E-ISSN : 3025-1311
https://journal.cib.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 5 Tahun 2026

KARAKTERISTIK KOMPARTEMEN SELULAR DAN PENGENDALIAN KERUSAKAN PEMBEKUAN PADA SINGKONG UBI JALAR DAN PEPAYA: *A NARRATIVE LITERATURE REVIEW*

Gita Anjani[1] , Marsha Rahmawati[2] , Amelia Ardianti Salsabila Azzahro[3], Fifi Triya Amanda[4], Lucas Mulanjaya[5], Revino Avataralli[6], Eli Nofarinda Putri[7], Yunita Satya Pratiwi[8]
Program Studi Teknologi Pangan, UPN "Veteran" Jawa Timur
E-mail: 25033010048@student.upnjatim.ac.id, 25033010049@student.upnjatim.ac.id, 25033010050@student.upnjatim.ac.id, 25033010051@student.upnjatim.ac.id, 25033010052@student.upnjatim.ac.id, 25033010053@student.upnjatim.ac.id, 25033010054@student.upnjatim.ac.id, Yunita.satya.tp@upnjatim.ac.id

ABSTRACT

Freezing extends food shelf life, but ice formation can damage cellular compartments and impair quality after thawing. This problem is relevant to locally important commodities with contrasting tissue characteristics, particularly cassava, sweet potato, and papaya. This narrative literature review examines relationships among cellular characteristics, water redistribution, freezing injury, drip loss, and texture, and evaluates potential mitigation strategies. Literature was identified through targeted searches of references in the original manuscript, title and keyword searches, and checks of journal websites, PubMed, and institutional repositories. Selection considered relevance to plant tissues, freezing processes, post-thaw quality, and source traceability. The synthesis indicates that membrane damage, reduced turgor, and changes in the cell-wall matrix contribute jointly to quality deterioration. Faster freezing can improve quality under specific conditions, but extremely low temperatures do not consistently produce the best outcomes. Papaya research shows that tissue reinforcement can increase firmness without necessarily improving sensory acceptance, while sweet potato research highlights the importance of pretreatment and product form. A commodity-specific combination of suitable freezing rates, selected pretreatments, stable frozen storage, and controlled thawing is therefore the most defensible approach. Validation in local cultivars remains necessary because the available studies differ in materials and endpoints, and direct measurements of cellular-compartment damage are limited

Keywords: Cellular Compartment Damage; Freezing Control; Local Food Commodities; Narrative Literature Review; Water And Texture Retention

Article History
Received: Oktober 2026
Reviewed:Oktober 2026
Published: Oktober 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

ABSTRAK

Pembekuan dapat memperpanjang umur simpan pangan, tetapi pembentukan kristal es berpotensi merusak kompartemen selular dan menurunkan mutu setelah pencairan. Fenomena ini penting pada komoditas lokal dengan karakter jaringan berbeda, terutama singkong, ubi jalar, dan pepaya. Artikel ini bertujuan menjelaskan hubungan antara karakteristik sel, redistribusi air, kerusakan pembekuan, kehilangan cairan, dan perubahan tekstur, serta menilai strategi pengendaliannya. Kajian menggunakan pendekatan narrative literature review melalui penelusuran terarah atas rujukan naskah awal, pencarian judul dan kata kunci, serta pemeriksaan laman jurnal, PubMed, dan repositori institusi. Literatur dipilih berdasarkan relevansi terhadap jaringan nabati, proses pembekuan, mutu setelah pencairan, dan keterlacakan sumber. Sintesis menunjukkan bahwa kehilangan integritas membran, penurunan turgor, dan perubahan matriks dinding sel merupakan mekanisme yang saling berkaitan. Pembekuan lebih cepat dapat memperbaiki mutu pada kondisi tertentu, tetapi suhu sangat rendah tidak selalu memberikan hasil terbaik. Penelitian pepaya menunjukkan bahwa penguatan jaringan dapat meningkatkan kekukuhan tanpa selalu meningkatkan penerimaan sensori, sedangkan kajian ubi jalar menegaskan pentingnya praperlakuan dan bentuk produk. Strategi yang paling beralasan ialah menggabungkan laju pembekuan sesuai karakter bahan, praperlakuan terpilih, kestabilan penyimpanan, dan pencairan terkendali. Penerapannya pada varietas lokal memerlukan validasi karena bukti antarkomoditas belum sebanding dan tidak seluruh penelitian mengukur kerusakan kompartemen secara langsung

