



ARTICLE

Optimalisasi Konsentrasi Ammonium Sulfat terhadap Kandungan β -Karoten dan Acceptability Organoleptik Nata de Papaya

Chevi Ardiana*, Annisa*, Sri Mulyaningsih*, Lida Amalia*, and Dewi Hernawati*

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Biologi, Institut Pendidikan Indonesia, Fakultas Ilmu Terapan dan Sains, Indonesia

*Corresponding author. Email: chevi@institutpendidikan.ac.id

(Received ; 12 Desember 2025 revised ; 12 Januari 2026 accepted ; 20 Januari 2026 ; published 30 Januari 2026)

Abstrak

Pepaya, sebagai buah tropis yang melimpah dalam β -karoten, menghadapi kendala daya simpan yang minim pascapanen, sehingga mudah mengalami kerusakan. Mengubahnya menjadi nata de papaya menawarkan peluang untuk memperpanjang ketersediaan produk sekaligus meningkatkan nilai ekonomisnya. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan konsentrasi ammonium sulfat yang paling efektif sebagai sumber nitrogen bagi *Acetobacter xylinum* dalam produksi selulosa nata, dilihat dari dampaknya pada kandungan β -karoten dan kualitas organoleptik. Metodologi penelitian didasarkan pada Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang meliputi empat level perlakuan konsentrasi (0%; 0,25%; 0,5%; 0,7%) dengan enam ulangan. Pengujian organoleptik, meliputi aspek warna, aroma, tekstur, dan rasa, dilakukan oleh 30 panelis yang tidak memiliki pengalaman sebelumnya, sementara penetapan kandungan β -karoten dilakukan menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Analisis statistik menunjukkan bahwa konsentrasi ammonium sulfat berpengaruh secara signifikan ($p < 0,05$) terhadap seluruh aspek organoleptik. Perlakuan dengan konsentrasi 0,5% menghasilkan nilai tertinggi untuk warna dan rasa, sedangkan konsentrasi 0,7% optimal untuk tekstur dan mampu mencapai kadar β -karoten tertinggi sebesar 1,817 mg/100 g. Dengan demikian, konsentrasi 0,5% direkomendasikan sebagai kondisi yang paling optimal untuk mutu sensori yang unggul.

Kata Kunci: Nata de papaya, Ammonium sulfat, β -karoten, Uji organoleptik, Optimalisasi konsentrasi

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu produsen pepaya terbesar di dunia dengan produksi mencapai 1,23 juta ton pada tahun 2023 (BPS, 2023). Pepaya (*Carica papaya* L.) kaya akan zat gizi esensial, terutama beta-karoten, vitamin C, serat pangan, dan enzim papain. Beta-karoten berfungsi sebagai provitamin A dan antioksidan kuat yang mendukung kesehatan mata, sistem kekebalan tubuh, serta pencegahan penyakit degeneratif seperti kanker dan penyakit kardiovaskular (Mustikaningrum, 2023). Meskipun demikian, pepaya memiliki umur simpan terbatas hanya 7–8 hari pada suhu kamar (Taris, 2015), sehingga rentan terhadap kerusakan pascapanen dan berkontribusi pada limbah pangan global yang signifikan (FAO, 2022).

Salah satu strategi pemanfaatan pepaya berlebih adalah pengolahannya menjadi nata de papaya melalui fermentasi oleh *Acetobacter xylinum*. Produk ini berupa gel selulosa mikrobial yang tinggi serat pangan, rendah kalori, dan mampu mempertahankan sebagian beta-karoten dari bahan baku, menjadikannya pangan fungsional potensial (Vionita, 2023). Kualitas nata, termasuk ketebalan, tekstur, dan sifat organoleptik, sangat bergantung pada komposisi media fermentasi, khususnya sumber karbon dan nitrogen. Ammonium sulfat $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ sebagai sumber nitrogen anorganik sering digunakan karena larut baik, mudah diabsorpsi mikroba, serta mendukung sintesis selulosa dan metabolit sekunder (Jagannath & Kalaiselvan, 2008).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi konsentrasi sumber nitrogen mempengaruhi mutu nata, seperti peningkatan ketebalan gel dan karakteristik sensoris (Saritama, 2020). Namun, studi spesifik tentang nata de papaya masih terbatas, terutama yang mengkaji hubungan konsentrasi ammonium sulfat dengan retensi beta-karoten serta sifat organoleptik (warna, aroma, tekstur, dan rasa). Celah ini krusial karena beta-karoten menentukan nilai fungsional produk, sementara sifat organoleptik memengaruhi penerimaan konsumen.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi konsentrasi ammonium sulfat (0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%) terhadap kandungan beta-karoten serta sifat organoleptik nata de papaya. Hasil diharapkan memberikan rekomendasi konsentrasi optimal untuk menghasilkan nata berkualitas sensori unggul dengan retensi gizi tinggi, mendukung pengembangan industri pangan fungsional berbasis limbah lokal.

2. Kajian Pustaka

2.1 Konsentrasi Ammonium Sulfat

Ammonium sulfat $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ teridentifikasi sebagai nutrisi nitrogen esensial yang vital bagi *Acetobacter xylinum* dalam proses fermentasi untuk menghasilkan nata de papaya. Nitrogen yang disediakan oleh senyawa ini mutlak diperlukan untuk biosintesis komponen seluler krusial seperti protein, asam nukleat, dan selulosa, yang menjadi tulang punggung pembentukan struktur nata. Pengaturan konsentrasi ammonium sulfat memegang peranan sentral; kekurangan unsur hara nitrogen dapat berakibat pada terhambatnya proliferasi bakteri, sementara kelebihan pasokan dapat menimbulkan efek toksik atau mengalihkan alur metabolisme bakteri secara tidak semestinya. Senyawa ini juga berkontribusi dalam menjaga keseimbangan rasio C/N yang optimal, diyakini sekitar 20:1, demi tercapainya sintesis selulosa yang efisien. Bentuk ion NH_4^+ mudah diserap oleh sel bakteri, yang berdampak positif terhadap akumulasi biomassa bakteri serta peningkatan kuantitas nata yang dihasilkan. Berdasarkan temuan-temuan terkini, rentang konsentrasi ammonium sulfat antara 0,4 hingga 0,8% diketahui mampu mengoptimalkan produksi selulosa tanpa mengganggu kestabilan pH lingkungan kultur [Khaidir et al., 2019., Hassan et al., 2018., Soares et al., 2020., Guharoy & Mukherjee, 2021].

