

**PENILAIAN KESEGERAN BUAH MANGGA BERDASARKAN
PERUBAHAN DINAMIS KANDUNGAN ASAM SITRAT DAN GULA TERLARUT
MENGUNAKAN ANALISIS HPLC**

**Freshness Assessment of Manggo Fruits Based on Dynamics Changes in Citric Acid and Sugar
Content Using High Performance Liquid Chromatography (HPLC)**

Putri Wulandari Zainal^{1*}, Daimon Syukri¹, Irfan Suliansyah², Khandra Fahmy¹

¹ Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas

² Departemen Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas

Email: putriwulandariz87@gmail.com

ABSTRAK

Kesegaran merupakan parameter kualitas utama yang menentukan penerimaan konsumen serta derajat kehilangan pasca-panen pada buah mangga (*Mangifera indica* L.). Penentuan kesegaran mangga yang ada saat ini sebagian besar didasarkan pada sifat fisik dan kimia umum, yang seringkali tidak dapat mendeteksi dengan baik pembusukan biokimia selama periode penyimpanan. Tujuan artikel ini adalah untuk mendeteksi kesegaran mangga berdasarkan perubahan dinamis kadar asam sitrat dan kandungan gula terlarut. Buah yang sudah matang disimpan pada dua suhu berbeda, yaitu 25°C dan 10°C, di mana pengamatan kadar asam sitrat, sukrosa, glukosa, dan fruktosa dilakukan setiap hari selama lima hari. Data yang didapatkan dengan jelas memperlihatkan perbedaan pola pada kadar asam sitrat dan gula terlarut buah mangga yang disimpan disuhu 25°C dan 10°C. Pada suhu 25 °C, kadar asam sitrat turun tajam, sedangkan pada suhu 10 °C kadarnya relatif stabil. Peningkatan sukrosa dan penurunan glukosa lebih nyata pada suhu 25 °C dan 10 °C. Kadar fruktosa hanya sedikit lebih tinggi pada suhu 25 °C dibandingkan pada suhu 10 °C. Analisis statistik mengkonfirmasi bahwa suhu penyimpanan berpengaruh pada kadar asam sitrat dan komposisi gula. Perilaku terkoordinasi asam sitrat dan berbagai gula inilah yang menjadi ciri khas 'sidik jari kimia mangga, yang berarti kita dapat menggunakan kadar zat-zat ini sebagai ukuran kesegaran buah. Semakin tinggi suhu, semakin cepat perubahan metabolisme dan semakin kurang segar buahnya. Penyimpanan suhu rendah menjaga laju metabolisme tetap stabil dan menunda penurunan kualitas, namun tetap saja, kita dapat menggunakan kadar asam sitrat dan gula sebagai cara yang andal untuk mengukur kesegaran mangga.

Kata kunci: asam sitrat; kandungan gula; kesegaran mangga; suhu penyimpanan

ABSTRACT

Freshness is a major quality parameter that has a significant effect on the acceptance and subsequent post-storage loss of mangoes (*Mangifera indica* L.). The existing freshness determination of mangoes is based mainly on physical and bulk physicochemical properties, which often cannot detect biochemical decay during the storage period. The aim of the article is to explore the freshness of mangoes based on the dynamic changes of citric acid and soluble sugar contents. The mature mangoes were kept at two different temperatures, namely 25°C and 10°C, where observations for citric acid, sucrose, glucose, and fructose levels were carried out on a daily basis during five days. It's clear that 25 °C and 10 °C have very different effects on the levels of citric acid and sugar in the fruit. At 25 °C, the levels of citric acid fell sharply, whereas at 10 °C they remained relatively stable. The increase in sucrose and the decline in glucose were more marked at 25°C and 10 °C respectively. The level of fructose was only a little higher at 25°C than at 10°C. Statistical analysis confirmed that the storage temperature has an effect on citric acid levels and the composition of sugars. This coordinated behavior of citric acid and the different sugars is what characterizes the chemical fingerprint of mangoes, which means that we can use the levels of these substances as a measure the freshness of manggo. The higher the temperature, the faster the metabolic changes and the less fresh the fruit.

Keywords: citric acid; freshness of mangoes; soluble sugars; storage temperature

PENDAHULUAN

Mangga (*Mangifera indica* L.) merupakan buah tropis yang unggul dan produk hortikultura penting di Asia Tenggara karena memiliki sifat-sifat unik seperti rasa manis, aroma, dan kandungan nutrisi yang sangat disukai konsumen. Namun demikian, sifat klimakteriknya melibatkan reaksi fisiologis dan biokimia yang cepat setelah panen yang menyebabkan hilangnya kesegaran secara terus-menerus (Kader, 2008; Yahia, 2011). Kesegaran merupakan atribut penting untuk penerimaan, nilai, dan masa simpan produk, khususnya untuk komoditas tropis yang seringkali memiliki kondisi pengaturan suhu yang terbatas untuk penyimpanan.

