untuk mencapai suhu inti -18°C dari suhu awal $20,5^{\circ}\text{C}$, sedangkan sampel dadu memerlukan waktu paling lama, yaitu 220 menit, dari suhu awal $21,7^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai -18°C . Dengan demikian, berdasarkan waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu inti -18°C , urutan kecepatan pembekuan dari yang tercepat hingga paling lambat adalah pasta-ABF, dadu-ABF, pasta-CF, dan dadu-CF.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode pembekuan dan bentuk bahan memengaruhi karakteristik perpindahan panas selama proses pembekuan. Penggunaan ABF menghasilkan penurunan suhu yang lebih cepat dibandingkan CF pada kedua bentuk bahan. Kondisi tersebut berkaitan dengan kemampuan sistem ABF dalam memberikan perpindahan panas yang lebih intensif antara media pendingin dan permukaan bahan, sehingga panas dari produk dapat dikeluarkan lebih cepat. Selain metode pembekuan, bentuk dan dimensi bahan juga memengaruhi waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu target. Sampel berbentuk pasta memiliki dimensi bahan yang relatif lebih tipis sehingga jarak perpindahan panas dari bagian pusat menuju permukaan lebih pendek. Kondisi tersebut memungkinkan panas dari bagian dalam bahan ditransfer menuju permukaan dengan lebih cepat dibandingkan pada bentuk dadu yang memiliki dimensi lebih besar (van der Sman 2020).

Secara keseluruhan, kurva pada Gambar 2 menunjukkan bahwa kombinasi bentuk pasta dan metode ABF menghasilkan proses pembekuan paling cepat, sedangkan kombinasi bentuk dadu dan metode CF menghasilkan proses paling lambat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ABF mampu mempercepat pencapaian suhu inti -18°C dibandingkan CF, sedangkan perbedaan bentuk dan dimensi bahan juga memengaruhi kecepatan perpindahan panas. Perbedaan waktu pembekuan tersebut menjadi dasar dalam karakterisasi tahapan pembekuan pada penelitian ini, yaitu fase *pre-cooling*, fase *freezing* atau kristalisasi, dan fase *post-freezing*. Karakteristik masing-masing fase selanjutnya dianalisis berdasarkan parameter yang sesuai dengan prosesnya.

Laju penurunan suhu (*cooling rate*) merupakan parameter yang menggambarkan kecepatan perubahan suhu pada pusat termal (*thermal center*) atau suhu inti bahan pangan per satuan waktu selama seluruh proses pembekuan berlangsung. Pada penelitian ini, laju penurunan suhu dihitung berdasarkan perubahan suhu inti terhadap waktu hingga mencapai suhu target dan dinyatakan dalam satuan $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Perhitungan tersebut mengacu pada pendekatan metodologis dari Dawson *et al.* (2020), yang menentukan *freezing rate* berdasarkan selisih antara nilai suhu awal dan akhir produk dibagi dengan total waktu pembekuan. Sebagai acuan komparatif, Dawson *et al.* (2020) melaporkan bahwa pada kondisi penelitian mereka, pembekuan lambat (*slow freezing*) menghasilkan *freezing rate* sekitar $0,07^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, sedangkan pembekuan cepat (*quick freezing*) mencapai sekitar $1,8^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ pada fase perubahan wujud (*freezing*). Nilai tersebut digunakan sebagai acuan komparatif dalam menginterpretasikan kecepatan pembekuan yang diperoleh pada penelitian ini guna mengevaluasi efisiensi perpindahan panas pada masing-masing perlakuan. Hasil pengukuran waktu yang diperlukan pada setiap fase pembekuan (*pre-cooling*, *freezing*, dan *post-freezing*)

serta hasil perhitungan laju penurunan suhu untuk masing-masing kombinasi perlakuan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Waktu dan karakteristik proses pembekuan pada setiap fase

Perlakuan	Waktu Pembekuan (menit)			Laju Penurunan Suhu		
	<i>Pre cooling</i>	<i>Freezing</i>	<i>Post freezing</i>	<i>Pre cooling</i> (°C/min)	<i>Freezing</i> (s/g)	<i>Post freezing</i> (°C/min)
ABF						
Pasta	1,50	7,80	4,70	12,00	5,49	2,77
Dadu	16,79	10,46	55,25	1,25	7,85	0,24
CF						
Pasta	23,33	45,83	80,83	0,92	34,38	0,16
Dadu	40,00	40,00	140,00	0,57	30,00	0,09

Tabel 5 menunjukkan bahwa laju penurunan suhu pada setiap fase pembekuan berbeda berdasarkan bentuk bahan dan metode pembekuan yang digunakan. Secara umum, sampel yang dibekukan menggunakan ABF memiliki laju penurunan suhu lebih tinggi dibandingkan dengan CF. Selain itu, bentuk pasta menunjukkan laju penurunan suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk dadu. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa proses perpindahan panas selama pembekuan dipengaruhi oleh metode pembekuan serta karakteristik geometris bahan, terutama ketebalan dan jarak perpindahan panas dari bagian pusat menuju permukaan bahan.

Pada fase *pre-cooling*, perlakuan pasta-ABF menunjukkan laju penurunan suhu tertinggi sebesar 12,00 °C/menit, diikuti oleh dadu-ABF sebesar 1,25 °C/menit, pasta-CF sebesar 0,90 °C/menit, dan dadu-CF sebesar 0,53 °C/menit. Fase *pre-cooling* merupakan tahap awal pembekuan ketika suhu bahan mengalami penurunan dari suhu awal menuju kondisi mendekati titik pembekuan, dengan pelepasan panas yang terutama berupa panas sensibel (*sensible heat*) (Fellows 2017). Tingginya laju penurunan suhu pada pasta-ABF menunjukkan bahwa panas sensibel pada perlakuan tersebut lebih cepat dikeluarkan dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut dapat berkaitan dengan bentuk pasta yang memiliki ketebalan relatif lebih tipis, sehingga jarak perpindahan panas dari bagian dalam bahan menuju permukaan menjadi lebih pendek. Dimensi dan geometri bahan dapat memengaruhi hambatan perpindahan panas selama proses pembekuan (van der Sman 2020). Sebaliknya, bentuk dadu memiliki jarak perpindahan panas dari pusat bahan menuju permukaan yang relatif lebih panjang, sehingga pelepasan panas berlangsung lebih lambat (Parandi *et al.* 2022).

Perbedaan laju penurunan suhu pada fase *pre-cooling* juga terlihat antara metode ABF dan CF. Pada bentuk pasta, laju penurunan suhu menggunakan ABF sebesar 12,00 °C/menit, sedangkan menggunakan CF sebesar 0,90 °C/menit. Pada bentuk dadu, laju penurunan suhu menggunakan ABF sebesar 1,25 °C/menit, sedangkan CF sebesar 0,53 °C/menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi pembekuan pada ABF menghasilkan penurunan suhu yang lebih cepat dibandingkan CF. Perbedaan ini berkaitan dengan kondisi operasi ABF yang menggunakan suhu media pembeku -40 °C dan aliran udara untuk meningkatkan perpindahan panas dari bahan ke lingkungan pembeku. Dengan demikian, pada

tahap awal pembekuan, baik metode pembekuan maupun bentuk bahan berperan dalam menentukan kecepatan pelepasan panas sensibel.

Memasuki fase *freezing* atau fase kristalisasi, karakteristik proses pembekuan tidak lagi difokuskan pada laju penurunan suhu, tetapi pada durasi bahan berada dalam rentang suhu kristalisasi. Dalam penelitian ini, fase *freezing* ditentukan secara operasional pada rentang suhu -1 hingga -5 °C dengan mengacu pada penelitian Aldoradin Puza pada alpukat varietas Hass. Rentang tersebut digunakan sebagai kriteria operasional untuk mengidentifikasi bagian kurva penurunan suhu yang merepresentasikan fase kristalisasi pada seluruh sampel penelitian. Penggunaan rentang tersebut bertujuan menyeragamkan penentuan fase kristalisasi pada setiap kombinasi perlakuan sehingga durasi fase *freezing* dapat dibandingkan secara konsisten. Rentang suhu tersebut digunakan sebagai acuan dari penelitian pada varietas alpukat yang berbeda dan tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa alpukat Miki memiliki titik beku yang identik dengan alpukat Hass.

Pada fase *freezing* yang ditentukan berdasarkan rentang suhu tersebut, air dalam bahan mengalami perubahan fase dari cair menjadi es disertai pelepasan panas laten pembekuan (*latent heat of fusion*) (Fellows 2017). Kondisi tersebut menyebabkan perubahan suhu inti bahan berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan fase *pre-cooling*, karena energi yang dilepaskan dari bahan tidak hanya menyebabkan penurunan suhu, tetapi juga digunakan dalam proses perubahan fase air menjadi kristal es. Oleh karena itu, karakteristik fase *freezing* dalam penelitian ini dinyatakan berdasarkan waktu spesifik terhadap massa bahan (s/g), sedangkan laju penurunan suhu dalam satuan °C/menit tetap digunakan untuk menggambarkan perubahan suhu pada fase *pre-cooling* dan *post-freezing*.

Waktu spesifik fase *freezing* dihitung dengan membagi durasi bahan berada pada rentang suhu -1 hingga -5 °C dalam satuan detik dengan massa sampel sebesar 80 g. Berdasarkan hasil perhitungan, perlakuan pasta-ABF memiliki waktu spesifik fase *freezing* terendah, yaitu 5,49 s/g, diikuti oleh dadu-ABF sebesar 7,85 s/g, dadu-CF sebesar 30,00 s/g, dan pasta-CF sebesar 34,38 s/g. Nilai waktu spesifik yang lebih rendah menunjukkan bahwa sampel membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai dan melewati rentang suhu -1 hingga -5 °C pada massa bahan yang sama. Dengan demikian, pada kondisi pembekuan yang digunakan dalam penelitian ini, penggunaan ABF menghasilkan durasi fase kristalisasi yang lebih singkat dibandingkan CF pada kedua bentuk bahan, dengan perlakuan pasta-ABF menunjukkan durasi fase *freezing* paling singkat.