2.2 Kandungan β -Karoten

β -Karoten, suatu pigmen karotenoid yang berfungsi sebagai prekursor vitamin A, bertanggung jawab atas corak kuning-oranye yang terlihat pada pepaya dan produk olahannya, nata de papaya. Selama proses fermentasi, nata memiliki kapasitas untuk menyerap β -karoten dari media pepaya. Penyerapan ini dipengaruhi oleh keberadaan nitrogen dari ammonium sulfat, yang berperan dalam memodulasi struktur selulosa. Untuk pengukuran kuantitasnya, digunakan metode spektrofotometri UV-Vis dengan pembacaan pada panjang gelombang 450 nm, sebagaimana dilaporkan oleh Rodriguez-Amaya pada tahun 2022.

Faktor ketersediaan nitrogen terbukti memiliki dampak signifikan terhadap aktivitas enzim biosintetik serta kemampuan matriks nata dalam mempertahankan pigmen. Pemberian nitrogen dalam jumlah yang optimal berkontribusi pada peningkatan integritas struktural nata, sehingga memungkinkan retensi β -karoten yang lebih efektif dibandingkan dengan kondisi di mana nitrogen tersedia secara defisien atau berlebih. Hal ini sejalan dengan temuan Britton dan Hornero-Méndez (2023).

2.3 Acceptability Organoleptik

Penerimaan konsumen terhadap nata de papaya dinilai melalui evaluasi organoleptik yang mencakup aspek warna, aroma, tekstur, dan rasa, dengan menggunakan instrumen skala hedonik dari 1 sampai 9. Kemampuan nata de papaya untuk sukses di pasar ditentukan oleh kualitas sensoriknya. Ammonium sulfat memberikan pengaruh tidak langsung pada atribut-atribut sensorik ini, yang disalurkan melalui jalur metabolisme bakteri. Perubahan yang terjadi pada aspek nitrogen dalam metabolisme bakteri dapat memodifikasi senyawa volatil pembentuk aroma fruity-fermentasi, memengaruhi tekstur agar menjadi lebih kenyal, dan mengembangkan rasa yang didominasi oleh nuansa manis dan asam. Hasil penilaian oleh panelis menunjukkan bahwa proporsi nutrisi yang tepat secara signifikan berkontribusi pada pencapaian skor penerimaan tertinggi secara keseluruhan.

Kandungan air dalam nata pepaya, yang diukur berdasarkan bobot basah, memiliki peran krusial dalam menentukan karakteristik tekstur yang kenyal serta durasi masa simpannya. Penggunaan ammonium sulfat, yang berfungsi sebagai garam, memodifikasi tekanan osmotik dalam media kultur, sehingga berdampak pada tingkat hidrasi matriks selulosa yang terbentuk. Konsentrasi ammonium sulfat yang berada pada rentang optimal, yaitu antara 0,5% hingga 0,7%, sangat penting untuk mempertahankan kadar air produk pada kisaran 90-95%, sebuah kondisi yang berkontribusi pada stabilitas produk secara keseluruhan [De Vuyst et al., 2020]. Di sisi lain, tingginya kadar air dapat meningkatkan elastisitas nata pepaya, namun pada saat yang sama membuatnya lebih rentan terhadap serangan kontaminasi mikroba. Untuk mencegah kondisi di mana produk menjadi terlalu lembek atau sebaliknya, menjadi terlalu kering, diperlukan kontrol yang cermat terhadap asupan nitrogen [Fennema & Rao, 2021].

2.4 pH Media Fermentasi

Untuk menghasilkan selulosa secara optimal, *A. xylinum* memerlukan nilai pH berkisar antara 3 hingga 4. Stabilitas pH dalam rentang ini dicapai berkat amonium sulfat, yang bekerja melalui proses hidrolisis ion NH_4^+ dan fungsi buffering. Tingkat konsentrasi amonium sulfat yang berbeda memberikan pengaruh terhadap jumlah asam organik yang diproduksi, sehingga membantu memelihara kondisi pH yang mendukung proses fermentasi [Hassan et al., 2023]. Jika pH berada di luar kisaran yang optimal, aktivitas enzim cellulose synthase dapat terhambat; oleh karena itu, pemantauan kadar nitrogen menjadi krusial guna memastikan efisiensi proses fermentasi [Guharoy & Mukherjee, 2021].

2.5 Rasio C/N

Rasio karbon-nitrogen (C/N) dalam media fermentasi merupakan faktor nutrisi yang fundamental untuk pertumbuhan mikroba dan sintesis metabolit. Bakteri *Acetobacter xylinum* memerlukan keseimbangan antara sumber karbon (misalnya, sukrosa, glukosa) untuk energi dan sintesis selulosa, serta sumber nitrogen untuk sintesis protein, asam nukleat, dan komponen seluler lainnya. Rasio C/N yang ideal untuk produksi selulosa oleh *Acetobacter xylinum* dilaporkan berada di kisaran 20:1, meskipun nilai ini dapat bervariasi tergantung pada strain bakteri dan kondisi media lainnya (Soares et al., 2011). Ammonium sulfat berperan sebagai penyedia nitrogen dalam media, sehingga konsentrasinya secara langsung memengaruhi rasio C/N keseluruhan.

Jika rasio C/N terlalu tinggi (artinya, nitrogen defisien), pertumbuhan bakteri dan produksi selulosa akan terhambat karena kekurangan bahan baku untuk sintesis protein dan asam nukleat. Sebaliknya, jika rasio C/N terlalu rendah (artinya, nitrogen berlebih), metabolisme bakteri dapat dialihkan dari produksi selulosa ke sintesis senyawa lain, atau bahkan dapat terjadi toksisitas nitrogen, yang juga menurunkan efisiensi produksi nata (Valla & Karlsen, 2004). Optimalisasi konsentrasi ammonium sulfat bertujuan untuk mencapai rasio C/N yang diinginkan agar mendukung pertumbuhan sel *Acetobacter xylinum* yang sehat dan memaksimalkan produksi selulosa, yang pada akhirnya akan menghasilkan rendemen nata yang tinggi dan karakteristik tekstur yang optimal.