Metode konvensional untuk mengevaluasi kesegaran buah mangga biasanya melibatkan atribut fisik dan fisikokimia seperti kekerasan, warna, total padatan terlarut, keasaman titrasi, dan atribut sensorik lainnya (Kader & Rolle, 2004; Nunes et al., 2007). Meskipun parameter tersebut sering digunakan sebagai gambaran kualitas secara umum, tetapi atribut tersebut belum tentu dapat mendeteksi perubahan biokimia yang mengakibatkan hilangnya kesegaran. Buah mangga seringkali tampak layak dikonsumsi meskipun terjadi perubahan metabolisme yang luas pada tingkat biokimia, sehingga kualitas produk dan potensi penyimpanan menurun akibat perubahan tersebut (Saltveit, 2016).

Dari sisi biokimia, asam organik dan gula terlarut memainkan peran penting dalam menilai kesegaran buah. Asam sitrat dikenal sebagai asam organik utama didalam buah mangga dan merupakan substrat kunci dalam siklus trikarboksilat (TCA). Selama penyimpanan, asam organik secara bertahap digunakan sebagai substrat dalam proses respirasi, sehingga penurunan keasaman terus berlanjut seiring dengan lamanya penyimpanan (Wills et al., 2007; Yahia, 2011). Sementara itu, gula terlarut seperti sukrosa, glukosa, dan fruktosa terus mengalami serangkaian konversi karena terjadinya hidrolisis pati dan penggunaan monosakarida sebagai sumber energi dalam proses respirasi (Yahia & Carrillo-Lopez, 2019).

Sebagian besar penelitian sebelumnya telah menggunakan indikator total gula, total padatan terlarut serta rasio gula dan asam untuk menggambarkan tingkat kematangan buah mangga (Wills et al., 2007; Kader, 2008; Yashoda et al., 2005; Yahia & Carrillo-Lopez, 2019). Namun secara keseluruhan, pendekatan metode tersebut belum mampu menangkap dinamika masing-masing gula secara spesifik dimana sukrosa, fruktosa dan glukosa memiliki peran metabolik yang berbeda selama penyimpanan dan pematangan buah. Misalnya, pemecahan sukrosa menjadi fruktosa dan glukosa dapat meningkat selama proses pematangan itu sendiri (Yashoda et al., 2005; Cordenunsi-Lysenko et al., 2019). Oleh karena itu, metode pengukuran berbasis analisis spesifik senyawa diperlukan untuk memahami mekanisme penurunan kesegaran secara lebih mendalam.

Kromatografi cair kinerja tinggi atau sering disebut *high performance liquid chromatography* (HPLC) digunakan untuk pengukuran akurat kandungan asam organik dan gula dalam buah. HPLC memungkinkan analisis simultan kadar asam sitrat, sukrosa, glukosa, dan fruktosa, yang membantu menjelaskan faktor-faktor penyebab hilangnya kesegaran buah selain data tentang sifat fisikokimia (Chinnici et al., 2005; Agius et al., 2018). Pemanfaatan HPLC dapat dijadikan sebagai salah satu keunggulan dalam analisis profil kimia untuk mengidentifikasi kesegaran buah mangga.

Suhu penyimpanan memainkan peran yang sangat penting dalam proses metabolisme yang terjadi pada mangga. Penyimpanan pada kondisi suhu ruangan biasanya memicu aktivitas metabolisme yang lebih tinggi, sedangkan penyimpanan pada suhu rendah dapat memperlambat proses metabolisme (Wills et al., 2007; Yahia, 2011). Namun, belum banyak penelitian yang melaporkan perubahan berbagai asam organik, gula, dan suhu yang berkaitan dengan identifikasi kesegaran, bukan hanya tingkat kematangan, selama penyimpanan. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mendeteksi kesegaran buah mangga berdasarkan dinamika profil senyawa asam sitrat dan gula larut pada kondisi penyimpanan 25 °C dan 10 °C. Keunikan penelitian ini terletak pada kemampuannya untuk memanfaatkan profil senyawa spesifik melalui HPLC untuk senyawa asam sitrat dan gula terlarut sebagai indikator kesegaran kimiawi individual. Dengan menggabungkan dinamika dan efek akibat suhu penyimpanan, penelitian ini mampu memberikan profil kesegaran berbasis kimia yang dapat mendeteksi penurunan kesegaran sebelum hilang.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Persiapan Penelitian

Buah mangga (*Mangifera indica* L., cv. Harum Manis) pada tingkat kematangan komersial diperoleh melalui saluran distribusi lokal. Kriteria untuk mendapatkan buah tersebut meliputi ukuran dan warna kulit yang seragam, tanpa kerusakan mekanis dan cacat yang terlihat, sesuai dengan pedoman praktik pengambilan sampel pasca panen (Kader & Rolle, 2004). Pengangkutan buah mangga ke laboratorium dilakukan dalam waktu 24 jam setelah panen buah.