Perbedaan durasi fase *freezing* antara metode pembekuan menunjukkan bahwa kondisi perpindahan panas selama proses pembekuan memengaruhi waktu yang diperlukan bahan untuk melewati rentang kristalisasi. Pada ABF, waktu spesifik fase *freezing* sebesar 5,49 s/g pada pasta dan 7,85 s/g pada dadu, sedangkan pada CF masing-masing sebesar 34,38 s/g pada pasta dan 30,00 s/g pada dadu. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa ABF mampu mempercepat proses pembekuan pada kondisi penelitian ini dibandingkan CF. Bentuk bahan juga menunjukkan perbedaan durasi fase *freezing*, terutama pada perlakuan ABF. Bentuk pasta yang relatif tipis memungkinkan jarak perpindahan panas dari bagian dalam bahan menuju permukaan menjadi lebih pendek, sehingga panas dapat ditransfer lebih cepat. Sebaliknya, pada bentuk dadu, jarak perpindahan panas dari bagian pusat menuju permukaan relatif lebih panjang (Parandi *et al.* 2022). Pada CF, perbedaan antara pasta dan dadu menunjukkan pola yang berbeda, dengan

waktu spesifik dadu-CF sedikit lebih rendah dibandingkan pasta-CF. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan panas selama pembekuan tidak hanya dipengaruhi oleh bentuk bahan, tetapi juga oleh kondisi pembekuan yang digunakan.

Penentuan fase *freezing* menggunakan rentang -1 hingga -5 °C memberikan dasar yang seragam untuk membandingkan durasi bahan berada pada zona kristalisasi. Zhu *et al.* (2019) menjelaskan bahwa selama proses pembekuan, air dalam bahan mengalami perubahan fase menjadi es, sementara komponen terlarut menjadi semakin terkonsentrasi pada fase cair yang belum membeku. Tan *et al.* (2021) menjelaskan bahwa laju pendinginan berhubungan dengan waktu yang dibutuhkan bahan untuk melewati zona pembentukan kristal. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, perbedaan waktu spesifik yang diperlukan masing-masing perlakuan untuk melewati rentang -1 hingga -5 °C digunakan untuk menggambarkan perbedaan karakteristik pembekuan antarperlakuan. Parameter s/g dalam penelitian ini tidak digunakan untuk menyatakan laju perubahan suhu, melainkan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan durasi fase kristalisasi yang telah dinormalisasi berdasarkan massa bahan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan ABF membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk melewati rentang kristalisasi dibandingkan CF. Perlakuan pasta-ABF memiliki waktu spesifik terendah sebesar 5,49 s/g, sedangkan pasta-CF memiliki waktu spesifik tertinggi sebesar 34,38 s/g. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa suhu media pembekuan dan kondisi perpindahan panas berperan terhadap lamanya bahan berada pada fase kristalisasi. Namun, karena penelitian ini tidak melakukan pengamatan langsung terhadap ukuran, jumlah, maupun distribusi kristal es, karakteristik kristal es tidak dapat ditentukan secara langsung berdasarkan data penelitian. Hubungan antara durasi pembekuan dan karakteristik kristal es digunakan sebagai dasar teoritis berdasarkan literatur.

Setelah bahan melewati rentang suhu kristalisasi -1 hingga -5 °C, proses pembekuan dilanjutkan ke fase *post-freezing*. Pada fase ini, laju penurunan suhu kembali meningkat pada sebagian besar perlakuan dibandingkan dengan fase *freezing*. Perlakuan pasta-ABF menunjukkan laju penurunan suhu tertinggi sebesar 2,77 °C/menit, diikuti oleh dadu-ABF sebesar 0,24 °C/menit, pasta-CF sebesar 0,16 °C/menit, dan dadu-CF sebesar 0,09 °C/menit. Peningkatan laju penurunan suhu setelah fase kristalisasi menunjukkan bahwa proses perubahan fase air telah berkurang sehingga penurunan suhu kembali lebih banyak berkaitan dengan pelepasan panas sensibel dari bahan yang telah membeku (Fellows 2000).

Perbedaan laju penurunan suhu pada fase *post-freezing* menunjukkan pola yang serupa dengan fase *pre-cooling*, terutama antara bentuk pasta dan dadu. Perlakuan pasta-ABF memiliki laju penurunan suhu yang lebih tinggi dibandingkan dadu-ABF. Pada metode CF, perbedaan juga terlihat antara pasta dan dadu, masing-masing sebesar 0,16 dan 0,09 °C/menit. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa dimensi bahan tetap berperan terhadap perpindahan panas setelah bahan melewati fase kristalisasi. Bentuk bahan yang lebih tipis memiliki jarak perpindahan panas yang lebih pendek sehingga panas dari bagian dalam bahan dapat lebih cepat ditransfer menuju permukaan (van der Sman 2020).

Jika dibandingkan berdasarkan ketiga fase pembekuan, fase *pre-cooling* dan *post-freezing* dinilai berdasarkan laju penurunan suhu (°C/menit), sedangkan fase *freezing* dinilai berdasarkan waktu spesifik (s/g). Pada fase *pre-cooling*, perlakuan

pasta-ABF menunjukkan laju penurunan suhu tertinggi sebesar 12,00 °C/menit, sedangkan dadu-CF menunjukkan nilai terendah sebesar 0,57 °C/menit. Pada fase *freezing*, pasta-ABF memiliki waktu spesifik terendah sebesar 5,85 s/g, sedangkan pasta-CF memiliki waktu spesifik tertinggi sebesar 34,37 s/g. Sementara itu, pada fase *post-freezing*, pasta-ABF kembali menunjukkan laju penurunan suhu tertinggi sebesar 2,77 °C/menit, sedangkan dadu-CF memiliki nilai terendah sebesar 0,09 °C/menit. Pola tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ABF menghasilkan perubahan suhu yang lebih cepat pada fase *pre-cooling* dan *post-freezing*, serta durasi fase kristalisasi yang lebih singkat dibandingkan CF pada kondisi penelitian ini.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pembekuan alpukat Miki berlangsung melalui tahapan *pre-cooling*, fase *freezing* atau kristalisasi, dan *post-freezing* menuju suhu target -18 °C. Setiap fase dievaluasi menggunakan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik prosesnya. Laju penurunan suhu (°C/menit) digunakan pada fase *pre-cooling* dan *post-freezing*, sedangkan waktu spesifik (s/g) digunakan pada fase *freezing* untuk menggambarkan durasi bahan berada pada rentang kristalisasi -1 hingga -5 °C. Rentang -1 hingga -5 °C yang mengacu pada penelitian Aldoradin Puza pada alpukat Hass digunakan sebagai kriteria operasional untuk menentukan fase kristalisasi secara konsisten pada seluruh perlakuan. Dengan pendekatan tersebut, karakteristik proses pembekuan setiap perlakuan dapat dibandingkan berdasarkan fase yang sama tanpa menyamakan parameter pengukuran antar fase. Hasil karakterisasi proses pembekuan ini selanjutnya menjadi dasar untuk menghubungkan kondisi pembekuan dengan perubahan mutu fisikokimia dan organoleptik alpukat selama penyimpanan beku.

4.3 Karakteristik Alpukat Beku

4.3.1 Warna

Perubahan warna merupakan salah satu indikator mutu yang penting dalam mengevaluasi kualitas alpukat selama proses pembekuan dan penyimpanan beku. Warna menjadi atribut visual pertama yang diamati konsumen sehingga sangat memengaruhi persepsi terhadap kesegaran, kualitas, dan penerimaan produk pangan (García *et al.* 2022). Kerusakan jaringan akibat proses mekanis, seperti pemotongan (*slicing/cutting*) maupun homogenisasi (*blending*), menyebabkan disintegrasi jaringan dan hilangnya kompartementalisasi sel (Rahmawati 2023). Kondisi tersebut dapat diperparah oleh pembentukan kristal es selama proses pembekuan yang berpotensi memecahkan membran sel, sehingga meningkatkan kontak antara enzim polifenol oksidase (PPO) dan senyawa fenolik yang pada akhirnya memicu terjadinya pencoklatan enzimatis. (Zhu *et al.* 2019; Mahmud *et al.* 2026). Oleh karena itu, perubahan warna diamati menggunakan sistem warna CIELAB yang terdiri atas parameter *Chroma* (C*), dan *Hue angle* (h°), karena mampu menggambarkan perubahan warna secara objektif dan representatif terhadap persepsi visual manusia (Marín-Obispo *et al.* 2021). Hasil pengujian karakteristik warna daging buah alpukat disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Karakteristik warna daging buah alpukat setelah pembekuan dan *thawing* pada hari ke-5 dan hari ke-10

Perlakuan		H5		H10	
Pembekuan	Bentuk	Chroma (C*)	Hue (h°)	Chroma (C*)	Hue (h°)
ABF	Pasta	37,52±0,24	96,63±0,41	39,65±0,29 ^b	95,85±0,24
	Dadu	39,44±1,26	93,95±2,47	35,26±1,95 ^a	91,01±2,36
CF	Pasta	41,33±0,40	94,55±0,77	56,40±1,10 ^c	94,58±0,21
	Dadu	41,67±3,13	90,20±3,80	60,31±0,06 ^d	91,07±0,51

Keterangan : Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Duncan pada taraf nyata 5%.

Tingkat kejenuhan atau intensitas warna pada bahan direpresentasikan oleh nilai C*, di mana angka yang semakin besar menandakan warna yang semakin pekat. Daging buah alpukat segar awalnya memiliki nilai C* sebesar 29,76. Setelah melalui proses pembekuan, nilai tersebut mengalami kenaikan menjadi 37,52–41,67 pada pengamatan hari ke-5, dan melonjak hingga mencapai rentang 35,26–60,31 di hari ke-10. Pola perubahan nilai C* sejalan dengan parameter b* karena nilai C* dihitung berdasarkan kombinasi nilai a* dan b*. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pada hari ke-5 (H5), metode pembekuan berpengaruh nyata terhadap nilai C* ($p < 0,05$), sedangkan bentuk bahan dan interaksi kedua faktor tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Sementara itu, pada hari ke-10 (H10), metode pembekuan ($p < 0,05$) dan interaksi antara bentuk bahan dengan metode pembekuan ($p < 0,05$) berpengaruh nyata terhadap nilai C*, sedangkan bentuk bahan tidak memberikan pengaruh yang nyata ($p > 0,05$). Signifikansi interaksi tersebut mengindikasikan bahwa pengaruh metode pembekuan terhadap nilai C* bergantung pada bentuk bahan yang dibekukan. Oleh karena itu, dilakukan uji lanjut Duncan untuk mengetahui perbedaan antar kombinasi perlakuan. Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa seluruh kombinasi perlakuan berbeda nyata, dengan nilai C* tertinggi diperoleh pada perlakuan dadu-CF, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan dadu-ABF. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan intensitas warna menjadi semakin dipengaruhi oleh kombinasi bentuk bahan dan metode pembekuan seiring bertambahnya lama penyimpanan. Menurut Pathare *et al.* (2013), peningkatan nilai C* menunjukkan warna yang semakin pekat dan semakin jauh dari warna netral.