Kata Kunci: Kerusakan Kompartemen Selular; Pengendalian Pembekuan; Komoditas Pangan Lokal; *Narrative Literature Review*; Retensi Air Dan Tekstur

1. PENDAHULUAN

Pembekuan merupakan salah satu pilihan pengawetan bagi komoditas pangan lokal yang akan dipasarkan atau diolah dalam bentuk beku. Keberhasilannya perlu dinilai dari mutu setelah pencairan, bukan hanya dari tercapainya suhu penyimpanan. Pada bahan nabati, perubahan fase air berlangsung di dalam jaringan yang memiliki membran plasma, vakuola, tonoplas, dinding sel, serta ruang antarsel. Interaksi antara struktur tersebut dan proses perpindahan panas menentukan respons bahan terhadap pembekuan. Karena itu, pemahaman mengenai kompartemen selular diperlukan untuk menjelaskan mengapa produk yang sama-sama dibekukan dapat memiliki kehilangan cairan dan tekstur akhir berbeda (Li *et al.*, 2018).

Secara teoritis, mutu jaringan ditopang oleh integritas membran, tekanan turgor, dan kekuatan dinding sel. Ketika es terbentuk, komposisi fase cair berubah dan air dapat berpindah

antarkompartemen. Tekanan mekanis, dehidrasi sel, serta perubahan permeabilitas membran dapat mengurangi kemampuan jaringan mempertahankan air. Saat es mencair, sebagian cairan keluar sebagai *drip*, sementara jaringan menjadi lebih lunak atau mengalami perubahan porositas. Kerusakan tersebut perlu dibedakan dari sekadar penurunan suhu karena penyimpanan beku juga melibatkan perubahan fisik dan biokimia pada bahan (Li *et al.*, 2018; van der Sman, 2020).

Bukti empiris memperlihatkan pentingnya karakter produk. Saraswati *et al.* (2022) mengembangkan singkong-goreng beku dengan mengevaluasi sifat fisik dan kimia setelah rangkaian pengolahan. Rady *et al.* (2019) meneliti ubi jalar setengah goreng dengan variasi praperlakuan, kultivar, dimensi bahan, dan kondisi pembekuan. Sementara itu, Lovera *et al.* (2018) menguji pepaya dengan perlakuan kalsium serta beberapa metode pembekuan. Ketiga penelitian memberikan konteks yang lebih dekat dengan komoditas kajian dibandingkan penggunaan hasil penelitian daging sebagai bukti langsung bagi jaringan tumbuhan.

Fokus masalah artikel ini adalah bagaimana mempertahankan air dan tekstur setelah pembekuan tanpa menganggap semua jaringan nabati memiliki kebutuhan proses yang sama. Singkong dan ubi jalar merupakan umbi berpati yang sering menjalani pemanasan sebelum atau sesudah pembekuan, sedangkan pepaya dapat ditujukan sebagai potongan buah yang menuntut keutuhan jaringan. Ubi jalar ungu dibahas sebagai bagian dari kelompok ubi jalar, bukan sebagai spesies berbeda. Dalam cakupan ini, istilah komoditas lokal merujuk pada relevansi bahan bagi pangan Indonesia; tidak seluruh penelitian yang digunakan dilakukan di Indonesia.

Peta perkembangan penelitian atau *state of the art* memperlihatkan pergeseran dari penjelasan umum kerusakan sel menuju penilaian proses dan perlindungan jaringan. Li *et al.* (2018) menempatkan struktur sel sebagai dasar penjelasan, sedangkan Jha *et al.* (2019) menekankan metode evaluasi kerusakan. Penelitian Schudel *et al.* (2021) membandingkan pembekuan dengan *dehydrofreezing*, sementara Gençdağ *et al.* (2024) menggabungkan nanoselulosa dan metode pembekuan pada *sour cherry*. Perkembangan ini menunjukkan bahwa intervensi mulai diarahkan pada kombinasi karakter bahan dan pengaturan proses.