Untuk mengoptimalkan produksi selulosa oleh *A. xylinum*, kondisi pH yang ideal harus dijaga dalam rentang 3 hingga 4. Stabilitas pH pada kisaran tersebut dimungkinkan oleh kehadiran amonium sulfat, yang menjalankan fungsinya melalui hidrolisis ion NH_4^+ dan mekanisme buffering. Perubahan konsentrasi amonium sulfat terbukti mempengaruhi kuantitas asam organik yang dihasilkan, sebuah mekanisme yang berkontribusi dalam pemeliharaan lingkungan pH yang kondusif bagi fermentasi [Hassan et al., 2023]. Apabila nilai pH menyimpang dari rentang optimalnya, aktivitas enzim cellulose synthase dapat mengalami hambatan, sehingga pemantauan yang cermat terhadap kadar nitrogen menjadi sangat penting demi menjaga efektivitas proses fermentasi [Guharoy & Mukherjee, 2021].

2.6 Total Asam dan Gula Pereduksi

Konsumsi gula pereduksi, seperti glukosa dan fruktosa, yang berperan sebagai substrat utama, mengalami penurunan seiring berjalannya fermentasi, sementara kadar asam total (asetat) menunjukkan tren peningkatan. Sumber nitrogen dari ammonium sulfat diketahui mampu mempercepat proses degradasi gula dan memfasilitasi kontrol atas produksi asam. [De Vuyst et al., 2020] Di samping itu, rasio C/N yang terkelola dengan baik berfungsi untuk mencegah akumulasi gula atau asam yang berlebihan, yang dapat diinterpretasikan sebagai indikator efisiensi metabolik. [Hassan et al., 2023].

2.7 Rendemen Nata

Pengukuran rendemen nata, yang diungkapkan dalam satuan persentase berat basah per berat kering (wb/db), berfungsi sebagai indikator untuk mengevaluasi efektivitas konversi substrat menjadi selulosa. Penelitian menunjukkan bahwa kadar nitrogen yang optimal berkontribusi pada peningkatan biomassa *A. xylinum*, menghasilkan rendemen yang mencapai lebih dari 70% ketika menggunakan 0,6% ammonium sulfat (Khaidir et al., 2019). Gangguan pada keseimbangan nitrogen, baik dalam kondisi defisiensi maupun surplus, berdampak negatif pada rendemen dengan menghambat perkembangan seluler (Soares et al., 2022).

2.8 Ketebalan Gel Nata

Ketebalan nata secara signifikan dipengaruhi oleh akumulasi selulosa yang terjadi pada area kontak

antara udara dan cairan. Peningkatan ketebalan nata hingga mencapai kisaran optimal 1-2 cm sangat ditunjang oleh nitrogen, yang berperan dalam mengaktifkan enzim selulosa sintase, sebagaimana dikemukakan oleh Hassan et al. (2023). Lebih lanjut, Soares et al. (2022) melaporkan bahwa optimalisasi konsentrasi amonium sulfat dapat mempercepat proses deposisi fibril selulosa.

Karakteristik tekstur kenyal yang terukur melalui alat penganalisis tekstur (gf) pada matriks selulosa yang memiliki kepadatan tinggi telah teramati. Konsentrasi nitrogen yang berada pada tingkat optimal berperan dalam pembentukan struktur fibril yang kokoh, sekaligus mencegah timbulnya sifat rapuh atau lembek [Hassan et al., 2023]. Lebih lanjut, perubahan dalam penggunaan amonium sulfat terindikasi mampu memengaruhi modifikasi pada ikatan yang menghubungkan antar-fibril dalam matriks tersebut [De Vuyst et al., 2020].

Kadar nitrogen yang memadai memegang peranan krusial dalam pembentukan atribut sensorik produk, mulai dari warna hingga rasa. Terkait warna, khususnya kuning atau oranye, retensi β -karoten sangat bergantung pada struktur selulosa, di mana tingkat nitrogen yang optimal berkontribusi pada intensitas warna yang superior, sebagaimana dilaporkan oleh Rodriguez-Amaya (2022). Dalam konteks aroma yang menyerupai fruity-fermentasi, modifikasi senyawa volatil oleh nitrogen berperan penting, sehingga proporsi nitrogen yang seimbang dapat menghasilkan profil aroma yang lebih disukai, menurut analisis Hofmann dan Schieberle (2022). Untuk mendapatkan tekstur yang kenyal, pembentukan matriks yang kuat memerlukan pasokan nitrogen yang cukup, seperti yang diindikasikan oleh Hassan et al. (2023). Sementara itu, keseimbangan asam organik yang terkendali menjadi kunci untuk menciptakan rasa manis-asam yang diinginkan, sebagaimana ditemukan oleh Soares et al. (2022). Secara kolektif, integrasi atribut-atribut ini, yang ketika mencapai skor keseluruhan melebihi 7, menandakan kualitas yang baik, menurut penelitian Meilgaard et al. (2021).

Penelitian oleh Khaidir et al. (2019) dan Hassan et al. (2023) menunjukkan bahwa penambahan amonium sulfat secara signifikan memengaruhi proses metabolisme bakteri *Acetobacter xylinum*. Pengaruh ini termanifestasi dalam modifikasi berbagai parameter selulosa, termasuk penyesuaian kadar air, perubahan tingkat keasaman (pH), rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), serta proporsi asam dan gula yang terkandung. Lebih lanjut, amonium sulfat berperan dalam retensi senyawa β -karoten dan aspek sensorik produk akhir. Melalui proses optimalisasi yang cermat, hasil produksi nata dapat ditingkatkan menjadi produk yang tidak hanya kaya nutrisi tetapi juga memiliki tekstur yang superior dan tingkat penerimaan yang tinggi di kalangan konsumen.

3. Metode Penelitian

3.1 Desain penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan Faktorial Tunggal Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan empat tingkatan perlakuan berbasis konsentrasi amonium sulfat, yaitu 0% (sebagai kelompok kontrol), 0,25%, 0,5%, dan 0,7%. Setiap perlakuan diaplikasikan sebanyak enam kali pengulangan, sehingga total unit percobaan mencapai 24. Variabel yang dimanipulasi adalah tingkat konsentrasi amonium sulfat. Sementara itu, variabel yang diamati dan diukur meliputi kandungan β -karoten serta skor penilaian organoleptik yang mencakup aspek warna, aroma, tekstur, dan rasa, serta penilaian keseluruhan. Parameter yang dijaga konstan selama percobaan adalah pH larutan pada 4, suhu ruang berkisar antara 28 hingga 30°C, durasi fermentasi selama 14 hari, dan penggunaan inokulum sebesar 10% (v/v).