Nilai h° berfungsi sebagai indikator untuk menentukan karakteristik warna dominan pada suatu komoditas. Alpukat segar sebelum perlakuan memiliki nilai h° sebesar 93,96°, yang menunjukkan warna dominan berada pada daerah hijau kekuningan. Pada hari ke-5, nilai h° berkisar antara 90,20°–96,63°, sedangkan pada hari ke-10 berkisar antara 91,01°–95,85°. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa baik pada hari ke-5 (H5) maupun hari ke-10 (H10), bentuk bahan berpengaruh nyata terhadap nilai h° ($p < 0,05$), sedangkan metode pembekuan dan interaksi antara bentuk bahan dengan metode pembekuan tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Stabilitasnya nilai h° menunjukkan bahwa meskipun terjadi perubahan tingkat kecerahan dan intensitas warna selama penyimpanan, rona warna dominan alpukat relatif tidak berubah. Dengan kata lain, pembekuan lebih memengaruhi tingkat kecerahan dan intensitas warna dibandingkan mengubah jenis warna dominan yang dimiliki alpukat. Menurut Pathare *et al.* (2013), nilai h° pada kisaran 90°

menunjukkan karakter warna kuning kehijauan yang masih khas untuk daging buah alpukat matang.

Pola perubahan warna pada akhir masa penyimpanan memperkuat hasil uji statistik yang telah diperoleh sebelumnya. Perubahan nilai C^* menunjukkan adanya perubahan intensitas warna alpukat selama penyimpanan beku, dengan perlakuan potongan dadu yang dibekukan menggunakan CF menunjukkan perubahan warna yang lebih besar dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan laju penurunan suhu yang lebih rendah pada CF yang menyebabkan bahan lebih lama melewati zona kritis kristalisasi, sehingga pembentukan kristal es berukuran lebih besar berpotensi meningkatkan kerusakan struktur sel dan memperbesar kontak antara enzim pencokelatan dengan substratnya. Sebaliknya, pembekuan menggunakan ABF menghasilkan laju penurunan suhu yang lebih tinggi sehingga waktu bahan melewati zona kristalisasi menjadi lebih singkat dan kerusakan jaringan dapat diminimalkan. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap perubahan intensitas warna yang relatif lebih rendah pada perlakuan ABF.

Sementara itu, perubahan nilai h° relatif lebih kecil dibandingkan perubahan C^* , yang menunjukkan bahwa perubahan selama penyimpanan lebih banyak terjadi pada intensitas warna daripada pergeseran rona dominan. Nilai h° yang relatif stabil menunjukkan bahwa karakteristik rona warna alpukat masih berada pada kisaran hijau kekuningan hingga akhir penyimpanan. Secara keseluruhan, perubahan nilai C^* dan h° menunjukkan bahwa pembekuan dan penyimpanan beku memengaruhi karakteristik warna alpukat, dengan bentuk pasta dan metode pembekuan ABF cenderung lebih mampu mempertahankan stabilitas warna dibandingkan bentuk dadu dan metode CF. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa bentuk bahan dan metode pembekuan secara bersama-sama dapat memengaruhi perubahan intensitas dan rona warna alpukat selama penyimpanan beku.

4.3.2 pH

Derajat keasaman (pH) merupakan salah satu indikator mutu kimia untuk mengevaluasi perubahan karakteristik alpukat setelah proses pembekuan dan *thawing*. Nilai pH dapat berubah akibat, hidrolisis lemak (lipolisis) dan komponen terlarut. Selain itu, fenomena *freeze concentration* menyebabkan sebagian air membeku lebih dahulu sehingga asam organik dan ion terlarut terkonsentrasi pada fase yang belum membeku (*unfrozen phase*). (Tan *et al.* 2019). Hasil pengukuran pH pada alpukat setelah penyimpanan beku dan *thawing* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Karakteristik pH daging buah alpukat setelah pembekuan dan thawing pada hari ke-5 dan ke-10

Perlakuan		H5	H10
Pembekuan	Bentuk		
ABF	Pasta	6,61±0,06 ^b	6,64±0,03 ^c
	Dadu	6,32±0,10 ^a	6,25±0,05 ^a
CF	Pasta	6,57±0,06 ^b	6,66±0,04 ^c
	Dadu	6,50±0,02 ^b	6,50±0,05 ^b

Keterangan : Huruf yang berbeda pada kolom dan waktu pengamatan yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Duncan pada taraf nyata 5% ($\alpha = 0,05$).

Sebelum diberikan perlakuan (H0), alpukat segar memiliki nilai pH sebesar 6,49 (Tabel 4). Berdasarkan tabel 7, setelah lima hari penyimpanan beku nilai pH berubah menjadi 6,32–6,61, kemudian pada hari ke-10 berada pada kisaran 6,25–6,66. Secara umum, perubahan pH yang terjadi relatif kecil, namun menunjukkan kecenderungan bahwa beberapa perlakuan mengalami penurunan pH dibandingkan kondisi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pembekuan tidak menyebabkan perubahan derajat keasaman yang drastis, tetapi memengaruhi distribusi komponen kimia di dalam jaringan selama penyimpanan. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pada hari ke-5 (H5), bentuk bahan dan interaksi antara bentuk bahan dengan metode pembekuan berpengaruh nyata terhadap nilai pH ($p < 0,05$), sedangkan metode pembekuan tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Pola tersebut mengalami perkembangan pada hari ke-10 (H10), di mana bentuk bahan, metode pembekuan, maupun interaksi antara kedua faktor seluruhnya berpengaruh nyata terhadap nilai pH ($p < 0,05$). Berbeda dengan parameter b^* dan C^* , yang baru menunjukkan interaksi signifikan pada hari ke-10, nilai pH telah memperlihatkan adanya pengaruh nyata dari kombinasi bentuk bahan dan metode pembekuan sejak hari ke-5, yang menunjukkan bahwa perubahan derajat keasaman alpukat telah dipengaruhi oleh kedua faktor tersebut sejak awal penyimpanan.

Apabila ditinjau berdasarkan bentuk bahan, perlakuan berbentuk pasta secara konsisten menghasilkan nilai pH yang lebih tinggi dibandingkan bentuk dadu, baik pada hari ke-5 maupun hari ke-10. Hal tersebut diduga dikarenakan proses homogenisasi menyebabkan komponen intraseluler, termasuk air dan asam organik, telah terdistribusi lebih merata sebelum pembekuan sehingga redistribusi selama pembentukan kristal es berlangsung lebih kecil dibandingkan pada bentuk dadu yang masih mempertahankan struktur jaringan utuh (Tan *et al.* 2019).

Pengaruh kombinasi perlakuan menjadi lebih nyata pada hari ke-10. Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa dadu-ABF menghasilkan nilai pH terendah dan berbeda nyata, sedangkan pasta-ABF dan pasta-CF tidak berbeda nyata. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaruh metode pembekuan terhadap perubahan pH bergantung pada bentuk bahan sebelum dibekukan. Pada bentuk dadu, metode pembekuan menyebabkan perbedaan pH yang nyata, sedangkan pada bentuk pasta kedua metode pembekuan memberikan hasil yang relatif setara. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan nilai pH selama penyimpanan beku tidak hanya dipengaruhi oleh suhu pembekuan, tetapi juga oleh karakteristik fisik bahan sebelum dibekukan. Breemer *et al.* (2024) menyatakan bahwa penyimpanan suhu rendah mampu mempertahankan stabilitas mutu kimia buah dengan menekan perubahan metabolik selama penyimpanan. Namun demikian, Wahyudi dan Purwandari (2018) menjelaskan bahwa perubahan metabolik yang masih berlangsung selama penyimpanan tetap dapat memengaruhi keseimbangan asam organik sehingga menyebabkan perubahan nilai pH. Dengan demikian, kombinasi bentuk bahan dan metode pembekuan berperan dalam menentukan kestabilan derajat keasaman alpukat selama penyimpanan beku.

Besaran persentase perubahan pH dari hari ke-5 ke hari ke-10 mendukung argumen bahwa signifikansi statistik yang teramati tidak diikuti oleh perubahan kimiawi yang besar. Seluruh perlakuan hanya mengalami perubahan antara 0,00–1,37%. Perlakuan dadu-CF bahkan tidak menunjukkan perubahan sama sekali antara kedua waktu pengamatan. Besaran perubahan yang secara konsisten berada di bawah 1,5% ini memperkuat interpretasi bahwa meskipun interaksi bentuk bahan

dan metode pembekuan berpengaruh nyata secara statistik terhadap pH pada kedua waktu pengamatan, pergeseran nilai pH akibat mekanisme *freeze concentration* dan kebocoran asam organik dari sel yang rusak tetap berada pada rentang yang sangat kecil dan tidak berpotensi menurunkan mutu maupun keamanan produk secara berarti (Neri *et al.* 2020).

Perubahan nilai pH yang terjadi selama penyimpanan juga berkaitan dengan redistribusi komponen terlarut di dalam jaringan. Fenomena tersebut tidak hanya memengaruhi konsentrasi ion hidrogen, tetapi juga distribusi gula dan senyawa terlarut lainnya yang selanjutnya tercermin pada perubahan nilai total padatan terlarut (TPT) yang dibahas pada subbab berikutnya. Meskipun perbedaan pH antar perlakuan signifikan secara statistik, besaran perubahan yang teramati (0,1–0,4 satuan) relatif kecil dan masih berada dalam rentang pH alpukat matang yang layak konsumsi. Signifikansi statistik ini kemungkinan besar mencerminkan presisi pengukuran dan konsistensi pengulangan, bukan perubahan kimiawi yang drastis seperti hidrolisis lipid. Hal ini didukung oleh hasil uji organoleptik yang menunjukkan atribut rasa tidak berbeda nyata antar perlakuan ($p=0,112$), mengindikasikan bahwa perubahan pH pada rentang ini berada di bawah ambang deteksi sensoris panelis terhadap rasa asam.