Celah yang teridentifikasi dalam literatur terpilih ialah belum tersedianya perbandingan seragam antara singkong, ubi jalar, dan pepaya yang secara bersamaan mengukur integritas membran, distribusi air, *drip loss*, dan tekstur. Kebaruan artikel ini bersifat sintesis: menghubungkan karakter kompartemen selular dengan pilihan pengendalian pembekuan, sambil membedakan bukti langsung pada komoditas sasaran dan bukti pembanding. Artikel ini tidak mengklaim penemuan mekanisme baru ataupun menjadi kajian pertama. Tujuannya adalah menjelaskan mekanisme kerusakan, membandingkan bukti antarkomoditas, dan merumuskan strategi pengendalian yang sesuai dengan kekuatan bukti yang tersedia.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain dan sumber penelusuran

Artikel disusun sebagai *narrative literature review* dengan sintesis tematik dan perbandingan kritis. Penelusuran terarah dilakukan pada 9 Oktober 2026, berangkat dari daftar pustaka naskah awal, kemudian dilengkapi pencarian judul persis, DOI, dan kata kunci melalui mesin pencari web. Sumber diperiksa pada laman penerbit atau jurnal, antara lain ScienceDirect, Springer Nature, jurnal IPB, dan ASABE; PubMed digunakan untuk pemeriksaan

rekaman artikel, sedangkan repositori institusi digunakan untuk naskah atau metadata pendukung. Tidak dilakukan penelusuran menyeluruh melalui Scopus atau Web of Science.

Kata kunci digunakan secara bertahap dalam bahasa Indonesia dan Inggris, antara lain "*freezing papaya sweet potato microstructure drip loss freezing rate*", "*Effects of freezing on cell structure*", "*Pretreatment and freezing rate effect*", "Pengaruh pengolahan pada sifat fisis dan kimia singkong-goreng beku", "*Nanocellulose sour cherries*", dan "*Drip loss control technology*". Judul atau DOI rujukan awal juga ditelusuri untuk memeriksa kesesuaian penulis, bahan, dan topik. Pendekatan tersebut ditujukan untuk menjawab fokus mekanistik dan aplikatif, bukan menghitung seluruh publikasi yang tersedia.

2.2 Kriteria inklusi dan eksklusi

Kriteria inklusi meliputi artikel penelitian atau ulasan ilmiah berbahasa Indonesia atau Inggris yang membahas pembekuan jaringan nabati, perubahan mikrostruktur atau distribusi air, *drip loss*, tekstur, maupun praperlakuan yang relevan. Artikel pada singkong, ubi jalar, dan pepaya diprioritaskan. Penelitian buah dan sayuran lain dapat disertakan sebagai pembanding dengan batas penerapan yang dinyatakan. Penelusuran memprioritaskan publikasi 2016 sampai tanggal pencarian; sumber yang akhirnya digunakan terbit pada 2018–2024. Identitas bibliografis harus dapat ditelusuri, dan temuan yang dibahas harus tersedia pada naskah atau abstrak yang dapat diperiksa.

Artikel dikeluarkan dari sintesis utama apabila hanya membahas pengeringan, produk minuman atau tepung tanpa hubungan langsung dengan pembekuan jaringan, atau menggunakan mikroba dan jaringan hewan sebagai objek utama. Sumber dengan identitas yang belum dapat dipastikan tidak dipakai sebagai landasan klaim. Data kadar air bahan segar tidak disetarakan dengan hasil pengeringan, sari buah, atau produk formulasi. Artikel ulasan dipakai untuk menjelaskan mekanisme dan memetakan topik; artikel penelitian digunakan untuk membandingkan temuan empiris.

2.3 Ekstraksi dan analisis

Informasi yang dicatat mencakup identitas sumber, komoditas dan bentuk bahan, praperlakuan, kondisi pembekuan, parameter mutu, hasil utama, serta batas generalisasinya. Sebelas artikel digunakan dalam sintesis akhir, terdiri atas enam penelitian empiris dan lima ulasan. Pembahasan dikelompokkan menjadi karakter kompartemen, mekanisme kerusakan, bukti antarkomoditas, hubungan *drip loss* dengan tekstur, serta pilihan pengendalian. Penilaian kritis dilakukan secara kualitatif berdasarkan kesesuaian bahan, pembanding, dan parameter yang diukur. Tidak dilakukan penilaian risiko bias dengan instrumen baku, meta-analisis, atau klaim bahwa pencarian telah mencakup seluruh literatur. Jumlah hasil awal dan jumlah eksklusi tidak dilaporkan karena tidak tersedia pencatatan penyaringan yang sistematis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pembahasan Subtopik Utama

Kompartemen selular sebagai dasar respons pembekuan

Dinding sel, membran plasma, dan tonoplas memiliki fungsi berbeda sehingga tidak tepat diperlakukan sebagai struktur yang sama. Dinding sel memberi dukungan mekanis; membran plasma memisahkan isi sel dari lingkungan ekstraseluler; sedangkan tonoplas membatasi vakuola. Vakuola berperan dalam penyimpanan air dan zat terlarut serta berkontribusi pada turgor. Di sisi lain, dinding sel dan lamela tengah membantu mempertahankan bentuk serta

keterikatan antarsel. Akibatnya, penurunan kekukuhan dapat terjadi melalui beberapa jalur, termasuk hilangnya turgor, kerusakan membran, dan melemahnya hubungan antarsel (Li *et al.*, 2018).