Proses awal melibatkan persiapan bahan utama, yaitu ekstrak pepaya varietas California yang matang dan telah dikupas kulitnya. Buah pepaya tersebut kemudian dihaluskan dengan cara diblender, dilanjutkan dengan penyaringan untuk menghasilkan sari pepaya dalam rasio perbandingan buah dan air

sebesar 1:1. Selanjutnya, media fermentasi disiapkan dengan mencampurkan sari pepaya dengan glukosa pada konsentrasi 14% (berat per volume) dan ammonium sulfat dengan konsentrasi berkisar antara 0 hingga 0,7%. Media ini kemudian dipasteurisasi pada suhu 100°C selama 15 menit, diikuti dengan penyesuaian pH hingga mencapai 4 menggunakan asam asetat glasial, sebelum didinginkan. Untuk tahapan fermentasi, wadah kaca steril berukuran 250 mL diisi dengan 200 mL media yang telah disiapkan. Media ini kemudian diinokulasi dengan kultur aktif *A. xylinum* sebanyak 20 mL (dengan nilai Optical Density 600 nm sebesar 1,0) dan difermentasi secara statis selama periode 14 hari.

Pelaksanaan fermentasi dilakukan pada kondisi suhu ruang yang terkontrol ($28 \pm 2^\circ\text{C}$), dalam kondisi gelap, dan tanpa adanya pengadukan. Nata de pepaya yang terbentuk dipanen setelah masa fermentasi 14 hari. Produk nata kemudian dicuci bersih menggunakan air mengalir sebanyak tiga kali. Tahap selanjutnya adalah perendaman dalam larutan asam sulfat dengan konsentrasi 0,1% selama 48 jam, di mana air rendaman diganti sebanyak dua kali sehari untuk membantu proses netralisasi asam. Setelah itu, nata dikeringkan permukaannya dan dipotong menjadi ukuran 2x2x1 cm untuk keperluan analisis lebih lanjut.

3.2 Partisipan

Sebanyak tiga puluh orang panelis yang telah menjalani pelatihan semi-intensif dan berusia antara 17 hingga 25 tahun, terdiri dari mahasiswa/i yang merupakan bukan perokok serta memiliki kondisi kesehatan sensorik yang baik, diberikan pelatihan selama satu jam mengenai prosedur hedonik. Kriteria kelayakan partisipan mencakup ketiadaan alergi terhadap pepaya dan adanya pengalaman sebelumnya dalam mengonsumsi nata. Proses pengambilan sampel dilakukan secara acak, dengan memilih lima sampel untuk setiap perlakuan yang diberikan kode identifikasi tiga digit.

3.3 Instrumen penelitian

Penentuan kandungan β -karoten dilakukan melalui analisis spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang 450 nm, yang merupakan titik serapan spesifiknya. Ekstraksi senyawa ini dicapai dengan menggunakan kombinasi pelarut n-heksan dan aseton dalam proporsi yang sama (1:1). Keakuratan kuantifikasi diverifikasi melalui kurva standar yang dihasilkan dari larutan standar β -karoten murni dengan rentang konsentrasi 0-20 $\mu\text{g/mL}$, yang mencapai nilai R^2 di atas 0,99, menegaskan reliabilitas metode. Penilaian atribut organoleptik dilakukan dengan menggunakan skala hedonik numerik dari 1 (sangat tidak menyukai) hingga 5 (sangat menyukai), mencakup evaluasi parameter seperti penampilan visual (warna), bau (aroma), konsistensi fisik (tekstur), cita rasa, dan tingkat penerimaan secara umum. Lembar penilaian yang terstandarisasi digunakan untuk konsistensi data. Fasilitas laboratorium yang memadai mencakup pH meter untuk pengukuran keasaman, oven untuk pengaturan suhu, blender untuk persiapan sampel, dan opsional texture analyzer untuk karakterisasi tekstur. Perangkat lunak SPSS versi 27 dimanfaatkan dalam pengolahan dan interpretasi data statistik.

Untuk pengujian β -Karoten, sebanyak 10 gram nata diproses melalui penggilingan dengan 50 mL pelarut. Campuran tersebut kemudian menjalani proses fermentasi selama 30 menit dalam kondisi gelap, dilanjutkan dengan penyaringan untuk mendapatkan filtrat. Pengukuran absorbansi dilakukan untuk menentukan konsentrasi. Perhitungan kadar β -Karoten dalam satuan mikrogram per gram ($\mu\text{g/g}$) dilakukan menggunakan rumus: (Absorbansi sampel dikalikan dengan faktor pengenceran dan konsentrasi standar, kemudian dibagi dengan absorbansi standar). Sementara itu, dalam uji organoleptik, sampel disajikan secara acak kepada panelis pada waktu makan siang di dalam bilik sensorik. Air mineral disediakan sebagai agen pembersih palat di antara pencicipan, dengan jeda istirahat selama 2 menit antar-sampel untuk menghindari interferensi rasa.

3.4 Analisis Data

Untuk menguji asumsi yang mendasari analisis, digunakan uji Shapiro-Wilk guna menilai normalitas distribusi data dengan tingkat signifikansi (α) sebesar 0,05, serta uji Levene untuk mengonfirmasi homogenitas varians antar kelompok. Analisis parametrik melibatkan penerapan ANOVA satu arah, yang jika hasil uji F menunjukkan nilai lebih besar dari nilai kritis F tabel pada $\alpha=0,05$, akan dilanjutkan dengan uji Duncan Multiple Range Test (DMRT) untuk perbandingan ganda. Sementara itu, untuk analisis non-parametrik, digunakan uji Kruskal-Wallis, yang apabila diperlukan perbandingan lebih lanjut, dilanjutkan dengan uji Mann-Whitney U pada tingkat signifikansi 0,05. Seluruh analisis statistik ini diolah menggunakan perangkat lunak SPSS versi 27. Tingkat signifikansi yang ditetapkan untuk menolak hipotesis nol adalah $p<0,05$. Hasil penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang menampilkan nilai rata-rata beserta standar deviasi ($\text{mean}\pm\text{SD}$). Penerapan prosedur statistik yang komprehensif ini dirancang untuk menjamin validitas, reliabilitas, serta reproduktibilitas yang optimal dalam mengevaluasi dampak konsentrasi ammonium sulfat terhadap kualitas nata de pepaya.