B. Tahapan Penelitian

Buah mangga diletakkan secara merata ke dalam dua lingkungan penyimpanan yaitu pada suhu 25 °C untuk penyimpanan dalam kondisi suhu ruangan dan suhu 10 °C untuk penyimpanan pada suhu rendah. Analisis kimia dilakukan setiap hari selama 5 hari, dimulai dari hari ke-1 hingga hari ke-5. Terdapat delapan replikasi biologis untuk setiap perlakuan. Penyimpanan pada suhu 10 °C dianggap memperlambat metabolisme, tetapi tidak sampai pada titik terjadinya kerusakan akibat suhu dingin, sedangkan penyimpanan pada suhu 25 °C umum dilakukan di negara-negara tropis (Wills et al., 2007; Yahia, 2011).

Larutan standar seperti Citric acid monohydrate, D-(+)-Glucose anhydrous, D-(-)-Fructose, Sucrose disiapkan dari pemasok bersertifikat sebagai sumber standar analitik. Air suling (*destilated*) dan pelarut fase gerak seperti acetonitrile digunakan dalam semua analisis kromatografi. Hal ini untuk menjamin akurasi dan keandalan dalam pengukuran konsentrasi kromatografi (Skoog et al., 2014).

C. Parameter Pengukuran

1. Ekstraksi Asam Sitrat and Gula Terlarut

Ekstrak daging buah mangga dipisahkan dari kulit dan bijinya dengan cara diblender menggunakan blender laboratorium. Sejumlah berat ekstrak diekstraksi menggunakan air suling. Sentrifugasi ekstrak dilakukan pada suhu rendah untuk mengurangi aktivitas enzim yang mungkin terlibat selama ekstraksi. Supernatan yang diperoleh disaring melalui membran 0,45 µm untuk dilanjutkan pada analisis HPLC (Yahia et al., 2011).

2. Analisis Asam Sitrat

Kandungan asam sitrat dianalisis konsentrasinya menggunakan sistem kromatografi cair kinerja tinggi yang terdiri dari sistem deteksi UV. Proses pemisahan menggunakan kolom fase terbalik C18 dengan asam sulfat 0,01 N sebagai fase gerak. Kurva kalibrasi standar eksternal dengan koefisien korelasi nilai melebihi 0,99 digunakan untuk kuantifikasi analisis asam organik dalam buah-buahan seperti yang direkomendasikan (Scherer et al., 2012).

3. Analisis HPLC Gula Terlarut

Sukrosa, glukosa, dan fruktosa dianalisis pada platform HPLC yang sama yang dilengkapi dengan detektor indeks bias. Pemisahan dilakukan pada kolom karbohidrat/amino di bawah fase gerak asetoneitril:air. Kurva kalibrasi untuk kuantifikasi didasarkan pada metode standar eksternal yang telah digunakan untuk profil gula dalam buah-buahan oleh AOAC (2019).

D. Analisis Statistik

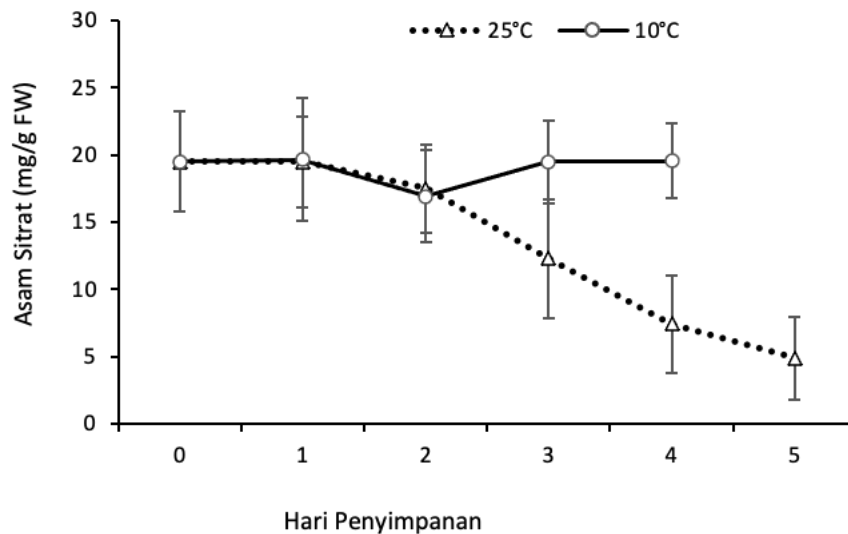
Hasil analisis statistik dinyatakan dalam nilai rata-rata dan simpangan baku. Interaksi antara suhu penyimpanan dan waktu penyimpanan terhadap komposisi kimia ditentukan menggunakan analisis varians (ANOVA) pada tingkat signifikansi $p < 0,05$ menggunakan software R Studio versi 4.5.2 (Montgomery, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perubahan Asam Sitrat selama Penyimpanan

Asam sitrat menunjukkan penurunan progresif selama penyimpanan untuk kedua suhu pengujian (Gambar 1), dengan penurunan yang lebih cepat pada 25 °C dibandingkan pada 10 °C. Penurunan kandungan asam sitrat yang stabil ini menunjukkan bahwa metabolisme asam organik sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan merupakan salah satu perubahan biologis pertama yang terjadi setelah

panen. Asam sitrat adalah asam organik utama dalam buah mangga, penurunannya merupakan indikator hilangnya kesegaran buah.