Pada singkong dan ubi jalar, pembahasan tidak cukup berhenti pada kadar air karena matriks pati dan riwayat pemanasan ikut menentukan karakter produk. Perubahan setelah pengukusan, blansir, atau penggorengan harus dipisahkan secara konseptual dari perubahan akibat pembekuan. Pada pepaya, kematangan dan kondisi jaringan sebelum pembekuan menjadi konteks penting untuk menafsirkan kekukuhan akhir. Dengan demikian, perbedaan kadar air tidak dapat digunakan sendirian untuk menyusun urutan ketahanan beku antarkomoditas. Penelitian produk olahan juga tidak otomatis mewakili sifat sel pada bahan mentah (Saraswati *et al.*, 2022; Rady *et al.*, 2019; Lovera *et al.*, 2018).

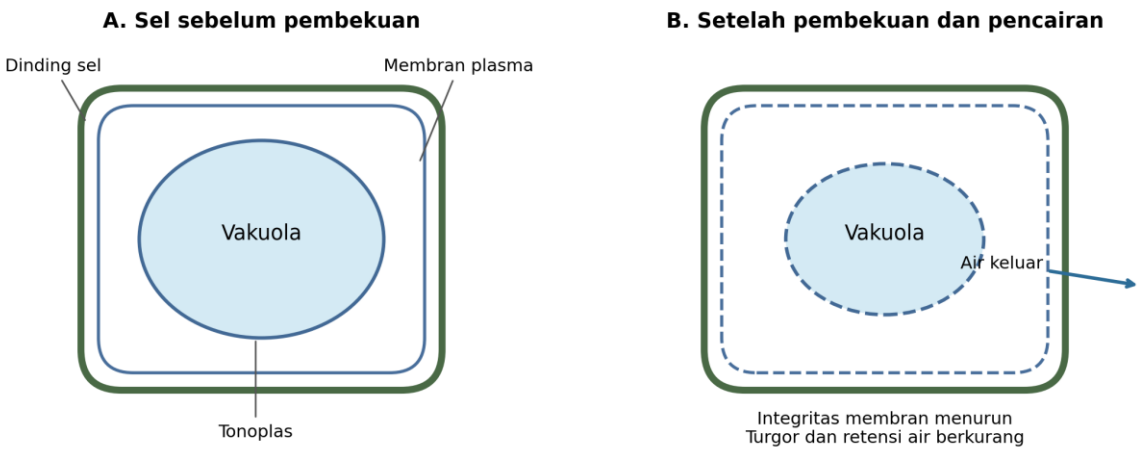
Karakterisasi yang dibutuhkan untuk perbandingan lanjutan mencakup bentuk bahan, kultivar, kematangan, ukuran potongan, kadar air dengan basis pelaporan yang sama, serta kondisi awal jaringan. Nilai kadar air hasil pengeringan tidak mewakili komposisi bahan segar, dan sari buah tidak mewakili kompartemen sel utuh. Oleh karena itu, kajian ini menggunakan perbandingan desain dan temuan penelitian, bukan menggabungkan angka kadar air dari bentuk produk berbeda menjadi satu dasar prediksi kerusakan.

Pembentukan es dan kerusakan membran

Pembekuan melibatkan nukleasi dan pertumbuhan kristal es. Pada sistem pangan, jumlah inti yang terbentuk, kemampuan membuang panas laten, komposisi bahan, dan kondisi pendinginan menentukan perkembangan kristal. Suhu media pembeku tidak identik dengan laju pembekuan di pusat produk. Produk berukuran besar, kemasan tebal, atau muatan alat yang padat dapat mengalami perpindahan panas berbeda walaupun suhu alat sama. Karena itu, kurva suhu terhadap waktu merupakan informasi yang lebih bermakna daripada menyebut suhu alat saja (Zheng *et al.*, 2024).

