

Karakteristik fisikokimia, total mikroba, dan sifat sensori serbuk limau kasturi (*Citrus microcarpa*) pada berbagai tingkat kematangan buah menggunakan mini spray dryer

*Physicochemical characteristics, total microbial count, and sensory properties of calamansi (*Citrus microcarpa*) powder at different fruit maturity stages using a mini spray dryer*

Maulana Mubarak^{1*}, Iqbal Nusa¹, Suhaimi Alias²

¹Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapten Muchtar Basri No. 3, Medan 20238, Indonesia

²Malaysian Agriculture Research and Development Institute (MARDI), Persiaran Mardi-UPM, 43400, Serdang, Selangor, Malaysia

*Email korespondensi: maulanamubarak24@gmail.com

Informasi artikel:

Dikirim: 14 Januari 2026; disetujui: 30 Januari 2026; diterbitkan: 31 Maret 2026

ABSTRACT

*Calamansi (*Citrus microcarpa*) is a local fruit commodity with considerable potential to be developed into a functional food product due to its high content of bioactive compounds, particularly antioxidants. Processing calamansi into powder form through spray drying can extend shelf life and improve application versatility; however, the quality of the resulting product is strongly influenced by the maturity stage of the fruit used. This study aimed to evaluate the effect of fruit ripening stages of calamansi (*Citrus microcarpa*) on the physicochemical characteristics, bioactive properties, and sensory attributes of the powder produced using a Büchi B-290 mini spray dryer. Calamansi fruits were harvested at three maturity stages: green, half-ripe, and ripe. The parameters analyzed included moisture content, water activity, color values (L^* and a^*), total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), and antioxidant activity determined by DPPH and ABTS assays. The results revealed that fruit maturity significantly affected color characteristics and antioxidant capacity. The powder produced from green fruit exhibited the highest antioxidant activity (DPPH IC_{50} = 5,01 mg/mL) with a TFC of 0,351 mg/mL, while ripe fruit produced a brighter color (L^* = 88,69) and the highest TPC (0,412 mg/mL). Antioxidant activity decreased with increasing maturity due to the degradation of phenolic and flavonoid compounds during ripening and drying processes. These findings indicate that fruit maturity level determines the balance between functional and sensory quality of calamansi powder. Green fruit is more suitable for functional antioxidant-rich products, while ripe fruit is preferable for instant beverage applications with appealing color.*

Keywords: antioxidant activity; calamansi fruit; fruit maturity; mini spray dryer; fruit powder

ABSTRAK

Limau kasturi (*Citrus microcarpa*) merupakan salah satu komoditas buah lokal yang berpotensi dikembangkan menjadi produk pangan fungsional karena kandungan senyawa bioaktifnya, terutama antioksidan. Pengolahan limau kasturi menjadi bentuk serbuk melalui proses pengeringan semprot dapat meningkatkan umur simpan dan kemudahan aplikasi, namun kualitas produk sangat dipengaruhi oleh tingkat kematangan buah yang

digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh tingkat kematangan buah limau kasturi (*Citrus microcarpa*) terhadap karakteristik fisikokimia, aktivitas bioaktif, dan sifat sensori serbuk yang dihasilkan melalui proses pengeringan sembur menggunakan mini *spray dryer* tipe Büchi B-290. Buah limau kasturi dipanen pada tiga tingkat kematangan yaitu hijau, separo masak, dan masak. Parameter yang dianalisis meliputi kadar air, aktivitas air, warna (L^* dan a^*), total fenolik (TPC), total flavonoid (TFC), serta aktivitas antioksidan menggunakan metode DPPH dan ABTS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kematangan berpengaruh nyata terhadap karakteristik warna dan aktivitas antioksidan serbuk yang dihasilkan. Serbuk dari buah muda memiliki aktivitas antioksidan tertinggi dengan nilai IC_{50} DPPH sebesar 5,01 mg/mL dan kandungan TFC sebesar 0,351 mg/mL, sedangkan buah masak menghasilkan warna lebih cerah ($L^* = 88,69$) dengan kandungan TPC tertinggi (0,412 mg/mL). Aktivitas antioksidan menurun seiring meningkatnya tingkat kematangan, yang disebabkan oleh degradasi senyawa fenolik dan flavonoid selama proses pematangan dan pengeringan. Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat kematangan buah menentukan keseimbangan antara aktivitas fungsional dan penampilan sensori serbuk. Buah muda lebih sesuai untuk produk fungsional kaya antioksidan, sedangkan buah matang lebih tepat untuk aplikasi minuman serbuk instan dengan warna yang lebih menarik.