Gambar 1. Dinamika Perubahan Asam Sitrat pada Buah Mangga Selama Penyimpanan

Dari sudut pandang metabolisme, asam sitrat diketahui bertindak sebagai substrat utama yang terlibat dalam siklus asam trikarboksilat (TCA). Suhu penyimpanan yang lebih tinggi meningkatkan laju aktivitas enzim pernapasan. Oleh karena itu, aktivitas siklus TCA dan laju konsumsi cadangan asam organik meningkat (Wills et al., 2007; Saltveit, 2016). Pada gilirannya, laju degradasi asam sitrat yang cepat pada suhu penyimpanan 25°C menunjukkan peningkatan aktivitas pernapasan.

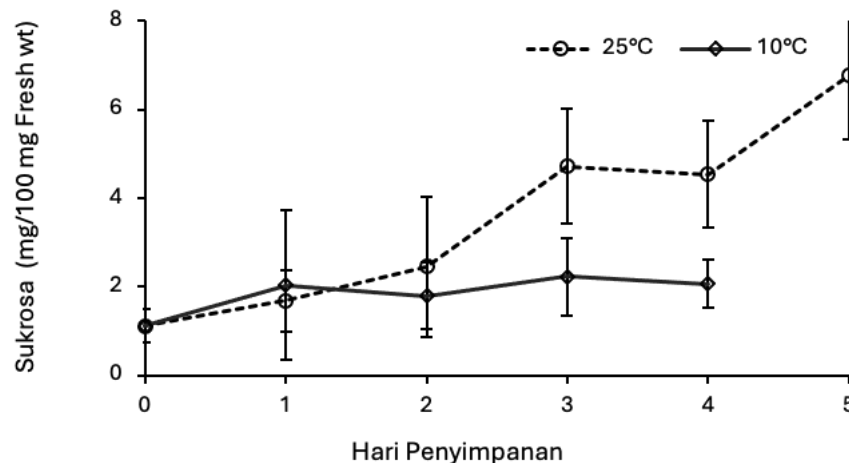
Selain signifikansinya sebagai substrat respirasi, asam sitrat juga berperan sebagai pengatur pH dalam sel dan homeostasis dalam sel. Penurunan bertahap kandungan asam sitrat mencerminkan pergeseran dari keadaan keseimbangan metabolisme yang teratur ke keadaan metabolisme penuaan, di mana respirasi pemeliharaan lebih dominan. Hal ini bertanggung jawab atas penurunan cepat jumlah asam organik yang dikeluarkan pada tahap awal penyimpanan, meskipun tidak ada perubahan yang signifikan dalam metabolisme karbohidrat (Yahia & Carrillo-Lopez, 2019).

Terlebih lagi, penurunan asam sitrat dapat diamati pada tahap awal penyimpanan, di mana pada saat itu masih sedikit perubahan pada kualitas yang terlihat seperti warna kulit atau kekenyalan. Namun, ini juga membuktikan poin penting mengenai penurunan kesegaran, yaitu bahwa degradasi kimia dimulai sebelum kualitas yang terlihat memburuk secara fisik. Asam organik merespons secara intens terhadap tekanan, yang menjadikan asam sitrat sebagai penanda yang sangat sensitif untuk kehilangan kesegaran dini (Kader, 2008). Pola kehilangan asam organik yang berkaitan dengan suhu seperti ini juga telah diamati pada mangga dan buah klimakterik lainnya, di mana penurunan kandungan asam sitrat terkait erat dengan proses penuaan daripada tahap kematangan itu sendiri (Yashoda et al., 2006; Yahia & Carrillo-Lopez, 2019). Secara keseluruhan, hasil-hasil ini memberikan dukungan kuat terhadap pandangan bahwa perubahan kandungan asam sitrat merupakan respons metabolisme dasar terhadap penuaan setelah panen. Kehilangan asam organik, yang menandai tahap awal hilangnya kesegaran, diikuti oleh perubahan metabolisme karbohidrat, yaitu pemecahan sukrosa, yang akan dibahas di bagian selanjutnya.

B. Kandungan Sukrosa

Kadar sukrosa meningkat seiring dengan peningkatan suhu penyimpanan, dengan peningkatan yang lebih tinggi pada suhu 25°C dan sedikit peningkatan pada mangga yang disimpan pada suhu 10°C (Gambar 2). Hasil ini berbeda dari asam sitrat dan menunjukkan perbedaan dalam kontrol metabolisme karbohidrat sebagai respons terhadap suhu penyimpanan

Peningkatan konsentrasi sukrosa pada 25°C mencerminkan redistribusi dan metabolisme karbohidrat yang dinamis, tidak hanya sekadar peningkatan rasa manis gula. Suhu yang lebih tinggi mempercepat laju metabolisme dan dapat mengubah keseimbangan metabolisme, sintesis, dan pemanfaatan sukrosa. Akumulasi sukrosa tersebut mencerminkan penyesuaian sementara metabolisme sukrosa selama fase penuaan awal karena karbohidrat dialokasikan kembali untuk memenuhi kebutuhan respirasi yang lebih tinggi (Medlicott & Thompson, 1985; Wills et al., 2007).