4.3.3 Total Padatan Terlarut

Total Padatan Terlarut (TPT) merupakan salah satu parameter kimia yang menggambarkan jumlah senyawa terlarut dalam bahan, seperti gula sederhana, asam organik, vitamin, mineral, dan komponen terlarut lainnya. Nilai TPT sering digunakan sebagai indikator mutu buah karena berkaitan dengan tingkat kematangan, cita rasa, serta perubahan komposisi kimia yang terjadi selama proses pembekuan dan penyimpanan. Selama pembekuan, pembentukan kristal es menyebabkan sebagian air berubah menjadi fase padat, sedangkan sebagian besar komponen terlarut tetap berada pada fase cair (*unfrozen phase*). Fenomena tersebut dikenal sebagai *freeze concentration*, yang menyebabkan konsentrasi zat terlarut meningkat sehingga nilai TPT setelah proses *thawing* dapat berubah dibandingkan kondisi awal (Fellows, 2017). Hasil pengukuran TPT disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8 Karakteristik total padatan terlarut (TPT) daging buah alpukat setelah pembekuan dan *thawing* pada hari ke-5 dan ke-10

Perlakuan		H5	H10
Pembekuan	Bentuk		
ABF	Pasta	7,57±0,69	8,40±0,35 ^c
	Dadu	5,07±0,15	5,17±0,15 ^a
CF	Pasta	6,68±0,39	7,20±0,61 ^b
	Dadu	5,32±0,28	5,41±0,11 ^a

Keterangan : Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Duncan pada taraf nyata 5% ($\alpha = 0,05$). Uji Duncan hanya dilakukan pada data hari ke-10 karena interaksi perlakuan berpengaruh nyata.

Sebelum diberikan perlakuan (H0), alpukat segar memiliki nilai TPT sebesar 4,30 °Brix (Tabel 4). Setelah penyimpanan selama lima hari, nilai TPT meningkat menjadi 5,07–7,57 °Brix, kemudian kembali meningkat pada hari ke-10 menjadi 5,17–8,40 °Brix. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses pembekuan dan

penyimpanan beku menyebabkan konsentrasi komponen terlarut semakin tinggi dibandingkan kondisi awal. Secara umum, perlakuan berbentuk pasta menunjukkan nilai TPT yang lebih tinggi dibandingkan bentuk dadu pada kedua waktu pengamatan. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pada hari ke-5 (H5), bentuk bahan berpengaruh nyata terhadap nilai total padatan terlarut (TPT), sedangkan metode pembekuan dan interaksi antara bentuk bahan dengan metode pembekuan tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Setelah penyimpanan selama 10 hari (H10), bentuk bahan dan interaksi antara bentuk bahan dengan metode pembekuan berpengaruh nyata terhadap nilai TPT ($p < 0,05$), sedangkan metode pembekuan tetap tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengaruh perlakuan terhadap perubahan TPT menjadi semakin jelas seiring bertambahnya lama penyimpanan beku.

Apabila ditinjau berdasarkan bentuk bahan, perlakuan berbentuk pasta secara konsisten menghasilkan nilai TPT yang lebih tinggi dibandingkan bentuk dadu, baik pada hari ke-5 maupun hari ke-10. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk bahan menjadi pasta berkontribusi terhadap peningkatan nilai TPT setelah proses *thawing*. Diduga proses homogenisasi menyebabkan gula, asam organik, dan komponen terlarut lainnya telah terdistribusi lebih merata sebelum pembekuan, sehingga redistribusi komponen tersebut selama pembentukan kristal es berlangsung lebih stabil dibandingkan pada bentuk dadu yang masih memiliki struktur jaringan utuh (Tan *et al.* 2019). Sedangkan jika ditinjau berdasarkan metode pembekuan, ABF cenderung menghasilkan nilai TPT lebih tinggi dibandingkan CF, terutama pada perlakuan berbentuk pasta. Pembekuan cepat menghasilkan kristal es berukuran lebih kecil dan tersebar lebih merata sehingga distribusi komponen terlarut di dalam jaringan lebih stabil selama pembekuan. Sebaliknya, pembekuan lambat pada CF menghasilkan kristal es yang lebih besar sehingga redistribusi air dan zat terlarut selama proses *thawing* berlangsung lebih besar (Petzold *et al.* 2017).

Pengaruh kombinasi perlakuan menjadi lebih nyata pada hari ke-10. Hasil uji Duncan menunjukkan bahwa perlakuan pasta-ABF menghasilkan nilai TPT tertinggi dan berbeda nyata, sedangkan kedua perlakuan berbentuk dadu tidak berbeda nyata satu sama lain. Hal tersebut menunjukkan bahwa efektivitas metode pembekuan terhadap peningkatan nilai TPT bergantung pada bentuk bahan sebelum dibekukan. Kombinasi homogenisasi dan pembekuan cepat mampu mempertahankan distribusi komponen terlarut secara lebih baik dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Peningkatan nilai TPT pada penelitian ini diduga berkaitan dengan fenomena *freeze concentration* (Fellows, 2017). Selama pembekuan, air bebas terlebih dahulu membentuk kristal es, sedangkan gula, asam organik, mineral, dan komponen terlarut lainnya tetap berada pada fase cair. Akibatnya, konsentrasi zat terlarut meningkat sehingga nilai $^{\circ}\text{Brix}$ yang terukur setelah proses *thawing* menjadi lebih tinggi dibandingkan sebelum pembekuan. Selain itu, pembekuan cepat menggunakan ABF menghasilkan kristal es yang lebih kecil sehingga kerusakan jaringan dapat diminimalkan dan distribusi komponen terlarut tetap lebih stabil dibandingkan pembekuan lambat (Zhu *et al.* 2019).

Persentase peningkatan nilai TPT dari hari ke-5 ke hari ke-10 menunjukkan pola yang berbeda nyata antara bentuk pasta dan bentuk dadu. Pada bentuk pasta, nilai TPT meningkat sebesar 10,96% pada perlakuan ABF (7,57 menjadi 8,40 $^{\circ}\text{Brix}$) dan 7,78% pada perlakuan CF (6,68 menjadi 7,20 $^{\circ}\text{Brix}$), sedangkan pada

bentuk dadu peningkatannya jauh lebih kecil, yaitu hanya 1,97% pada ABF dan 1,69% pada CF. Perbedaan besaran peningkatan yang mencolok ini memperkuat argumen bahwa struktur sel pasta yang telah mengalami penghancuran dan homogenisasi lebih rentan terhadap efek konsentrasi padatan terlarut (*freeze concentration*) yang terakumulasi seiring bertambahnya waktu penyimpanan beku, dibandingkan bentuk dadu yang struktur jaringannya masih relatif utuh sehingga migrasi dan konsentrasi zat terlarut berlangsung lebih terbatas (Tan *et al.* 2019). Peningkatan yang paling besar secara konsisten terjadi pada perlakuan pasta-ABF, yang juga tercatat sebagai perlakuan dengan deviasi TPT terjauh dari kondisi segar (H0) pada evaluasi indeks efektivitas De Garmo, sehingga temuan ini memperkuat penjelasan mengapa pasta-ABF, meskipun unggul secara nilai absolut, tidak menjadi kombinasi dengan tingkat retensi mutu tertinggi terhadap kondisi awal.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai TPT meningkat selama penyimpanan beku dibandingkan kondisi awal. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh bentuk bahan, serta interaksi keduanya yang semakin nyata setelah sepuluh hari penyimpanan. Kombinasi pasta-ABF menghasilkan nilai TPT tertinggi, menunjukkan bahwa pembekuan cepat pada bahan yang telah dihomogenisasi lebih efektif mempertahankan konsentrasi komponen terlarut selama penyimpanan beku. Perubahan distribusi komponen terlarut tersebut juga berkaitan erat dengan perubahan kandungan air di dalam jaringan, sehingga pembahasan selanjutnya difokuskan pada parameter kadar air.

4.3.4 Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter kimia yang digunakan untuk mengevaluasi kandungan air dalam jaringan bahan pangan setelah mengalami proses pembekuan dan *thawing*. Kandungan air berperan penting dalam menentukan stabilitas mutu, karena berkaitan dengan aktivitas enzim, pertumbuhan mikroorganisme, serta karakteristik fisik bahan (Yulviani *et al.* 2022). Selama proses pembekuan, sebagian besar air bebas berubah menjadi kristal es sehingga aktivitas biologis dapat ditekan. Namun demikian, proses pembekuan tidak selalu mengubah jumlah air total di dalam bahan, melainkan lebih banyak memengaruhi distribusi air di dalam jaringan (Roos, 2021). Hasil pengukuran kadar air disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Karakteristik kadar air daging buah alpukat setelah pembekuan dan *thawing* pada hari ke-5 dan ke-10

Perlakuan		H5	H10
Pembekuan	Bentuk		
ABF	Pasta	85,04±0,15	85,01±0,05
	Dadu	84,74±0,14	84,71±0,19
CF	Pasta	84,99±0,08	84,91±0,02
	Dadu	84,72±0,72	85,50±0,79

Sebelum diberikan perlakuan (H0), alpukat segar memiliki kadar air sebesar 84,73%. Setelah penyimpanan selama lima hari, kadar air berada pada kisaran 84,72–85,04%, sedangkan pada hari ke-10 berkisar antara 84,71–85,50%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kadar air pada seluruh perlakuan relatif mendekati kondisi awal dengan perubahan yang sangat kecil selama penyimpanan beku. Hal

ini mengindikasikan bahwa proses pembekuan dan penyimpanan tidak menyebabkan perubahan kandungan air total secara berarti. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa pada hari ke-5 maupun hari ke-10, bentuk bahan, metode pembekuan, serta interaksi keduanya tidak memberikan pengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap kadar air alpukat setelah proses *thawing*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan bentuk bahan maupun laju penurunan suhu belum mampu menghasilkan perubahan kadar air total yang signifikan.

Apabila ditinjau berdasarkan bentuk bahan, perlakuan pasta maupun dadu menunjukkan kadar air yang relatif seragam pada kedua waktu pengamatan. Meskipun secara deskriptif terdapat sedikit perbedaan nilai antar perlakuan, variasi tersebut tidak cukup besar untuk menghasilkan perbedaan nyata secara statistik. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan bentuk bahan sebelum pembekuan tidak memengaruhi kandungan air total setelah proses *thawing*. Sedangkan apabila ditinjau berdasarkan metode pembekuan, ABF maupun CF juga menghasilkan kadar air yang relatif serupa. Meskipun pembekuan cepat diketahui mampu menghasilkan kristal es yang lebih kecil dan mempertahankan struktur jaringan lebih baik dibandingkan pembekuan lambat, perbedaan tersebut tidak tercermin pada kadar air total yang diukur setelah proses *thawing*. Hal ini menunjukkan bahwa laju penurunan suhu lebih berpengaruh terhadap distribusi air di dalam jaringan dibandingkan terhadap jumlah air total yang terkandung dalam bahan (Parandi *et al.* 2022).