Kata kunci: aktivitas antioksidan; buah limau kasturi; kematangan buah; mini *spray dryer*; serbuk buah

PENDAHULUAN

Limau kasturi (*Citrus microcarpa*) merupakan salah satu jenis jeruk lokal yang banyak ditemukan di Asia Tenggara, termasuk Indonesia, dan sering dimanfaatkan sebagai bahan penyedap makanan maupun minuman karena cita rasa asam dan aromanya yang khas. Buah ini mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti vitamin C, flavonoid, dan minyak atsiri yang berperan penting sebagai antioksidan alami (Belitz *et al.*, 2009). Namun demikian, limau kasturi memiliki kadar air yang tinggi sehingga mudah mengalami kerusakan akibat aktivitas enzimatik dan pertumbuhan mikroba. Kondisi ini menyebabkan umur simpan buah menjadi singkat serta menimbulkan kehilangan nilai ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengolahan yang dapat memperpanjang umur simpan sekaligus mempertahankan kualitas sensori dan kandungan gizinya. Salah satu metode yang potensial digunakan adalah pengeringan menjadi bentuk serbuk.

Pengeringan semprot (*spray drying*) merupakan metode yang banyak digunakan untuk mengubah bahan cair atau semi-cair menjadi bentuk serbuk melalui proses atomisasi dan kontak langsung dengan udara

panas. Proses ini mampu menghasilkan serbuk dengan ukuran partikel seragam, mudah larut, serta memiliki stabilitas yang baik, terutama ketika menggunakan agen pembawa seperti maltodekstrin yang dapat membantu mempertahankan sifat fisikokimia dan senyawa bioaktif pada produk buah kering (Leyva-porras *et al.*, 2021; Vargas *et al.*, 2024). Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan *carrier agent* seperti maltodekstrin dapat meningkatkan kestabilan serbuk buah serta melindungi senyawa aktif dari kerusakan akibat panas (Baldelli *et al.*, 2024). Selain itu, teknologi mini *spray dryer* memungkinkan proses pengeringan skala laboratorium dengan pengaturan suhu dan laju alir udara yang presisi, sehingga hasil yang diperoleh lebih konsisten (Sharma *et al.*, 2023).

Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada optimasi kondisi proses pengeringan, seperti suhu inlet dan konsentrasi bahan penyalut, terhadap karakteristik serbuk buah jeruk (Kusumaningrum, 2014). Namun, studi mengenai pengaruh tingkat kematangan buah limau kasturi terhadap karakteristik fisikokimia, total mikroba, dan sifat sensori serbuk yang dihasilkan melalui mini *spray*

dryer masih sangat terbatas. Padahal, perubahan fisiologis selama proses pematangan buah, seperti peningkatan total padatan terlarut dan penurunan kadar asam, dapat berpengaruh signifikan terhadap mutu akhir serbuk (Kassa dan Teferi 2024). Dengan demikian, penelitian ini memiliki kebaruan ilmiah dalam mengkaji hubungan antara tingkat kematangan buah limau kasturi dan kualitas serbuk yang dihasilkan melalui proses mini *spray drying*.

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana tingkat kematangan buah limau kasturi memengaruhi karakteristik fisikokimia, total mikroba, serta sifat sensori dari serbuk yang dihasilkan. Berdasarkan hal tersebut, hipotesis penelitian ini adalah bahwa tingkat kematangan buah yang berbeda akan memberikan pengaruh signifikan terhadap mutu akhir serbuk limau kasturi, baik dari segi sifat fisik, kimia, mikrobiologi, maupun organoleptik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh tingkat kematangan buah limau kasturi (*Citrus microcarpa*) terhadap karakteristik fisikokimia, aktivitas bioaktif, dan sifat sensori serbuk yang dihasilkan melalui proses pengeringan sembur menggunakan mini *spray dryer* tipe Büchi B-290.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan untuk sampel penelitian merupakan Buah Limau Kasturi segar yang berasal kebun petani dari daerah Pagoh, Johor, Malaysia.

Alat

Peralatan mencakup blender, timbangan, *homogenizer*, *spray dryer*, chromameter, A_w meter, *Moisture Analyzer* dan seperangkat alat analisa aktivitas antioksidan.

Pembuatan serbuk limau kasturi

Buah limau kasturi disortir berdasarkan tingkat kematangan mentah/hijau (H), separuh masak (0,5M) dan masak (M). Buah dicuci, dibelah, dan dipisahkan dari biji. Daging buah kemudian diblender dan disaring

untuk mendapatkan sari buah murni. Sari buah dicampur dengan maltodekstrin sebanyak 10% (b/b) dan dihomogenkan menggunakan *homogenizer* (IKA T25 Ultra-Turrax, Germany) selama 5 menit pada kecepatan 10.000 rpm.

Proses pengeringan dilakukan menggunakan *Spray dryer* Büchi B-290 (Switzerland) dengan parameter operasi sebagai berikut: suhu inlet 150°C, suhu outlet 80°C, laju umpan 5 mL/menit, dan laju alir udara 600 L/jam. Setiap sampel limau kasturi (H, 0,5M, dan M) dikeringkan secara terpisah hingga diperoleh serbuk limau kasturi kering. Serbuk disimpan dalam wadah kaca tertutup rapat pada suhu ruang sebelum dianalisis.