Gambar 2. Perubahan Kandungan Sukrosa Buah Mangga Setelah Panen

Pada suhu 10°C, konsentrasi sukrosa sedikit meningkat dan kemudian mencapai titik jenuh, yang merupakan indikasi pengaturan aktivitas metabolisme yang lebih ketat seiring bertambahnya usia produk. Aktivitas enzimatis yang rendah pada suhu yang lebih rendah menghambat pergantian sukrosa dan aktivitas lain yang tidak berkontribusi pada pemeliharaan stabilitas konsentrasi gula. Stabilitas tersebut tercermin dalam penuaan yang tertunda dan kesegaran saat produk didinginkan (Quinet et al., 2019).

Berkaitan dengan kesegaran, sukrosa berperan ganda karena tidak hanya berfungsi sebagai pemanis tetapi juga sebagai sumber karbon yang mudah dimanfaatkan untuk respirasi. Kecenderungan sukrosa pada tahap awal penyimpanan menunjukkan adanya transisi dalam metabolisme karbohidrat dari pemeliharaan kesegaran menuju produksi energi. Perubahan fisiologis ini juga terjadi pada buah-buah klimakterik lainnya yang masuk dalam tahap awal penuaan (Medlicott & Thompson, 1985; Wills et al., 2007; Saltveit, 2016; Sun et al., 2020).

Profil gula spesifik senyawa seperti sukrosa memberikan wawasan mekanistik tentang penurunan kesegaran dengan menguraikan dinamika karbohidrat individual daripada respons agregat. Seiring dengan berlangsungnya peningkatan sukrosa, perubahan terkoordinasi pada konsentrasi glukosa dan fruktosa mencerminkan keseimbangan antara hidrolisis sukrosa dan pemanfaatan monosakarida sebagai substrat respirasi. Fenomena ini menggambarkan suatu pola yang secara konsisten diamati pada mangga dan buah-buahan klimakterik lainnya selama penyimpanan pasca panen (Sivakumar et al., 2011; Osorio et al., 2013; Yahia, 2011).

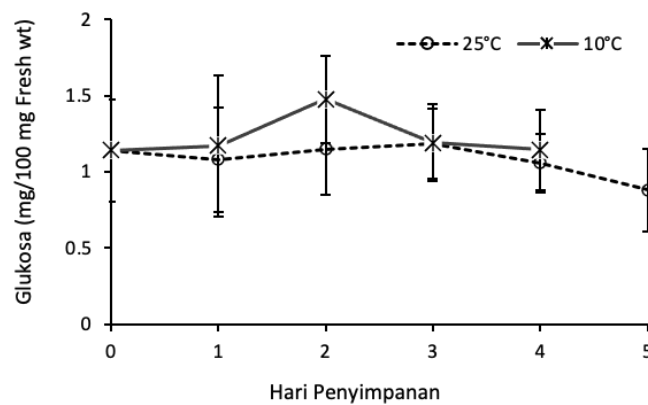
C. Kandungan Glukosa dan Fruktosa

Glukosa dan fruktosa memiliki karakteristik yang berbeda dengan sukrosa dimana hal ini menggambarkan perbedaan metabolisme karbohidrat pada proses pascapanen. Pada suhu 25°C, konsentrasi glukosa cenderung meningkat hingga akhir penyimpanan dan pada suhu 10°C sedikit meningkat pada hari kedua penyimpanan dan kemudian sedikit menurun dan stabil yang dapat dilihat pada Gambar 3a. Pola ini menunjukkan bahwa glukosa lebih diutamakan sebagai substrat respirasi yang mudah tersedia di bawah peningkatan kebutuhan metabolisme.

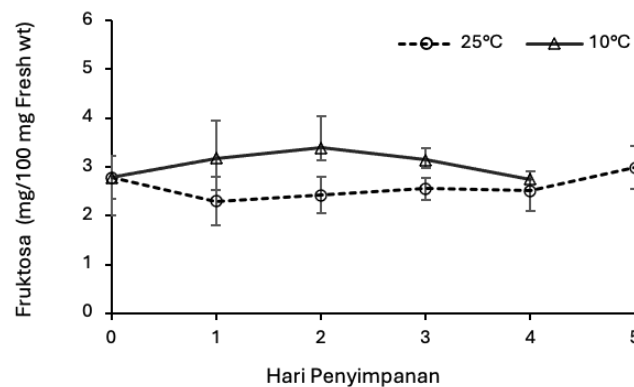
Penurunan glukosa yang cepat pada suhu 25 °C konsisten dengan peningkatan aktivitas respirasi pada suhu yang lebih tinggi, di mana monosakarida dikonsumsi dengan cepat untuk mempertahankan

produksi energi. Sebaliknya, peningkatan sementara glukosa pada suhu 10 °C kemungkinan mencerminkan hidrolisis sukrosa yang terbatas di bawah respirasi yang ditekan, dengan stabilisasi selanjutnya karena aktivitas metabolisme secara keseluruhan tetap rendah (Wills et al., 2007; Saltveit, 2016; Yahia & Carrillo-Lopez, 2019).