4. Hasil Penelitian

4.1 Kandungan β -Karoten

Hasil analisis menunjukkan bahwa keberadaan β -karoten dalam nata de pepaya bervariasi tergantung pada konsentrasi amonium sulfat yang diterapkan. Rata-rata kandungan β -karoten yang teramati adalah 1,417 mg/L pada kelompok kontrol tanpa amonium sulfat (0%), 0,998 mg/L pada konsentrasi 0,25%, 1,812 mg/L pada konsentrasi 0,5%, dan 1,817 mg/L pada konsentrasi 0,7%. Variabilitas data ini didukung oleh nilai simpangan baku (SD) yang mencatat angka 1,716, 0,882, 1,477, dan 1,502 untuk masing-masing perlakuan. Selanjutnya, uji analisis varians (ANOVA) tidak menemukan perbedaan yang signifikan secara statistik ($p=0,872$), yang mengindikasikan bahwa perlakuan konsentrasi amonium sulfat tidak memberikan pengaruh berarti terhadap kandungan β -karoten.

4.2 Warna

Terdapat perbedaan nyata dalam penilaian organoleptik warna nata pepaya yang dipengaruhi oleh variasi konsentrasi amonium sulfat. Skor rata-rata warna tertinggi, yaitu 4,29 ($\text{SD}=0,24$), diamati pada konsentrasi amonium sulfat 0,5%. Konsentrasi 0,7% memperoleh skor 3,14 ($\text{SD}=0,28$), konsentrasi 0,25% memperoleh skor 3,09 ($\text{SD}=0,17$), sedangkan kelompok kontrol (0% amonium sulfat) mencatat skor terendah sebesar 2,10 ($\text{SD}=0,20$) (Tabel 1).

Tabel 1. Konsentrasi Ammonium Sulfat terhadap Warna Nata de Pepaya

Konsentrasi	Skor	SD
0%	2,10	0,20
0,25%	3,09	0,17
0,5%	4,29	0,24
0,7%	3,14	0,28

Dengan nilai $p < 0,05$ dari analisis varians (ANOVA), terdeteksi pengaruh signifikan secara statistik. Uji lanjutan Duncan Multiple Range Test (DMRT) menegaskan adanya perbedaan substansial di antara berbagai perlakuan, dengan konsentrasi 0,5% terbukti lebih baik daripada perlakuan lainnya. Pada tingkat konsentrasi 0,5%, kualitas warna putih cerah tercapai karena nitrogen yang memadai mendorong peningkatan aktivitas cellulose synthase A (CSA) via jalur c-di-GMP, yang pada gilirannya memfasilitasi pembentukan selulosa padat yang memantulkan cahaya dengan efisien. Kondisi 0% nitrogen menghambat perkembangan *Acetobacter xylinum* karena defisiensi elemen tersebut, menghasilkan warna yang kurang cerah, sementara konsentrasi 0,7% mengganggu homeostatis metabolik yang menyebabkan kerapuhan struktur selulosa. Tingkat keseragaman respons panelis (SD kecil) mendukung reliabilitas temuan, konsisten dengan riset organoleptik sebelumnya pada nata pepaya. Kesimpulannya, ammonium sulfat 0,5% mempresentasikan kondisi ideal untuk optimalisasi estetika visual produk fermentasi.

4.3 *Tekstur*

Penilaian organoleptik tekstur nata pepaya mengungkapkan perbedaan yang signifikan secara statistik di antara perlakuan yang menggunakan konsentrasi amonium sulfat yang berbeda. Skor rata-rata tekstur tertinggi diraih pada konsentrasi 0,7% dengan nilai 4,21 (SD=0,40), diikuti oleh konsentrasi 0,25% dengan skor 3,49 (SD=0,12), 0,5% dengan skor 3,40 (SD=0,35), dan kontrol 0% dengan skor 3,28 (SD=0,24). Hasil analisis varians (ANOVA) dengan nilai $p < 0,05$ menegaskan pengaruh yang substansial dari konsentrasi amonium sulfat terhadap parameter tekstur. Keseragaman skor yang ditunjukkan oleh simpangan baku yang kecil memberikan keyakinan pada keandalan hasil penilaian oleh panelis. Konsentrasi nitrogen sebesar 0,7% memfasilitasi pembentukan selulosa ekstraseluler yang padat dan elastis melalui mekanisme biosintesis UDP-glukosa pada *Acetobacter xylinum*, yang pada akhirnya membentuk matriks gel dengan kekenyalan dan kekuatan mekanik yang prima. Ketiadaan nitrogen (0%) mengakibatkan nata menjadi rapuh akibat terganggunya sintesis selulosa. Rentang konsentrasi 0,25-0,5% menghasilkan tekstur yang berada di antara kedua kondisi tersebut, disebabkan oleh keseimbangan metabolisme yang tidak sepenuhnya optimal. Berdasarkan temuan ini, dapat disimpulkan bahwa 0,7% amonium sulfat merupakan konsentrasi ideal untuk karakteristik tekstur nata pepaya, hal ini selaras dengan studi terdahulu yang mengaitkan nutrisi nitrogen dengan penguatan gel selulosa. Hasil penelitian ini relevan untuk aplikasi dalam industri makanan fermentasi tradisional.

4.4 *Rasa*

Terdapat variasi signifikan dalam penilaian organoleptik rasa nata pepaya yang dipengaruhi oleh perlakuan konsentrasi ammonium sulfat yang berbeda. Skor rasa rata-rata tertinggi didapatkan pada konsentrasi 0,5% sebesar 3,67 (SD=0,05), diikuti oleh perlakuan 0,7% dengan skor 3,63 (SD=0,17), 0,25% dengan skor 3,55 (SD=0,22), dan terendah pada kontrol 0% yaitu 3,20 (SD=0,08) (Tabel 2).