Dalam kondisi pembekuan lambat, pembentukan es ekstraseluler dapat meningkatkan konsentrasi zat terlarut pada fase cair yang tersisa. Penurunan potensial air di luar sel mendorong perpindahan air dari dalam sel, sehingga terjadi dehidrasi dan perubahan volume. Pertumbuhan es juga dapat menekan jaringan. Sebaliknya, pembekuan sangat cepat dapat membatasi waktu migrasi air, tetapi tidak menjamin ketiadaan cedera karena lokasi es dan tegangan termal tetap berperan. Dengan demikian, kerusakan tidak hanya disebabkan oleh gambaran kristal yang “menusuk” membran; perubahan osmotik dan mekanis bekerja bersama (Li *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2024).

Setelah integritas membran menurun, pengaturan air dan zat terlarut terganggu. Kerusakan tonoplas dapat mengubah pemisahan komponen vakuola dan sitoplasma, sementara perubahan dinding sel memengaruhi kekuatan jaringan. Namun, tidak semua perubahan ini harus disebut lisis total. Istilah penurunan integritas atau peningkatan permeabilitas lebih tepat apabila penelitian tidak menunjukkan pecahnya sel secara langsung. Demikian pula, rendahnya kekukuhan tidak cukup untuk membuktikan bahwa seluruh tonoplas telah rusak. Interpretasi mekanistik perlu mengikuti jenis pengukuran yang tersedia (Jha *et al.*, 2019).



Gambar 1. Skema kompartemen sel tumbuhan sebelum pembekuan dan kemungkinan perubahan setelah pembekuan serta pencairan. Garis putus-putus menggambarkan penurunan integritas membran, bukan bukti lisis total pada seluruh sel. Kehilangan air dapat mengurangi turgor dan berkontribusi pada perubahan tekstur. Skema konseptual tidak berskala dan tidak mewakili hasil mikroskopis.

Sumber: ilustrasi skematis disusun untuk artikel ini berdasarkan konsep Li *et al*. (2018) dan Jha *et al*. (2019).

Perbandingan temuan pada komoditas sasaran

Penelitian Saraswati *et al*. (2022) menunjukkan bahwa singkong dapat dikembangkan menjadi produk singkong-goreng beku melalui rangkaian pengolahan yang memengaruhi karakter fisik dan kimia. Nilai utamanya bagi kajian ini adalah bukti penerapan pada pangan lokal Indonesia. Akan tetapi, penelitian tersebut bukan perbandingan khusus laju pembekuan atau pengamatan tonoplas. Hasil akhirnya tidak dapat dipakai untuk mengukur besarnya kerusakan vakuola ataupun menyimpulkan laju pembekuan optimum singkong mentah. Kesenjangan ini perlu diisi oleh penelitian yang mengendalikan prapemasakan dan mengukur mutu sebelum serta sesudah pembekuan secara terpisah.

Pada ubi jalar, Rady *et al*. (2019) menguji kultivar Covington dan Murasaki, bentuk potongan, pelapisan *gum*, dan kondisi pembekuan pada produk setengah goreng. Laju yang lebih tinggi pada kondisi penelitian berkaitan dengan porositas serta penyerapan minyak yang lebih rendah setelah penggorengan. Temuan ini mendukung penyesuaian proses terhadap matriks berpati dan penggunaan akhir produk. Meskipun demikian, mutu produk setelah digoreng tidak setara dengan kekukuhan umbi mentah setelah pencairan. Hasil tersebut juga belum cukup untuk menyatakan respons semua varietas ubi jalar ungu Indonesia identik dengan kultivar yang diuji.

Lovera *et al*. (2018) memberikan bukti langsung pada pepaya. Pembekuan dengan nitrogen cair menimbulkan retakan pada kondisi penelitiannya. Praperlakuan kalsium laktat membantu mempertahankan struktur dan kekukuhan, tetapi penerimaan sensori lebih tinggi pada buah tanpa praperlakuan atau dengan kalsium glukonat. Temuan ini memperlihatkan

bahwa kekukuhan instrumental tertinggi tidak selalu menghasilkan produk paling disukai. Karena penelitian dilakukan pada bahan dan kondisi tertentu, hasilnya merupakan dasar pengujian pepaya lokal, bukan resep yang dapat diterapkan tanpa penyesuaian.

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa luaran harus disesuaikan dengan tujuan produk. Singkong dan ubi jalar siap goreng memerlukan evaluasi tekstur setelah pemasakan, sedangkan potongan pepaya membutuhkan penilaian keutuhan, cairan yang keluar, dan penerimaan sensori setelah pencairan. Perbedaan luaran ini menjelaskan mengapa satu teknologi tidak dapat diberi peringkat terbaik secara universal. Rancangan penelitian lanjutan perlu menggunakan kontrol segar dan kontrol beku tanpa praperlakuan agar manfaat setiap tahap dapat dipisahkan.