Tidak ditemukannya pengaruh interaksi antara bentuk bahan dan metode pembekuan menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut tidak saling memengaruhi dalam menentukan kadar air alpukat setelah *thawing*. Dengan demikian, respons kadar air pada setiap bentuk bahan relatif sama, baik dibekukan menggunakan ABF maupun CF. Hasil penelitian ini diduga berkaitan dengan mekanisme redistribusi air selama proses pembekuan dan pencairan. Selama pembekuan, air bebas membentuk kristal es, kemudian kembali mencair dan terdistribusi ke dalam jaringan selama proses *thawing*. Oleh karena itu, kadar air total yang terukur setelah pencairan cenderung tetap mendekati kondisi awal meskipun mikrostruktur jaringan mengalami perubahan (Roos, 2021). Zhu *et al.* (2019) juga menyatakan bahwa laju penurunan suhu lebih banyak memengaruhi mikrostruktur jaringan dan ukuran kristal es dibandingkan kandungan air total bahan. Dengan demikian, pengaruh utama pembekuan bukan terletak pada berkurangnya jumlah air, melainkan pada perubahan distribusi air di dalam jaringan yang selanjutnya dapat memengaruhi karakteristik mutu lainnya.

Persentase perubahan kadar air dari hari ke-5 ke hari ke-10 menjadi bukti kuantitatif tambahan yang memperkuat kestabilan parameter ini dibandingkan parameter mutu lainnya. Tiga dari empat kombinasi perlakuan menunjukkan perubahan yang sangat kecil, yaitu pasta-ABF dan dadu-ABF masing-masing $-0,04\%$, serta Pasta CF $-0,09\%$, sedangkan hanya perlakuan dadu-CF yang menunjukkan peningkatan sedikit lebih besar sebesar $0,92\%$ ($84,72\%$ menjadi $85,50\%$). Besaran perubahan yang secara keseluruhan berada di bawah 1% ini jauh lebih kecil dibandingkan besaran perubahan pada parameter C^* , maupun TPT yang mencapai puluhan persen mengonfirmasi bahwa kemasan LDPE efektif membatasi kehilangan uap air (*freezer burn*) selama rentang waktu penyimpanan yang diamati, dan sejalan dengan hasil analisis ragam yang menunjukkan tidak terdapat pengaruh

nyata baik dari bentuk bahan, metode pembekuan, maupun interaksi keduanya terhadap kadar air pada kedua waktu pengamatan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air alpukat relatif stabil selama penyimpanan beku dan tidak dipengaruhi secara nyata oleh bentuk bahan, metode pembekuan, maupun interaksi keduanya. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembekuan lebih banyak menyebabkan perubahan distribusi air daripada perubahan kandungan air total. Meskipun demikian, perubahan mikrostruktur akibat redistribusi air tetap berpotensi memengaruhi karakteristik sensoris produk. Oleh karena itu, pada subbab berikutnya dilakukan evaluasi organoleptik untuk mengetahui tingkat penerimaan panelis terhadap alpukat beku yang dihasilkan.

4.3.5 Organoleptik

Pengujian organoleptik dilakukan terhadap produk akhir berupa jus alpukat yang dibuat dari masing-masing perlakuan setelah proses *thawing*. Pembuatan jus dilakukan menggunakan formulasi yang sama untuk seluruh perlakuan, yaitu 450 g daging buah alpukat, 200 mL air, dan 55 gram gula pasir, sehingga perbedaan tingkat kesukaan panelis diharapkan berasal dari pengaruh bentuk bahan dan metode pembekuan, bukan akibat perbedaan komposisi formulasi. Penilaian dilakukan terhadap atribut warna, aroma, tekstur, rasa, dan penerimaan keseluruhan menggunakan uji hedonik skala 1–5. Hasil perhitungan tingkat kesukaan panelis disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10 Tingkat kesukaan panelis terhadap jus alpukat pada berbagai perlakuan

Perlakuan		Penilaian panelis				
Pembekuan	Bentuk	Warna	Tekstur	Aroma	Rasa	Keseluruhan
ABF	Pasta	4,00±0,00	4,00±0,00	3,63±1,00	3,17±1,21	3,43±1,04
	Dadu	3,63±1,00	3,77±1,01	3,40±1,00	3,73±1,11	3,83±0,99
CF	Pasta	3,77±1,04	3,97±1,03	3,70±1,09	3,63±1,07	4,00±0,95
	Dadu	3,53±1,04	3,47±1,14	3,53±1,01	3,87±1,01	3,80±0,89

1. Warna

Berdasarkan Tabel 10, tingkat kesukaan panelis terhadap atribut warna berkisar antara 3,53–4,00, yang menunjukkan bahwa seluruh perlakuan masih berada pada kategori disukai. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada perlakuan pasta-ABF, sedangkan nilai terendah diperoleh pada perlakuan dadu-CF. Meskipun demikian, variasi skor antar perlakuan relatif kecil sehingga secara visual seluruh sampel masih memiliki penampakan yang dapat diterima oleh panelis. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan nilai warna yang terukur secara instrumental belum sepenuhnya diikuti oleh perubahan persepsi visual manusia. García *et al.* (2022) menyatakan bahwa warna merupakan atribut pertama yang digunakan konsumen dalam menilai mutu produk pangan, sedangkan Mahmud *et al.* (2026) menjelaskan bahwa pembentukan kristal es dapat menyebabkan kerusakan jaringan yang memicu pencoklatan enzimatis. Namun demikian, tingkat pencoklatan yang terjadi pada penelitian ini diduga masih relatif rendah sehingga belum mampu menghasilkan perbedaan warna yang dapat dikenali secara nyata oleh panelis.

2. Tekstur

Nilai rata-rata tingkat kesukaan panelis terhadap atribut tekstur berkisar antara 3,47–4,00, dengan skor tertinggi diperoleh pada perlakuan pasta-ABF. Seluruh perlakuan masih memperoleh penilaian pada kategori disukai, menunjukkan bahwa jus alpukat yang dihasilkan tetap memiliki tekstur yang dapat diterima oleh panelis meskipun berasal dari metode pembekuan yang berbeda. Tekstur merupakan atribut sensori yang dipengaruhi oleh kondisi jaringan setelah proses pembekuan. Wu *et al.* (2022) menjelaskan bahwa integritas struktur sel, distribusi air, dan pembentukan kristal es berperan penting dalam menentukan karakteristik tekstur produk beku. Pada penelitian ini, perubahan struktur jaringan yang terjadi diduga belum cukup besar untuk menghasilkan perbedaan tekstur yang dapat dikenali secara nyata oleh panelis, sehingga seluruh perlakuan memperoleh tingkat penerimaan yang relatif seragam.

3. Aroma

Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata-rata kesukaan panelis terhadap atribut aroma berada pada kisaran 3,40–3,70, menunjukkan bahwa seluruh perlakuan masih diterima dengan baik. Perlakuan pasta-CF memperoleh skor rata-rata tertinggi, sedangkan dadu-ABF memperoleh skor rata-rata terendah. Namun demikian, selisih nilai antar perlakuan relatif kecil sehingga tidak menunjukkan adanya kecenderungan preferensi yang kuat terhadap salah satu perlakuan. Aroma produk beku sangat dipengaruhi oleh kestabilan senyawa volatil selama penyimpanan. Menurut Zhang *et al.* (2021), suhu rendah selama pembekuan mampu memperlambat aktivitas enzimatis dan reaksi oksidasi yang berperan dalam pembentukan maupun degradasi senyawa volatil. Hal ini sesuai dengan Fellows (2017) yang menjelaskan bahwa senyawa volatil penyusun aroma dapat mengalami perubahan selama pembekuan, namun perubahan tersebut umumnya tidak terlalu besar apabila penyimpanan dilakukan dalam waktu relatif singkat dan bahan dikemas dengan baik. Oleh karena itu, karakteristik aroma alpukat pada seluruh perlakuan relatif tetap terjaga sehingga menghasilkan tingkat penerimaan panelis yang hampir seragam.

4. Rasa

Tingkat kesukaan panelis terhadap atribut rasa berkisar antara 3,17–3,87. Nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada perlakuan dadu-CF, sedangkan nilai terendah diperoleh pada perlakuan pasta-ABF. Meskipun terdapat kecenderungan panelis lebih menyukai rasa pada beberapa perlakuan tertentu, seluruh nilai masih berada pada kategori netral hingga disukai sehingga secara umum produk tetap dapat diterima. Menurut Zhang *et al.* (2021), suhu pembekuan yang rendah mampu menghambat aktivitas enzimatis dan berbagai reaksi kimia yang berpotensi mengubah komponen penyusun cita rasa. Dengan demikian, karakteristik rasa pada seluruh perlakuan relatif tetap terjaga sehingga panelis memberikan tingkat kesukaan yang hampir sama terhadap seluruh sampel.

5. Penerimaan keseluruhan

Penerimaan keseluruhan (*overall acceptance*) merupakan indikator yang menggambarkan keputusan akhir panelis setelah mempertimbangkan seluruh atribut sensori secara bersamaan. Berdasarkan Tabel 10, skor penerimaan keseluruhan berkisar antara 3,43–4,00. Perlakuan pasta-CF memperoleh nilai rata-

rata tertinggi, sedangkan pasta-ABF memperoleh nilai rata-rata terendah. Secara deskriptif, hasil tersebut menunjukkan bahwa panelis cenderung lebih menyukai jus alpukat yang dihasilkan melalui pembekuan menggunakan CF, meskipun seluruh perlakuan masih berada pada kategori disukai. Temuan ini sejalan dengan Popper *et al.* (2004) yang menyatakan bahwa penerimaan keseluruhan (*overall acceptance*) merupakan respons konsumen terhadap produk secara menyeluruh yang dipengaruhi oleh kombinasi atribut sensori, seperti warna, aroma, rasa, dan tekstur. Oleh karena itu, suatu produk dapat menunjukkan perbedaan tingkat penerimaan keseluruhan meskipun masing-masing atribut sensori yang dinilai secara terpisah tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan. Hal ini terjadi karena panelis secara alami mengintegrasikan seluruh informasi sensori menjadi satu persepsi akhir ketika menentukan tingkat kesukaan terhadap suatu produk.