Uji kadar air

Pengujian kadar air menggunakan alat *Moisture Analyzer* (A&D MX-50). Sampel ditimbang 5 g lalu alat ditutup dan otomatis bekerja hingga hasilnya keluar.

Uji aktivitas air

Aktivitas air (A_w) diukur menggunakan alat A_w meter (PRE-AquaLab). Sampel dimasukkan ke dalam ruang pengukuran alat tersebut, kemudian setelah indikator menunjukkan posisi ready, tombol start ditekan untuk memulai proses pengukuran. Nilai aktivitas air (A_w) akan muncul pada layar ketika alat menunjukkan status completed, menandakan bahwa pengukuran telah selesai dan data dapat dibaca (Suharyanto, 2009).

Uji warna

Sampel diletakkan didalam wadah pipih untuk serbuk limau kasturi menggunakan alat Chromameter (CR-400 Konica Minolta) lalu dilakukan uji warna.

Uji aktivitas antioksidan

Pembuatan Ekstrak Sampel, timbang 0,5 g bubuk limau kasturi dan tambahkan 5 mL air suling. Lalu letakkan ke orbital shaker (DAIHAN Scientific SHO-2D) selama 1 jam dengan 150 rpm, Masukkan ke dalam Centrifuge (Sigma 2-16P) dengan kecepatan 8500 rpm selama 10 menit. Setelah itu keluarkan dan disaring dengan kertas saring

(Advantec 5A) lalu dari filtrat diambil dan dilakukan pengujian aktivitas antioksidan. Pengujian Aktivitas Antioksidan menggunakan berbagai metode yaitu

Total polyphenol content (TPC)

Masukkan standar gallic acid kedalam plate microplate sebanyak 50 μL lalu buat pengenceran dengan tambahkan air suling sebanyak 50 μL hingga wadah terakhir lalu air dilution terakhir dibuang. Setelah itu masukkan sampel sebanyak 50 μL dan masukkan air suling 50 μL . Lalu keduanya wadah sample dan standart diberi larutan folin sebanyak 100 μL , atur timer hingga 6 menit setelah memasukkan larutan folin pertama kali. Lalu masukkan larutan Na_2CO_3 sebanyak 100 μL . inkubasi selama 2 jam di tempat gelap lalu baca menggunakan Abs 765 nm dengan alat Microplate reader gen5 (EON Biotek) (Singleton et al., 1999).

DPPH radical scavening

Siapkan DPPH campurkan ke methanol lalu absorpsi menggunakan Abs 517 nm dengan alat Microplate reader gen5 (EON Biotek) hingga nilai absorpsinya 1. Lalu masukan 2 standart bersampingan yaitu Trolox dan Vitamin C sebanyak 100 μL lalu buat pengenceran dengan tambahkan air suling sebanyak 100 μL hingga wadah terakhir lalu air dilution terakhir dibuang. Setelah itu masukkan sampel sebanyak 100 μL . Lalu keduanya wadah *sample* dan *standart* diberi larutan DPPH sebanyak 200 μL . Inkubasi selama 40 menit di tempat gelap lalu baca menggunakan Abs 517 nm dengan alat Microplate reader gen5 (EON Biotek) (Blois, 1958; Lu dan Foo, 2000).

Total flavonoid content

Masukkan standar *Quercetin hydrate* sebanyak 100 μL lalu buat pengenceran dengan tambahkan air suling sebanyak 100 μL hingga wadah terakhir lalu air dilution terakhir dibuang. Setelah itu masukkan sampel sebanyak 100 μL . Lalu keduanya wadah *sample* dan *standart* diberi larutan 2% $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebanyak 100 μL . Inkubasi selama 1 jam di tempat gelap lalu baca menggunakan Abs 420 nm dengan alat

Microplate reader gen5 (EON Biotek) (Ali et al., 2018)

Trolox equivalent antioxidant capacity (TEACH)

Pembuatan *Standart* ABTS dahulu yaitu Solution A (7mM ABTS) dan Solution B (potassium persulfate 2,45 mM, keduanya dicampur dan di letakkan di tempat gelap selama 16 jam. Setelah dicampur dan di tambahkan air suling lalu di absorpsi menggunakan Abs 734 nm dengan alat Microplate reader gen5 (EON Biotek) hingga nilai absorpsinya 0,7. Lalu Masukkan *Standart Trolox* sebanyak 20 μL lalu buat pengenceran dengan tambahkan air suling sebanyak 20 μL hingga wadah terakhir lalu air dilution terakhir dibuang. Setelah itu masukkan sampel sebanyak 20 μL . Lalu keduanya wadah *sample* dan *standart* diberi larutan ABTS sebanyak 280 μL . Inkubasi selama 30 menit di tempat gelap lalu baca menggunakan Abs 734 nm dengan alat Microplate reader gen5 (EON Biotek) (Rajurkar dan Hande, 2011).