Fruktosa menunjukkan perubahan yang relatif moderat, dengan sedikit peningkatan pada suhu 25 °C dan sedikit penurunan pada suhu 10 °C (Gambar 3b). Perilaku asimetris ini relatif terhadap glukosa menunjukkan perbedaan jalur metabolisme dan efisiensi pemanfaatan antara kedua monosakarida tersebut. Glukosa umumnya lebih disukai dalam jalur respirasi, sedangkan fruktosa cenderung menunjukkan pergantian yang lebih lambat, terutama dalam kondisi fluks metabolisme yang tinggi (Cordenunsi-Lysenko et al., 2019; Quinet et al., 2019).



(a)



(b)

Gambar 3 Perubahan Kandungan (a) Fruktosa dan (b) Glukosa pada buah mangga

Fenomena perubahan ini dapat dinyatakan bahwa peningkatan sementara kadar glukosa dan fruktosa tidak dapat dianggap sebagai indikasi rasa manis pada buah mangga. Sebaliknya, perubahan ini menunjukkan peningkatan metabolisme yang berkaitan dengan kebutuhan respirasi yang terkait dengan penuaan. Tren kadar glukosa dan fruktosa ini sebelumnya telah dilaporkan untuk buah-buahan lain dalam fase klimakterik, misalnya, mangga, pisang, dan tomat, yang berkaitan dengan metabolisme monosakarida daripada sifat pemanisnya (Yashoda et al., 2006; Cordenunsi-Lysenko et al., 2019; Quinet et al., 2019).

Dalam hal ini, analisis spesifik senyawa glukosa dan fruktosa melalui HPLC jauh lebih informatif daripada metode yang mengukur total rasa manis. Oleh karena itu, dalam hal memantau awal perubahan metabolisme yang berkontribusi pada hilangnya kesegaran, kadar glukosa dan fruktosa yang diukur

dengan HPLC sangat penting dalam memantau status metabolisme pasca panen melalui aksi terintegrasi glukosa dan fruktosa sebagai indikator fungsi metabolisme.

D. Pengaruh Temperatur terhadap Kesegaran

Validasi tren dinamika asam sitrat dan kandungan gula yang telah dibahas pada bagian 4.1-4.3 yang bergantung pada suhu dapat dilihat pada Tabel 1 yang dianalisis menggunakan uji ANOVA dua arah dan diikuti dengan uji rentang berganda Duncan. Analisis ini mengungkapkan bahwa komposisi kimia buah mangga secara signifikan dipengaruhi oleh suhu penyimpanan ($p < 0,05$) dan bahwa peran suhu dalam metabolisme pasca panen buah tidak dapat diabaikan (Wills et al., 2007; Yahia, 2011).

Tabel 1. Profiling Kesegaran Buah Mangga Berdasarkan Kandungan Asam Sitrat, Sukrosa, Glukosa, Fruktosa Dan Total Gula

Suhu	Hari	Asam Sitrat	Sukrosa	Glukosa	Fruktosa	Total Gula
25 °C	1	19.47 ± 3.37 c	1.69 ± 0.70 a	1.08 ± 0.34 a	2.30 ± 0.49 a	5.07 ± 1.43 a
	2	18.51 ± 3.28 c	2.46 ± 1.58 a	1.15 ± 0.30 ab	2.42 ± 0.38 a	6.04 ± 12.03 a
	3	12.27 ± 4.42 b	4.72 ± 1.30 b	1.19 ± 0.23 ab	2.55 ± 0.22 a	8.46 ± 1.47 c
	4	7.44 ± 3.63 a	4.54 ± 1.20 b	1.06 ± 0.19 a	2.50 ± 0.41 a	8.11 ± 1.60 bc
	5	4.89 ± 3.07 a	6.77 ± 1.46 c	0.88 ± 0.27 a	2.99 ± 0.45	10.64 ± 1.61 d
10 °C	1	19.67 ± 4.58 c	2.03 ± 1.68 a	1.17 ± 0.47 ab	3.17 ± 0.77	6.38 ± 2.67 ab
	2	16.91 ± 3.43 c	1.79 ± 0.75 a	1.48 ± 0.29 b	3.39 ± 0.66	6.66 ± 1.55 ab
	3	19.51 ± 3.07 c	2.22 ± 0.88 a	1.19 ± 0.26 ab	3.14 ± 0.25	6.56 ± 1.01 ab
	4	19.57 ± 2.82 c	2.06 ± 0.55 a	1.15 ± 0.26 ab	2.74 ± 0.17	5.96 ± 0.66 a

Hasil dari uji Duncan mengungkapkan perbedaan yang nyata dan statistik pada nilai mangga pada suhu 25 °C dan 10 °C, khususnya pada asam sitrat dan glukosa. Hasil tersebut sesuai dengan sensitivitas tinggi kehilangan asam organik dan konsumsi glukosa terhadap suhu, karena peningkatan suhu meningkatkan respirasi dan metabolisme, yang sesuai dengan perubahan fisiologis yang diketahui pada buah klimakterik (Saltveit, 2016; Wills et al., 2007) ketika disimpan pada suhu yang lebih tinggi.