6. Hasil uji Friedman serta uji lanjut Siegel dan Castellan

Untuk mengonfirmasi apakah perbedaan tingkat kesukaan yang diamati secara deskriptif benar-benar berbeda secara statistik, data organoleptik dianalisis menggunakan uji Friedman karena bersifat ordinal dan diperoleh dari panelis yang sama (*related samples*) pada seluruh perlakuan. Hasil analisis menunjukkan bahwa atribut warna, tekstur, aroma, dan rasa tidak berbeda nyata antar perlakuan ($p > 0,05$). Sebaliknya, atribut penerimaan keseluruhan menunjukkan perbedaan nyata antar kombinasi perlakuan ($\chi^2 = 8,790$; $p = 0,032$), sehingga analisis dilanjutkan menggunakan metode Siegel dan Castellan (1988). Karena hanya atribut penerimaan keseluruhan yang berbeda nyata, dilakukan uji lanjut menggunakan metode Siegel dan Castellan (1988) untuk mengetahui apakah terdapat pasangan perlakuan yang memiliki perbedaan tingkat kesukaan secara spesifik. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai *Critical Difference* (CD) sebesar 0,88. Hasil uji lanjut Siegel & Castellan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11 Uji lanjut Siegel & Castellan pada atribut penerimaan keseluruhan

Perbandingan	Selisih Mean Rank	<i>Critical Difference</i> (CD)
Pasta ABF – Dadu ABF	0,484	0,880
Pasta ABF – Pasta CF	0,850	0,880
Pasta ABF – Dadu CF	0,334	0,880
Dadu ABF – Pasta CF	0,366	0,880
Dadu ABF – Dadu CF	0,150	0,880
Pasta CF – Dadu CF	0,516	0,880

Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa seluruh selisih *Mean Rank* antar pasangan perlakuan masih lebih kecil daripada nilai *Critical Difference* (0,88), sehingga tidak terdapat pasangan perlakuan yang berbeda nyata secara statistik. Dengan demikian, meskipun uji Friedman mampu mendeteksi adanya perbedaan tingkat penerimaan keseluruhan di antara keempat kombinasi perlakuan secara simultan, perbedaan tersebut tidak dapat diatribusikan secara spesifik pada satu pasangan perlakuan tertentu setelah dilakukan uji lanjut. Kondisi ini secara metodologis merupakan fenomena yang dapat terjadi pada analisis nonparametrik. Uji Friedman berfungsi mengevaluasi apakah terdapat perbedaan secara keseluruhan di antara seluruh perlakuan, sedangkan uji lanjut Siegel dan Castellan melakukan perbandingan berpasangan dengan menerapkan koreksi Bonferroni

untuk mengendalikan peluang terjadinya kesalahan Tipe I (*family-wise error rate*). Penerapan koreksi tersebut menyebabkan batas signifikansi menjadi lebih ketat sehingga hanya pasangan perlakuan dengan perbedaan yang cukup besar yang dapat dinyatakan berbeda nyata.

Pada penelitian ini, nilai *Critical Difference* sebesar 0,88 hanya sedikit lebih besar dibandingkan selisih *Mean Rank* terbesar, yaitu 0,85 antara perlakuan pasta-ABF dan pasta-CF. Kedekatan kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat penerimaan panelis terhadap keempat kombinasi perlakuan relatif serupa. Meskipun terdapat kecenderungan panelis lebih menyukai perlakuan tertentu berdasarkan nilai rata-rata hedonik, besarnya perbedaan tersebut belum cukup untuk dinyatakan signifikan setelah diterapkan koreksi terhadap pengujian berganda. Secara keseluruhan, hasil organoleptik menunjukkan bahwa seluruh kombinasi perlakuan masih dapat diterima oleh panelis, dengan perbedaan yang relatif kecil pada setiap atribut sensori. Hasil ini juga memperlihatkan bahwa evaluasi mutu produk tidak dapat hanya didasarkan pada parameter sensori, melainkan perlu dipadukan dengan parameter objektif seperti warna, pH, total padatan terlarut, dan kadar air. Oleh karena itu, penentuan kombinasi perlakuan terbaik pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode indeks efektivitas De Garmo yang mengintegrasikan seluruh parameter mutu sehingga keputusan yang dihasilkan mencerminkan performa produk secara lebih komprehensif.

4.4 Neraca Massa Proses Pembekuan Alpukat

Neraca massa disusun untuk menggambarkan distribusi massa bahan baku alpukat selama proses penelitian, mulai dari bahan baku awal hingga pembagian sampel pada setiap perlakuan. Penyusunan neraca massa bertujuan untuk memberikan informasi mengenai pemanfaatan bahan pada setiap tahapan proses, serta memastikan penggunaan bahan selama penelitian dapat ditelusuri secara sistematis. Hasil perhitungan neraca massa penggunaan bahan disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12 Neraca massa penggunaan bahan baku alpukat untuk analisis parameter objektif

Tahapan Proses	Massa (gram)	Presentase (%)
Alpukat utuh	3.315,00	100,00
Biji	895,20	27,00
Kulit	331,50	10,00
Daging buah sebelum sortasi	2.094,30	63,18
Daging buah setelah sortasi	2.027,76	61,17
Sampel <i>Air Blast Freezer</i> (ABF)	998,80	30,13
Sampel <i>chest freezer</i>	978,14	29,51
Total sampel	1.976,94	59,63
Daging buah tidak digunakan	50,82	1,53

Berdasarkan Tabel 12, penelitian ini menggunakan 10 buah alpukat dengan total massa awal sebesar 3.315,00 gram. Setelah dilakukan pengupasan dan pemisahan biji, diperoleh massa biji sebesar 895,2 gram (27%) dan massa kulit sebesar 331,5 gram (10%), sehingga dihasilkan massa daging buah sebelum sortasi sebesar 2.094,30 gram (63,18%) dari total bahan baku. Selanjutnya, daging buah

disortasi untuk menghilangkan bagian yang mengalami kerusakan fisik, pencoklatan, maupun cacat lainnya sehingga diperoleh 2.027,76 gram (61,17%) daging buah yang layak digunakan sebagai bahan penelitian. Daging buah hasil sortasi kemudian dibagi ke dalam empat kombinasi perlakuan, yaitu pasta-ABF, dadu-ABF, pasta-CF, dan dadu-CF, dengan masing-masing kombinasi terdiri atas tiga ulangan. Massa sampel pada setiap unit percobaan dihitung berdasarkan massa bersih daging buah setelah dikurangi massa kemasan LDPE sebesar 2 gram per kemasan. Berdasarkan perhitungan tersebut, total daging buah yang digunakan untuk analisis parameter objektif mencapai 1.976,94 gram (59,63%), sedangkan 50,82 gram (1,53%) daging buah tidak digunakan sebagai sampel pengujian karena penyesuaian massa pada setiap unit percobaan agar seluruh perlakuan memiliki bobot yang seragam.

Neraca massa yang disajikan pada Tabel 12 hanya menggambarkan penggunaan bahan baku untuk analisis parameter objektif, yaitu laju penurunan suhu, karakteristik warna, derajat keasaman (pH), total padatan terlarut (TPT), dan kadar air. Sementara itu, bahan yang digunakan untuk pengujian organoleptik tidak dimasukkan ke dalam perhitungan neraca massa tersebut karena disiapkan secara terpisah menggunakan alpukat tambahan dengan tingkat kematangan, karakteristik fisik, serta prosedur preparasi dan perlakuan pembekuan yang sama. Pemisahan penggunaan bahan ini dilakukan untuk memastikan bahwa kebutuhan sampel pada pengujian sensori tidak memengaruhi jumlah unit percobaan maupun ketersediaan sampel yang digunakan dalam analisis parameter objektif.

4.5 Penentuan Kombinasi Perlakuan Terbaik

Hasil analisis terhadap seluruh parameter mutu menunjukkan bahwa tidak terdapat satu kombinasi perlakuan yang memberikan hasil terbaik pada seluruh parameter yang diamati. Setiap kombinasi perlakuan menunjukkan keunggulan pada parameter mutu yang berbeda, sehingga penentuan perlakuan terbaik tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu parameter. Perlakuan dadu-ABF menunjukkan nilai yang paling mendekati kondisi awal (H_0) pada beberapa parameter, antara lain *Chroma* (C^*), TPT, dan kadar air, sedangkan perlakuan pasta-CF menunjukkan nilai organoleptik keseluruhan tertinggi. Sementara itu, parameter *Hue angle* (h°) dan pH menunjukkan respons yang berbeda antar perlakuan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya perbedaan keunggulan antar perlakuan pada masing-masing parameter mutu, sehingga diperlukan pendekatan yang dapat mengintegrasikan seluruh parameter secara simultan untuk menentukan kombinasi perlakuan terbaik. Oleh karena itu, metode De Garmo digunakan untuk menggabungkan nilai dari seluruh parameter mutu berdasarkan bobot kepentingannya sehingga diperoleh nilai akhir yang dapat digunakan sebagai dasar penentuan perlakuan terbaik.

Pada penelitian ini, penentuan perlakuan terbaik dilakukan menggunakan metode indeks efektivitas De Garmo dengan pendekatan *reference quality*, yaitu menggunakan mutu alpukat segar (H_0) sebagai nilai acuan. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian bukan untuk memperoleh nilai parameter yang paling tinggi ataupun paling rendah, melainkan untuk mendapatkan kombinasi perlakuan pembekuan yang mampu mempertahankan karakteristik mutu alpukat sedekat mungkin dengan kondisi segarnya setelah proses pembekuan dan *thawing*. Oleh karena itu, seluruh parameter objektif dievaluasi berdasarkan besarnya deviasi

terhadap nilai H_0 , sedangkan parameter organoleptik keseluruhan dinilai menggunakan prinsip semakin tinggi tingkat kesukaan panelis maka semakin baik. Kriteria penilaian setiap parameter disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13 Kriteria penilaian metode De Garmo

Parameter	Kriteria
<i>Chroma</i> (C^*)	Mendekati H_0
<i>Hue angle</i> (h°)	Mendekati H_0
pH	Mendekati H_0
TPT	Mendekati H_0
Kadar air	Mendekati H_0
Organoleptik Keseluruhan	Semakin tinggi semakin baik

Pemilihan kriteria pada Tabel 13 didasarkan pada tujuan penelitian, yaitu mempertahankan mutu alpukat setelah pembekuan agar tetap menyerupai kondisi segar. Oleh karena itu, seluruh parameter fisikokimia dievaluasi berdasarkan kedekatannya terhadap nilai H_0 sebagai *reference quality*. Semakin kecil deviasi suatu parameter terhadap kondisi awal, semakin tinggi nilai efektivitas yang diberikan. Pendekatan ini berbeda dengan metode indeks efektivitas konvensional yang menggunakan prinsip *larger-is-better* atau *smaller-is-better*. Pada penelitian ini, hanya parameter organoleptik keseluruhan yang menggunakan prinsip semakin tinggi semakin baik karena menggambarkan tingkat penerimaan konsumen terhadap produk akhir. Selanjutnya, setiap parameter diberikan bobot yang sama, sebagaimana disajikan pada Tabel 14.