Uji sensori

Uji sensori dilakukan untuk mengetahui tingkat kesukaan panelis terhadap bubuk limau kasturi yang disimpan dalam wadah aluminium dan box suhu pengeringan 60°C. Uji sensori dilakukan oleh 40 panelis kategori terlatih dengan rentang penilaian skor 1-7 dengan rincian skala sebagai berikut: 1 = sangat tidak suka, 2 = tidak suka, 3 = agak tidak suka, 4 = netral, 5 = agak suka, 6 = suka, dan 7 = sangat suka. Untuk menilai warna, bau, kemasaman, kepahitan, tekstur, *after taste* dan penerimaan keseluruhan (Triandini dan Wangiyana, 2022).

Analisa data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode *One Way Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengetahui adanya perbedaan yang signifikan antar perlakuan. Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan yang nyata, maka dilakukan uji lanjut menggunakan *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada tingkat signifikansi 5% ($p \leq 0,05$) guna menentukan

perbedaan antar rata-rata perlakuan secara lebih spesifik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik fisikokimia serbuk limau kasturi

Proses pengeringan sembur (*spray drying*) limau kasturi menghasilkan serbuk dengan kadar air berkisar antara 3,60–3,84%, aktivitas air (a_w) antara 0,272–0,312, serta nilai kecerahan warna (L^* = 85,40–88,69) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai kadar air tersebut menunjukkan bahwa seluruh sampel serbuk telah mencapai kategori bahan kering, karena kadar air di bawah 5% dapat

menghambat pertumbuhan mikroba dan memperpanjang umur simpan (Belitz *et al.*, 2009).

Rendahnya kadar air disebabkan oleh efisiensi alat Büchi B-290 mini *spray dryer*, yang mampu mengatomisasi larutan sari buah menjadi partikel halus dengan luas permukaan tinggi, sehingga air cepat menguap ketika bersentuhan dengan udara panas. Meskipun terdapat perbedaan tingkat kematangan, tidak terdapat perbedaan nyata ($p>0,05$) pada kadar air dan aktivitas air antar sampel. Hal ini menunjukkan bahwa parameter operasi pengeringan (terutama suhu inlet dan laju aliran udara) berperan lebih dominan terhadap penghilangan air dibandingkan komposisi bahan baku.

Tabel 1. Karakteristik fisikokimia serbuk limau kasturi

Tingkat Kemasakan	Kadar Air (%)	A_w	L	a^*	b^*
H	$3,84 \pm 0,32^a$	$0,306 \pm 0,014^a$	$85,47 \pm 1,25^b$	$-3,14 \pm 0,08^b$	$23,32 \pm 0,52^b$
0,5M	$3,60 \pm 0,71^a$	$0,312 \pm 0,006^a$	$85,40 \pm 0,43^b$	$-1,06 \pm 0,12^a$	$29,56 \pm 0,32^b$
M	$3,60 \pm 0,38^a$	$0,272 \pm 0,001^a$	$88,69 \pm 0,20^a$	$-2,42 \pm 0,08^b$	$20,19 \pm 0,38^a$

Keterangan: Terdapat perbedaan yang signifikan pada taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$) yang ditunjukkan dengan nilai rata-rata diikuti notasi huruf berbeda berdasarkan uji DMRT.

Namun, perbedaan nyata ($p<0,05$) ditemukan pada parameter warna (L^* dan a^*). Sampel masak (M) menunjukkan nilai kecerahan (L^* = 88,69) tertinggi dibandingkan dengan hijau (H) (85,47) dan separo masak (0,5M) (85,40). Peningkatan kecerahan pada buah matang berhubungan dengan perubahan pigmen selama proses pematangan, yaitu degradasi klorofil dan peningkatan karotenoid yang memberikan warna kuning-oranye lebih cerah. Selain itu, kandungan gula yang meningkat pada buah matang dapat menyebabkan pembentukan lapisan amorf saat pengeringan, yang berkontribusi pada pantulan cahaya yang lebih tinggi sehingga meningkatkan nilai kecerahan (Xu *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022).

Sebaliknya, nilai a^* (tingkat kemerahan–kehijauan) menunjukkan tren yang bervariasi. Sampel hijau memiliki nilai a^* negatif paling besar (-3,14), menandakan dominasi warna kehijauan akibat kandungan

klorofil yang tinggi. Nilai a^* meningkat menjadi -1,06 pada separo masak, menunjukkan transisi warna menuju kekuningan, namun menurun sedikit pada buah masak (-2,42) yang menunjukkan keseimbangan antara sisa klorofil dan pembentukan pigmen karotenoid. Menurut (Cairone *et al.*, 2025; Kapoor *et al.*, 2022), perubahan warna ini merupakan hasil dari reaksi degradasi klorofil menjadi feofitin dan lutein selama pematangan dan pemanasan.

Perbedaan tingkat kematangan buah memengaruhi warna serbuk limau kasturi secara signifikan, tetapi tidak memengaruhi kadar air dan aktivitas air. Buah matang memberikan serbuk dengan warna paling cerah (daya tarik visual tinggi), sementara buah hijau menghasilkan warna lebih gelap namun berpotensi memiliki kandungan senyawa bioaktif lebih stabil.