Perbedaan signifikan muncul dari uji rentang Duncan antara sampel mangga yang disimpan pada suhu 25 °C dan 10 °C dalam kasus asam sitrat dan glukosa dalam analisis yang dilakukan. Hal ini menguatkan sensitivitas metabolisme asam organik dan pemanfaatan monosakarida terhadap suhu pada angka yang diberikan. Buah klimakterik jelas menunjukkan peningkatan respirasi dan konsumsi substrat metabolik karena peningkatan suhu seperti yang disarankan oleh literatur yang lebih baru (Wills et al., 2007; Sun et al., 2020).

Sebaliknya, sukrosa dan fruktosa memiliki variabilitas yang relatif lebih rendah, namun tetap dipengaruhi suhu. Pola statistik pada karbohidrat ini konsisten dengan perputaran yang relatif lebih stabil atau lebih lambat pada suhu 10°C. Stabilisasi metabolisme karbohidrat yang diinduksi suhu telah dilaporkan pada buah-buahan tropis dan subtropis, di mana penyimpanan suhu rendah berfungsi untuk mengurangi laju aktivitas metabolik dan memperlambat proses penuaan (Sivakumar et al., 2011; Yahia, 2011).

Hasil analisis statistik, secara umum, mendukung interpretasi biokimia yang telah dibahas di atas, dan suhu penyimpanan memang merupakan faktor penting dalam mengatur dinamika kesegaran kimiawi buah mangga. Melalui verifikasi nilai metabolit yang diamati melalui uji ANOVA dan Duncan, analisis statistik ini memberikan dukungan kuat terhadap model sidik jari kesegaran kimiawi terintegrasi, yang akan dikembangkan di bagian selanjutnya (Pott et al., 2020).

E. *Fingerprint* Kesegaran

Perbedaan yang terlihat antara profil asam sitrat, sukrosa, glukosa, dan fruktosa mencerminkan ciri khas kesegaran kimiawi pada mangga. Senyawa-senyawa ini termasuk dalam kelas yang disebut metabolit primer yang artinya senyawa-senyawa ini diidentifikasi melalui penelitian ilmiah yang intensif dan telah digunakan atau dipecah dengan cara yang bermakna di dalam tumbuhan. Perbedaan

yang diakibatkan oleh respon terhadap lingkungan membentuk sidik jari kimia karakteristik untuk mangga selama penyimpanan. sidik jari karakteristik ini mencerminkan respon keseluruhan lingkungan terhadap regulasi metabolisme dari semua kelas senyawa organik dan kandungan gula.

Pada suhu 25 °C, tingkat kehilangan kesegaran ditentukan oleh penurunan tajam kandungan asam sitrat, penurunan tajam kandungan glukosa, sedikit peningkatan kandungan fruktosa, dan peningkatan tajam kandungan sukrosa. Penurunan tajam kandungan asam sitrat menunjukkan peningkatan metabolisme asam organik untuk proses respirasi, dan penurunan tajam kandungan glukosa menunjukkan pemanfaatan monosakarida yang mudah diakses secara preferensial. Peningkatan kadar sukrosa yang menyertainya menunjukkan adanya perubahan metabolisme karbohidrat selama stres, bukan peningkatan kualitas akibat perubahan komposisi kimia bahan nabati pada suhu 25 °C (Wills et al., 2007; Taiz et al., 2015; Saltveit, 2016; Yahia & Carrillo-Lopez, 2019).

Sebaliknya, mangga yang disimpan pada suhu 10 °C menunjukkan profil kimia yang sangat berbeda, yang merupakan karakteristik kondisi yang mendukung kesegaran. Konsentrasi asam sitrat berubah secara tidak signifikan, sukrosa sedikit meningkat kemudian stabil, konsentrasi glukosa meningkat sementara selama periode awal, sementara konsentrasi fruktosa cenderung menurun. Pola ini menunjukkan penghambatan metabolisme pernapasan, serta pengaturan metabolisme karbohidrat, selama penyimpanan pada suhu rendah. Tidak adanya perubahan konsentrasi asam organik yang mencolok, serta pengaturan konsentrasi gula, menunjukkan homeostasis metabolik, yang mengindikasikan kondisi yang mendukung penundaan penuaan atau retensi kesegaran (Sivakumar et al., 2011; Yahia, 2019).

Metabolit individual secara bersama-sama tidak memberikan representasi lengkap dari kompleksitas dinamika kesegaran yang terjadi selama penyimpanan. Sebaliknya, keadaan kesegaran dapat diekspresikan lebih akurat melalui dinamika gabungan asam organik dan gula. Kadar sukrosa pada suhu 25°C biasanya akan menunjukkan peningkatan rasa manis. Sebaliknya, dalam konteks penipisan asam sitrat dan penurunan kadar glukosa, hal ini lebih mencerminkan disfungsi metabolisme yang mengakibatkan hilangnya kesegaran.