Tabel 14 Bobot parameter pada metode De Garmo

Parameter	Bobot
<i>Chroma</i> (C^*)	0,167
<i>Hue angle</i> (h°)	0,167
pH	0,167
TPT	0,167
Kadar Air	0,167
Organoleptik Keseluruhan	0,167

Pembobotan yang sama dilakukan karena seluruh parameter dipandang memiliki tingkat kepentingan yang setara dalam merepresentasikan mutu alpukat setelah proses pembekuan dan *thawing*. Dengan demikian, tidak terdapat satu parameter yang lebih dominan dibandingkan parameter lainnya dalam menentukan perlakuan terbaik. Pendekatan ini dipilih agar nilai efektivitas yang dihasilkan mencerminkan keseimbangan mutu secara menyeluruh, baik dari aspek fisik, kimia, maupun penerimaan sensoris. Nilai efektivitas total setiap kombinasi perlakuan diperoleh melalui penjumlahan seluruh nilai berbobot ($NP \times W$) pada masing-masing parameter. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15 Nilai efektivitas total dan peringkat perlakuan

Perlakuan	Nilai Efektivitas	Peringkat
Dadu-ABF	0,617	1
Pasta-CF	0,603	2
Dadu-CF	0,434	3
Pasta-ABF	0,387	4

Berdasarkan hasil perhitungan metode indeks efektivitas De Garmo, kombinasi perlakuan dadu-ABF memperoleh nilai efektivitas tertinggi sebesar 0,617 sehingga ditetapkan sebagai kombinasi perlakuan terbaik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perlakuan dadu-ABF memiliki kinerja keseluruhan paling baik berdasarkan integrasi enam parameter mutu yang digunakan, yaitu C^* , h° , pH, total padatan terlarut (TPT), kadar air, dan organoleptik keseluruhan. Karena seluruh parameter diberikan bobot yang sama, yaitu 0,1667, nilai efektivitas akhir mencerminkan kontribusi yang setara dari masing-masing parameter terhadap penentuan mutu keseluruhan. Keunggulan perlakuan dadu-ABF terutama didukung oleh nilai efektivitas yang tinggi pada C^* , TPT, dan kadar air, serta nilai organoleptik keseluruhan yang relatif tinggi. Namun, perlakuan ini memiliki nilai efektivitas yang rendah pada h° dan pH karena kedua parameter tersebut memiliki penyimpangan yang lebih besar dari kondisi awal (H_0) dibandingkan beberapa perlakuan lainnya.

Perlakuan pasta-CF menempati peringkat kedua dengan nilai efektivitas sebesar 0,603. Nilai tersebut terutama didukung oleh nilai efektivitas tertinggi pada h° dan organoleptik keseluruhan, serta nilai yang relatif baik pada kadar air dan beberapa parameter lainnya. Meskipun demikian, perubahan C^* , pH, dan TPT menyebabkan nilai efektivitas totalnya masih berada sedikit di bawah perlakuan dadu-ABF. Selanjutnya, perlakuan dadu-CF menempati peringkat ketiga dengan nilai efektivitas sebesar 0,433. Perlakuan ini menunjukkan keunggulan pada pH dan TPT, tetapi memiliki nilai efektivitas rendah pada C^* dan kadar air serta nilai h° yang relatif rendah. Sementara itu, perlakuan pasta-ABF memperoleh nilai efektivitas terendah sebesar 0,387. Meskipun perlakuan tersebut menunjukkan nilai efektivitas yang relatif baik pada C^* , h° , dan kadar air, nilai efektivitas yang rendah pada TPT dan organoleptik keseluruhan menurunkan nilai efektivitas totalnya.

Secara keseluruhan, hasil analisis De Garmo menunjukkan bahwa tidak terdapat satu perlakuan yang unggul pada seluruh parameter mutu. Setiap kombinasi perlakuan memiliki keunggulan dan kelemahan pada parameter yang berbeda, sehingga penentuan perlakuan terbaik perlu mempertimbangkan seluruh parameter secara simultan. Berdasarkan pendekatan tersebut, kombinasi dadu-ABF memperoleh nilai efektivitas tertinggi dan ditetapkan sebagai perlakuan terbaik dengan nilai 0,617. Hasil ini menunjukkan bahwa pembekuan menggunakan ABF pada bahan berbentuk dadu memberikan keseimbangan mutu terbaik berdasarkan enam parameter yang dievaluasi setelah penyimpanan beku selama sepuluh hari. Meskipun demikian, hasil indeks efektivitas De Garmo dipengaruhi oleh sistem pembobotan yang digunakan. Dalam penelitian ini, seluruh parameter diberikan bobot yang sama karena dianggap memiliki tingkat kepentingan yang setara dalam merepresentasikan mutu alpukat beku. Oleh karena itu, apabila tujuan optimasi pada penelitian selanjutnya lebih diarahkan pada parameter tertentu, seperti

penerimaan konsumen, stabilitas warna, atau karakteristik fisikokimia tertentu, pembobotan dapat disesuaikan dengan tujuan penelitian.

4.6 Saran Penyajian Produk Jus Alpukat Beku

Berdasarkan hasil analisis fisikokimia, organoleptik, dan indeks efektivitas De Garmo, kombinasi perlakuan bentuk dadu dengan metode pembekuan *air blast freezer* (ABF) menunjukkan nilai efektivitas tertinggi dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi perlakuan tersebut memiliki kemampuan yang relatif lebih baik dalam mempertahankan mutu alpukat beku berdasarkan parameter yang diamati pada penelitian ini. Oleh karena itu, kombinasi tersebut dapat dipertimbangkan sebagai alternatif teknologi pengolahan alpukat beku pada kondisi proses yang digunakan dalam penelitian ini.

Produk yang dikembangkan dalam penelitian ini diarahkan sebagai alpukat beku dalam kemasan dengan bobot 80 g, sehingga dapat disimpan dan selanjutnya diolah menjadi jus sesuai kebutuhan konsumen. Untuk memudahkan penyajian, setiap satu kemasan alpukat beku seberat 80 g dapat diolah dengan penambahan sekitar 40 mL air dan 8 g gula pasir, kemudian diblender hingga diperoleh tekstur dan konsistensi jus yang homogen. Formulasi penyajian ini dapat digunakan sebagai rekomendasi awal konsumsi, sedangkan tingkat kemanisan dan kekentalan masih dapat disesuaikan dengan preferensi konsumen. Rekomendasi tersebut divisualisasikan dalam bentuk desain kemasan yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Produk alpukat beku dalam kemasan



V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

1. Bentuk bahan dan metode pembekuan memberikan pengaruh terhadap karakteristik mutu alpukat beku, dengan respons yang berbeda pada setiap parameter yang diamati. Interaksi antara bentuk bahan dan metode pembekuan berpengaruh nyata terhadap *Chroma* (C^*), pH, dan total padatan terlarut (TPT), sedangkan beberapa parameter lainnya menunjukkan respons terhadap faktor utama dan/atau tidak menunjukkan perbedaan yang nyata antar perlakuan. Kadar air tidak menunjukkan perbedaan yang nyata antar perlakuan.
2. Pembekuan menggunakan Air Blast Freezer (ABF) menghasilkan penurunan suhu bahan yang lebih cepat dibandingkan chest freezer (CF). Perlakuan pasta-ABF mencapai suhu inti $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam waktu paling singkat, yaitu 14 menit, sedangkan perlakuan dadu-CF membutuhkan waktu paling lama, yaitu 220 menit. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode pembekuan dan bentuk bahan memengaruhi kecepatan pelepasan panas selama proses pembekuan.
3. Hasil uji organoleptik menggunakan uji Friedman menunjukkan bahwa atribut warna, tekstur, aroma, dan rasa tidak menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan, sedangkan atribut penerimaan keseluruhan menunjukkan perbedaan nyata ($p = 0,032$). Secara deskriptif, perlakuan pasta-CF memperoleh nilai rata-rata penerimaan keseluruhan tertinggi. Namun, berdasarkan uji lanjut Siegel dan Castellan dengan koreksi terhadap pengujian berganda, tidak terdapat pasangan perlakuan yang berbeda nyata. Dengan demikian, perbedaan penerimaan keseluruhan antar perlakuan lebih tepat dinyatakan sebagai kecenderungan secara deskriptif.
4. Berdasarkan metode indeks efektivitas De Garmo dengan pendekatan reference quality dan bobot yang sama untuk seluruh parameter, kombinasi perlakuan dadu-ABF ditetapkan sebagai perlakuan terbaik dengan nilai efektivitas tertinggi sebesar 0,617. Hasil tersebut diperoleh berdasarkan integrasi enam parameter mutu, yaitu *Chroma* (C^*), *Hue angle* (h°), pH, total padatan terlarut (TPT), kadar air, dan organoleptik penerimaan keseluruhan. Dengan demikian, dadu-ABF memberikan keseimbangan mutu keseluruhan terbaik setelah penyimpanan beku selama 10 hari berdasarkan sistem pembobotan yang digunakan dalam penelitian ini.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi lama penyimpanan beku untuk mengetahui perubahan mutu fisikokimia dan organoleptik alpukat secara lebih komprehensif serta menentukan stabilitas mutu selama penyimpanan.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan jenis dan karakteristik kemasan yang berbeda untuk mengetahui pengaruh kemasan terhadap perubahan mutu alpukat selama pembekuan dan penyimpanan beku, serta dilanjutkan dengan pendugaan umur simpan produk.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajayi IS, Olabisi OI, Fatona SA. 2022. Development of air blast freezer for the storage of fruits and vegetables. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 8(6): 71–77. doi: 10.31695/IJASRE.2022.8.6.8.
- Aldoradin-Puza E, Rodríguez-Mázmela C, Cuba-Mayo FE, Morán-González CV, Alemán-Polo JM. 2022. Evaluation of traditional freezing and electromagnetic field-assisted freezing in the physical and sensory properties of avocado (*Persea americana* Mill) variety Hass. *Brazilian Journal of Food Technology*. 25: e2021083. doi: 10.1590/1981-6723.08321.
- AOAC International. 2019. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 21st Edition. Rockville (MD): AOAC International.
- Aprilliani F, Atmiasih D, Ristiono A. 2021. Evaluasi tingkat kematangan buah alpukat (*Persea americana* Mill.) dengan teknologi pengolahan citra. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*. 18(1): 1–2. doi: 10.21082/jpasca.v18n1.2021.1-8.
- Aprilliani F, Hernowo. 2022. Metode non-destruktif untuk mengevaluasi hubungan antara warna kulit dan karakteristik kualitas alpukat (*Persea americana* Mill.). *Jurnal Ilmiah Inovasi*. 22(3). doi: 10.25047/jii.v22i3.3621.
- Ardiansyah R. 2019. *Alpukat*. Surabaya (ID): JP Books.
- Badan Standarisasi Nasional. 1992. *SNI 01-3168-1992: Apokat*. Jakarta (ID): Dewan Standarisasi Nasional
- Basri, Suryono M, Novaliah. 2021. Pengolahan pembekuan ikan tongkol (*Euthynnus affinis*) dengan menggunakan freezer kulkas. *J Pengelolaan Sumberd Perair*. 5(1): 59–66.
- Breemer R, Palijama S, Pattiruhu G. 2024. Pengaruh suhu dan lama penyimpanan terhadap mutu buah alpukat (*Parsea americana*). *Lipida: Jurnal Teknologi Pangan dan Industri Pertanian*. 4(1): 27–37.
- Brennan JG, Butlers JR, Cowell ND, Lilly AEV. 1974. *Food Engineering Operations*. Essex: Applied Science Publisher.
- Castell-Perez ME. 2024. *Freezing of Food* [Book]. College Station (US): Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University.
- Dawson P, Al-Jeddawi W, Rieck J. 2020. The effect of different freezing rates and long-term storage temperatures on the stability of sliced peaches. *International Journal of Food Science*. 2020:9178583. <https://doi.org/10.1155/2020/9178583>
- De Garmo EP, Sullivan WG, Canada JR. 1984. *Engineering Economy*. 7th ed. New York (US): Macmillan Publishing Company.
- Departemen Agronomi Dan Hortikultura IPB University. 2010. Alpukat Miki. URL: <http://Agh.Ipb.Ac.Id/Index.Php/61-Penelitian/Lingkup-Penelitian/551-Alpukat-Miki>. [Diakses Pada Tanggal 22 Juli 2022].