Kehilangan cairan dan perubahan tekstur

Drip loss adalah cairan yang keluar selama atau setelah pencairan sesuai prosedur pengukuran yang digunakan. Pada jaringan rusak, sebagian air hasil pencairan tidak kembali tertahan seperti pada kondisi awal. Cairan tersebut dapat membawa komponen larut sehingga kehilangan bobot beriringan dengan perubahan mutu. Besarnya *drip* dipengaruhi oleh keadaan jaringan, kondisi pembekuan, penyimpanan, dan pencairan. Oleh sebab itu, pengendalian kehilangan cairan memerlukan pengaturan rangkaian proses, bukan hanya pemilihan *freezer* (Wu *et al.*, 2021).

Hubungan *drip loss* dan tekstur tidak harus linear atau sama kuat pada semua bahan. Membran yang lebih permeabel dapat memperbesar kehilangan cairan, sementara kekukuhan juga bergantung pada dinding sel, adhesi antarsel, dan kondisi matriks. Produk dapat menjadi lunak akibat berkurangnya turgor, tetapi perubahan porositas dan prapemasakan dapat memberikan pola tekstur lain. Istilah *mushy* menggambarkan kelembekan, sedangkan *spongy* menggambarkan karakter berongga atau menyerupai spons; keduanya merupakan deskripsi mutu, bukan bukti spesifik kerusakan vakuola.

Pengukuran *drip loss* dapat menjadi indikator pendukung, tetapi tidak menggantikan uji tekstur dan pengamatan mikrostruktur. Perbandingan antarpaper memerlukan kesamaan suhu akhir pencairan, lama penirisan, ukuran sampel, dan dasar massa. Untuk penelitian berikutnya, kehilangan cairan perlu dipasangkan dengan pengujian kekukuhan atau kompresi serta indikator integritas membran. Pengamatan mikroskopis atau analisis distribusi air dapat memperkuat penjelasan, sedangkan satu parameter saja berisiko menyederhanakan mekanisme kerusakan (Jha *et al.*, 2019).

Pembekuan cepat dan batas efektivitasnya

Pembekuan cepat umumnya ditujukan untuk membatasi pertumbuhan kristal besar, tetapi pemilihan teknologi harus mengikuti kondisi produk. *Air-blast freezer* meningkatkan perpindahan panas melalui aliran udara, sedangkan *individual quick freezing* atau *IQF* mengacu pada pembekuan unit produk secara terpisah. *IQF* bukan jaminan bahwa setiap konfigurasi selalu lebih cepat daripada seluruh sistem *air-blast*. Ukuran unit, aliran udara, suhu, susunan produk, dan kapasitas muatan menentukan hasil aktual. Teknologi kriogenik menawarkan pendinginan intensif, tetapi respons jaringan tetap perlu diperiksa.

Cao *et al.* (2018) memperlihatkan bahwa *blueberry* yang dibekukan pada −80 °C mempertahankan beberapa parameter mutu lebih baik daripada perendaman nitrogen cair, meskipun nitrogen cair memberikan pembekuan lebih cepat. Temuan ini menjadi bukti pembanding bahwa mengejar suhu terendah bukan kriteria tunggal keberhasilan. Hasil tersebut

tidak menetapkan −80 °C sebagai suhu optimum singkong, ubi jalar, atau pepaya; penetapan kondisi proses memerlukan pengujian komoditas sasaran dan pertimbangan energi.

Schudel *et al*. (2021) juga menemukan respons berbeda pada wortel, paprika, dan mentimun. *Dehydrofreezing* konvektif memperbaiki kekukuhan paprika sekitar 52% dan wortel sekitar 35% dibandingkan pembekuan konvensional pada −20 °C. Namun, pembekuan ultra-rendah menurunkan mutu mentimun pada beberapa parameter. Ini mendukung pemilihan proses berdasarkan bahan. Selain itu, penurunan *drip* setelah prapengeringan harus dibaca bersama kehilangan air pada tahap praperlakuan; *drip* yang rendah belum tentu berarti rendemen total lebih tinggi.

Praperlakuan dan pengelolaan rantai proses

Praperlakuan dapat diarahkan untuk memperkuat jaringan, mengurangi air yang akan membeku, atau melindungi matriks. Pilihan yang dibahas dalam literatur mencakup impregnasi kalsium, dehidrasi parsial, dan pelapisan atau penambahan bahan pelindung. Setiap pilihan mempunyai konsekuensi terhadap rasa, komposisi, waktu proses, serta kesesuaian produk akhir. Karena itu, perlakuan dipilih berdasarkan kebutuhan nyata bahan dan tidak sekadar ditambahkan untuk meningkatkan kekukuhan.