Ciri khas kesegaran kimiawi yang dijelaskan dalam penelitian ini menggambarkan suatu kontinum dari pemeliharaan kesegaran hingga pembusukan, yang terutama dipengaruhi oleh suhu penyimpanan. Mangga segar menunjukkan kadar asam sitrat yang stabil, sukrosa yang teratur, dan monosakarida yang seimbang, sedangkan pembusukan disertai dengan penurunan asam organik, peningkatan glukosa, dan perubahan distribusi gula. Melalui proses biologis terintegrasi ini, profil HPLC telah terbukti sebagai prosedur yang efektif dan sangat mekanistik untuk mendeteksi kesegaran sebelum terjadinya penurunan kualitas (Pott et al., 2020).

KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan hasil yang baik dalam pengujian kesegaran buah mangga melalui analisis dinamika kandungan asam sitrat dan gula larut selama periode penyimpanan jangka pendek. Penurunan bertahap asam sitrat, serta perubahan nyata sukrosa, glukosa dan fruktosa, memberikan gambaran sekilas tentang proses penurunan kesegaran. Oleh karena itu, penggabungan dinamika asam sitrat dan zat terlarut gula dengan dampak suhu penyimpanan, memberikan pendekatan berbasis kimia yang kredibel untuk mendeteksi kesegaran mangga. Sidik jari yang diusulkan ini dapat bermanfaat untuk manajemen penyimpanan produk segar dan dapat diaplikasikan pada buah klimakterik lainnya dengan sifat metabolisme yang serupa.

DAFTAR PUSTAKA

- AOAC. (2019). *Official methods of analysis* (21st ed.). AOAC International.
- Agius, C., von Tucher, S., Poppenberger, B., & Rozhon, W. (2018). Quantification of sugars and organic acids in tomato fruits. *MethodsX*, 5, 537–550. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.014>
- Carrillo-Lopez, A., Ramirez-Bustamante, F., Valdez-Torres, J. B., Rojas-Villegas, R., & Yahia, E. M. (2000). Ripening and quality changes in mango fruit as influenced by storage temperature. *Journal of Food Quality*, 23(5), 479–492. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2000.tb00583.x>

- Chinnici, F., Spinabelli, U., Riponi, C., & Amati, A. (2005). Optimization of the determination of organic acids and sugars in fruit juices by ion-exclusion liquid chromatography. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(2–3), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.01.005>
- Cordenunsi-Lysenko, B. R., Nascimento, J. R. O., Castro-Alves, V. C., Purgatto, E., Fabi, J. P., & Peroni-Okyta, F. H. G. (2019). The starch is (not) just another brick in the wall: The primary metabolism of sugars during banana ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10, 391. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00391>
- Kader, A. A. (2008). Flavor quality of fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(11), 1863–1868. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3293>
- Kader, A. A., & Rolle, R. S. (2004). The role of postharvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce. *FAO Agricultural Services Bulletin No. 152*.
- Medlicott, A. P., & Thompson, A. K. (1985). Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 36(7), 561–566. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740360707>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.
- Nunes, M. C. N., & Emond, J. P. (2007). Relationship between weight loss and visual quality of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.08.007>
- Osorio, S., Scossa, F., & Fernie, A. R. (2013). Molecular regulation of fruit ripening. *Frontiers in Plant Science*, 4, 198. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00198>
- Pott, D. M., Osorio, S., & Vallarino, J. G. (2020). Metabolite changes during postharvest storage and associated quality deterioration. *Metabolites*, 10(5), 187. <https://doi.org/10.3390/metabo10050187>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., & Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Saltveit, M. E. (2016). Respiratory metabolism. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* (pp. 73–91). Elsevier.
- Scherer, R., Rybka, A. C. P., Ballus, C. A., Meinhardt, A. D., Teixeira Filho, J., & Godoy, H. T. (2012). Validation of a HPLC method for simultaneous determination of main organic acids in fruits and juices. *Food Chemistry*, 135(1), 150–154. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.111>
- Sivakumar, D., Jiang, Y., & Yahia, E. M. (2011). Maintaining mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality during the export chain. *Food Research International*, 44(5), 1254–1263. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.022>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principles of instrumental analysis* (6th ed.). Cengage Learning.
- Sun, L., Li, C., Zhu, J., Jiang, C., Li, Y., & Ge, Y. (2020). Influences of postharvest ATP treatment on storage quality and enzyme activity in sucrose metabolism of *Malus domestica*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.004>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Wills, R. B. H., McGlasson, W. B., Graham, D., & Joyce, D. (2007). *Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables* (5th ed.). UNSW Press.
- Yahia, E. M. (2011). *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*. Woodhead Publishing.
- Yahia, E. M., & Carrillo-Lopez, A. (2019). *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*. Woodhead Publishing.
- Yashoda, H. M., Prabha, T. N., & Tharanathan, R. N. (2005). Mango ripening—Chemical and structural characterization of pectic and hemicellulosic polysaccharides. *Carbohydrate Research*, 340(12), 2097–2105. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.03.004>