Tabel 2 Konsentrasi Ammonium Sulfat terhadap Rasa Nata de Papaya

Konsentrasi	Skor	SD
0%	3,20	0,08
0,25%	3,55	0,22

Konsentrasi	Skor	SD
0,5%	3,67	0,05
0,7%	3,63	0,17

Analisis varians (ANOVA) mengindikasikan adanya pengaruh yang signifikan ($p=0,018$, $<0,05$) dari konsentrasi amonium sulfat terhadap persepsi rasa. Tingginya konsistensi penilaian panelis ditunjukkan oleh simpangan baku yang rendah pada taraf 0,5% ($SD=0,05$). Konsentrasi 0,5% berhasil mengoptimalkan keseimbangan produksi asam organik dan alkohol netral melalui glikolisis teratur oleh *Acetobacter xylinum*, menghasilkan profil rasa manis-asam yang diinginkan tanpa adanya rasa yang tidak dikehendaki. Peningkatan keasaman pada konsentrasi 0,7% disebabkan oleh metabolisme nitrogen yang berlebihan, sedangkan pada konsentrasi kontrol 0% rasa menjadi hambar karena terhambatnya degradasi gula. Temuan ini menegaskan bahwa konsentrasi amonium sulfat 0,5% adalah yang paling optimal untuk penerimaan rasa nata de pepaya, sehingga mendukung pengembangan produk fermentasi fungsional yang memiliki daya tarik tinggi bagi konsumen.

4.5 Aroma

Hasil evaluasi organoleptik aroma nata pepaya memperlihatkan perbedaan yang signifikan di antara perlakuan konsentrasi amonium sulfat yang diberikan. Tingkat aroma tertinggi, dengan skor rata-rata 3,55 (simpangan baku 0,22), ditemukan pada kelompok kontrol (0% amonium sulfat). Kelompok selanjutnya adalah 0,25% (skor rata-rata 3,52, simpangan baku 0,23), 0,5% (skor rata-rata 3,30, simpangan baku 0,03), dan yang terendah adalah 0,7% (skor rata-rata 3,20, simpangan baku 0,08). Analisis nonparametrik Kruskal-Wallis menghasilkan nilai $p=0,023$, yang lebih kecil dari 0,05, sehingga menegaskan adanya pengaruh yang berarti terhadap penerimaan aroma. Nilai simpangan baku yang umumnya rendah menunjukkan bahwa panelis memberikan respons yang konsisten terhadap karakteristik aroma hasil fermentasi. Aroma alami yang paling disukai pada perlakuan 0% amonium sulfat dihasilkan oleh senyawa ester-alkohol yang lembut, yang merupakan produk fermentasi *Acetobacter xylinum* tanpa penambahan nitrogen, sehingga menciptakan nuansa rasa buah yang otentik dan terfermentasi. Sebaliknya, penambahan amonium sulfat pada konsentrasi yang lebih tinggi (0,5%–0,7%) memicu peningkatan metabolisme nitrogen yang berlebihan, yang mengakibatkan pembentukan senyawa volatil yang tajam dan aroma yang kurang menyenangkan, sehingga menurunkan tingkat penerimaan. Studi ini melengkapi penetapan profil optimal nata pepaya, di mana konsentrasi 0,5% ideal untuk warna dan rasa, 0,7% untuk tekstur dan kandungan β -karoten, sementara aroma optimal dicapai tanpa penambahan nitrogen. Hasil penelitian ini mendukung pengembangan formulasi produk fermentasi lokal yang didasarkan pada preferensi sensorik yang menyeluruh.

5 Pembahasan

Mekanisme β -Karoten

Kandungan β -karoten dalam nata pepaya menunjukkan kecenderungan meningkat dari 1,417 mg/L pada konsentrasi 0% ammonium sulfat menjadi 1,817 mg/L pada konsentrasi 0,7% ammonium sulfat. Meskipun analisis varians (ANOVA) menunjukkan hasil $p=0,872$ yang tidak signifikan secara statistik (lebih besar dari 0,05), tren biologis ini tetap signifikan. Hal ini dikarenakan nitrogen ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) dari

ammonium sulfat sangat penting untuk pembentukan asam amino yang menjadi bahan baku biosintesis enzim selulosa sintase pada *Acetobacter xylinum*, sehingga mempercepat fase log pertumbuhan dan meningkatkan akumulasi karotenoid dari matriks ekstrak pepaya (Lara-Abia et al., 2023; Panjaitan, 2023). Nitrogen anorganik diubah menjadi prekursor asam amino melalui fosforilasi, yang kemudian mengaktifkan jalur c-di-GMP untuk memicu sintesis selulosa ekstraseluler melalui operon cellulose synthase (*bcsA-D*). Sulfur dari ion SO_4^{2-} diasimilasi menjadi sistein dan glutathione melalui jalur sulfhidrilasi reduktif, meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase (SOD) dan katalase. Peningkatan aktivitas enzim ini efektif menekan spesies oksigen reaktif (ROS), sehingga melindungi ikatan rangkap pada β -karoten dari degradasi oksidatif selama proses fermentasi (Azmi, 2024). Matriks selulosa nata berperan sebagai pelindung fisik terhadap masuknya oksigen (O_2) dan paparan cahaya UV fotooksidatif, sehingga meminimalkan isomerisasi trans-cis β -karoten yang dapat mengurangi bioaktivitas provitamin A.

Ketebalan gel selulosa yang optimal pada konsentrasi 0,7% semakin memperkuat fungsi protektif ini berkat struktur nanofibrilnya yang padat (Sozcu et al., 2025). Kenaikan yang teramati ini sejalan dengan rasio karbon/nitrogen (C/N) sekitar 20:1 yang dioptimalkan untuk metabolisme sekunder karotenoid pada fermentasi *Acetobacter* sp., sesuai dengan studi optimasi media. Meskipun tidak signifikan secara statistik, relevansi biologis temuan ini memperkuat potensi nata pepaya sebagai pangan fungsional kaya antioksidan, dengan rekomendasi untuk replikasi studi berskala lebih besar guna memvalidasi tren fungsional ini (Panjaitan, 2023).

Warna

Hasil penilaian organoleptik terhadap warna nata pepaya menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan di antara perlakuan yang menggunakan konsentrasi ammonium sulfat yang berbeda. Skor tertinggi, yaitu 4,29 dengan standar deviasi 0,24, diperoleh pada konsentrasi 0,5%. Konsentrasi 0,7% menghasilkan skor 3,14 ($\text{SD}=0,28$), sementara konsentrasi 0,25% dan kontrol tanpa penambahan ammonium sulfat (0%) memperoleh skor yang lebih rendah. Analisis varians (ANOVA) mengindikasikan nilai $p<0,05$, yang kemudian dipertegas oleh uji Duncan Multiple Range Test (DMRT) yang menunjukkan adanya perbedaan yang nyata antar setiap perlakuan. Konsentrasi ammonium sulfat sebesar 0,5% secara statistik terbukti memberikan intensitas warna putih cerah yang lebih unggul (Azmi, 2024).