Gençdağ *et al*. (2024) meneliti nanoselulosa dari kulit pistachio yang dimasukkan ke *sour cherry* melalui impregnasi vakum, kemudian dikombinasikan dengan pembekuan statis, *air-blast*, dan *IQF*. Selama penyimpanan enam bulan, perlakuan nanoselulosa menurunkan *drip loss* dan kebocoran ion dibandingkan kelompok tanpa perlakuan. Bukti ini mendukung potensi kombinasi perlindungan matriks dan pengaturan pembekuan, tetapi belum merupakan bukti efektivitas pada tiga komoditas sasaran. Kesesuaian bahan untuk aplikasi pangan, dampak sensori, dan kelayakan proses perlu dinilai sebelum penerapan.

Kajian ini tidak menjadikan DMSO sebagai rekomendasi untuk pangan. Keberhasilan bahan tersebut menjaga viabilitas kultur mikroba tidak membuktikan kesesuaiannya untuk produk buah atau umbi yang dikonsumsi. Demikian pula, hasil pengujian jaringan daging tidak digunakan untuk menjelaskan tonoplas tumbuhan secara langsung. Pemilihan pelindung harus didasarkan pada penelitian bahan pangan yang relevan dan penggunaan yang sesuai, bukan pada kesamaan istilah krioproteksi.

Kestabilan suhu selama penyimpanan juga penting karena perubahan suhu dapat memicu perubahan kristal dan memperburuk mutu. Setelah itu, pencairan perlu dikendalikan agar evaluasi tidak tercampur dengan kerusakan tambahan pada tahap akhir. Rangkaian pembekuan, penyimpanan, dan pencairan sebaiknya diperlakukan sebagai satu sistem. Dengan pendekatan ini, keberhasilan pembekuan dinilai melalui mutu produk pada saat digunakan, bukan hanya karakter kristal segera setelah keluar dari alat (van der Sman, 2020; Wu *et al*., 2021).

3.2 Implikasi dan Keterbatasan

Implikasi praktis dan teoritis

Secara praktis, sintesis ini mendukung pengembangan proses per komoditas. Untuk singkong dan ubi jalar siap goreng, pengaruh prapemasakan, ukuran potongan, serta pembekuan perlu diuji terhadap tekstur produk akhir. Untuk potongan pepaya, percobaan perlu menggabungkan keutuhan jaringan, *drip loss*, dan penerimaan sensori. Rekomendasi ini merupakan rancangan penerapan berdasarkan sintesis, bukan kondisi optimum yang telah terbukti untuk seluruh bahan lokal.

Pemilihan teknologi dapat dimulai dari penyeragaman bahan baku, pencatatan kurva suhu pusat produk, serta perbandingan mutu dengan kontrol. Investasi alat perlu mempertimbangkan kapasitas, energi, rendemen total, dan nilai produk. Pembekuan cepat hanya layak disebut lebih baik apabila manfaatnya tetap terlihat setelah penyimpanan dan pencairan. Penambahan praperlakuan juga perlu memberi keuntungan yang sebanding dengan biaya dan perubahan karakter produk.

Secara teoritis, kajian ini menempatkan integritas membran, turgor, dinding sel, dan matriks bahan sebagai komponen yang saling berhubungan. Kerangka tersebut membantu menjelaskan mengapa kadar air total atau *drip loss* saja tidak cukup untuk mewakili kerusakan sel. Implikasi bagi penelitian adalah perlunya menghubungkan indikator struktur dengan mutu makroskopis pada sampel yang sama. Untuk pengembangan standar proses, pelaporan kondisi bahan, kurva suhu, dan prosedur pencairan perlu dibuat konsisten agar hasil penelitian dapat dibandingkan.

Keterbatasan kajian

Penelusuran bersifat terarah dan tidak sistematis sehingga berpotensi melewatkan artikel relevan. Tidak ada penilaian risiko bias formal atau penggabungan ukuran efek. Sebagian informasi diperoleh dari abstrak dan metadata, sehingga interpretasi dibatasi pada temuan yang dapat diperiksa. Walaupun pencarian dilakukan pada 2026, kumpulan sumber yang digunakan berakhir pada 2024 dan tidak mewakili seluruh perkembangan terbaru. Kebaruan yang diajukan dibatasi sebagai integrasi tematik dalam lingkup sumber terpilih.