Aktivitas antioksidan serbuk limau kasturi

Hasil analisis aktivitas antioksidan menggunakan metode DPPH dan ABTS, serta kandungan Total Phenolic Content (TPC) dan Total Flavonoid Content (TFC) ditampilkan pada Tabel 2. Sampel FD (H) menunjukkan aktivitas antioksidan tertinggi dengan nilai

IC₅₀ DPPH 5,01 mg/mL, diikuti oleh FD (M) sebesar 12,66 mg/mL dan FD (0,5M) sebesar 15,57 mg/mL. Nilai IC₅₀ yang lebih rendah menunjukkan kemampuan yang lebih kuat dalam menetralkan radikal bebas (Belitz *et al.*, 2009). Pola serupa juga terlihat pada metode ABTS, di mana buah hijau memiliki aktivitas penangkapan radikal tertinggi.

Tabel 2. Aktivitas antioksidan serbuk limau kasturi

Tingkat Kemasakan	TPC (mg /mL)	DPPH (IC ₅₀ mg/mL)	ABTS (IC ₅₀ mg/mL)	TFC (mg /mL)
H	0,319 ± 0,0004 ^b	5,01 ± 0,26 ^a	20,91 ± 0,5 ^c	0,351 ± 0,005 ^c
0,5M	0,289 ± 0,002 ^a	15,57 ± 0,90 ^c	13,69 ± 1,36 ^a	0,296 ± 0,006 ^a
M	0,412 ± 0,002 ^c	12,66 ± 1,45 ^b	17,79 ± 0,79 ^b	0,328 ± 0,006 ^b

Keterangan: Terdapat perbedaan yang signifikan pada taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$) yang ditunjukkan dengan nilai rata-rata diikuti notasi huruf berbeda berdasarkan uji DMRT

Tingginya aktivitas antioksidan pada buah muda dapat dijelaskan oleh kandungan metabolit sekunder yang lebih tinggi, terutama senyawa polifenol dan flavonoid yang berperan sebagai donor electron. Selama proses pematangan, aktivitas enzim polifenol oksidase meningkat sehingga sebagian senyawa fenolik teroksidasi dan kehilangan kemampuan sebagai antioksidan (Zhang *et al.*, 2022).

Menariknya, meskipun buah masak (M) memiliki aktivitas antioksidan lebih rendah, nilai Total Phenolic Content (TPC) justru paling tinggi (0,412 mg/mL). Hal ini menunjukkan bahwa jumlah total senyawa fenolik tidak selalu sebanding dengan efektivitasnya dalam menangkap radikal bebas. Fenomena ini dapat terjadi karena pada tingkat kematangan tinggi, sebagian senyawa fenolik terikat dengan gula atau asam organik membentuk kompleks yang kurang aktif secara redoks (Moazzen *et al.*, 2022). Dengan demikian, struktur kimia senyawa fenolik lebih menentukan kemampuan antioksidatif dibandingkan konsentrasinya secara kuantitatif.

Selain itu, kandungan Total Flavonoid Content (TFC) juga menunjukkan pola yang bervariasi, dengan nilai tertinggi pada buah hijau (0,351 mg/mL) dan terendah pada separa masak (0,296 mg/mL). Flavonoid

merupakan kelompok senyawa yang mudah terdegradasi akibat paparan panas saat pengeringan (ElGamal *et al.*, 2023; Jia *et al.*, 2025). Oleh karena itu, sedikit perbedaan kadar flavonoid antar sampel dapat pula disebabkan oleh perbedaan stabilitas termal selama pengeringan, terutama pada buah matang yang memiliki kadar gula tinggi yang dapat mempercepat reaksi pencoklatan non-enzimatis.

Aktivitas antioksidan serbuk limau kasturi cenderung menurun seiring meningkatnya tingkat kematangan buah, meskipun kandungan total fenolik meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas struktur senyawa fenolik dan flavonoid lebih berperan dibandingkan kuantitas totalnya. Kondisi buah muda menghasilkan serbuk dengan potensi fungsional lebih tinggi sebagai sumber antioksidan alami.

Uji sensori serbuk limau kasturi

Hasil uji sensori menunjukkan bahwa tingkat kematangan bahan berpengaruh terhadap karakteristik sensori yang meliputi warna, aroma, rasa, tekstur, dan tingkat kesukaan keseluruhan. Sampel dengan tingkat kematangan mentah memperoleh nilai terendah pada hampir seluruh atribut sensori karena warna yang masih pucat, aroma bahan mentah yang kurang berkembang, rasa yang

belum optimal, serta tekstur yang relatif keras sehingga kurang disukai panelis. Pada tingkat setengah masak, terjadi peningkatan penerimaan sensori yang ditandai dengan

warna yang mulai cerah, aroma yang lebih berkembang, rasa yang lebih seimbang, serta tekstur yang mulai melunak.