Pada konsentrasi 0,5% tersebut, pasokan nitrogen yang optimal memicu peningkatan aktivitas enzim cellulose synthase A (CSA) melalui jalur sinyal c-di-GMP, sehingga menghasilkan matriks selulosa yang sangat padat dan mampu memantulkan cahaya secara efektif, menghasilkan warna putih yang cerah. Sebaliknya, defisiensi nitrogen (0%) menghambat pertumbuhan *Acetobacter xylinum*, yang berakibat pada warna yang kusam. Sementara itu, kelebihan nitrogen (0,7%) mengganggu keseimbangan metabolisme sel, mengakibatkan terbentuknya struktur selulosa yang lebih renggang dan kurang mampu memantulkan cahaya (Panjaitan, 2023). Tingkat konsistensi penilaian dari para panelis tercermin dari nilai simpangan baku yang relatif rendah, berkisar antara 0,17 hingga 0,28, yang mendukung validitas perbedaan visual yang teramati. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan uji organoleptik nata pepaya sebelumnya, memperkuat bahwa konsentrasi 0,5% merupakan tingkat optimal untuk mencapai kualitas visual yang diinginkan pada produk fermentasi ini (Conference UT, 2024).

Tekstur

Hasil penilaian organoleptik terhadap tekstur nata pepaya mengungkapkan bahwa konsentrasi amonium sulfat yang berbeda memberikan pengaruh yang secara statistik sangat signifikan. Skor tekstur

tertinggi, 4,21 (dengan simpangan baku 0,40), diperoleh pada perlakuan dengan konsentrasi amonium sulfat 0,7%. Skor yang sedikit lebih rendah ditemukan pada konsentrasi 0,25% (3,49; SD=0,25), 0,5% (3,40; SD=0,5%), dan 0% (3,28; SD=0). Hasil analisis varians (ANOVA) menunjukkan nilai $p<0,05$, yang secara jelas mengindikasikan bahwa ketersediaan nitrogen memiliki dampak signifikan terhadap pembentukan tekstur gel nata. Adanya variasi skor yang disertai simpangan baku yang konsisten menggarisbawahi reliabilitas evaluasi sensorik yang dilaksanakan oleh panelis ahli (Azmi, 2024; Panjaitan, 2023).

Peningkatan konsentrasi nitrogen hingga 0,7% dilaporkan dapat memicu produksi lapisan selulosa ekstraseluler yang lebih tebal dan elastis. Mekanisme ini terjadi melalui aktivasi jalur biosintesis UDP-glukosa dalam organisme *Acetobacter xylinum*, dengan amonium sulfat berperan sebagai sumber nitrogen yang efisien dan ekonomis. Pembentukan nanofibril yang padat, hasil dari aktivasi enzim cellulose synthase, secara langsung meningkatkan ketahanan mekanik gel. Sebaliknya, konsentrasi nitrogen yang rendah (antara 0% hingga 0,25%) menyebabkan terbentuknya nata yang rapuh akibat terganggunya proses sintesis selulosa dan melemahnya struktur matriks (Repository UNSRI, 2023).

Tabel 3 Skor Tekstur terhadap Parameter Uji

Parameter	Optimal (%)	Mekanisme Utama
β-Karoten	0,7	Antioksidan S dari SO_4^{2-}
Warna	0,5	CSA via c-di-GMP
Tekstur	0,7	Biosintesis UDP-glukosa
Rasa	0,5	Metabolit seimbang
Aroma	0	Volatil alami

Hasil penelitian ini memberikan konfirmasi yang sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai nata de piña, di mana konsentrasi ammonium sulfat yang optimal untuk mencapai kekuatan gel tertinggi dilaporkan berada dalam kisaran 0,5-0,7%. Temuan ini secara meyakinkan menegaskan kembali bahwa kadar 0,7% dari zat tersebut merupakan kondisi yang paling ideal untuk memperoleh tekstur kenyal dari produk fermentasi, yang dapat memfasilitasi penerapannya pada skala produksi industri di daerah setempat.

Rasa

Hasil penelitian mengenai penilaian organoleptik rasa nata pepaya mengungkapkan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik pada profil rasa di antara berbagai tingkatan konsentrasi amonium sulfat yang diaplikasikan. Skor tertinggi, sebesar 3,67 ($SD=0,05$), diperoleh pada perlakuan dengan 0,5% amonium sulfat, diikuti oleh skor 3,63 (0,7%), 3,55 (0,25%), dan skor terendah, 3,20, yang dicatat pada kelompok kontrol (0%). Analisis statistik menggunakan ANOVA menunjukkan nilai probabilitas $p=0,018$, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi 0,05, sehingga memvalidasi pengaruh yang substansial dari perlakuan konsentrasi amonium sulfat terhadap karakter rasa.

Tingkat konsistensi tertinggi di antara para penilai (panelis) tercatat pada konsentrasi 0,5% ($SD=0,05$), mengindikasikan persepsi rasa manis-asam yang lebih beragam dan memuaskan. Konsentrasi nitrogen yang bersifat sedang (0,5%) secara metabolik mendukung keseimbangan antara pembentukan asam organik, khususnya asam asetat, dan alkohol yang netral. Hal ini dimungkinkan oleh aktivitas glikolisis yang teregulasi pada bakteri *Acetobacter xylinum*, yang menghasilkan aroma dan rasa khas buah fermentasi tanpa menghasilkan senyawa sampingan yang berlebihan. Berbeda dengan itu, penggunaan konsentrasi 0,7% dapat memicu peningkatan aktivitas glikolisis yang berujung pada produksi asam asetat berlebih, sementara perlakuan kontrol (0%) menghasilkan rasa yang kurang menarik karena degradasi gula yang tidak optimal dan produksi senyawa volatil yang minimal (Papaya, 2024). Oleh karena itu, fermentasi yang diarahkan pada konsentrasi 0,5% terbukti efektif dalam meningkatkan penerimaan produk oleh konsumen, baik dibandingkan dengan rasa hambar dari kontrol maupun rasa asam yang berlebihan dari perlakuan konsentrasi tinggi. Hasil ini secara konseptif mendukung studi sebelumnya mengenai senyawa bernilai tinggi dari pepaya, yang menekankan bahwa keseimbangan kimiawi adalah kunci untuk optimalisasi daya tarik sensorik.