Penelitian yang dibandingkan berbeda dalam kultivar, lokasi, bentuk produk, praperlakuan, kondisi penyimpanan, dan cara mengukur mutu. Bukti pada ubi jalar tidak secara khusus mencakup seluruh varietas ungu lokal, sedangkan studi singkong yang digunakan tidak mengukur kerusakan kompartemen secara langsung. Temuan *blueberry*, *sour cherry*, dan sayuran lain berfungsi sebagai pembanding, bukan pengganti validasi lokal. Kajian ini juga tidak menyediakan analisis biaya atau pengujian eksperimental baru. Oleh karena itu, rekomendasi dinyatakan sebagai arah pengembangan dan harus diuji sebelum dijadikan standar produksi.

4. KESIMPULAN

Karakteristik kompartemen selular memengaruhi respons pangan nabati terhadap pembekuan melalui integritas membran, pengaturan air, turgor, dan kekuatan dinding sel. Pembentukan es dapat memicu redistribusi air serta tekanan osmotik dan mekanis, yang kemudian berkontribusi pada kehilangan cairan dan perubahan tekstur. Namun, *drip loss* tidak dapat dipakai sendiri untuk membuktikan lisis vakuola atau memprediksi seluruh perubahan tekstur.

Strategi pengendalian yang paling beralasan adalah kombinasi laju pembekuan yang sesuai dengan karakter bahan, praperlakuan terpilih, suhu penyimpanan stabil, dan pencairan terkendali. Tidak ada bukti yang cukup untuk menetapkan satu suhu, alat, atau bahan pelindung sebagai pilihan terbaik bagi singkong, ubi jalar, dan pepaya sekaligus. Pengembangan komoditas lokal perlu mempertimbangkan bentuk produk dan tujuan konsumsi, kemudian memvalidasi manfaat melalui pengukuran struktur, retensi air, tekstur, rendemen, dan penerimaan sensori.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Yunita Satya Pratiwi, S.P., M.Kes. selaku dosen pengampu, serta kepada Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur sebagai lingkungan akademik penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Cao, X., Zhang, F., Zhao, D., Zhu, D., & Li, J. (2018). *Effects of freezing conditions on quality changes in blueberries. Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(12), 4673–4679. https://doi.org/10.1002/jsfa.9000

Gençdağ, E., Görgüç, A., & Yılmaz, F. M. (2024). *Nanocellulose as a novel cryoprotectant to improve the quality of frozen sour cherries. Food and Bioprocess Technology*, 17, 4724–4738. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03404-1

Jha, P. K., Xanthakis, E., Chevallier, S., Jury, V., & Le-Bail, A. (2019). *Assessment of freeze damage in fruits and vegetables. Food Research International*, 121, 479–496. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.002

Li, D., Zhu, Z., & Sun, D.-W. (2018). *Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. Trends in Food Science & Technology*, 75, 46–55. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019

Lovera, N. N., Ramallo, L., & Salvadori, V. O. (2018). *Effects of different freezing methods on calcium enriched papaya (Carica papaya L.). Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2039–2047. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3118-x

Rady, A., Giaretta, A., Akinbode, A., Ruwaya, M., & Dev, S. (2019). *Pretreatment and freezing rate effect on physical, microstructural, and nutritional properties of fried sweet potato. Transactions of the ASABE*, 62(1), 45–59. https://doi.org/10.13031/trans.13099

Saraswati, T. I., Adawiyah, D. R., & Rungkat, F. Z. (2022). Pengaruh pengolahan pada sifat fisis dan kimia singkong-goreng beku. Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 27(4), 528–535. https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.528

Schudel, S., Prawiranto, K., & Defraeye, T. (2021). *Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage. Journal of Food Engineering*, 293, 110376. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110376

van der Sman, R. G. M. (2020). *Impact of processing factors on quality of frozen vegetables and fruits. Food Engineering Reviews*, 12(4), 399–420. https://doi.org/10.1007/s12393-020-09216-1

Wu, J., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C.-h. (2021). *Drip loss control technology of frozen fruits and vegetables during thawing: A review. International Agrophysics*, 35(3), 235–250. https://doi.org/10.31545/intagr/142289

Zheng, O., Zhang, L., Sun, Q., & Liu, S. (2024). *Basic theory of ice crystallization based on water molecular structure and ice structure*. *Foods*, 13(17), 2773. https://doi.org/10.3390/foods13172773