Tabel 3. Uji sensori serbuk limau kasturi.

Tingkat Kemasakan	Warna	Bau	Kemanisan	Kemasaman	Penerimaan Keseluruhan
H	$4,97 \pm 1,17^a$	$4,67 \pm 1,07^a$	$4,37 \pm 1,03^a$	$4,57 \pm 1,05^a$	$4,47 \pm 1,20^a$
0,5M	$5,33 \pm 0,98^b$	$5,03 \pm 0,91^b$	$4,93 \pm 1,02^c$	$5,27 \pm 0,77^b$	$5,03 \pm 0,91^b$
M	$6,23 \pm 0,61^c$	$6,17 \pm 0,61^c$	$4,83 \pm 1,19^b$	$5,70 \pm 0,91^c$	$5,60 \pm 0,75^c$

Keterangan: Terdapat perbedaan yang signifikan pada taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$) yang ditunjukkan dengan nilai rata-rata diikuti notasi huruf berbeda berdasarkan uji DMRT.

Skor 1-7 dengan rincian skala sebagai berikut: 1 = sangat tidak suka, 2 = tidak suka, 3 = agak tidak suka, 4 = netral, 5 = agak suka, 6 = suka, dan 7 = sangat suka.

Sementara itu, sampel masak memperoleh skor tertinggi pada seluruh atribut sensori dan menjadi perlakuan yang paling disukai panelis. Hal ini disebabkan oleh perubahan fisik dan kimia selama proses pemasakan, seperti degradasi pigmen, pembentukan senyawa volatil penyusun aroma, peningkatan cita rasa akibat reaksi termal, serta pelunakan struktur jaringan bahan. Menurut Winarno (2004), pemanasan dapat meningkatkan mutu sensori dengan memperbaiki warna, rasa, dan aroma bahan pangan, sedangkan Fellow (2009) menyatakan bahwa proses pemasakan menyebabkan perubahan struktur bahan yang berpengaruh langsung terhadap tekstur dan tingkat penerimaan konsumen. Selain itu, Meilgaard *et al.* (2006) menjelaskan bahwa kesukaan keseluruhan merupakan hasil interaksi seluruh atribut sensori, sehingga perlakuan masak memberikan tingkat penerimaan tertinggi dibandingkan perlakuan mentah dan setengah masak.

Total mikroba serbuk limau kasturi

Untuk parameter Total Plate Count (TPC), nilai yang diperoleh pada seluruh sampel berada pada kisaran $3,0 \times 10^2$ hingga $1,05 \times 10^3$ CFU/g. Nilai ini menunjukkan jumlah total mikroorganisme yang sangat rendah dan mengindikasikan bahwa sampel masih berada dalam kondisi bersih serta tidak mengalami pencemaran yang signifikan.

Secara umum, nilai TPC di bawah 1×10^4 CFU/g dianggap memuaskan untuk produk hasil pertanian segar, sehingga seluruh sampel limau kasturi dalam pengujian ini dinyatakan memenuhi standar kebersihan mikrobiologi. Hasil dapat dilihat pada tabel 4 yang ada di bawah.

Pada pengujian khamir dan kapang (Yeast and Mould), sebagian besar sampel menunjukkan nilai yang rendah, yaitu kurang dari $1,0 \times 10^1$ CFU/g. Namun, beberapa sampel menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi, yaitu sampel H1 ($2,10 \times 10^2$ CFU/g), S1 ($3,0 \times 10^1$ CFU/g), dan M3 ($2,0 \times 10^2$ CFU/g). Menurut Pratama *et al.* (2019), keberadaan *yeast* dan *mould* dalam jumlah kecil masih umum ditemukan pada produk pangan berbahan alami dan tidak selalu menunjukkan penurunan mutu apabila masih berada di bawah ambang batas. Meskipun nilai tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima, hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan pertumbuhan alami kapang pada permukaan buah, terutama pada buah yang lebih matang atau yang terpapar kelembapan. Kondisi ini dapat dipengaruhi oleh faktor penyimpanan, kelembapan lingkungan, atau perbedaan penanganan pascapanen. Oleh karena itu, pemantauan terhadap kondisi penyimpanan dan kebersihan permukaan buah sangat dianjurkan.

Tabel 4. Total Mikroba Serbuk Limau Kasturi.