[Ditjen Hortikultura] Direktorat Jenderal Hortikultura. 2022. *Kementan Tinjau Potensi Alpukat Kalibening Unggulan Kabupaten Semarang*. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Fellows PJ. 2017. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. Ed ke-4. Cambridge: Woodhead Publishing.

Geethu M, Gomez S, Kumar KA. 2023. Physico-chemical, sensorial and microbiological quality of frozen avocado (*Persea americana* Mill.) slices. *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 42(1): 123-128. doi: 10.18805/ajdfr.DR-1722.

Grover K, Negi PS. 2023. Recent developments in freezing of fruits and vegetables: Striving for controlled ice crystallization. *Journal of Food Science*. 88(12): 4834–4853. doi: 10.1111/1750-3841.16810

Halimah RA. 2021. Teknologi pengeringan beku untuk mempertahankan mutu buah pepaya Calina (*Carica papaya* L.) [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.,

Hartati S, Yunus A, Nandariyah N, Yuniastuti E, Pujiasmanto B, Purwanto E, Dirgahayu P. 2022. Diversifikasi tanaman pekarangan dengan tanaman alpukat untuk meningkatkan gizi keluarga. *SEMAR (Jurnal Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni bagi Masyarakat)*. 11(2): 161–166. doi: 10.20961/semar.v11i2.61199.

Hastuti H, Marlina S, Rusdianto. 2025. Pelatihan pembuatan olahan kreatif berbahan dasar labu siam pada ibu-ibu Kelompok Tani Boritallasa, Kab. Gowa. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara (JPkMN)*. 6(2): 3161–3166. doi: 10.55338/jpkmn.v6i2.4943.

Hayati R. 2022. *Teknologi Pascapanen Hasil Pertanian*. Banda Aceh: Syiah Kuala University Press.

Hu R, Zhang M, Liu W, Mujumdar AS, Bai B. 2022. Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 21(2): 1979–2001. doi: 10.1111/1541-4337.12919.

[IIR] International Institute of Refrigeration. 2006. *Recommendations for the Processing and Handling of Frozen Foods*. Paris (FR): International Institute of Refrigeration.

James C, Purnell G, James SJ. 2015. A review of novel and innovative food freezing technologies. *Food and Bioprocess Technology*. 8(8): 1616–1634. doi: 10.1007/s11947-015-1542-8.

Kassim A, Workneh TS. 2020. Influence of postharvest treatments and storage conditions on the quality of Hass avocados. *Heliyon*. 6: e04234. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04234.

Kaur GJ, Orsat V, Singh A. 2021. An overview of different homogenizers, their working mechanisms and impact on processing of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. doi: 10.1080/10408398.2021.1969890.

- Kiani H. 2022. Phase change and crystallization behavior of water in biological systems and innovative freezing processes and methods for evaluating crystallization. *Discover Food*. 2: 6. doi: 10.1007/s44187-021-00004-2.
- [Kemenkes RI] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2018. *Tabel Komposisi Pangan Indonesia 2017*. Jakarta (ID): Direktorat Jenderal Kesehatan Masyarakat.
- Liao BK, Goh AP, Lio CI, Hsiao HI. 2024. Kinetic models applied to quality change and shelf-life prediction of fresh-cut pineapple in food cold chain. *Food Chemistry*. 437: 137803. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137803
- Mahmud MM, Mia MS, Nabi MHB, Arnab AH, Zzaman W. 2026. Mechanistic insights into color and texture stability of frozen tropical vegetables: processing, modeling, and preservation strategies. *Food Science & Nutrition*.
- Marín-Obispo LM, Villarreal-Lara R, Rodríguez-Sánchez DG, Del Follo-Martínez A, Espíndola Barquera MC, Jaramillo-De la Garza JS, Díaz de la Garza RI, Hernández-Brenes C. 2021. Insights into drivers of liking for avocado pulp (*Persea americana*): integration of descriptive variables and predictive modeling. *Foods*. 10(99): 1–21. doi: 10.3390/foods10010099.
- Marsya R. 2016. Rancangan kemasan tunggal dengan bahan pengisi untuk transportasi buah alpukat (*Persea americana* Mill) [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Neri L, Faieta M, Di Mattia C, Sacchetti G, Mastrocola D, Pittia P. 2020. Antioxidant activity in frozen plant foods: effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage. *Foods*. 9(12): 1886. doi: 10.3390/foods9121886
- Nisah K, Barat YM. 2019. Efek edible coating pada kualitas alpukat (*Persea americana* Mill.) selama penyimpanan. *Amina*. 1(1): 11–17.
- Parandi A, Sadeghian M, Eshtiaghi MN. 2022. Recent trends in pretreatment of food before freeze drying. *Processes*. 10(12): 2415. doi: 10.3390/pr10122415.
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). *Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review*. Food and Bioprocess Technology, 6(1), 36–60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Petzold G, Orellana P, Moreno J, Cuevas C. 2017. Process parameters of vacuum-assisted freeze concentration. *Chemical Engineering Transactions*. 57: 1789–1794. doi: 10.3303/CET1757299.
- Popper R, Rosenstock W, Schraidt M, Kroll BJ. 2004. The effect of attribute questions on overall liking ratings. *Food Quality and Preference*. 15: 853–858. doi: 10.1016/j.foodqual.2003.12.002.
- Rahman S. 2019. Effect of avocados to LDL cholesterol as a preventive risk of atherosclerosis. *International Journal of Multidisciplinary Current Research*. 7(1): 4-7.
- Rahmawati MR. 2023. Pengaruh metode pembekuan terhadap mutu buah pisang mas kirana terolah minimal [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor
- Roos YH. 2021. Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality. *Foods*. 10(2): 447. doi: 10.3390/foods10020447.

- Tan YY, Jin YM, Yang N, Wang Z, Xie ZJ, Xu XM, Jin ZY, Liao XJ, Sun H. 2019. Influence of uniform magnetic field on physicochemical properties of freeze-thawed avocado puree. *RSC Advances*. 9(39595): 1–9. doi: 10.1039/c9ra05280a.
- Tan M, Mei J, Xie J. 2021. The formation and control of ice crystal and its impact on the quality of frozen aquatic products: A review. *Crystals*. 11: 68. doi: 10.3390/cryst11010068.
- Taskirawati I, Yuniarti AD, Larekeng SH, Syahidah, Arif A, Gusmiaty, Prastiyo A. 2025. Diversifikasi produk olahan jamur tiram dalam meningkatkan keterampilan masyarakat di Desa Labuaja Kabupaten Maros. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*. 6(2): 3066–3072. doi: 10.55338/jpkmn.v6i2.5277.
- van der Sman RGM. 2020. Impact of processing factors on quality of frozen vegetables and fruits. *Food Engineering Reviews*. 12(4): 399–420. doi: 10.1007/s12393-020-09216-3.
- Verti EA, Mustikarini ED, Lestari T. 2021. Diversity of avocado germplasm (*Persea americana*) in Bangka Island based on morphological character. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*. Bangka Belitung, 2021. Bangka: Fakultas Teknik Universitas Bangka Belitung. hlm 33–38.
- Wahyudi, I., & Purwandari, U. (2018). Pengaruh Penambahan Kayu Manis (*Cinnamomum Burmannii*) Terhadap Kadar Air, PH, Ketengikan dan Tekstur Wingko Selama Penyimpanan. *Jurnal Teknologi Pangan*, 11(2), 31-37.
- Wisudawaty P. 2012. Aplikasi minyak nabati sebagai coating pada pembekuan irisan wortel (*Daucus carota* L) dan perubahan mutunya selama penyimpanan [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Yulviani R, Wardana S, Hamzah SW. 2022. Analisis mutu fisik dan kimia buah alpukat (*Persea americana* Mill.) yang diberikan pelapisan dan pembekuan cepat. *Jurnal Agroteknosains*. 6(2): 112–121.
- Zhu Z, Zhou Q, Sun DW. 2019. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*. 90: 13–25. doi: 10.1016/j.tifs.2019.05.012.