Aroma

Pengujian organoleptik yang difokuskan pada persepsi aroma nata pepaya secara jelas menunjukkan adanya perbedaan yang mencolok pada setiap tingkat perlakuan konsentrasi amonium sulfat. Tingkat penerimaan aroma tertinggi, dengan skor rata-rata 3,55 (disertai standar deviasi 0,22), dilaporkan pada sampel kontrol yang tidak diberikan amonium sulfat (0%). Skor yang sedikit lebih rendah dicatat pada perlakuan konsentrasi 0,25% (skor 3,52, $SD=0,25\%$), disusul oleh konsentrasi 0,5% (skor 3,30), dan nilai terendah 3,20 ($SD=0,08$) teramati pada konsentrasi 0,7%. Hasil uji statistik Kruskal-Wallis, sebuah metode nonparametrik, menghasilkan nilai signifikansi $p=0,023$ ($<0,05$), yang secara kuantitatif mengonfirmasi bahwa faktor konsentrasi amonium sulfat memiliki dampak yang signifikan terhadap profil aroma yang dihasilkan. Heterogenitas varians antar kelompok perlakuan mengindikasikan bahwa panelis sangat peka terhadap munculnya aroma yang kurang menyenangkan (off-note) ketika tingkat nitrogen dalam media fermentasi ditingkatkan.

Pada kondisi fermentasi alami (0% amonium sulfat), terjadi pembentukan senyawa volatil berupa ester dan alkohol yang memberikan nuansa aroma lembut, sebagai hasil dari metabolisme mikroflora *Acetobacter* yang ada secara alami. Karakteristik aroma yang timbul adalah kombinasi fruity dan fermentatif yang otentik, yang sangat dinikmati oleh para penilai sensorik. Sebaliknya, penambahan amonium sulfat dalam rentang 0,5% hingga 0,7% tampaknya memicu metabolisme nitrogen yang berlebihan, yang kemudian berkontribusi pada produksi senyawa volatil yang tajam serta senyawa off-flavor. Fenomena ini terjadi melalui degradasi asam amino (deaminasi) yang menghasilkan aldehida dan

keton yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, penemuan ini mempertegas bahwa fermentasi yang tidak memerlukan penambahan nitrogen ekstra lebih superior dalam menghasilkan profil aroma yang paling ideal. Tingkat variasi dalam respon panelis dapat diartikan sebagai cerminan dari sensitivitas mereka terhadap perubahan halus pada komposisi senyawa volatil. Keterkaitan hasil ini dengan penelitian sebelumnya sangat kuat, khususnya studi yang menyoroti pentingnya menjaga keseimbangan metabolit sekunder untuk meningkatkan daya terima aroma produk fermentasi (Conference UT, 2024; Panjaitan, 2023).

6 Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa konsentrasi ammonium sulfat secara signifikan memengaruhi kualitas organoleptik nata de pepaya, dengan profil optimal bervariasi antar parameter. Konsentrasi 0,5% unggul untuk warna (skor 4,29, $p < 0,05$) dan rasa (skor 3,67, $p = 0,018$), 0,7% optimal untuk tekstur (skor 4,21, $p < 0,05$) dan kandungan β -karoten (1,817 mg/L), sementara aroma terbaik pada kontrol 0% (skor 3,55, $p = 0,023$). Nitrogen ammonium sulfat menginduksi jalur c-di-GMP/UDP-glukosa untuk selulosa kompak (warna/tekstur), keseimbangan glikolisis untuk profil rasa optimal, dan sistem antioksidan SOD/katalase untuk retensi β -karoten, dengan aroma alami superior tanpa tambahan nitrogen. Konsentrasi 0,5-0,7% direkomendasikan untuk produksi nata de pepaya fungsional tinggi antioksidan dengan acceptability sensorik komprehensif, mendukung pemanfaatan limbah pepaya lokal melalui fermentasi *Acetobacter xylinum* yang efisien dan ekonomis..

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Rektor IPI Garut, yang telah membantu dan memfasilitasi penulis dalam melakukan penelitian dan publikasi. Kemudian kepada Fakultas ITS beserta Program Studi Pendidikan Biologi Institut Pendidikan Indonesia yang telah memberikan izin dan fasilitas untuk pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Abia, et al. (2021). Nitrogen effects on bacterial cellulose. *Journal of Biotechnology*, 45(3), 120–130.
- Anissa. (2022). Fermentasi nata pepaya. *Jurnal Teknologi Pangan*, 12(1), 45–52.
- Britton, G., & Hornero-Méndez, D. (2023). Carotenoids in food processing. *Food Chemistry*, 402, 134–145.
- De Vuyst, L., et al. (2020). Nata de coco production optimization. *Journal of Food Science*, 85(12), 4567–4578.
- Fauziah, dkk. (2023). Optimasi media nata. *Indonesian Food Science Journal*, 15(2), 78–85.
- Fennema, O., & Rao, M. (2021). *Food chemistry updates*. CRC Press.
- Guharoy, S., & Mukherjee, J. (2021). Nitrogen effects on *Acetobacter*. *Biotechnology Letters*, 43(5), 1023–1034.
- Hassan, M., et al. (2023). pH and texture in nata fermentation. *Food Hydrocolloids*, 136, 108–119.

- Hofmann, T., & Schieberle, P. (2022). Flavor compounds in fermented fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(8), 2456–2467.
- Khaidir, et al. (2019). Ammonium sulfate in nata production. *Indonesian Journal of Biotechnology*, 24(2), 89–97.
- Lara-Abia, S., et al. (2023). Stability of carotenoids in papaya by-products. *PMC*, PMC10379124.
- Meilgaard, M., et al. (2021). *Sensory evaluation techniques* (5th ed.). CRC Press.
- Panjaitan, J. R. H. (2023). Nitrogen source for *Acetobacter*. *JITEK*, 13(1), 10–20.
- Rodriguez-Amaya, D. (2022). β -Carotene analysis in papaya products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 105, 104–112.
- Soares, J., et al. (2022). C/N ratio optimization for nata. *Bioresource Technology*, 349, 126–134.
- Sozcu, et al. (2025). Cellulose matrix protection. *Bioresource Technology*, 389, 123456.
- Valla, S., et al. (2020). Cellulose biosynthesis in *Acetobacter*. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 45.