Sampel	Total Plate Count (CFU/g)	Yeast & Mould (CFU/g)	Coliform (MPN/g)
Mentah/Hijau (H1)	$3,0 \times 10^2$	$2,10 \times 10^2$	0
Mentah/Hijau (H2)	$4,7 \times 10^2$	$< 1,00 \times 10$	0
Mentah/Hijau (H3)	$3,5 \times 10^2$	$< 1,00 \times 10$	0
Separuh masak (0,5M1)	$3,0 \times 10^2$	$3,00 \times 10$	0
Separuh masak (0,5M2)	$1,05 \times 10^3$	$< 1,00 \times 10$	0
Separuh masak (0,5M3)	$7,5 \times 10^2$	$< 1,00 \times 10$	0
Masak (M1)	$3,5 \times 10^2$	$< 1,00 \times 10$	0
Masak (M2)	$4,0 \times 10^2$	$< 1,00 \times 10$	0
Masak (M3)	$3,7 \times 10^2$	$2,00 \times 10^2$	0

Sementara itu, hasil pengujian Coliform menunjukkan nilai 0 MPN/g pada seluruh sampel. Hasil ini merupakan indikator yang sangat baik karena ketiadaan bakteri coliform menandakan tidak adanya pencemaran yang berasal dari air, tanah, maupun kotoran. Temuan ini sejalan dengan penelitian Reonanda *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa nilai coliform 0 MPN/g pada produk minuman buah menunjukkan kondisi higienis serta aman untuk dikonsumsi. Selain itu, hasil ini menunjukkan bahwa proses penanganan, pencucian, dan persiapan sampel telah dilakukan secara higienis dan sesuai dengan praktik kebersihan yang baik.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh sampel limau kasturi berada dalam kondisi mikrobiologis yang aman dan memuaskan. Meskipun terdapat sedikit peningkatan jumlah khamir dan kapang pada beberapa sampel, kondisi tersebut tidak memengaruhi keamanan maupun kualitas produk secara keseluruhan. Upaya perbaikan dapat dilakukan dengan memastikan pengendalian kelembapan, suhu, serta kebersihan lingkungan selama penyimpanan dan penanganan buah dilakukan dengan lebih optimal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa produk limau kasturi pada seluruh tingkat kematangan, yaitu hijau, setengah matang, dan matang, memenuhi standar keamanan mikrobiologi dan aman untuk dikonsumsi maupun diproses lebih lanjut.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat kematangan buah limau kasturi berpengaruh nyata terhadap karakteristik fisikokimia, aktivitas antioksidan, sifat sensori, dan mutu mikrobiologi serbuk yang dihasilkan melalui proses mini *spray drying*. Kadar air dan aktivitas air seluruh sampel *relative* rendah dan tidak berbeda nyata antar tingkat kematangan, yang menunjukkan bahwa proses pengeringan berlangsung efektif dan produk memiliki stabilitas penyimpanan yang baik. Namun demikian, warna serbuk dipengaruhi oleh tingkat kematangan buah, di mana buah matang menghasilkan serbuk dengan kecerahan tertinggi dan daya tarik visual yang lebih baik.

Dari aspek fungsional, serbuk yang dihasilkan dari buah hijau memiliki aktivitas antioksidan tertinggi serta kandungan flavonoid yang lebih tinggi dibandingkan buah setengah masak dan matang, meskipun kandungan total fenolik tertinggi ditemukan pada buah matang. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas aktivitas antioksidan lebih ditentukan oleh kualitas dan struktur senyawa bioaktif dibandingkan dengan jumlah total senyawa fenolik. Aktivitas antioksidan cenderung menurun seiring meningkatnya tingkat kematangan buah akibat degradasi senyawa bioaktif selama proses pematangan dan pengeringan.

Hasil uji sensori menunjukkan bahwa serbuk dari buah matang memiliki tingkat

penerimaan tertinggi oleh panelis pada seluruh atribut sensoris, terutama warna, aroma, dan penerimaan keseluruhan, sedangkan serbuk dari buah hijau memiliki tingkat kesukaan terendah. Dari sisi mikrobiologi, seluruh sampel serbuk limau kasturi memenuhi standar keamanan pangan dengan jumlah mikroba yang rendah, nilai khamir dan kapang dalam batas aman, serta tidak terdeteksi bakteri *coliform*. Dengan demikian, buah limau kasturi hijau lebih sesuai untuk pengembangan produk pangan fungsional kaya antioksidan, sedangkan buah matang lebih tepat digunakan untuk produk minuman serbuk instan yang menekankan mutu sensoris.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) dan *Malaysian Agricultural Research and Development Institute* (MARDI) dalam mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. M. A., El-Nour, M. E. A. M., & Yagi, S. M. (2018). Total phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity of ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) rhizome, callus and callus treated with some elicitors. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(2), 677–682. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.03.003>
- Baldelli, A., Pico, J., Woo, M. W., Castellarin, S., & Pratap-Singh, A. (2024). Spray dried powder of common fruit juices: Enhancement of main properties. *Powder Technology*, 441. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119560>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). *Food chemistry* (4th ed.). Cambridge, UK: Springer-Verlag.
- Blois, M. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181, 1199–1200. <http://dx.doi.org/10.1038/1811199a0>
- Cairone, F., Angiolella, L., Bertini, F., Iazzetti, A., Fabrizi, G., Petralito, S., Cesa, S., & Simonetti, G. (2025). Ripening-related changes in color and bioactive compounds of diospyros kaki: preliminary insights on its antifungal activity. *Foods*, 14(8), 1–18. <https://doi.org/10.3390/foods14081332>
- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C., Al-Rejaie, S., & Elmasry, G. (2023). Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products : a comprehensive overview. *Agronomy*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy13061580>
- Fellow, P. J. (2009). *Food processing technology: Principles and practice* (3rd ed.). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Jia, H., Ren, F., & Liu, H. (2025). Effects and improvements of storage conditions and processing on the bioaccessibility and bioavailability of phytochemicals in fruits and vegetables. *International Journal of Food Science and Technology*, 60(1), 1–16. <https://doi.org/10.1093/IJFOOD/vvae040>
- Kapoor, L., Simkin, A. J., Doss, C. G. P., & Siva, R. (2022). Fruit ripening : dynamics and integrated analysis of carotenoids and anthocyanins. *BMC Plant Biology*, 22(7), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03411-w>
- Kassa, M. G., & Teferi, D. A. (2024). Impact of ripening stages and drying techniques on the physicochemical and sensory attributes of apple mango chips. *Food Science WILEY*, 90(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17585>
- Kusumaningrum, D. (2014). *Kajian pengaruh suhu udara inlet dan konsentrasi maltodekstrin terhadap kualitas fisik bubuk jeruk nipis (Citrus aurantifolia) hasil pengeringan dengan spray dryer* [Skripsi]. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Leyva-porras, C., Saavedra-Leos, M. Z.,

- Lopez-Martinez, L. A., Espinosa-Solis, V., Teran-Figueroa, Y., Toxqui-Teran, A., & Compean Martinez, I. (2021). Strawberry juice powders : effect of spray-drying conditions on the microencapsulation of bioactive components and physicochemical properties. *Molecules*, 26(18). <https://doi.org/10.3390/molecules26185466>
- Lu, Y., & Foo, L. Y. (2000). Antioxidant and radical scavenging activities of polyphenols from apple pomace - vegetables. *Food Chemistry*, 68(1), 81–85. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00167-3)
- Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (2006). *Sensory evaluation techniques, Fourth Edition*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Moazzen, A., Oztinen, N., Ak-sakalli, E., & Kos, M. (2022). *Heliyon Structure-antiradical activity relationships of 25 natural antioxidant phenolic compounds from different classes*. 8(June). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10467>
- Pratama, A. G., Kristanty, R. E., & Tulandi, S. M. (2019). Analysis of total plate count and yeast and mould count on traditional medicines. *KnE Life Sciences*, 4(15), 11–13.
- Rajurkar, N. ., & Hande, S. . (2011). Estimation of phytochemical content and antioxidant activity of some selected traditional indian medicinal plants. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73, 146–151. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.91574>
- Reonanda, H., Hartati, F. K., Hariyani, N., & Sigit, B. S. (2024). Analysis of Escherichia coli and total plate count of red guava fruit juice. *Demeter: Journal of Farming and Agriculture*.
- Sharma, R., Chandra, N. P., & Seth, D. (2023). Optimization of spray-drying conditions using response surface methodology, physico-chemical characterization and shelf-life estimation of pineapple powder. *Sustainable Food Technology*, 1, 750–761. <https://doi.org/10.1039/d3fb00008g>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Suharyanto, S. (2009). Aktivitas air (aw) dan warna dendeng daging giling terkait cara pencucian (leaching) dan jenis daging yang berbeda. *Jurnal Sain Peternakan Indonesia*, 4(2), 113–120. <https://doi.org/10.31186/jspi.id.4.2.113-120>
- Triandini, I. G. A. A. H., & Wangiyana, I. G. A. S. (2022). Mini-review uji hedonik pada produk teh herbal hutan. *Jurnal Silva Samalas*, 5(1), 12–19. <https://doi.org/10.33394/jss.v5i2.5473>
- Vargas, V., Saldarriaga, S., Sanchez, F. S., Cuellar, L. N., & Paladines, G. M. (2024). Heliyon Effects of the spray-drying process using maltodextrin on bioactive compounds and antioxidant activity of the pulp of the tropical fruit açai (Euterpe oleracea Mart .). *Heliyon*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33544>
- Winarno, F. G. (2004). *Kimia pangan dan gizi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Xu, Y., Liu, Y., Li, W., Yang, C., Lin, Y., Wang, Y., Chen, C., Wan, C., Chen, J., & Gan, Z. (2022). The effects of bagging on color change and chemical composition in ‘ jinyan ’ kiwifruit (actinidia chinensis). *Horticulture*, 8(6), 478. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060478>
- Zhang, H., Pu, J., Wang, M., Wang, Y., Luo, X., & Deng, Q. (2022). Changes in phenolic compounds and antioxidant activity during development of ‘qiangcuili’ and ‘cuihongli’ fruit. *Foods*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/foods11203198>

Zhu, F., Wen, W., Cheng, Y., & Fernie, A. R. (2022). The metabolic changes that effect fruit quality during tomato fruit ripening. *Molecular Horticulture*, 2(2), 1–19.